

MARCOS CALDEIRA RIBEIRO

EFICIENTIZAÇÃO E GERENCIAMENTO DO USO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R484e
2008

Ribeiro, Marcos Caldeira, 1955-
Eficientização e gerenciamento do uso de energia elétrica
em perímetros irrigados / Marcos Caldeira Ribeiro.
– Viçosa, MG, 2008.
xxi, 178f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Irrigação agrícola - Ibipeba (BA). 2. Irrigação agrícola
- Equipamentos e acessórios. 3. Energia elétrica. 4. Agricul-
tura familiar. 5. Desenvolvimento sustentável.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.7

MARCOS CALDEIRA RIBEIRO

EFICIENTIZAÇÃO E GERENCIAMENTO DO USO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 22 de fevereiro de 2008.

Prof. Antônio Alves Soares
(Co-Orientador)

Pesq. Wathney Hermsdorff

Prof. Expedito José Ferreira

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Prof. Delly Oliveira Filho
(Orientador)

À minha esposa Silvana
e aos nossos filhos
Larissa e Henrique.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu amor incondicional, que enviou seu Filho ao mundo para nos dar vida eterna para todos que nele crê (Jesus, em João 3, 16).

À minha querida esposa e aos seus pais, por saberem o significado da esperança, do amor, da dignidade e da fé.

Aos meus filhos, pela graça, pelo carinho e pela paz.

Aos meus queridos pais e aos meus irmãos, pela minha vida, pela minha formação e pela compreensão.

Ao Professor Delly Oliveira Filho, pela orientação, pela amizade e pelo incentivo.

Aos meus conselheiros Professores Antônio Alves Soares, José Helvecio Martins e Everardo Chartuni Mantovani, pelas sugestões.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Banco do Nordeste do Brasil – BNB, por meio do Fundo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Fundeci, por disponibilizar recursos para a realização da pesquisa.

Ao Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós – DIPIM, na pessoa do gerente Eng^o Agrônomo Paulo Henrique Santos de Araújo, pelas informações imprescindíveis ao desenvolvimento desta pesquisa.

À 2ª Superintendência Regional da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF – 2ª S.R., em especial ao Núcleo de Irecê, pelo apoio.

Ao meu amigo e colega de pesquisa Carlos Alberto Teixeira, pelos ensinamentos da humildade e pela dedicação.

Aos meus amigos e companheiros da área de Energia na Agricultura, pela união e pela auto-estima.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pela oportunidade dos conhecimentos adquiridos.

Com apreço, aos meus amigos e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo entusiasmo e pela dedicação, agilidade e competência em suas funções.

Aos meus colegas, amigos e irmãos em Cristo, pelo incentivo e pelo apoio para o meu sucesso.

Aos benfeitores desta Nação que acreditam no ensino, na pesquisa e nas entidades educacionais como prova de um futuro grandioso para os nossos filhos.

BIOGRAFIA

MARCOS CALDEIRA RIBEIRO, filho de Fenelon Ribeiro e Clarice Caldeira Ribeiro, nasceu no dia 6 de julho de 1955, em Patrocínio, Minas Gerais.

Em julho de 1985, formou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras – UFLA.

No período de janeiro de 1996 a janeiro de 1987, estagiou na 1ª Superintendência Regional da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF - 1ª S.R., em Montes Claros, Minas Gerais. Na região de Januária, ajudou, no Projeto Sertanejo, o desenvolvimento de trabalhos técnicos para dimensionamento da irrigação em pequenas propriedades rurais e na extensão rural.

No ano de 1987, foi classificado para fazer o curso de Especialização em Engenharia de Irrigação, do Programa Nacional de Irrigação – PRONI, Governo da Espanha e Universidade Federal de Brasília (UnB), em Brasília, Distrito Federal.

Em 1988, fez o curso de “Operacion, Mantenimiento y Administracion de los Sistemas de Conduccion de Água para Riego”, no Centro Internacional de Irrigação, em Utah State University, nos Estados Unidos, com visita técnica em perímetros irrigados nos Estados de Utah, Arizona e Califórnia.

Em 1994, especializou-se em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Minas Gerais – FEAMIG, em Belo Horizonte, Minas Gerais.

Em 1988, trabalhou no perímetro irrigado da Cooperativa do Médio São Francisco – COMESF, em Barreiras, Bahia; em 1989, na implantação de novas áreas irrigadas, nos perímetros irrigados de Pinheiro e São Bernardo, ambos no Maranhão, e Parnaíba, no Piauí; entre 1989 e 1992, no perímetro irrigado de Estreito, COOPERE, Espinosa, Minas Gerais; em 1997, no gerenciamento do perímetro irrigado de Pirapora, Minas Gerais, pela Associação dos Usuários do Perímetro Irrigado de Pirapora – AUPPI; nos anos de 1997 e 1998, como responsável pela implantação da operação e manutenção do perímetro irrigado de Mirorós, Ibipeba, Bahia; em 1999, como responsável pela implantação da operação e manutenção do perímetro irrigado de Guadalupe, Piauí; e em 2000, como gerente do perímetro irrigado de Formoso "A", Bom Jesus da Lapa, Bahia.

Participou da equipe de trabalho do convênio Universidade Federal de Viçosa (UFV), Banco do Nordeste do Brasil (BNB), pelo Fundo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNDECI), e Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós (DIPIM), intitulado “Redução do custo de produção na agricultura familiar visando à otimização de perímetros irrigados”, concluído em 2008.

Em junho de 2003, concluiu o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, intitulado “Estudo sobre a racionalização do uso de energia na irrigação”.

Em agosto de 2003, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, submetendo-se à defesa da tese em fevereiro de 2008.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REFERÊNCIAS.....	7
CAPÍTULO 1.....	9
TARIFA BINÔMIA PARA O CUSTO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS.....	9
RESUMO.....	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. Simulação da operação de perímetros irrigados.....	31
3.2. Medidas de gerenciamento e tarifas binômias.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Simulação da operação de perímetros irrigados.....	41
4.2. Medidas de gerenciamento e tarifas binômias.....	59
5. CONCLUSÃO.....	62

	Página
6. REFERÊNCIAS	64
CAPÍTULO 2.....	66
POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA BARRAGEM MANOEL NOVAES, IBIPEBA, BAHIA.....	66
RESUMO	66
1. INTRODUÇÃO.....	68
2. OBJETIVO	72
3. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM	73
4. POTENCIAL HIDROENERGÉTICO	78
5. UNIDADES GERADORAS.....	87
5.1. Equipamentos eletromecânicos	87
5.2. Seleção do tipo de turbina hidráulica	88
6. VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DA PCH EM MIRORÓS.....	92
7. CONCLUSÕES.....	100
8. REFERÊNCIAS	101
CAPÍTULO 3.....	103
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA NA UTILIZAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ CENTRAL	103
RESUMO	103
1. INTRODUÇÃO.....	104
2. OBJETIVOS.....	113
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	114
3.1. Modelo matemático.....	114
3.2. Protótipo.....	118
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	126
4.1. Modelamento matemático.....	126
4.2. Protótipo.....	130
5. CONCLUSÃO	141
6. AGRADECIMENTOS.....	143
7. REFERÊNCIAS	144

	Página
CAPÍTULO 4.....	147
GERENCIAMENTO DO USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA NO PERÍMETRO IRRIGADO DE MIRORÓS.....	147
RESUMO	147
1. INTRODUÇÃO.....	148
2. OBJETIVOS.....	151
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	152
3.1. Relação entre o número de horas de irrigação por dia e os gastos com energia elétrica.....	152
3.2. Uso da irrigação com incentivo tarifário noturno e de baixa pressão.....	153
3.3. Adequação tarifária – Estudo da escolha da demanda de contrato.....	155
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	157
4.1. Relação entre o número de horas de irrigação por dia e os gastos com energia elétrica.....	157
4.2. Uso da irrigação noturna e de baixa pressão.....	159
4.3. Estudo da adequação tarifária – Escolha da demanda contratada	166
5. CONCLUSÃO	171
6. REFERÊNCIAS	173
3. CONCLUSÃO GERAL	174
3.1. Tarificação binômica para consumo da água e pressão manométrica na tomada d'água	174
3.2. Aproveitamento energético da barragem.....	175
3.3. Utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central para economia de energia	176
3.4. Gerenciamento do uso de água e energia elétrica do perímetro irrigado de Mirorós.....	177

LISTA DE QUADROS

	Página
CAPÍTULO 1	
1. Tarifas médias de energia elétrica, por classe de consumo regional e para o Brasil, em (R\$ MWh ⁻¹), referentes a janeiro de 2007.....	13
2. Aspectos gerais a serem considerados na escolha do sistema de irrigação.....	16
3. Planilha de levantamento do custo da água por lote	23
4. Opções tarifárias do Grupo A.....	25
5. Descontos na tarifa de energia elétrica para irrigação em função do tipo de consumidor e das regiões do Brasil	28
6. Características hidráulicas das bombas 1, 2, 3 e 4 da EP1, segundo o fabricante KSB	38
7. Gastos de energia elétrica representados pelas situações de uso da irrigação em uma mesma lâmina d'água	43
8. Potência na rede de distribuição da EP1 do perímetro irrigado de Mirorós e a necessária no lote irrigado em uma mesma dotação de rega de 1,37 L s ⁻¹ ha ⁻¹	47
9. Simulação da demanda de potência a ser utilizada pelo irrigante	52

	Página
10. Cálculo da tarifa monômnia $k_{2\text{variável}}$ para o consumo de água e tarifa $k_{2\text{variável}}$ para o consumo de água e demanda de energia elétrica	54
11. Comparação entre o valor de cada irrigante da tarifa $k_{2\text{variável}}$ utilizando-se metodologia de tarifa monômnia e tarifa binômnia	55
12. Volume de água necessário por hectare, em metros cúbicos, em função do número de horas de funcionamento do sistema por dia.....	57
13. Potência mecânica útil (kW) para uma pressão de 30 mca, em função da lâmina de irrigação e das horas de funcionamento do sistema por dia	57
14. Potência mecânica útil (kW) para uma pressão de 20 mca, em relação à lâmina bruta de irrigação e horas de funcionamento do sistema por dia	58
15. Consumo de energia elétrica antes e depois da otimização dos conjuntos de bombeamento da EP1	59
16. Comparação de sistemas de irrigação por aspersão convencional e localizada	60
 CAPÍTULO 2	
1. Classificação de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH	69
2. Classificação das PCH quanto à potência e queda de projeto	70
3. Características da barragem Manoel Novaes	74
4. Disponibilidade hídrica da barragem Manoel Novaes	77
5. Água utilizada para irrigação em cada EP do perímetro irrigado de Mirorós.....	82
6. Velocidade admissível da água em condutos forçados em função do material empregado	91
7. Demanda de potência média mensal de energia elétrica de 2003 a 2005.....	94
8. Consumo médio mensal de energia elétrica das estações de pressurização do DIPIM de 2003 a 2005.....	95

	Página
9. Custos do aproveitamento hidrelétrico da barragem Manoel Novaes	96
10. Perfil de consumo e demanda média de energia elétrica do DIPIM.....	97
11. Plano de pagamento para quitação do empréstimo para pagamento da minicentral hidrelétrica	97
12. Resultado da análise econômica de vida útil da minicentral hidrelétrica do DIPIM	98
 CAPÍTULO 3	
1. Dados nominais do conjunto motobomba	119
2. Características dos emissores Senninger, modelo LDN, com vazões em galões por minuto e em metros cúbicos por hora.....	124
3. Dimensionamento do pivô central para diâmetro médio de alcance dos emissores de 6 m, para lâmina de irrigação de 4 mm dia ⁻¹	127
4. Lâmina de 4 mm dia ⁻¹ para dar uma volta em 24 h com VRP de 14,06 mca.....	127
5. Dimensionamento da linha de irrigação nas declividades de 20%, 10% e em nível, com o diâmetro interno da tubulação em PVC de 47,5 mm, vazão máxima de 9,53 L s ⁻¹ e altura manométrica na bomba de 34,86 mca	128
6. Pressões para diferentes declividades na linha de irrigação	130
7. Dados referentes à posição do protótipo do pivô na declividade de 20% e freqüências de 60 Hz a 30 Hz	132
8. Dados referentes à posição do protótipo do pivô na declividade de 10% para freqüências de 60 Hz a 30 Hz	133
9. Dados referentes à posição do protótipo do pivô em nível, nas freqüências de 60 Hz a 30 Hz	134
10. Potências elétricas para declividades de 20%, 10% e 0% e freqüências, em Hz, de 60, 55, 50, 45, 40, 35 e 30	138
11. Estimativa da potência elétrica demandada em função da declividade do pivô estudado	139

	Página
12. Consumo de energia elétrica em função da declividade.....	140
 CAPÍTULO 4	
1. Vazão utilizada nas estações de pressurização de água – EPs ...	153
2. Volume médio de água (m ³) bombeado de 2003 a 2005, no DIPIM.....	157
3. Tipos de tarifa horo-sazonal em função das horas do dia, aplicada à irrigação no DIPIM.....	158
4. Número de horas diárias de funcionamento para suprir a irrigação no DIPIM (médios mensais de 2003 a 2005).....	159
5. Gasto médio com energia elétrica em 2005, no DIPIM, nas cinco EPs com valores de tarifa atualizados.....	160
6. Potência demandada pelos conjuntos motobombas das EPs com a atuação do inversor de frequência sem otimização do número de horas de funcionamento	160
7. Número de horas de funcionamento indicado e os valores da tarifa horo-sazonal verde praticada em 2007 no DIPIM, nas cinco EPs.....	161
8. Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação em 2007 no DIPIM, nas cinco EPs	162
9. Número de horas de funcionamento otimizado para cada mês do ano no DIPIM, nas cinco EPs, de 2003 a 2005	163
10. Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento otimizado com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco EPs.....	163
11. Número de horas de funcionamento otimizado para cada mês do ano no DIPIM, nas cinco EPs, somente com sistemas de baixa pressão	165
12. Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento otimizado com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco EPs.....	165

	Página
13. Demanda de energia elétrica média do DIPIM de 2003 a 2005....	166
14. Adequação tarifária na EP1 do DIPIM	167
15. Adequação tarifária na EP2 do DIPIM	167
16. Adequação tarifária na EP3 do DIPIM	168
17. Adequação tarifária na EP4 do DIPIM	168
18. Adequação tarifária na EP5 do DIPIM	169
19. Síntese da escolha da demanda otimizada no DIPIM	170

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 1	
1. Curvas características de bombas hidráulicas e do sistema de bombeamento com variação da vazão	18
2. Charge de jornal da Índia.....	29
3. Comportamento das relações de vazão, altura manométrica, torque e potência com a variação de rotação.....	32
4. Representação diária de situações de uso da irrigação por três irrigantes com a aplicação da tarifa binômica.....	42
5. (i) Custo mensal de tarifa praticada e (ii) custo mensal da tarifa binômica proposta	45
6. Curva do sistema de bombeamento da EP1	48
CAPÍTULO 2	
1. Mapa de localização da bacia da barragem Manoel Novaes.....	74
2. Vista do vertedouro da barragem Manoel Novaes.....	75
3. Vista da torre de controle da barragem Manoel Novaes.....	75
4. Vista do reservatório da barragem Manoel Novaes	75
5. Nível da barragem Manoel Novaes no período de 1999 a 2007...	76

	Página
6. Permanência de queda no tempo	79
7. Características técnicas do conjunto turbina-gerador	79
8. Distribuição de quedas de projeto de uma usina hidrelétrica.....	80
9. Representação esquemática do perfil da barragem Manoel Novaes	81
10. Frequência das quedas de projetos da barragem Manoel Novaes	83
11. Curvas da vazão e da potência em função da altura de queda	84
12. Local de saída da água da barragem	85
13. Vista panorâmica a jusante da barragem	86
14. Seleção de turbinas aplicáveis a minicentraís hidrelétricas	89
 CAPÍTULO 3	
1. Métodos de controle de vazão em bombas centrífugas (dp = sensor de pressão diferencial).....	107
2. Uso da válvula de controle em conjunto motobomba	108
3. Uso do inversor de frequência em conjunto motobomba.....	108
4. Comportamento das relações de vazão, altura manométrica, torque e potência específica com a variação de rotação específica	109
5. Consumo de energia no controle da vazão em bombas centrífugas.....	110
6. Posicionamento, em alicive, da torre do pivô central com diferentes pressões e vazões em cada emissor.....	116
7. Esquematização da automação com controle de velocidade em função da diferença de pressão no início e fim da linha lateral	119
8. Instalação dos equipamentos motor e bomba do protótipo da linha de irrigação do pivô central	121
9. Equipamentos e conexões utilizados na construção do protótipo.	122

	Página
10. Instalação e funcionamento da linha de irrigação do protótipo de pivô central	123
11. Características das curvas da bomba utilizada no protótipo, para rotações de (a) 3.500 rpm e (b) 1.750 rpm	125
12. Curvas características da bomba Imbil, modelo INI, rotor de 139 mm, para rotações de 3.500 rpm e 1.750 rpm.....	128
13. Ajuste do manômetro (óleo) da marca AZUD, com escalas de 0–6 BAR (0–61 mca)	129
14. Ajuste do manômetro (óleo) da marca HOMIS, com escalas de 0–10 kgf/cm ² (0–100 mca).....	129
15. Ajuste do manômetro (seco) da marca SOMAR, com escala de 0–60 mca.....	130
16. Protótipo do pivô central	131
17. Relação entre vazão e altura manométrica (curva do sistema) para declividades de 20%, 10% e 0%, nas frequências, em Hz, de 60, 55, 50, 45, 40, 35 e 30.....	135
18. Pressão e vazão para diferentes frequências com declividade de 20%	136
19. Pressão e vazão para diferentes frequências com declividade de 10%	136
20. Pressão e vazão para diferentes frequências com declividade de 0%	137
 CAPÍTULO 4	
1. Fluxograma do gerenciamento de água e energia proposto para perímetro irrigado	154
2. Fluxograma da adequação tarifária aplicada ao DIPIM	154

RESUMO

RIBEIRO, Marcos Caldeira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2008. **Eficientização e gerenciamento do uso de energia elétrica em perímetros irrigados.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Co-Orientadores: Antônio Alves Soares, José Helvecio Martins e Everardo Chartuni Mantovani.

O desenvolvimento sustentável tem sido posto como novo paradigma para permitir a conservação dos recursos naturais e evitar crises de abastecimento para as futuras gerações. Racionalização do uso de energia e da água na agricultura irrigada é cada vez mais importante, tendo em vista as conjunturas nacional e internacional. O uso conflitivo de água e crises de abastecimento de energia têm-se tornado mais freqüentes, afetando o planejamento da produção agrícola. A agricultura familiar necessita de insumos e tecnologias para se tornar agente de promoção social. A irrigação de perímetros irrigados vem-se mostrando como uma opção de alavancagem da agricultura familiar, da qualidade de vida e do desenvolvimento regional. O governo tem participação ativa na implantação de perímetros irrigados, especialmente no Nordeste brasileiro. O objetivo desta tese foi estudar diferentes soluções de efficientização e gerenciamento do uso de água e energia em perímetros irrigados da agricultura familiar, tendo como estudo de caso o Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de

Mirorós, Ibipeba, BA. Os objetivos específicos foram: (i) estudar o uso de inversores de frequência como principal meio de automação em sistemas de irrigação do tipo pivô central, com a finalidade de racionalizar o uso de energia elétrica; (ii) estudar a viabilidade de as barragens para acumulação de água em perímetros irrigados serem, simultaneamente, geradoras de energia elétrica, contribuindo para maior atratividade econômica dos investimentos; (iii) propor diferentes possibilidades de gerenciamento do uso de energia em perímetros, como: horário de disponibilidade da irrigação, enquadramento tarifário e otimização das demandas de contrato de energia elétrica, entre outras; e (iv) propor a implantação de tarifas de água que considerem não somente o volume de água consumido, mas, também, a pressão manométrica de demanda por irrigante – tarifa binômica. Os principais resultados foram: (i) quanto ao uso de inversores de frequência, foi verificado o potencial de redução do consumo e demanda de energia elétrica, por meio de protótipo de pivô central; (ii) quanto à implantação de unidade geradora de energia elétrica, foi mostrada a possibilidade de redução da tarifa para os irrigantes na proporção da contribuição da unidade geradora; (iii) quanto às ações de gerenciamento propostas, pode-se afirmar que a administração do perímetro implantou uma série das ações propostas, resultando em menor custo da água e conseqüente aumento da competitividade econômica dos irrigantes; (iv) finalmente, os estudos da implantação de tarifa binômica para irrigantes da agricultura familiar de condomínios de irrigação mostraram-se: a) viabilidade econômica; b) liberdade de escolha de sistema de irrigação que convier ao irrigante; c) justifica melhor os custos da energia elétrica, pois taxa não só pelo consumo, mas também pela demanda de energia elétrica; e d) a necessidade de implantação apenas de medidor de pressão manométrica por lote. Os estudos apontaram que a efficientização de perímetros não somente é necessária como possível. Ressalta-se que algumas das medidas dependem de investimentos significativos, como o uso de inversores de frequência e implantação de central geradora de eletricidade, e outras mais do gerenciamento, como o caso das tarifas binômicas, enquadramento tarifário e otimização do número de horas de funcionamento.

ABSTRACT

RIBEIRO, Marcos Caldeira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2008. **Electrical energy management in irrigated perimeters.** Adviser: Delly Oliveira Filho. Co-Advisers: Antônio Alves Soares, José Helvecio Martins and Everardo Chartuni Mantovani.

Sustainable development has been perceived as a new paradigm allowing for natural resource conservation and supply crisis prevention for future generations. The rational use of energy and water in irrigated agriculture is becoming more important both nationally and internationally. Conflictive water use and energy supply shortages have become more frequent, affecting the planning of the agricultural production. Agricultural production on the familiar level requires inputs and technologies in order to become a social promotional agent. The watering of irrigated perimeters is an option to leverage: agricultural production on the familiar level, quality of life, and regional development. The government has actively participated in the implantation of irrigated perimeters, especially in the Brazilian Northeast. The objective of this thesis was to study different solutions for water use and energy management in irrigated perimeters for familiar agriculture, using the Mirorós Irrigation District in the Ibipeba, Bahia municipality as a case study. The specific objectives were (i) to study the use of frequency inverters for automation in central pivot irrigation systems with the purpose of rationalizing

the use of electric energy; (ii) to study the viability of irrigation dams to generate electrical energy, contributing to improve the economic investment's attractiveness; (iii) to propose different energy management possibilities in perimeters considering: available irrigation times, tariff framing and optimization of electric energy contract demands, among others; and (iv) to consider the implantation of water tariffs that not only consider the consumed volume of water, but also the pressure demanded by each consumer – dual tariff. The main results were: (i) when frequency inverters were used, the consumption and electrical energy demand was reduced as measured in the central pivot irrigation system prototype; (ii) regarding the implantation of an electric energy generation unit, the tariff reduction possibility for irrigators in the generation contribution proportion was shown; (iii) regarding the load management proposed, it was affirmed that the perimeter's administration already implanted a series of actions resulting in lower water costs and consequently better economics for the participants; and (iv) finally, the studies of the dual tariff implantation revealed: a) economic viability; b) free choice of irrigation systems for each participant; c) better description of electric energy costs, considering not only consumption, but also electric energy demand; d) need for a pressure measuring instrument for each participant. It was pointed out that some of the measures are dependent on significant investments as in the case of the use of frequency inverters and the implantation of the power plant, and others depend more on management, as in the case of the dual tariff, tariff framing and optimization of the total operational hours.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, o governo federal liberou recursos financeiros como forma de incentivar a agricultura familiar no Brasil. Várias linhas de crédito, com recursos vultosos, foram abertas com juros subsidiados, com os objetivos de fixar o homem no campo e iniciar uma ocupação sustentável de todo o território brasileiro, considerando-se as particularidades de cada região e de seus habitantes (MAD/SAF, 2007).

Os perímetros irrigados são áreas irrigadas divididas em lotes, em que os agricultores potencializam a produção e, conseqüentemente, promovem o crescimento econômico regional onde o Programa da Agricultura Familiar está presente. No Brasil, os perímetros irrigados, em implantação e implantados pelo governo federal, perfazem uma área irrigada de aproximadamente 300.000 ha, tendo como principal atividade a fruticultura (CODEVASF, 2004). Nesses perímetros, quando bem administrados, a agricultura familiar é sólida e rentável.

Um dos problemas dos perímetros irrigados brasileiros que usam água pressurizada é o alto custo do bombeamento. Nesse contexto, a racionalização do uso de energia e água é imprescindível na redução dos custos das tarifas de água e energia dos perímetros irrigados.

Em 1985, iniciou-se no Brasil o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (PROCEL), visando incentivar ações para o aumento da eficiência energética de equipamentos que consomem diretamente, ou não,

energia elétrica ou que poderiam ajudar a reduzir o consumo de eletricidade na matriz energética brasileira. Entre os equipamentos e tecnologias que têm sido objeto de ações visando ao uso eficiente de energia, citam-se: motores elétricos, bombas hidráulicas, inversores de frequência, programas computacionais (Mark IV; agribombas; SETMO; BD motores), lâmpadas fluorescentes compactas, reatores eletrônicos, refrigeradores eficientes e aparelhos de ar-condicionado eficientes, entre outros.

Em sintonia com o progresso tecnológico que foi proporcionado pelos programas de incentivo ao combate ao desperdício de energia elétrica do governo federal, deve-se também priorizar o gerenciamento do uso da água. Nas ações possíveis de gerenciamento, destacam-se: a aquisição, a substituição ou a adequação de equipamentos e a adequação de contratos de fornecimento de energia elétrica. Essas ações ajudam a reduzir os custos com energia elétrica.

Nos perímetros irrigados, vários fatores influenciam o valor da conta de energia elétrica, como: (i) tipo de sistema de irrigação de baixa, média ou alta pressão; (ii) uso de motores do tipo padrão ou do tipo alto rendimento; (iii) bombas hidráulicas com baixo ou alto rendimento; (iv) tipos de tarifa de energia elétrica horo-sazonal (verde e azul) ou convencional e tarifas com, ou sem, incentivo de irrigação noturna; (v) utilização, ou não, de inversores de frequência, (vi) tipo de cobrança adotado pela administração do perímetro irrigado na conta de água: (a) volume total de água consumido, (b) pressão média do sistema de irrigação e (c) horário de utilização da energia elétrica; e (vii) aproveitamento energético dos lagos de acumulação das barragens que fornecem água para os perímetros irrigados. Metas constantes a serem perseguidas por parte das administrações dos perímetros têm sido a utilização de sistemas que minimizem os gastos com energia elétrica e água, maximizando os lucros dos produtores rurais da agricultura irrigada.

O uso de inversores de frequência podem economizar energia pela redução na demanda de potência do conjunto motobomba de irrigação entre as diferenças no custo de energia entre a operação de rotação constante (nominal) e a operação da rotação reduzida. Tal diferença depende da redução de potência, do tempo de operação para rotação reduzida e do custo de energia elétrica (HANSON et al., 1996).

A economia proporcionada por projetos eficientes poderá influenciar o custo de implantação de perímetros irrigados, considerando-se que o custo da eletrificação rural pode ser até cinco vezes mais do que em sistemas urbanos similares (JUCÁ; RIBEIRO, 1998).

Demandas econômicas e pressões ambientais têm induzido o mundo a investir em soluções de uso eficiente de energia e no uso mais intenso de fontes renováveis de energia.

Entre essas demandas e pressões, destacam-se: (i) preço do barril de petróleo próximo de U\$100,00 (maior valor nominal desde a crise do petróleo de 1973); e (ii) maior conscientização da sociedade nacional e mundial. Dessa forma, têm-se buscado soluções que aliam o uso racional do ponto de vista econômico e do ponto de vista ambiental.

Implementar uma gestão energética eficiente em propriedades irrigadas significa implementar também medidas em vários setores da administração local. Nesse contexto, encontram-se as ações de redução do desperdício de energia elétrica. A filosofia das ações de uso racional da energia consiste na garantia da prestação de serviços de qualidade com o menor consumo possível, desde o dimensionamento do sistema até o manejo inteligente da irrigação.

A energia elétrica está presente em todos os setores da vida moderna. A humanidade, com o passar do tempo, está se tornando cada vez mais dependente da eletricidade. Assim, também está presente na composição dos custos das empresas, como descreveu Miguel (2003). No entanto, cada vez mais a aproximação maior do esgotamento dos recursos naturais e os impactos ambientais dificultam os aproveitamentos de geração de energia. No Brasil, as imensas distâncias dos grandes potenciais hidroelétricos e dos centros consumidores encarecem os investimentos em transmissão.

No horizonte de médio prazo, a maior de todas as fontes de energia para o futuro está na sua conservação, isto é, gerenciamento do lado da demanda, esclareceram Oliveira e Sá (1998). A eficiência no uso da eletricidade proporciona vários benefícios, como a redução dos custos e da probabilidade da falta de energia, o aumento da competitividade das

empresas e a redução da necessidade de investimentos e dos impactos ambientais (NADEL; GELLER, 2001).

A conservação da energia é o uso eficiente desta que, segundo Michaels (2002), significa reduzir as perdas numa instalação, otimizando os processos ou melhorando a tecnologia.

O gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) consiste no planejamento, implementação e acompanhamento de atividades ou estratégias que visam modificar a curva de carga dos consumidores. Isso pode ser realizado adotando-se tecnologias e processos mais eficientes e, também, por meios de técnicas de gerenciamento e fontes alternativas de energia. Existem dois tipos básicos de programas de GLD: aquele que possibilita o controle direto da carga do consumidor e o que procura mudar os hábitos de consumo por meio da divulgação, da educação ou do preço (CAMARGO, 1996).

Sistemas de irrigação são dinâmicos, ou seja, diversas áreas podem estar sendo irrigadas em diferentes momentos. Essa dinâmica, em geral, gera demanda de energia em potências variáveis com o tempo. Tais variações devem ser realizadas pelos equipamentos de bombeamento e ser otimizadas, visando ao uso eficiente. Essas compensações, no controle da pressão e vazão, serão amenizadas com o uso de válvulas reguladoras de vazão e pressão associadas com o controle de velocidade do conjunto motor e bomba com o uso de inversores de frequência, mudando, assim, o ponto de operação da curva do sistema com a interseção da nova curva da bomba (CAMPANA, 2000).

O uso do inversor de frequência envolve questões técnicas e econômicas do irrigante em melhorar a eficiência no manejo da irrigação. O irrigante, ao analisar a possibilidade de controlar o volume necessário a cada estágio da cultura, deverá decidir pelo controle do tempo ou intensidade de bombeamento (CARVALHO et al., 2000).

O conhecimento dos fatores que influenciam o consumo e demanda de energia na irrigação é fundamental para a racionalização do seu uso. A diferenciação nos custos finais do manejo da irrigação é, também, função do tipo de equipamento a ser utilizado como sistema de alta, média ou baixa

pressão. A pressão de trabalho e a pressão do sistema influenciam diretamente a eficiência do uso da energia no bombeamento para irrigação.

Estudos têm mostrado que a demanda de potência para o bombeamento de água para a irrigação pode variar de 0,2 a 1,9 kW ha⁻¹ (0,3 a 2,6 cv ha⁻¹). Essa variação é função do tipo de sistema de irrigação utilizado. Se for de maior pressão, a demanda de potência será maior. Marouelli e Silva (1998) relataram que o consumo médio de energia chegou a 0,4 kWh m⁻³ de água em sistemas de baixa pressão.

Esta tese, intitulada “Eficientização e Gerenciamento do Uso de Energia Elétrica em Perímetros Irrigados”, foi dividida em quatro capítulos: (i) Tarifa binômica para o custo da água em perímetros irrigados; (ii) Potencial de geração de energia elétrica na barragem Manoel Novaes, Ibipeba, Bahia; (iii) Análise de viabilidade técnica na utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central; e (iv) Gerenciamento e metodologia em perímetros irrigados.

Mostrou-se, no capítulo “Tarifa binômica para o custo da água em perímetros irrigados”, que a implantação de tarifas binômicas (pressão de trabalho e volume consumido de água) influencia o uso eficiente de energia elétrica.

No capítulo “Potencial de geração de energia elétrica na barragem Manoel Novaes, Ibipeba, Bahia”, mostra-se o potencial de aproveitamento energético de quedas de água de barragens de perímetros irrigados já construídas e que não possuem aproveitamento de geração de energia elétrica. Isso ajudaria a reduzir o custo de produção dos agricultores em perímetros irrigados.

No capítulo seguinte, “Análise de viabilidade técnica na utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central”, apresentam-se as relações entre um sistema manual e outro automatizado com inversor de frequência e suas vantagens e desvantagens no bombeamento e aspersão de água em sistemas de pivô central. Ressalta-se, aqui, que os perímetros irrigados com estações de bombeamento e os pivôs centrais possuem em comum o fato de uma única estação de bombeamento atender à demanda de água e pressão. Portanto, estudos do uso de inversor de frequência em sistemas de irrigação por pivô central

podem ser úteis no entendimento de perímetros irrigados, visando ao uso racional de energia, por utilizarem pontos distintos e variáveis de distribuição de água.

O capítulo “Gerenciamento do uso de água e energia elétrica no perímetro irrigado de Mirorós” aborda uma forma de gerenciamento utilizando o número de horas de irrigação variável por mês e as tarifas de energia elétrica que minimizam o gasto com eletricidade.

A contribuição científica deste trabalho abrange: (i) a área de planejamento de novos perímetros irrigados, (ii) inovação na cobrança da tarifa de água e na manutenção de perímetros irrigados na redução dos custos com a variação no número de horas de funcionamento mensal com a utilização de sistema de irrigação de baixa pressão automatizado; e (iii) aproveitamento de quedas de água já existentes em barragens de projetos de perímetros irrigados para geração de energia.

Ressalta-se que a tarifa binômica em condomínios de irrigação poderá (juntamente com campanhas de conscientização) contribuir para o uso racional de energia, ao mesmo tempo que permite aos usuários terem liberdade de escolha do sistema de irrigação que melhor lhes atendam. Assim, não somente a energia, mas o serviço que ela proporciona, passa a ser o principal objeto de atenção.

2. REFERÊNCIAS

CAMARGO, C. C. de B. **Gerenciamento pelo lado da demanda: metodologia para identificação de potencial de conservação de energia elétrica de consumidores residenciais**. Florianópolis: UFSC, 1996. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAMPANA, S. **Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação tipos pivô central e aspersão convencional**. Viçosa, MG: UFV, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CARVALHO, J. A.; MELLO, C. R. de ; BRAGA JÚNIOR, R. A.; REINATO, C. H.; SANTANA, M. J. de. Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, DEAg/UFPB, v. 4, n. 1, p. 51-56, 2000.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. A experiência de grandes setores usuários de água. In: **Seminário de recursos hídricos**. Brasília: BNDES/ANA/SRH-MMA, 2004.

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 179-182, may/jun. 1996.

JUCÁ, A. S.; RIBEIRO, F.S. A importância da norma técnica no custo da eletrificação rural. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: TEC ART, 1998. v.1, p. 678-682.

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. Brasília: EMBRAPA-CNPq, 1998. 15 p. (Circular Técnica da Embrapa Hortaliças, 11).

MDA/SAF – Ministério do Desenvolvimento Agrário/Secretaria da Agricultura Familiar. Disponível em:<www.mda.gov.br/saf>. Acesso em: mar. 2007.

MICHAELS, H. Efficiency for security. **Energy Markets Magazine**, section market opportunities, february 2002.

MIGUEL, M. **Modelos de gestão de auditoria energética para usinas hidrelétricas**: estudo de caso na Itaipu. Florianópolis, UFSC, 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NADEL, S.; GELLER, H. S. **Smart energy policies**: saving money and reducing pollutant emissions through greater energy efficiency. Washington, D.C.: ACEEE – American Council for an Energy-Efficient Economy, 2001.

OLIVEIRA, A. C. C.; SÁ JÚNIOR, J. C. de. **Uso eficiente da energia elétrica**. Recife: UFPE, 1998.

CAPÍTULO 1

TARIFA BINÔMIA PARA O CUSTO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

RESUMO

Em grandes empresas rurais de distribuição de água, ou distritos de irrigação, principalmente as que possuem redes de distribuição de água bombeada, a tarifa k2 de custo variável depende exclusivamente da razão da conta de energia elétrica pelo consumo de água em metros cúbicos por mês. Nesse caso, a água que chega ao irrigante terá pressão e vazão recomendadas de acordo com o tipo do sistema de irrigação. Segundo estudos realizados pela concessionária de energia elétrica de Minas Gerais – CEMIG, se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia elétrica seriam economizados. Desses 30% de energia elétrica, 20% são devidos à aplicação desnecessária da água e 10%, ao dimensionamento inadequado e ineficiência dos equipamentos empregados na irrigação. A proposição e estudo de tarifas de água que considerem a pressão ou demanda de potência hidráulica como fator determinante dos custos de água e não somente a quantidade de água entregue ao sistema de irrigação devem ser considerados. Um sistema de bombeamento coletivo pode favorecer um mau irrigante, prejudicando

aquele que deseja investir na irrigação racional, com maior eficiência. Em estudo preliminar, compararam-se três irrigantes com sistemas de irrigação de alta e baixa pressões, utilizando a mesma quantidade de água necessária para a planta. O resultado foram diferenças nos custos do consumo de energia elétrica, no irrigante entre 11% e 78% e no custo da água na implantação de tarifas binômias. Mostra-se, assim, que tarifas binômias podem contribuir para a maior racionalidade do uso dos recursos água e energia.

Palavras-chave: Tarifa de água, distribuição de água e perímetro irrigado.

1. INTRODUÇÃO

Em uma relação contratual de prestação de serviços entre duas pessoas estão o contratador e o contratado. O contratador solicita a execução de serviços, e o contratado executa o serviço. Nessa ordem, gerar-se-á uma ação passível para a construção de resultados.

A divisão racional dos custos de insumos como água e energia elétrica ajudam a estabelecer relações de confiança e transparência entre o contratado e o contratador. Essas são parcerias que favorecem uma dinâmica saudável no processo das classes da cadeia produtiva.

Algumas empresas, como de telefonia, de eletricidade, de transporte e de abastecimento de água, entre outras, estabelecem tarifas diferenciadas em função do tipo de uso, dos períodos do dia, da época do ano e da localização, em função da oferta e procura do bem (COSTA, 2001; OLIVEIRA FILHO et al., 2000; TANABE, 1998).

No caso do setor elétrico brasileiro, entre as décadas de 1970 e 1990 aplicava-se uma única tarifa de energia elétrica em todo o Brasil, e os consumidores dos diversos estados pagavam o mesmo valor pela energia consumida. Esse valor garantia a remuneração das concessionárias, independentemente de sua eficiência, e as empresas não lucrativas eram mantidas por aquelas que davam lucro. Essa modalidade de tarifa não incentivava as empresas a buscar eficiência, pois o custo era pago pelo consumidor. Por diversas razões (como o controle da inflação), a

remuneração mínima de uma série de concessionárias não era atingida, o que gerou um círculo vicioso, com inadimplência entre distribuidoras e geradoras e inadequação financeira que prejudicava, sensivelmente, o aumento da capacidade instalada do setor, ou seja, impedia novos investimentos. Nesse contexto, surgiu a Lei nº 8.631/1993, pela qual a tarifa passou a ser fixada por concessionária, conforme características específicas de cada área de concessão. E, em 1995, foi aprovada a Lei nº 8.987, que garantiu o equilíbrio econômico-financeiro às concessões de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2007).

A água para ser explorada tem de ser conduzida até o local determinado para que se possa usufruir dos benefícios que, potencialmente, ela pode prover. Para o seu uso final, seja o urbano, o industrial ou o rural, algumas obras serão necessárias para se chegar ao destino previamente definido. Nas tarifas urbanas de água, o consumidor paga pelo abastecimento de água registrado (onde estão incluídos os custos de investimentos, energia, manutenção e pessoal, entre outros) e pelo esgotamento sanitário, que é lançado para fora do seu estabelecimento em redes de coleta. Para a tarifa de água em perímetros de irrigação, o valor quantitativo da água é aquele que passa pelo registrador, computando-se o seu volume durante um período de tempo.

Deve-se buscar maior racionalidade do uso de recursos tão fundamentais como energia e água. Essa racionalidade ajudará a empresa alcançar o objetivo maior: desenvolvimento sustentável. Incentivos a regiões com maiores carências de infra-estrutura técnica e industrial têm sido dados por meio, inclusive, de tarifas e benefícios fiscais, a fim de amenizar as distorções de crescimento. A título de exemplo, apresentam-se as diferenciações de tarifas nas regiões do Brasil, conforme mostrado no Quadro 1.

O processo de distribuição de água é um fator preponderante e pode proporcionar melhor eficiência no sistema de abastecimento e, como consequência principal, na redução de tarifa.

Quadro 1 – Tarifas médias de energia elétrica, por classe de consumo regional e para o Brasil, em (R\$ MWh⁻¹), referentes a janeiro de 2007

Classe de Consumo	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
Residencial	292,90	274,92	306,89	282,07	301,54	296,43
Industrial	219,96	206,01	221,73	200,85	214,07	213,50
Comercial	292,05	288,89	275,79	254,25	279,09	275,23
Rural	216,03	168,84	209,89	145,59	214,51	175,08
Poder público	312,16	316,56	288,28	279,07	285,54	295,63
Iluminação pública	165,98	171,59	172,17	146,88	164,59	166,70
Serviço público	188,37	178,36	197,06	181,60	182,35	188,86
Consumo próprio	288,13	300,99	301,02	246,04	292,04	292,75
Tarifa média total	265,10	248,26	266,19	224,72	262,05	254,50

Fonte: ANEEL, 2007.

Na composição da tarifa de água em áreas de distribuição para irrigação, principalmente, são previstos gastos com pessoal, manutenção da infra-estrutura (como a condução de água em canais ou tubulações, drenos, estações de bombeamento e outros), despesas com administração, energia elétrica e investimentos futuros. Nesse caso, sobretudo quando envolvem administração empresarial, será necessário separar o que é custo fixo e custo variável, gerando, assim, uma tarifa com duas componentes, em que a primeira é, em geral, função da área irrigável e a segunda, função do volume de água consumido.

Em grandes empresas rurais de distribuição de água, ou distritos de irrigação, principalmente, as que possuem redes de distribuição de água bombeada, a tarifa de custo variável depende, exclusivamente, do quanto de energia se gasta para conduzir o volume de água a ser utilizado. Nesse caso, a água que chega ao irrigante terá pressão e vazão recomendadas em função do tipo de sistema de irrigação.

O manejo racional da irrigação consiste na aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento certo. Por não adotar um método de controle da irrigação, o produtor rural usualmente irriga em excesso, temendo que a cultura sofra estresse hídrico, o que pode comprometer a produção. Esse excesso tem como consequência o

desperdício de energia e de água usadas em um bombeamento desnecessário (LIMA et al., 1999; SOUZA, 2001; SILVA JÚNIOR, 2005).

Se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia elétrica seriam economizados. Dos 30% de energia elétrica, a fração de 20% é devida à aplicação desnecessária da água e 10% ao redimensionamento e otimização dos equipamentos demandados na irrigação (CEMIG, 1993). Em vista desse resultado, Lima et al. (1999) ressaltaram que o manejo adequado da irrigação pode vir a ser excedente ao país na ordem de 6,755 bilhões de metros cúbicos por ano de água e em torno de 2.336 GWh por ano de energia elétrica, ou seja, 533 MW de potência (supondo fator de carga de 50%), reduzindo as pressões desses dois recursos fundamentais ao país e ao meio ambiente.

O conhecimento da eficiência de cada método de irrigação pode definir a escolha do sistema a ser implantado que melhor adaptar à realidade local. O conceito de eficiência de irrigação pode ser descrito como a relação entre a quantidade de água requerida pela planta e a quantidade total aplicada pelo sistema de irrigação.

Os perímetros irrigados, por serem áreas de uso de tecnologia avançada, são indutores de várias outras atividades industriais e comerciais, promovendo a dinamização da economia, circulando riquezas e gerando empregos. Cavalcanti e Da Costa (1998) consideraram a relação entre o número de empregos indiretos e diretos em perímetro irrigados de 1,86 emprego. Valdes et al. (2004) verificaram que há variações entre perímetros irrigados e que a demanda por mão-de-obra varia de 0,2 ha⁻¹ na rizicultura a 0,7 ha⁻¹ na bananicultura, chegando a 2,5 ha⁻¹ na viticultura. Nessas variações entre os perímetros irrigados, estima-se a geração, em média, de 0,95 emprego direto por hectare. Calcula-se que a agricultura em perímetros públicos de irrigação seja responsável por 0,8 milhão de empregos diretos e indiretos.

Podem-se considerar três tipos básicos de sistemas de irrigação: irrigação por superfície, irrigação por aspersão e irrigação localizada.

No método de irrigação por superfície, a distribuição da água se dá por gravidade, por meio da superfície do solo. Algumas considerações podem ser apresentadas, como o consumo de grande quantidade de água,

limitações de topografia, baixos investimentos inicial e operacional, baixo consumo de energia (quando bombeado) e exigência de sistema de distribuição de água coletivo rigoroso.

No método de irrigação por aspersão, a água é aspergida, ou espalhada, por meio de emissores em forma de chuva sobre as plantas. Os métodos de irrigação por aspersão utilizam a água sob pressão (bombeada). São conjuntos de tubos, aspersores e conexões distribuídas na área irrigada de funcionando fixo ou em movimento como o autopropelido, o pivô central e o linear. Algumas considerações podem ser citadas, como: (i) adaptado a diferentes condições de solo e topografia; (ii) a eficiência de irrigação pode ser maior com baixo consumo de água, em comparação com a irrigação por superfície; (iii) facilidade de automação; e (iv) possibilidade de ser transferido para outras áreas. As limitações podem ser: (i) os altos custos de implantação e operação em relação à irrigação por superfície; e (ii) a influência das condições climáticas.

No método da irrigação localizada, a água é, em geral, aplicada por baixo das copas das plantas, permitindo, assim, um direcionamento localizado com emissores de baixa pressão do tipo gotejador (vazão inferior a 12 L h^{-1}) e microaspersor. Como é um método de baixa pressão e de emissores de pequenos orifícios, requer filtros para um bom funcionamento. A grande vantagem desse método é que a área molhada varia de 20% a 80% da área total, possibilitando maior economia de água e energia. O seu custo inicial é alto, por ser um método pontual, mas permite automação total e requer pouca mão-de-obra.

Na escolha de um sistema de irrigação devem ser consideradas as suas características de funcionamento, bem como o seu custo. No Quadro 2, apresentam-se algumas considerações quanto à escolha do sistema de irrigação.

Quadro 2 – Aspectos gerais a serem considerados na escolha do sistema de irrigação

Sistemas de Irrigação	Volume de Água Requerido ($L s^{-1} ha^{-1}$)			Consumo de Energia Elétrica ($kWh m^{-3}$)			Eficiência do Sistema (%)		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Superfície			> 1	< 0,3			< 75		
Aspersão		0,6 – 1				0,2–0,6		60–85	
Localizada	< 0,7				0,1–0,4				> 80

Fonte: ANA, 2002; MAROUELLI; SILVA, 1998.

De acordo com o Quadro 2, podem-se fazer as seguintes observações:

- (i) No sistema de irrigação por superfície, normalmente o custo de implantação do sistema é baixo. Esse sistema é próprio para qualquer cultura, porém o volume de água requerido em geral é mais alto, comparando-se com a convencional, ocorrendo, assim, baixa eficiência de irrigação, que pode variar de 40% a 75%. A velocidade de infiltração ideal da água no solo tende a ficar em torno de média a baixa. Esse sistema de irrigação é recomendado para solos não muito arenosos. Como o sistema é implantado em superfícies de baixa declividade e o sistema de bombeamento é de baixa pressão e, às vezes, abaixo do nível da água como represas e açudes, o consumo de energia tende a ser baixo e requer alta demanda de mão-de-obra.
- (ii) Os sistemas de irrigação por aspersão podem ser do tipo portátil, permanente ou mecanizado. Em um sistema tipo portátil, o custo inicial é abaixo do custo do tipo permanente, que consiste na movimentação de linhas de irrigação a cada período de tempo, e também abaixo do custo do mecanizado (exemplo: pivô central e autopropelido), que requer maior infraestrutura. Para justificar o investimento do alto custo inicial de implantação, o valor econômico da cultura deverá ser alto. O volume de água consumida e a eficiência do sistema, compreendidos entre 60% e 85%, tendem a ser superiores ao do sistema de superfície e inferiores ao do sistema localizado, o que é mais propício para terrenos com maior declividade do que a irrigação por superfície. Permitem o uso de plantio adensado e demandam

menor mão-de-obra em comparação com o sistema de superfície. Como o sistema normalmente funciona com o uso de média pressão, o consumo e demanda de energia podem ser altos, se comparados com os da irrigação localizada.

- (iii) Em regiões onde há conflito do uso da água, o sistema de irrigação localizada como o gotejamento e a microaspersão está, aos poucos, substituindo aqueles de baixa eficiência de irrigação. É um sistema pressurizado que utiliza baixa pressão para o seu funcionamento, o que, também, contribui para um menor consumo de energia. Seu custo inicial é alto, podendo ser utilizado em qualquer tipo de solo ou declividade agricultável. Por ter boa eficiência de irrigação, entre 80% e 95%, demanda volume de água e consumo de energia menores do que os sistemas de irrigação por aspersão.

O uso de irrigação de baixa pressão utilizado em sistemas de irrigação por gotejamento consome menos energia e água em relação àquela de alta pressão. Portanto, a proposição e estudo de tarifas de água que considerem a pressão e, ou, a demanda de potência hidráulica como fator determinante dos custos de água, e não somente a quantidade de água entregue ao sistema, devem ser considerados.

Uma das razões da maior demanda por irrigação reside na maior produtividade e lucratividade da agricultura irrigada em relação à de sequeiro. Mas, apesar dessa maior lucratividade e produtividade, é fato também que muitos recorrem à irrigação sem se preocupar com o consumo de energia e de água.

Na maioria dos perímetros irrigados, tem-se o bombeamento de água em estações centrais comumente chamadas de estações de bombeamento ou estações de pressurização. Já a aplicação de água nas parcelas, ou lotes agrícolas, é feita por meio de sistemas de média (convencional) ou de baixa pressão (localizadas). Se houvesse tarifas de água que diferenciassem os custos de água em função, também, da pressão de fornecimento e não somente da quantidade de água utilizada, certamente os usuários iriam considerar a pressão de serviço como parâmetro importante na tomada de decisão quanto ao sistema de irrigação a ser utilizado.

A administração de um perímetro irrigado tem por objetivo fornecer água aos irrigantes em seus lotes e cobrar pelo serviço. Uma parcela dessa

cobrança pode ser aplicada na modernização do sistema de distribuição de água em equipamentos mais eficientes, proporcionando, assim, menor gasto com a energia elétrica.

Os distritos de irrigação que têm sistemas pressurizados tendem a fornecer água para irrigação com livre demanda. No final de cada mês, o volume total de água consumida é rateado entre os irrigantes conforme o volume demandado por lote. Os perímetros irrigados, que são projetados com sistemas de irrigação por aspersão convencional, são concebidos para funcionar com pressão adequada e alimentar uma série de irrigantes a partir de determinada estação de bombeamento. Há irrigantes que utilizam a pressão original do projeto e outros que usam pressões menores, o que é permitido. Aqueles que trabalham com pressões menores estão colaborando para uma mudança na curva do sistema projetado, contribuindo para a redução no consumo de energia elétrica. No entanto, no sistema tarifário atual eles não recebem incentivo algum por estarem consumindo menos energia.

A Figura 1 contém: (i) um conjunto de curvas das bombas CB_1 , CB_2 e CB_3 , em função da rotação; e (ii) um conjunto de curvas do sistema de irrigação CS_1 , CS_2 e CS_3 , em função das vazões e perdas de carga consideradas, especialmente na tubulação.

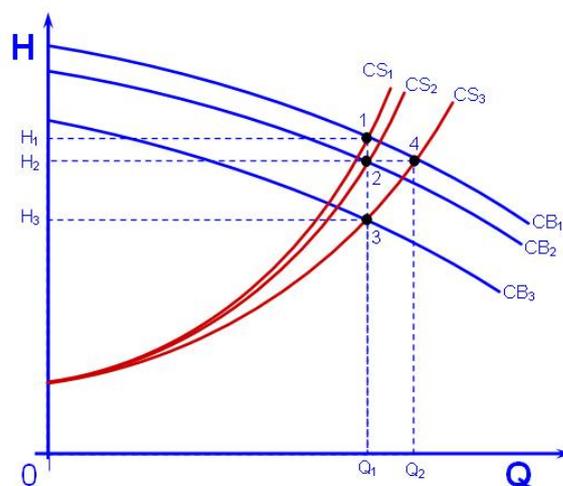


Figura 1 – Curvas características de bombas hidráulicas e do sistema de bombeamento com variação da vazão.

A interseção da curva da bomba (CB) e da curva do sistema (CS) corresponde ao ponto de operação da bomba (Figura 1). A demanda de potência é proporcional ao retângulo formado pelos vértices opostos com a interseção da curva da bomba com a curva do sistema, pontos 1, 2, 3 e 4 e a origem. Com a variação da vazão e da pressão, a curva do sistema muda e, assim, também mudam a potência demandada e o rendimento da bomba. O mesmo acontece com a curva desta, que, com a variação da rotação, pode-se adequar melhor o funcionamento conforme a demanda. O ponto de operação 1 é a interseção da curva do sistema 1 (CS_1) com a curva da bomba 1 (CB_1) e representa o projeto técnico inicialmente proposto, e os demais pontos, como ajustes durante a operação de bombeamento, servem para analisar o comportamento do sistema em operação. O ponto de operação 4 (CS_3 com CB_1) significa que a bomba aumentará a vazão com redução da pressão. Supõe-se, nesse caso, que a potência requerida pela bomba aumentará e, conseqüentemente, haverá maior consumo de energia elétrica. Mantendo a vazão inicial Q_1 com pressão H_2 , a interseção será o ponto de operação 2, que proporcionará redução na potência da bomba. Essas variações na curva da bomba podem ser ajustadas por meio de inversores de frequência que controlam a frequência de alimentação dos motores e das bombas.

Os irrigantes de um mesmo sistema de bombeamento para distribuição de água para irrigação que queiram investir na mudança de sistemas de baixa pressão poderão ser beneficiados quando incentivados com tarifa diferenciada. Não somente porque os sistemas de baixa pressão em geral são mais automatizados do que os de alta pressão, mas, também, porque requerem menores pressões manométricas e, conseqüentemente, menores potências elétricas para funcionamento.

Em perímetros de irrigação, ou irrigação coletiva, ou condomínios de irrigação, cada tomada de água para irrigação apresenta demanda da quantidade necessária de água e pressão para que o sistema de irrigação do lote entre em operação. Essa estrutura de perímetros oferece liberdade, pois os irrigantes podem escolher o método de irrigação, e tem características sociais e econômicas que visam ao desenvolvimento local e regional.

O uso das válvulas reguladoras de pressão (VRP) permite ajustar a vazão para a pressão desejada. A VRP pode ser eficiente do ponto de vista de regular a pressão, mas ineficiente do ponto de vista de dissipar energia. Essa dissipação pode ser mais bem trabalhada por meio da alteração da curva da bomba que, para adequá-la à demanda e à instalação de sistema de variação de vazão, a rotação nominal da bomba pode ser alterada por equipamentos específicos, como o inversor de frequência, ajustando-se o ponto de operação com a mínima demanda de potência. Nesse caso, alguns benefícios da redução de pressão podem ser descritos: (i) redução na lâmina de água de irrigação, devido à possibilidade de uso de sistemas mais eficientes; (ii) diminuição de ocorrências de vazamentos; (iii) estabelecimento da continuidade proporcional no abastecimento, garantindo a adequação da irrigação; e (iv) tarifa de energia elétrica reduzida.

As vazões outorgadas de água para sistema de irrigação determinam a escolha de sistemas, bem como a sua utilização. Otimizar sistemas de irrigação com vazão prefixada permite melhor distribuição de água em toda a área irrigada e maximiza a utilização de equipamentos. A mudança de sistemas de irrigação de alta para baixa pressão permite: (i) redução na vazão, (ii) queda no consumo de energia e (iii) melhora na eficiência da irrigação. As conseqüências das mudanças são a economia de recursos hídricos e recursos energéticos. Tais recursos hídricos economizados poderão ser utilizados para ampliar a área de irrigação.

Caracterização de tarifas de água e de energia elétrica praticadas em perímetros irrigados

Os custos contidos no cálculo da tarifa de água em perímetros públicos de irrigação são taxados de acordo com dois tipos de tarifa: k1 e k2.

A tarifa k1 corresponde ao investimento inicial do governo aplicado em obras de infra-estrutura de todo o complexo do perímetro. A tarifa k2 se refere a duas modalidades: a tarifa fixa ($k_{2\text{fixo}}$) e a tarifa variável ($k_{2\text{variável}}$).

Conforme o Manual de Operação de Projetos de Irrigação (EFFERTZ et al., 1993), os componentes dos custos da administração, operação e

manutenção dos perímetros irrigados, k2, são os custos: (i) de pessoal, (ii) de manutenção de todas as obras, (iii) operacionais, (iv) de energia elétrica e (v) dos investimentos necessários à operação e manutenção.

A tarifa $k2_{\text{variável}}$ é aquela que varia a cada período de medição (dia, mês ou ano), de acordo com o consumo de água. No caso de sistemas bombeados, o valor da conta de energia elétrica será rateado entre os irrigantes que se beneficiaram da irrigação no período. A conta de energia elétrica possui duas componentes principais, que são a demanda em kW e o consumo em kWh. O consumo específico de energia elétrica pode ser previsto conforme dados técnicos de altura manométrica (H_{man}) por metro cúbico de água (m^3). O consumo de energia elétrica por metro cúbico pode ser estimado utilizando-se a equação 1.1a.

$$C_E = \left(\frac{H_{\text{man}} Q}{367,2 \eta_B \eta_M} \right) \frac{n}{V} \quad (1.1a)$$

em que:

- C_E = consumo específico de energia elétrica, kWh m^{-3} ;
- H_{man} = altura manométrica, mca;
- Q = vazão, m^3h^{-1} ;
- n = número de horas de utilização, h;
- η_B = rendimento da bomba, decimal;
- η_M = rendimento do motor, decimal; e
- V = volume de água bombeado, m^3 ; e
- 367,2 = fator de conversão de unidades ($3,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1} * 1,36 \text{ cv} * 75$).

O desenvolvimento da equação 1.1a é descrita pelas equações 1.1 bcd.

$$P_H = \rho g H Q \quad (1.1b)$$

$$P_{\text{el}} = \frac{P_H}{\eta_B \eta_M} = \frac{\rho g H Q}{\eta_B \eta_M} \quad (1.1c)$$

$$C_E = \frac{P_{el} t}{V} = \frac{P_{el} t}{Q t} = \frac{\frac{\rho g H Q}{\eta_B \eta_M} t}{Q t} = \frac{\rho g H}{\eta_B \eta_M} \quad (1.1d)$$

em que:

- P_H = potência hidráulica;
- ρ = densidade da água, 1.000 kg m^{-3} ;
- g = aceleração da gravidade, $9,81 \text{ m s}^{-2}$;
- H = altura manométrica, m;
- Q = vazão, m^3s^{-1} ;
- P_{el} = potência elétrica;
- η_B = rendimento da bomba, em decimal;
- η_M = rendimento do motor, em decimal;
- C_E = consumo de energia elétrica;
- t = tempo, s; e
- V = volume, m^3 .

O $k_{2\text{fixo}}$ é a soma de todas as despesas com manutenção, veículos e pessoal dividida pela área total do perímetro irrigado. A manutenção de estações de bombeamento, às vezes, é transferida para $k_{2\text{variável}}$. O $k_{2\text{variável}}$ é composto pelo custo da energia elétrica mais o custo das manutenções das estações de bombeamento (EB) dividido pelo volume utilizado do ano anterior pelos irrigantes, conforme apresentado na equação 1.2.

$$k_{2\text{variável}} = \frac{(d_{EE} + M_{EB})}{(12 D_i A_i)} \quad (1.2)$$

em que:

- $k_{2\text{variável}}$ = tarifa aplicada ao consumo de água bombeada, $\text{R\$ m}^{-3}$;
- d_{EE} = despesas com energia elétrica, $\text{R\$ ano}^{-1}$;
- M_{EB} = custo de manutenção das estações de bombeamento, $\text{R\$ ano}^{-1}$;
- D_i = dotação de irrigação, $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$;
- A_i = área irrigada, ha; e
- 12 = número de meses no ano.

No Quadro 3, representa-se o cabeçalho da planilha em que é feito o cálculo para cobrança da tarifa k2.

Quadro 3 – Planilha de levantamento do custo da água por lote

Número do Lote	Usuário irrigante	Hidrômetro (m ³)		Consumo (m ³)	Área (ha)	K2 Fixo		K2 Variável		Total K2
		Leitura Anterior	Leitura Atual			(R\$/ha)	subtotal (R\$)	(R\$/1000m ³)	subtotal (R\$)	R\$

Tarifas binômias de energia elétrica

As tarifas binômias de energia elétrica são constituídas por dois fatores, que representam o investimento (R\$ kW⁻¹ no mês) e a operação (R\$ kWh⁻¹ no mês), podendo ser estimada pela equação 1.3.

$$G_{EE} = t_D D_{EE} + t_C C_{EE} \quad (1.3)$$

em que:

G_{EE} = gasto com energia elétrica, R\$ mês⁻¹;

t_D = tarifa de demanda, R\$ kW⁻¹;

t_C = tarifa de consumo, R\$ kWh⁻¹;

D_{EE} = demanda de energia elétrica, kW mês⁻¹; e

C_{EE} = consumo de energia elétrica, kWh mês⁻¹.

A curva de carga típica do sistema elétrico brasileiro indica que a maior demanda por energia elétrica ocorre no horário geralmente compreendido entre 17 h e 22 h. O sistema tarifário em vigor no Brasil, aplicável à maioria dos consumidores, pode ser classificado em convencional e horo-sazonal (THS). Visando adequar a oferta de energia à solicitação de carga do sistema elétrico, foi concebida a estrutura tarifária horo-sazonal (tarifas azul e verde), de modo a oferecer tarifas a preços diferenciados, de acordo com o horário do dia (ponta e fora de ponta) e períodos do ano (úmido e seco). Essa estrutura tarifária tem como objetivo a prorrogação da necessidade de ampliação do sistema elétrico nacional

(CEMIG, 1988). Os consumidores de energia elétrica que se enquadram no sistema horo-sazonal de tarifas podem ser taxados pelo consumo e, ou, pela demanda de energia elétrica.

Para efeito tarifário, denomina-se horário de ponta o período de três horas consecutivas, definido nas 24 horas do dia, geralmente compreendidas entre 17 h e 22 h. O sistema tarifário determina cobranças de tarifas diferenciadas em períodos seco e úmido. Denomina-se período seco aquele período do ano compreendido entre maio e novembro e período úmido, o intervalo do ano entre dezembro e abril. Buscando ajustar as curvas de oferta e demanda de eletricidade, cobra-se uma taxa, em média, 5% mais cara durante o período seco. No horário de ponta, a tarifa é cerca de 200% mais cara do que no horário fora de ponta para demanda e cerca de 130% mais cara para o consumo na tarifa azul. No caso da tarifa verde, a tarifa no horário de ponta sofre o referido acréscimo apenas para o consumo de energia elétrica e não para demanda (CEMIG,1988). Na modalidade tarifária THS verde, contrata-se uma única demanda, enquanto na modalidade tarifária THS azul se contratam duas demandas: uma para o horário de ponta e outra para o fora de ponta.

Caso o consumidor tenha registrado demanda superior a 10% da que ele contratou, é cobrada a tarifa de ultrapassagem, assim denominada a demanda de energia utilizada por determinado consumidor, além da que foi contratada.

Para a estrutura tarifária, conforme Resolução 456, de 29/11/2000, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os consumidores são divididos em dois grupos (A e B), de acordo com a potência instalada (CEMIG, 2001).

No grupo A estão incluídos os consumidores da classe industrial/comercial atendidos em tensão de fornecimento igual ou superior a 2.300 V. A esses consumidores é aplicada a tarifa binômica, ou seja, tarifas de demanda de potência e de consumo são cobradas de acordo com o contrato de fornecimento.

No grupo B estão incluídos os consumidores atendidos em tensão de fornecimento inferior a 2.300 V. A esses consumidores é aplicada apenas a

tarifa monômnia convencional, ou seja, é cobrado apenas o consumo de energia elétrica em kWh/mês.

No grupo A, dependendo da tensão de fornecimento e da demanda de potência, os consumidores dispõem de três opções tarifárias: (i) tarifa convencional, (ii) tarifa horo-sazonal verde e (iii) tarifa horo-sazonal azul. No Quadro 4, indicam-se essas opções.

Quadro 4 – Opções tarifárias do Grupo A

Características do Consumidor	Tarifa
Tensão \geq 69 kV e qualquer demanda	Azul
Tensão < 69 kV e demanda \geq 300 kW	Azul ou verde
Tensão < 69 kV e 50 kW < demanda < 300 kW	Azul, verde ou convencional

Fonte: CEMIG, 2001.

A tarifa convencional contempla os consumidores atendidos com tensão menor que 69 kV e demanda entre 50 kW e 300 kW.

A tarifa azul atinge três tipos de consumidores:

- (i) Os que são atendidos com tensão menor que 69 kV e demanda entre 50 kW e 300 kW, com critério de aplicação opcional.
- (ii) Os que são atendidos com tensão menor que 69 kV e demanda igual ou superior a 300 kW, podendo optar pela tarifa verde.
- (iii) Os que são atendidos com tensão igual ou superior a 69 kW e qualquer demanda de energia elétrica, com critério de aplicação compulsória.

A tarifa verde contempla os consumidores atendidos com tensão menor que 69 kV e demanda igual ou superior a 300 kW.

Legislação

A Lei de Irrigação (Lei Nº 6.662, de 25 de junho de 1979) e sua regulamentação indicam que o ressarcimento dos investimentos e dos

custos de operação e manutenção dos projetos de irrigação implantados com apoio do governo deverá ser feito por meio das tarifas de água cobradas dos irrigantes. Essas tarifas incluem um componente relativo ao volume consumido, para cobrir os custos de operação e manutenção; e um componente em função da área, para propiciar o retorno dos investimentos públicos em obras de uso comum (EFFERTZ et al., 1993).

Mudança de paradigma

A Lei nº 9.433 – LEI DAS ÁGUAS, Art. 19, estabelece que a água é um bem econômico e seu uso, uma indicação de seu real valor, bem como incentiva a sua racionalização (BRASIL, 1997).

Nos perímetros irrigados, em que o sistema de distribuição de água possa ser pressurizado, é recomendável que, além da cobrança da água, que se cobre uma taxa referente ao custo da pressurização. Com isso, o irrigante que trabalhar com um sistema de irrigação de alta pressão pagará mais que aquele que trabalhar com um sistema de baixa pressão. Logicamente que ocorrerão custos para substituir um sistema de aspersão convencional, de média pressão, por um sistema de irrigação localizada de baixa pressão. A utilização da tarifa diferenciada em relação à pressão demandada induzirá o irrigante a ter motivação para fazer a substituição. Essa substituição proporcionará ao irrigante menor tarifa, e, conseqüentemente, a diferença financiará o novo sistema e aumentará a rentabilidade da atividade econômica do irrigante e do perímetro como um todo.

Tanabe (1998), Oliveira Filho et al. (1999) e Costa (2001) propuseram tarifas de energia elétrica em função do tipo de uso final. Essas tarifas podem induzir os consumidores a racionalizar o uso da energia. As tarifas tipo de uso propostas são funções inversamente proporcionais do rendimento calculado a partir do segundo princípio da termodinâmica, ou seja, rendimento exergético. O segundo princípio analisa as transformações energéticas, incluindo o potencial da energia em produzir trabalho, considerado a forma mais nobre de energia. Já o primeiro princípio da termodinâmica só analisa as quantidades de energia envolvidas. Por isso, o

primeiro princípio é também chamado de princípio da conservação da energia e o segundo, de princípio da análise da degradação da energia.

Tarifa noturna para a irrigação

Para incentivar o uso de energia durante o período noturno, a fim de reduzir a demanda no horário de ponta, foram criados descontos para os produtores que utilizarem seus sistemas de irrigação à noite. Com isso, muitos projetos foram elaborados para usufruir desse benefício.

A partir de outubro de 2002, os produtores passaram a ter 2,5 h a mais de tarifa reduzida, graças à decisão aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que alterou o horário para aplicação de descontos na tarifa de irrigação das 23 h às 5 h, no período compreendido entre 21h30 e 6 h do dia seguinte (ANEEL, 2002).

Ribeiro (2003) analisou o processo de adequação das bombas ao novo horário, em que a indicação de bombas para a mesma altura manométrica e com vazão inferior, adequando a lâmina d'água de irrigação, proporcionou racionalização do uso da energia. A adequação do dimensionamento de bombas hidráulicas e de motores elétricos acarretou diminuição de gastos previstos com energia elétrica de até 35%.

No Quadro 5, apresentam-se as regiões do país com os respectivos descontos na tarifa de energia para irrigação. 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, havendo nas regiões menos desenvolvidas um subsídio maior na tarifa de irrigação.

Além dos benefícios tarifários, existem vantagens técnicas em se irrigar à noite, visto que, em geral, as condições climáticas são mais favoráveis, com menor probabilidade de vento, insolação inexistente, temperatura mais baixa e umidade relativa do ar mais elevada.

Quadro 5 – Descontos na tarifa de energia elétrica para irrigação em função do tipo de consumidor e das regiões do Brasil

Regiões do País	Grupo A (Alta Tensão) %	Grupo B (Baixa Tensão) %
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: ANEEL, 2002.

Tarifa de irrigação binômia – questão prática

Para incentivar o baixo consumo de energia para o bombeamento de água, pode-se aplicar uma tarifa de irrigação binômia, em que o irrigante que contribuir para um sistema de irrigação eficiente receberá desconto tarifário.

A motivação deste estudo foi investigar formas de incentivar maior eficiência na irrigação em projetos comunitários de irrigação.

Financiamento

A possibilidade de financiamento de novas tecnologias e formas para a melhoria da eficiência na irrigação foi um dos focos do 3º Fórum Mundial da Água em Kyoto, Japão, em março de 2003. Durante o evento, estudos projetaram para a agricultura irrigada um crescimento em torno de 15% a 20% nos próximos 30 anos, atendendo à demanda por mais alimentos de uma população projetada em 8 bilhões de pessoas, além de responder à demanda econômica por produtos agrícolas de maior valor agregado.

A Figura 2 ilustra uma reflexão no setor da agricultura irrigada, em que se pode justificar que os financiamentos para irrigação estão mais disponíveis, os lucros são previsíveis e o aumento na produção de alimentos é superior ao de sequeiro.



Figura 2 – Charge de jornal da Índia.

Acredita-se que o uso de tarifas inteligentes de água em perímetros irrigados venha melhorar a eficiência do uso dos recursos água e energia elétrica. A proposição de tarifas de água em função não somente do consumo verificado de água, mas também da pressão de serviço necessária ao lote, pode favorecer aqueles irrigantes que realmente proporcionam eficiência na irrigação.

2. OBJETIVOS

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo geral de propor tarifa binômia para a água em perímetros irrigados.

Os objetivos específicos foram:

- ✓ Simular a operação de perímetros para diferentes tipos de sistemas de irrigação quanto às características hidráulicas, elétricas e de gastos com energia para tarifa binômia.
- ✓ Avaliar os impactos técnicos e econômicos de medidas de gerenciamento incluindo tarifas binômias em perímetros de irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado nos Laboratórios de Energia e de Hidráulica, pertencentes à área de Energia na Agricultura e à área de Recursos Hídricos e Ambientais, respectivamente, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, e de informações técnicas fornecidas pelo Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós – DIPIM, Ibipeba, Bahia.

Foram desenvolvidos neste trabalho a simulação da operação de perímetros irrigados envolvendo simulação hidráulica, potência hidráulica na tomada de água de cada lote, curva do sistema de bombeamento, rendimento total ou global (η_0) na associação de bombas em paralelo, simulação econômica e curva de carga no bombeamento, além de medidas de gerenciamento e tarifas binômias.

3.1. Simulação da operação de perímetros irrigados

Os dados referentes à pressão e volume de água consumido foram estudados com o objetivo de atingir melhor adequação tarifária.

- Simulação hidráulica

Com o conhecimento das pressões e vazões para cada tomada d'água, pôde-se utilizar a metodologia aplicada ao estudo do consumo e da demanda de energia elétrica.

As curvas características das bombas da Estação de Pressurização de Água 1 (EP1) foram estudadas, a fim de avaliar o seu comportamento no campo, simulando possibilidades reais, em que a vazão e a pressão foram variadas. Usaram-se as leis de afinidades, ou relações de Rateau, e o comportamento da velocidade de rotação de uma bomba centrífuga. Na Figura 3, apresentam-se essas curvas, utilizando as leis de afinidades.

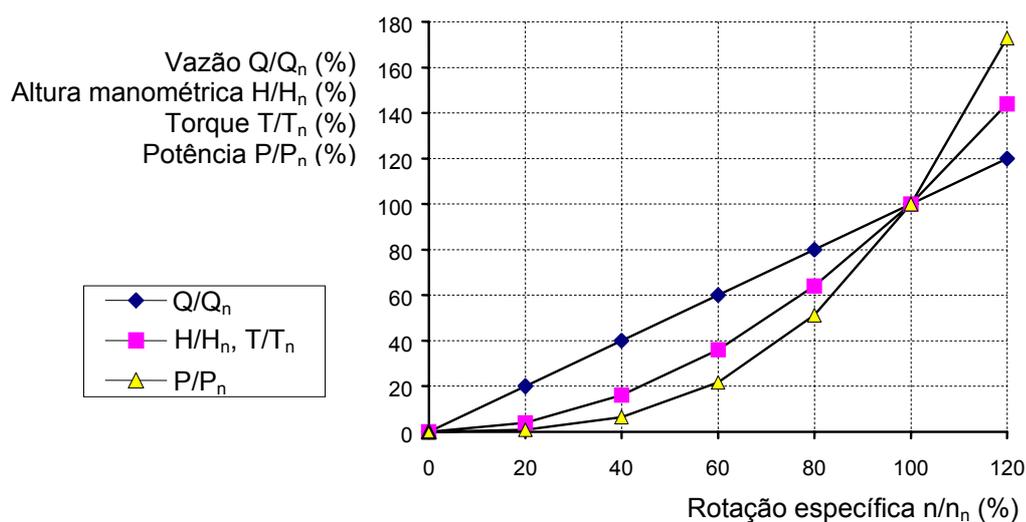


Figura 3 – Comportamento das relações de vazão, altura manométrica, torque e potência com a variação de rotação.

A Figura 3 ilustra as relações de afinidades para alteração da rotação com a pressão, vazão, potência e torque. O torque, neste caso, foi considerado quando houve alteração da frequência de trabalho do motor em relação à frequência da rede de energia elétrica.

A equação 1.4 define as semelhanças entre as propriedades relacionadas ao sistema de bombeamento, para acoplamento direto do motor e da bomba, que foram usadas nos cálculos.

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^* = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^* = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^* = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} \quad (1.4)$$

em que:

n = rotação ou velocidade do rotor;

f = frequência da rede elétrica;

Q = vazão;

H = altura manométrica;

T = torque do motor;

P = potência hidráulica;

1 = subscrito referente ao valor nominal de projeto;

2 = subscrito referente ao valor a ser encontrado; e

* = relações de Rateau.

Na equação 1.4, não se consideraram o escorregamento dos motores de indução no cálculo da alteração da frequência e, conseqüentemente, o uso da bomba centrífuga. Nesse caso, vale informar as implicações do escorregamento. Os motores assíncronos, ou de indução, têm características de rotações diferentes dos motores síncronos. Além de serem mais robustos e de custo de aquisição menor, funcionam com uma velocidade entre 0,8% e 5% inferior à velocidade síncrona (MOREIRA et al., 2000). A diferença de velocidades entre o campo girante (n_s) e a velocidade do rotor (n) tem o nome de velocidade relativa (n_2). O escorregamento (s) é um número adimensional e definido como a razão entre a velocidade relativa e a velocidade síncrona do motor. A velocidade síncrona é encontrada na relação entre a frequência da rede de energia elétrica (f) e o número de pólos do motor (P), como apresentado nas equações 1.5a, 1.5b e 1.5c.

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (1.5a)$$

$$n_2 = n_s - n \quad (1.5b)$$

$$s = \frac{n_2}{n_s} \quad (1.5c)$$

em que:

n_s = velocidade síncrona, rpm;

f = freqüência da rede de energia elétrica, Hz;

P = número de pólos;

n_2 = velocidade relativa, rpm;

n = velocidade nominal, rpm; e

s = escorregamento do motor elétrico, adimensional.

Assim, a velocidade de rotação no eixo do motor (n) é expressa pela equação 1.6.

$$n = n_s (1 - s) \quad (1.6)$$

- Potência hidráulica na tomada d'água

Cada lote irrigado apresenta demanda de potência e consumo de energia para suprir as suas necessidades hídricas. Pode-se fazer analogia da pressão e vazão correspondentes. Mudança na pressão ou na vazão do lote altera o consumo de energia elétrica na estação de bombeamento.

A pressão total, ou altura manométrica, é diretamente proporcional à potência. Isso é válido para uma vazão constante, como indicado pelas equações 1.7a-e.

$$P_h = \dot{m} g h \quad (1.7a)$$

$$P_h = \rho Q g h \quad (1.7b)$$

$$P_h = \rho g Q h \quad (1.7c)$$

$$P_h = k h \quad (1.7d)$$

$$k = \rho g Q \quad (1.7e)$$

em que:

- P_h = potência hidráulica, kW;
- \dot{m} = vazão mássica, kg de água s^{-1} ;
- g = aceleração da gravidade, $m s^{-2}$;
- h = altura manométrica ou pressão, m;
- ρ = massa específica da água, $kg m^{-3}$;
- Q = vazão volumétrica da água, $m^3 s^{-1}$; e
- k = constante, $kg m s^{-3}$.

A demanda total de potência hidráulica do sistema atendido por uma estação de bombeamento será o somatório das potências das demandas individuais de cada lote mais as perdas de carga nas tubulações, perdas localizadas e desníveis geométricos.

Pode-se calcular, ou estimar, a porcentagem da potência total demandada por lote, em dada situação, por meio do índice da demanda de potência.

O índice correspondente à demanda de potência em cada lote é função do total das demandas individuais dos lotes, como apresentado na equação 1.8. O índice de cada lote multiplicado pela demanda de potência total do período medido (dia, mês, ano) projeta o percentual de participação na conta de energia elétrica.

$$I_L = \frac{P_L}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_L}{\sum (P_{L1} + P_{L2} + \dots + P_{Ln})} \quad (1.8)$$

em que:

- I_L = índice da demanda de potência em cada tomada d'água, adimensional;
- P_L = potência demandada por uma tomada d'água, kW;
- $\sum_{i=1}^n P_i$ = somatório das potências das tomadas d'águas de estação de bombeamento i, kW; e
- n = número de irrigantes por estação de bombeamento.

O índice correspondente para potência é alterado conforme o contrato com o irrigante, em que é possível adequar o novo sistema de irrigação, pressão e vazão inferiores ao original.

A tarifa usualmente praticada em perímetros irrigados é representada pelo custo da energia elétrica anual em função da vazão total máxima permitida pelo projeto. Utilizando-se inversores de frequência para variar a vazão e a pressão por meio da variação da frequência, será possível economizar energia elétrica e, assim, beneficiar aquele irrigante que investiu na eficiência da irrigação, ou seja, em equipamentos e manejo de irrigação de melhor eficiência.

A potência mecânica necessária em cada lote foi calculada utilizando-se a equação 1.9.

$$P_m = 0,002725 \frac{Q H_{\text{man}}}{\eta_b} \quad (1.9)$$

Desenvolvimento da equação 1.9:

$$P_m = \frac{P_H}{\eta_b}$$

$$P_m = \frac{\dot{m} g h}{\eta_b} = \frac{\rho g Q H}{\eta_b} = \frac{1000 * 9,81 Q H}{\eta_b} = 1000 * 9,81 \frac{Q_{(m^3/h)} H_{(m)}}{3600 * 1000}$$

$$P_m = 0,002725 \frac{Q_{(m^3/h)} H_{(m)}}{\eta_b} = \frac{Q_{(m^3/h)} H_{(m)}}{367,2 \eta_b}$$

em que:

P_m = potência mecânica, kW;

Q = vazão, m^3h^{-1} ;

H_{man} = altura manométrica total das tomadas d'água a que a estação de bombeamento pertence, m; e

η_b = rendimento da bomba, decimal.

- Curva do sistema de bombeamento

A curva do sistema de trabalho, ou da tubulação, é a característica de todo o conjunto de bombeamento e relaciona a altura manométrica em função da altura geométrica e da vazão.

A equação 1.10 define uma curva de trabalho típico do sistema de bombeamento, conforme Hazen-Willians.

$$H_{\text{man}} = H_g + k Q^{1,852} \quad (1.10)$$

em que:

H_{man} = altura manométrica, m;

H_g = altura geométrica, m;

k = coeficiente da curva; e

Q = vazão do sistema, m^3h^{-1} .

- Rendimento Total ou Global (η_0) na associação de bombas em paralelo

O perímetro em questão usado como estudo de caso possui cinco estações de bombeamento, cada uma delas com quatro bombas em paralelo e ligadas progressivamente, conforme a demanda dos irrigantes. A estimativa de rendimento total da associação das bombas foi feita por meio da equação 1.11.

$$\eta_a = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\eta_i}} \quad (1.11)$$

em que:

η_a = rendimento da associação de bombas em paralelo, decimal;

Q_i = vazão da i-ésima bomba, m^3s^{-1} ; e

η_i = rendimento da i-ésima bomba, decimal.

O Quadro 6 contém as características hidráulicas das bombas 1, 2, 3 e 4 da EP1, segundo o fabricante KSB.

Quadro 6 – Características hidráulicas das bombas 1, 2, 3 e 4 da EP1, segundo o fabricante KSB

Bomba	Fabricante - KSB Modelo	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Altura Manométrica (mca)	Número de Estágios	Rotor (mm)	Rotação (rpm)	Rendimento Nominal (%)
1	ETA – 150-50	380	100	1	480	1750	76,0
2	ETA – 150-50	300	100	1	462	1750	70,5
3	ETA – 150-50	300	100	1	462	1750	70,5
4	ETA – 150-50	300	100	1	462	1750	70,5

- Simulação econômica

Os estudos foram feitos comparando-se entre duas hipóteses dentro de um perímetro irrigado: (i) as apresentadas pelo projeto original que utiliza a pressão e vazão com baixo tempo de operação para cada irrigação; (ii) e pressão e vazão inferiores e tempo de irrigação acima daqueles projetados originalmente.

- Curva de carga no bombeamento

A estimativa do consumo de energia elétrica foi feita a partir da potência hidráulica útil requerida e do volume de água requerido pelo sistema de bombeamento, utilizando-se a equação 1.12.

$$Q = 10 \frac{A L_B}{H} \quad (1.12)$$

em que:

Q = vazão requerida, m³h⁻¹;

A = área da superfície agrícola útil, ha;

L_B = lâmina bruta de irrigação, mm dia⁻¹; e

H = tempo específico de funcionamento do sistema, h dia⁻¹.

A partir da equação 1.9, estimou-se a potência elétrica por meio das equações 1.13 e 1.14.

$$P_{el} = \frac{P_m}{\eta_m} \quad (1.13)$$

ou

$$P_{el} = \frac{P_H}{\eta_b \eta_m} \quad (1.14)$$

em que:

P_{el} = potência elétrica, kW;

P_m = potência mecânica, kW;

η_m = rendimento do motor, decimal;

P_H = potência hidráulica, kW; e

η_b = rendimento da bomba.

Se os rendimentos da bomba e do motor não forem considerados, então a potência elétrica, a hidráulica e a mecânica serão iguais, como representado na equação 1.15.

$$P_H = P_m = P_{el} \quad (1.15)$$

As simulações da aplicação da tarifa binômica consideraram a hipótese apresentada na equação 1.15.

3.2. Medidas de gerenciamento e tarifas binômicas

A tarifa binômica de energia elétrica é função do consumo e da demanda de energia elétrica. Já a tarifa de irrigação binômica estudada é função do volume de água e da pressão manométrica, como mostrado na equação 1.16.

$$T_{\text{irr}} = f\left(\frac{\text{Vol}}{\text{mês}}, \frac{P}{\text{mês}}\right) \quad (1.16)$$

em que:

T_{irr} = tarifa de irrigação, R\$ mês⁻¹;

Vol = volume, m³; e

P = pressão, mca.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Simulação da operação de perímetros irrigados

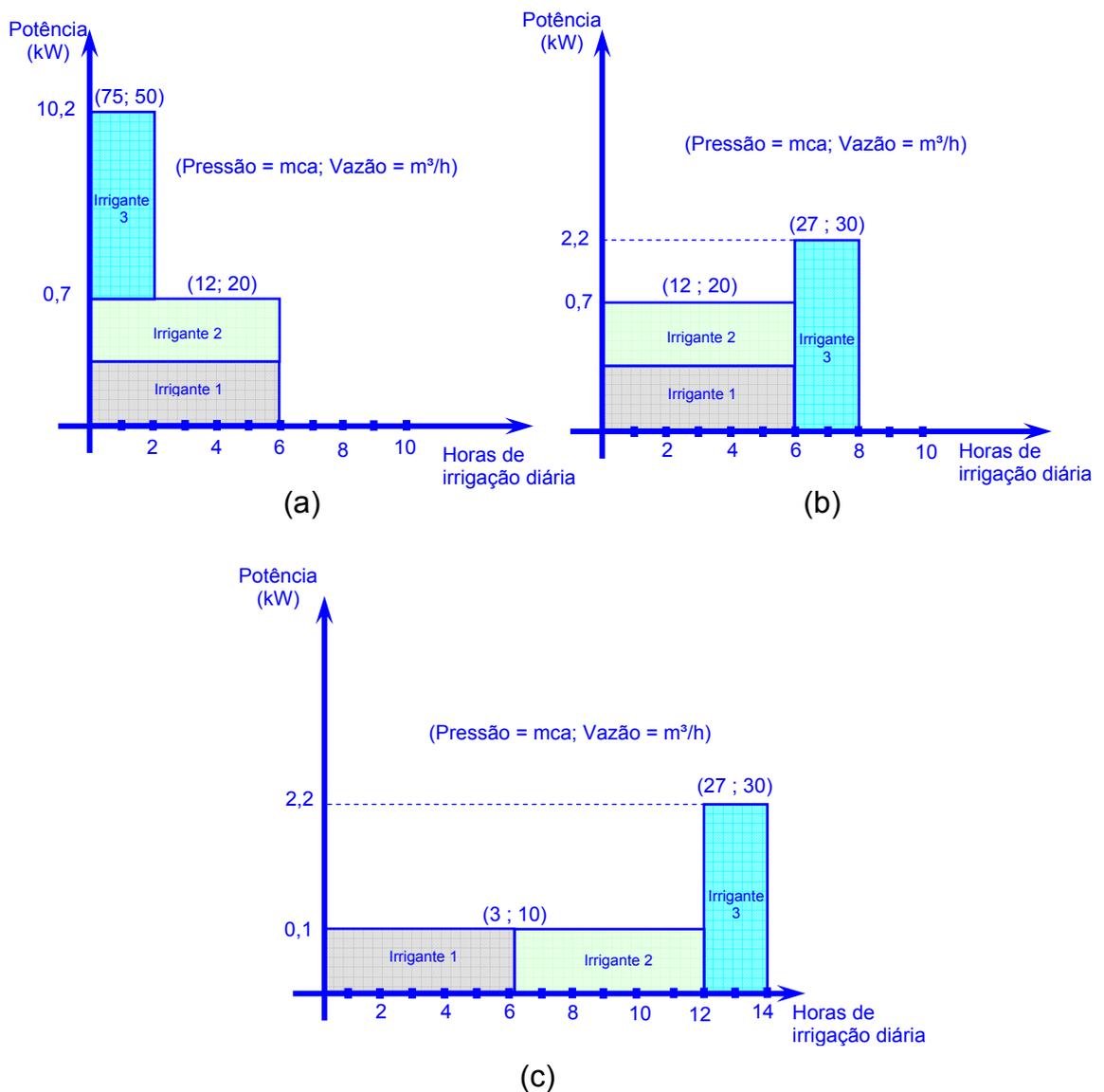
Utilizando as relações de Rateau (DENÍCULI, 2001) apresentadas na equação 1.4, pode-se simular a situação em que um ramal de um sistema de bombeamento fornece água para três irrigantes, com o mesmo volume diário, para determinada cultura, com o mesmo turno de irrigação, e utilizando a potência útil, considerando rendimentos de 100%. Observam-se, no Quadro 7abc e nas Figuras 4 a-c, três situações diferentes para três irrigantes, utilizando a mesma lâmina d'água para irrigação.

As Figuras 4a-c mostram a operação diária de três irrigantes que demandam mesmos volumes de água para irrigação, sendo os irrigantes 1 e 2 de baixa pressão e baixa vazão e o irrigante 3, de alta pressão e alta vazão. Suponha-se que os irrigantes 1, 2 e 3 sejam abastecidos por estação de bombeamento que seja tarifada no regime horo-sazonal.

No Quadro 7, as situações apresentadas na Figura 4 podem ser observadas pelo valor da tarifa praticada e pela tarifa realmente utilizada pelo irrigante. A tarifa praticada em comunidades coletivas de irrigação é repassada conforme o consumo de água pelo período de uso. Já a tarifa realmente utilizada, ou proposta, visa ao consumo individual de cada irrigante. O valor da tarifa aplicada para demanda foi de R\$13,815 por kW e para consumo, de R\$ 0,1121 por kWh fora de ponta. Os gastos mensais do

consumo (R\$/kWh mês) referem-se a uma irrigação por dia, enquanto os gastos mensais com a demanda (R\$/kW mês), à maior demanda durante o mês.

No Quadro 7, mostram-se os valores de consumo e demanda da energia elétrica e na Figura 4, as formas do uso da irrigação.



Figuras 4 – Representação diária de situações de uso da irrigação por três irrigantes com a aplicação da tarifa binômia.

Quadro 7 – Gastos de energia elétrica representados pelas situações de uso da irrigação em uma mesma lâmina d'água

Situação da Figura 4 (a)	Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Praticados (em Vigor)													Resultado por Dia		Gasto Mensal
	Horário (h dia ⁻¹)													kWh	kW	TOTAL R\$
	1	2	3	4	5	6										
kW	10,20	10,20	0,70	0,70	0,70	0,70	-	-	-	-	-	-	-			
kWh	10,20	10,20	0,70	0,70	0,70	0,70	-	-	-	-	-	-	-			
Irrig. 1	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-	-	-	7,73	3,40	72,98
Irrig. 2	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-	-	-	7,73	3,40	72,98
Irrig. 3	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-	-	-	7,73	3,40	72,98
Total de demanda de energia elétrica (kW)														10,2	140,91	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)													23,20		78,02	
Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Realmente Utilizados (Proposto)																
kWh (médio)	2,04	2,04	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	-			
Irrig. 1	2,04	2,04	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	-	5,48	2,04	46,61
Irrig. 2	2,04	2,04	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	-	5,48	2,04	46,61
Irrig. 3	6,12	6,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,24	6,12	125,71
Total de demanda de energia elétrica (kW)														10,2	140,91	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)													23,20		78,02	

(a)

Situação da Figura 4 (b)	Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Praticado (em Vigor)													Resultado por Dia		Gasto Mensal
	Horário (h dia ⁻¹)													kWh	kW	TOTAL R\$
	1	2	3	4	5	6	7	8								
kW	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	2,20	2,20	-	-	-	-	-			
kWh	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	2,20	2,20	-	-	-	-	-			
Irrig. 1	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	-	-	-	-	-	2,87	0,73	19,77
Irrig. 2	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	-	-	-	-	-	2,87	0,73	19,77
Irrig. 3	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	-	-	-	-	-	2,87	0,73	19,77
Total de demanda de energia elétrica (kW)														2,2	30,39	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)													8,60		28,92	
Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Realmente Utilizados (Propostos)																
kWh (médio)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,73	0,73	-	-	-	-	-	-		
Irrig. 1	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	-	2,10	0,44	13,14
Irrig. 2	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	-	-	-	-	2,10	0,44	13,14
Irrig. 3	-	-	-	-	-	-	2,20	2,20	-	-	-	-	-	4,40	1,32	33,03
Total de demanda de energia elétrica (kW)														2,2	30,39	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)													8,60		28,92	

(b)

Situação da Figura 4 (c)	Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Praticados (em Vigor)														Resultado por Dia		Gasto Mensal
	Horário (h dia ⁻¹)														kWh	kW	TOTAL R\$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
kW	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	2,20	2,20			
kWh	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	2,20	2,20			
Irrig. 1	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,87	0,73	16,41
Irrig. 2	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,87	0,73	16,41
Irrig. 3	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	1,87	0,73	16,41
Total de demanda de energia elétrica (kW)															2,2	30,39	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)														5,60		18,83	
Consumo e Demanda de Energia Elétrica – Realmente Utilizados (Propostos)																	
kWh (médio)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	2,20	2,20			
Irrig. 1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,60	0,28	5,82
Irrig. 2	-	-	-	-	-	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	-	-	0,60	0,28	5,82
Irrig. 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,20	2,20	4,40	1,65	37,59
Total de demanda de energia elétrica (kW)															2,2	30,39	
Total de consumo de energia elétrica (kWh)														5,60		18,83	

(c)

Na Figura 4, nota-se que os irrigantes 1 e 2 utilizam sistemas de irrigação de baixa pressão e permitem o uso de uma potência menor e, conseqüentemente, menores gastos de energia elétrica. Na comparação com o irrigante 3, que possui sistema de alta pressão, o consumo de água para irrigar toda a área em tempo menor exige um sistema de bombeamento com alta taxa de pressão para garantir o suprimento de água a todos.

Observa-se, na Figura 4a, que o consumo absoluto foi de 23,20 kWh e a demanda, de 10,2 kW, projetando para os irrigante, com o mesmo tamanho de áreas irrigadas, consumo de energia elétrica e demanda iguais. Para a tarifa proposta, o irrigante 3 desembolsará uma quantia superior à dos irrigantes 1 e 2. Nessa situação apresentada, o irrigante 3 poderá propor uma melhor estruturação em seu manejo do sistema de irrigação, assim como um sistema mais eficiente. Observa-se também, nessa figura, que nas duas primeiras horas o irrigante 3 utiliza vazão superior à dos irrigantes 1 e 2, ocasionando demanda de energia elétrica de 10,2 kW, ou R\$140,91, que, dividindo por três irrigantes e projetando para um mês, representa um custo de R\$46,97 por irrigante, enquanto um consumo total de 23,2 kWh, ou R\$78,02, que, dividido por três e projetado para o mês, resulta num custo de R\$26,00 kWh no fim da operação da irrigação.

Na Figura 4b, a análise foi feita para jornada diária de 8 h de irrigação. Nas seis primeiras horas de irrigação, somente os irrigantes 1 e 2 irrigaram e demandaram da rede de energia elétrica pequena potência (0,7 kW), devido à menor exigência de pressão de seus sistemas de irrigação. No período entre 6 e 8 h, o irrigante 3 entrou no sistema sozinho e demandou uma potência de 2,2 kW em seu sistema de irrigação de alta pressão. Assim, todos desembolsaram R\$30,39 pela demanda de 2,2 kW, ou seja, R\$10,13 por irrigante. Já o consumo de energia elétrica é função do número de horas de funcionamento de cada sistema, proporcionando um custo de R\$0,32 pelo consumo de 2,87 kWh por irrigante.

Observando a Figura 4c com 14 h de irrigação, nas 12 primeiras horas os sistemas de baixa pressão foram atendidos, demandando uma potência igual a 0,1 kW. Nas 2 h seguintes, o sistema de alta pressão do irrigante 3 foi atendido, também demandando potência de 2,2 kW. Dessa

forma, todos pagaram por 2,2 kW. Já o consumo de energia elétrica é também função do número de horas de funcionamento de cada sistema.

Na Figura 5, apresenta-se a diferença entre a tarifa convencional, praticada no rateio da energia elétrica utilizada no bombeamento, e o consumo e demanda de energia elétrica realmente utilizada por irrigante.

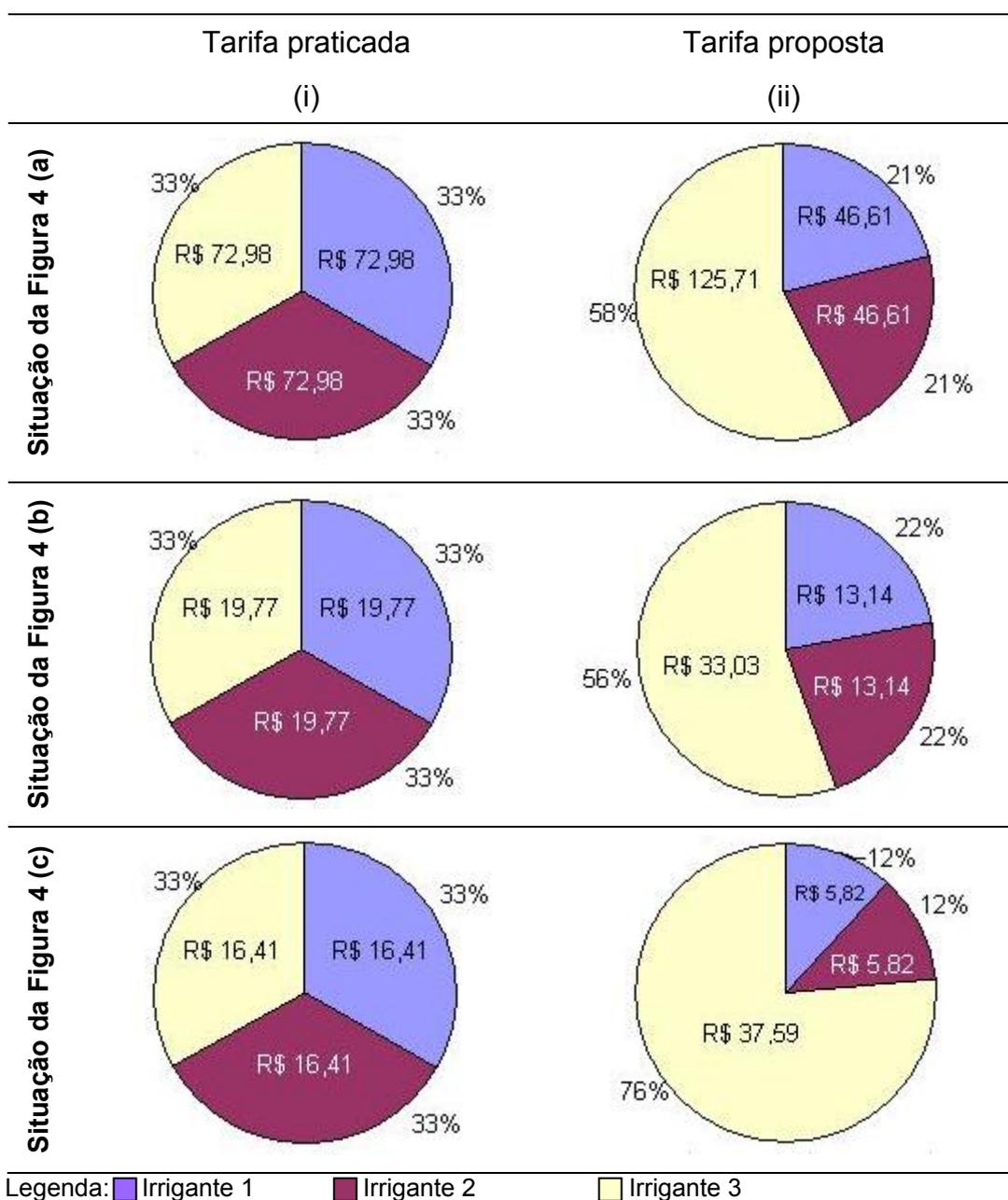


Figura 5 – (i) Custo mensal de tarifa praticada e (ii) custo mensal da tarifa binômia proposta.

Na Figura 5, apresentam-se as informações de uso de energia elétrica para uma mesma necessidade hídrica em dada cultura para cada situação estudada e o total do custo mensal na tarifa praticada e na proposta. A coluna (i) contém o gasto que normalmente é praticado, em que a conta de energia elétrica é repartida conforme o consumo de água, e a coluna (ii) corresponde ao gasto que realmente foi utilizado. Nota-se, nessas figuras, que a tarifa praticada mantém custo igual para todos os irrigantes em todas as situações. Já com relação à tarifa proposta para as situações (a) (b) e (c) o irrigante 3 teve o seu custo de energia elétrica superior ao dos demais. Na situação (a), utilizando a tarifa proposta os irrigantes 1 e 2 tiveram economia de 36% no valor da conta de energia elétrica, enquanto o irrigante 3 teve aumento de 73%. Já na situação (c), em que cada irrigação foi individualizada, ou seja, cada irrigante tinha para si toda a irrigação solicitada, as economias dos irrigantes 1 e 2 foram de 68%, e o irrigante 3 teve aumento de 131% na sua conta de energia elétrica. O custo total em cada situação teve os gastos diferenciados por apresentarem as potências elétricas e, conseqüentemente, as demandas também diferenciadas.

Simulação do consumo de energia em lotes de um perímetro irrigado

Em um perímetro irrigado, as demandas de vazão são variáveis em função da época do ano, do preparo do solo ou de diferentes tipos de cultivo. As variações de pressão são mínimas, e o seu custo é incorporado dentro da tarifa de consumo de água.

A conta de energia elétrica do perímetro é enviada aos irrigantes por meio da conta de tarifa de água (k2), conforme o consumo registrado em seus hidrômetros no acumulado do mês.

No Quadro 8, apresentam-se as características da pressão e da vazão em cada lote no setor 1, da EP1, do perímetro irrigado de Mirorós, Bahia, para o pleno funcionamento do sistema com os dados do projeto original.

Quadro 8 – Potência na rede de distribuição da EP1 do perímetro irrigado de Mirorós e a necessária no lote irrigado em uma mesma dotação de rega de 1,37 L s⁻¹ha⁻¹

Lote	A	B	C	D	E	F (E/D)	G (D/ΣD)	H (E/ΣE)
	Área Irrigada (ha)	Pressão na Rede de Distribuição (mca)	Pressão Necessária à Irrigação do lote (mca)	Demanda de Potência de Saída da Rede para o Lote (kW)	Demanda de Potência Necessária à Irrigação do Lote (kW)	Índice de Aproveitamento da Potência	Percentual de Potência na Rede	Percentual de Potência Necessária à Irrigação
1	5,00	87,67	49,45	8,19	4,62	56,4%	2,50%	2,13%
2	10,56	84,89	51,30	16,74	10,12	60,4%	5,11%	4,66%
3	5,00	83,43	48,65	7,79	4,54	58,3%	2,38%	2,09%
4	5,00	81,09	47,15	7,57	4,40	58,1%	2,31%	2,03%
5	15,5	78,99	50,06	22,87	14,49	63,4%	6,98%	6,67%
6	5,00	78,33	47,15	7,31	4,40	60,2%	2,23%	2,03%
7	5,00	81,10	47,25	7,57	4,41	58,3%	2,31%	2,03%
8	16,56	81,13	53,50	25,09	16,55	65,9%	7,66%	7,62%
9	5,00	81,15	46,75	7,58	4,36	57,6%	2,31%	2,01%
10	5,00	79,55	47,45	7,43	4,43	59,6%	2,27%	2,04%
11	11,3	79,30	50,73	16,74	10,71	64,0%	5,11%	4,93%
12	5,00	78,88	48,05	7,36	4,49	60,9%	2,25%	2,07%
13	5,00	73,80	39,75	6,89	3,71	53,9%	2,10%	1,71%
14	5,00	73,80	47,05	6,89	4,39	63,8%	2,10%	2,02%
15	5,00	71,81	40,35	6,70	3,77	56,2%	2,05%	1,73%
16	5,00	71,81	47,05	6,70	4,39	65,5%	2,05%	2,02%
17	5,00	69,14	40,65	6,46	3,80	58,8%	1,97%	1,75%
18	5,00	69,14	47,85	6,46	4,47	69,2%	1,97%	2,06%
19	5,00	62,45	40,85	5,83	3,81	65,4%	1,78%	1,76%
20	5,00	62,45	47,95	5,83	4,48	76,8%	1,78%	2,06%
21	5,00	70,28	40,15	6,56	3,75	57,1%	2,00%	1,73%
22	9,97	70,97	54,34	13,22	10,12	76,6%	4,04%	4,66%
23	5,00	70,79	40,15	6,61	3,75	56,7%	2,02%	1,73%
24	5,00	63,20	38,55	5,90	3,60	61,0%	1,80%	1,66%
25	16,42	62,09	41,23	19,04	12,64	66,4%	5,81%	5,82%
26	5,00	62,09	38,15	5,80	3,56	61,4%	1,77%	1,64%
27	5,00	62,21	40,25	5,81	3,76	64,7%	1,77%	1,73%
28	5,00	62,21	49,55	5,81	4,63	79,6%	1,77%	2,13%
29	5,00	60,62	40,35	5,66	3,77	66,6%	1,73%	1,73%
30	5,00	60,62	48,35	5,66	4,51	79,8%	1,73%	2,08%
31	5,00	56,57	39,75	5,28	3,71	70,3%	1,61%	1,71%
32	9,97	55,80	48,01	10,40	8,95	86,0%	3,18%	4,12%
33	5,00	54,98	39,85	5,13	3,72	72,5%	1,57%	1,71%
34	9,94	52,81	39,42	9,80	7,32	74,6%	2,99%	3,37%
35	14,41	41,31	33,94	11,11	9,13	82,2%	3,39%	4,20%
36	15,3	40,80	34,84	11,65	9,95	85,4%	3,56%	4,58%
Total	259,94	100,00	Média 44,6%	327,45	217,20	Média 65,9%	100,0%	100,0%

Analisando o Quadro 8, verifica-se que, com a potência encontrada na saída da rede de distribuição de água para os lotes, o rendimento médio na simulação com bombas em paralelo foi de 72%, mantendo-se o mesmo rendimento com potência necessária à irrigação dos lotes.

No caso de perímetros irrigados, como apresentado no Quadro 8, a tarifa binômica tem seus valores correspondentes na vazão e pressão. A

coluna “B” apresenta uma pressão de projeto que foi de 100 mca em relação à maior pressão da rede, que foi de 87,67 mca. Isso se deve a uma diferença de cota da bomba até o lote 1 de 8 m e mais as perdas de carga em 305 m de tubulação de ferro fundido. A coluna “C” foi calculada conforme a pressão necessária à irrigação em função das características dos aspersores com pressão de serviço de 25 mca e vazão de $1,76 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, da declividade representativa do lote e da tubulação da linha de irrigação com diâmetro de 50 mm (sete aspersores em cada linha). Nas colunas “D” e “E”, a demanda de potência foi calculada em função da vazão de água para irrigação do lote em relação às pressões da rede e à necessária para irrigação daquele lote, respectivamente. O índice de aproveitamento da potência que chegava ao lote e da que era utilizada está relacionado na coluna “F”. Notou-se, também, que o baixo índice de aproveitamento da potência hidráulica nos lotes mais próximos da estação de bombeamento é relacionado pela pressão máxima do sistema de distribuição de água exigida para o funcionamento. Assim, pode-se ter um parâmetro de valorização do lote ou grau de custo da energia em cada tomada d’água.

A curva do sistema de bombeamento da EP1, utilizando-se os dados de projeto do Quadro 8, pode ser observada na Figura 6.

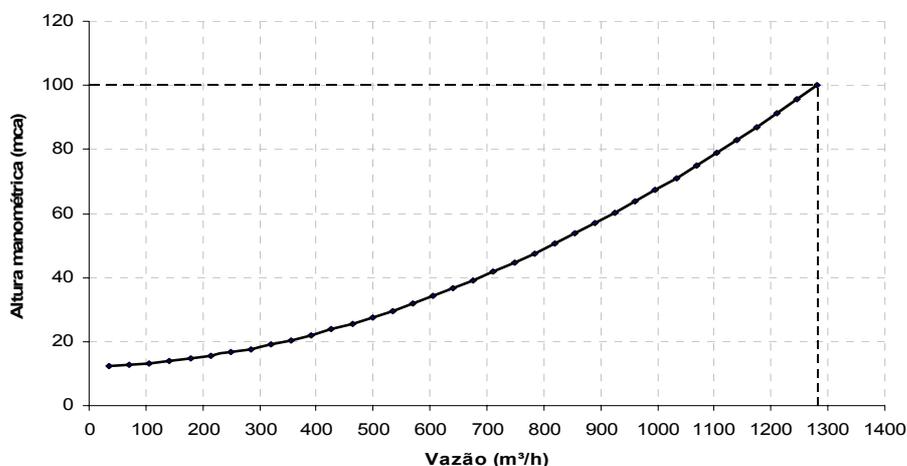


Figura 6 – Curva do sistema de bombeamento da EP1.

A Figura 6 ilustra a curva do sistema em funcionamento da EP1, em que cada tomada d'água tem a vazão de projeto de 24,66 m³h⁻¹, para um lote de 5 ha, e uma pressão crescente, conforme o número de tomadas d'água ligadas. Percebe-se que a altura manométrica do projeto chega a 100 mca e a vazão, a 1.283,2 m³h⁻¹.

Utilização da tarifa binômia em perímetros irrigados

O custo unitário da água (C_A) é facilmente calculável se a tarifa de energia elétrica for de acordo com a equação 1.17.

$$C_A = \frac{t C_{EE}}{\left(\frac{V}{1000}\right)} \quad (1.17)$$

em que:

- C_A = custo unitário da água, R\$ 1.000⁻¹ m⁻³;
- t = tarifa de consumo de energia elétrica, R\$ kWh⁻¹ ;
- C_{EE} = consumo de energia elétrica, kWh; e
- V = volume de água consumido, m³.

Quando houver a taxação devida aos custos de pressurização, pode-se supor que a parcela dos custos de demanda de dado usuário é proporcional à altura manométrica em relação à do sistema. Ou seja, a parcela de contribuição porcentual para a pressão manométrica total de dado irrigante em relação ao sistema de dada estação de bombeamento será a parte dos custos de demanda de potência de energia elétrica que ele utilizou.

É verdade também, como visto anteriormente, que só se pode afirmar que a parte dos custos da demanda de energia elétrica é diretamente proporcional à altura manométrica se houver coincidência de utilização dos sistemas de irrigação. Esta, então, é uma das hipóteses simplificadas deste trabalho.

A seguir, apresenta-se a metodologia de cálculo da tarifa de demanda, proporcional à pressão manométrica utilizada por lote.

A pressão máxima a ser utilizada em determinado período é relacionada com a demanda anual projetada de energia elétrica. As tarifas

são normalmente pré-fixadas e vigentes no período anual. Utilizando esse princípio, pode-se equacionar o valor a ser pago para cada irrigante.

A equação 1.18 pode ser utilizada no cálculo da demanda para determinação da tarifa da pressão utilizada.

$$D_{\text{LOTE}} = D_{\text{PL}} - \left(\frac{D_{\text{PL}} - D_{\text{A}}}{k} \right) \quad (1.18)$$

em que:

- D_{LOTE} = demanda de potência por lote, kW;
- D_{PL} = demanda de potência de projeto do lote, kW;
- D_{A} = demanda de potência atual do lote, kW; e
- k = constante, adimensional.

A constante k é a relação entre a demanda dos lotes e a demanda tarifada. A equação 1.19 estabelece essa relação.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n D_{\text{PL}_i} - \sum_{i=1}^n D_{\text{A}_i}}{D_{\text{P}} - D_{\text{t}}} \quad (1.19)$$

em que:

- k = constante, adimensional;
- D_{PL_i} = demanda de potência atual do i -ésimo lote, kW;
- D_{A_i} = demanda de potência atual do i -ésimo lote, kW;
- D_{P} = demanda de potência de projeto, kW; e
- D_{t} = demanda de potência registrada de energia elétrica, kW.

O somatório das demandas de potência de projeto dos lotes ($\sum D_{\text{PL}}$) foi igual ao das demandas por lote ($\sum D_{\text{Lote}}$) somado à diferença da demanda de potência de projeto (D_{P}) e à demanda de potência registrada na tarifa de energia elétrica (D_{t}), como apresentado na equação 1.20.

$$\sum D_{\text{PL}} = \sum D_{\text{LOTE}} + (D_{\text{P}} - D_{\text{t}}) \quad (1.20)$$

Para essa metodologia, a demanda de potência atual estará sempre vinculada à vazão inicialmente projetada, por se tratar somente da variação da pressão e não da vazão.

Simulação dos custos das tarifas monômias e binômias

Apresenta-se a simulação para obter a tarifa binômia da EP1 do DIPIM, supondo que os irrigantes dos lotes 1 a 7 tiveram redução de 10 mca na pressão de serviço no lote em relação ao projeto original, a exemplo de uma troca do sistema de irrigação mais eficiente e de baixa pressão.

O Quadro 9 contém dados da simulação para determinação da economia de demanda de potência elétrica proporcional a cada irrigante que reduziu a pressão de trabalho no seu lote, mostrando o valor calculado da demanda de potência (kW) a ser efetuada para a tarifa a ser paga pelo irrigante. A demanda de potência necessária para o funcionamento da EP1 foi de 485,82 kW e a simulada para a concessionária de energia elétrica, de 393,12 kW. Nota-se, nesse quadro, que a diferença entre a demanda de potência necessária de projeto da EP1 e a demanda da concessionária de energia elétrica foi de 92,7 kW, distribuída aos irrigantes dos lotes de 1 a 7 pela redução na pressão de serviço da irrigação nos lotes. Essa diminuição proporcionou queda nas características do sistema de bombeamento em 4,44%, entre as médias de 44,6 e 42,6 mca, em que se pôde relacionar para a economia de energia elétrica.

Para o coeficiente k (equação 2.19), que determina a proporção da economia de demanda de cada lote, foi encontrado na simulação o valor de 0,230097445, nos sete lotes com redução na pressão de 10 mca cada. Esse valor é variável, sendo também o denominador da diferença das demandas de potências, o qual está relacionado com a diminuição na pressão em cada lote.

Quadro 9 – Simulação da demanda de potência a ser utilizada pelo irrigante

Lote	Pressão Original de Projeto Necessária à Irrigação do Lote	Redução na Pressão	Pressão Ajustada à Irrigação do Lote	Demanda de Potência de Projeto Necessária à Irrigação do Lote	Demanda de Potência Ajustada à Irrigação do Lote	Diferença entre as Demandas de Projeto e à Ajustada	Economia de Demanda por Lote	Demanda de Potência a ser Faturada
	(mca)	(mca)	(mca)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
1	49,45	10	39,45	10,33	8,24	2,09	9,08	1,25
2	51,30	10	41,30	22,61	18,21	4,40	19,16	3,46
3	48,65	10	38,65	10,17	8,08	2,09	9,08	1,08
4	47,15	10	37,15	9,85	7,76	2,09	9,08	0,77
5	50,06	10	40,06	32,40	25,93	6,47	28,13	4,27
6	47,15	10	37,15	9,85	7,76	2,09	9,08	0,77
7	47,25	10	37,25	9,87	7,78	2,09	9,08	0,79
8	53,50	0	53,50	36,98	36,98	0,00	0,00	36,98
9	46,75	0	46,75	9,77	9,77	0,00	0,00	9,77
10	47,45	0	47,45	9,92	9,92	0,00	0,00	9,92
11	50,73	0	50,73	23,95	23,95	0,00	0,00	23,95
12	48,05	0	48,05	10,04	10,04	0,00	0,00	10,04
13	39,75	0	39,75	8,31	8,31	0,00	0,00	8,31
14	47,05	0	47,05	9,83	9,83	0,00	0,00	9,83
15	40,35	0	40,35	8,43	8,43	0,00	0,00	8,43
16	47,05	0	47,05	9,83	9,83	0,00	0,00	9,83
17	40,65	0	40,65	8,50	8,50	0,00	0,00	8,50
18	47,85	0	47,85	10,00	10,00	0,00	0,00	10,00
19	40,85	0	40,85	8,54	8,54	0,00	0,00	8,54
20	47,95	0	47,95	10,02	10,02	0,00	0,00	10,02
21	40,15	0	40,15	8,39	8,39	0,00	0,00	8,39
22	54,34	0	54,34	22,62	22,62	0,00	0,00	22,62
23	40,15	0	40,15	8,39	8,39	0,00	0,00	8,39
24	38,55	0	38,55	8,06	8,06	0,00	0,00	8,06
25	41,23	0	41,23	28,26	28,26	0,00	0,00	28,26
26	38,15	0	38,15	7,97	7,97	0,00	0,00	7,97
27	40,25	0	40,25	8,41	8,41	0,00	0,00	8,41
28	49,55	0	49,55	10,36	10,36	0,00	0,00	10,36
29	40,35	0	40,35	8,43	8,43	0,00	0,00	8,43
30	48,35	0	48,35	10,10	10,10	0,00	0,00	10,10
31	39,75	0	39,75	8,31	8,31	0,00	0,00	8,31
32	48,01	0	48,01	19,99	19,99	0,00	0,00	19,99
33	39,85	0	39,85	8,33	8,33	0,00	0,00	8,33
34	39,42	0	39,42	16,34	16,34	0,00	0,00	16,34
35	33,94	0	33,94	20,42	20,42	0,00	0,00	20,42
36	34,84	0	34,84	22,23	22,23	0,00	0,00	22,23
Total	Média 44,60		Média 42,62	485,82	464,49	21,33	92,70	393,12
							Total 485,82	

O consumo e a demanda realmente utilizada nos lotes de cada irrigante, conforme apresentado no Quadro 9, foram calculados utilizando-se as equações 1.21 e 1.22.

$$C_{EE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i V_i n_i}{367,2 \eta_i} \right) \quad (1.21)$$

$$D_{EE} = \frac{H V}{367,2 \eta} \quad (1.22)$$

em que:

- C_{EE} = consumo de energia elétrica individual, kWh (mês)⁻¹;
- D_{EE} = demanda de energia elétrica individual, kW (mês)⁻¹;
- H_i = pressão correspondente à i-ésima tomada d'água, m;
- V_i = volume de água consumido pelo i-ésimo lote, m³(mês)⁻¹;
- n_i = número de horas de funcionamento do i-ésimo lote, h;
- η = rendimento do sistema de bombeamento, decimal; e
- 367,2 = fator de conversão de unidades.

No Quadro 10, apresentam-se as tarifas monômnia e binômnia utilizando uma conta real da concessionária de energia elétrica para a EP1 e a sua manutenção pela administração do perímetro.

O Quadro 10 contém os valores registrados da concessionária de energia elétrica e os valores correspondentes do custo da energia elétrica a serem faturados. Para a tarifa $k_{2\text{variável}}$, relativo à tarifa monômnia, tem-se o valor de R\$37,26 por 1.000 m³ de água consumida. Para as simulações do cálculo da tarifa binômnia foram feitas duas determinações de tarifa: (i) tarifa de água $k_{2\text{variável}}$, que agrega todos os valores de custos menos a demanda (kW) registrada na conta de energia elétrica para cada 1.000 m³ consumido de água por mês (R\$23,15 por 1.000 m³ de água consumida); e (ii) tarifa de demanda $k_{2\text{variável}}$ que utiliza somente a demanda (kW) registrada na conta da concessionária de energia elétrica para cada kW (R\$13,81 por kW).

Quadro 10 – Cálculo da tarifa monômnia $k2_{\text{variável}}$ para o consumo de água e tarifa $k2_{\text{variável}}$ para o consumo de água e demanda de energia elétrica

		Unidade	Consumo ou Demanda	Tarifa de Energia Elétrica (R\$)	Valor (R\$)
CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA	Demanda de energia elétrica	kW	393,12	13,8150	5.430,95
	Consumo ativo na ponta	kWh	282,24	0,90705	256,01
	Consumo ativo fora de ponta	kWh	66.492,00	0,10170	6.762,24
	Consumo ativo reservado	kWh	756,00	0,10170	76,89
	Multa, encargos, outros				817,40
Manutenção da EP1					1.000,00
TOTAL					14.343,48
Consumo de água		1000 m ³	384,96		
TARIFA MONÔMIA				Valor (R\$)	
.Tarifa k2 (variável)		R\$ 1.000 ⁻¹ m ⁻³	384,96	14.343,48	37,26
TARIFA BINÔMIA				Valor (R\$)	
.Tarifa de água k2 (variável)		R\$ 1.000 ⁻¹ m ⁻³	384,96	8.912,53	23,15
.Tarifa de demanda k2 (variável)		R\$ kW ⁻¹	393,12	5.430,95	13,81

O Quadro 11 contém a tarifa monômnia e a tarifa binômnia, discriminando-se o valor a ser pago por lote. A simulação foi para todos os lotes com vazão, em média, de 4,94 m³h⁻¹ha⁻¹ e jornada diária de irrigação de 10 h.

A pressão de equilíbrio entre todos os irrigantes foi calculada, utilizando-se a equação 1.23.

$$p = \frac{270 D \left(\frac{D_{pi}}{D_{pp}} \right) \eta_b}{0,736 Q} \quad (1.23)$$

$$p = \frac{270 \cdot 393,12 \left(\frac{217,39}{485,82} \right) 0,72}{0,736 \cdot 1283,2} = 36,21 \text{ mca}$$

em que:

- p = pressão de equilíbrio, mca;
- D = demanda de potência aplicada na conta de energia, kW;
- D_{pi} = demanda de potência necessária à irrigação do lote, kW;
- D_{pp} = demanda de potência de projeto necessária à irrigação, kW;
- Q = vazão bombeada, m³h⁻¹; e
- η_b = rendimento da bomba, decimal.

Quadro 11 – Comparação entre o valor de cada irrigante da tarifa $k2_{\text{variável}}$ utilizando-se metodologia de tarifa monômnia e tarifa binômnia

Lote	Área irrigada	Volume de Água por Mês para Jornada Diária de 10 Horas	$k2_{\text{variável}}$	$k2_{\text{variável}}$			Diferença (TM – TB)
			Tarifa Monômnia (TM)	Tarifa Binômnia (TB)			
			Custo da Água para Irrigação	Custo da Água para Irrigação	Custo da Demanda de Potência	Custo Total para Tarifa Binômnia	
(ha)	(h.dia ⁻¹)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	
1	5	7,41	276,09	171,56	17,29	188,85	87,24
2	10,56	15,63	582,37	361,86	47,75	409,61	172,76
3	5	7,41	276,09	171,56	14,98	186,54	89,55
4	5	7,41	276,09	171,56	10,65	182,21	93,89
5	15,5	22,95	855,11	531,33	59,02	590,35	264,76
6	5	7,41	276,09	171,56	10,65	182,21	93,89
7	5	7,41	276,09	171,56	10,94	182,50	93,60
8	16,56	24,51	913,23	567,45	510,91	1.078,37	-165,13
9	5	7,41	276,09	171,56	134,97	306,53	-30,44
10	5	7,41	276,09	171,56	137,00	308,55	-32,46
11	11,3	16,74	623,73	387,56	330,88	718,44	-94,72
12	5	7,41	276,09	171,56	138,73	310,28	-34,19
13	5	7,41	276,09	171,56	114,76	286,32	-10,23
14	5	7,41	276,09	171,56	135,84	307,40	-31,30
15	5	7,41	276,09	171,56	116,50	288,05	-11,96
16	5	7,41	276,09	171,56	135,84	307,40	-31,30
17	5	7,41	276,09	171,56	117,36	288,92	-12,82
18	5	7,41	276,09	171,56	138,15	309,71	-33,61
19	5	7,41	276,09	171,56	117,94	289,50	-13,40
20	5	7,41	276,09	171,56	138,44	309,99	-33,90
21	5	7,41	276,09	171,56	115,92	287,47	-11,38
22	9,97	14,76	549,95	341,72	312,51	654,23	-104,27
23	5	7,41	276,09	171,56	115,92	287,47	-11,38
24	5	7,41	276,09	171,56	111,30	282,85	-6,76
25	16,42	24,30	905,41	562,59	390,36	952,95	-47,54
26	5	7,41	276,09	171,56	110,14	281,70	-5,61
27	5	7,41	276,09	171,56	116,21	287,76	-11,67
28	5	7,41	276,09	171,56	143,06	314,61	-38,52
29	5	7,41	276,09	171,56	116,50	288,05	-11,96
30	5	7,41	276,09	171,56	139,59	311,15	-35,05
31	5	7,41	276,09	171,56	114,76	286,32	-10,23
32	9,97	14,76	549,95	341,72	276,10	617,82	-67,87
33	5	7,41	276,09	171,56	115,05	286,61	-10,51
34	9,94	14,70	547,72	340,33	225,78	566,11	-18,39
35	14,41	21,33	794,75	493,83	282,07	775,90	18,85
36	15,3	22,62	842,81	523,69	307,06	830,75	12,06
Total	259,94	384,96	14.343,48	8.912,53	5.430,95	14.343,48	-

Nota-se, no Quadro 11, que os lotes de 1 a 7 tiveram diferença na redução da tarifa binômica, por contribuírem com a racionalização do uso de energia do sistema de irrigação do lote. Nos demais lotes, a tarifa binômica elevou os valores em relação à tarifa monômica. Já os lotes 35 e 36 também tiveram as suas tarifas binômicas reduzidas sem alterarem o seu sistema de irrigação, pelo fato de apresentarem a pressão utilizada de 33,94 mca e 34,84 mca, respectivamente, abaixo da pressão de equilíbrio do sistema de bombeamento, que foi de 36,21 mca para uma potência de 393,12 kW e vazão de 1.283,2 m³h⁻¹.

Observou-se que é possível ter uma tarifa em que o irrigante possa obter benefícios quando assume com a administração do perímetro um contrato de fornecimento de água utilizando uma pressão menor do que a do projeto original. Isso possibilita uma nova avaliação do sistema de bombeamento, visando a uma redução de custo.

Simulação econômica

A tarifa binômica em sistemas de bombeamento de água é justificada pela possibilidade de se fazer um paralelo entre a demanda e o consumo de energia elétrica com a pressão e a vazão integralizada em determinado tempo do sistema de irrigação. A troca do sistema de alta ou média pressão por um sistema de baixa pressão possibilita uma economia de energia elétrica sem prejudicar a irrigação.

Nos Quadros 12, 13, 14 e 15, apresentam-se uma simulação relacionando horas de irrigação diária, de 1 h a 12 h por dia, para diferentes lâminas de irrigação, de 1 a 10 mm (dia)⁻¹. Essa lâmina representa a irrigação total necessária (ITN), que é a quantidade d'água que se necessita aplicar a cada irrigação. Tal lâmina é diretamente proporcional ao volume de água consumido em cada hectare. Nota-se, nesses quadros, que, quanto maior o tempo de irrigação diária, menor a vazão horária a aplicar.

Quadro 12 – Volume de água necessário por hectare, em metros cúbicos, em função do número de horas de funcionamento do sistema por dia

		Horas de Funcionamento do Sistema de Irrigação por Dia											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lâmina de água para irrigação (mm/dia)	1,0	10,00	5,00	3,33	2,50	2,00	1,67	1,43	1,25	1,11	1,00	0,91	0,83
	2,0	20,00	10,00	6,67	5,00	4,00	3,33	2,86	2,50	2,22	2,00	1,82	1,67
	3,0	30,00	15,00	10,00	7,50	6,00	5,00	4,29	3,75	3,33	3,00	2,73	2,50
	4,0	40,00	20,00	13,33	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00	4,44	4,00	3,64	3,33
	5,0	50,00	25,00	16,67	12,50	10,00	8,33	7,14	6,25	5,56	5,00	4,55	4,17
	6,0	60,00	30,00	20,00	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,67	6,00	5,45	5,00
	7,0	70,00	35,00	23,33	17,50	14,00	11,67	10,00	8,75	7,78	7,00	6,36	5,83
	8,0	80,00	40,00	26,67	20,00	16,00	13,33	11,43	10,00	8,89	8,00	7,27	6,67
	9,0	90,00	45,00	30,00	22,50	18,00	15,00	12,86	11,25	10,00	9,00	8,18	7,50
	10,0	100,00	50,00	33,33	25,00	20,00	16,67	14,29	12,50	11,11	10,00	9,09	8,33

Nos Quadros 13 e 14, tem-se a potência necessária para conduzir a água para irrigação nas pressões de 30 e de 20 mca, respectivamente, considerando 100% de rendimentos no sistema de bombeamento. A demanda de potência será diretamente proporcional à lâmina de irrigação e inversamente proporcional ao tempo de irrigação diária.

Quadro 13 – Potência mecânica útil (kW) para uma pressão de 30 mca, em função da lâmina de irrigação e das horas de funcionamento do sistema por dia

		Horas de Funcionamento do Sistema de Irrigação por Dia											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lâmina de água para irrigação (mm/dia)	1,0	0,82	0,41	0,27	0,21	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07
	2,0	1,63	0,82	0,54	0,41	0,32	0,27	0,24	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14
	3,0	2,45	1,23	0,82	0,61	0,49	0,41	0,35	0,31	0,27	0,24	0,22	0,21
	4,0	3,27	1,63	1,09	0,82	0,66	0,54	0,46	0,41	0,36	0,32	0,29	0,27
	5,0	4,09	2,05	1,36	1,02	0,82	0,68	0,58	0,51	0,46	0,41	0,38	0,34
	6,0	4,91	2,45	1,63	1,23	0,98	0,82	0,70	0,61	0,54	0,49	0,45	0,41
	7,0	5,73	2,86	1,91	1,43	1,15	0,96	0,82	0,71	0,63	0,57	0,52	0,48
	8,0	6,54	3,27	2,18	1,63	1,31	1,09	0,93	0,82	0,73	0,66	0,60	0,54
	9,0	7,36	3,68	2,45	1,84	1,47	1,23	1,05	0,92	0,82	0,74	0,67	0,61
	10,0	8,18	4,09	2,72	2,05	1,63	1,36	1,17	1,02	0,91	0,82	0,74	0,68

Quadro 14 – Potência mecânica útil (kW) para uma pressão de 20 mca, em relação à lâmina bruta de irrigação e horas de funcionamento do sistema por dia

		Horas de Funcionamento do Sistema de Irrigação por Dia											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lâmina de água para irrigação (mm/dia)	1,0	0,54	0,27	0,18	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
	2,0	1,09	0,54	0,36	0,27	0,22	0,18	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09
	3,0	1,63	0,82	0,54	0,41	0,32	0,27	0,24	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14
	4,0	2,18	1,09	0,73	0,54	0,43	0,36	0,31	0,27	0,24	0,22	0,20	0,18
	5,0	2,72	1,36	0,91	0,68	0,54	0,46	0,39	0,34	0,30	0,27	0,25	0,23
	6,0	3,27	1,63	1,09	0,82	0,66	0,54	0,46	0,41	0,36	0,32	0,29	0,27
	7,0	3,82	1,91	1,27	0,96	0,77	0,63	0,54	0,48	0,43	0,38	0,35	0,32
	8,0	4,36	2,18	1,46	1,09	0,88	0,73	0,63	0,54	0,49	0,43	0,40	0,36
	9,0	4,91	2,45	1,63	1,23	0,98	0,82	0,70	0,61	0,54	0,49	0,45	0,41
	10,0	5,45	2,72	1,82	1,36	1,09	0,91	0,78	0,68	0,60	0,54	0,49	0,46

Comparando os dados da potência demandada no Quadro 13 com os do Quadro 14, na mesma lâmina de irrigação, tem-se uma economia de energia elétrica de 33%, considerando-se um rendimento de 100% em ambas as situações, ou seja, a economia é proporcional ao decréscimo de pressão.

Na situação da EP1 do perímetro irrigado, foi simulado o consumo de energia elétrica atual sem uso da tarifa binômica e para consumo no próximo período, utilizou-se a tarifa binômica, como mostrado no Quadro 15. As simulações foram feitas com redução de 33% da pressão total para uma jornada diária de 15 h por dia.

Observa-se, no Quadro 15, que, com a redução na altura manométrica da EP1 em 33% e mantendo as vazões e rendimentos das bombas e o tempo de funcionamento constante, o consumo de energia elétrica reduziu proporcionalmente em relação à pressão, passando de 5.209 para 3.508 kWh por ano no sistema de bombeamento 1 e de 4.452 para 2.986 kWh por ano no sistema 2.

A diminuição na pressão afeta o valor final do custo de energia. Esses valores podem ser ainda maiores se houver a troca por sistemas de irrigação por aspersão convencional de alta pressão por outra mais eficiente de menor pressão, o que acarretará menor demanda e, conseqüentemente, menores gastos com energia.

Quadro 15 – Consumo de energia elétrica antes e depois da otimização dos conjuntos de bombeamento da EP1

	Pressão de Projeto Original		Pressão Otimizada		Diferença (%)	
	1	2	1	2	1	2
Conjunto motor e bomba						
Consumo de energia elétrica (kWh(ano) ⁻¹)	5.209	4.452	3.508	2.986	33	33
Demanda de energia elétrica (kW (ano) ⁻¹)	1713	1464	1153	982	33	33
Vazão (m ³ h ⁻¹)	380	300	380	300	0	0
Altura manométrica (mca)	100	100	67	67	33	33
Rotação do conjunto motor e bomba(rpm)	1750	1750	1432	1432	18	18
Rendimento da bomba (%)	76,0	70,5	76,0	70,5	0	0
Potência da bomba (kW)	136,3	116,0	91,3	77,7	33	33
Potência do motor (kW)	147,2	128,8	92,0	92,0	38	29
Índice de carregamento (%)	93,0	90,0	99,0	84,0	-7	6
Rendimento do motor (%)	95,5	95,1	95,0	95,0	1	0
Jornada de trabalho (h(dia) ⁻¹)	15	15	15	15	0	0
Meses por ano	8	8	8	8	0	0

A utilização de equipamentos de baixa pressão proporciona redução no custo de operação, pela diminuição na demanda de energia elétrica (kW), devido à queda na pressão do sistema. Porém, o consumo de energia elétrica (kWh) é o mesmo em ambas as situações, se for considerado que o rendimento dos conjuntos motor e bomba é igual. No entanto, é importante ressaltar que, em geral, os sistemas de baixa pressão têm eficiência de irrigação de maior resultado em demanda de maior lâmina bruta e conseqüente economia suplementar de energia.

4.2. Medidas de gerenciamento e tarifas binômias

Percebe-se que, em geral, não são dados incentivos tarifários quaisquer que implantem sistemas de irrigação mais eficientes energeticamente, ou seja, os custos de água para tais irrigantes são o mesmo que os dos outros irrigantes. A cobrança apenas da quantidade de água consumida em lote irrigado tem sido a prática mais comum, mas falta incentivo ao irrigante para proporcionar melhor eficiência geral no sistema de

bombeamento coletivo. Por esse motivo, uma reformulação da tarifa de água para cobrar apenas pela quantidade de água e se ter uma livre escolha da pressão de trabalho, nos limites permitidos do projeto mais bem adequado ao sistema implantado, pode acelerar a implantação de medidas de racionalização do uso da energia.

No Quadro 16, apresenta-se uma comparação de sistemas de irrigação por aspersão convencional e localizada com dada área irrigada, com eficiência adequada do sistema de irrigação para o tipo de irrigação, pressão e vazão ideal e o volume de cada sistema.

Quadro 16 – Comparação de sistemas de irrigação por aspersão convencional e localizada

Produtor Irrigante A (Aspersão)		Produtor Irrigante B (Localizada)
Área irrigada	=	Área irrigada
Lâmina de irrigação	=	Lâmina de irrigação
Eficiência do sistema	<	Eficiência do sistema
Pressão	>	Pressão
Vazão	>	Vazão
Tempo de irrigação	<	Tempo de irrigação
Volume bombeado	>	Volume bombeado

No Quadro 16, apresentam-se as possibilidades de a demanda e o consumo diminuir, em condições a serem aplicadas no estudo da viabilidade da tarifa de irrigação binômica nos casos distintos de consumo de energia.

Implantação de tarifas binômicas

As tarifas binômicas podem ser implantadas por indução ou por adoção.

(i) Tarifa binômica por indução

Caracteriza-se pela conscientização do grupo de irrigantes para formalizar o fornecimento de água. Essa conscientização deverá seguir um

planejamento e não é arbitrária, mas, sim, de livre escolha e em comum acordo, como horário de funcionamento e seqüência na distribuição de água, entre outros.

(ii) Tarifa binômia por adoção

Caracteriza-se pelo cumprimento de normas que são adotadas, podendo ser sujeitas à penalização no seu descumprimento. A vantagem é que podem ser previstos os seus impactos econômicos, bem como direcionar investimentos futuros.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados deste trabalho e as condições sob as quais foi realizado, pode-se concluir que:

- A tarifa binômica mostrou-se uma boa ferramenta de racionalização do uso de água e de energia elétrica pela melhor utilização dos recursos. No entanto, a aplicação da tarifa binômica no perímetro irrigado de Mirorós depende da conscientização dos irrigantes e de investimento em equipamentos para medição e registro de pressão.
- A migração dos produtores que utilizam métodos de irrigação com baixa eficiência, ou tradicionais, para outros de melhor eficiência pode ser intensificada e ter como consequência a redução nos gastos com energia se a tarifa binômica for adotada.
- A liberdade de escolha de sistemas de irrigação é uma tendência democrática que permite custos menores de produção agrícola.
- A implantação de novos métodos de tarifação incentiva a adoção de sistemas de irrigação mais eficientes no uso dos recursos água e energia.

- Os valores dos lotes na licitação poderiam ser diferenciados de acordo com a pressão de chegada na tomada de água de cada lote, ou seja, sua diferença de nível até o bombeamento influenciaria o preço de aquisição do lote.
- A diminuição na pressão de trabalho pode proporcionar economia nos gastos com energia elétrica, especialmente quando o sistema de bombeamento tiver equipamento de controle de velocidade, por meio da alteração da frequência de trabalho do motor. Isso pode ocasionar controle do desperdício de energia elétrica e, conseqüentemente, menor valor da tarifa de consumo e de demanda de energia elétrica. Mostrou-se que essa economia pode ser repassada aos irrigantes.

6. REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. O processo de outorga de águas e licenciamento ambiental para irrigação. Minicurso. In. CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 12., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, MG: ANA, 2002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Por dentro da conta de luz:** informação de utilidade pública. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2007. 32 p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Por dentro da conta de luz:** informação de utilidade pública. Brasília: ANEEL, 2002. (Resolução ANEEL 540).

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa de energia elétrica.** Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: jan. de 2007.

BRASIL. LEI Nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 – **Lei das águas.**

CAVALCANTI, J. E. A.; DA COSTA, F. A. Impactos sócio-econômicos da irrigação na região mineira da SUDENE. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 29, p. 573-597, julho 1998. Número especial.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Condições gerais de fornecimento de energia elétrica.** Rio de Janeiro, 2001, 29 de novembro de 2000. (Resolução ANEEL 456).

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Estudo de otimização energética.** Belo Horizonte, 1993. 22 p.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. **Tarifas horo-sazonais.** Rio de Janeiro, 1988. (Manual de orientação ao consumidor).

COSTA, J. M. **Análise exergética em sistemas elétricos**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 2001. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DENÍCULI, W. **Bombas hidráulicas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2001. 162 p.

EFFERTZ, R.; OLSON, D. C.; VISSA, R.; ARRUMATEGUI, H. **Operação e manutenção de projetos irrigados**. Trabalho elaborado pelo Bureau of Reclamation, do Departamento de Interior dos Estados Unidos, por solicitação da Secretaria de Irrigação do Governo Brasileiro. Brasília: Secretaria de Irrigação, 1993. 490 p. (Manual de Irrigação, 4).

LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. O Uso da Irrigação no Brasil. In: **Estado das águas no Brasil – 1999**: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos, Brasília: SIH/ANEEL/MME; SRH/MMA, 1999. p. 73-82.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. Brasília: Embrapa-CNPq, 1998. 15 p. (Embrapa-CNPq. Circular Técnica, 11).

MOREIRA, H. J. F.; SOARES, G. A.; TABOSA, R. de P.; SHINDO, R. **Guia operacional de motores elétricos**. Versão 2000. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000. 161 p.

OLIVEIRA FILHO, D.; TANABE, C. S.; COSTA, J. M. Considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Amb.**, Campina Grande, v. 4, n.1, p.114-119, 2000.

RIBEIRO, M.C. **Estudo sobre racionalização do uso de energia na irrigação**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SILVA JÚNIOR, J. P. da. **Combate ao desperdício de energia**. Juiz de Fora, MG: UFJF, 2005. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

SOUZA, G. H. F. de; BRITO, R. A. L.; DANTAS NETO, J.; SOARES, J. M.; NASCIMENTO, T. Desempenho do Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho. **Rev. Bras. Eng. Agríc. e Amb.**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 204-209, 2001.

TANABE, C. S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 1998. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

VALDES, A.; WAGNER, E.; MARZALL, I.; SIMAS, J.; MORELLI, J.; PEREIRA, L. P.; AZEDO, L. G. T. **Impactos e externalidades sociais da irrigação do semi-árido brasileiro**. Brasília: Banco Mundial, 2004. v. 5, 115 p. (Série Água Brasil).

CAPÍTULO 2

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA BARRAGEM MANOEL NOVAES, IBIPEBA, BAHIA

RESUMO

Este estudo é importante pelo fato de existir o desperdício de potencial energético em barragens de uso exclusivo para acumulação e distribuição de água. No momento em que a tomada de água da barragem é acionada para abastecimento, ela pode, também, gerar energia elétrica, contribuindo para a redução no custo de irrigação. A barragem Manoel Novaes, incrustada na Chapada Diamantina, no Município de Ibipeba, Bahia, é uma delas, a qual tem potencial para, pelo menos, garantir o suprimento energético de uma das cinco estações de bombeamento do perímetro de irrigação de Mirorós. O potencial da barragem para a geração de energia elétrica chega a 500 kW, e o período crítico de demanda dessa energia situa-se entre os meses de agosto e novembro. A maior média registrada de demande de potência nas estações de bombeamento em três anos consecutivos foi na EP3, com 534 kW, para uma área de 313 ha e dotação de $1,37 \text{ L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$ no mês de setembro. Representa 26% do total de economia no valor da tarifa de energia elétrica no mês mais crítico, e a energia produzida pela microcentral hidrelétrica pode chegar a representar 29,4% da

demanda total por mês. Esse empreendimento se paga no período de 5 anos e 8 meses, o que viabiliza a sua construção.

Palavras-chave: Turbina hidráulica, geração de energia elétrica e perímetro irrigado.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, as civilizações têm utilizado a energia da água para processos agrícolas, como a roda d'água para moagem de grãos, o acionamento de bombas d'água e a geração de energia elétrica por meio de turbinas, entre outras.

Pequenas hidrelétricas no Brasil surgiram no final do século XIX. Porém, o grande impulso no uso da energia produzida pela água para geração de energia elétrica começou no início do século 20, devido à industrialização no interior do país, principalmente as indústrias têxteis.

A partir da metade do século XX, com a implantação de grandes usinas hidrelétricas com capacidade para maximizar a geração de energia e com os sistemas de malhas interligados, as pequenas centrais hidrelétricas começaram a perder espaço, tornando-se obsoletas e pouco atrativas.

As maiores reservas mundiais de hidroenergia estão no Brasil, dada a sua imensa quantidade de rios, apresentando, assim, grande potencial de aplicação a pequenas e microcentrais hidrelétricas no atendimento a populações dispersas em áreas rurais (CEPEL, 2000).

O uso de geração descentralizada por meio de pequenas e mini-centrais hidrelétricas tem por objetivo aumentar a oferta de energia elétrica em escala para o desenvolvimento econômico e social do país.

A implantação e operação de pequenas centrais hidrelétricas pode proporcionar alguns benefícios, como: (i) reduzir a demanda da rede

nacional de energia elétrica; (ii) garantir a geração de eletricidade renovável para uso local; (iii) evitar significativamente os impactos ambiental e social que seriam causados pela construção de grandes hidrelétricas; e (iv) impulsionar o desenvolvimento e as economias regionais, promovendo, assim, melhoria na qualidade de vida das comunidades locais.

Classificam-se as Pequenas Centrais Hidrelétricas em micro, mini e pequenas centrais, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH

Características	Micro	Mini	Pequena
Potência máxima (kW)	100	1.000	30.000
Altura máxima da barragem (m)	3	5	10
Vazão máxima da central (m ³ s ⁻¹)	2	15	20
Mínimo de grupos geradores p/ vazão máxima	1	2	2
Potência máxima do grupo de gerador (kW)	100	1.000	30.000
Período máximo para implantação (meses)	6	12 a 24	18 a 36

Fonte: CEPEL, 2000.

A Lei nº 9.648 autoriza a dispensa de licitações para empreendimentos hidrelétricos de até 30 MW de potência instalada para Autoprodutor e Produtor Independente (ANEEL, 1998). A concessão será outorgada mediante autorização até esse limite de potência, desde que os empreendimentos mantenham as características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. A Resolução da ANEEL 394 estabelece que os aproveitamentos com características de PCH são aqueles com potência entre 1.000 e 30.000 kW e área inundada de até 3,0 km²; esse tipo de empreendimento possibilita melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais (ANEEL, 1998). A partir de 1998, a construção dessas unidades de geração foi incrementada por meio de uma série de mecanismos legais e regulatórios (ANEEL, 2003).

Podem, ainda, as PCH ser classificadas quanto à potência instalada e à queda de projeto, como mostrado no Quadro 2, considerando-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada.

Quadro 2 – Classificação das PCH quanto à potência e queda de projeto

Classificação das Centrais	Potência - P	Queda de Projeto - H (m)		
	(kW)	Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$100 < P < 1000$	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequena	$1000 < P < 30000$	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fonte: ELETROBRÁS, 2007.

Conforme a apresentação do Projeto de Lei 523, o Brasil planeja que até 2020 a produção de eletricidade de fontes alternativas corresponda a 25% de toda a energia gerada e consumida no território nacional, devendo, até 2030, essa participação porcentual subir para 35% (BRASIL, 2007). O Parágrafo Primeiro do Art. 11 diz que: “a construção e a reativação de PCH será estimulada mediante mecanismos financeiros, tributários e econômicos para possibilitar, assim, a geração distribuída de energia hidrelétrica e a geração autônoma para atendimento das próprias necessidades, dentre os quais o imposto de renda incidente sobre as receitas provenientes das vendas de energia gerada pelas empresas proprietárias das pequenas centrais hidrelétricas terá seu recolhimento diferido por prazo não inferior a 5 (cinco) anos”.

Outra forma de viabilizar o aproveitamento de pequenas quedas de água é a utilização de equipamentos alternativos para geração de energia elétrica, como: bombas hidráulicas funcionando como turbina e motores elétricos funcionando como geradores. Segundo Balarim et al. (2004), para potências geradas de até 50 kW é indicado o uso de bombas funcionando como turbina.

Nos últimos anos, a potência instalada de geração de energia elétrica não acompanhou o crescimento da demanda de energia, e a falta de planejamento e os equívocos nas gestões do setor elétrico ocasionaram crises energéticas, evidenciando-se o racionamento de energia de 2001. A partir de então, as PCHs voltaram a ter destaque (TIAGO FILHO, 2002; TIAGO FILHO; LEMOS, 2007).

O aproveitamento de barragens de acumulação de água já existentes para geração de energia elétrica poderá contribuir para o desenvolvimento sustentável, quando satisfaz as necessidades atuais, sem comprometer o meio ambiente (VILAS BOAS, 2006).

No Brasil existem inúmeras barragens, cujo principal objetivo é a formação de reservatórios para abastecimento de água, perenização de cursos d'água e armazenamento de água para irrigação. O uso desses reservatórios para geração de energia elétrica poderia contribuir em parte com o aumento da oferta de energia, além de reduzir os gastos com energia dos distritos de irrigação.

2. OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo estudar a viabilidade do uso potencial de geração elétrica de pequena barragem do Distrito de Mirorós, usada para o abastecimento de água e irrigação.

3. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

A barragem está próxima do distrito de Mirorós, Município de Ibipeba, Estado da Bahia. De propriedade do governo federal e administrada pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (CODEVASF), tem área de contribuição na seção de barramento de 1.771 km² e está localizada no leito do rio Verde, entre as coordenadas 11°25' e 12°60' de latitude sul e 42°10' e 42°34' de longitude oeste (Figura 1)

No Quadro 3, apresentam-se dados técnicos da barragem.

O vertedouro (Figura 2) é composto de: (i) estrutura de concreto armado; (ii) duas comportas; (iii) largura de 31,5 m; (iv) revanche igual a 3 m; (v) altura da lâmina de 10 m; e (vi) cota da soleira de 522 m.

A tomada de água (Figura 3) é composta por: (i) torre de comando; (ii) seção da tomada de água com secção retangular de 4,00 x 4,50 m; (iii) extensão da galeria de 250 m; (iv) vazão do projeto de 5,0 m³s⁻¹; e (v) cota da tomada d'água de 492 m.

O reservatório da barragem (Figura 4) caracteriza-se por: (i) capacidade de armazenamento de 158 milhões de m³ de água; (ii) superfície do lago igual a 780 ha; (iii) nível máximo da lâmina d'água igual a 533 m; nível máximo operacional igual a 532 m; (iv) nível mínimo operacional igual a 495 m; e (v) volume útil igual a 153,6 milhões de m³ de água.

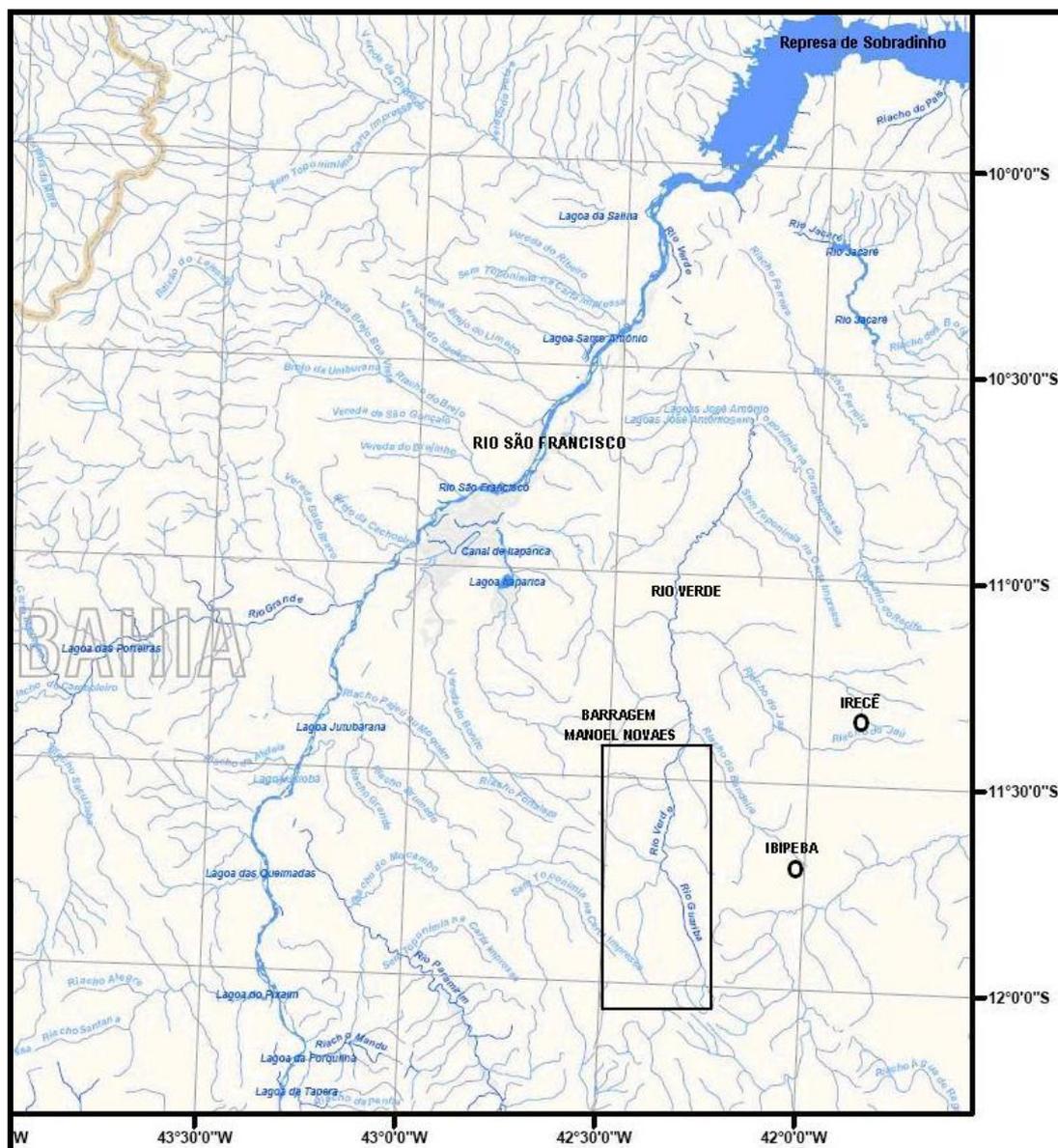


Figura 1 – Mapa de localização da bacia da barragem Manoel Novaes.
Fonte: ELETROBRÁS, 2005.

Quadro 3 – Características da barragem Manoel Novaes

Tipo	Solo Compactado; Protegida com Enrocamento
Altura máxima (m)	70
Comprimento (m)	320
Largura máxima da base (m)	350
Largura do coroamento (m)	10
Cota da crista (m)	535

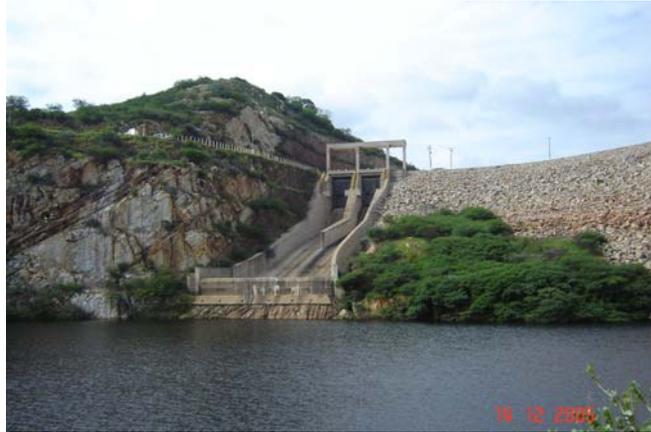


Figura 2 – Vista do vertedouro da barragem Manoel Novaes.



Figura 3 – Vista da torre de controle da barragem Manoel Novaes.

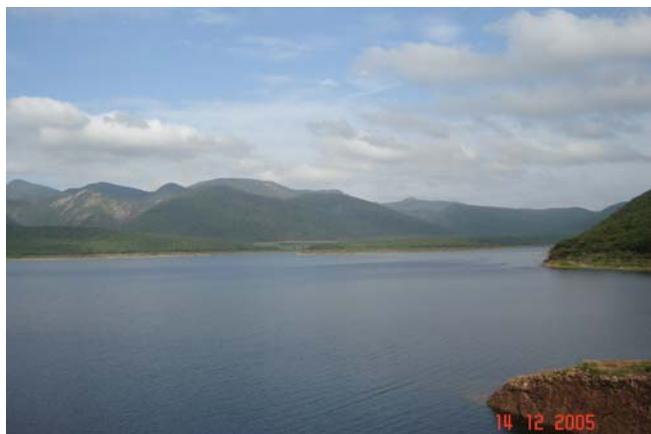


Figura 4 – Vista do reservatório da barragem Manoel Novaes.

Para a tomada d'água, previu-se, inicialmente, uma vazão de $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Porém, para a vazão de projeto, feita a verificação nos estudos hidrológicos de regularização da barragem em 90%, é de $2,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (CODEVASF, 1994).

Na Figura 5, apresentam-se informações referentes às cotas da barragem por um período de mais de oito anos.

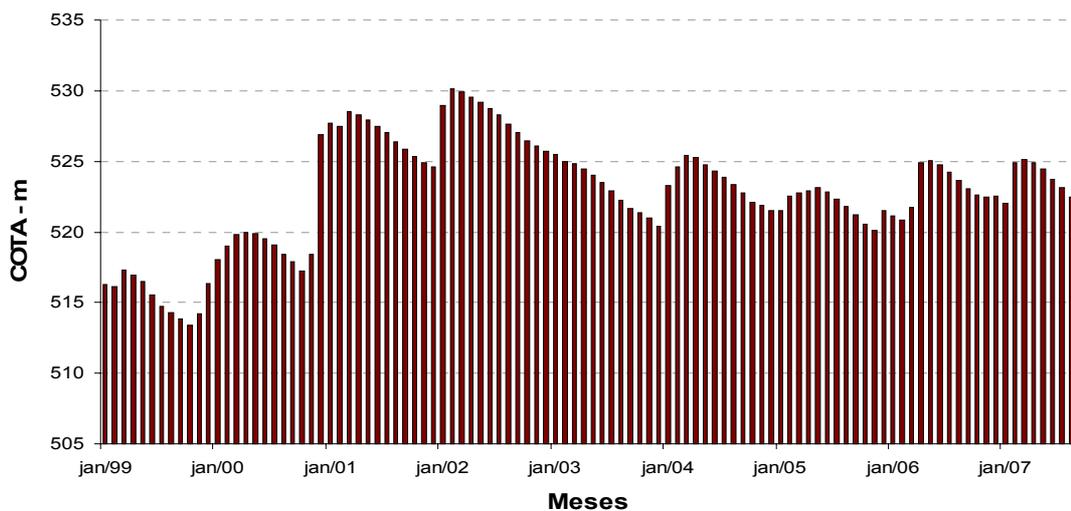


Figura 5 – Nível da barragem Manoel Novaes no período de 1999 a 2007.
Fonte: DIPIM, 2007.

Nota-se, na Figura 5, que, dentro do período de oito anos, a cota mínima da barragem foi igual a 513 m em outubro de 1999, que corresponde a um volume de armazenagem de 51,06 milhões de m^3 , não prejudicando o fornecimento de água para irrigação, abastecimento urbano e manutenção da vazão ecológica do curso d'água.

As informações, obtidas no Manual de Operação e Manutenção do Projeto de Irrigação de Mirorós (CODEVASF, 1994), de que as simulações foram realizadas com vazões entre $0,5$ e $5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ evidenciaram que a barragem tem condições de garantir, com probabilidade de 90%, uma vazão de $2,25 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A vazão média da bacia a montante da barragem, calculada para o período de 46 anos, foi de $3,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Entre os meses de dezembro a maio ocorrem 85% do total anual da captação de água.

Por esses estudos, estabeleceram-se proporções para o uso da água em atendimento ao abastecimento humano, irrigação e descarga ecológica, como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Disponibilidade hídrica da barragem Manoel Novaes

Finalidade do Uso da Água	Vazão Disponível
Demanda da Adutora do Feijão	0,70 m ³ s ⁻¹
Demanda do projeto de irrigação de Mirorós	1,30 m ³ s ⁻¹
Leito do rio Verde	0,25 m ³ s ⁻¹
Total da demanda	2,25 m ³ s ⁻¹

Fonte: CODEVASF, 1994.

Conforme mostrado no Quadro 4, a distribuição do volume de água de 0,25 m³s⁻¹ para perenização do rio Verde e vida aquática no leito do rio permite o abastecimento das lavouras irrigadas de particulares situadas nas várzeas do rio, a jusante da barragem. A vazão de 0,7 m³s⁻¹ é destinada ao consumo humano e abastecimento das cidades próximas, por meio da Adutora do Feijão, administrada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA). A vazão de 1,3 m³s⁻¹ destina-se ao Projeto de Irrigação de Mirorós, em que a jusante da barragem a água é distribuída por meio do canal principal.

4. POTENCIAL HIDROENERGÉTICO

Uma vez determinados o nível máximo normal da água e o deplecionamento do reservatório, são realizadas simulações da operação da usina visando obter os valores característicos de quedas que são usados no dimensionamento das turbinas.

A queda líquida disponível, ou queda de referência, em uma usina hidrelétrica depende dos níveis d'água a montante e a jusante da usina, ou seja, do nível do reservatório e do nível do canal de fuga. Essa queda varia com a operação da usina.

Entende-se por canal de fuga a estrutura que faz a recondução da água para o rio, após a passagem pela turbina.

Para o projeto das turbinas de uma usina hidrelétrica, quatro parâmetros básicos são determinados: (i) queda de referência, (ii) queda de projeto, (iii) queda máxima e (iv) queda mínima.

Queda líquida ou queda de referência – H_{ref}

Queda líquida para a qual a turbina, com abertura total do distribuidor, fornece a potência máxima do gerador. A queda de referência é dimensionada para a permanência de 95% do tempo na curva de distribuição de quedas na usina, em simulação para todo o histórico de vazões. Esse critério considera que, em 95% do tempo, a turbina deve ser capaz de fornecer a potência nominal do gerador (Figura 6).

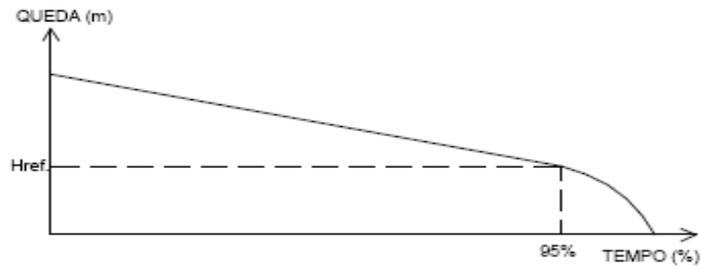


Figura 6 – Permanência de queda no tempo.

A queda de referência é também chamada de queda líquida nominal. Por meio dela se faz o chamado "Casamento Turbina-Gerador", pois, para quedas abaixo dessa, a turbina limita a potência máxima da usina, enquanto para quedas acima a potência fica limitada pelo gerador. A Figura 7 ilustra essa situação.

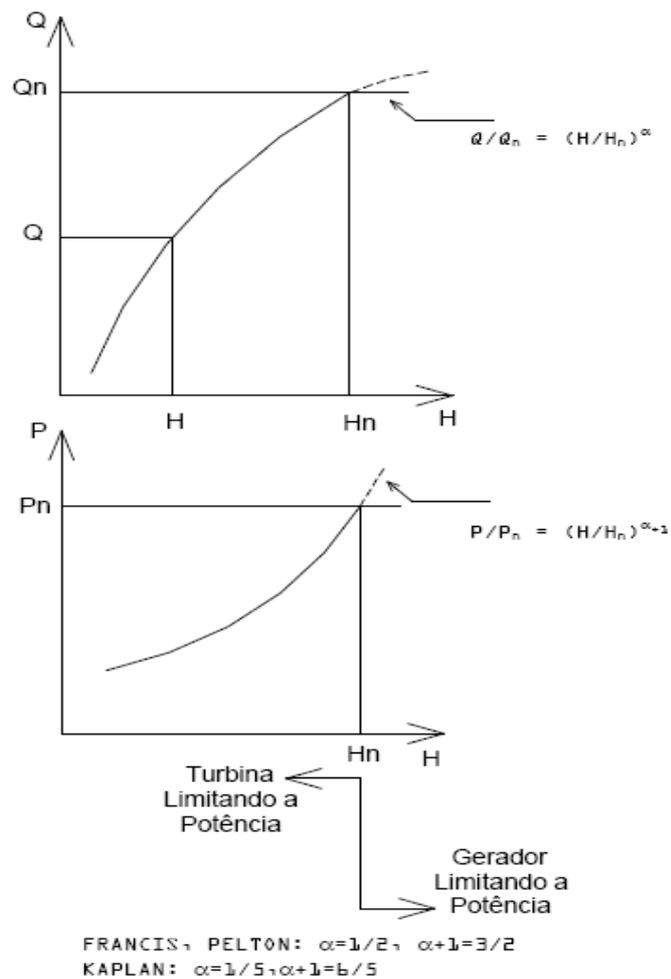


Figura 7 – Características técnicas do conjunto turbina-gerador.

A potência a ser instalada deve ser recalculada com base na queda líquida final obtida por meio da determinação de perdas de carga no sistema adutor. Essas perdas são advindas da perda de carga na tomada d'água do canal e perda de carga na tomada d'água da tubulação forçada. Nas situações de uso da descarga de fundo da barragem para captação de água, calculam-se a perda de carga na entrada da tubulação forçada e a perda de carga por atrito.

Queda de projeto

Entende-se esta ser aquela para a qual o rendimento da turbina é máximo. A queda de projeto é dimensionada como aquela mais freqüente, ou seja, a moda da distribuição de quedas na usina, obtida da simulação da operação desta para o histórico de vazões naturais conhecidas (Figura 8) (ELETROBRÁS, 2007).

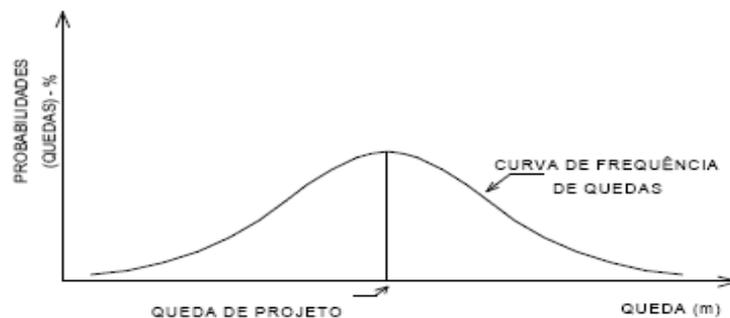


Figura 8 – Distribuição de quedas de projeto de uma usina hidrelétrica.

As quedas de referência e de projeto devem ser determinadas considerando-se o sistema de referência de médio prazo – planejamento de 15 anos.

Queda máxima operativa

É aquela obtida pela diferença entre o nível máximo normal de operação do reservatório e o nível do canal de fuga com uma unidade

operando a plena carga, subtraída a perda hidráulica do circuito de geração (ELETROBRÁS, 2007).

Queda mínima operativa

Entende-se a menor queda entre a obtida pela diferença entre o nível mínimo de montante e o nível do canal de fuga. As quedas máximas e mínimas operativas devem ser determinadas tanto para a época de entrada em operação da usina quanto para o horizonte de médio prazo, valendo sempre a pior condição (ELETROBRÁS, 2007).

Os trabalhos foram executados com dados referentes ao uso da água da barragem Manoel Novaes para o projeto de irrigação, Adutora do Feijão para as cidades vizinhas e perenização do rio.

Atualmente, a vazão ecológica do rio Verde está em torno de $0,33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, e a Embasa, localizada em Mirorós, trabalha com a vazão de $0,50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de jornada diária de 20h30, deixando de funcionar no período de ponta das 17h30 às 21 h.

Na Figura 9, tem-se uma representação do perfil da barragem Manoel Novaes, conforme dados da sua construção.

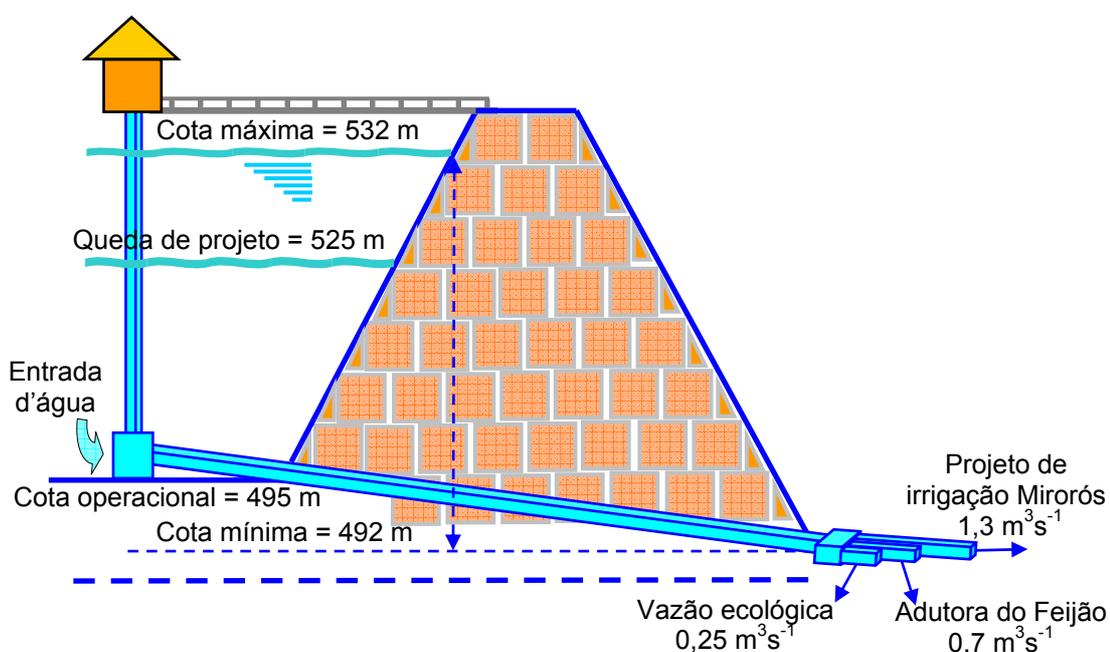


Figura 9 – Representação esquemática do perfil da barragem Manoel Novaes.

O sistema de distribuição de água no perímetro se dá em cinco estações de bombeamento, como apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Água utilizada para irrigação em cada EP do perímetro irrigado de Mirorós

Mês do Ano	Volume Mensal Bombeado por Estação (m ³)					Volume Total Bombeado (m ³)	Volume Estimado Diário Bombeado (m ³)	Vazão (m ³ h ⁻¹)
	EP I	EP II	EP III	EP IV	EP V			
Jan.	187.513	218.281	165.020	30.877	45.018	646.709	20.862	1.490
Fev.	193.437	176.271	105.202	113.050	81.478	669.438	23.909	1.708
Mar.	276.755	274.337	227.408	145.134	162.100	1.085.734	35.024	2.502
Abr.	196.173	216.234	145.517	114.462	170.227	842.613	28.087	2.006
Mai	228.288	336.433	272.433	176.179	225.178	1.238.511	39.952	2.854
Jun.	227.876	312.835	286.963	158.486	214.262	1.238.511	41.284	2.949
Jul.	221.299	307.215	277.886	195.546	196.581	1.198.527	38.662	2.762
Ago.	157.429	222.942	197.112	156.951	194.408	928.842	29.963	2.140
Set.	246.718	386.567	302.714	192.904	257.331	1.386.234	46.208	3.301
Out.	188.120	348.101	228.610	183.425	179.829	1.128.085	36.390	2.599
Nov.	36.036	52.879	33.537	55.431	36.735	214.618	7.154	511
Dez.	10.377	11.256	22.976	12.957	11.464	69.030	2.227	159
Volume total bombeado	2.170.021	2.863.351	2.265.378	1.535.402	1.774.611	10.608.763	349.720	24.980
Vazão média mensal	180.835	238.613	188.782	127.950	147.884	884.064	29.143	2.082

Nos gastos de água para a irrigação com bombeamento diário de 14 h, a vazão média aproximada para irrigação dos lotes familiares, dentro do período crítico da irrigação que ocorre de março a outubro, é de 2.640 m³ h⁻¹ ou 0,73 m³s⁻¹, conforme projeção no Quadro 5. O restante da vazão projetada para o perímetro é reservado para utilização em lotes empresariais.

Potencial hidrelétrico

A vazão na concepção do projeto de irrigação e demais usos foi de 2,25 m³s⁻¹. O nível da barragem para a determinação da cota da queda de

projeto de 521 m foi analisado por meio do volume compreendido entre os anos de 1999 e 2007.

O Manual de Minicentrals Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 1988) recomenda que, na falta de informações dos rendimentos da turbina e do gerador para estudos de viabilidade, podem-se usar 77% para a eficiência da turbina e 95% para a eficiência do gerador. Nesse caso, o rendimento global ficaria em 73%.

A Figura 10 ilustra a queda de maior freqüência na barragem Manoel Novais para uso no cálculo do dimensionamento da turbina.



Figura 10 – Freqüência das quedas de projetos da barragem Manoel Novaes.

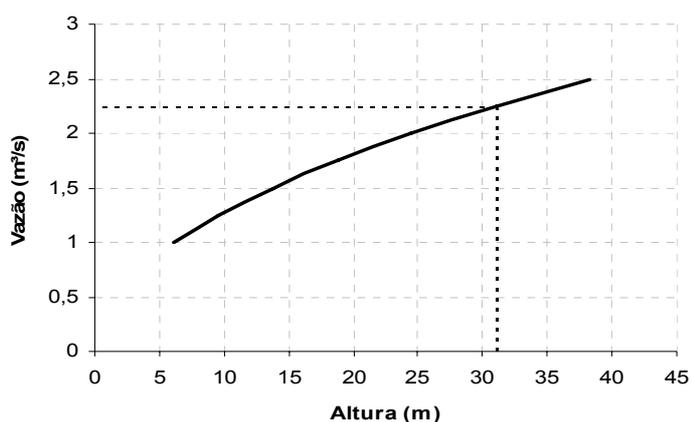
Observando a Figura 10, nota-se que as maiores freqüências na queda para o dimensionamento de maior rendimento da turbina ficaram nas cotas de 523 m e 525 m, com 14,4% de repetições. O valor da cota 523 m foi adotado neste estudo.

O local ideal para a instalação da turbina e do gerador de energia elétrica é próximo à tomada d'água do canal de irrigação na cota de 492 m. Na possibilidade de instalação nesse local, pode-se ter um desnível até a

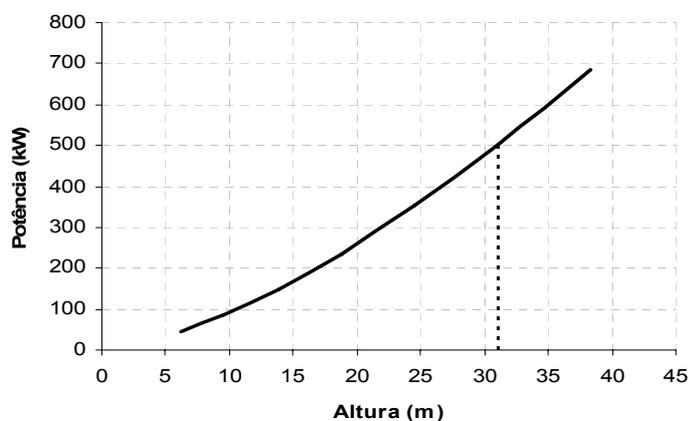
cota de queda de projeto de 31 m, que foi a diferença entre as cotas 523 e 492 m.

A tubulação forçada poderá ser a mesma já utilizada, de concreto armado, para tomada d'água. Um dos pontos indicados para a instalação da turbina e do gerador pode ser no final da galeria, que é ideal, para um melhor aproveitamento hidroelétrico. A construção de uma tubulação forçada construída com chapa de aço soldada facilitará a obtenção de melhor rendimento global. As perdas de cargas oriundas da movimentação da água dentro da galeria e do tubo de aço foram desconsideradas.

Na Figura 11, apresenta-se a relação da vazão e da potência com a altura de queda.



(a)



(b)

Figura 11 – Curvas da vazão e da potência em função da altura de queda.

A altura de queda e a vazão alteram o potencial de geração de energia elétrica pela turbina, como mostrado na Figura 11. O gerador trabalha em condição ideal até o limite de 31 m de queda e a turbina, em condição ideal acima de 31 m. Esse casamento turbina e gerador proporciona o ponto ótimo de geração de energia elétrica na barragem Manoel Novaes.

Na Figura 12, mostra-se o local de descarga da água para uso do projeto de irrigação, Adutora do Feijão e perenização do rio Verde.

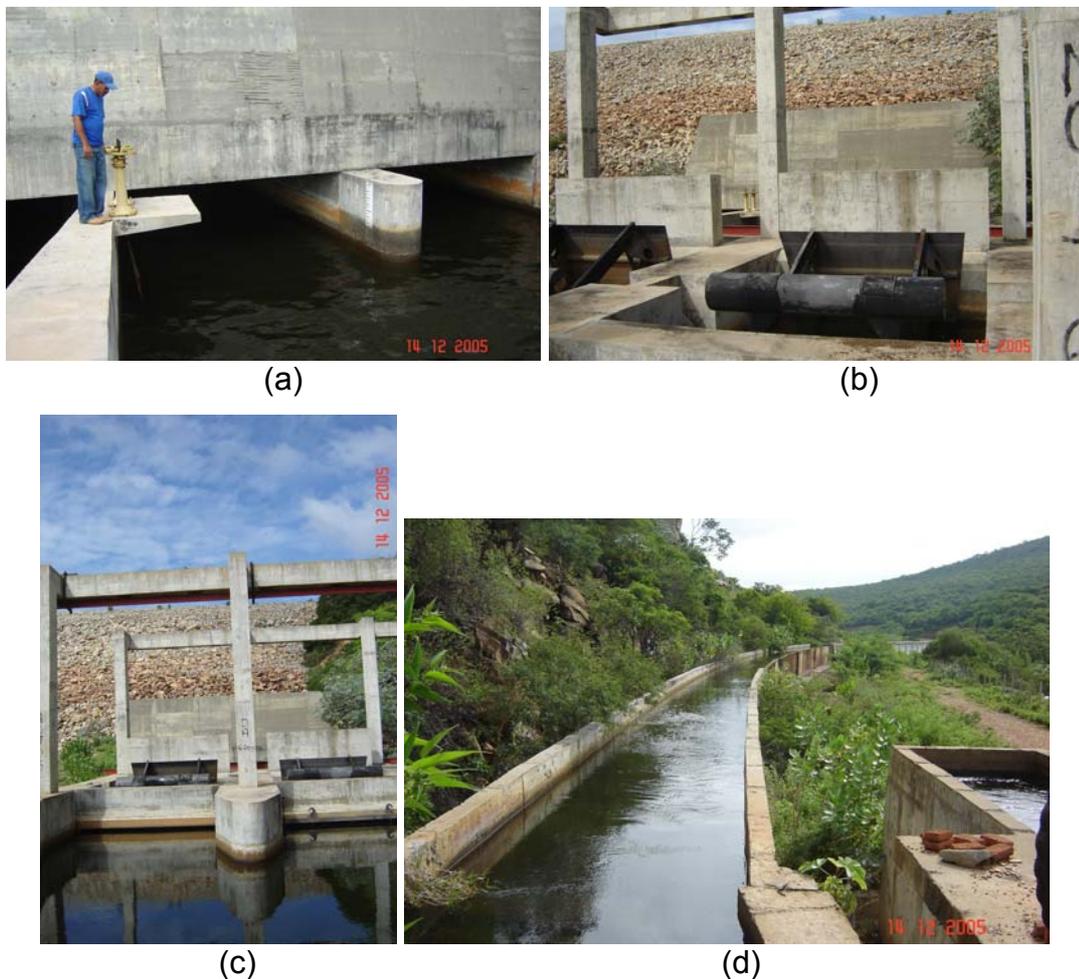


Figura 12 – Local de saída da água da barragem.

Na análise preliminar das Figuras 12 e 13, mostra-se a viabilidade técnica de instalação da casa de máquinas da PCH na tomada d'água.



Figura 13 – Vista panorâmica a jusante da barragem.

5. UNIDADES GERADORAS

Dependendo de cada tipo de turbina a ser utilizada na hidrelétrica, deverá ser avaliada a vazão turbinada mínima (abaixo da qual a máquina deve ser desligada) de cada uma das unidades, de forma a compatibilizar essa capacidade de vazão turbinada mínima com as vazões de estiagem do curso d'água em estudo. Tal critério visa aproveitar as vazões baixas do rio para geração de energia, tendo em vista que esse é o período em que a energia é mais valorizada.

5.1. Equipamentos eletromecânicos

As turbinas hidráulicas utilizadas nas mini e pequenas centrais hidrelétricas devem ser escolhidas de modo a obter facilidade de operação e de manutenção, dando-se grande importância à sua robustez e confiabilidade, pois a tendência é de que a usina seja operada no modo não assistido. Na escolha da turbina, devem-se analisar, além dos parâmetros técnicos e do seu preço, a capacidade de imediato atendimento, em caso de problemas durante o funcionamento, e a disponibilidade para fornecimento de peças sobressalentes, por parte do fabricante.

A escolha da velocidade de rotação da turbina depende da potência nominal, da altura de queda, do tipo de turbina e do tipo de gerador. As características referentes a cada turbina serão tratadas juntamente com o

tipo específico da turbina, porém a influência do tipo de gerador na escolha da velocidade de rotação da unidade é focado de modo abrangente nos diversos tipos de turbinas. São considerados dois tipos de geradores: (i) assíncrono e (ii) síncrono.

No gerador assíncrono ou no síncrono, a velocidade de rotação é a mesma na turbina e no gerador. Assim, deve-se procurar a velocidade síncrona mais próxima da calculada, conforme fórmulas típicas para cada tipo de turbina (equação 2.1).

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

em que:

n_s = velocidade de rotação síncrona, em rpm;

f = frequência da rede, em Hertz; e

p = número de pólos do gerador, adimensional.

5.2. Seleção do tipo de turbina hidráulica

Uma vez obtidas a queda líquida (m) e a vazão (m^3s^{-1}), pode-se encontrar o tipo de turbina recomendado. Para isso, deve-se utilizar o ábaco da Figura 14, em que estão representadas, em caráter orientativo, as faixas de utilização de cada turbina. Essa seleção permite, também, obter a potência estimada do conjunto turbina-gerador (kW), bastando, para isso, interpolar os valores das linhas oblíquas. A faixa de potência unitária adotada nas minicentraís é de 100 kW até 1.000 kW, valendo como entrada os valores de queda até 200 m e vazão de até $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A potência indicada na Figura 14 é aproximada, pois supõe rendimentos constantes de 95% para o gerador e 77% para a turbina.

As turbinas “Banki” podem ser utilizadas em uma faixa de quedas e descargas bastante ampla. De modo geral, toda a faixa atendida pela turbina “Francis”, até o limite de potência da ordem de 500 kW, é adequada para turbinas do tipo Banki. O custo de uma turbina Banki é menor do que o de uma turbina Francis de mesma queda e potência. Porém, as indústrias no ramo têm experiência significativa com turbinas Francis, o que não acontece com as turbinas do tipo Banki.

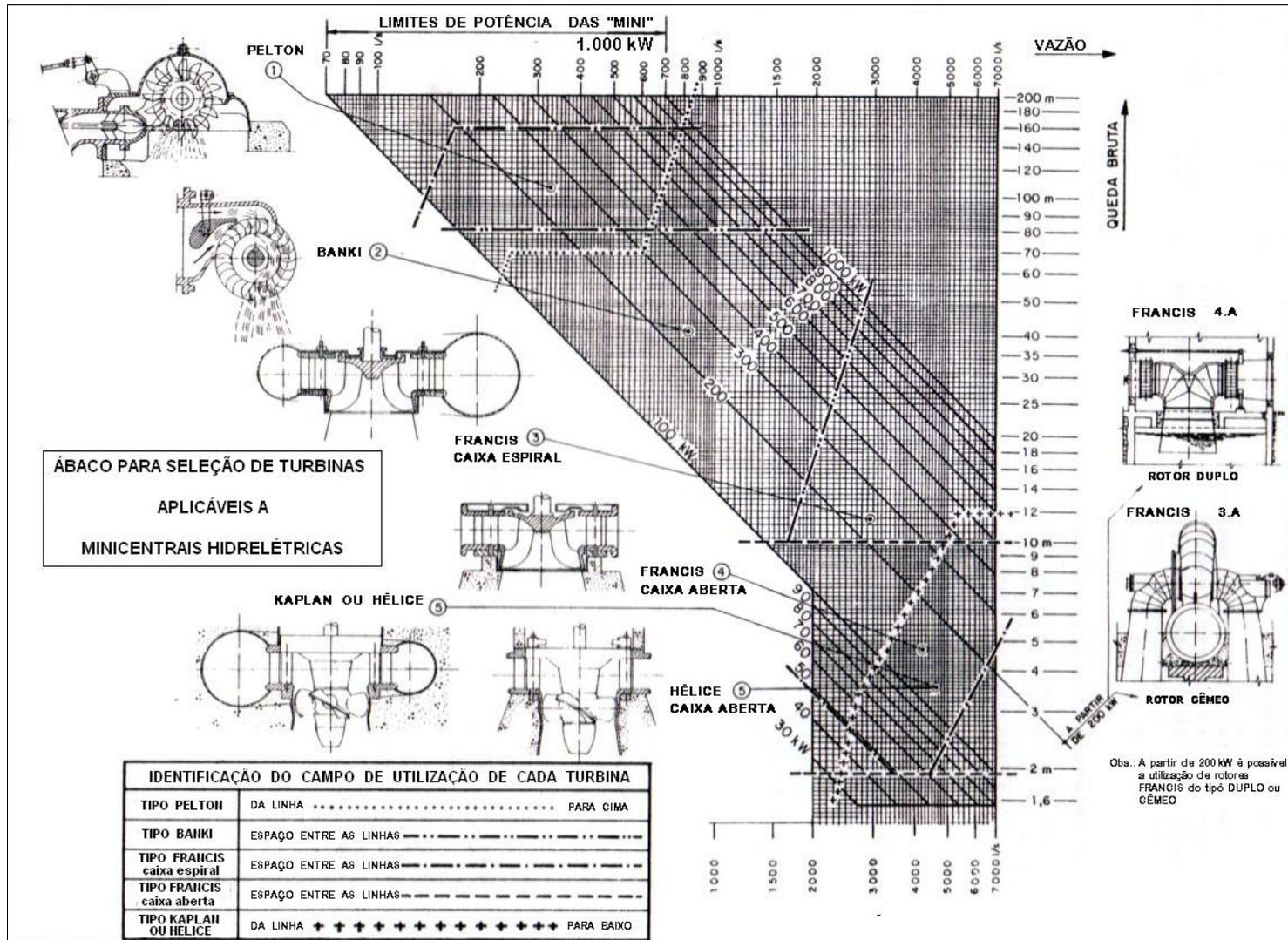


Figura 14 – Seleção de turbinas aplicáveis a minicentrais hidrelétricas.
Fonte: ELETROBRÁS, 1988.

A queda líquida (m) e a vazão de projeto por turbina (m^3s^{-1}) são os parâmetros utilizados na escolha preliminar do tipo de turbina e, também, para estimar a potência (kW). A partir desses dados, é possível determinar a velocidade específica da turbina, fator importante para o dimensionamento futuro, pela equação 2.2.

$$n_s = \frac{n P_n^{0,5}}{H_{liq}^{1,25}} \quad (2.2)$$

em que:

- n_s = velocidade específica da turbina, rpm;
- n = velocidade da rotação da turbina, rpm;
- P_n = potência nominal da turbina, kW; e
- H_{liq} = queda líquida, m.

A Norma NBR 12591 – Dimensões Principais de Turbinas para PCH (ABNT, 1992) utiliza o conceito de velocidade específica calculada por meio da queda e da vazão nominal pela equação 2.3.

$$n_s = \frac{n Q_n^{0,5}}{H_n^{0,75}} \quad (2.3)$$

em que:

- n_s = velocidade específica da turbina, rpm;
- n = velocidade da rotação da turbina, rpm;
- Q_n = vazão garantida ou nominal, m^3s^{-1} ; e
- H_n = altura de queda nominal, m.

É recomendada uma velocidade máxima de escoamento na tubulação, conforme o material empregado, como apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Velocidade admissível da água em condutos forçados em função do material empregado

Material	Velocidade Máxima Admissível (m s ⁻¹)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: ELETROBRÁS, 1988.

A potência indicada no gráfico da Figura 8 corresponde à potência instalada ou à da saída do gerador, apresentada na equação 2.4.

$$P = 9,81 Q H_{liq} \eta_T \eta_G \quad (2.4)$$

em que:

- P = potência instalada, kW;
- Q = vazão da turbina, m³s⁻¹;
- H_{liq} = queda líquida, m;
- η_T = rendimento da turbina, decimal; e
- η_G = rendimento do gerador, decimal.

A potência instalada (P) para o gerador será de:

$$P = 9,81 \times 2,25 \times 31 \times 0,77 \times 0,95$$

$$P = 500 \text{ kW}$$

6. VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DA PCH EM MIRORÓS

O estudo de viabilidade econômica foi realizado considerando-se: número de horas de funcionamento anual, vida útil, taxa de juros, aumento da energia acima da inflação no horizonte de planejamento, preço da energia elétrica (kWh) e da demanda de potência (kW) no horário-de-ponta e preço das máquinas e equipamentos, entre outros.

Foram utilizados, como parâmetros econômicos, a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL), a Relação Benefício/Custo (RB/C) e o Tempo de Retorno do Capital (TRC) (FRIZZONE; SILVEIRA, 2000).

(i) Taxa interna de retorno (TIR)

Define-se como aquela taxa de juro que faz que a somatória dos fluxos de caixa descontados para o início do período seja igual a zero. A TIR deverá ser comparada com a taxa de atratividade, para se decidir pela aceitação ou não de um projeto. Na comparação de alternativas, o projeto que apresentar maior TIR será o mais atrativo.

A TIR pode ser expressa pela equação 2.5.

$$\sum_{j=0}^n R_j + (1+i)^j = \sum_{j=0}^n C_j + (1+i)^j \quad (2.5)$$

em que:

- i = taxa interna de retorno;
- R_j = receitas oriundas do projeto no ano j ;
- C_j = custos do projeto no ano j ; e
- η = vida útil do projeto.

(ii) Valor Presente Líquido (VPL)

A VPL é determinada descontando-se os fluxos líquidos de caixa, para o início do período de investimento. Genericamente, pode ser expresso pela equação 2.6.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{R_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (2.6)$$

em que:

- R_j = receitas oriundas do projeto no ano j ;
- C_j = custos do projeto no ano j ;
- i = taxa de desconto; e
- n = vida útil do projeto.

(iii) Relação Benefício/Custo (RB/C):

O critério de RB/C é normalmente definido em termos dos valores descontados. Custos e receitas são descontados separadamente e a determinada taxa, ou seja, a relação benefício/custo é definida como o quociente entre a soma dos benefícios e a soma dos custos, sendo estes descontados pela taxa de juros adotada. Quanto maior a relação benefício/custo, maior a viabilidade do investimento. A opção do investimento é considerada viável, caso $RB > 1$ (equação 2.7).

$$RB/C = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{R_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j}} \quad (2.7)$$

em que:

- R_j = receitas oriundas do projeto no ano j ;
- C_j = custos do projeto no ano j ;

i = taxa de desconto; e

n = vida útil do projeto.

(iv) Tempo de retorno do capital (TRC)

O tempo de retorno do capital é aquele necessário para que o valor investido seja recuperado. No caso em que o fluxo líquido avaliado apresenta valores de investimento e benefícios com sinais iguais e positivos, conclui-se que o retorno do capital, na opção em questão, é imediato. Caso contrário, o cálculo do TRC divide-se em anos e meses necessários para que o investimento inicial seja recuperado.

A implantação e viabilidade econômica de uma unidade geradora de energia elétrica requerem estudos de interesses econômicos e sociais.

O perímetro irrigado de Mirorós dispõe de cinco estações de bombeamento que levam a água aos lotes irrigados.

A conta de energia elétrica é repassada aos irrigantes proporcionalmente ao respectivo consumo de água. No Quadro 7, apresenta-se a média da demanda de potência de energia elétrica dos anos de 2003, 2004 e 2005.

Quadro 7 – Demanda de potência média mensal de energia elétrica de 2003 a 2005

Mês	Demanda (kW mês ⁻¹)					Total
	EP 1	EP 2	EP 3	EP 4	EP 5	
Janeiro	405	399	520	193	238	1.756
Fevereiro	329	324	481	146	150	1.430
Março	359	347	483	161	139	1.489
Abril	425	387	494	192	165	1.663
Mai	432	386	493	193	203	1.708
Junho	472	408	517	174	233	1.804
Julho	470	416	516	181	213	1.797
Agosto	472	415	522	204	249	1.863
Setembro	479*	418	534*	212	244	1.888
Outubro	477,	418	533	215*	253	1.895*
Novembro	469,	419*	523	214	261*	1.888
Dezembro	400	408	526	175	216	1.725

* = valores nominais.

Nota-se, no Quadro 7, que a maior demanda total no ano foi no mês de outubro, com média, em três anos, de 379 kW por estação.

As características da demanda de potência de energia elétrica de cada estação de pressurização (EP) são relacionadas pelo tamanho da área irrigada, altura manométrica e lâmina de irrigação, como são os casos da EP 4 e EP 5, em que parte de seus lotes se situa abaixo da estação de bombeamento. A EP 3 é maior em área irrigada, sendo a demanda média de potência de energia elétrica máxima no período de 534 kW.

No Quadro 8, apresenta-se o consumo de energia elétrica média no período.

Quadro 8 – Consumo médio mensal de energia elétrica das estações de pressurização do DIPIM de 2003 a 2005

Mês	Consumo (kWh mês ⁻¹)					Total
	EP 1	EP 2	EP 3	EP 4	EP 5	
Janeiro	61.848	76.500	99.396	21.114	24.892	283.750
Fevereiro	23.292	16.525	23.976	6.930	4.601	75.325
Março	31.140	30.225	37.836	7.542	4.660	111.403
Abril	95.907	100.657	121.119	41.292	24.076	383.051
Mai	61.596	64.836	88.740	31.788	24.724	271.684
Junho	94.224	90.987	130.720	39.078	41.007	396.016
Julho	117.396	112.284	165.744	45.270	66.125*	506.819
Agosto	126.540	121.068	175.500	52.048	62.557	537.713
Setembro	124.740	130.104*	164.124	52.524	65.091	536.583
Outubro	142.848*	125.568	180.540*	52.974*	48.405	550.335*
Novembro	48.003	101.454	48.155	39.731	22.753	260.097
Dezembro	20.506	46.874	24.008	11.701	8.218	80.883

* = Valores máximos.

Observando o Quadro 8, o consumo no mês de outubro é o maior, como no caso da demanda de potência de energia elétrica.

Considerando a tarifa de energia elétrica horo-sazonal verde A4 aplicada pela concessionária de energia elétrica do Estado da Bahia – COELBA, em dezembro de 2006 apresentaram-se os seguintes valores para: demanda de potência de 16,4532 R\$ (kW)⁻¹; consumo fora de ponta de

0,1180 R\$ (kWh)⁻¹; 1,180 R\$ (kWh)⁻¹ no horário de ponta; e 0,01180 R\$ (kWh)⁻¹ na irrigação noturna.

Estudos econômicos

Para uma potência instalada de 500 kW, o custo da aquisição foi estimado em aproximadamente R\$380.000,00 da turbina e de R\$300.000,00 do gerador. Com esses valores, pode-se compor o custo de uma minicentral hidrelétrica. No Quadro 9, apresenta-se o custo de cada item relacionado com a construção e com a montagem.

Quadro 9 – Custos do aproveitamento hidrelétrico da barragem Manoel Novaes

Ítem	Discriminação das Despesas	Custo (R\$)
1	Turbina	380.000,00
2	Gerador	300.000,00
3	Engenharia	170.000,00
4	Construção civil – material	145.000,00
5	Material e peças	145.000,00
6	Mão-de-obra	285.000,00
7	Linha de transmissão (0,5 km)	60.000,00
Total		R\$1.485.000,00

O Quadro 10 ilustra o perfil de consumo e demanda médio de energia elétrica do DIPIM.

De acordo com o Quadro 11, o gasto médio mensal com energia elétrica de uma estação de pressurização é de R\$13.587,45 e o anual, de R\$163.049,45. Desses valores, o gasto porcentual da conta com demanda de potência de energia elétrica é, em média, igual a 42% e com consumo de energia elétrica, igual a 58%.

No perímetro irrigado, o custo médio mensal da conta de energia elétrica para consumo foi igual a R\$39.274,59 e para demanda, R\$28.662,68, perfazendo um valor total de R\$67.937,27.

Quadro 10 – Perfil de consumo e demanda média de energia elétrica do DIPIM

Itens	Mensal Média	Anual
Consumo (kWh)	332.805	3.993.659
Demanda (kW)	1.742	1.742
Consumo (R\$)	39.274,59	471.295,00
Demanda (R\$)	28.662,68	343.952,00
Custo total nas 5 EPs (R\$)	67.937,27	815.247,23
Custo médio por EP (R\$)	13.587,45	163.049,45
Porcentual do gasto total com consumo de energia elétrica (%)		58
Porcentual do gasto total com demanda de potência de energia elétrica (%)		42

Quadro 11 – Plano de pagamento para quitação do empréstimo para pagamento da minicentral hidrelétrica

Ano	Saldo Devedor (R\$)	Juros sobre Saldo Devedor (R\$)	Amortização (R\$)	Prestação (R\$)
0	1.485.000,00			
1	1.150.299,36	118.800,00	334.700,64	453.500,64
2	815.598,71	92.023,95	334.700,64	426.724,59
3	480.898,07	65.247,90	334.700,64	399.948,54
4	146.197,43	38.471,85	334.700,64	373.172,49
5	(0,00)	11.695,79	146.197,43	157.893,22
Totais		326.239,49	1.485.000,00	1.811.239,49

O período de funcionamento com maior rendimento do sistema turbina e gerador deverá ser entre março e outubro, ou seja, durante oito meses.

O Quadro 11 ilustra a simulação de um empréstimo para custear a obra da minicentral hidrelétrica no valor de R\$1.485.000,00, com um ano de carência e 8% ao ano de taxa de juros sobre o saldo devedor e cinco anos para pagar.

Considerando-se que: (i) o gasto com demanda de potência de energia elétrica do DIPIM representa 42% do gasto total e que o gasto com consumo representa 58% do gasto total; (ii) a demanda total mensal média do DIPIM é igual a 1.742 kW e o consumo total mensal médio é igual a 332.804 kWh; e (iii) a potência gerada pela PCH é igual a 500 kW e a energia produzida pela PCH em 4.000 h por ano, igual a 2.000.000 kWh. A energia gerada pela PCH representaria em torno de 12% da demanda atual e 29% da energia consumida anualmente das cinco estações de pressurização de água no perímetro irrigado. Assim, seria evitado o gasto de R\$334.700,64 dos R\$815.247,24 pagos à COELBA anualmente.

O Quadro 12 contém o resultado da análise econômica, considerando-se o fluxo de caixa do Quadro 11 e os seguintes índices econômicos: (i) Valor Presente Líquido (VPL); (ii) Taxa Interna de Retorno (TIR); (iii) Relação Benefício/Custo (RB/C); e (iv) Tempo de Retorno do Capital (TRC).

Quadro 12 – Resultado da análise econômica de vida útil da minicentral hidrelétrica do DIPIM

Índices Econômicos	Valor
VPL	R\$1.425.616,54
TIR	44%
RB/C	2,76
TRC	5 anos e 8 meses

Para a análise de vida útil de 50 anos, conclui-se que: (i) o VPL ao final do investimento será igual a R\$1.425.616,54, com taxa de 12%; (ii) a TIR, igual a 44% ao ano; (iii) a RB/C, 2,76 vezes; e (iv) o TRC, 5 anos e 8 meses.

Além de os índices econômicos estudados serem favoráveis à implementação do investimento na minicentral hidrelétrica, outros fatores confirmam, como: (i) Impacto ambiental praticamente nulo (barragem e estruturas de canais já realizadas), (ii) Geração de energia elétrica como

produto complementar da irrigação e abastecimento humano e
(iii) Funcionamento apenas nos horários de suprimento de água, ou seja, haveria a produção de energia elétrica sem prejudicar o abastecimento urbano de água e do perímetro irrigado.

7. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são apresentadas a seguir.

- A PCH de 500 kW de potência representaria em torno de 12% da demanda atual e 29% da energia consumida anualmente nas cinco estações de pressurização de água do perímetro irrigado. Dessa forma, podem-se reduzir os custos com energia elétrica pela implantação da PCH em torno de 30%. Esse valor representaria cerca de 10% do valor total da tarifa de irrigação cobrada no perímetro irrigado, proporcionando redução na tarifa cobrada dos irrigantes de agricultura familiar.
- A análise econômica de vida útil foi favorável à implementação da PCH, proporcionando vantagem financeira ao DIPIM.
- Acredita-se que este mesmo estudo possa ter resultados favoráveis e ser de grande valor para muitas outras barragens.

8. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12591** – Dimensões Principais de Turbinas para PCH. Rio de Janeiro, 1992. 27 p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Lei no 9.648 de 27 de maio de 1998**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Brasília, DF. Acesso em: jan. 2007.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 394 de 04 de dezembro de 1998**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Brasília, DF. Acesso em: jan. 2007.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução 652 de 09 de dezembro de 2003**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Brasília, DF. Acesso em: jan. 2007.

BALARIM, Carlos R.; TARGA, Luiz A.; VIRGENS FILHO, Jorim S. et al. Custo de bombas centrífugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 219-225, jan./abr. 2004. ISSN 0100-6916.

BRASIL. Câmara dos Deputados Federais. **Projeto de Lei 523/2007** - Estabelece meta que 25% da geração de energia elétrica nacional seja por fontes alternativas até 2020. Brasília, DF. 2007.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural** – Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCHs. CEPEL, versão 1. Rio de Janeiro, 2000. 48 p. (Relatório Técnico).

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Manual de operação e manutenção do projeto de irrigação de Mirorós**. Edição final. [S.l.]: Magna Engenharia Ltda., 1994. 249 p.

DIPIM – Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós. **Dados de acompanhamento da operação e manutenção**. Gerência executiva do Distrito. Mirorós, Ibipeba, BA, 2007.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A. **Manual de minicentrals hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1988. 530 p.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Atlas do potencial hidrelétrico brasileiro**. DENH/DEN/Diretoria de Engenharia da Eletrobrás. 2005. Disponível em: <www.eletrabras.gov.br/sipot>.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas do Brasil. **Diretrizes para projetos de PCH**. Rio de Janeiro, 2007.

FRIZZONE, J. A.; SILVEIRA, S. de F. R. Avaliação e custos de projetos de irrigação. In: SEMINÁRIO ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 2000, Uberaba. **Anais...** Uberaba, MG: CEMIG, 2000. v. 1, p. 1-87.

TIAGO FILHO, G. L. **Análise de perspectivas da introdução de tecnologias alternativas de energia no Brasil**. Itajubá, MG: Unifei, 2002. (Apresentação do tema: Avaliação do Potencial das PCHs no Mercado de Energia Elétrica – Seminário).

TIAGO FILHO, G. L.; LEMOS, H. Energização de comunidade isolada na Amazônia – Projeto microcentral Canaã. **PCH Notícias**, n. 32, p. 23-27, dez/jan/fev. 2007. ISSN 1676-0220.

VILAS BOAS, C. de L., **Modelo multicritérios de apoio à decisão aplicado ao uso múltiplo de reservatórios**: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite. Brasília, DF: UnB, Impr. Univ., 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado em Economia - Gestão Econômica do Meio Ambiente Ecologia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA NA UTILIZAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO TIPO PIVÔ CENTRAL

RESUMO

Os custos de energia elétrica vêm aumentando acima da inflação, o que diminui a atratividade econômica da lavoura irrigada com sistemas pressurizados. O uso de inversor de frequência associado à aquisição de emissores e válvulas reguladoras de pressão pode assegurar a uniformidade da lâmina de água para as plantas e economia de energia elétrica. Um protótipo da linha de irrigação de pivô central, de 8,25 m, possibilitou estudos com variação de declividade de até 20%. O uso de inversor de frequência possibilitou uma economia de 26% e, ainda, adequou a frequência para a lâmina de irrigação nas diversas declividades. O simples uso de inversor de frequência possibilita a redução da potência elétrica devido à maximização do rendimento e do fator de potência, e, também, o conjunto motobomba apresentou melhor desempenho. O estudo reforça a importância do uso do inversor de frequência em motores elétricos nas atividades de irrigação tipo pivô central instalados em terrenos com declividade para a economia de energia elétrica. O controle da rotação do motor pelo inversor de frequência possibilita a adequação da lâmina irrigada do sistema a outra cultura de diferente demanda hídrica.

Palavras-chave: Irrigação, pivô central e inversor de frequência.

1. INTRODUÇÃO

Para a água chegar a uma área a ser irrigada existem etapas a realizar nesse processo, que consiste na captação no manancial (rio ou poço), na condução e na distribuição. E em cada uma dessas etapas é possível desenvolver ações em prol da redução dos desperdícios de energia e de água. Para tanto, é necessário conhecer dados específicos do sistema para que o consumo de energia elétrica seja compatível com o sistema de irrigação a ser implantado.

O gasto excessivo de energia pode ser causado por problemas, como: (i) nos procedimentos operacionais; (ii) nas falhas do dimensionamento técnico; (iii) na deficiência da manutenção preventiva ou corretiva; (iv) na baixa eficiência dos equipamentos elétricos ou hidráulicos, (v) nos contratos de energia elétrica inadequados; e (vi) na lâmina d'água aplicada inadequadamente, entre outros.

A agricultura irrigada é responsável por cerca de 42% dos alimentos produzidos no mundo e ocupa uma área cultivada 4,5 vezes menor que a agricultura de sequeiro (CHRISTOFIDIS, 2002). Estima-se que, nas próximas décadas, metade a dois terços da produção de alimentos será proveniente da agricultura irrigada (SANTOS, 1998).

Na irrigação, é primordial conhecer a relação entre o custo da água utilizada e o custo de produção, a fim de que se busquem soluções que otimizem investimentos. Ela é importante no desenvolvimento agrícola,

tendo papel de destaque no planejamento do uso da água, em razão dos grandes volumes envolvidos.

A relação entre o consumo de água e o consumo de energia elétrica na agricultura irrigada deve ser maximizada, pois os custos dessa energia podem chegar a 25% dos de produção em sistemas de irrigação do tipo pivô central (BERNARDO et al., 2006). Assim, o uso racional de energia na irrigação pode aumentar, em muito, a viabilidade do investimento. Além disso, o custo de implantação do sistema elétrico rural pode ser até 400% maior que os similares urbanos (JUCÁ; RIBEIRO, 1998).

Racionalizar energia elétrica é de fundamental importância para a sociedade, para os consumidores e para as concessionárias de energia. Para os consumidores haverá queda dos gastos com produção, aumentando a atratividade econômica. Já para a sociedade o adiamento da construção de novas unidades geradoras permitirá maior disponibilidade de recursos públicos para outras aplicações, ressaltando-se que geração, transmissão e distribuição de energia demandam, em geral, cerca de três vezes mais capital para investimento do que os outros segmentos industriais (JUCÁ; RIBEIRO, 1998). Para as concessionárias, racionalizar energia elétrica é importante por adiar novos investimentos em geração de energia e proporcionar melhoria na manutenção e ampliação de novos mercados. Como investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica têm a taxa interna de retorno (TIR) menor do que a média dos segmentos industriais de capital intensivo, esse adiamento pode colaborar para que a economia como um todo tenha melhor desempenho.

Entre as formas de irrigação utilizadas, destaca-se o sistema de irrigação do tipo pivô central. Os sistemas de irrigação mecanizada são muito comuns devido às suas inúmeras vantagens, como economia de mão-de-obra e a possibilidade de automação. A energia elétrica é utilizada, principalmente, para o bombeamento de água em mais de 95% desse sistema e, secundariamente, para automação e controle.

Em pivôs centrais instalados em terrenos inclinados, caso se desprezasse a ação das válvulas reguladoras de pressão, o índice de carregamento (razão da potência consumida pela potência nominal) de

motores no sistema de bombeamento varia conforme a posição da linha lateral.

Na tentativa de redução de custos, Campana et al. (1999) avaliaram dados relativos ao comportamento de motores elétricos utilizados para irrigação em algumas fazendas situadas em Minas Gerais. Esses dados indicaram as viabilidades econômica e energética da racionalização de energia elétrica em sistemas de irrigação, a partir da adequação de força-motriz e do bombeamento. Na simulação do uso de inversor de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central, Campana (2000) não considerou as perdas próprias do inversor, como também não validou os seus resultados em laboratório ou em campo.

Salvador (2004) mostrou que o uso de válvulas de controle, em geral, pode ser minimizado ao utilizar o controle da rotação em sistemas de carregamento variável. Os controles com válvulas ou registros geram dissipação de energia, portanto devem ser minimizados.

O uso de inversores de frequência para controle da variação da vazão no bombeamento de água em sistemas de irrigação, por meio da rotação do conjunto motor e bomba, ainda não é muito disseminado no meio rural. Essa tecnologia oferece diversas vantagens que devem ser observadas, como descreveram Américo et al. (1998), Mello et al. (2004) e Salvador (2004): (i) simplificação da rede de tubulação do sistema com eliminação das válvulas de controle e “by-pass”, provocando alívio na rede de distribuição pela eliminação de altos choques de pressão (golpe de aríete); (ii) aumento da vida útil da bomba e do motor pela diminuição no desgaste mecânico, devido à eliminação da contrapressão; (iii) redução do ruído no sistema; (iv) melhores rendimentos da bomba, nas faixas de potência abaixo da nominal; (v) alívio da rede elétrica, pois os acionamentos com velocidade variável partem com a corrente e o conjugado nominal, enquanto os acionamentos com motores de corrente alternada (CA) ligados diretamente à rede partem com correntes da ordem de seis a oito vezes a nominal; (vi) o fator de potência na rede elétrica pode ser controlado para ser aproximadamente igual à unidade ($\cos \Phi = 1$), sendo o consumo de potência reativa da rede praticamente nulo; (vii) controle da qualidade da energia elétrica (controle de nível e desequilíbrio da tensão e da frequência); e

(viii) ótima adaptação da máxima velocidade do motor à bomba, por meio da liberdade na escolha da frequência/velocidade do acionamento. Salvador (2004) descreveu, também, vantagens adicionais como partidas suaves; redução de perdas nas válvulas; maior flexibilidade de operação; melhor controle sobre parâmetros do processo; e melhoria e conforto das condições operacionais pelo menor nível de ruído (Figura 1).

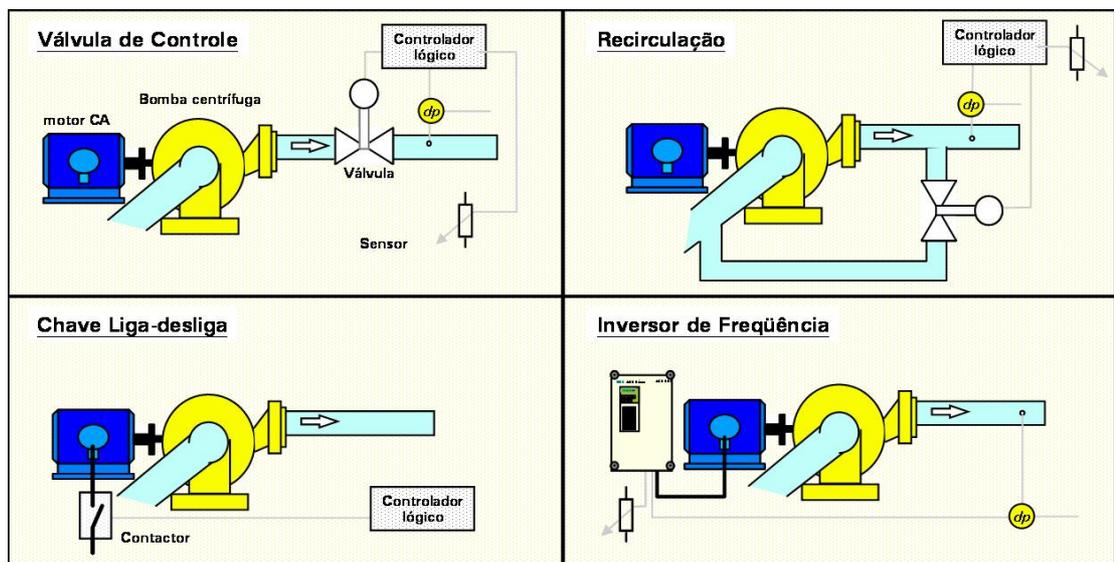


Figura 1 – Métodos de controle de vazão em bombas centrífugas (dp = sensor de pressão diferencial).
 Fonte: SALVADOR, 2004.

O uso de inversores de frequência permite não somente o controle da rotação, mas, também, o da tensão de saída e do fator de potência. Assim, pode-se racionalizar o uso da energia elétrica, pois o rendimento de bombas centrífugas é função da rotação, enquanto o rendimento de motores elétricos e para dado carregamento é função da rotação e da tensão de fornecimento. Permite minimizar os gastos com energia elétrica também pela ação desses equipamentos no controle da corrente de partida e nos tempos de aceleração e desaceleração. Gastos com manutenção de motores elétricos devem ser menores, pois eles estarão sujeitos a menores “estresses”

elétricos e mecânicos (provocados pelas variações bruscas no torque e pelas altas correntes de partida), ou seja, menor aquecimento.

As Figuras 2 e 3 representam situações quando se usa válvula de controle totalmente aberta para semifechada e velocidade de rotação nominal para velocidade reduzida, respectivamente.

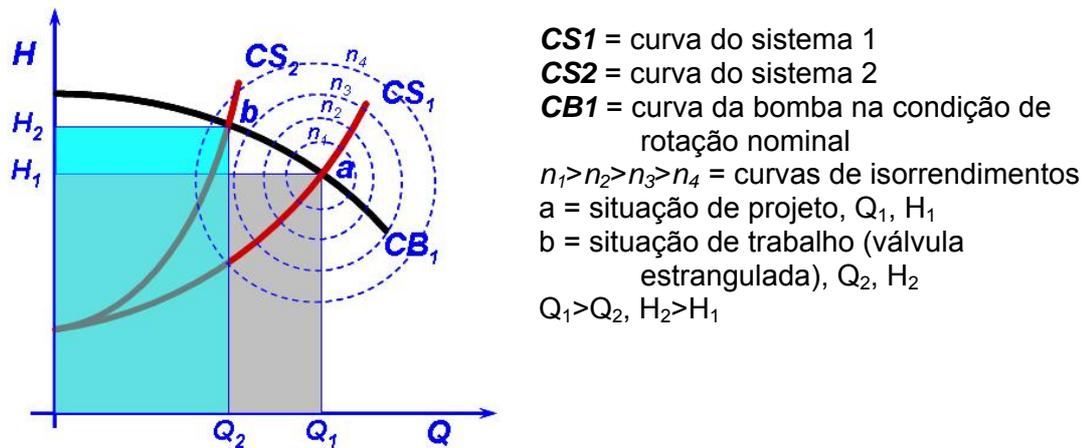


Figura 2 – Uso da válvula de controle em conjunto motobomba.

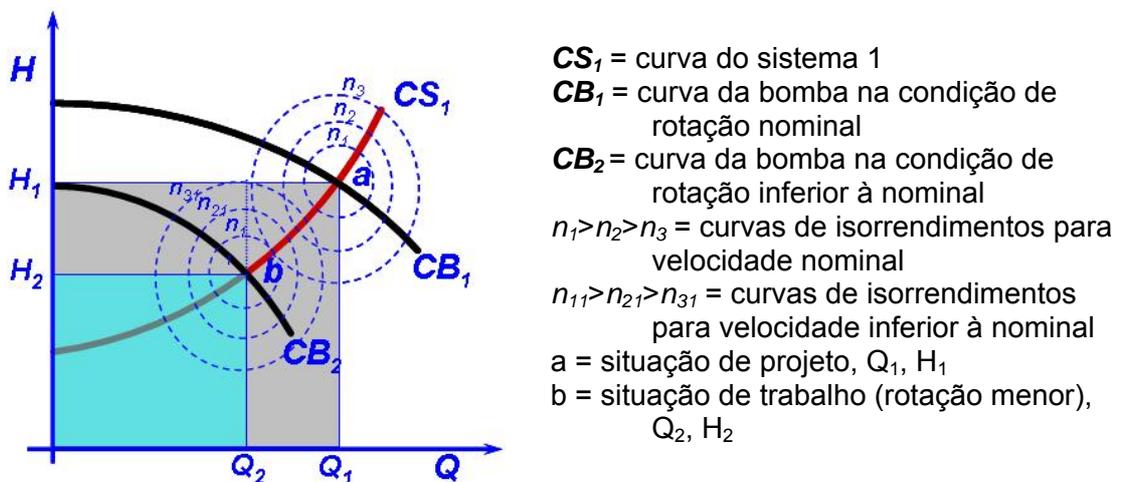


Figura 3 – Uso do inversor de frequência em conjunto motobomba.

A Figura 2 ilustra o funcionamento de uma bomba projetada para funcionar no ponto “a” e também no ponto “b”. A potência hidráulica é função da área representada pelos retângulos correspondentes dos pontos “a” e “b”, e o rendimento da bomba decresce de “a” para “b”.

Comparando as Figuras 2 e 3, observa-se que há diminuição da pressão no ponto de trabalho da curva característica do sistema, o que possibilita significativa economia real para uma nova situação de trabalho. Simultaneamente ocorre o fato de que o rendimento da bomba não varia tanto quanto pelo uso de registro ou válvulas, ou seja, o rendimento no ponto “a” é aproximadamente igual ao do ponto “b”.

Quando a potência e torque variáveis ocorrem em aplicações como ventiladores, bombas centrífugas e compressores centrífugos, então a máxima potência acontece com a máxima velocidade. O torque varia com o quadrado da velocidade e a potência com o cubo da velocidade, obedecendo às relações de afinidade de Rateau, como mostrado na Figura 4. Esse é o tipo particular de carga em que o emprego de equipamentos de controle de velocidade produz as maiores economias de energia para aplicações com acionamento eletrônico (SALVADOR, 2004; VIANA et al., 2004).

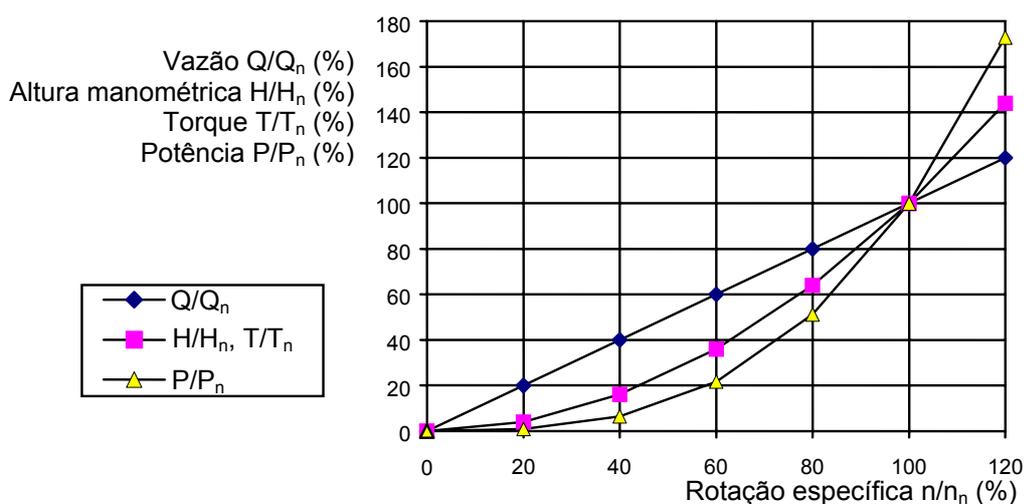


Figura 4 – Comportamento das relações de vazão, altura manométrica, torque e potência específica com a variação de rotação específica.

O sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central com inversores de frequência pode ser atraente economicamente e, do ponto de vista operacional, exige menos mão-de-obra e ação de controle mais precisa. Quanto ao controle do volume da água aplicada na irrigação, estudos comprovam que o funcionamento de sistemas de bombeamento sob rotação nominal permite menor flexibilidade no manejo do que aqueles sob regime de rotação variável. No entanto, a rotação deverá ser sempre ajustada em função do ponto de estado almejado. A qualquer superdimensionamento no projeto, o inversor pode, pelo controle da rotação, racionalizar o uso de energia (ALVES, 2001; CENDES, 2004).

Na Figura 5, apresenta-se a economia de consumo de energia em sistemas de bombeamento entre: (i) o inversor de frequência, (ii) o sistema liga-desliga (on-off), (iii) o estrangulamento (fechamento da válvula) e (iv) a recirculação da água em excesso (SALVADOR, 2004).

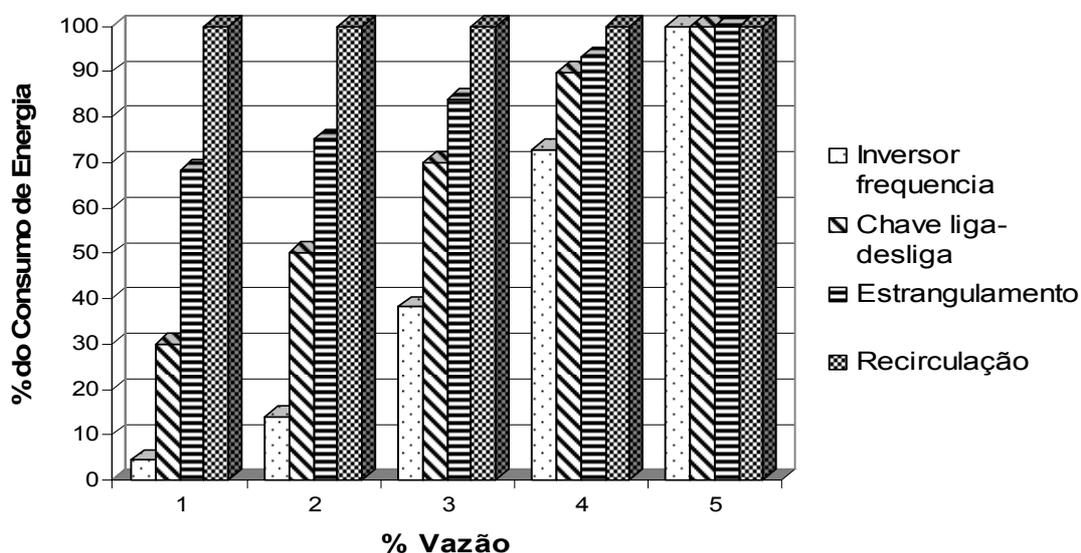


Figura 5 – Consumo de energia no controle da vazão em bombas centrífugas.
 Fonte: SALVADOR, 2004.

Analisando a Figura 5, observa-se que o uso do inversor de frequência para o controle do bombeamento acarreta consumo inferior aos demais listados quando se tem a vazão reduzida. Inversores de frequência podem também apresentar resultados significativos de economia mesmo com 100% de carga, visto que a eliminação de alguns componentes do sistema pode proporcionar ganhos. Além disso, o controle do nível e do equilíbrio entre as fases da tensão gera economias adicionais. Também, o motor pode estar superdimensionado em relação à carga aplicada, e o uso do inversor irá melhorar o rendimento do processo de conversão de energia, pelo controle da frequência.

Para ter maior atratividade econômica com o uso de novas tecnologias é preciso: (i) analisar o processo a ser utilizado, tendo como referência a construção de protótipos; e (ii) simular as condições hidráulicas que estão sendo adotadas (em que se destacam a irrigação tipo pivô central e a distribuição de água em perímetros irrigados), impondo nas simulações e em protótipos as mesmas condições do uso real. Esse procedimento trará vantagens para o desenvolvimento da tecnologia e economia na sua implementação.

Campana (2000) simulou a viabilidade econômica da aplicação de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central de baixa pressão, concluindo ser o número de horas de funcionamento anual, o preço da tarifa de energia elétrica e o preço do inversor de frequência os principais parâmetros que influenciam a viabilidade econômica. Tendo em vista que as análises realizadas por Campana (2000) foram com dados simulados, a realização de experimento de validação e posterior à análise econômica deve permitir maior confiabilidade nos resultados.

Hanson et al. (1996), analisando o uso de inversores de frequência na irrigação, obtiveram resultados significativos com a redução na potência elétrica consumida e chegaram a um resultado de viabilidade econômica para motores que trabalham entre 500 e 1.000 h no ano para recuperar os custos do investimento. Para chegar a essa conclusão, foram estudadas cinco situações do uso de inversores de frequência na irrigação em condições de carga variável. Uma das situações estudadas foi o uso do bombeamento dimensionado para irrigar 32,3 ha, mas que irrigou somente

20,2 ha. O uso do inversor de frequência, em vez da válvula de controle, permitiu uma economia de energia de 39% e aumento na eficiência do sistema de 10%. Os resultados apresentados por Hanson não foram generalizados, pois seus estudos, apesar de terem abordado cinco situações, foram pontuais, ou seja, não levaram em conta a influência das taxas de carregamento de motores para bombeamento e tamanho ou potência dos equipamentos (motores e bombas) sobre a rentabilidade do investimento em inversores de frequência.

Para verificar a precisão da simulação de uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação, é preciso analisá-los em sistemas reais.

2. OBJETIVOS

Este projeto teve por objetivos desenvolver e testar um modelo matemático para simular a utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central, visando à automação, controle e racionalização de uso da energia elétrica.

Os objetivos específicos foram:

- (i) Desenvolver modelo matemático e simular a utilização de inversor de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central.
- (ii) Construir um protótipo, em laboratório, para simular situações próprias de sistemas de irrigação do tipo pivô central automatizados com o uso de inversores de frequência.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado nos Laboratórios de Energia e de Recursos Hídricos e Ambientais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

3.1. Modelo matemático

Para tubulações de diâmetros menores que 125 mm e trabalhando com água à temperatura de 20 °C, Watters e Keller (citados por BERNARDO et al., 2006) desenvolveram a equação 3.1 para cálculo da perda de carga em tubulações e mangueiras de plásticos.

$$hf = 7,89 \cdot 10^5 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad (3.1)$$

em que:

- hf = perda de carga, m;
- Q = vazão, L s⁻¹;
- D = diâmetro interno da tubulação, mm; e
- L = comprimento, m.

As curvas características do sistema a serem estudadas foram analisadas conforme a equação 3.2, de Hazen-Williams (DENÍCULI, 2001).

$$H = \Delta Z + L \left(\frac{4}{0,355 \pi C D^{2,63}} \right)^{1,852} Q^{1,852} \quad (3.2)$$

em que:

- H = altura manométrica, m;
- ΔZ = diferença de nível, m;
- L = comprimento da tubulação, m;
- C = coeficiente de rugosidade da tubulação, adimensional;
- D = diâmetro da tubulação, m; e
- Q = vazão, m^3s^{-1} .

Para análise da potência elétrica economizada na variação da declividade do pivô central, foi utilizada a equação 3.3, em que a vazão, as alturas manométricas e os rendimentos da bomba e do motor são funções da frequência (VIANA et al., 2004).

$$P_{el} = \frac{1000 g Q(f) (H_2(f) - H_1(f))}{\eta_b(f) \eta_m(f)} \quad (3.3)$$

em que:

- P_{el} = potência elétrica economizada, kW;
- g = aceleração da gravidade, $m s^{-2}$;
- Q = vazão, m^3s^{-1} ;
- H_1 = altura manométrica inicial, m;
- H_2 = altura manométrica final, m;
- η_b = rendimento da bomba, em decimal;
- η_m = rendimento do motor, em decimal; e
- f = frequência, Hz.

Para o controle da lâmina a ser aplicada conforme o projeto agrônômico, analisaram-se a velocidade do pivô central, a área irrigada e a vazão e o raio de alcance dos aspersores, bem como o projeto técnico original para a situação de maior perda de carga. Na Figura 6, apresenta-se uma situação a ser considerada, representando a declividade do pivô central, em que os aspersores têm pressão e vazão diferenciadas.

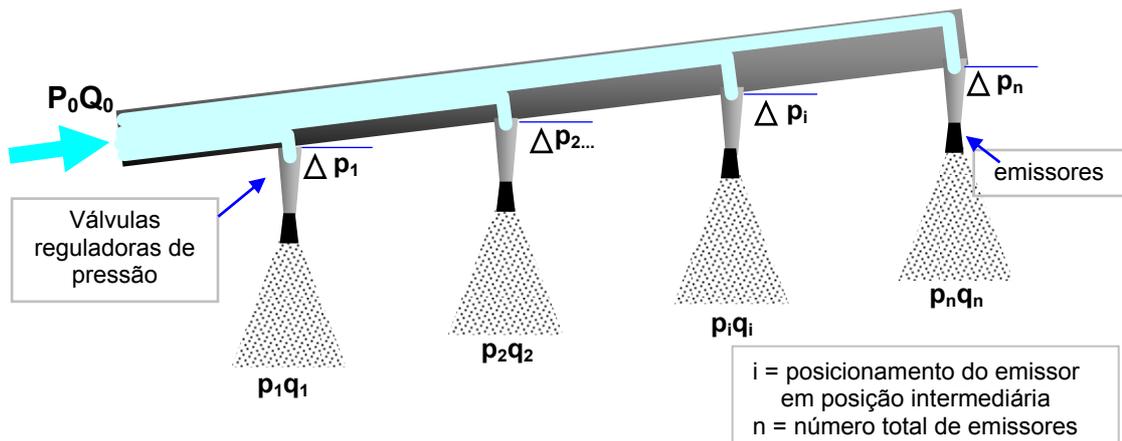


Figura 6 – Posicionamento, em active, da torre do pivô central com diferentes pressões e vazões em cada emissor.

O motor elétrico foi alimentado com o inversor de frequência que controla a frequência proveniente da rede elétrica para a frequência que minimize o consumo de energia.

A alteração da rotação da bomba, como forma de manejar adequadamente um sistema de bombeamento, foi obtida obedecendo-se às leis de afinidade ou leis de Rateau. A equação 3.4 foi usada para avaliar o comportamento da rotação do motor elétrico por um inversor de frequência na bomba centrífuga para uma rotação variável.

Na equação 4.4, apresentam-se as semelhanças entre as propriedades relacionadas ao sistema de bombeamento, para acoplamento direto motor e bomba, que foram usadas nos cálculos.

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^* = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^* = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^* = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} \quad (3.4)$$

em que:

- n = rotação ou velocidade do rotor;
- f = frequência do motor (desconsiderou-se o escorregamento);
- Q = vazão;
- H = altura manométrica;
- T = torque do motor;

- P = potência hidráulica;
- 1 = subscrito referente ao valor nominal da máquina;
- 2 = subscrito referente ao valor a ser encontrado; e
- * = relações de Rateau.

Na equação 2.5, não se consideraram o escorregamento no cálculo da alteração da frequência do motor de indução e, conseqüentemente, o uso da bomba. Nesse caso, vale informar as implicações do escorregamento. Os motores assíncronos, ou de indução, têm características de rotações diferentes em relação aos motores síncronos. Além de serem mais robustos e de custo de aquisição menor, funcionam com uma velocidade levemente inferior à velocidade síncrona, situando-se entre 0,8% e 5% (MOREIRA et al., 2000). A diferença de velocidades entre o campo girante (n_s) e a velocidade do rotor (n) tem o nome de velocidade relativa (n_2). O escorregamento (s) é um número adimensional e definido como a razão na velocidade relativa pela velocidade síncrona do motor. A velocidade síncrona é encontrada na relação entre a frequência da rede de energia elétrica (f) e o número de pólos do motor (P), como apresentado nas equações 3.5abc.

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (3.5a)$$

$$n_2 = n_s - n \quad (3.5b)$$

$$s = \frac{n_2}{n_s} \quad (3.5c)$$

em que:

- n_s = velocidade síncrona, rpm;
- f = frequência da rede de energia elétrica, Hz;
- P = número de pólos;
- n_2 = velocidade relativa, rpm;
- n = velocidade nominal, rpm; e
- s = escorregamento, adimensional.

Assim, a velocidade de rotação no eixo do motor (n) é expressa pela equação 3.6.

$$n = n_s (1 - s) \quad (3.6)$$

3.2. Protótipo

Foi construído um protótipo nas dependências do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, que serviu para validação do modelo.

O protótipo foi constituído dos seguintes componentes:

- (i) Motor trifásico com potência nominal de 2,21 kW (3 cv).
- (ii) Bomba centrífuga e os componentes de sucção e de recalque.
- (iii) Inversor de frequência com controle vetorial.
- (iv) Válvulas reguladoras de pressão.
- (v) Válvulas manuais de controle do fluxo de água.
- (vi) Emissores do tipo difusor para sistemas de irrigação pivô central, conexões e tubulações.

Foram avaliados os índices de carregamento e rendimento, de motores elétricos, a partir do uso de variadores de frequência, em função dos seguintes fatores:

- (i) Ângulo de inclinação vertical da linha de aspersão.
- (ii) Vazão.
- (iii) Pressão manométrica.
- (iv) Número de emissores.
- (v) Características dos emissores (vazão, pressão de serviço, diâmetro do bocal e raio de alcance, entre outros).

A simulação do pivô central foi feita com a utilização de tubulação com a regulação da pressão após a saída para a tubulação do emissor, por meio de válvulas de estrangulamento (válvulas de gaveta). Essas válvulas foram ajustadas com vazões predeterminadas, tendo como variáveis a pressão na saída da bomba e a altura geométrica do sistema. Foram efetuadas medições dos parâmetros, com e sem o uso de inversores de frequência, para avaliar a economia de energia. A aquisição de dados foi feita por meio de um medidor de grandezas elétricas e por equipamentos de

medição elétricos manuais. Na Figura 7, mostra-se o esquema da montagem do sistema em laboratório que representa a irrigação tipo pivô central.

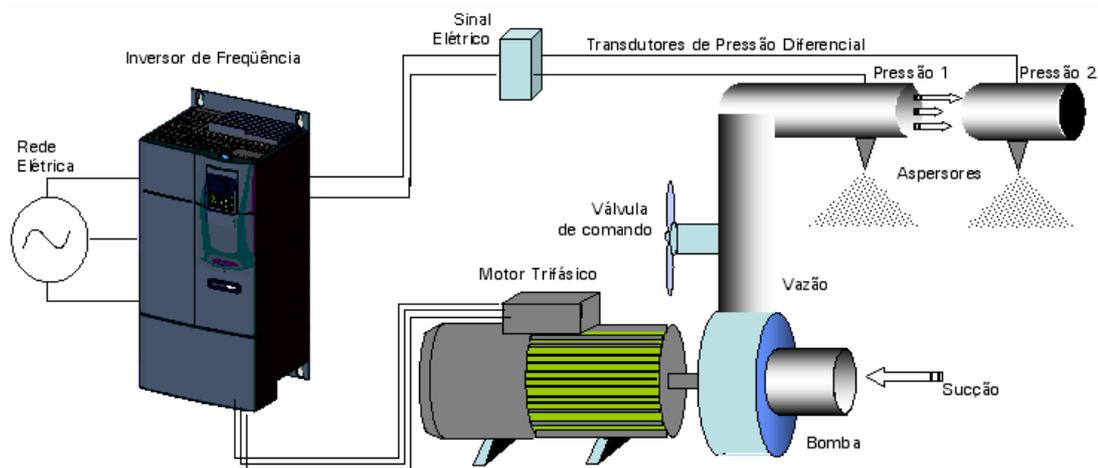


Figura 7 – Esquematização da automação com controle de velocidade em função da diferença de pressão no início e fim da linha lateral.

A Figura 7 apresenta a interface entre o sistema de bombeamento e o inversor de frequência. A variação do sinal elétrico se deu por meio de leituras manuais.

No Quadro 1, apresentam-se as características dos equipamentos elétrico, eletrônico e hidráulico que foram utilizados para a montagem do protótipo de pivô central.

Quadro 1 – Dados nominais do conjunto motobomba

Motor elétrico, rebobinado, com mudança de polaridade de quatro para dois pólos				
Fabricante: WEG	P = 3 cv	IP55	3465 rpm	
Tipo padrão	T = 220/380V	Cat N	Isol B	FS = 1,15
Bomba hidráulica				
Fabricante: IMBIL	Rotação = 1750 rpm e 3500 rpm		H = 25 a 35 mca	
Modelo INI 32-125.1	Rotor = 139 mm		Q = 9 a 27 m ³ h ⁻¹	
Inversor de frequência				
Fabricante: YASKAWA	P = até 2,2 kW		Modelo VS – 616	

A determinação das curvas de rendimento do sistema, com motobomba trifásica de 2,21 kW (3 cv), foi em função da pressão e vazão nominais de cada controle de frequência e da tensão feita por meio do uso de inversor de frequência. Este aparelho foi ajustado, manualmente, por meio de um potenciômetro e da leitura da pressão diferencial (pressão no início – pressão no fim da linha) na tubulação de recalque do sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central.

A corrente, tensão, potência e fator de potência foram determinados usando-se um sistema de aquisição de grandezas elétricas instalado no motor e programado para aquisição de dados a cada 5 min. Esses dados foram analisados e forneceram informações quanto ao consumo do equipamento e da qualidade da energia da rede (TEIXEIRA, 2001; TEIXEIRA, 2002; RIBEIRO, 2003).

A instalação do protótipo do sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central com o uso de inversor de frequência foi ajustado, por meio de controle da pressão, para simular uma declividade que possa variar até 30% (BERNARDO et al., 2006; MEDEIROS, 2005). O seu ajuste de deslocamento, para fins de coleta de dados, foi representado pelo controle da pressão para cada grau, em relação ao seu eixo, até completar uma volta.

As variações da rotação foram em função da pressão do sistema projetado para cada momento (ALVES, 2001), bem como observada a sua vazão, por meio de hidrômetros. Como em Alves (2001) e Cendes (2004), foram mantidas as válvulas reguladoras de pressão nos emissores e verificados os limites de suas atuações com o uso de inversores de frequência.

A Figura 8 ilustra a alimentação de energia elétrica do motor, a conexão com a bomba, manômetro, válvula de controle e tubulação de sucção e recalque de instalação.

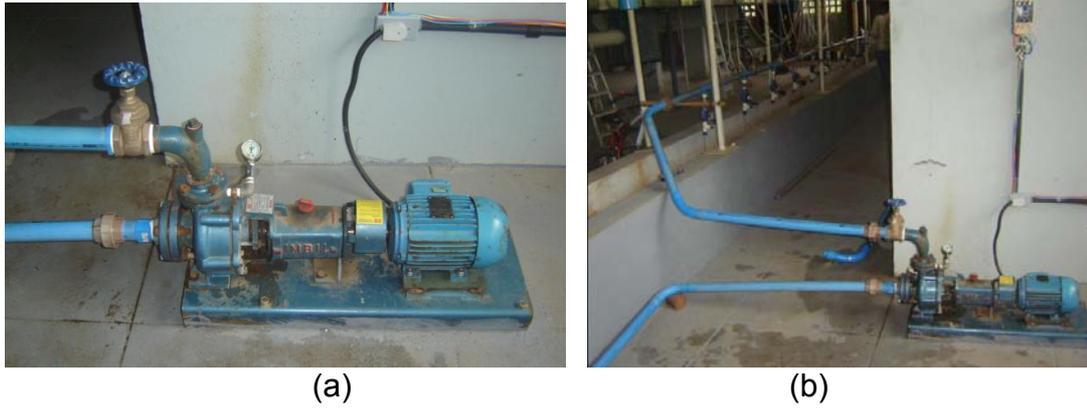


Figura 8 – Instalação dos equipamentos motor e bomba do protótipo da linha de irrigação do pivô central.

Na Figura 9, apresentam-se os equipamentos e conexões do protótipo da linha de irrigação de um pivô central, em que:

- (1) fonte de energia elétrica trifásica, 220 V;
- (2) inversor de frequência – controle para motores de até 2,2 kW (3 cv);
- (3) motor elétrico trifásico de 2,2 kW (3 cv), 3.500 rpm;
- (4) bomba hidráulica IMBIL–INI 32-125.1, 3.500 rpm, pressão de 25 a 35 mca e vazão $9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ a $27 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$;
- (5) tubo de PVC, DN 50 mm;
- (6) ponto de tomada de pressão no início da linha de irrigação (Pin) – esse ponto de tomada de pressão serve para enviar informações para o centro de processamento de dados do sistema;
- (7) válvula de gaveta de 50 mm;
- (8) ponto de tomada de pressão na linha de irrigação – manômetro;
- (9) derivação de 50 mm para 20 mm;
- (10) registro de esfera de $\frac{1}{2}$ ”;
- (11) ponto de tomada de pressão – manômetro;
- (12) hidrômetro de $\frac{1}{2}$ ” com conexão para $\frac{3}{4}$ ”;
- (13) válvulas reguladora de pressão Valley, 14,1 mca (20 PSI); e
- (14) emissores – vazão de 0,17 a $3,8 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

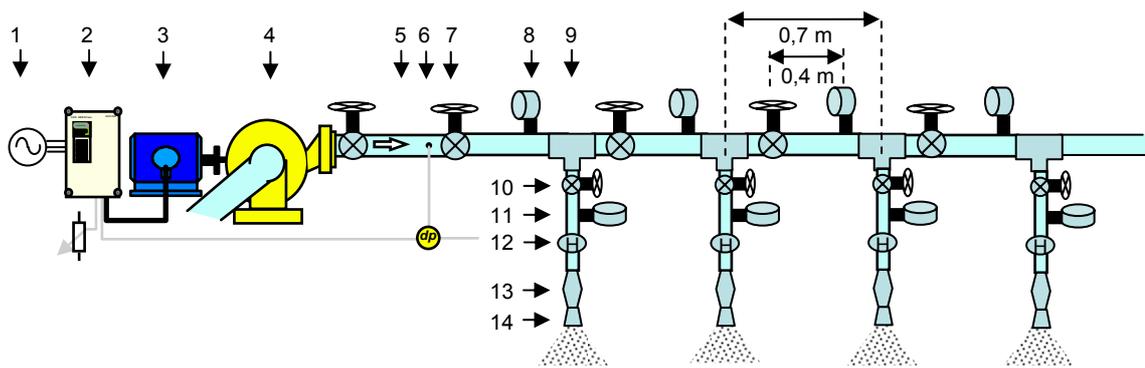


Figura 9 – Equipamentos e conexões utilizados na construção do protótipo.

Foram também padronizados os espaçamentos entre as medições, em que as distâncias entre as saídas dos emissores são de 0,7 m e a válvula de gaveta da linha de irrigação, de 0,4 m do ponto de tomada de pressão. O total de emissores na linha de irrigação do protótipo foi de oito unidades e a distância da tubulação de recalque da bomba até a saída do primeiro emissor, de 3,35 m. Foram instaladas duas válvulas de controle de vazão no início da linha, para possibilitar o ajuste da pressão na linha de irrigação (P_{in}).

Dentro do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, foi instalada a linha de irrigação do protótipo (Figura 10). Essa linha foi montada com 6,1 m de comprimento de tubulação de PVC de diâmetro nominal de 50 mm, nove válvulas reguladoras de vazão do tipo gaveta para a linha principal de abertura de 50 mm, nove tomadas de pressão e oito saídas para emissores. O protótipo possui um registro geral no início da tubulação, uma válvula geral de controle no início da linha de irrigação e uma válvula de controle para cada derivação ou trecho. Cada uma das oito saídas para os emissores tem as suas conexões reduzidas de 50 mm para 19 mm, uma válvula reguladora de vazão do tipo esfera, um hidrômetro, uma tomada de pressão, uma válvula reguladora de pressão (VRP) de 14,06 mca e emissor da Senninger.

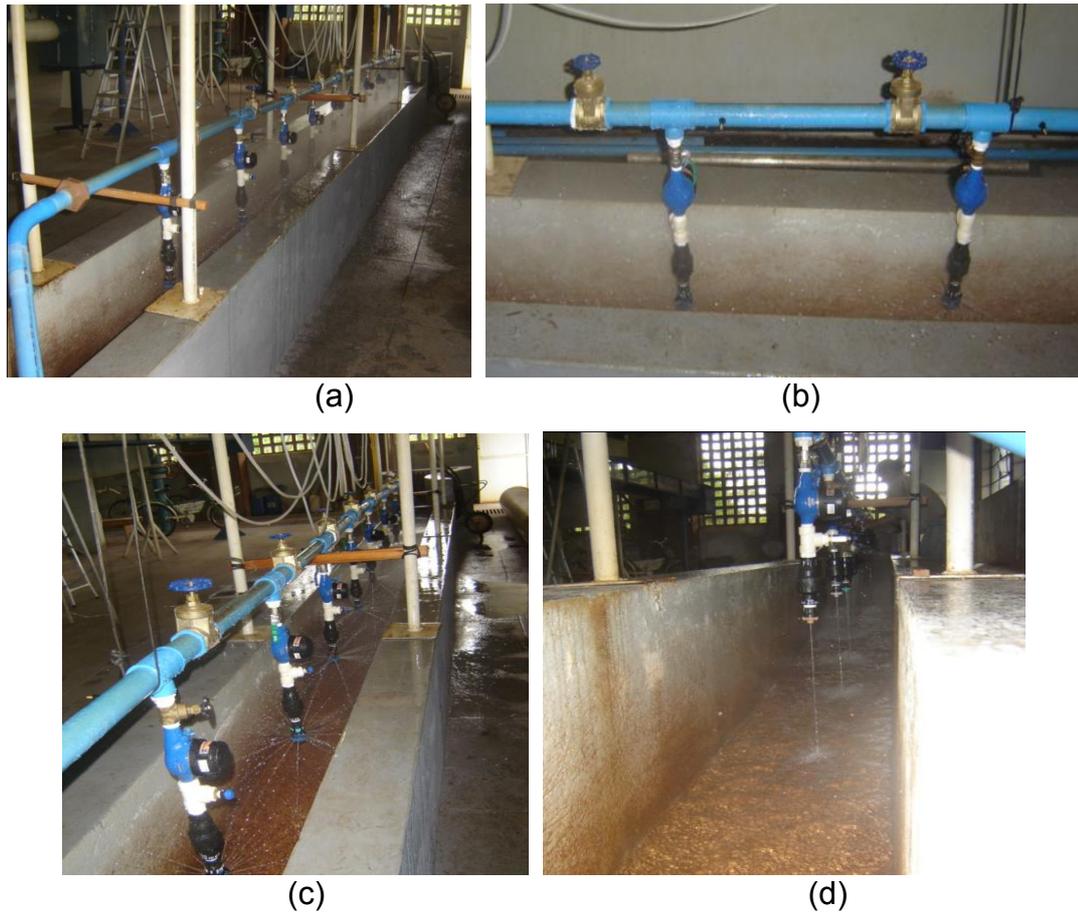


Figura 10 – Instalação e funcionamento da linha de irrigação do protótipo de pivô central.

Os procedimentos seguidos para regular a linha de irrigação do protótipo para representar a linha de irrigação do pivô central no campo foram:

- (i) deixar todas as válvulas reguladoras de vazão (válvula de gaveta) totalmente abertas com o sistema montado;
- (ii) acionar o sistema de bombeamento para entrar em funcionamento;
- (iii) ajustar a segunda válvula de vazão (a primeira está ao lado da bomba) para a pressão pré-calculada no início da linha de irrigação (P_{in});
- (iv) ajustar, em seqüência, todas as válvulas para as pressões pré-calculadas, segundo as equações de determinação da altura manométrica, de cada trecho;

- (v) verificar se a segunda válvula (Pin) mantém a mesma pressão desejada – caso a pressão tenha sido alterada, deve-se repetir novamente o mesmo procedimento do item anterior; e
- (vi) fazer as leituras de vazão e pressão para cada alteração de frequência da rede elétrica, ou rotação, desejada.

Foram coletados dados elétricos de tensão da rede elétrica (V), corrente elétrica (A), potência elétrica registrada por meio do próprio inversor ou por equipamento manual (kW), rotação do eixo motor e bomba (rpm) e frequência da rede elétrica (Hz).

No Quadro 2, apresentam-se os tipos de bocais utilizados nos emissores da linha do fabricante Senninger, modelo LDN, com os respectivos limites de pressões e vazões.

Quadro 2 – Características dos emissores Senninger, modelo LDN, com vazões em galões por minuto e em metros cúbicos por hora

em galões por minuto (metros cúbicos por hora)	BOCAL	PSI (mca)				BOCAL	PSI (mca)				
		6*	10	15	20*		6*	10	15	20*	
		(4,22)	(7,03)	(10,55)	(14,06)		(4,22)	(7,03)	(10,55)	(14,06)	
#5	Bege (5/64")	.43 (0,098)	.55 (0,125)	.66 (0,150)	.76 (0,173)	#15	Marrom Escuro (15/64")	3.91 (0,888)	5.05 (1,147)	6.03 (1,370)	7.00 (1,590)
#6	Ouro (3/32")	.64 (0,145)	.82 (0,186)	.98 (0,223)	1.14 (0,259)	#16	Alaranjado (1/4")	4.48 (1,018)	5.79 (1,315)	6.91 (1,569)	8.03 (1,824)
#7	Limão (7/64")	.87 (0,198)	1.12 (0,254)	1.34 (0,304)	1.56 (0,354)	#17	Verde Escuro (17/64")	5.03 (1,142)	6.50 (1,476)	7.76 (1,762)	9.01 (2,046)
#8	Lavanda (1/8")	1.12 (0,254)	1.45 (0,329)	1.73 (0,393)	2.01 (0,457)	#18	Violeta (9/32")	5.62 (1,276)	7.25 (1,647)	8.65 (1,965)	10.04 (2,280)
#9	Cinza (9/64")	1.41 (0,320)	1.82 (0,413)	2.17 (0,493)	2.52 (0,572)	#19	Preto (19/64")	6.19 (1,406)	7.99 (1,815)	9.54 (2,167)	11.08 (2,517)
#10	Turquesa (5/32")	1.74 (0,395)	2.25 (0,511)	2.69 (0,611)	3.12 (0,709)	#20	Turquesa Escura (5/16")	6.78 (1,540)	8.75 (1,987)	10.44 (2,371)	12.13 (2,755)
#11	Amarelo (11/64")	2.05 (0,466)	2.65 (0,602)	3.21 (0,729)	3.76 (0,854)	#21	Mostarda (21/64")	7.37 (1,674)	9.52 (2,162)	11.36 (2,580)	13.20 (2,998)
#12	Vermelho (3/16")	2.45 (0,556)	3.16 (0,718)	3.81 (0,865)	4.45 (1,011)	#22	Marrom (11/32")	7.97 (1,810)	10.29 (2,337)	12.28 (2,789)	14.27 (3,241)
#13	Branco (13/64")	2.92 (0,663)	3.77 (0,856)	4.50 (1,022)	5.23 (1,188)	#23	Creme (23/64")	8.86 (2,012)	11.18 (2,539)	13.34 (3,030)	15.50 (3,520)
#14	Azul (7/32")	3.40 (0,772)	4.39 (0,997)	5.24 (1,190)	6.09 (1,383)	#24	Azul Escuro (3/8")	9.34 (2,121)	12.06 (2,739)	14.40 (3,271)	16.73 (3,800)

* Para melhor desempenho, a Senninger recomenda que opere o LDN entre 10 a 15 psi (7,03 a 10,55 mca).

As vazões apresentadas no Quadro 2 são diferenciadas para simular os valores ao longo da linha de irrigação. Para o experimento, foram utilizados os emissores de bocal de números 5; 8; 10; 12; 14; 15,5; 16,5; e 18.

Na Figura 11ab, apresentam-se as curvas características da bomba Imbil, que pode funcionar mantendo as características originais, nas rotações de 3.500 rpm e 1.750 rpm, respectivamente.

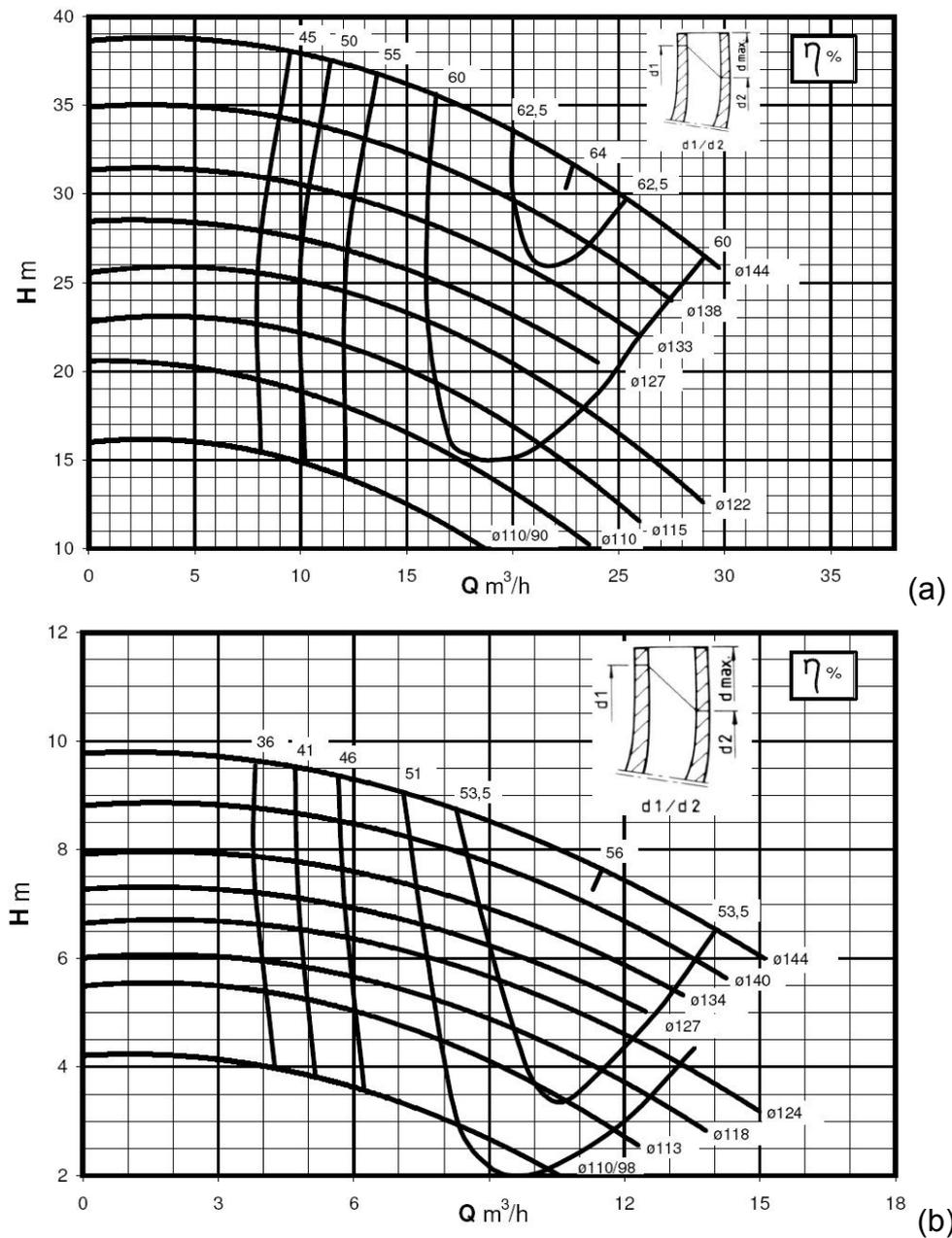


Figura 11 – Características das curvas da bomba utilizada no protótipo, para rotações de (a) 3.500 rpm e (b) 1.750 rpm.
Fonte: IMBIL, 2007.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelamento matemático

De posse dos emissores para uso na irrigação por aspersão tipo pivô central e conhecendo a vazão, a pressão de serviço e a lâmina de irrigação a serem aplicadas, foram calculadas as posições da distância até o eixo do pivô, a área irrigada e a precipitação média.

No Quadro 3, apresenta-se o dimensionamento do pivô central que foi utilizado como referência para a construção e aferição do protótipo.

No Quadro 4, representa-se a equivalência do protótipo de 8,25 m para a linha de irrigação de 66 m do pivô central, com uma lâmina d'água de 4 mm dia⁻¹ para completar uma volta em 24 h. Observa-se, nesse quadro, que o espaçamento entre emissores foi diferenciado para manter a mesma lâmina d'água aplicada.

No Quadro 5 é mostrado o equivalente, no campo, dos valores nas diferentes declividades do terreno para a linha de irrigação do pivô central.

A Figura 12 ilustra os pontos de operação para vazão e altura manométrica máximas para o dimensionamento da bomba de 3.500 rpm e de 1.750 rpm da linha de irrigação do pivô. A curva do sistema em funcionamento abrange as duas curvas características da bomba do fabricante com os pontos de interseção para a vazão de 9,89 m³h⁻¹ e pressão de 35,5 mca para as rotações de 3.500 rpm e 1.750 rpm, com a vazão de 5,22 m³h⁻¹ e a pressão de 7,6 mca.

Quadro 3 – Dimensionamento do pivô central para diâmetro médio de alcance dos emissores de 6 m, para lâmina de irrigação de 4 mm dia⁻¹

Bocal de Referência do Emissor Senninger	Vazão		Pivô Central				
	m ³ h ⁻¹	Ls ⁻¹	Distância do Emissor ao Eixo do Pivô Central	Área Irrigada do Emissor	Tempo de Irrigação por Emissor	Horas por Volta	Precipitação Média
			m	ha	min	h	mm/h
5	0,17	0,05	18,2	0,102	75,7	24	3,17
8	0,46	0,13	29,5	0,274	46,6	24	5,15
10	0,71	0,20	36,8	0,425	37,4	24	6,42
12	1,01	0,28	43,9	0,606	31,3	24	7,67
14	1,38	0,38	51,4	0,830	26,8	24	8,97
15,5	1,64	0,46	56,0	0,984	24,6	24	9,77
16,5	1,88	0,52	59,9	1,128	22,9	24	10,46
18	2,28	0,63	66,0	1,368	20,8	24	11,52
Total	9,53	2,65	-	5,718	-	-	-

Quadro 4 – Lâmina de 4 mm dia⁻¹ para dar uma volta em 24 h com VRP de 14,06 mca

Emissor		1	2	3	4	5	6	7	8
Bocal de referência	-	5	8	10	12	14	15,5	16,5	18
Vazão (L s ⁻¹)	-	0,047	0,128	0,197	0,281	0,383	0,456	0,522	0,633
Vazão (m ³ h ⁻¹)	-	0,17	0,46	0,71	1,01	1,38	1,64	1,88	2,28
Trecho	MB – Pin	Pin – 1	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8
Distância por trecho (m)	6	18,2	11,4	7,3	7,1	7,5	4,6	4,0	6,1
Distância do centro pivô	0	18,2	29,5	36,8	43,9	51,4	56	59,9	66,0

Quadro 5 – Dimensionamento da linha de irrigação nas declividades de 20%, 10% e em nível, com o diâmetro interno da tubulação em PVC de 47,5 mm, vazão máxima de 9,53 L s⁻¹ e altura manométrica na bomba de 34,86 mca

Trecho/emissor	Pin	1	2	3	4	5	6	7	8	
Comprimento do trecho (m)	6	18,2	11,4	7,3	7,1	7,5	4,6	4	6,1	
Vazão decrescente (m ³ h ⁻¹)	9,53	9,53	9,36	8,90	8,19	7,18	5,80	4,16	2,28	
hf (*) (m)	0,982	0,830	0,476	0,263	0,203	0,148	0,051	0,015	0,000	
20 %	Desnível do emissor (m)	0	3,63	5,89	7,32	8,70	10,16	10,87	11,59	12,96
	Altura manométrica por ponto (mca)	33,88	29,41	26,65	24,93	23,30	21,66	20,69	19,87	18,65
10 %	Desnível do emissor (m)	0	1,82	2,96	3,68	4,39	5,13	5,50	5,88	6,58
	Altura manométrica por ponto (mca)	27,26	24,61	22,99	22,00	21,08	20,19	19,68	19,26	18,65
0 %	Desnível do emissor (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Altura manométrica por ponto (mca)	20,64	19,81	19,33	19,07	18,86	18,72	18,67	18,65	18,65
-10%	Desnível do emissor (m)	0	-1,82	-2,96	-3,68	-4,39	-5,13	-5,50	-5,88	-6,58
	Altura manométrica por ponto (mca)	15,01	15,67	16,14	16,64	17,25	17,66	18,04	18,65	15,01
-20%	Desnível do emissor (m)	0	-3,63	-5,89	-7,32	-8,70	-10,16	-10,87	-11,59	-12,96
	Altura manométrica por ponto (mca)	9,83	11,63	12,83	14,05	15,40	16,27	17,05	18,27	9,83

(*) Equação de Watters e Keller – BERNARDO et al., 2006.

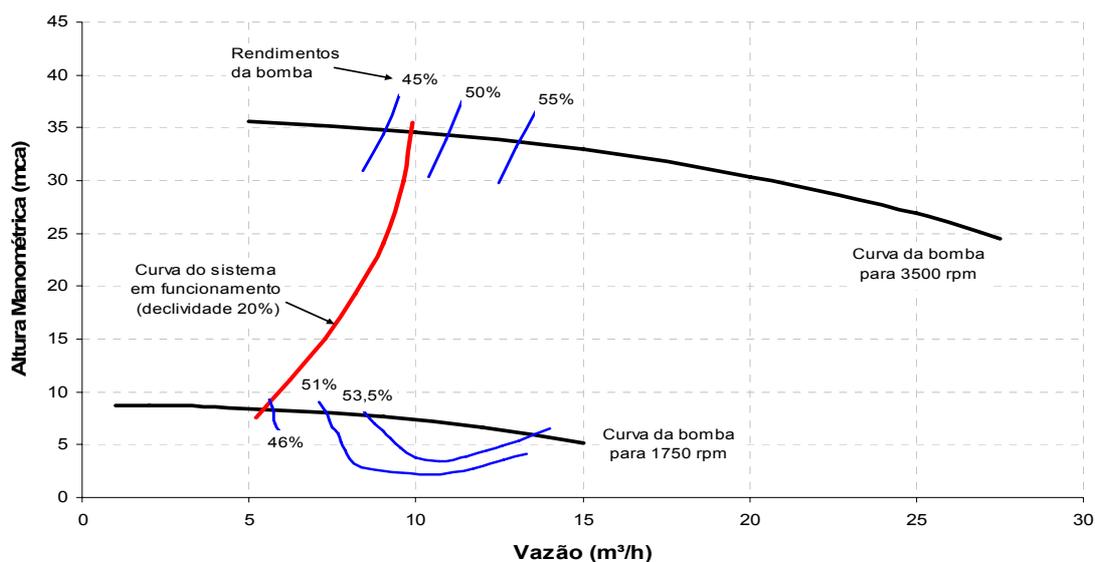


Figura 12 – Curvas características da bomba Imbil, modelo INI, rotor de 139 mm, para rotações de 3.500 rpm e 1.750 rpm.

Foram utilizados três manômetros: (i) um acoplado na bomba, com leituras em metros de coluna de água (mca); (ii) um para uso manual, com conexão para a linha de irrigação; e (iii) um para uso manual, com conexão para os emissores. Esses manômetros foram aferidos pelo Laboratório de Engenharia Civil da UFV, originando as curvas de calibração apresentadas nas Figuras 13, 14 e 15. As correlações encontradas foram consideradas satisfatórias.

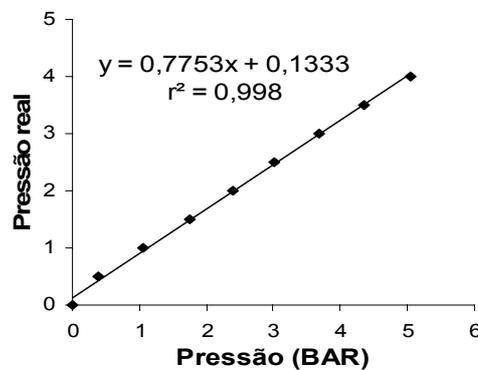


Figura 13 – Ajuste do manômetro (óleo) da marca AZUD, com escalas de 0–6 BAR (0–61 mca).

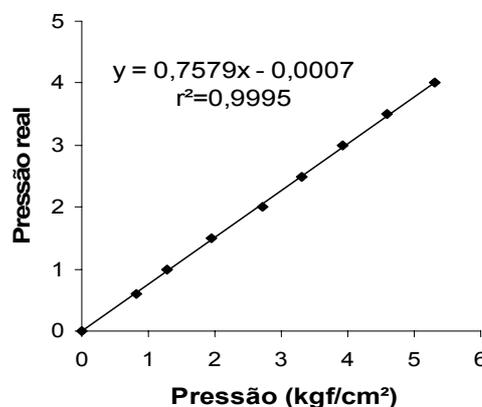


Figura 14 – Ajuste do manômetro (óleo) da marca HOMIS, com escalas de 0–10 kgf/cm² (0–100 mca).

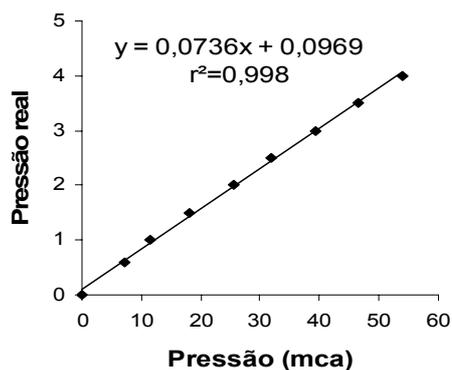


Figura 15 – Ajuste do manômetro (seco) da marca SOMAR, com escala de 0–60 mca.

Os valores medidos e corrigidos de diferentes declividades e modelos de emissores dos valores de altura manométrica e de pressão nos emissores são representados no Quadro 6.

No Quadro 6, apresenta-se a correção dos ajustes para pressões atmosféricas para Viçosa, cuja altitude é de 650 m acima do nível do mar. As pressões foram ajustadas para medições da coluna de mercúrio.

Quadro 6 – Pressões para diferentes declividades na linha de irrigação

Declividade %	Pressão na Linha de Irrigação (mca)								
	Pin	1	2	3	4	5	6	7	8
20	33,9	29,4	26,6	24,9	23,3	21,7	20,9	20,1	18,7
10	27,3	24,6	23,0	22,0	21,1	20,2	19,8	19,4	18,7
0	20,7	19,8	19,3	19,1	18,9	18,7	18,7	18,7	18,7

4.2. Protótipo

A Figura 16 ilustra todo o protótipo e como foi montado no Laboratório de Hidráulica do DEA/UFV, com o sistema de captação de água, o conjunto motobomba com inversor de frequência e a linha de recalque de 8,25 m e com oito saídas de água dos emissores.

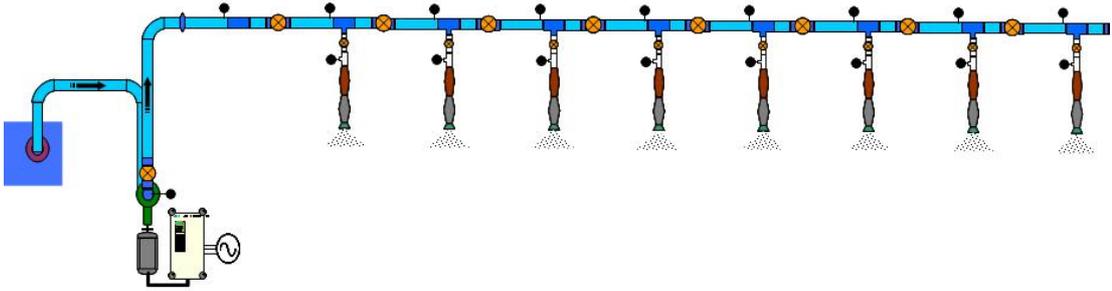


Figura 16 – Protótipo do pivô central.

Foram realizados os seguintes testes simulando as declividades de 20%, 10% e 0%.

Nos Quadros 7, 8 e 9, apresentam-se os dados elétricos, mecânicos e hidráulicos do protótipo, controlados por inversor de frequência, para declividades de 20%, 10% e 0%, respectivamente.

Nos Quadros 7, 8 e 9 são apresentados dados referentes à pressão definida na linha de irrigação, com controle de simulação de declividade pela válvula reguladora de vazão do início da linha de irrigação. Os pontos de coletas foram a partir da frequência de 60 Hz e espaçadas de 5 Hz em 5 Hz até a rotação de 30 Hz. Na declividade de 20% e frequência de 30 Hz, a vazão representou 52% do total, a pressão 21% e a potência elétrica 13%. Nota-se, nesses quadros, que para cada frequência utilizada foram geradas nove informações de vazão e 17 de pressão.

A Figura 17 contém as curvas do sistema para 20%, 10% e 0% de declividade, nas frequências, em Hz, de 60, 55, 50, 45, 40, 35 e 30.

Na Figura 17, têm-se as curvas do sistema de bombeamento representativas das declividades de 20%, 10% e 0%.

Quadro 7 – Dados referentes à posição do protótipo do pivô na declividade de 20% e frequências de 60 Hz a 30 Hz

UFV/DEA – Experimento da Área de Energia na Agricultura – Simulação Protótipo Pivô Central								
		Declividade (20%)						
Frequência (Hz)		60	55	50	45	40	35	30
Vazão (m³/h)		9,89	9,62	9,02	8,18	7,27	6,24	5,22
Pressão na Bomba (m)	Recalque	35,50	30,00	24,10	19,40	15,00	11,09	7,60
	Pin	33,30	27,90	23,00	18,20	14,20	10,80	7,30
Pressão em cada trecho (mca)	1	32,00	26,20	21,80	17,00	13,40	9,90	6,90
	2	29,30	24,00	19,40	15,40	11,90	8,80	6,00
	3	27,60	22,20	18,00	14,00	11,00	8,00	5,70
	4	26,00	21,00	16,70	13,30	10,60	7,90	5,30
	5	24,40	19,30	15,40	12,60	9,80	7,20	4,90
	6	23,60	18,50	14,70	11,70	9,30	6,90	4,70
	7	22,90	18,00	14,10	11,40	8,80	6,80	4,40
	8	21,50	16,80	13,10	10,80	8,10	5,90	4,00
Pressão (mca) e vazão (m³/h) nos emissores	p1	30,59	24,47	19,37	15,30	11,22	7,65	4,59
	q1	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,15	0,13
	p2	27,53	21,92	16,83	13,26	9,18	6,63	3,57
	q2	0,47	0,47	0,47	0,46	0,44	0,37	0,31
	p3	24,98	19,88	14,79	11,73	8,16	5,61	3,06
	q3	0,72	0,72	0,71	0,71	0,63	0,54	0,45
	p4	22,94	17,85	13,26	10,20	7,14	4,59	2,55
	q4	1,05	1,02	1,01	0,97	0,85	0,73	0,62
	p5	20,39	15,30	11,73	8,16	6,12	4,08	2,04
	q5	1,44	1,43	1,38	1,24	1,10	0,94	0,79
	p6	18,35	13,26	10,20	7,65	5,10	3,06	2,04
	q6	1,72	1,69	1,63	1,41	1,24	1,07	0,89
	p7	17,34	12,24	9,18	6,63	4,59	2,55	2,04
	q7	1,97	1,93	1,75	1,54	1,37	1,17	0,98
	p8	13,77	9,69	7,14	5,10	3,57	2,04	2,04
	q8	2,33	2,18	1,88	1,67	1,48	1,26	1,06
Rotação (rpm)		3.460,4	3.185,5	2.902,8	2.617,4	2.322,0	2.020,0	1.726,8
Corrente elétrica média (A)		10,1	9,4	8,3	7,5	5,9	4,8	3,9
Tensão elétrica média (V)		231,1	223,5	223,8	223,6	214,1	222,2	221,7
Potência elétrica (kW)		3,8	3,0	2,4	1,9	1,2	0,7	0,5

Quadro 8 – Dados referentes à posição do protótipo do pivô na declividade de 10% para frequências de 60 Hz a 30 Hz

UFV/DEA – Experimento da Área de Energia na Agricultura – Simulação Protótipo Pivô Central								
		Declividade (10%)						
Frequência (Hz)		60	55	50	45	40	35	30
Vazão (m³/h)		9,88	9,62	8,90	8,10	7,07	6,08	5,03
Pressão de recalque na bomba (m)		35,50	30,90	24,10	20,00	15,00	11,00	7,60
Pressão em cada trecho (m. c. a.)	Pin	33,30	28,00	22,90	18,50	14,00	10,70	7,70
	1	27,40	23,10	19,00	15,00	11,40	8,40	6,00
	2	25,80	20,90	18,70	13,40	10,20	7,60	5,50
	3	24,60	20,00	16,00	12,70	9,80	7,30	5,20
	4	23,90	19,00	15,00	12,00	9,00	6,80	5,00
	5	23,00	18,40	14,70	11,90	8,80	6,60	4,80
	6	22,60	18,00	14,20	11,60	8,60	6,40	4,70
	7	22,20	17,50	14,00	11,00	8,40	6,10	4,50
Pressão (m. c. a.) e Vazão (m³/h) nos emissores	P1	24,98	19,37	15,30	11,22	8,16	5,10	2,04
	Q1	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,14	0,12
	P2	22,43	16,83	12,75	9,18	6,12	3,57	-
	Q2	0,47	0,47	0,46	0,45	0,40	0,34	0,25
	P3	20,39	16,32	12,24	8,67	5,61	3,06	-
	Q3	0,72	0,72	0,71	0,68	0,59	0,51	0,43
	P4	18,86	14,28	10,20	7,65	4,59	2,55	-
	Q4	1,03	1,02	1,00	0,92	0,80	0,70	0,58
	P5	17,34	12,75	9,18	6,63	4,08	2,04	-
	Q5	1,44	1,42	1,35	1,25	1,07	0,92	0,75
	P6	16,32	11,73	8,16	6,12	3,57	-	-
	Q6	1,71	1,69	1,58	1,40	1,22	1,06	0,88
	P7	14,79	10,20	7,65	5,10	3,06	-	-
	Q7	1,98	1,91	1,70	1,53	1,33	1,13	0,95
	P8	12,24	8,67	6,12	4,08	2,04	-	-
	Q8	2,35	2,20	1,92	1,70	1,48	1,28	1,07
Rotação (rpm)		3.464,4	3.187,5	2.901,0	2.619,9	2.318,6	2.026,7	1.724,8
Corrente elétrica média (A)		10,1	9,3	8,5	7,5	5,8	4,8	3,9
Tensão elétrica média (V)		219,5	219,9	220,2	220,7	221,0	221,0	221,0
Potência elétrica (kW)		3,6	2,8	2,4	1,8	1,1	0,8	0,5

Quadro 9 – Dados referentes à posição do protótipo do pivô em nível, nas frequências de 60 Hz a 30 Hz

UFV/DEA – Experimento da Área de Energia na Agricultura – Simulação Protótipo Pivô Central								
		Declividade (0%)						
Frequência (Hz)		60	55	50	45	40	35	30
Vazão (m³/h)		10,46	9,96	9,07	8,27	7,18	6,06	5,07
Pressão de recalque na Bomba (m)		35,50	30,50	24,00	19,50	15,50	11,00	7,70
Pressão em cada trecho (m.c.a.)	Pin	33,50	28,00	23,00	18,50	14,00	10,30	7,50
	1	22,87	18,30	14,50	12,00	9,00	6,20	4,50
	2	22,37	18,00	14,00	11,50	8,50	6,00	4,50
	3	22,08	17,50	14,00	11,00	8,50	6,00	4,50
	4	21,84	16,50	13,50	10,50	8,00	6,00	4,50
	5	21,63	16,50	13,50	10,50	8,00	6,00	4,50
	6	21,57	16,50	13,50	10,50	8,00	6,00	4,50
	7	21,52	16,50	13,50	10,50	8,00	6,00	4,50
Pressão (m.c.a.) e Vazão (m³/h) nos emissores	p1	20,60	16,21	12,13	9,08	6,12	3,87	1,02
	q1	0,19	0,19	0,18	0,17	0,15	0,13	0,11
	p2	20,19	15,09	11,22	8,26	5,91	3,77	0,82
	q2	0,45	0,48	0,48	0,45	0,38	0,33	0,27
	p3	19,37	14,28	10,40	8,06	5,61	3,26	0,51
	q3	0,77	0,72	0,72	0,68	0,57	0,49	0,40
	p4	18,35	13,46	9,99	7,34	4,89	2,86	0,31
	q4	1,08	1,08	0,98	0,90	0,83	0,68	0,57
	p5	16,52	12,34	9,18	6,32	4,18	2,24	0,20
	q5	1,60	1,44	1,31	1,20	1,03	0,90	0,76
	p6	16,11	11,93	8,26	6,12	4,08	2,04	0,20
	q6	1,80	1,80	1,60	1,44	1,20	1,03	0,90
	p7	15,30	10,71	8,16	5,91	3,87	1,94	0,10
	q7	2,00	2,00	1,80	1,64	1,38	1,13	0,95
	p8	13,77	9,99	7,14	5,10	3,26	1,02	0,10
	q8	2,57	2,25	2,00	1,80	1,64	1,38	1,13
Rotação (rpm)		3.461,8	3.188,4	2.903,8	2.620,6	2.321,1	2.015,7	1.720,7
Corrente elétrica média (A)		10,2	9,3	8,3	7,3	5,8	4,7	3,9
Tensão elétrica média (V)		220,8	219,7	221,1	221,6	223,0	223,2	223,4
Potência elétrica (kW)		3,5	2,8	2,2	1,7	1,2	0,7	0,5

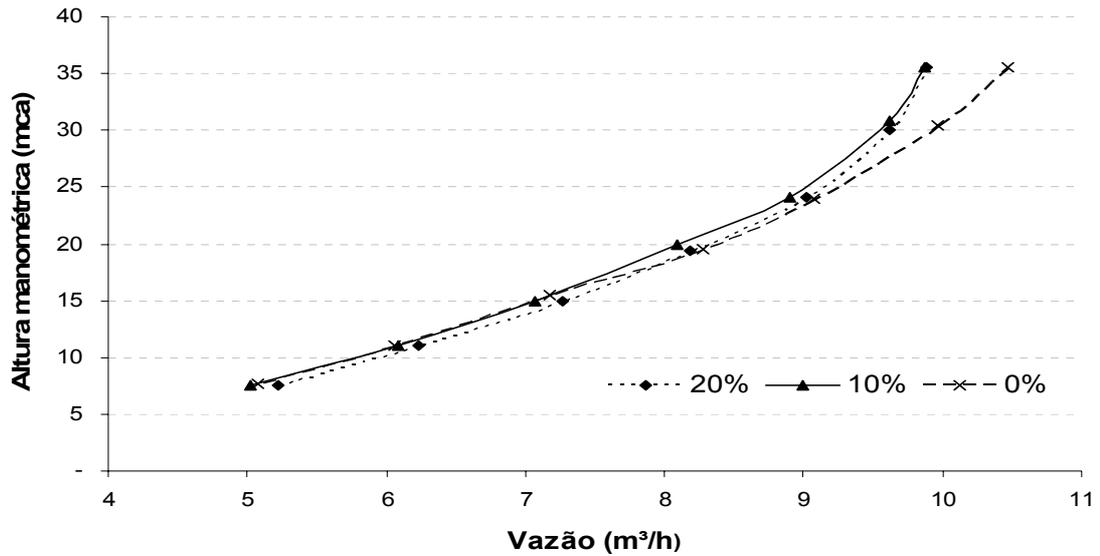


Figura 17 – Relação entre vazão e altura manométrica (curva do sistema) para declividades de 20%, 10% e 0%, nas frequências, em Hz, de 60, 55, 50, 45, 40, 35 e 30.

Efeito da declividade pela variação da frequência elétrica do motor

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam a atuação dos oito emissores, na situação de declividade em nível, em função da relação entre a pressão e a vazão, nas frequências elétricas, em Hz, de 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60.

Observando as Figuras 18, 19 e 20, nota-se que há uma tendência dos emissores de se alinharem paralelamente, a partir da atuação da válvula reguladora de pressão (VRP), ou seja, 14,06 mca. A pressão de operação do emissor de número 8 é menor que a da VRP, nas três condições de declividade. Os emissores com VRP não satisfazem as necessidades hídricas da cultura com a alteração da rotação do motor e bomba pela frequência da rede de energia elétrica.

As curvas que representam as frequências de 60 Hz até 30 Hz, com todos os emissores funcionando, apresentam curvas paralelas. Isso se deve ao fato de que, com a alteração da frequência, se tem alteração na rotação da motobomba e, conseqüentemente, a pressão e a vazão alteram proporcionalmente.

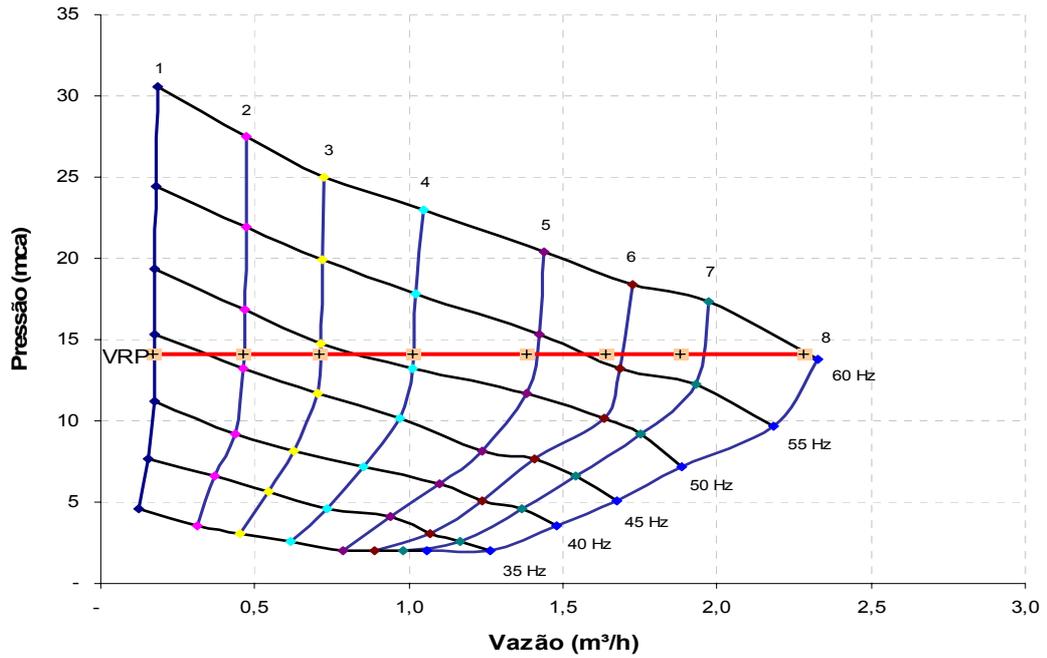


Figura 18 – Pressão e vazão para diferentes freqüências com declividade de 20%.

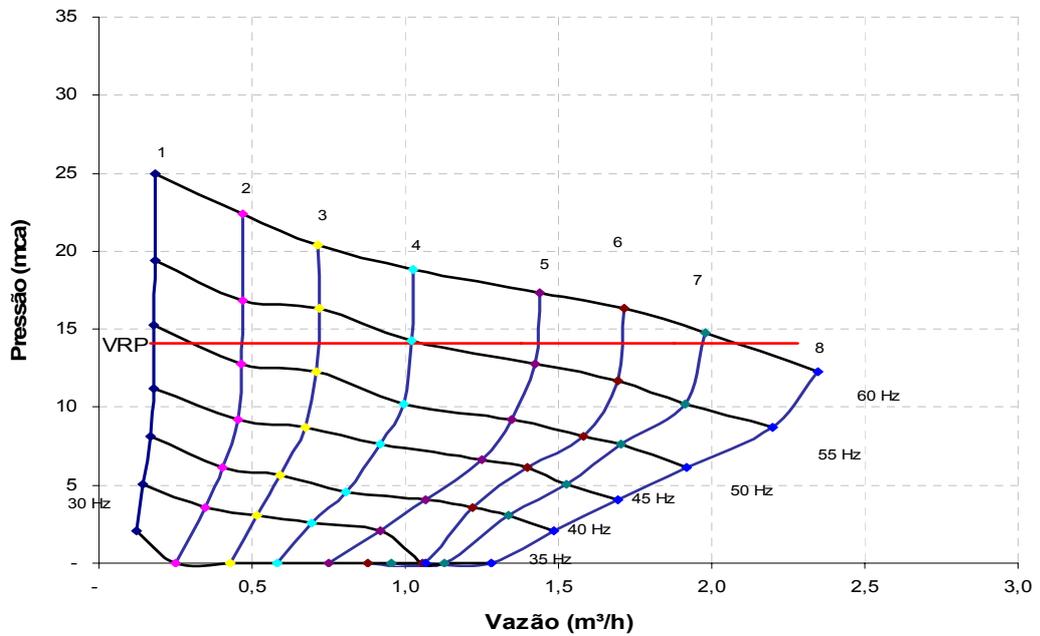


Figura 19 – Pressão e vazão para diferentes freqüências com declividade de 10%.

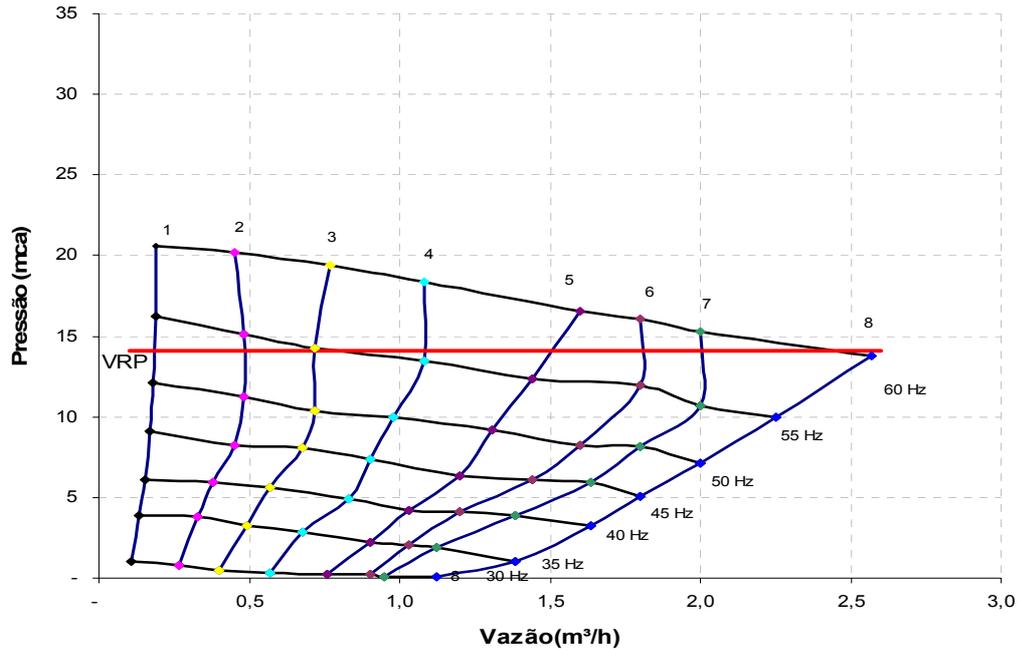


Figura 20 – Pressão e vazão para diferentes frequências com declividade de 0%.

Alguns erros possíveis de ajuste da linha de irrigação na leitura das vazões e das pressões: (i) no ajuste da pressão da linha de recalque (P_{in}), entre o calculado e o lido, o manômetro apresentou instabilidade na leitura; (ii) a interdependência das vazões e pressões nos emissores, ou seja, a pressão e a vazão de um emissor, influenciava a pressão e vazão de outro emissor; (iii) as válvulas de gaveta apresentavam aberturas desiguais, ou seja, não abriam por inteiro; e (iv) a rotação da motobomba não era constante em determinados períodos.

Influência da variação da frequência do motor na distribuição de água

Os dados de vazão, frequência e potência elétrica para as diferentes declividades estudadas encontram-se no Quadro 10.

Quadro 10 – Potências elétricas para declividades de 20%, 10% e 0% e frequências, em Hz, de 60, 55, 50, 45, 40, 35 e 30

Declividade	20%							
Frequência (Hz)	60	55	52,6	50	45	40	35	30
Vazão (m ³ h ⁻¹)	9,89	9,62	9,53	9,02	8,18	7,27	6,24	5,22
Diferença da vazão solicitada (%)	3,6	0,9	0	-5,7	-16,5	-31,1	-52,7	-82,6
Potência elétrica (kW)	3,80	3,00	2,71	2,40	1,90	1,20	0,70	0,50
Declividade	10%							
Frequência (Hz)	60	55	53,2	50	45	40	35	30
Vazão (m ³ h ⁻¹)	9,88	9,62	9,53	8,9	8,1	7,07	6,08	5,03
Diferença da vazão solicitada (%)	3,5	0,9	0	-7,1	-17,7	-34,8	-56,7	-89,5
Potência elétrica (kW)	3,60	2,80	2,65	2,40	1,80	1,10	0,80	0,50
Declividade	0%							
Frequência (Hz)	60	55	52,3	50	45	40	35	30
Vazão (m ³ h ⁻¹)	10,46	9,96	9,53	9,07	8,27	7,18	6,06	5,07
Diferença da vazão solicitada (%)	8,9	4,3	0	-5,1	-15,2	-32,7	-57,3	-88,0
Potência elétrica (kW)	3,50	2,80	2,48	2,20	1,70	1,20	0,70	0,50

Nota-se, no Quadro 10, que entre as frequências de 55 Hz e 50 Hz ocorre a vazão de projeto de 9,53 m³h⁻¹, correspondente à lâmina de irrigação de 4 mm. Observa-se também, nesse quadro, que a vazão decresce com a diminuição da frequência, proporcionando menores vazões e, conseqüentemente, menores lâminas de irrigação. No entanto, as frequências de 60 Hz e 55 Hz tiveram excesso de água para irrigação, em que a vazão nos emissores foi maior que a projetada. Assim, verifica-se que a automação do uso do inversor de frequência com a interface com o computador pode manter a frequência desejada para a lâmina de água projetada para a irrigação.

Estimativa de economia no consumo de energia elétrica

Com os dados da potência elétrica do motor apresentados nas declividades de 20%, 10% e 0%, estimou-se a potência elétrica do motor para cada posição do pivô central, em toda a sua circunferência, utilizando as relações de afinidades da potência e da altura manométrica (equação 3.7).

$$P_2 = P_1 \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^{1,5} \quad (3.7)$$

em que:

- P_2 = potência elétrica a ser utilizada, kW;
- P_1 = potência elétrica de referência, kW;
- H_2 = altura manométrica utilizada, mca; e
- H_1 = altura manométrica de referência, mca.

As potências elétricas estimadas para todas as declividades do pivô central para dar uma volta são apresentadas no Quadro 11.

Quadro 11 – Estimativa da potência elétrica demandada em função da declividade do pivô estudado

Declividades (%)	20	10	0	-10	-20
Potência elétrica (kW)	3,8	3,6	3,5	2,0	0,7

Os dados das declividades de 20%, 10% e 0% foram coletados e as potências das declividades negativas de 10% e 20%, estimadas.

Para cada 3 h de funcionamento, o pivô gira 45° e tem uma mudança de declividade de 10%. A cada declividade de um porcentual, o pivô demora 18 min (0,3 h). No Quadro 12, apresenta-se o consumo de energia elétrica em cada mudança de porcentual da declividade.

Quadro 12 – Consumo de energia elétrica em função da declividade

Declividade (%)	Potência Elétrica (kW)	Consumo de Energia Elétrica (kWh)	Declividade (%)	Potência Elétrica (kW)	Consumo de Energia Elétrica (kWh)
20	3,80	1,14	-1	3,33	1,00
19	3,78	1,13	-2	3,17	0,95
18	3,75	1,13	-3	3,01	0,90
17	3,73	1,12	-4	2,85	0,86
16	3,71	1,11	-5	2,70	0,81
15	3,69	1,11	-6	2,54	0,76
14	3,67	1,10	-7	2,39	0,72
13	3,65	1,09	-8	2,25	0,67
12	3,63	1,09	-9	2,10	0,63
11	3,62	1,08	-10	1,96	0,59
10	3,60	1,08	-11	1,82	0,55
9	3,59	1,08	-12	1,69	0,51
8	3,57	1,07	-13	1,55	0,47
7	3,56	1,07	-14	1,42	0,43
6	3,55	1,06	-15	1,30	0,39
5	3,54	1,06	-16	1,17	0,35
4	3,53	1,06	-17	1,05	0,32
3	3,52	1,06	-18	0,93	0,28
2	3,51	1,05	-19	0,82	0,24
1	3,51	1,05	-20	0,70	0,21
0	3,50	1,05			
Total do consumo de energia elétrica por volta =>					67,5 kWh

O Quadro 12 contém as informações das potências e os consumos a cada 18 min de cada declividade. No período de 24 h, o pivô teve consumo estimado de 67,5 kWh, utilizando-se o inversor de frequência. Sem o uso do inversor de frequência, a potência para cada declividade pode ser estimada como a mesma de projeto, ou seja, 3,8 kW. Essa potência tem um consumo de 1,14 kWh, que em 24 h resultará um consumo de energia elétrica de 91,2 kWh. Nesse caso, a economia estimada por volta do pivô será de 26%.

5. CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir.

- O modelo foi implementado e validado com os resultados do protótipo.
- Os emissores com válvulas reguladoras de pressão mantêm adequadas as lâminas de irrigação previstas para suprir as demandas hídricas da cultura com as declividades estudadas para motores com frequência nominal (60 Hz). Porém, a alteração da frequência e, conseqüentemente, a rotação do eixo do motor e da bomba alteraram as uniformidades da lâmina de irrigação, que ficaram abaixo das necessidades das plantas.
- As interferências na rotação do motor pelo inversor de frequência possibilitaram a verificação da lâmina irrigada do sistema, permitindo adaptar o uso do pivô central à outra cultura ou, mesmo, tratos culturais necessários nas faixas a irrigar.
- O controle da rotação do motor possibilita alterar o dimensionamento original do pivô, como também a lâmina d'água a ser aplicada. Permite a manutenção dos emissores sem o prejuízo, ou até mesmo a retirada, de alterar a lâmina de irrigação, além de diminuir o consumo de energia elétrica.

- Abre espaço para novos estudos de emissores que não dependem de VRP e sejam exclusivos para sistemas que utilizam inversor de frequência.
- A economia de 26% foi possível graças à atuação do inversor de frequência, o que possibilita a frequência adequada para a lâmina de irrigação nas variações de declividade.
- O simples uso do inversor de frequência, conectado entre a rede elétrica e o motor elétrico, proporcionou economia de energia elétrica pelo ajuste da velocidade de forma a proporcionar a potência necessária dentro da faixa entre as potências dos motores fabricados comercialmente.
- O conjunto motobomba apresentou melhor desempenho no rendimento com a variação da velocidade.
- Este estudo reforça a importância do uso do inversor de frequência em motores elétricos nas atividades de irrigação, para a economia de energia elétrica.

6. AGRADECIMENTOS

À Valmont Indústria e Comércio Ltda., pela doação dos emissores e das válvulas reguladoras de pressão utilizados no protótipo; e ao engenheiro Marcus Schmidt, pelo empenho.

Aos estudantes Aline Araújo Nunes, do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da UFV; e Ricardo de Oliveira Camargo Scarcelli, do Curso de Engenharia Elétrica da UFV, pela colaboração na montagem e coleta de dados.

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE, de Viçosa, MG, pelo fornecimento de hidrômetros utilizados na medição de vazão.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, A. J. **Inversores de frequência**: uma ferramenta para acionamento e racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central. Goiânia, GO: UFG, 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

AMÉRICO, M.; STEPHAN, R. M.; SOARES, G. A.; MELLO, A. J. C. **Guia operacional de acionamentos eletrônicos**. Rio de Janeiro, RJ: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 1998. Versão 1.0.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

CAMPANA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; SOARES, A. A.. Racionalização da potência de motores elétricos em sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, 1999.

CAMPANA, S. **Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação tipos pivô central e aspersão convencional**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 2000. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CENDES, F. **Proposta de automação de sistemas de irrigação com pivô central baseados em microcomputadores**. Goiânia, GO: UFG, 2004. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna – ITEM/Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem – ABID**, Brasília, n. 54, 2002.

DENÍCULI, W. **Bombas hidráulicas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2001. 162 p. (Caderno didático).

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p. 179-182, may/jun. 1996.

IMBIL. **Catálogo de bombas INI**. Itapira, SP, 2007. Disponível em: <www.imbil.com.br>.

JUCÁ, A. S.; RIBEIRO, F.S. A importância da norma técnica no custo da eletrificação rural. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: TEC ART, 1998. v.1, p. 678-682.

MEDEIROS, A. M. M. **Potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central no estado de Goiás**. Goiânia, GO: UFG, 2005. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

MELLO, A. J. C.; SOARES, G. A.; AMÉRICO, M.; SHINDO, R.; COSTA, R. S.; STEPHAN, R. M. **Inversores de frequência – ASD**. Disseminação de Informações em Eficiência Energética – DIEE. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2004. 60 p.

MOREIRA, H. J. F.; SOARES, G. A.; TABOSA, R. de P.; SHINDO, R. **Guia operacional de motores elétricos**. Versão 2000. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000. 161 p.

RIBEIRO, M.C. **Estudo sobre racionalização do uso de energia na irrigação**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SALVADOR, R. **Inversor de frequência** – Exemplo de aplicação e economia de energia. Disseminação de Informações em Eficiência Energética – DIEE. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2004.

SANTOS, J. R. M. dos. **Irigar é preciso**. Rio de Janeiro: FGV, 1998. (Agroanalysis, 3).

TEIXEIRA, C. A.; OLIVEIRA FILHO, D.; LACERDA FILHO, A. F. Racionalização do uso de força motriz em fábrica de ração da Universidade Federal de Viçosa – Estudo de caso. In: SEMINÁRIO ENERGIA NA AGRICULTURA – INDICANDO NOVOS CAMINHOS PARA A PRODUTIVIDADE NO CAMPO, 2., 2001, Uberaba. **Anais...** Uberaba, MG: Fazenda Energética – Companhia Energética de Minas Gerais, 2001.

TEIXEIRA, C. A. **Racionalização do uso de energia elétrica em unidades armazenadoras**. Viçosa, MG: DEA/UFV, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

VIANA, A. N. C.; WERDINE, D.; BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SOUZA, P. R. C.; BERENHAUSER, C. J. T. **Uso eficiente de energia elétrica e conservação de água em sistemas de saneamento ambiental.** Disseminação de Informações em Eficiência Energética – DIEE. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2004.

CAPÍTULO 4

GERENCIAMENTO DO USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA NO PERÍMETRO IRRIGADO DE MIRORÓS

RESUMO

Uma forma de reduzir o custo de produção de perímetros irrigados sem grandes investimentos financeiros é adotar um gerenciamento eficiente. O propósito deste trabalho foi desenvolver um gerenciamento e uma metodologia para o dimensionamento de perímetros irrigados, tendo como objetivos específicos: (i) relacionar o número de horas de irrigação por dia e os gastos com a energia elétrica; (ii) estudar o uso da irrigação noturna e da baixa pressão; (iii) adequar as tarifas – escolha da demanda de contrato; e (iv) desenvolver manual técnico para dimensionamento e manejo de perímetros irrigados. O experimento foi realizado no Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós (DIPIM), em Ibipeba, Bahia, e nos Laboratórios da Área de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG. Concluiu-se, pelas ações do gerenciamento, que há a possibilidade de redução de cerca de 50% na conta de energia elétrica do perímetro irrigado. O estudo desenvolvido contribuiu para que os gastos com energia elétrica fossem reduzidos.

Palavras-chave: Redução do consumo de energia elétrica e gerenciamento de perímetros irrigados.

1. INTRODUÇÃO

Os perímetros irrigados são complexos agrícolas destinados à produção de alimentos, seja pela agricultura familiar para fixar o homem no campo, seja pela agricultura empresarial. Esses empreendimentos contribuem, sobremaneira, para o desenvolvimento regional, proporcionando geração de renda e trabalho para a população local (MDA/SAF, 2007).

Um dos principais componentes do custo de produção de alimentos num perímetro irrigado é a água, quer distribuída por gravidade, quer bombeada. O volume de água utilizado por um produtor está relacionado à necessidade da planta a ser cultivada, do tipo de solo, do manejo de irrigação, do tipo de equipamentos de irrigação, do regime de chuvas e das condições psicrométricas locais, entre outros (BERNARDO et al., 2006).

A administração de perímetros irrigados, normalmente, fornece água pressurizada na entrada dos lotes de produção agrícola, porém o irrigante é responsável pela implementação do sistema de irrigação, pela escolha da cultura a ser produzida, pelo manejo da irrigação, pelos tratamentos culturais, pela colheita, pela comercialização da produção e pelo pagamento de tarifas à administração do perímetro irrigado (EFFERTZ et al., 1993).

As tarifas de perímetros irrigados geralmente são divididas em duas parcelas fixas: manutenção e investimento em equipamentos e em pessoal; e variável: gasto com energia elétrica (EFFERTZ et al., 1993).

A média de consumo específico de perímetros irrigados bem administrados e com sistemas de distribuição de água pressurizada é em torno de R\$0,045 por metro cúbico de água bombeada, projetando-se para cada hectare irrigado o custo mensal próximo de R\$68,00 (DIPIM, 2007). Esse valor tende a ser reduzido com a utilização de: (i) equipamentos para bombeamento (bombas hidráulicas, motores elétricos e equipamentos de automação) e distribuição de água mais eficiente, com baixa demanda de pressão de serviço (microaspersores, gotejadores); (ii) gerenciamento e planejamento dos horários disponíveis para distribuição conjunta de água no perímetro irrigado; (iii) utilização de tarifas horo-sazonais com incentivo à irrigação noturna; e (iv) adoção de manejo da irrigação das culturas, entre outros (RIBEIRO, 2003).

No sistema de irrigação coletiva dos lotes em perímetros irrigados, considera-se que o bombeamento é feito por conjuntos de motobomba em paralelo e de forma estratégica. É importante mencionar que, quanto maior o número de agricultores irrigando seus lotes simultaneamente, menor a tarifa de água a ser paga. Dessa forma, o número de horas de funcionamento diário induzirá quase que a totalidade dos irrigantes a realizar a operação de irrigação no período predeterminado pela administração do perímetro irrigado. Assim, a administração consegue maximizar a eficiência do conjunto motobomba, o que refletirá em menores custos com energia elétrica no bombeamento (RIBEIRO, 2003).

O sistema tarifário horo-sazonal determina a cobrança diferenciada da tarifa de energia elétrica em diferentes horas do dia e diferentes meses do ano. No caso da irrigação, a tarifa horo-sazonal com incentivo noturno tem desconto de 90% no preço do consumo da energia elétrica na Região Nordeste do Brasil, no horário das 21h30 às 6 h (ANEEL, 2002). Deve-se observar que não há desconto na tarifa de demanda.

Com a tarifa de incentivo à irrigação noturna, podem-se reduzir gastos com a energia elétrica, adotando-se sistemas de irrigação que possam ser enquadrados dentro do horário incentivado.

A otimização da escolha das demandas de contrato de energia elétrica pode proporcionar economia. Deve-se considerar, nessa escolha, que o limite de tolerância para a concessionária de energia elétrica não

cobrar a tarifa de demanda de ultrapassagem, que é igual a três vezes o valor da tarifa de demanda normal, é de apenas 10% acima da demanda contratada. Em muitos casos, entretanto, pode-se contratar uma demanda que leva ao pagamento eventual de tarifa de ultrapassagem. Análises do histórico de contas de energia elétrica e de expectativas futuras podem levar a essa conclusão.

Os irrigantes da agricultura familiar de perímetros irrigados podem receber assistência técnica por meio de material didático que aborde temas relacionados ao dimensionamento de perímetros, ao manejo e eficiência de sistemas de irrigação e ao cálculo do gasto de energia elétrica pelo acionamento de conjuntos de motobomba, entre outros.

Propõe-se, portanto, neste trabalho desenvolver um gerenciamento de perímetros irrigados visando à redução nos custos de produção da agricultura familiar.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver metodologia de gerenciamento de perímetros irrigados.

Os objetivos específicos foram:

- (i) Relacionar o número de horas de irrigação por dia com os gastos com energia elétrica.
- (ii) Estudar o uso da irrigação noturna e de baixa pressão.
- (iii) Propor metodologia de adequação tarifária – escolha da demanda de contrato.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós (DIPIM), em Ibipeba, Bahia, e nos laboratórios da Área de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

Foram feitas as seguintes simulações: (i) relação entre o número de horas de irrigação por dia e os gastos com energia elétrica, (ii) uso da irrigação com incentivo tarifário noturno e de baixa pressão e (iii) estudo da adequação tarifária.

3.1. Relação entre o número de horas de irrigação por dia e os gastos com energia elétrica

Foi estudada a relação entre o número de horas de funcionamento da irrigação de perímetro e os gastos com energia elétrica, considerando-se o número de irrigantes e as características de pressão e vazão de cada um e o número de sistemas de bombeamento e suas potências.

Considerou-se, ainda, que os irrigantes, além de práticas de irrigação diferentes entre si, possuem sistemas de irrigação também diferentes entre si. A outorga para a irrigação dos lotes da agricultura familiar que utilizam as estações de pressurização de água (EPs) foi de $1,37 \text{ L s}^{-1}\text{ha}^{-1}$.

No Quadro 1 é mostrada a vazão máxima de três conjuntos de motobomba para cada estação de pressurização de água. Cada EP tem quatro conjuntos de motobomba, mantendo-se um como reserva.

Quadro 1 – Vazão utilizada nas estações de pressurização de água – EPs

Estação de Pressurização de Água	Área (ha)	Vazão (m ³ h ⁻¹)
EP 1	255	1011
EP 2	236	960
EP 3	312	1171
EP 4	213	817
EP 5	245	887

Pela equação 4.1, pode-se encontrar o número mínimo de horas trabalhadas por dia, em cada EP.

$$n = h_t + \frac{V}{d_{\text{mês}} Q} \quad (4.1)$$

em que:

- n = número de horas de funcionamento, h (dia)⁻¹;
- V = volume registrado por mês na EP, m³;
- Q = vazão máxima no bombeamento na EP, m³h⁻¹;
- d_{mês} = dias do mês de referência, dia(mês)⁻¹; e
- h_t = hora de tolerância, h.

3.2. Uso da irrigação com incentivo tarifário noturno e de baixa pressão

Visando ao uso racional da energia elétrica, foram estudados o uso da irrigação com incentivo tarifário noturno e os sistemas de irrigação de baixa pressão. Na Figura 1 é mostrado o fluxograma para o gerenciamento de água e energia proposto para o perímetro irrigado.

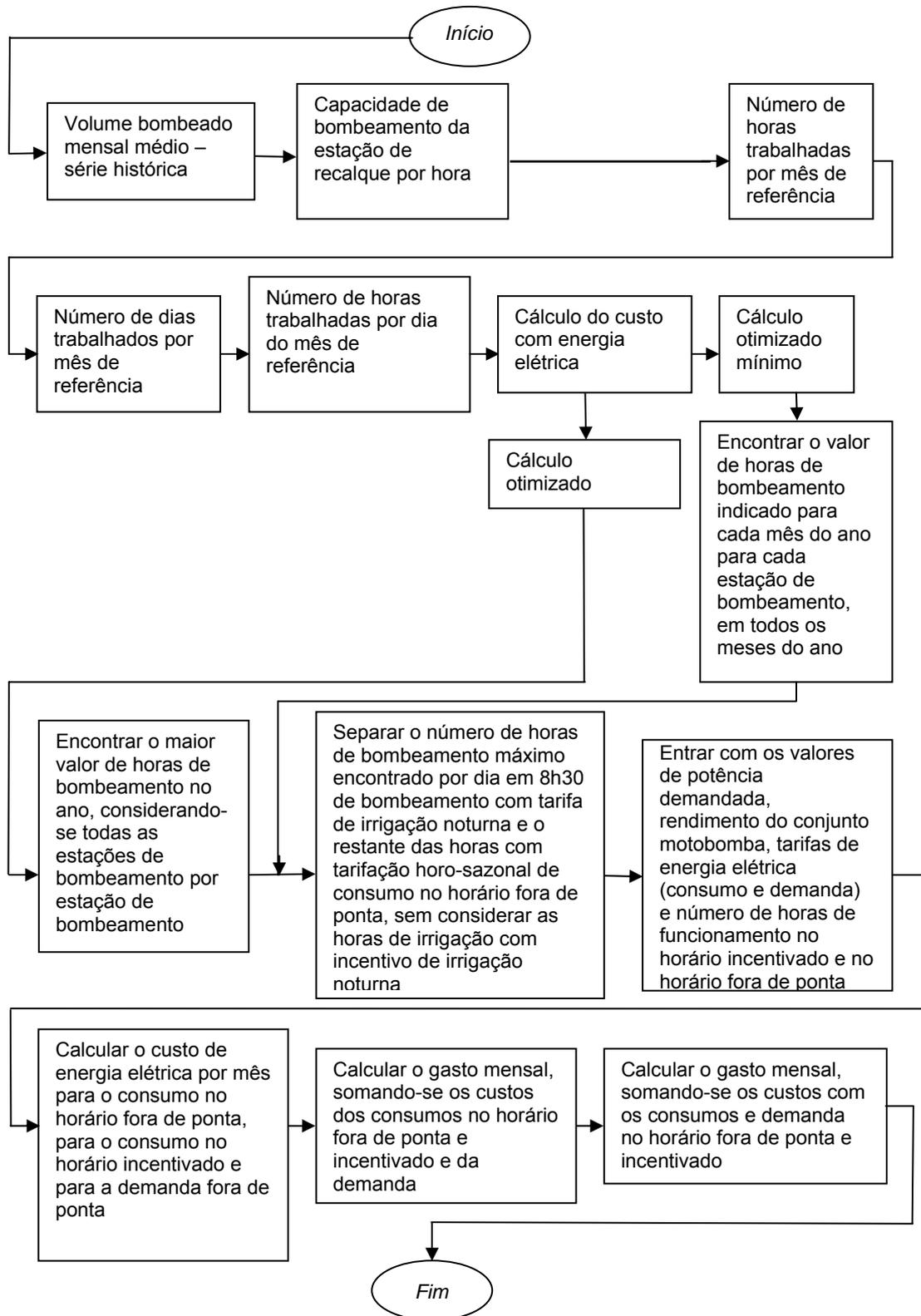


Figura 1 – Fluxograma do gerenciamento de água e energia proposto para perímetro irrigado.

Considerou-se que os sistemas de irrigação de baixa pressão, como microaspersão e gotejamento, possuem eficiência de irrigação entre 80% e 95%, enquanto os de alta pressão, como a aspersão convencional, se encontram entre 60% e 85% (MAROUELLI; SILVA, 1998).

Considerou-se a relação da rotação com a potência exercida pelo conjunto motobomba pela equação 4.2, de Rateau.

$$P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 P_1 \quad (4.2)$$

em que:

P_2 = potência de trabalho do conjunto motobomba, kW;

n_2 = rotação medida no eixo da motobomba, rpm;

n_1 = rotação nominal do conjunto motobomba, rpm; e

P_1 = potência nominal do conjunto motobomba, kW.

3.3. Adequação tarifária – Estudo da escolha da demanda de contrato

De posse das últimas 24 faturas de energia elétrica e do contrato de demanda do DIPIM, simulou-se a escolha da demanda de contrato, considerando-se as vantagens e as desvantagens do pagamento de ultrapassagem de demanda. Essa simulação foi realizada por meio do programa computacional Excel, levando-se em conta a utilização de ferramentas de lógica e de otimização. Foi considerada a possibilidade de ultrapassagem da demanda contratada em até 10%, o que é permitido pela legislação.

Foi estudada a adequação de força-motriz e do dimensionamento de bombas, bem como o seu relacionamento na adequação tarifária. Na Figura 2 é mostrado o fluxograma de adequação tarifária, considerando-se o contrato de demanda de energia da concessionária de energia elétrica da Bahia.

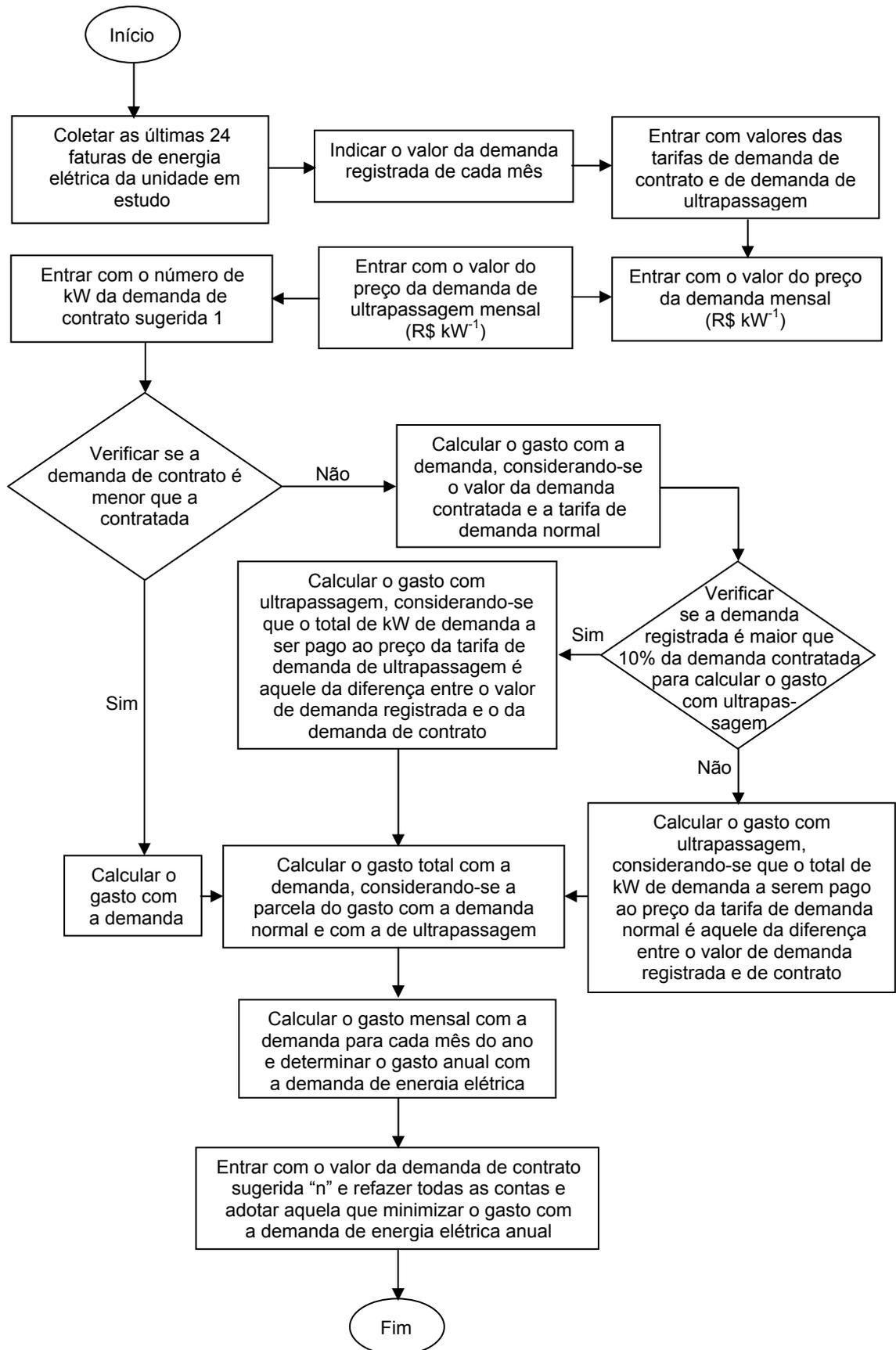


Figura 2 – Fluxograma da adequação tarifária aplicada ao DIPIM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Relação entre o número de horas de irrigação por dia e os gastos com energia elétrica

No Quadro 2 é mostrado o volume de água médio (m^3) bombeado por mês, entre 2003 e 2005, no Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós (DIPIM), em cada uma das cinco estações de pressurização de água (EP).

Quadro 2 – Volume médio de água (m^3) bombeado de 2003 a 2005, no DIPIM

Mês	EP 1 m^3	EP 2 m^3	EP 3 m^3	EP 4 m^3	EP 5 m^3	Total m^3	Vazão média m^3/dia^{-1}	m^3/h^{-1}
Jan.	187.513	218.281	165.020	30.877	45.018	646.709	20.862	1.490
Fev.	193.437	176.271	105.202	113.050	81.478	669.438	23.909	1.708
Mar.	276.755	274.337	227.408	145.134	162.100	1.085.734	35.024	2.502
Abr.	196.173	216.234	145.517	114.462	170.227	842.613	28.087	2.006
Mai	228.288	336.433	272.433	176.179	225.178	1.238.511	39.952	2.854
Jun.	227.876	312.835	286.963	158.486	214.262	1.200.422	40.014	2.858
Jul.	221.299	307.215	277.886	195.546	196.581	1.198.527	38.662	2.762
Ago.	157.429	222.942	197.112	156.951	194.408	928.842	29.963	2.140
Set.	246.718	386.567	302.714	192.904	257.331	1.386.234	46.208	3.301
Out.	188.120	348.101	228.610	183.425	179.829	1.128.085	36.390	2.599
Nov.	36.036	52.879	33.537	55.431	36.735	214.618	7.154	511
Dez.	10.377	11.256	22.976	12.957	11.464	69.030	2.227	159
Total	2.170.021	2.863.351	2.265.378	1.535.402	1.774.611	10.608.763	348.450	24.889
Média	180.835	238.613	188.782	127.950	147.884	884.064	29.038	2.074

Observa-se no Quadro 2 que o maior volume de água bombeado, ou seja, 386.567 m³, ocorreu na EP 2 no mês de setembro. No período de março a outubro, a irrigação apresenta maior consumo de água no perímetro. Já as duas últimas colunas mostram a vazão média diária (considerando 14 h de bombeamento por dia) em m³ dia⁻¹ e m³h⁻¹.

No Quadro 3 são apresentados os horários de ponta, fora de ponta e fora de ponta incentivado da tarifa de energia elétrica horo-sazonal.

Quadro 3 – Tipos de tarifa horo-sazonal em função das horas do dia, aplicada à irrigação no DIPIM

Tipo de Tarifa Horo-Sazonal	Período	Total de Horas
Fora de ponta com incentivo tarifário noturno para irrigação	21h30 às 6 h	8h30
Fora de ponta	6 h às 17 h	11h
Ponta – três horas consecutivas	17 h às 20 h	3 h
Fora de ponta	20h às 21h30	1h30
Total		24 h

Foi considerada uma hora de tolerância (h_t) para o atendimento de irrigantes em suas atividades extras. A demanda do número de horas de funcionamento diário para irrigação em cada mês no sistema de bombeamento de água, considerando-se a otimização do sistema de bombeamento no DIPIM, é apresentada no Quadro 4. Percebe-se que 14 h de irrigação diária satisfaziam à maior demanda mensal de água, que ocorreu em setembro, na EP 2.

Quadro 4 – Número de horas diárias de funcionamento para suprir a irrigação no DIPIM (médios mensais de 2003 a 2005)

	Meses												Média
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	h.dia ⁻¹												
EP1	7,0	7,2	9,8*	7,3	8,3	8,3	8,1	6,0	8,9	7,0	2,1	1,3	6,8
EP2	8,3	6,9	10,2	8,3	12,3	11,5	11,3	8,5	14,0*	12,7	2,8	1,4	9,0
EP3	5,5	3,9	7,3	5,0	8,5	8,9	8,7	6,4	9,3*	7,3	1,9	1,6	6,2
EP4	2,2	5,5	6,7	5,5	8,0	7,3	8,7	7,2	8,6*	8,2	3,2	1,5	6,1
EP5	2,6	4,0	6,9	7,2	9,2	8,8	8,1	8,1	10,4*	7,5	2,3	1,4	6,4

(*) maior número de horas por ano na EP.

Considerando-se a série histórica de consumo de água do DIPIM e as características agronômicas das culturas e dos sistemas de irrigação e mantendo sempre a operação otimizada dos conjuntos motobombas, a disponibilidade de água para os irrigantes no mês de setembro na EP 2 seria igual a 14 h. Já para o mês de dezembro na EP 1 seria igual a 1,3 h (1h18). Essas horas determinam o número de horas-limite por dia, sem prejuízo para a irrigação. É necessário refazer o cálculo do número de horas por dia se, por exemplo, houver modificações técnicas e físicas na irrigação com a troca por sistemas de irrigação mais eficientes e de lâmina de água para a irrigação a ser utilizada em um novo tipo de cultura.

Espera-se, portanto, que a otimização do horário de disponibilização de água para os irrigantes nos diferentes períodos do ano possa economizar energia elétrica.

4.2. Uso da irrigação noturna e de baixa pressão

No Quadro 5 são mostrados o consumo e demanda de energia elétrica em setembro de 2005, com valores atualizados das tarifas para setembro de 2007, no DIPIM.

Conforme se verifica no Quadro 5, o gasto médio mensal atual do DIPIM para as cinco estações de pressurização é de aproximadamente R\$69.964,55. Mas, para cada estação de bombeamento, esse valor foi em torno de R\$13.992,91.

Quadro 5 – Gasto médio com energia elétrica em 2005, no DIPIM, nas cinco EPs com valores de tarifa atualizados

Item	Valor
Consumo registrado (kWh)	332.805
Demanda registrada (kW)	1.742
Tarifa de consumo – Horário fora de ponta – R\$ (kWh) ⁻¹	0,12352
Tarifa de demanda – R\$ (kW) ⁻¹	16,56513
Custos	
Consumo – R\$ (mês) ⁻¹	41.108,10
Demanda – R\$ (mês) ⁻¹	28.856,45
Total com energia elétrica nas cinco EPs (R\$)	69.964,55
Total médio com energia elétrica em uma EP (R\$)	13.992,91

No Quadro 6 é mostrada a potência demandada pelo sistema de bombeamento com a atuação do inversor de frequência, considerando-se as relações de Rateau e o número de horas de funcionamento atual, 14 h.

Quadro 6 – Potência demandada pelos conjuntos motobombas das EPs com a atuação do inversor de frequência sem otimização do número de horas de funcionamento

	Potência Nominal dos Motores Elétricos das EPs (cv)	Potência Estimada pela Relação de Rateau (cv)
EP 1	500	415
EP 2	450	374
EP 3	600	498
EP 4	170	141
EP 5	500	415
Total	2220	1843

As potências nominais dos motores elétricos e as potências otimizadas são exibidas no Quadro 6. As potências otimizadas foram relacionadas, pela equação de Rateau, com as rotações nominais médias dos motores das EPs de 1.785 rpm e as rotações medidas médias dos motores em plena carga de 1.678 rpm. A rotação de 1.678 rpm medida pode ser justificada pelo uso do inversor de frequência que ajusta a rotação para a vazão máxima, ou de projeto, necessária à irrigação.

No Quadro 7, tem-se o número de horas de funcionamento diário indicado para cada estação de pressurização, bem como os valores da tarifa horo-sazonal verde praticada em 2007 no DIPIM nas cinco estações de pressurização. Deve-se observar que os valores adotados para o número diário de horas são os maiores dentro da série histórica de 2003 a 2005, para cada estação de pressurização.

Observa-se na estação de pressurização EP2 que é necessário utilizar as 8h30 da irrigação de horário noturno incentivado e mais as 5h30 do horário fora de ponta de irrigação diariamente (Quadro 7). Nota-se que, no caso da tarifa incentivada para a Região Nordeste do Brasil, o incentivo tarifário é de 90% das tarifas de consumo de energia elétrica (kWh). O rendimento médio dos conjuntos de motobomba das EPs foi considerado igual a 80%.

Quadro 7 – Número de horas de funcionamento indicado e os valores da tarifa horo-sazonal verde praticada em 2007 no DIPIM, nas cinco EPs

	Potência Otimizada dos Motores	Horas de Funcionamento		Tarifa de Energia Elétrica			
		Horário Fora de Ponta	Horário Incentivado	Verde		Verde incentivada	
				R\$ kWh ⁻¹	R\$ kW ⁻¹	R\$ kWh ⁻¹	R\$ kW ⁻¹
	kW (cv)	h (dia) ⁻¹	h (dia) ⁻¹				
EP1	305,4 (415)	1,3	8,5				
EP2	275,3 (374)	5,5	8,5				
EP3	366,3 (498)	0,8	8,5	0,12352	16,56513	0,012352	16,56513
EP4	103,8 (141)	0,1	8,5				
EP5	305,4 (415)	1,9	8,5				

O Quadro 8 apresenta o gasto médio mensal com energia elétrica, em função do número de horas de funcionamento, com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007 no DIPIM, nas cinco estações de pressurização de água.

Quadro 8 – Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação em 2007 no DIPIM, nas cinco EPs

	Gasto com Consumo no Horário Normal	Gasto com Consumo no Horário Incentivado	Gasto com Demanda	Gasto Total
	R\$ (mês) ⁻¹	R\$ (mês) ⁻¹		R\$ (mês) ⁻¹
EP1	1.840,53	1.203,42	6.329,02	9.372,97
EP2	7.008,18	1.083,08	5.696,12	13.787,38
EP3	1.359,16	1.444,11	7.594,82	10.398,09
EP4	48,14	409,16	2.151,87	2.609,17
EP5	2.690,01	1.203,42	6.329,02	10.222,45
				46.390,06

O gasto mensal do DIPIM seria em torno de R\$46.390,06 (Quadro 8), caso fossem adotados os horários definidos de acordo com a série histórica de volume de água bombeado, época do ano e necessidade hídrica das culturas, entre outros. Com base nessa simulação, pode-se assegurar que o potencial de economia em relação ao gasto do sistema de irrigação atual seria de 33% (R\$23.574,49 por mês).

No Quadro 9 são apresentadas as horas de funcionamento diário otimizadas para cada mês do ano que entraram na simulação do gasto mensal com energia elétrica das cinco EPs.

Conforme se observa no Quadro 9, para o mês de janeiro na EP1 seria necessário irrigar apenas 7,0 h no horário incentivado e nenhuma hora no horário de irrigação com tarifação de horário de fora de ponta.

No Quadro 10 é apresentado o gasto com energia elétrica de acordo com o número de horas de funcionamento diário otimizado para cada mês, com a utilização máxima do horário incentivado, adotando-se a tarifa horosazonal verde do mês de setembro de 2007 para o DIPIM, nas cinco estações de pressurização. Considerou-se, nesta simulação, que 80% dos irrigantes do perímetro irrigado que utilizam as EPs adotaram sistema de irrigação de baixa pressão automatizado, ou seja, microaspersão ou gotejamento, e os outros 20% adotaram sistemas de irrigação de alta pressão, como aspersão convencional.

Quadro 9 – Número de horas de funcionamento otimizado para cada mês do ano no DIPIM, nas cinco EPs, de 2003 a 2005

Número de Horas Fora de Ponta	Meses do Ano											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
EP1	-	-	1,3	-	-	-	-	-	0,4	-	-	-
EP2	-	-	1,7	-	3,8	3,0	2,8	-	5,5	4,2	-	-
EP3	-	-	-	-	-	0,4	0,2	-	0,8	-	-	-
EP4	-	-	-	-	-	-	0,2	-	0,1	-	-	-
EP5	-	-	-	-	0,7	0,3	-	-	1,9	-	-	-

Número de Horas Fora de Ponta Incentivada	Meses do Ano											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
EP1	7,0	7,2	8,5	7,3	8,3	8,3	8,1	6,0	8,5	7,0	2,1	1,3
EP2	8,3	6,9	8,5	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	2,8	1,4
EP3	5,5	3,9	7,3	5,0	8,5	8,5	8,5	6,4	8,5	7,3	1,9	1,6
EP4	2,2	5,5	6,7	5,5	8,0	7,3	8,5	7,2	8,5	8,2	3,2	1,5
EP5	2,6	4,0	6,9	7,2	8,5	8,5	8,1	8,1	8,5	7,5	2,3	1,4

Quadro 10 – Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento otimizado com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco EPs

	Gasto com Consumo no Horário Fora de Ponta	Gasto com Consumo no Horário Fora de Ponta Incentivado	Gasto com Demanda	Gasto Total
	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹
EP1	2.406,85	11.269,72	75.948,20	89.624,77
EP2	26.758,50	11.111,15	68.353,38	106.223,03
EP3	2.378,53	12.385,36	91.137,84	105.901,74
EP4	144,41	3.480,30	25.822,39	29.447,10
EP5	4.105,80	10.420,24	75.948,20	90.474,24
Gasto anual com energia elétrica (R\$ ano ⁻¹)				421.670,87
Gasto médio mensal com energia elétrica (R\$ mês ⁻¹)				35.139,24

Conforme se observa no Quadro 10, o gasto médio mensal simulado com energia elétrica foi igual a R\$35.139,24, com a utilização do número de horas de funcionamento otimizado e a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco estações de pressurização. Dessa forma, o potencial de economia com gastos com energia elétrica em relação à situação atual seria igual a 49,7%.

Utilizando o número de horas do Quadro 4, anteriormente apresentado, considerou-se que todos os irrigantes do perímetro irrigado adotariam sistemas de irrigação de baixa pressão. Com isso, a vazão demandada por dia seria menor que a adotada atualmente no DIPIM, devido ao aumento na eficiência de irrigação. Atualmente, próximo de 80% dos irrigantes possuem sistemas de irrigação de baixa pressão (eficiência de irrigação igual a 90%, em média), e 20% têm sistemas de irrigação de alta pressão (eficiência de irrigação igual a 75%, em média). Assim, a vazão foi reduzida proporcionalmente a 20% dos irrigantes, ou seja, passando o seu sistema de irrigação de alta pressão para o de baixa pressão.

No Quadro 11 são apresentados os valores das horas de funcionamento diário otimizadas para cada mês do ano que entraram na simulação do gasto mensal com energia elétrica das cinco EPs, considerando-se todos os irrigantes com sistemas de irrigação de baixa pressão e utilizando as 8h30 de irrigação noturna com tarifa incentivada.

Verifica-se, no Quadro 11, que para o mês de janeiro seria necessário irrigar apenas 6,8 h no horário incentivado e nenhuma hora além no horário fora de ponta, na EP1.

No Quadro 12, apresentam-se os gastos com energia elétrica de acordo com o número de horas de funcionamento diário otimizado e diferenciado para cada mês com a utilização máxima do horário incentivado, adotando-se a tarifa horo-sazonal verde de setembro de 2007, para o DIPIM, nas cinco estações de pressurização. Considerou-se que, nessa simulação, todos os irrigantes do perímetro irrigado que utilizam as EPs adotaram sistema de irrigação de baixa pressão automatizado, ou seja, microaspersão ou gotejamento.

Quadro 11 – Número de horas de funcionamento otimizado para cada mês do ano no DIPIM, nas cinco EPs, somente com sistemas de baixa pressão

	Meses do Ano											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Número de Horas Fora de Ponta												
EP1	-	-	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP2	-	-	1,4	-	3,4	2,7	2,5	-	5,1	3,8	-	-
EP3	-	-	-	-	-	0,1	-	-	0,6	-	-	-
EP4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EP5	-	-	-	-	0,4	-	-	-	1,5	-	-	-
Número de Horas de Funcionamento Otimizado												
EP1	6,8	7,0	9,5	7,1	8,0	8,0	7,8	5,9	8,6	6,8	2,1	1,3
EP2	8,1	6,7	9,9	8,0	11,9	11,2	11,0	8,2	13,6	12,3	2,7	1,4
EP3	5,4	3,8	7,1	4,9	8,3	8,6	8,4	6,2	9,1	7,1	1,9	1,6
EP4	2,2	5,3	6,5	5,4	7,7	7,0	8,5	7,0	8,4	8,0	3,1	1,5
EP5	2,6	3,9	6,7	7,0	8,9	8,5	7,9	7,8	10,0	7,3	2,3	1,4

Quadro 12 – Gasto com energia elétrica em função do número de horas de funcionamento otimizado com a utilização máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco EPs

	Gasto com Consumo no Horário Fora de Ponta	Gasto com Consumo no Horário Fora de Ponta Incentivado	Gasto com Demanda	Gasto Total
	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹
EP1	1.415,79	11.170,61	75.948,20	88.534,60
EP2	24.082,65	13.379,25	68.353,38	105.815,28
EP3	1.189,27	12.300,41	91.137,84	104.627,52
EP4	-	3.398,47	25.822,39	29.220,86
EP5	2.690,01	10.519,35	75.948,20	89.157,55
Gasto com energia elétrica (R\$ (ano) ⁻¹)				417.355,82
Gasto com energia elétrica (R\$ (mês) ⁻¹)				34.779,65

O gasto mensal com energia elétrica foi igual a R\$34.779,65 (Quadro 12) ao se usar o número de horas de funcionamento otimizado e utilizar a máxima do horário incentivado para irrigação no ano de 2007, para o DIPIM, nas cinco EPs, considerando-se todos os irrigantes com sistemas de irrigação de baixa pressão e empregando as 8h30 de irrigação noturna com tarifa incentivada. Dessa forma, o potencial de economia com gastos com energia elétrica em relação à situação atual é de 50,2%.

4.3. Estudo da adequação tarifária – Escolha da demanda contratada

O contrato celebrado entre o DIPIM e a Companhia de Eletricidade da Bahia – COELBA determina a cobrança da demanda registrada e não da demanda de contrato, podendo-se, ainda, ultrapassar em 10% o valor da demanda contratada.

No Quadro 13, é apresentada a demanda de energia elétrica média em 2003, 2004 e 2005.

Quadro 13 – Demanda de energia elétrica média do DIPIM de 2003 a 2005

Mês	Demanda (kW)					Total
	EP I	EP II	EP III	EP IV	EP V	
Janeiro	405,12	399,36	520,32	192,96	238,40	1.756,16
Fevereiro	329,28	323,52	481,44	146,16	149,92	1.430,32
Março	359,04	346,56	482,88	161,28	139,20	1.488,96
Abril	424,80	387,36	493,92	191,52	165,12	1.662,72
Mai	432,38	385,84	493,19	193,24	203,13	1.707,78
Junho	472,32	408,24	516,96	173,52	232,80	1.803,84
Julho	470,16	416,16	516,24	181,44	212,64	1.796,64
Agosto	472,32	414,72	522,00	204,12	249,12	1.862,28
Setembro	479,52	418,32	534,24	212,40	243,84	1.888,32
Outubro	476,64	417,60	532,81	214,57	253,20	1.894,82
Novembro	469,44	419,76	523,44	214,20	261,36	1.888,20
Dezembro	399,60	408,24	526,32	174,96	215,76	1.724,88

Nos Quadros 14, 15, 16, 17 e 18, mostram-se os dados de entrada e a adequação da escolha da demanda de contrato, nas cinco estações de pressurização de água do DIPIM. A tarifa de demanda contratada foi de R\$16,56513 kW⁻¹ e a tarifa de demanda de ultrapassagem, de R\$49,69539 kW⁻¹.

Quadro 14 – Adequação tarifária na EP1 do DIPIM

Demanda contratada atual (kW).....		478,40		
Demanda de ultrapassagem atual (kW).....		526,24		
Demanda contratada sugerida (kW).....		436,00		
Demanda de ultrapassagem – situação proposta (kW).		479,60		
Mês do Ano	Demanda	Gasto com Demanda Contratada	Gasto com Demanda de Ultrapassagem	Gasto Total com Demanda
2003 a 2005	kW	R\$	R\$	R\$
Janeiro	405,12	6.710,87	0,00	6.710,87
Fevereiro	329,28	5.454,57	0,00	5.454,57
Março	359,04	5.947,54	0,00	5.947,54
Abril	424,80	7.036,87	0,00	7.036,87
Maio	432,38	7.162,43	0,00	7.162,43
Junho	472,32	7.824,04	0,00	7.824,04
Julho	470,16	7.788,26	0,00	7.788,26
Agosto	472,32	7.824,04	0,00	7.824,04
Setembro	479,52	7.943,31	0,00	7.943,31
Outubro	476,64	7.895,60	0,00	7.895,60
Novembro	469,44	7.776,33	0,00	7.776,33
Dezembro	399,60	6.619,43	0,00	6.619,43
Total (R\$ ano ⁻¹)				85.983,30

Quadro 15 – Adequação tarifária na EP2 do DIPIM

Demanda contratada atual (kW).....		423,20		
Demanda de ultrapassagem atual (kW).....		465,52		
Demanda contratada sugerida (kW).....		381,60		
Demanda de ultrapassagem – situação proposta (kW).....		419,80		
Mês do Ano	Demanda	Gasto com Demanda Contratada	Gasto com Demanda de Ultrapassagem	Gasto Total com Demanda
2003 a 2005	kW	R\$	R\$	R\$
Janeiro	399,36	6.615,45	0,00	6.615,45
Fevereiro	323,52	5.359,15	0,00	5.359,15
Março	346,56	5.740,81	0,00	5.740,81
Abril	387,36	6.416,67	0,00	6.416,67
Maio	385,84	6.391,49	0,00	6.391,49
Junho	408,24	6.762,55	0,00	6.762,55
Julho	416,16	6.893,74	0,00	6.893,74
Agosto	414,72	6.869,89	0,00	6.869,89
Setembro	418,32	6.929,53	0,00	6.929,53
Outubro	417,60	6.917,60	0,00	6.917,60
Novembro	419,76	6.953,38	0,00	6.953,38
Dezembro	408,24	6.762,55	0,00	6.762,55
Total (R\$ ano ⁻¹)				78.612,81

Quadro 16 – Adequação tarifária na EP3 do DIPIM

Demanda contratada atual (kW).....				533,60
Limite da demanda de ultrapassagem atual (kW).....				587,00
Demanda contratada sugerida (kW).....				485,70
Limite da demanda de ultrapassagem – situação proposta (kW)....				534,30
Mês do Ano	Demanda	Gasto com Demanda Contratada	Gasto com Demanda de Ultrapassagem	Gasto Total com Demanda
2003 a 2005	kW	R\$	R\$	R\$
Janeiro	520,32	8619,17	0,00	8.619,17
Fevereiro	481,44	7975,12	0,00	7.975,12
Março	482,88	7998,97	0,00	7.998,97
Abril	493,92	8181,85	0,00	8.181,85
Maio	493,19	8169,76	0,00	8.169,76
Junho	516,96	8563,51	0,00	8.563,51
Julho	516,24	8551,58	0,00	8.551,58
Agosto	522,00	8647,00	0,00	8.647,00
Setembro	534,24	8849,76	0,00	8.849,76
Outubro	532,81	8826,07	0,00	8.826,07
Novembro	523,44	8670,85	0,00	8.670,85
Dezembro	526,32	8718,56	0,00	8.718,56
Total (R\$ ano ⁻¹)				101.772,18

Quadro 17 – Adequação tarifária na EP4 do DIPIM

Demanda contratada atual (kW).....				170,00
Limite da demanda de ultrapassagem atual (kW).....				187,00
Demanda contratada sugerida (kW).....				195,10
Limite da demanda de ultrapassagem – situação proposta (kW)....				214,60
Mês do Ano	Demanda	Gasto com Demanda Contratada	Gasto com Demanda de Ultrapassagem	Gasto Total com Demanda
2003 a 2005	kW	R\$	R\$	R\$
Janeiro	192,96	3196,41	1.141,01	4.337,41
Fevereiro	146,16	2421,16	0,00	2.421,16
Março	161,28	2671,62	0,00	2.671,62
Abril	191,52	3172,55	1.069,44	4.242,00
Maio	193,24	3201,05	1.154,92	4.355,97
Junho	173,52	2874,38	0,00	2.874,38
Julho	181,44	3005,58	0,00	3.005,58
Agosto	204,12	3381,27	1.695,61	5.076,88
Setembro	212,40	3518,43	2.107,08	5.625,52
Outubro	214,57	3554,38	2.214,92	5.769,30
Novembro	214,20	3548,25	2.196,54	5.744,79
Dezembro	174,96	2898,24	0,00	2.898,24
Total (R\$ ano ⁻¹)			11.579,52	49.022,85

Quadro 18 – Adequação tarifária na EP5 do DIPIM

Demanda contratada atual (kW).....		265,00		
Limite da demanda de ultrapassagem atual (kW).....		291,50		
Demanda contratada sugerida (kW).....		237,60		
Limite da demanda de ultrapassagem – situação proposta (kW)....		261,40		
Mês do Ano	Demanda	Gasto com Demanda Contratada	Gasto com Demanda de Ultrapassagem	Gasto Total com Demanda
2003 a 2005	kW	R\$	R\$	R\$
Janeiro	238,4	3949,13	0,00	3.949,13
Fevereiro	149,92	2483,44	0,00	2.483,44
Março	139,2	2305,87	0,00	2.305,87
Abril	165,12	2735,23	0,00	2.735,23
Mai	203,13	3364,87	0,00	3.364,87
Junho	232,8	3856,36	0,00	3.856,36
Julho	212,64	3522,41	0,00	3.522,41
Agosto	249,12	4126,71	0,00	4.126,71
Setembro	243,84	4039,24	0,00	4.039,24
Outubro	253,2	4194,29	0,00	4.194,29
Novembro	261,36	4329,46	0,00	4.329,46
Dezembro	215,76	3574,09	0,00	3.574,09
Total (R\$ ano ⁻¹)				42.481,11

A demanda de contrato que mais se ajustaria para minimizar os gastos com a demanda contratada seria a demanda de 436 kW (Quadro 14). Ressalta-se, aqui, que o valor de R\$85.983,30 é o mesmo pago pelo DIPIM na época da realização da coleta de dados. No entanto, a COELBA seleciona os três valores mensais de demanda registrada no ano que mais se distanciam do valor da demanda de contrato e cobra somente um, como multa. Então, quanto mais o valor da demanda de contrato estiver ajustado com as demandas registradas, menor será a possibilidade de pagar a multa ao final do contrato. Dessa forma, a substituição do valor da demanda contratada de 478,4 kW para 436 kW é a indicada.

Na EP2, sugere-se a substituição do valor da demanda contratada de 423,2 kW para 381,6 kW (Quadro 15).

No caso da EP3, a substituição do valor da demanda contratada de 533,6 kW para 485,7 kW é a indicada (Quadro 16). Já no Quadro 17 da EP4 a substituição do valor da demanda contratada de 170 kW para 195,1 kW é a indicada. No entanto, nessa estação de pressurização haverá redução de

24% (R\$11.579,52) do valor gasto com a demanda de contrato anualmente, pois há considerável gasto com a ultrapassagem da demanda contratada.

No Quadro 18, sugere-se para a EP5 a substituição do valor da demanda contratada de 265 kW para 237,6 kW.

No estudo das cinco EPs do DIPIM, somente na EP4 a demanda de contrato sugerida, além de minimizar o risco de pagamento de multa por inadequação da demanda de contrato escolhida, reduziria significativamente o valor gasto com a demanda de contrato nessa estação de pressurização.

No Quadro 19, apresenta-se a síntese da escolha da demanda otimizada nas cinco estações de pressurização do DIPIM.

Quadro 19 – Síntese da escolha da demanda otimizada no DIPIM

	Demanda Contratada	Demanda Sugerida	Gasto com Demanda	Economia com a Escolha da Demanda de Contrato	
	kW	kW	R\$ (ano) ⁻¹	R\$ (ano) ⁻¹	%
EP1	478,4	436,0	85.983,30	-	-
EP2	423,2	381,6	78.612,81	-	-
EP3	533,6	485,7	101.772,18	-	-
EP4	170,0	195,1	49.022,85	11.579,52	24
EP5	265,0	237,6	42.481,11	-	-

5. CONCLUSÃO

As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir:

- O estudo da série histórica do consumo de água pelos irrigantes, as necessidades hídricas das culturas e as condições climáticas formam um conjunto de informações imprescindível para ações de gerenciamento de uso da água.
- Foi otimizado o número de horas de funcionamento mensal para o DIPIM, para cada estação de pressurização e para diferentes condições de funcionamento.
- Houve redução na vazão demandada no DIPIM de 1,37 (vazão outorgada) para $0,8 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.
- A utilização das oito horas e trinta minutos de incentivo tarifário noturno para irrigação dentro das 14 h por dia de bombeamento reduziu em 33% a conta mensal de energia elétrica.
- A utilização das oito horas e trinta minutos de incentivo tarifário noturno para irrigação com complementação do tempo de irrigação por dia de

cada mês para o bombeamento diminuiu em 49,7% a conta mensal de energia elétrica.

- A utilização das oito horas e trinta minutos de incentivo tarifário noturno para irrigação com complementação do tempo de irrigação por dia de cada mês e todos os irrigantes utilizando sistemas de irrigação de baixa pressão reduziram em 50,2% a conta mensal de energia elétrica em relação à situação atual.
- No estudo das cinco estações de pressurização do DIPIM, somente na EP 4 a demanda de contrato sugerida diminuiria em 24% o valor gasto com a demanda de contrato nessa estação de pressurização.

6. REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. O processo de outorga de águas e licenciamento ambiental para irrigação. Minicurso. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 12., 2002, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, MG: Agência Nacional de Águas, 2002.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2006. 625 p.

DIPIM – Distrito de Irrigação do Perímetro Irrigado de Mirorós. **Dados de acompanhamento da operação e manutenção**. Ibipeba, BA: Gerência Executiva do Distrito de Irrigação de Mirorós, 2007.

EFFERTZ, R.; OLSON, D. C.; VISSA, R.; ARRUMATEGUI, H. **Operação e manutenção de projetos irrigados**. Trabalho elaborado pelo Bureau of Reclamation, do Departamento de Interior dos Estados Unidos, por solicitação da Secretaria de Irrigação do Governo Brasileiro. Brasília: Secretaria de Irrigação, 1993. 490 p. (Manual de irrigação, 4).

MAROUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 1998. 15 p. (Circular Técnica da Embrapa Hortaliças, 11).

MDA/SAF – Ministério do Desenvolvimento Agrário/Secretaria da Agricultura Familiar. Disponível em: <www.mda.gov.br/saf>. Acesso em: mar. 2007.

RIBEIRO, M.C. **Estudo sobre a racionalização do uso de energia na irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

3. CONCLUSÃO GERAL

Este estudo abordou a racionalização do uso da energia elétrica e da água no perímetro irrigado de Mirorós, em Ibipeba, Bahia, para a agricultura familiar. Foram focalizados: (i) Tarifação binômica para consumo de água para irrigação (vazão e pressão manométrica) em cada lote; (ii) Aproveitamento energético de barragens; (iii) Utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central, para economia de energia; e (iv) Gerenciamento do uso da água e da energia elétrica. Demonstrou-se o grande potencial de redução da tarifa de água e da economia de energia elétrica no perímetro irrigado de Mirorós, o que resultaria em grande potencial de economia de energia para o país se fosse adotado esse sistema para outros perímetros de mesmas características.

3.1. Tarifação binômica para consumo da água e pressão manométrica na tomada d'água

Os principais desafios e vantagens da utilização das tarifas binômicas são:

Desafios

(i) A migração dos produtores que utilizam métodos de irrigação ineficientes, ou tradicionais, para outros de melhor eficiência pode ser intensificada como

conseqüência da redução no custo da energia se a tarifa binômica for adotada.

(ii) A implantação da tarifa binômica continuará permitindo a liberdade de escolha do sistema de irrigação entre dos limites contratuais.

(iii) A aplicação da tarifa binômica em perímetros irrigados depende da conscientização dos irrigantes e dos investimentos em equipamentos para medir e registrar a pressão na entrada do lote.

Vantagens

(i) O irrigante desembolsará o valor real do uso da água pressurizada para a irrigação do lote.

(ii) Na simulação da operação de perímetros irrigados, a tarifa binômica mostrou-se boa ferramenta de racionalização do uso da água e da energia elétrica.

(iii) O desenvolvimento de novas tecnologias de irrigação pode incentivar o surgimento de diferentes conceitos de tarifas de água aplicadas na administração de perímetros irrigados.

(iv) O valor dos lotes de irrigação na licitação de venda inicial poderá ser diferenciado de acordo com a pressão de chegada na tomada de água de cada lote, ou seja, sua diferença de nível até o bombeamento influenciará o preço da aquisição do lote.

Assim, a implantação da tarifa binômica é indicada, tendo em vista o fato de os desafios serem muito menores que as vantagens.

3.2. Aproveitamento energético da barragem

Foi observado que o aproveitamento da energia hidráulica da barragem é técnica e economicamente viável, com nenhum impacto ambiental, pois a barragem já está construída. O potencial de geração de energia elétrica estimado da barragem Manuel Novaes foi igual a 500 kW. Seria reduzido em torno de 12% da demanda contratada e 50% do consumo anual de energia elétrica do DIPIM, com a implementação da PCH. A análise econômica de vida útil mostrou a viabilidade da implementação do sistema de geração de energia elétrica, e o investimento seria pago num período

médio inferior a 6 anos. De acordo com o exposto, a implementação da PCH na barragem Manoel Novaes do DIPIM é importante para a redução de gastos com a tarifa de água cobrada dos irrigantes da agricultura familiar.

3.3. Utilização de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central para economia de energia

Com o objetivo de reduzir os custos da agricultura irrigada, como um todo, foi estudado um protótipo de pivô central instalado no Laboratório de Hidráulica da UFV, para verificar a viabilidade do uso do inversor de frequência e a economia de energia elétrica para uma área correspondente às declividades de até 20%. Foram considerados: (i) desenvolvimento de um modelo matemático e simulação da utilização de inversor de frequência em sistemas de irrigação tipo pivô central; e (ii) construção de um protótipo para simulação em situações próprias de sistemas de irrigação do tipo pivô central automatizados no seu bombeamento, com o uso de inversor de frequência.

Concluiu-se que:

- (i) Os emissores com válvulas reguladoras de pressão (VRP) mantêm adequadas as lâminas de irrigação previstas para suprir as demandas hídricas da cultura com as declividades estudadas para motores com frequência nominal (60 Hz). Porém, a alteração da frequência e, conseqüentemente, da rotação do eixo do motor e a da bomba alteraram as uniformidades da lâmina de irrigação, que ficaram abaixo das necessidades das plantas.
- (ii) As modificações na rotação do motor pelo inversor de frequência permitiram o pivô central adaptar-se a qualquer lâmina d'água para a cultura, ou seja, de diferentes demandas hídricas.
- (iii) Portanto, a otimização de gastos com energia elétrica indica que se deve irrigar durante o período de incentivo tarifário noturno, complementado com a irrigação tarifada no regime de tarifa horo-sazonal verde, para se obter economia nos gastos com consumo e demanda de energia elétrica.

(iv) Abre espaço para novos estudos de emissores que não dependam de válvulas de reguladores de pressão e sejam exclusivos para sistemas que utilizam inversor de frequência.

3.4. Gerenciamento do uso de água e energia elétrica do perímetro irrigado de Mirorós

Os objetivos deste trabalho foram: (i) verificar a influência da variação no número de horas de funcionamento de irrigação por dia na conta de energia elétrica mensal; (ii) estudar a implementação de 100% da irrigação do perímetro irrigado com a utilização de métodos que utilizem baixa pressão e com todos os irrigantes utilizando as 8h30 de irrigação noturna; e (iii) adequação tarifária – simular ações com e sem adequação de força-motriz.

Conclui-se sobre o exposto o que se segue:

- (i) Verificação da influência da variação no número de horas de funcionamento de irrigação por dia na conta de energia elétrica mensal:
 - (a) O estudo das séries históricas do consumo da água por parte dos irrigantes, das necessidades hídricas das culturas, das condições climáticas e das características do bombeamento forma-se um conjunto de informações imprescindível para ações de gerenciamento do uso da água.
 - (b) A partir do estudo, determinou-se para cada mês o número de horas de funcionamento mensal que atende às necessidades hídricas e minimize o consumo de energia, sem prejuízo do atendimento das necessidades hídricas das culturas.
 - (c) A redução no número de horas de funcionamento do bombeamento de água proporcionará economia significativa nos gastos com consumo de energia elétrica.
- (ii) Estudo da implementação de 100% da irrigação no perímetro irrigado usufruindo-se de métodos que utilizam baixa pressão e com todos os irrigantes usando as 8h30 de irrigação noturna incentivada:

- (a) Verificou-se que os potenciais de economia com gastos com energia elétrica foram de 33% e 50% dos gastos atuais para valor do número de horas de funcionamento diário fixadas para o ano todo ou estabelecidas mensalmente em função da demanda hídrica histórica, respectivamente.
- (b) Para que esses resultados sejam alcançados, todos os irrigantes envolvidos deverão adotar equipamentos de irrigação de baixa pressão, se possível, automatizados e irrigar somente nos horários preestabelecidos pelo estudo.
- (iii) Estudo da adequação tarifária – escolha da demanda de contrato.
O estudo da adequação tarifária/enquadramento tarifário deve ser feito anualmente e sempre que houver significativa alteração no volume mensal de demanda de água; significativa alteração nos sistemas de irrigação; alteração tarifária; e alteração no horário de incentivo tarifário.
Pelo estudo de caso, detectou-se que somente em uma das cinco estações de pressurização de água a adequação tarifária indicou economia potencial de 24% em gastos com energia elétrica.