

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO
POR ASPERSÃO PIVÔ CENTRAL**

Antônio Marcos de Melo Medeiros

Orientador:

Dr. Pedro Marques da Silveira

Co-orientador:

**Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de
Oliveira**

Fevereiro-2010

ANTÔNIO MARCOS DE MELO MEDEIROS

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO
POR ASPERSÃO PIVÔ CENTRAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Dr. Pedro Marques da Silveira

Co-orientador:

**Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de
Oliveira**

Goiânia, GO - Brasil

2010

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG**

M488o Medeiros, Antônio Marcos de Melo.
Otimização de sistemas de irrigação por aspersão pivô central [manuscrito] / Antônio Marcos de Melo Medeiros. – 2010.

131 f., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Marques da Silveira; Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, 2010.

Bibliografia : f.101.

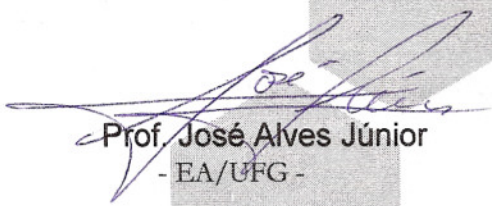
1. Eficiência energética – Consumo (Economia). 2. Dimensionamento econômico. 3. Conversores de frequência. 4. Irrigação por aspersão. 5. Pivô Central. I. Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos II. Título.

CDU: 626.84

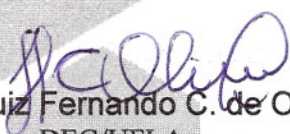
ANTÔNIO MARCOS DE MELO MEDEIROS

TÍTULO: "Otimização de sistemas de irrigação por aspersão pivô central".

Tese DEFENDIDA e APROVADA em 25 de fevereiro de 2010, pela Banca Examinadora Constituída pelos membros:




Prof. José Alves Júnior
- EA/UFG -



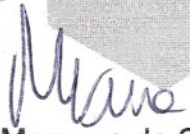
Prof. Luiz Fernando C. de Oliveira
- DEG/UFLA -



Prof. José Wilson Lima Nerys
- EEEEC/UFG -



Prof. Antônio Melo de Oliveira
- EEEEC/UFG -



Dr. Pedro Marques da Silveira
Presidente – Embrapa Arroz e Feijão

UFG

Este trabalho é dedicado à minha querida e amada Juliana Carneiro, ao meu pai Abelardo Medeiros, *in memoriam*, pelo incentivo, minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, pela saúde e oportunidades oferecidas.

Ao meu orientador Dr. Pedro Marques da Silveira e co-orientador professor Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pela importante orientação e instrução durante o trabalho.

Minha companheira Juliana, pela compreensão e ajuda.

Meu pai, minha mãe e meus irmãos pelo apoio e conselhos nos momentos de dificuldade.

Aos professores da UFG pela minha formação acadêmica e profissional.

Aos funcionários da UFG pelo bom serviço prestado.

Aos funcionários e amigos da Embrapa Arroz e Feijão pelo bom serviço prestado.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro concedido.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico-CNPq-Brasil.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável (...) para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer".

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 SISTEMA PIVÔ CENTRAL	18
2.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO	21
2.3 OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA NA IRRIGAÇÃO	23
2.4 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO	26
2.5 ESTRUTURA TARIFÁRIA DA ENERGIA ELÉTRICA	33
2.5.1 Cálculo da tarifa	34
2.6 SELEÇÃO DE BOMBAS E DE MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA	39
2.7 CONVERTOR DE FREQUÊNCIA-INVERSOR.....	43
2.8 EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO E UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA	48
2.9 DÉFICIT HÍDRICO	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 SISTEMA PIVÔ CENTRAL DE REFERÊNCIA	54
3.2 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DO SISTEMA PIVÔ CENTRAL.....	56
3.2.1 Linha lateral	57
3.2.2 Adutora e sucção	59
3.2.3 Bomba e motor elétrico	61
3.2.4 Diâmetro econômico em função do custo mínimo	62
3.3 UTILIZAÇÃO DO CONVERTOR DE FREQUÊNCIA	63
3.4 ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO PIVÔ CENTRAL E SISTEMAS DE PLANTIO	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO	71
4.1.1 Dimensionamento para a linha lateral do pivô central	71
4.1.2 Dimensionamento para a adutora do pivô central	73

4.2	COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA ADUTORA	81
4.3	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	83
4.3.1	Varição da pressão ao longo de um giro do pivô central	84
4.3.2	Retorno financeiro do investimento	87
4.3.3	Retorno financeiro do pivô central com vazão de 172,5 m³ h⁻¹.....	87
4.3.4	Retorno financeiro do pivô central com vazão de 246,6 m³h⁻¹	88
4.4	ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E SISTEMAS DE PLANTIO DA CULTURA DO FEIJOEIRO	89
4.4.1	Análise do consumo de energia elétrica para diferentes condições climáticas e sistemas de plantio.....	93
5	CONCLUSÕES	99
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	101
	APÊNDICES	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação das características do motor padrão, motor de alto rendimento adequado e conjunto motobomba adequado.....	22
Tabela 2. Períodos do dia	33
Tabela 3. Itens considerados nos cálculos de faturas de energia elétrica para as tarifas horo-sazonal azul e verde.	35
Tabela 4. Descontos percentuais na tarifa de energia elétrica para irrigação em função do tipo de consumidor e das regiões do Brasil.	38
Tabela 5. Simulações do consumo de energia nos quatro primeiros anos da cultura do cafeeiro para a região do Triângulo Mineiro, utilizando os sistemas de irrigação por gotejamento, LEPA, pivô convencional.	50
Tabela 6. Simulações do consumo de energia nos quatro primeiros anos da cultura do cafeeiro para a região Oeste da Bahia, utilizando os sistemas de irrigação por gotejamento, LEPA, pivô convencional.	50
Tabela 7. Equipamentos, coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e fonte dos dados.	51
Tabela 8. Altura geométrica entre o ponto pivô e o final da linha lateral para diferentes posições do equipamento medidas em ângulos de giro.	55
Tabela 9. Combinações realizadas dos diâmetros para a linha lateral do pivô central. ...	59
Tabela 10. Combinações de diâmetros e comprimento da adutora do pivô central.	61
Tabela 11. Valores de vida útil e taxas de manutenção de componentes de sistemas de irrigação.	63
Tabela 12. Perda de carga ($hf_{\text{pivô}}$) e pressão na entrada da linha lateral (P_m) do pivô central para as diferentes combinações de diâmetros e vazão.	71
Tabela 13. Custo do pivô ($R\*) para as diferentes combinações de diâmetro da linha lateral.	72
Tabela 14. Perda de carga total (hf_{total}), na adutora (hf_{adutora}) e sucção ($hf_{\text{sucção}}$) para as diferentes combinações de diâmetros da adutora e vazão.	73
Tabela 15. Custo fixo ($R\*) da adutora (CF_{adutora}), sucção ($CF_{\text{sucção}}$) e total (CF_{total}) para as diferentes combinações de diâmetros da adutora do pivô central.	74
Tabela 16. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora	

para a vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, rotação de 1750 rpm e motor padrão e de alto rendimento.	75
Tabela 17. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, rotação de 1750 rpm e motor padrão e de alto rendimento.	78
Tabela 18. Diâmetro obtido da adutora para diferentes métodos de dimensionamento.	83
Tabela 19. Análise financeira para o sistema pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	87
Tabela 20. Análise financeira para o sistema pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	88
Tabela 21. Distribuição de frequência da umidade relativa do ar obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.	89
Tabela 22. Distribuição de frequência da velocidade do vento obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.	90
Tabela 23. Distribuição de frequência da evaporação do Tanque Classe A obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.	90
Tabela 24. Cálculo da ET_o e ET_c para o período de 35 a 60 dias de idade do feijoeiro (floração).	91
Tabela 25. Cálculo da ET_o e ET_c para o período de 60 a 80 dias de idade do feijoeiro (enchimento dos grãos).	91
Tabela 26. Eficiência da aplicação de água do sistema de irrigação pivô central.	92
Tabela 27. Análise do consumo de energia elétrica para diferentes valores de fração da área de déficit, com valores climáticos médios.	94
Tabela 28. Análise do consumo de energia elétrica para diferentes valores de fração da área de déficit, com valores climáticos extremos.	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema pivô central (Bernardo et al., 2006).....	18
Figura 2. Variação dos custos de investimento (CI), operacional (CO) e total (CT) de um sistema de bombeamento em função do diâmetro da tubulação de recalque (Carvalho & Oliveira, 2008)	31
Figura 3. Rendimento da bomba em função da rotação específica (Carvalho & Oliveira, 2008).....	42
Figura 4. Configuração de um conversor de frequência (Rashid, 1999).....	43
Figura 5. Conversor de frequência com reatâncias indutivas instaladas na entrada (WEG, 2008).....	45
Figura 6. Ação do inversor de frequência na regulação da rotação do motor (Carvalho & Oliveira, 2008).....	46
Figura 7. Ponto de operação de um pivô central quando a linha lateral ocupa posição intermediária (Carvalho & Oliveira, 2008)	47
Figura 8. Sistema pivô central com controle automático da velocidade em função da pressão diferencial (Cendes, 2004).....	48
Figura 9. Consumo de energia e eficiência média para diferentes métodos de irrigação (Marouelli & Silva, 1998).....	49
Figura 10. Custos de energia elétrica versus área irrigada (Bonomo, 1999).....	51
Figura 11. Localização do pivô central 1 da Embrapa Arroz e Feijão (Google Earth, 2008)	54
Figura 12. Variações do nível do terreno, pressão na base do pivô central e pressão na bomba em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	85
Figura 13. Diferença da altura manométrica (? H) e do consumo de energia elétrica (?E) em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	85
Figura 14. Variações do nível do terreno, pressão na base do pivô central, pressão na bomba em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	86

Figura 15. Diferença da altura manométrica (ΔH) e do consumo de energia elétrica (ΔE) em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 86

RESUMO

Medeiros, A. M. de M. **Otimização de sistema de irrigação por aspersão pivô central.** 2010. 131 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.¹

Ultimamente vem percebendo com mais intensidade, a escassez de água e energia elétrica em algumas regiões do país. Esta observação ocorreu justamente no período do ano quando existe a maior necessidade de demanda de água das culturas irrigadas. A necessidade de reconhecer a possibilidade de ocorrência de impactos negativos do uso da irrigação, avaliando-os e desenvolvendo soluções tecnológicas que provoquem melhorias, viabilizando a atividade agrícola irrigada, de forma adequada. Este trabalho teve por objetivo a otimização de um sistema de irrigação pivô central, partindo das características desse sistema e considerando a análise de várias combinações de tubos para a adutora e linha lateral; escolha do conjunto motobomba com maior rendimento; utilização e comparação entre motor padrão e de alto rendimento, após a escolha da melhor opção de diâmetro da adutora e linha lateral, análise do sistema utilizando inversor de frequência. A metodologia adotada consistiu na otimização de dois sistemas de irrigação pivô central um existente no local e outro considerando um sistema de irrigação pivô central novo projetado para atender determinada lâmina d'água. Para os dois sistemas de irrigação pivô central foi considerando a análise econômica do diâmetro das tubulações que compõem o sistema de irrigação a pivô central, analisando várias configurações de diâmetros diferentes, rotações do conjunto moto bomba, utilização de motores de alto rendimento e padrão, uso do inversor de frequência. O resultado com os cálculos realizados foi uma economia de energia elétrica de 25% considerando o uso do diâmetro econômico para os dois sistemas adotados. Para análise com uso inversor de frequência com, resultou em uma economia de 9,23% para o sistema de irrigação pivô central existente, e para o novo sistema de irrigação pivô central resultou em uma economia de 10,6%. A análise do retorno do investimento considerando o uso do sistema com inversor de frequência foi de uma taxa de retorno do investimento de 6,52% a.a, sistema de irrigação pivô central existente e para o sistema de irrigação pivô central novo foi de 9,48% a.a. O projeto tem retorno, mas de longo prazo, ou seja, inviável em curto prazo, considerando a taxa básica de juro com 12,25% a.a. Os resultados apresentados no trabalho mostram que há um grande potencial de economia de energia elétrica, e a análise econômica mostrou a viabilidade do sistema com retorno do capital investido. O cálculo utilizado para a determinação do sistema de irrigação pivô central diminuiu o custo e o tempo para obtenção de dados que compõem a análise do potencial de economia de energia elétrica.

Palavras-chave: eficiência energética, dimensionamento econômico, conversor de frequência.

¹ Orientador: Dr. Pedro Marques da Silveira. Embrapa Arroz e Feijão.
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. DEG-UFLA.

ABSTRACT

Medeiros, A. M. de M. **Optimization of system center pivot sprinkler irrigation** 2010. 131 f. Thesis (Doctor in Agronomy: Soil and Water) - Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010. ¹

It has been noticed lately that some regions of Brazil has presented lower supplying of water and energy. It has occurred mainly during the period of the year when it is higher the need for irrigation water. It is necessary to recognize the possibility of negative impacts of irrigation, to analyze them and present solutions so as to improve the irrigation systems. The aim of this study is the estimation by one system of irrigating the central pivot, breaking from the characteristics of this systems and considering the analyzed of varies combinations of pipes for water main and lateral line, choice of the set motor pump with major yield, utilization and comparison among motor standard and of high yield after the selection from best option in diameter from water main and lateral line, analyze the system using a variable frequency drives. The result with the calculations performed was an energy saving of 25% considering the use of the diameter for the two economic systems adopted. For analysis using a frequency inverter with resulted in a saving of 9.23% for center pivot irrigation system exists, and for the new center pivot irrigation system resulted in savings of 10.6%. The analysis of return on investment considering the use of the system with variable frequency drive was a rate of return on investment of 6.52% pa, center pivot irrigation system for existing and center pivot irrigation system was again 9.48 % pa. The project's return, more long-term, or feasible in the short term, considering the benchmark interest rate to 12.25% pa. The results presented in the study show that there is great potential for power savings, and economic analysis showed the feasibility of the system with return on invested capital. The calculation used for determining the center pivot irrigation system reduces the cost and time to obtain data that make analysis of the potential of saving electricity.

Key words: energy efficiency, economic size, variable frequency drives.

¹ Adviser: Dr. Pedro Marques da Silveira. Embrapa Arroz e Feijão.
Co-adviser: Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. DEG-UFLA.

1 INTRODUÇÃO

Como os sistemas de irrigação são usuários de água, faz-se necessário que as pesquisas voltadas aos projetos de concepção, uso e manejo destes sistemas sejam contextualizadas e atualizadas para que os estudos tenham caráter não só científico, mas também prático e técnico, garantindo o retorno do avanço do conhecimento, para a sociedade. Portanto, o paradoxo da crescente demanda de água no setor agrícola, que é o seu maior usuário, a necessidade de economizá-la e a demanda por novas técnicas que envolvam o uso da água no meio rural, fomenta para que novos métodos de análise e tecnologias sejam alvos de pesquisa em diversas áreas do conhecimento.

Embora que a irrigação desempenha um papel fundamental para a sociedade, reconhece-se que, devido às mudanças nos valores sociais e ao aumento da competição pelo uso da água, a quantidade de água disponível para a agricultura irrigada terá seu uso controlado. O planejamento em nível de bacia hidrográfica do uso da água e por sua vez da energia elétrica, faz-se necessário de modo que se possa produzir com sustentabilidade, agredindo o menos possível os recursos hídricos e evitando o racionamento de água pelo emprego da atividade irrigação.

A irrigação é uma técnica de produção agrícola que concorre, em algumas regiões, diretamente com a indústria e as cidades, pelo uso da água, sendo vista nesse processo como vilã, pois o volume de água utilizado é demasiadamente grande. Todavia, essa é uma ação necessária, pois a aplicação de água nas culturas aumenta a eficiência de uso de outros insumos, como fertilizantes, por exemplo, garante a produção na entressafra em regiões áridas ou de regime pluvial inconstante, além de oferecer segurança durante os veranicos.

Devido à facilidade operacional, à alta adaptabilidade a diferentes condições de solo e topografia e à pequena demanda por mão-de-obra, a prática da irrigação por meio de sistema pivô central vem sendo amplamente utilizada na região Centro-Oeste do Brasil (Medeiros, 2005). A energia elétrica consumida em sistemas de irrigação do tipo pivô central está associada ao bombeamento e ao acionamento dos motores elétricos instalados

nas torres do sistema, responsáveis pelo deslocamento do equipamento sobre a área irrigada. A energia elétrica consumida no bombeamento depende do volume de água a ser elevado da fonte até a área irrigada, da energia hidráulica a ser fornecida a água pela bomba e do rendimento global do sistema de bombeamento, ou seja, dos rendimentos da bomba e do motor elétrico.

O custo do consumo de energia depende do tempo de funcionamento do sistema de irrigação, da tarifa praticada pelas concessionárias de energia elétrica e do período de funcionamento do sistema, das condições de funcionamento do equipamento, das condições climáticas e do manejo da irrigação.

Em um sistema de irrigação estabelecido, a área irrigada é um fator de dimensionamento que não se altera, portanto, o volume de água bombeado sofre alterações em função da lâmina bruta. A lâmina bruta é variável com a capacidade de armazenamento de água no solo, com a cultura e com a sua fase de desenvolvimento, com as condições climáticas, com a eficiência do sistema de irrigação e com o manejo adotado (Mantovani & Ramos, 1994).

A redução nas perdas e a melhoria na uniformidade de aplicação de água nos sistemas de irrigação por aspersão, associado às técnicas de manejo e do percentual da área adequadamente irrigada, bem como, o uso de equipamentos de automação e controle, como por exemplo, o conversor de frequência, tem permitido a redução no volume de água na irrigação.

As reduções na altura manométrica exigem menores potências instaladas, sendo um dos fatores que deve ser analisado na otimização de sistemas de irrigação. Esta redução se consegue com uma otimização dos pontos de captação e de instalação do equipamento, de modo a reduzir o comprimento da adutora e do desnível geométrico; redução das perdas de carga e de dispositivos que permitam a adequação da rotação do sistema motobomba em função da posição da linha lateral na área irrigada. Quando há uma variação do ponto de operação de projeto, como é o caso do sistema de irrigação pivô central, o ajuste da curva da bomba pode ser feito pela mudança da velocidade de rotação com uso de conversor de frequência, que do ponto de vista de racionalização da energia, apresenta como uma forma não dissipativa, implicando em uma redução no seu consumo (Alves, 2001).

A energia consumida pela instalação de bombeamento depende dentre outros fatores: vazão, pressão, rendimentos da bomba e do motor e do uso. Portanto, uma seleção

da bomba e do motor com base em critérios econômicos, consiste na análise do custo de investimento desses equipamentos e do custo operacional proporcionado com a redução de energia. A seleção da bomba para atender o ponto de operação capaz de fornecer a vazão e altura manométrica de projeto, geralmente é feita nas curvas características fornecidas pelos fabricantes. Nas referidas curvas, procura-se sempre selecionar o modelo que proporcione um alto rendimento.

Na agricultura irrigada, o planejamento adequado das instalações dos sistemas de irrigação e a administração cuidadosa dos recursos hídricos são essenciais para o empresário agrícola. O bom funcionamento do sistema de irrigação está diretamente subordinado à qualidade e longevidade dos componentes e, principalmente, aos cálculos de perda de carga durante o dimensionamento hidráulico da rede. Nesse processo de dimensionamento, em que há diferentes possibilidades de diâmetros frente a diferentes perdas de carga admissíveis na tubulação, o procedimento manual em busca da melhor solução torna-se trabalhoso e demorado. Nesse contexto, a utilização de ferramentas matemáticas de otimização, como os algoritmos genéticos, tornam-se úteis para auxiliar a tomada de decisão. A otimização matemática das instalações de sistemas de irrigação e do manejo do sistema, visando diminuir ou adequar os custos de produção de alimentos, sem desperdício de água e energia de bombeamento, vem ao encontro dos anseios da sociedade mundial e da agricultura irrigada moderna.

Portanto, otimizar um sistema significa minimizar os custos de investimentos e variáveis de modo a maximizar a receita do produtor. A maximização energética se consegue com a redução do volume de água bombeado, redução da altura manométrica e com o aumento do rendimento global do sistema de captação.

Face ao exposto, verifica-se que, para a otimização de um sistema de irrigação por aspersão do tipo pivô central, deve-se analisar os fatores que afetam o volume de água a ser captado, a altura manométrica e o rendimento global do sistema de bombeamento. Portanto, esse trabalho tem como objetivo: 1) Avaliar o consumo de energia elétrica de um sistema de irrigação pivô central com o dimensionamento econômico das tubulações que compõem o sistema; 2) Viabilidade de redução de energia consumida desse sistema com o uso do inversor de frequência e de motor de alto rendimento e padrão, mudança de velocidade de bombeamento; 3) Consumo de energia para diferentes condições climáticas e de plantio.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMA PIVÔ CENTRAL

O pivô central é um sistema de irrigação por aspersão com movimentação mecânica empregado, principalmente em grandes áreas. O sistema constituído de uma lateral móvel, com vários aspersores, suspensa por torres sobre rodas, que irriga uma área circular através da rotação da linha lateral de aspersão em torno de um ponto fixo. A parte da lateral móvel que se estende além da última torre é denominada lance em balanço e algumas vezes são dotadas de um canhão final. Para tal, as torres são dotadas de motores elétricos que proporcionam a cada torre um movimento independente, de modo a proporcionar um alinhamento da linha lateral (Figura 1). O movimento de cada torre deve ser independente, devido ao fato de que, cada torre terá que descrever uma circunferência crescente à medida que se distância do ponto pivô (Colombo, 2003; Bernardo et al., 2006).

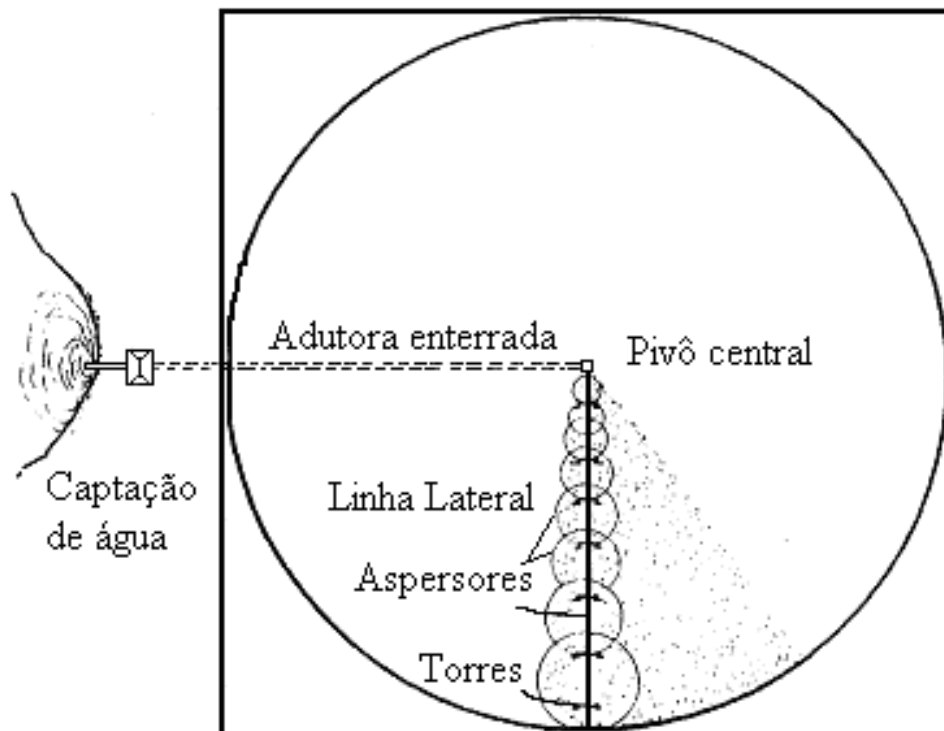


Figura 1. Sistema pivô central (Bernardo et al., 2006).

O diâmetro da linha lateral de um sistema pivô central pode ter um diâmetro único em toda sua extensão ou pode ser constituído de diâmetros diferentes associados em série. Diâmetros diferentes associados em série são mais utilizados em equipamentos de maior porte de modo proporcionar uma diminuição na perda de água do sistema de irrigação (Carvalho & Oliveira, 2008). Como a área a ser irrigada por cada aspersor ao longo da linha lateral deverá ser crescente à medida que se distancia do ponto central do pivô, este aumento é conseguido pelo arranjo entre espaçamento e a vazão do aspersor. Portanto, para se conseguir um aumento na área irrigada pelos aspersores posicionados no final da linha lateral, deve-se fazer uma combinação entre diâmetro do bocal e pressão. Há, portanto, a necessidade de pressões mais elevadas no final da linha lateral, principalmente quando se emprega o aspersor canhão na extremidade da linha, pouco utilizado atualmente. Esta elevação de pressão deve ser adequada de modo a não pulverizar excessivamente o jato de água lançado pelo bocal do aspersor o que poderá agravar as perdas por deriva.

O atendimento da pressão do aspersor posicionado na extremidade final proporcionará uma grande variação de pressão ao longo da linha lateral, que será maior quanto maior o tamanho da área irrigada. Para adequar a pressão na base dos aspersores à sua pressão de operação, empregam-se neste tipo de equipamento de irrigação, válvulas reguladoras de pressão, que funcionam como válvulas dissipadoras, proporcionando assim perdas de carga localizadas (Bernardo et al., 2006).

Segundo Kincaid & Heermann (1970), devem ser mantidas pressões adequadas no sistema de irrigação para se obterem as vazões desejadas e uma aplicação uniforme de água pelos aspersores. Os mesmos autores enfatizaram que a redução da perda de pressão, além de proporcionar uma pressão mais favorável aos aspersores, diminui a pressão requerida pelo pivô, permitindo, assim, a escolha de um sistema de bombeamento de menor capacidade.

Segundo Chu & Moe (1972), dois parâmetros hidráulicos básicos para o dimensionamento e avaliação do sistema pivô central são: a perda de pressão total do sistema que é necessária para dimensionar a bomba e, a distribuição de pressão ao longo da linha lateral que possibilita a seleção dos emissores para proporcionar uma aplicação de água mais adequada.

Lima et al. (2003) observaram que os sistemas de irrigação precisam ser bem projetados, principalmente em áreas de topografia acidentada, onde ocorre uma variação acentuada na pressão do sistema, causando diferenças de vazão, reduzindo a uniformidade

de distribuição de água e a consequente diminuição da eficiência de aplicação, além de aumentar as perdas de água por escoamento superficial.

O pivô central é, segundo Vilela (2002) e Queiroz et al. (2008), o sistema de irrigação por aspersão mais automatizado que existe no mercado, podendo essa automação variar desde um simples acessório a controladores que permitem o seu acionamento a distância por meio de ondas de rádio ou telefone celular. A automação desejada e implementada deve ser aquela que considera a informação de sensores no solo, na planta ou na atmosfera, para o acionamento do sistema de irrigação e não um calendário programável.

Segundo Braga & Oliveira (2005), devido à alta tecnologia empregada na agricultura em busca da maior produtividade, muitas áreas utilizam a irrigação controlada por meio de pivô central para o controle das necessidades hídrica da cultura. Em certas regiões agrícolas o emprego desta tecnologia está gerando alta demanda dos mananciais devido ao grande número de equipamentos instalados e suas dimensões.

No Brasil, os projetos de sistemas de irrigação por pivô central, por exemplo, envolvem grande aporte de investimentos, o que praticamente excluem os pequenos produtores, os quais recorrem ao sistema convencional de aspersão que utilizam um sistema de alimentação monofásico (Folegatti et al., 1998).

As pivôs centrais apresentam alto custo de instalações, e é por isso que são economicamente mais interessantes em grandes áreas, onde os custos de instalação podem ser divididos por uma área irrigada maior. De modo geral, os custos de instalação de um pivô giram em torno de R\$ 3.000,00 a R\$ 5.000,00 por hectare e seus custos de manutenção são equiparáveis aos da aspersão convencional (Rassini et al., 2007). Entretanto, seus custos de operação (energia e mão-de-obra) são baixos, pois têm baixa relação potência/área e um operador consegue operar, facilmente, áreas de até 300 ha.

O custo da energia elétrica corresponde a aproximadamente 22% do custo variável para implantar uma lavoura de milho irrigada no Brasil, desconsiderando os custos indiretos com amortização, manutenção e assistência técnica. A opção tem sido produzir o que o mercado remunera melhor, como sementes, feijão na entre safra, frutas e olerícolas. Opções como o cultivo de frutas e olerícolas tendem a requerer sistemas de irrigação localizada (Folegatti et al., 1998).

A irrigação está entrando numa fase em que a prioridade é a eficiência no uso da água, ou seja, a avaliação da quantidade de água que é efetivamente utilizada para o

desenvolvimento das culturas em relação ao total de água aplicada. Quanto menor é a perda de água, seja por evaporação, escoamento superficial ou percolação em direção ao subsolo, maior é a eficiência da irrigação.

Já existem métodos de irrigação que trabalham com eficiência de aplicação de até 95%, praticamente eliminando as perdas envolvidas. Por isso, a irrigação no Brasil está demandando necessariamente equipamentos que possam distribuir a água com mais eficiência, evitando desperdícios, e, estudos mais precisos sobre fatores fisiológicos, pedológicos e climáticos, que determinam a quantidade correta de água a ser utilizada (Marcuzzo, 2008).

Observa-se, portanto, que a irrigação é uma tecnologia importante na produção de alimentos no Brasil. Mesmo, no Brasil, sendo utilizada numa área pequena com 3.440.470 ha em comparação à área total cultivada de 58.460.963 ha (Christofidis, 2007), o que equivale a 5,89% da área total plantada, a irrigação é responsável pelo triplo da produção de uma mesma área sem irrigação, e por mais de um terço do valor de toda a produção nacional (ANA, 2004). Verifica-se com isto a importância do papel da irrigação na produção de alimentos e na economia do Brasil.

2.2 SISTEMA DE BOMBEAMENTO

Usualmente os sistemas de irrigação por aspersão do tipo pivô central são projetados com a finalidade de atender a necessidade de água para determinado tipo de cultura. As bombas radiais aceleram a massa líquida por meio da força centrífuga fornecida pelo giro do rotor, cedendo energia cinética à massa em movimento e transformando a energia cinética internamente em energia de pressão, ou piezométrica, na saída do rotor, através da voluta da bomba. O rotor da bomba, que contém pás presas a um disco, gira acionado por um motor elétrico, dentro de uma carcaça estanque. No giro, o rotor impulsiona o líquido para a periferia, criando uma pressão maior de saída e uma menor na entrada do rotor e por consequência, gerando um gradiente hidráulico entre a entrada e a saída da bomba. A massa líquida acelerada pelo rotor ganha velocidade e pressão e alcança a voluta da bomba que possui seção gradualmente crescente (Jardim, 1992).

A curva característica de uma bomba radial é a representação gráfica do seu desempenho operacional, em que, para certa velocidade angular de giro, de um

determinado rotor, registra-se a variação da altura manométrica total em função da vazão de bombeamento.

O processo de adequação da força motriz e de sistema de bombeamento, considerando-se vários motores, envolve, para cada um deles, a análise técnica de seu funcionamento e a análise econômica das possibilidades de troca.

Na Tabela 1 estão apresentados os gastos anuais com consumo e demanda de energia elétrica de um equipamento de irrigação do tipo pivô central, operando 1405 horas por ano com o motor padrão e, com motor de alto rendimento adequado às condições de carga, bem como os gastos para a substituição proposta do conjunto motobomba atual por outro mais adequado às condições de projeto (conjunto motobomba adequando), segundo Espíndula Neto et al. (2003).

Tabela 1. Comparação das características do motor padrão, motor de alto rendimento adequado e conjunto motobomba adequando.

Motor	Pot ¹ (CV)	IC ² (%)	η ³ (%)	CON ⁴ (hfp) (R\$ ano ⁻¹)	CON ⁵ (not) (R\$ ano ⁻¹)	DEM ⁶ (R\$ ano ⁻¹)	Total (R\$ ano ⁻¹)	Redução (%)
Padrão (em uso)	175	93	92,1	5.282,00	888,70	7.733,30	13.904,20	-
Motor de alto rendimento adequado	175	93	94,8	5.141,80	865,10	7.528,10	13.535,10	2,73
Conjunto motobomba adequado	150	95	94,1	4.316,90	726,30	6.320,30	12.016,10	12,64

¹Potência dos motores elétricos, ²índice de carregamento, ³rendimento dos motores elétricos, ⁴gastos com consumo de energia elétrica no horário fora de ponta, ⁵gastos com consumo de energia elétrica no período noturno, ⁶gastos com demanda de energia elétrica.

Observa-se que, para o equipamento de irrigação operando com o motor atual, ou seja, do tipo padrão, os gastos anuais com consumo e demanda de energia elétrica totalizam R\$ 13.904,20. Comparando com os valores de gastos com consumo e demanda de energia elétrica quando adotada a substituição proposta por um motor de alto rendimento adequado às condições de carga, os gastos anuais são de R\$ 13.535,10, ou seja, a substituição proposta, pode gerar uma economia de R\$ 369,10, por ano. Quando avaliados os gastos anuais para a substituição proposta do conjunto motobomba, de R\$ 12.016,10, obteve-se uma economia anual com a substituição proposta de R\$ 1.888,10, sendo, as duas propostas, tanto para adequação de força motriz, quanto para adequação do

sistema de bombeamento, para o empresário agrícola, atrativa e viável sob o ponto de vista técnico e econômico.

2.3 OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA NA IRRIGAÇÃO

Otimizar consiste em selecionar, dentre um conjunto de possíveis alternativas, uma que seja ótima, de acordo com determinado critério. O objetivo principal dos diversos métodos de otimização econômica de redes de distribuição de água é encontrar o sistema de menor custo, que atenda aos requerimentos hidráulicos de vazão e pressão nos pontos de consumo de água (Medeiros & Gomes, 1999).

Bastos (1994) recomenda estimular um manejo racional da irrigação e a otimização dos equipamentos elétricos utilizados, com a finalidade de tornar a utilização da água e da energia mais eficientes. O estabelecimento do consumo de água das culturas deve ser feito criteriosamente a fim de propiciar um dimensionamento correto dos sistemas de irrigação.

Segundo Scaloppi (1986), os sistemas de irrigação por aspersão são responsáveis por grande quantidade de energia utilizada na produção agrícola. As exigências em água e energia na irrigação, bem como os custos envolvidos devem ser analisados simultaneamente, para diferentes alternativas de dimensionamento dos sistemas de irrigação por aspersão. A quantidade de energia consumida na operação de bombeamento de água para irrigação pode ser expressa por:

$$E = \frac{\gamma V H}{\eta} \quad [1]$$

em que:

E = energia consumida pela unidade de bombeamento (J);

γ = peso específico da água (9800 N m⁻³);

V = volume de água bombeado (m³);

H = altura manométrica total (m); e

η = rendimento global da unidade de bombeamento, decimal.

Pela Equação 1 pode-se verificar que a redução da energia consumida em unidades de bombeamento depende dos seguintes fatores, individuais ou combinados:

a) Redução do volume de água bombeado;

- b) Redução da altura manométrica total;
- c) Aumento do rendimento global da unidade de bombeamento.

O volume de água bombeado é determinado pela área efetivamente irrigada, lâmina líquida a ser aplicada e eficiência de aplicação. A área efetivamente irrigada refere-se à superfície do solo ocupado com a cultura e a lâmina líquida de irrigação é variável durante o seu desenvolvimento (Bernardo et al, 2006). A lâmina total de água aplicada depende da eficiência do método de irrigação empregado, que segundo Scaloppi (1986), expressa a relação entre a quantidade de água à cultura e a quantidade de água aplicada, sendo função de parâmetros de dimensionamento, operação e manejo da irrigação. Por essa razão, constitui-se no fator mais prontamente modificável para redução do volume de água bombeado.

A definição da época de plantio empregando o zoneamento de risco climático e o uso de sistemas de plantio, como o sistema plantio direto, permitem uma redução do volume de água aplicado na irrigação. A palhada na superfície do solo altera a relação solo-água, pois previne a evaporação reduzindo, assim, a taxa de evapotranspiração das culturas, e propicia aumento do intervalo entre irrigações. Deste modo, espera-se que, com o incremento do nível de cobertura do solo, haja economia significativa nos custos de operação do sistema de irrigação (Stone & Moreira, 2000). Moreira & Stone (1995) observaram maior eficiência do uso da água no sistema plantio direto com cobertura morta, em relação a outros sistemas de preparo do solo. Portanto, os parâmetros de manejo da irrigação determinados para as condições de preparo convencional do solo, nem sempre atendem às necessidades para o manejo em condições de plantio direto.

Nascimento et al. (2001) verificaram que, para o feijoeiro cultivado em Goiânia, em condições de plantio direto, houve uma economia de água de irrigação, que corresponde a uma redução de 20% do total da água aplicada em relação ao plantio convencional. Andrade et al. (2002), avaliando o consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo em Santo Antônio de Goiás, verificaram que a evapotranspiração máxima apresentou valores menores à medida que aumentou a porcentagem de cobertura do solo; e que os valores máximos dos coeficientes de cultura relativos do feijoeiro, observados dos 29 aos 35 dias, decresceram com o aumento da cobertura do solo, sendo iguais a 1,25, 1,24, 1,15, 1,12 e 1,01, para as porcentagens de cobertura do solo de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, respectivamente.

Segundo Bonomo (1999), a eficiência de aplicação de sistemas de irrigação por aspersão está diretamente relacionada com a uniformidade com que a água é aplicada sobre a superfície do solo, com as perdas de água que ocorrem por evaporação e arrastamento pelo vento e com os vazamentos no sistema de condução. Sistemas de baixa eficiência requerem um volume de água maior derivado da fonte, o que aumenta o consumo de energia.

Considera-se que os métodos de irrigação de baixa eficiência levam a um consumo de energia elétrica e água, superior do requerido pelos cultivos. Pode-se enfatizar que é possível a expansão das áreas irrigadas, devido ao investimento em equipamentos e tecnologias que permitiram maior mobilidade e controle do uso da água, com aumento de produtividade e redução dos custos de operação e de manutenção. Dessa forma, aumenta-se a competitividade da agricultura irrigada com redução do consumo de energia e de perdas de água (Mariotoni & Dores, 2004).

O monitoramento da agricultura irrigada permite o aumento da produtividade sem acarretar prejuízos advindos dos custos de manutenção e operação do sistema. Um estudo realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais mostrou que, se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizadas, sendo 20% da energia economizada referente à aplicação desnecessária de água e 10% ao redimensionamento e otimização dos equipamentos utilizados na irrigação (Lima et al., 1999).

Medeiros et al. (2003), avaliando a eficiência de uso de energia elétrica no Perímetro Irrigado de Pirapora, no período de 1999 a 2000, verificaram que os excessos de energia anual para o perímetro foram de 2.108 MWh e 1.856,8 MWh, respectivamente, conduzindo a um desperdício de energia de 97% e 88%, respectivamente. Os autores concluíram que em razão da aplicação excessiva de água, também foi excessivo o consumo de energia elétrica sendo necessária, portanto, a implantação de um programa de manejo de irrigação visando otimizar o uso de água e de energia elétrica.

A altura manométrica requerida na unidade de bombeamento depende da altura geométrica total, da pressão de operação das unidades aplicadoras de água e das perdas de pressão resultantes da condução da água nas tubulações e acessórios componentes do sistema de irrigação (Carvalho & Oliveira, 2008).

Segundo Scaloppi (1986), a pressão de operação dos aspersores constitui-se em importante alternativa a ser considerada em programas destinados à conservação de

energia. Por outro lado, os níveis de eficiência global das unidades de bombeamento podem ser otimizados pela escolha criteriosa da bomba hidráulica, da unidade motora e do mecanismo de transmissão de potência entre o motor e a bomba. Além disso, o autor ressalva que as variações operacionais do sistema de irrigação deverão ser mantidas dentro de limites considerados aceitáveis para que não comprometam a eficiência de aplicação de água. Em equipamentos pivô central, é comum a utilização das válvulas reguladoras de pressão, uma vez que o equipamento movimenta sofrendo alterações nas pressões ao longo da linha lateral em função da topografia.

A topografia acidentada de algumas regiões dificulta o projeto e o manejo da irrigação, gerando dificuldades para balanceamentos de pressão ao longo das tomadas de irrigação. Geralmente são projetados para garantir vazão constante nos aspersores, tornando sistemas superdimensionados. Portanto, a pressão de projeto fica acima da indicada pelos reguladores, uma vez que é sempre projetada para atender condições mínimas desta unidade de medida, exigida no ponto de maior altura manométrica, produzindo sobrepressão nos demais pontos da área irrigada (Bernardo et al, 2006).

A análise conjunta da curva característica da bomba e da curva do sistema define o ponto de operação do sistema de bombeamento para cada situação. O bom desempenho de um projeto de bombeamento depende da criteriosa escolha dos componentes para que na operação se consiga um ponto operacional que atenda, em todas as situações, as necessidades de vazão e pressão de trabalho com bom rendimento operacional (Jardim, 1992).

2.4 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO

A captação, elevação e condução de água envolvem consumo de energia pelo sistema de recalque. O maior ou menor consumo de energia elétrica depende do desnível existente entre a fonte de água e o destino final, diâmetro, material e comprimento da tubulação, rendimento da bomba e do motor elétrico, e, com o tempo de funcionamento do sistema de bombeamento (Marouelli, 1998).

No dimensionamento da tubulação de recalque, estão envolvidas as seguintes variáveis hidráulicas: velocidade média de escoamento da água (V), vazão (Q), diâmetro do tubo (D) e perda de carga total (h_f). Para tanto, dispõe-se de duas equações, a da continuidade e a da perda de carga (Denículi, 2001), ou seja:

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4} \quad [2]$$

$$hf = k \frac{Q^n}{D^m} L \quad [3]$$

em que:

Q = vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

D = diâmetro do tubo (m);

v = velocidade de escoamento (m s^{-1});

L = comprimento da canalização (m);

hf = perda de carga total (m);

k = coeficiente que depende da rugosidade interna dos tubos e das características físicas da água;

n e m = expoentes que dependem da equação de perda de carga empregada, sendo $n = 2$ e $m = 5$ para a equação de Darcy e $n = 1,852$ e $m = 4,87$ para a equação de Hazen-Williams (Azevedo Netto et al., 1998).

Nos projetos de sistemas pressurizados de irrigação, a vazão, geralmente é uma variável conhecida, restando assim três das quatro variáveis hidráulicas (V , D e hf) para as duas equações. Portanto, o dimensionamento da tubulação de recalque é um problema indeterminado, pois existem mais incógnitas do que equações, podendo haver inúmeras soluções para o diâmetro que atende a vazão de projeto.

Essa indeterminação pode ser solucionada admitindo-se uma restrição hidráulica ao problema, que pode ser uma perda de carga máxima admissível no conduto, uma velocidade recomendada de escoamento ou então admitindo um diâmetro já normalizado dentre os comercialmente disponíveis. A metodologia mais adequada para resolver o problema constitui-se na análise econômica que minimize o custo de implantação e operação do sistema de bombeamento. Portanto, o dimensionamento econômico da adutora envolve o custo de investimento e o custo operacional.

Na determinação do diâmetro econômico, para o qual o custo total seja mínimo, deve-se incluir o consumo de energia e os custos do capital investido, levando-se em consideração a amortização e a taxa de juros. A energia fornecida pela bomba à água deve atender o desnível geométrico entre a captação e o ponto de consumo e as perdas de

carga linear e acidental nas tubulações e fornecer a pressão necessária para o funcionamento do sistema hidráulico (Jardim, 1992), ou seja:

$$H = h_g + h_f + P \quad [4]$$

Substituindo a equação 3 na 4, tem-se que:

$$H = h_g + k L \frac{Q^n}{D^m} + P \quad [5]$$

Potência consumida no bombeamento é obtida por:

$$Pot = \frac{\eta Q H}{\eta} \quad [6]$$

em que:

h_g = altura geométrica total (m);

P = pressão do sistema (m);

Pot = potência (W);

η = rendimento do conjunto motobomba (decimal).

Segundo Carvalho & Oliveira (2008), para se determinar a altura manométrica de um sistema de irrigação pivô central, empregam-se a seguinte equação:

$$H = P_{in} + h_{f_{adutora}} + h_{f_{sucção}} + h_{g_{recalque}} + h_{g_{sucção}} \quad [7]$$

em que:

P_{in} = pressão na base do pivô (m);

$h_{f_{adutora}}$ = perda de carga na adutora (m);

$h_{f_{sucção}}$ = perda de carga na sucção (m);

$h_{g_{adutora}}$ = altura geométrica da adutora que compreende o desnível do início da área irrigada ao ponto de instalação do conjunto motobomba (m) e

$h_{g_{sucção}}$ = altura geométrica de sucção (m);

A pressão na base do equipamento pivô central depende da pressão de operação dos aspersores, da existência do aspersor posicionado no final do balanço, da vazão do sistema, do comprimento e diâmetro da linha lateral, altura do equipamento e do desnível entre o ponto pivô e a extremidade da linha lateral e da presença das válvulas reguladoras de pressão, ou seja:

$$P_{in} = P_S + hf_{pivô} + hf_{localizada} + A_e + z \quad [8]$$

em que:

P_{in} = pressão na base do pivô (m);

P_S = pressão de operação no final da linha lateral (m);

$hf_{pivô}$ = perda de carga na linha lateral (m);

$hf_{localizada}$ = perda de carga localizada (m);

A_e = altura do equipamento (m) e

z = desnível entre o ponto pivô e a extremidade da linha lateral (m).

A perda de carga na linha lateral do sistema pivô central pode ser determinada empregando as equações de perda carga considerando a condição de tubulação virgem (hf_v) conduzindo a vazão total ao longo de todo o comprimento da linha lateral, corrigida por um fator que considere a distribuição da vazão em função do número de aspersores, ou seja:

$$hf_{pivô} = hf_v \cdot F_r \quad [9]$$

Carvalho & Oliveira (2008) apresentaram uma equação analítica para a determinação do fator de correção da perda de carga (F_r) em função da distância (r) em que se encontra o ponto de emissão a partir do início da linha lateral, conforme descrita a seguir:

$$F_r = \sum_{i=0}^m \frac{1}{2i+1} \frac{m!}{i!(m-i)!} \left(\frac{r}{R}\right)^{2i+1} \quad [10]$$

em que,

r = distância em metros de um ponto qualquer a partir do início da linha lateral, variando entre zero e L , sendo L o comprimento da linha lateral;

R = raio em metros da área irrigada, que para o equipamento pivô central sem canhão final $R = L$ e

m = expoente do termo velocidade na equação de perda de carga utilizada, sendo igual a 2,0 para a equação de Darcy e de 1,852 para a equação de Hazen-Williams.

Para $r / R > 0,8$, o fator de correção de perda de carga se mantém próximo de 0,53 para a equação de Darcy e 0,53 para a equação de Hazen-Williams. Segundo Colombo (2003), a maioria dos equipamentos apresenta a relação $r / R > 0,9$, em que a perda de carga em um pivô central com linha lateral de um único diâmetro é da ordem de 54% daquela que ocorreria em uma tubulação de mesmo diâmetro e comprimento igual ao raio irrigado, conduzindo uma vazão constante.

Para o caso em que a linha lateral do pivô central for composta por dois trechos de diferentes diâmetros, a perda de carga é obtida fazendo:

$$hf_{\text{pivô}} = 10,643 \frac{R}{D_1^{4,87}} \frac{Q^{1,852}}{C} F_{L1/R} = 10,643 \frac{R}{D_2^{4,87}} \frac{Q^{1,852}}{C} F_{L/R} = F_{L1/R} \quad [11]$$

em que:

L_1 = comprimento do trecho inicial de diâmetro D_1 (m);

D_1 = diâmetro inicial (m);

D_2 = diâmetro do trecho de comprimento $L - L_1$ (m);

C = coeficiente de atrito;

$F_{L/R}$ = fator de correção calculado pela equação 10 considerando todo o comprimento L da linha lateral com único diâmetro;

$F_{L1/R}$ = fator de correção calculado pela equação 10 considerando todo o comprimento L_1 da linha lateral com único diâmetro.

A altura manométrica do sistema de irrigação pivô central é variável com a posição da linha lateral na área irrigada e a variação será maior quanto maior for a inclinação do terreno.

O custo total (CT) do bombeamento, portanto, envolverá o custo de investimento (CI) e o custo operacional (CO), ou seja:

CT ? CI ? CO

[12]

Levando-se em conta que o custo total depende dos investimentos iniciais que por sua vez depende diretamente dos custos do diâmetro da tubulação, o diâmetro econômico será o que proporcionará o custo total mínimo da instalação. Um diâmetro maior resultará em uma perda de carga pequena, logo a altura manométrica e a potência do conjunto motobomba serão relativamente pequenas, reduzindo, portanto, os custos operacionais, mas por outro lado, o custo de investimento da tubulação será elevado. Por outro lado, para uma determinada vazão, quanto menor o diâmetro, maior será a perda de carga, proporcionando um aumento na altura manométrica e por sua vez na potência consumida no bombeamento.

O comportamento dos custos de investimento, operacional e total com o diâmetro da tubulação de recalque pode ser visualizado na Figura 2. Assim, procura-se quantificar os custos de investimentos necessários à implantação de um sistema e os relativos à sua operação, para um grupo de diâmetros de tubulações pré-selecionados e por comparação seleciona-se o que apresentar o menor custo total (Carvalho & Oliveira, 2008).

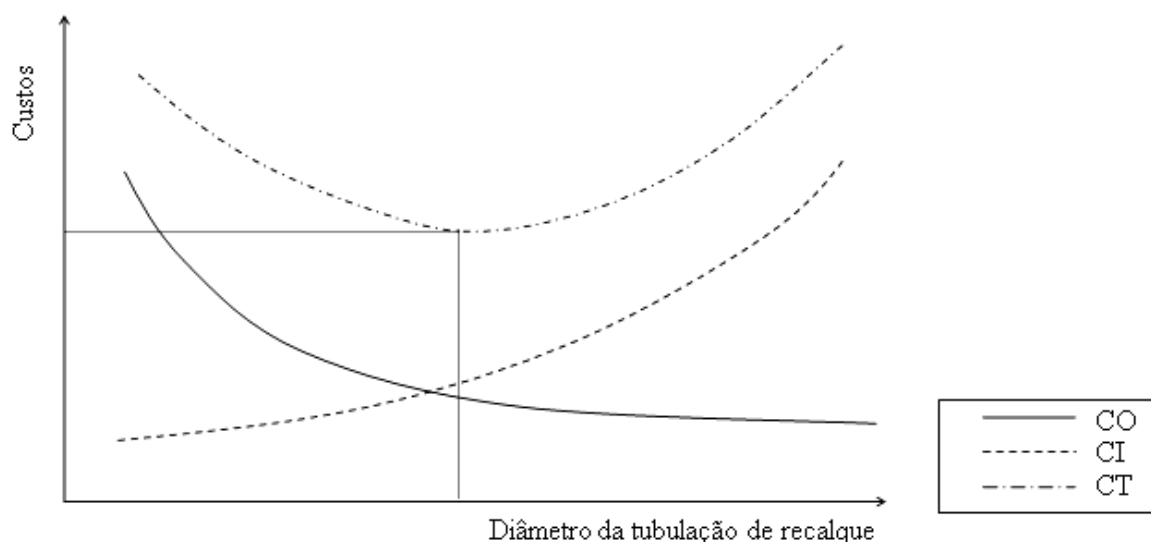


Figura 2. Variação dos custos de investimento (CI), operacional (CO) e total (CT) de um sistema de bombeamento em função do diâmetro da tubulação de recalque (Carvalho & Oliveira, 2008)

Portanto, no dimensionamento econômico deve-se analisar o custo total do sistema, para diferentes valores de diâmetro; a equação do custo total pode ser escrita da seguinte forma:

$$CT = C_D \cdot D \cdot L + C_E \cdot Pot \quad [13]$$

em que:

D e L = diâmetro e comprimento das tubulações de recalque e sucção, (m);

C_D = custo anual do conduto com diâmetro e comprimento unitário;

C_E = custo operacional anual do bombeamento;

Para se obter o diâmetro econômico, deve-se investigar o mínimo da função de custo dado pela Equação 13, ou seja, igualando a primeira derivada a zero. Para tal, substituindo a Equação 6 na 13 e derivando o custo total em relação ao diâmetro, obtém-se segundo Carvalho & Oliveira (2008) a expressão que permite a determinação do diâmetro econômico, ou seja:

$$D = \frac{m \cdot k}{270} \cdot \frac{C_E}{C_D} \cdot Q^{\frac{n+1}{m+1}} \quad [14]$$

A equação mostra que para cada valor de vazão existe um diâmetro econômico, e seu valor depende ainda do tipo de material do tubo e da relação entre custos anuais com a operação do sistema de bombeamento e do conduto.

Segundo Carvalho & Oliveira (2008), em sistemas de bombeamento para irrigação é comum conhecer a vazão, pressão e rendimento da bomba, e, conseqüentemente, a potência no eixo. Assim, a potência absorvida pode ser dada por:

$$Pot_{abs} = \frac{Pot_{eixo}}{\eta_M} = \frac{QH_{man}}{\eta_B \eta_M} \quad [15]$$

em que,

Pot_{abs} = Potência absorvida do conjunto motobomba (W);

Pot_{eixo} = Potência no eixo da bomba (W);

η_M = Rendimento do motor;

η_B = Rendimento da bomba;

2.5 ESTRUTURA TARIFÁRIA DA ENERGIA ELÉTRICA

Em estudos realizados nos anos 80, foi constatado que o perfil de comportamento do consumo da energia ao longo do dia encontrava-se vinculado aos hábitos do consumidor e às características próprias do mercado de cada região. Baseando-se nestas características originou-se, a nova Estrutura Tarifária Horo-sazonal, em que a tarifa tem valores diferenciados segundo horários do dia e períodos do ano (ANEEL, 2000a), conforme descrito abaixo:

Divisão do ano:

- Período seco: compreendido entre os meses de maio a novembro, em que é o período de pouca disponibilidade de água nos reservatórios das hidrelétricas e a energia elétrica tem um custo maior.

- Período úmido: compreendido entre os meses de dezembro até abril, em que é neste período há um maior potencial para geração de energia elétrica, conseqüentemente, o preço da energia é menor.

Divisão do dia:

Dentro de cada um destes períodos (seco ou úmido), o consumo da energia varia ao longo do dia. No horário de ponta, que é compreendido entre 18 horas e 21 horas, atingindo um valor máximo próximo às 19 horas, há uma maior sobrecarga do sistema elétrico, o que implica em um valor maior do custo da energia neste período. O período restante do dia é denominado horário fora de ponta, em que a energia está disponível a um custo menor. Considerando que durante o período compreendido entre 23 horas e 5 horas, o consumo de energia é ainda menor, havendo uma maior disponibilidade desta, os usuários podem ter um desconto no valor da energia consumida neste horário, ou seja, o preço da energia neste período é diferenciado (tarifa noturna), no caso de irrigação, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Períodos do dia .

Período	Horário
Horário de Ponta	Das 18:00 às 21:00h (3 h)
Horário Fora de Ponta	Das 06:00 às 18:00h e 21:00 às 21:30 h (12h e 30min)
Horário Reservado	Das 21:30 às 06:00 h (08h 30min)

Fonte: ANEEL (2006).

Os consumidores de energia elétrica são classificados em dois grupos de acordo com a potência instalada, ou seja:

- Grupo A ou primário: são atendidos por redes trifásicas, cujas potências dos transformadores variam de 112,5 a 1000 kVA, em tensão igual ou superior a 2,3 kV. A tarifação para esse grupo possui estruturas com dois componentes básicos na definição do seu preço, ou seja, demanda de potência e consumo de energia, podendo ser acrescida de um valor devido a energia reativa.

- Grupo B ou secundário: são atendidos por redes monofásicas, com transformadores variando de 5 a 37,5 kVA, e por redes trifásicas, potências dos transformadores variando de 15 a 75 kVA. Para este grupo, se aplica o processo de tarifa única, ou seja, o consumidor paga apenas pelo consumo, podendo, ainda, ser beneficiado pela tarifa reduzida (tarifa noturna), no caso de irrigantes.

2.5.1 Cálculo da tarifa

O sistema de tarifação obedece as normas determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), variando de acordo com o tipo de consumidor e do tipo de contrato.

Para consumidor do grupo B é aplicada uma tarifação única, cobrado sobre o consumo; dependendo do tipo de contrato, o consumidor poderá ser beneficiado com uma tarifa reduzida no período de 23 horas às 5 horas.

$$\text{Custo final (R\$)} = C \cdot T_c \quad [16]$$

em que:

C = consumo (kWh);

T_c = tarifa de energia elétrica (R\$ kW⁻¹);

Para os consumidores do grupo A o sistema de tarifação pode ser convencional e horo-sazonal (azul e verde). A ocorrência de excedente de reativo será verificada pela concessionária por meio do fator de potência mensal ou horário. Se o fator de potência medido estiver com valor abaixo de 0,92 será cobrada uma taxa adicional (aplicável para a tarifação horo-sazonal). Se houver uma demanda de potência maior do que a contratada,

será cobrada, também, a tarifa de ultrapassagem, ou seja, será cobrado o excedente de demanda (ANEEL, 2000a).

Tarifa Convencional: preço único para demanda de potência e preço único para consumo de energia, não importando o período em que a energia é utilizada. Nesta tarifa é atendida em tensão inferior a 69 kV e com demanda menor do que 500 kW. O custo final de fornecimento de energia é dado pela soma dos custos relativos à demanda e aquele devido ao consumo.

$$\text{Custo final (R\$)} = C \cdot T_c + D \cdot T_d \quad [17]$$

em que:

C = consumo, kWh

T_c = tarifa de energia elétrica, R\$/kWh

D = demanda (kW);

T_d = tarifa de demanda (R\$ kW⁻¹).

Tarifa horo-sazonal: este tipo de tarifação permite um melhor aproveitamento da energia elétrica disponível, uma vez que, há um deslocamento do consumo para horários e períodos do ano em que o preço é mais baixo. Existem dois tipos de tarifa horo-sazonal, ou seja, tarifa verde e tarifa azul, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Itens considerados nos cálculos de faturas de energia elétrica para as tarifas horo-sazonal azul e verde.

Tarifa Azul	Tarifa Verde
Demanda na Ponta	Demanda
Demanda Fora de Ponta	Consumo na Ponta
Consumo na Ponta	Consumo Fora de Ponta
Consumo Fora de Ponta	

Fonte:ANEEL (2006).

A tarifa azul é destinada basicamente aos grandes consumidores com potência igual ou superior a 500 kW em que, o custo final do fornecimento de energia elétrica é composto pelas parcelas, ou seja:

- Demanda de potência (kW): com preço para a ponta e preço diferenciado (menor) para fora de ponta.

- Consumo de energia elétrica (kWh): preços diferenciados segundo os períodos de ponta e fora de ponta e também segundo os períodos do ano (úmido e seco).

$$\text{Custo final (R\$)} = D_p \cdot T_{dp} + D_{fp} \cdot T_{dfp} + C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad [18]$$

em que:

D_p = demanda em horário de ponta (kW);

T_{dp} = tarifa de demanda em horário de ponta (R\$ kW⁻¹);

D_{fp} = demanda em horário fora de ponta (kW);

T_{dfp} = tarifa de demanda em horário fora de ponta (R\$ kW⁻¹);

C_p = consumo de energia em horário de ponta (kWh);

T_p = tarifa de consumo em horário de ponta (R\$ kWh⁻¹);

C_{fp} = consumo de energia em horário fora de ponta (kWh);

T_{fp} = tarifa de consumo em horário fora de ponta (R\$ kWh⁻¹).

No caso de ultrapassagem da demanda medida relativamente à demanda contratada, a composição do custo final ficará acrescida de um valor relativo à ultrapassagem no período de ponta e no período fora de ponta:

$$CD = D_p \cdot T_{dp} + D_{fp} \cdot T_{dfp} + (D_{mp} - D_p) \cdot T_{up} + (D_{mfp} - D_{fp}) \cdot T_{ufp} \quad [19]$$

em que:

CD = custo da demanda (R\$);

D_{mp} = demanda medida na ponta (kW);

D_{mfp} = demanda medida fora de ponta (kW);

T_{up} = tarifa de demanda de ultrapassagem (R\$ kW⁻¹);

T_{ufp} = tarifa de demanda de ultrapassagem fora de ponta (R\$ kW⁻¹).

$$\text{Custo de energia (R\$)} = C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad [20]$$

O custo final é obtido pela soma das parcelas referentes à demanda e àquele devido ao consumo de energia, ou seja:

$$CF = CE + CD \quad [21]$$

em que:

CF = custo final (R\$);

CE=custo de energia (R\$);

CD=custo de demanda (R\$).

A tarifa verde é destinada basicamente aos consumidores de médio porte, com demanda na faixa de 50 kW a 500 kW, atendida na tensão de fornecimento na faixa de 2,3 kV a 44 kV.

- Demanda de potência: só existe um preço para a demanda (fora de ponta).

- Consumo de energia elétrica: preços diferenciados segundo os períodos de ponta e fora de ponta e também segundo os períodos do ano (ponta seca, ponta úmida, fora de ponta seca e fora de ponta úmida).

Se o consumidor usar a energia no horário de ponta (18 horas às 21 horas) está sujeito a pagar a energia consumida neste período multiplicado por 10,6 vezes em relação ao preço do energia consumida no horário fora de ponta, ou seja:

$$\text{Custo final (R\$)} = D_c \cdot T_d + C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad [22]$$

em que:

D_c = demanda contratada (kW);

T_d = tarifa de demanda (R\$ kW⁻¹);

C_p = consumo de energia em horário de ponta (kWh);

T_p = tarifa de consumo em horário de ponta (R\$ kWh⁻¹);

C_{fp} = consumo de energia em horário fora de ponta (kWh);

T_{fp} = tarifa de consumo em horário fora de ponta (R\$ kWh⁻¹).

No caso de ultrapassagem da demanda medida relativamente à demanda contratada, a composição do custo final ficará acrescida de um valor relativo à ultrapassagem, ou seja:

$$CF = D_c \cdot T_d + (D_m - D_c) \cdot T_u + C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad [23]$$

em que:

CF= custo final (R\$);

D_m = demanda medida (kW);

T_u = tarifa de demanda de ultrapassagem (R\$ kW⁻¹);

Segundo a Resolução Homologatória N° 704, de 12 de novembro de 2008 da (ANEEL, 2008a), as tarifas energéticas cobrada pela Companhia Energética de Goiás (CELG) estão apresentadas nos anexos B e C, para os grupos tarifários A e B.

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. 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 às 5 h, no período compreendido entre 21:30 e 6 h do dia seguinte (ANEEL, 2002).

Na Tabela 4, 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 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 (ANEEL, 2006).

Tabela 4. Descontos percentuais 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 (2006).

Ribeiro (2003) analisou o processo de adequação do funcionamento das bombas de irrigação ao novo horário, em que a indicação de bombas para a mesma altura manométrica e com vazão inferior, adequando a lâmina de 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%.

Segundo Souza (2001), após análise de despesas que foram obtidos com 10.000 simulações, os resultados alcançados permitiram verificar que a tarifação horo-sazonal possibilitou os menores gastos com energia com a tarifa verde com irrigação noturna. A única opção tarifária mais barata que esta, seria para uma situação em que não houvesse a cobrança do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), o que proporcionaria uma redução de 21,9% nas despesas. O autor ainda observou a igualdade entre as despesas com energia elétrica na tarifa horo-sazonal azul e verde que foi devido ao equacionamento das tarifas que desconsiderava a possibilidade de utilização dos sistemas de irrigação no horário de ponta. Portanto, a grande desvantagem da tarifa horo-sazonal azul está em utilizá-la no horário de ponta, ou apresentar demanda de ultrapassagem. Segundo Souza (2001) a tarifa convencional, dentro das mesmas condições estabelecidas para as demais modalidades de tarifação, sempre se mostrou como uma opção onerosa e desfavorável ao agricultor, e que cuidados com o valor do fator de potência da instalação devem ser tomados, o qual foi observado dentro das mesmas condições de tarifação, a ocorrência de um fator de potência baixo aumenta em média, 31,4% as despesas com energia elétrica.

2.6 SELEÇÃO DE BOMBAS E DE MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA

A energia fornecida ao sistema de bombeamento depende do motor e a eficiência dos rendimentos da bomba, do motor. Portanto, uma seleção da bomba e do motor com base em critérios econômicos, consiste na análise do custo de investimento desses equipamentos e do custo operacional proporcionado com a redução de energia. A seleção da bomba para atender o ponto de operação capaz de fornecer a vazão e altura manométrica de projeto, geralmente é feita nas curvas características fornecidas pelos fabricantes. Nas referidas curvas, procura-se sempre selecionar o modelo que proporcione um alto rendimento.

O projeto e aplicação do conjunto motobomba, entretanto, requer critérios, para representar uma bomba com um rotor com formato adequado. O critério utilizado foi o conceito de rotação específica que utiliza as relações de similaridade equação 27 na formulação deste parâmetro. A rotação específica relaciona as condições operacionais das máquinas de fluxo com as formas possíveis de seus rotores (Jardim, 1992).

A relação de proporcionalidade entre as vazões de duas bombas homólogas é dada por:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \propto \frac{n_1}{n_2} \propto \frac{D_1^3}{D_2^3} \quad [24]$$

em que,

$$\frac{D_1^2}{D_2^2} \propto \frac{Q_1^{2/3}}{Q_2^{2/3}} \propto \frac{n_1^{2/3}}{n_2^{2/3}} \quad [25]$$

Entre as alturas de elevação, tem-se:

$$\frac{H_1}{H_2} \propto \frac{n_1^2}{n_2^2} \propto \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad [26]$$

em que,

$$\frac{H_1}{H_2} \propto \frac{Q_1^{2/3}}{Q_2^{2/3}} \propto \frac{n_1^{4/3}}{n_2^{4/3}} \quad [27]$$

ou,

$$\frac{n_1^{4/3} Q_1^{2/3}}{H_1} \propto \frac{n_2^{4/3} Q_2^{2/3}}{H_2} \quad [28]$$

Se cada uma das variáveis da equação anterior for elevado à potência $\frac{3}{4}$ obtêm-se a seguinte equação:

$$\frac{n_1 Q_1^{1/2}}{H_1^{3/4}} \propto \frac{n_2 Q_2^{1/2}}{H_2^{3/4}} \quad [29]$$

Vale observar que esta expressão não é válida somente para duas bombas homólogas 1 e 2, mas para qualquer número de bombas homólogas operando sob

condições similares. Admiti-se então que uma destas bombas homólogas seja uma bomba padrão, desenvolvendo uma altura de elevação de 1m com a vazão de $1\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ (estas condições de operação definem a bomba padrão!). A rotação desta bomba padrão é o parâmetro que procuramos a rotação específica, n_q (Jardim, 1992):

$$n_q \approx \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad [30]$$

em que:

n_q = rotação específica unitária (rpm);

n = rotação da bomba (rpm).

A rotação específica caracteriza o “potencial” da bomba em desenvolver o par de condições de operação (H;Q) operando com uma certa rotação n .

Outra grandeza empregada na seleção correta da bomba consiste no diâmetro ótimo, obtido em função das rotações específica e nominal da bomba e da altura manométrica no ponto de operação do projeto. O diâmetro ótimo do rotor da bomba pode ser obtido pela seguinte expressão (Jardim, 1992):

$$d_r \approx \frac{0,5 \cdot n_q \cdot 75 \cdot \sqrt{H}}{n} \quad [31]$$

em que,

d_r = diâmetro ótimo do rotor da bomba (mm);

n_q = rotação específica (rpm).

A Figura 3 permite uma prévia análise do rendimento esperado da bomba, o que auxilia o projetista com o diâmetro ótimo do rotor, selecionar a bomba sobre as curvas características que permita a otimização do sistema de bombeamento. Para obtenção do rendimento esperado da bomba, calcula-se a rotação específica (Equação 31) e com o auxílio desta Figura determina-se o rendimento da bomba para uma determinada vazão.

Os motores de alto rendimento são oferecidos pela grande maioria dos fabricantes como uma alternativa vantajosa para determinadas aplicações, porém, custam, em geral, mais caro que os motores padrão (motores normais de linha). Por outro lado,

devido suas características especiais, especialmente aquelas relacionadas ao rendimento, a sua utilização pode conduzir em vantagens econômicas importantes ao longo da sua vida útil (Campana et al., 2000). A decisão de qual motor deverá ser adquirido, além de uma decisão técnica, é também uma decisão econômica, a qual poderá ocorrer em instalações novas ou quando da substituição de um motor avariado.

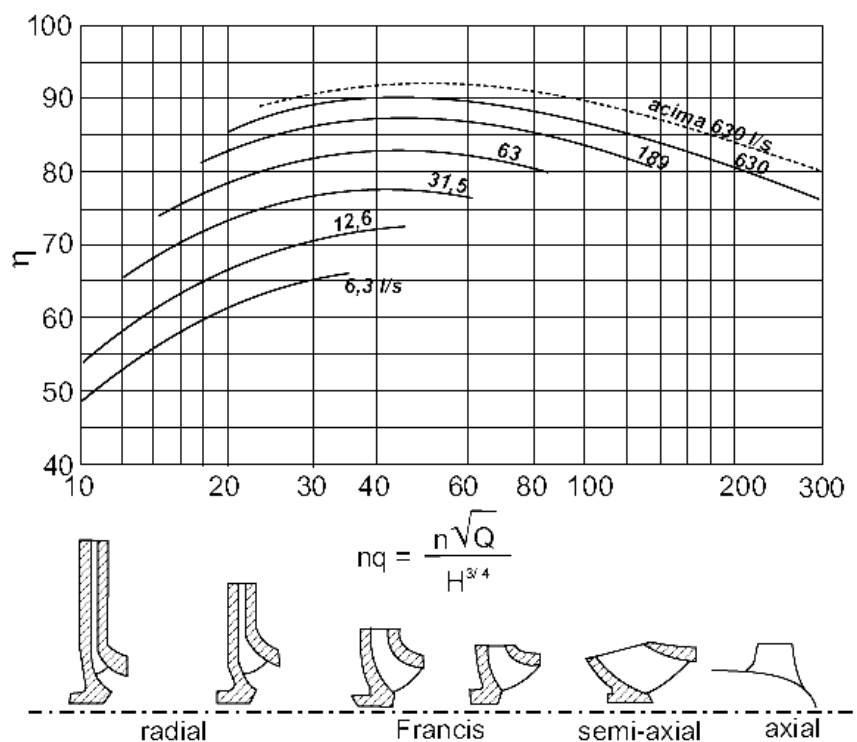


Figura 3. Rendimento da bomba em função da rotação específica (Carvalho & Oliveira , 2008)

Os motores de alto rendimento nem sempre são justificáveis e a análise econômica visa, desta forma, fornecer subsídios para que uma decisão possa ser tomada. A fim de que análise possa ser corretamente realizada, torna-se importante conhecer as principais características dos motores de indução de alto rendimento que os diferenciam dos motores do tipo padrão (NBR 7094, 2003).

Pode-se dizer que os motores de alto rendimento são motores projetados e construídos tendo em vista o seu rendimento, além do custo de fabricação. Para tanto as principais dimensões e materiais empregados são otimizadas a fim de obter-se um alto rendimento, resultando num custo maior, cerca de 30% maior que motores padrão (Albuquerque, 1982).

Os motores de alto rendimento em geral apresentam as seguintes características: menor temperatura de trabalho resultando numa vida útil maior, menor necessidade de manutenção e menor nível de ruído devido ao melhor balanceamento e menores tolerâncias de fabricação. Deve-se também salientar que as características citadas variam de fabricante para fabricante, sendo que nem todos os fabricantes adotam as mesmas medidas para elevar o rendimento. As características acima descritas conduzem a um motor com perdas menores que os motores padrão, resultando numa melhoria do rendimento. Este aumento do rendimento em relação aos motores padrão varia com a potência do motor e com o fabricante, não sendo, portanto um valor constante. A diferença no rendimento diminui com o aumento da potência, ou seja, a diferença de rendimento diminui com o aumento da potência nominal. Deve-se, no entanto, atentar sempre para o valor absoluto em termos de perdas de potência de um motor normal e de um de alto rendimento. Para grandes motores, mesmo uma pequena diferença no rendimento pode levar a uma redução significativa no consumo do motor (Jordan, 1994).

2.7 CONVERSOR DE FREQUÊNCIA-INVERSOR

O conversor de frequência é um equipamento que utiliza de componentes da eletrônica de potência por meio de chaveamento (Rashid, 1999). Utilizando técnica de modulação do sinal da tensão elétrica e frequência de alimentação do motor, permite controle de sua rotação deste modo controlando, o fluxo de potência elétricas, entregue ao motor de indução (Figura 4).

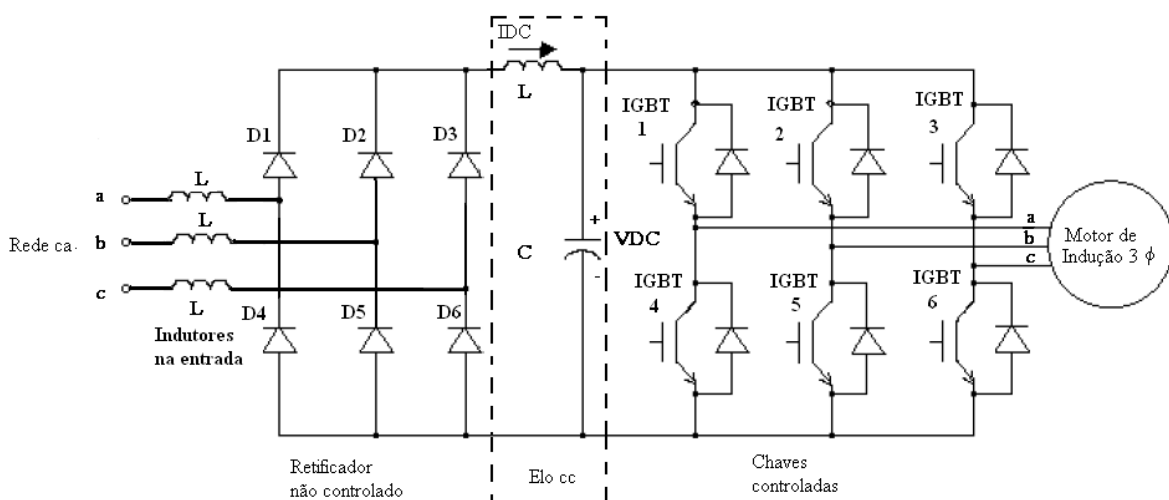


Figura 4. Configuração de um conversor de frequência (Rashid, 1999)

O desacoplamento entre o retificador e o conversor é feito pelo circuito intermediário do elo c.c., possibilitando que a forma de onda da tensão de saída do inversor seja completamente independente do sinal da rede em termos de tensão e frequência.

O controle do chaveamento das chaves do inversor é feito pela técnica de Controle Direto de Torque (DTC) que produz um sinal de saída com corrente aproximadamente senoidal na alimentação do motor.

As formas de onda, tanto de tensão quanto de corrente, produzidas pelos conversores na rede de distribuição (alimentação) não são puramente senoidais. Em condições normais, os conversores de 6 pulsos são responsáveis pela geração de harmônicos principalmente de quinta e de sétima ordens na rede de distribuição. Para reduzir as harmônicas de corrente de baixa ordem geradas na rede de distribuição, são instaladas reatâncias indutivas trifásicas (filtro) na entrada do conversor de frequência.

Na retificação dos conversores de frequência fluem correntes não senoidais, devido à faixa de trabalho dos componentes de retificação (diodos ou tiristores). Essa corrente não senoidal, quando “circula” pela impedância da rede provoca uma queda em tensão, também não senoidal, gerando então, distorções na tensão senoidal da rede. A distorção pode ser dividida em uma onda senoidal fundamental e suas harmônicas, conforme análise de Fourier; a distorção total então é medida em porcentagem de sua onda fundamental (Magalhães et al., 2010).

Para formas de onda distorcidas, o fator de potência é a relação entre potência ativa (kW) e potência aparente (kVA), sendo esta, o real fator de potência de uma instalação elétrica. O cálculo leva em consideração os harmônicos e o resultado será o real fator de potência. Com correntes distorcidas que produzem fator de potência, os harmônicos reduzem a capacidade do sistema elétrico. Parcialmente, isto é devido ao aumento dos valores eficaz de corrente quando os harmônicos estão presentes. Outra razão é o aumento do *stress* térmico devido ao efeito pelicular que os harmônicos impõe em transformadores e condutores. Este fator de potência não é melhorado para valores solicitados no PRODIST (ANEEL, 2008b) em seu módulo oito com banco de capacitores.

As componentes harmônicas de um sistema são acumulativas e podem prejudicar o funcionamento de equipamentos, inclusive os próprios conversores de frequência. O uso de reatâncias de entrada é extremamente importante, melhora a forma de onda das correntes de entrada aproximando-as da forma senoidal (WEG, 2008).

Diminuindo assim o nível de harmônicas gerado pelos conversores de frequência (Figura 5).



Figura 5. Conversor de frequência com reatâncias indutivas instaladas na entrada (WEG, 2008).

Segundo Rizzo (1991), a utilização de inversores de frequência resulta numa economia de energia três vezes superior ao método de regulação dissipativa que utiliza uma válvula de estrangulamento na tubulação, além do mais a utilização de inversores de frequência contribui, dentre outros, nos seguintes aspectos: redução de desgaste mecânico e da manutenção associada ao motor elétrico; redução da demanda de energia; economia de energia; e melhoria do Fator de Potência.

A Figura 6 mostra a ação do inversor de frequência na regulação da rotação do motor de modo a proporcionar a mudança no ponto de operação de uma instalação de bombeamento. Para a curva da bomba operando na rotação n_1 , o ponto de operação do sistema de bombeamento é caracterizado pela vazão e altura manométrica no ponto A.

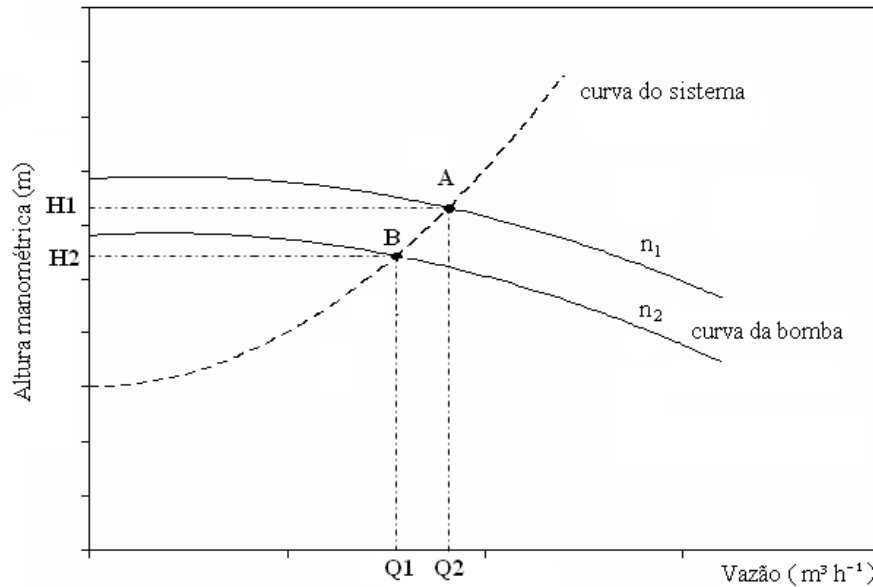


Figura 6. Ação do inversor de frequência na regulação da rotação do motor (Carvalho & Oliveira, 2008)

A alteração da rotação da bomba, como forma de manejar adequadamente um sistema de bombeamento, o novo ponto de operação obedece às leis de afinidade ou de Rateaux. A Equação 32 é usada para avaliar o comportamento da rotação do motor elétrico por um inversor de frequência na bomba centrífuga para uma rotação variável. Esta equação apresenta as semelhanças mecânicas entre as propriedades relacionadas ao sistema de bombeamento, para acoplamento direto motor e bomba (Alves et al., 2002).

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{Pot_2}{Pot_1}\right)^{\frac{1}{3}} \quad [32]$$

em que, o subscrito 1 refere ao valor nominal e o subscrito 2 ao valor referente ao novo ponto de operação.

A bomba instalada para fornecer a vazão e a pressão quando a lateral do pivô estiver situada em active, o funcionamento do pivô faz com que a linha lateral desloque e ocupe diferentes posições, sob diferentes declives, originando, para cada posição, diferentes alturas manométricas. Estas diferenças de alturas manométricas são compensadas quando se utiliza reguladores de pressão, mantendo, assim, uma mesma vazão ao longo de todo o giro do pivô. Entretanto, havendo uma forma de variar a altura

manométrica ao longo do giro do pivô, mantendo constante a vazão, além de o sistema conservar a uniformidade será possível obter uma economia de energia (Figura 7).

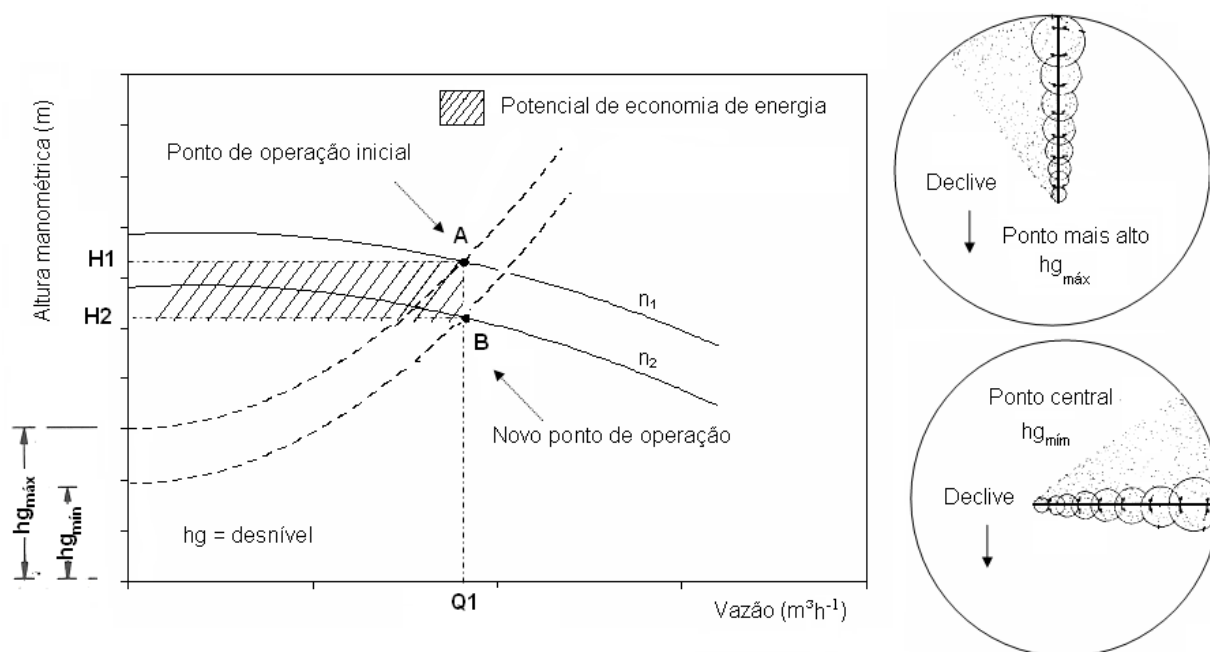


Figura 7. Ponto de operação de um pivô central quando a linha lateral ocupa posição intermediária (Carvalho & Oliveira, 2008)

A operação do sistema em modo automático com regulação não dissipativa proposto por Alves (2001) e implementado por Cendes (2004) tem como variáveis de monitoramento, ou seja, de entrada a pressão no aspersor situado na extremidade inicial da linha lateral (A_i) e a pressão no aspersor mais externo na linha lateral (A_f), em que a variável de controle é a rotação do conjunto motobomba. Com isso, o procedimento adotado para a determinação da economia de energia, resultante do uso do sistema de controle é constituído da detecção da variação de pressão entre o ponto A e o ponto B, conforme Figura 7, no qual o controle atua na variação da velocidade da bomba. Resultando assim em uma variação do consumo de energia elétrica entre os dois pontos conforme Equação 32.

O sistema de controle é ajustado para garantir que o aspersor (dos dois pontos monitorados) quando situado na maior altura manométrica esteja sempre no valor mínimo necessário para atender as condições da vazão previstas no projeto. A Figura 8, mostra o sistema desenvolvido por Cendes (2004), no qual o dado de pressão do final da linha lateral é transmitido do sensor A_f para o início da linha lateral, esse por sua vez anexado ao dado de pressão do sensor A_i e enviado ao receptor da central de processamento

localizado no sistema de bombeamento. A central de processamento ou controle tem um programa que analisa os dados de pressão A_i e A_f que faz o controle da velocidade de rotação do sistema de bombeamento, através do envio de um comando ao inversor de frequência.

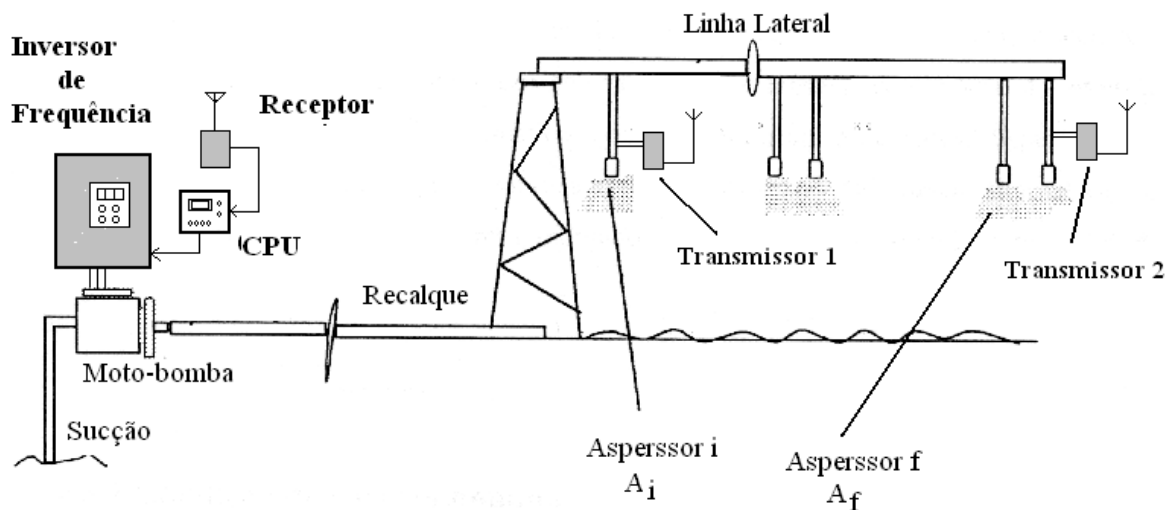


Figura 8. Sistema pivô central com controle automático da velocidade em função da pressão diferencial (Cendes, 2004).

2.8 EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO E UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA

O método de irrigação é a forma pela qual a água pode ser aplicada às culturas, que basicamente são quatro, ou seja: superfície, aspersão, localizada e subirrigação. Para cada método há dois ou mais sistemas de irrigação que podem ser empregados. A razão pela qual há muitos tipos de sistemas de irrigação está associada à grande variação de solo, clima, culturas, disponibilidade de energia e condições socioeconômicas para as quais o sistema de irrigação deve ser adaptado (Andrade & Brito, 2008).

Segundo Marouelli & Silva (1998), os valores do consumo médio de energia por método de irrigação para determinada eficiência de aplicação de água está apresentada na Figura 9, em que, pode-se observar que os métodos de irrigação pressurizados demandam maior consumo de energia em comparação à irrigação por superfície.

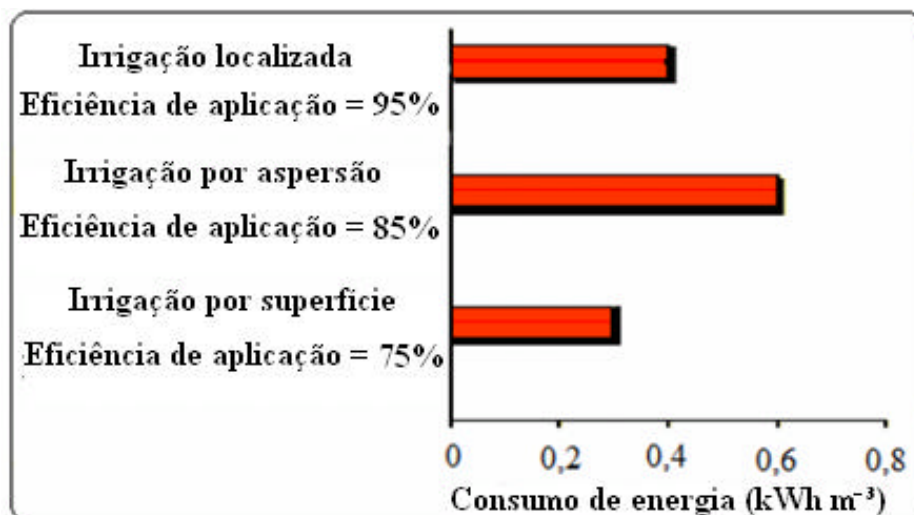


Figura 9. Consumo de energia e eficiência média para diferentes métodos de irrigação (Marouelli & Silva, 1998).

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados gerados pelo programa computacional IRRIGA, referentes às simulações para o período de estudo quanto ao consumo de água e energia (Mantovani et al., 2003), utilizando os sistemas de irrigação por gotejamento, pivô central equipado com LEPA e pivô central convencional para as regiões do Triângulo Mineiro e Oeste da Bahia. Devido à fase adulta da planta do cafeeiro irrigado representar os maiores consumos quanto ao consumo de água e energia para expressar altas produtividades, foi discutido principalmente os resultados obtidos para a fase adulta.

A análise comparativa da necessidade hídrica da cultura, para as duas regiões utilizando o sistema de irrigação por gotejamento, apresentou valores maiores para a região Oeste da Bahia em relação ao Triângulo Mineiro. O consumo de água foi menor, para a fase adulta da cultura, com conseqüente menor o gasto de energia, utilizando o sistema de irrigação por gotejamento. Comparando os valores de volume total de água utilizado e custo de energia foram maiores, para o sistema pivô tipo LEPA (*low energy precision application*), em relação ao sistema de irrigação por gotejamento para a fase adulta da cultura. O pivô central convencional apresentou um consumo de água e de energia mais elevado que o pivô tipo LEPA e o sistema de irrigação por gotejamento.

Tabela 5. Simulações do consumo de energia nos quatro primeiros anos da cultura do cafeeiro para a região do Triângulo Mineiro, utilizando os sistemas de irrigação por gotejamento, LEPA, pivô convencional.

Tempo de Irrigação (h)			Energia (R\$)		Vol. de água (m ³)	
Ano	Diurno	Noturno	Total	Total	Área	Total
Gotejamento						
1	797	443	1240	2160	21,6	200234
2	1295	628	1923	3207	32,1	310324
3	2066	1022	3088	4875	48,8	498405
4	2667	1217	3884	5918	59,2	626802
Total	6835	3310	10136	16160	—	1635765
Pivô equipado com emissores tipo LEPA						
1	648	384	1032	5529	55,3	200541
2	1224	680	1904	9275	92,8	370186
3	1858	929	2787	13288	132,9	541721
4	2361	1178	3540	15921	159,2	688149
Total	6091	3171	9263	44013	—	1800597
Pivô convencional						
1	952	532	1484	12490	125	436468
2	1567	879	2446	19215	192	719479
3	2085	1074	3159	24672	247	929178
4	2252	1153	3405	25414	254	1001496
Total	6856	3638	10494	81791	—	3086621

Tabela 6. Simulações do consumo de energia nos quatro primeiros anos da cultura do cafeeiro para a região Oeste da Bahia, utilizando os sistemas de irrigação por gotejamento, LEPA, pivô convencional.

Tempo de Irrigação (h)			Energia (R\$)		Vol. de água (m ³)	
Ano	Diurno	Noturno	Total	Total	Área	Total
Gotejamento						
1	1281	680	1961	2879	28,8	344051
2	2066	1048	3115	4391	43,9	546404
3	3668	1540	5208	7423	74,2	913639
4	4444	1860	6304	8712	87,1	1105921
Total	11459	5128	16588	23405	—	2910015
Pivô equipado com emissores tipo LEPA						
1	1162	642	1804	7957	79,6	413689
2	1870	957	2827	12038	120,4	648217
3	2985	1466	4451	18472	184,7	1020733
4	3624	1893	5516	21646	216,5	1264984
Total	9641	4958	14598	60113	—	3347623
Pivô convencional						
1	1515	810	2325	16666	166,7	799474
2	2331	1237	3568	24563	245,6	1226579
3	3005	1513	4518	31017	310,2	1553220
4	3074	1579	4653	30726	307,3	1599712
Total	9925	5139	15064	102972	—	5178935

O valor do coeficiente de uniformidade de aplicação de água (Tabela 7) para o sistema de irrigação por pivô central convencional, foi o mais baixo utilizado nas simulações, afetando o cálculo da irrigação total necessária (ITN) em todas as fases da cultura nas regiões em questão, contribuindo desta forma, para ampliar as diferenças de consumo de água e energia em relação aos demais sistemas.

Tabela 7. Equipamentos, coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e fonte dos dados.

Equipamento	CUC	Fonte
Pivô central convencional	85	Bonomo (1999)
Pivô equipado com LEPA	90	Santinato & Fernandes (2002)
Gotejamento	92	Souza (2000)

A Figura 10 mostra a relação entre os vários tipos de sistemas de irrigação e da área plantada e com o custo de energia elétrica. As curvas mostram que, com o aumento da área, os custos da energia elétrica consumida em geral diminuem (Bonomo, 1999).

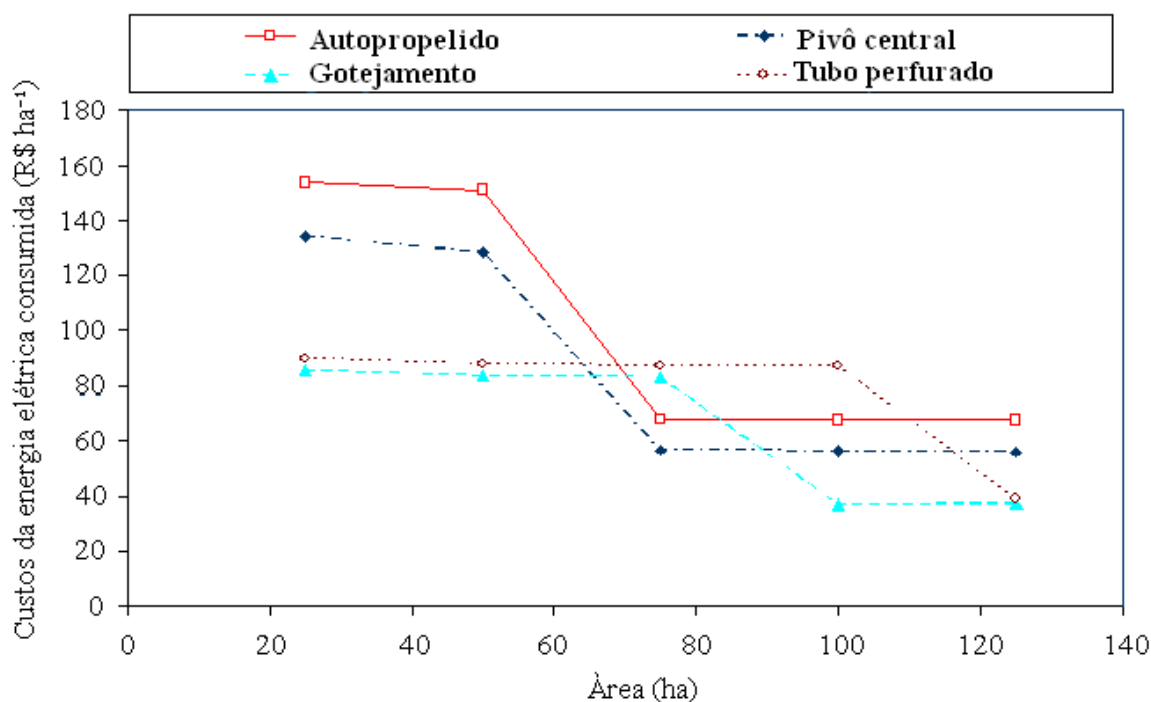


Figura 10. Custos de energia elétrica versus área irrigada (Bonomo, 1999)

2.9 DÉFICIT HÍDRICO

As condições climáticas interferem decisivamente nas necessidades hídricas das culturas de modo a promover o rendimento ótimo sem qualquer limitação. A água é um dos principais insumos que limita mais frequentemente, o rendimento da cultura, reduzindo assim a eficiência do sistema de produção agrícola. Torna-se necessária então, a realização de um manejo adequado da irrigação para atender as necessidades da cultura e obter um maior retorno econômico. Para Andrade Júnior et al. (1997), os níveis de irrigação influenciam o rendimento da cultura, quando não se consegue obter o comportamento de variação da produtividade com o crescente incremento de lâminas de água, porque a máxima aplicação de água não é suficiente para fornecer condições potenciais de produção e, conseqüentemente, não se consegue estabelecer condições ótimas econômicas.

O déficit hídrico pode causar um decréscimo acentuado nas atividades fisiológicas, principalmente na divisão e no crescimento das células e, portanto no crescimento das plantas. A deficiência hídrica também ocasiona o fechamento dos estômatos, diminuindo a concentração intracelular de CO_2 e, conseqüentemente, gerando o decréscimo na assimilação do mesmo, prejudicando a produção. Por outro lado, o excesso hídrico, poderá ocasionar a diminuição de oxigênio na zona radicular, dificultando a respiração e, conseqüentemente, reduzindo a produção de energia necessária para a síntese e a translocação dos compostos orgânicos e a absorção ativa dos mesmos, prejudicando a produção. A falta de oxigênio, também, pode ter provocado a redução na fotossíntese, ocorrendo, portanto, um menor crescimento das plantas devido à diminuição da eficiência de transformação dos fotoassimilados nestas condições. Além disso, o excesso hídrico pode ter ocasionado a lixiviação de nutrientes, diminuindo a sua disponibilidade para as plantas (Azevedo et al., 2005).

A lâmina ótima econômica consiste na técnica de não usar o ponto máximo da curva de maior produtividade. Quando a água se constitui em um fator limitante à produção agrícola, a utilização de irrigação com déficit permite maior retorno econômico do que a irrigação completa (English, 1990). A definição de um intervalo de manejo de irrigação a partir de uma função de produção conhecida permite a utilização racional da irrigação com déficit.

Como exemplo de aplicação tem-se estudo realizado por Andrade Junior et al. (2001) que utilizaram estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia, no

intervalo de manejo racional de água variando de 45,1 mm (lâmina mínima) a 356,2 mm (lâmina máxima) e obtendo uma lâmina ótima de 126,7 mm, a qual proporcionou uma receita líquida de 2,18 US\$ m⁻³ de água aplicada, com uma economia de água de 64,4% em relação à lâmina máxima e uma redução média de 45,5% no custo da energia elétrica. Nesse caso, o produtor poderá adotar a irrigação com déficit e aumentar a área irrigada com o volume de água que foi economizado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SISTEMA PIVÔ CENTRAL DE REFERÊNCIA

No estudo de otimização do sistema de irrigação utilizou-se o pivô central de número 1 (Figura 11), instalado na Embrapa Arroz e Feijão, localizado no município de Santo Antônio de Goiás-GO, cujo centro da área irrigada se encontra nas seguintes coordenadas geográficas: 16° 29' 37" S e 49° 18' 16" O.

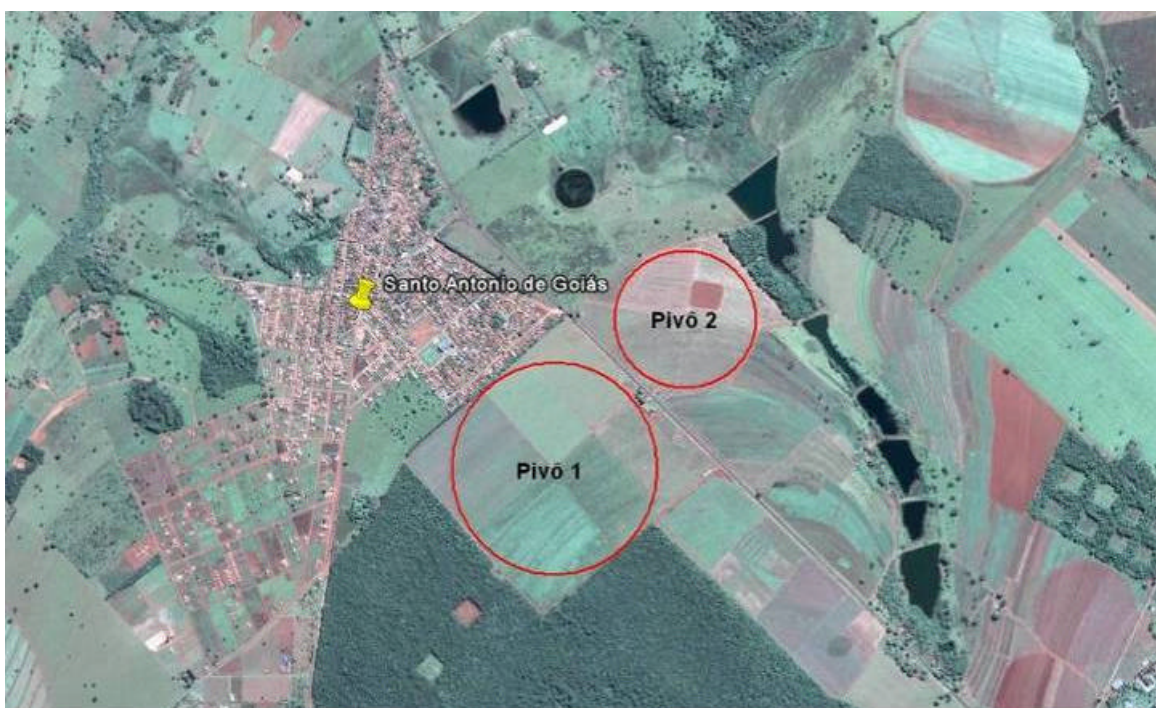


Figura 11. Localização do pivô central 1 da Embrapa Arroz e Feijão (Google Earth , 2008)

O equipamento empregado no estudo de caso foi caracterizado por Alves Filho (2002), sendo constituído de dez torres com lances médios de 38,6 m com balanço de 24 m, totalizando 410 m. O raio médio irrigado pelo pivô central é de 411,2 m, totalizando uma área irrigada de 53,12 ha (Figura 11).

O sistema pivô central possui uma altura de 2,7 m, e a tubulação da linha lateral é de aço zincado com diâmetro de 168,28 mm. A adutora, de aço zincado, tem 1038

m de comprimento e 159 mm de diâmetro e a sucção tem 2 m de comprimento e 250 mm de diâmetro.

Segundo Alves Filho (2002), o sistema de bombeamento é composto de uma bomba instalada modelo TK 150-50, com potência de 96,7 cv no eixo e o motor elétrico modelo WEG de 100 cv, com pressão de serviço de 106 m e vazão de 172,5 m³ h⁻¹. O rendimento total da bomba é 70% e do motor 82% (Anexo A).

A altura geométrica total entre a captação e o ponto pivô é de 26 m e as alturas geométricas entre o ponto pivô posicionado na altitude de 786 m, e o final da tubulação, foram levantados em um estudo topográfico realizado na área do pivô 1 e estão apresentados na Tabela 8 para diferentes ângulos de giro do equipamento, tomando-se com o início da escala de giro o ponto mais alto.

Tabela 8. Altura geométrica entre o ponto pivô e o final da linha lateral para diferentes posições do equipamento medidas em ângulos de giro.

Ângulo de giro	Cota do terreno (m)	Altura geométrica (m)
0°	100,00	6,33
15°	99,39	5,72
30°	98,04	4,37
45°	95,98	2,31
60°	93,83	0,16
75°	91,29	-2,38
90°	89,04	-4,63
105°	86,87	-6,80
120°	85,05	-8,62
135°	83,65	-10,02
150°	82,89	-10,78
165°	82,32	-11,35
180°	82,81	-10,86
195°	83,25	-10,42
210°	83,95	-9,72
225°	85,33	-8,34
240°	87,16	-6,51
255°	89,13	-4,54
270°	91,17	-2,50
285°	93,23	-0,44
300°	95,20	1,53
315°	97,10	3,43
330°	98,89	5,22
345°	99,98	6,31

Considerando a lâmina levantada por Alves Filho (2002), foi projetado um novo sistema, considerando na análise, dois tipos de sistemas para a comparação, um com

dados de projeto do sistema em operação e outro para atender as necessidades de lâmina de água.

3.2 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DO SISTEMA PIVÔ CENTRAL

No dimensionamento econômico do sistema pivô central, considerou-se duas vazões para a análise, a justificativa é ter dados de referências de um sistema já implementado e outro considerando um sistema novo a ser implementado. No sistema já implementado, a análise tem por objetivo de se verificar a necessidade ou não de substituir por outro mais eficiente, no sistema novo de implementar, um sistema mais eficiente.

Uma tubulação em irrigação pode, conforme a finalidade, ser designada como adutora, ramal ou lateral. A adutora é aquela tubulação que vai da bomba até a área a ser irrigada. Normalmente é a tubulação de maior diâmetro. Os ramais são aquelas tubulações que conduzem água para os diferentes setores a serem irrigados, e a lateral é a tubulação no qual estão conectados os emissores, sejam eles aspersores, gotejadores ou microaspersores. Como pode ser deduzida, uma lateral possui vazão variável. No primeiro trecho é conduzida a vazão que atende a todos os emissores. No segundo trecho, após o primeiro emissor, é conduzida a vazão total menos a vazão do primeiro emissor, e no último trecho é conduzida a vazão do último emissor.

No dimensionamento econômico do sistema pivô central foram feitas simulações de combinações dos diâmetros empregados na linha lateral, adutora e sucção. Para tal, foi elaborada uma planilha eletrônica, considerando as diferentes combinações de diâmetros de tubulação da linha lateral (6 5/8" e 8") e da adutora e sucção (6", 7", 8", 10" e 12"), em que foi calculado para cada combinação de diâmetros a altura manométrica total para a situação de maior altura geométrica ao longo da trajetória da linha lateral móvel. Com base na altura manométrica total e na vazão de projeto, foram selecionadas no catálogo dos fabricantes KSB (KSB, 2003) e WEG (WEG, 2005), a bomba e o motor que proporcionava o menor consumo de energia de modo a otimizar o custo total de implantação do sistema de irrigação pivô central.

3.2.1 Linha lateral

No cálculo da altura manométrica faz-se necessário conhecer a pressão na base do equipamento pivô central. Segundo Colombo (2003), Bernardo et al. (2006) e Carvalho & Oliveira (2008), a pressão na base do equipamento pivô central depende da pressão de operação dos aspersores, da existência de aspersor posicionado na extremidade final da linha lateral, do comprimento e diâmetro(s) da linha lateral, altura do equipamento, desnível entre o ponto pivô e a extremidade da linha lateral e da vazão, conforme Equação 8.

Nesta análise foram consideradas a pressão de operação dos aspersores de 15 m e a perda de carga localizada nas válvulas reguladoras de pressão de 5 m e altura do equipamento de 2,7 m, conforme descrito por Alves Filho (2002) para o pivô central 1 da Embrapa Arroz e Feijão. O desnível entre o ponto pivô e a extremidade da linha lateral no sentido de aclave obtido no levantamento de campo foi de 6,33 m (Tabela 8).

Para o caso de equipamento em que a linha lateral apresenta apenas um diâmetro, a perda de carga ao longo da linha lateral é obtida pelo emprego da equação de Hazen-Williams corrigida com o fator F_r (Equação 33); por um fator que leva em consideração a distribuição da vazão ao longo da linha lateral em função do número de aspersores, no qual Scaloppi & Allen (1993) apresentaram uma equação analítica para determinação do fator de correção de perda de carga (Equação 34).

$$hf_{\text{pivô}} = 10,643 \frac{L}{D^{4,87}} \frac{Q^{1,852}}{C} F_r \quad [33]$$

em que:

F_r = fator de correção da perda de carga;

Q = vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

L = comprimento da linha lateral (m);

D = diâmetro da canalização (m);

C = coeficiente de rugosidade (aço zincado $C = 125$).

$$F_r = \frac{r}{R} + \frac{m}{3} \frac{r^3}{R^3} + \frac{m(m-1)}{10} \frac{r^5}{R^5} + \frac{m(m-1)(m-2)}{42} \frac{r^7}{R^7} \quad [34]$$

em que:

r = distância de um ponto qualquer a partir do início da linha lateral, variando de 0 a L , sendo L o comprimento da linha lateral (m);

R = raio da área irrigada (m);

$m = 1,852$.

O valor para o fator F_r segundo Colombo (2003) e Carvalho & Oliveira (2008), considerando para a maioria dos equipamentos pivô central a relação da linha lateral (L) e o raio molhado (R) é maior que 0,9, pode-se afirmar que a perda de carga em um pivô central com uma linha lateral de diâmetro único é da ordem de 54%, daquela que ocorreria em uma tubulação de mesmo diâmetro e comprimento igual ao raio molhado conduzindo uma vazão constante e igual á vazão total do pivô.

Para o caso de equipamento conduzindo uma vazão constante e a combinação de dois tipos de tubulação os valores foram menores, Equação 35.

$$hf_{\text{pivô}} = k \frac{R}{D_1^{4,87}} F_{L/R} = k \frac{R}{D_2^{4,87}} F_{L/R} = F_{L/R} \quad [35]$$

em que:

L_1 = comprimento do trecho inicial de diâmetro D_1 (m);

D_2 = diâmetro do trecho de comprimento $L - L_1$ (m).

$F_{L/R}$ = fator de correção calculado pela Equação 34 considerando todo o comprimento L da linha lateral com único diâmetro;

$F_{L_1/R}$ = fator de correção calculado pela Equação 34 considerando todo o comprimento L_1 da linha lateral com único diâmetro.

$$k = 10,643 \left(\frac{Q}{3600C} \right)^{1,852} \quad [36]$$

O valor de k considerando a vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e o valor da constante de rugosidade para $C = 125$ para tubos de aço zincado que são utilizados na linha lateral, resultou em um valor de $k = 5,01 \cdot 10^{-6}$; para o sistema com vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ resultou em um $k = 9,71 \cdot 10^{-6}$.

Para o cálculo das simulações de composição da linha lateral do pivô, considerou-se o equipamento pivô central Lindsay (www.lindsay.com.br), cujo vão inicial

possui uma distância entre torres de 54,53 m, a parte intermediária com distância entre torres de 54,55 m e o balanço com comprimento de 26,82 m. Nas simulações foram empregados os diâmetros de 8” polegadas (203,2 mm) com diâmetros de 6 5/8” (168,28 mm), conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Combinações realizadas dos diâmetros para a linha lateral do pivô central.

Combinação	Diâmetro		
	Vão inicial	Vão intermediário	Balanço
PC1	6 5/8”	6 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC2	8”	6 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC3	8”	1 vão de 8” e 5 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC4	8”	2 vãos de 8” e 4 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC5	8”	3 vãos de 8” e 3 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC6	8”	4 vãos de 8” e 2 vãos de 6 5/8”	6 5/8”
PC7	8”	5 vãos de 8” e 1 vão de 6 5/8”	6 5/8”

Para a análise econômica, foi cotado junto aos representantes de venda do equipamento pivô central Lindsay, o custo linear da linha lateral de 8” (565,20 R\$ m⁻¹) e de 6 5/8” (497,98 R\$ m⁻¹).

3.2.2 Adutora e sucção

De acordo com Batista & Coelho (2003), todo o sistema de bombeamento deve ser projetado levando em conta critérios econômicos, uma vez que o diâmetro da tubulação, a potência do sistema de bombeamento e as despesas operacionais, estão relacionados. A redução no diâmetro da tubulação eleva as perdas de carga e aumenta a potência necessária do conjunto motobomba; esta configuração de projeto propicia maior custo do conjunto elevatório e maior despesa com energia, embora proporcione economia na compra da tubulação. Por outro lado, aumentando-se o diâmetro da tubulação, a potência do conjunto elevatório e o custo operacional de energia elétrica serão menores, podendo tornar-se economicamente viável ao longo da vida útil dos equipamentos.

No cálculo da altura manométrica total (H) foi considerada a seguinte equação:

$$H = P_{in} + hf_{adutora} + hf_{sucção} + hf_i + h_{recalque} + h_{sucção} \quad [37]$$

em que:

$hf_{adutora}$ = perda de carga na adutora (m);

$hf_{sucção}$ = perda de carga na sucção (m);

hf_i = perdas de cargas localizadas na adutora e sucção (m);

h_{recalque} = altura geométrica de recalque (m);

$h_{\text{sucção}}$ = altura geométrica de sucção (m);

A perda de carga na adutora foi determinada para diferentes combinações de diâmetros associados em série, empregando a equação de Hazen-Williams, ou seja:

$$hf_{\text{adutora}} = k \left(\frac{L_1}{D_1^{4,87}} + \frac{L_2}{D_2^{4,87}} \right) \quad [38]$$

em que:

L_1 = comprimento do trecho de diâmetro D_1 (m);

L_2 = comprimento do trecho de diâmetro D_2 (m);

O valor de k considerando a vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e o $C = 125$ para tubos de aço zincado, resultou em um valor de $k = 5,01 \times 10^{-6}$; e para a vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ resultou em $k = 9,71 \times 10^{-6}$.

Nesta análise, adotou-se para a tubulação de sucção o diâmetro comercial imediatamente superior ao maior diâmetro da adutora. Este procedimento, segundo Carvalho & Oliveira (2008), deve ser adotado com a finalidade de reduzir as perdas de carga na sucção e evitar problemas de cavitação da bomba. A perda de carga na sucção foi determinada considerando o comprimento do atual sistema implantado no Pivô 1 de 2 m (Alves Filho, 2002), empregando a equação de Hazen-Williams. No cálculo das perdas de carga localizadas na adutora e sucção empregou-se o método dos comprimentos equivalentes descritos por Carvalho & Oliveira (2008), considerando todos os acessórios e conexões existentes no sistema do Pivô 1 (Anexo A).

Nos cálculos realizados para a escolha do diâmetro econômico da adutora foram considerados o mesmo princípio da linha lateral, mas com mais opções de diâmetro para a adutora e um comprimento total de 1038 m, conforme Tabela 10. Para a análise econômica, fez-se a cotação junto aos representantes de venda do equipamento pivô central Lindsay, dos tubos de aço zincado, obtendo os valores médios de 113,33 R\$ m^{-1} para o tubo de 12", 91,67 R\$ m^{-1} para o de 10", 66,67 R\$ m^{-1} para o de 8", 55,00 R\$ m^{-1} para o de 7" e 40,50 R\$ m^{-1} para o de 6".

Tabela 10. Combinações de diâmetros e comprimento da adutora do pivô central

D (mm)	304,8	254	203,2	177,8	152,4	Custo total da adutora (R\$)
D (pol)	12"	10"	8"	7"	6"	
Custo da tubulação (R\$/m)	133,33	91,67	66,67	55,00	40,50	
Adutora	L (m)					
A1	1038	0	0	0	0	138396,54
A2	780	258	0	0	0	127648,26
A3	516	522	0	0	0	116650,02
A4	258	780	0	0	0	105901,74
A5	0	1038	0	0	0	95153,46
A6	0	780	258	0	0	88703,46
A7	0	516	522	0	0	82103,46
A8	0	258	780	0	0	75653,46
A9	0	0	1038	0	0	69203,46
A10	0	0	780	258	0	66192,60
A11	0	0	516	522	0	63111,72
A12	0	0	258	780	0	60100,86
A13	0	0	0	1038	0	57090,00
A14	0	0	0	780	258	53349,00
A15	0	0	0	516	522	49521,00
A16	0	0	0	258	780	45780,00

3.2.3 Bomba e motor elétrico

A seleção da bomba foi feita de forma a maximizar a eficiência e o diâmetro do rotor, para as rotações de 1750 rpm e 3500 rpm, na tentativa de se reduzir o custo com energia elétrica e com a aquisição da bomba. Para tal, calculou-se inicialmente a rotação específica (Chaudhry, 1987) e o diâmetro ótimo do rotor da bomba (Equações 30 e 31). Empregando-se a Figura 3, fez-se a estimativa da eficiência máxima esperada da bomba a ser selecionada.

Empregando-se as curvas características das bombas fabricadas pela KSB (KSB, 2003), procurou-se selecionar diferentes modelos, para as duas rotações, que proporcionassem eficiências e diâmetros de rotor próximos aos valores maximizados esperados.

Para as duas rotações analisadas, e em função das potências exigidas no eixo da bomba, foram selecionados os motores elétricos fabricados pela WEG. Foi considerado dimensionados, corretamente, os motores que apresentaram índices de carregamento entre 75% e 100%, resultando um funcionamento otimizado e fator de potência adequado. Abaixo e acima destes valores, o motor poderá estar super ou subdimensionado,

respectivamente. Como consequência do baixo índice de carregamento do motor elétrico, dentre outros, citam-se: a redução do fator de potência, do rendimento e o aumento da corrente de partida (WEG, 1998). Para a adequação de força motriz, é importante que se faça a avaliação do índice de carregamento e do índice de rendimento do motor na condição de carga efetiva.

3.2.4 Diâmetro econômico em função do custo mínimo

Os custos de investimentos, pivô central, tubulações, bomba e motor, foram levantados em diferentes empresas que comercializam os equipamentos que compõem o sistema de irrigação por aspersão pivô central, equação 39. Para o cálculo do custo anualizado, equação 40 (ANEEL, 2000b), considerou-se um valor médio da vida útil dos equipamentos de 20 anos (Tabela 11) conforme recomendação do Proni (1987) e a taxa de juros foi à praticada pela Comissão de Políticas Monetárias (COPOM, 2008) do Banco Central de 12,25% . Nesta análise não foi considerado o valor residual (valor de sucata).

$$CI = C_{\text{pivô}} + C_{\text{tubulação}} + C_{\text{bomba}} + C_{\text{motor}} \cdot FRC \quad [39]$$

$$FRC = \frac{1 + i^n}{1 + i^n - 1} \quad [40]$$

em que,

CI = custo de investimento (R\$);

$C_{\text{pivô}}$ = custo do equipamento pivô central (R\$);

$C_{\text{tubulação}}$ = custo da tubulação adutora (R\$);

C_{bomba} = custo da bomba (R\$);

C_{motor} = custo do motor elétrico (R\$);

FRC = fator de recuperação de capital (%);

i = taxa de juros (%);

n = vida útil do sistema em anos.

Os custos operacionais analisados foram os de manutenção do sistema empregando um valor médio de 2% sobre os custos de investimentos segundo recomendação do Proni (1987) e da energia elétrica (equação 41). O custo da energia elétrica foi calculado com base na tarifas praticadas pelas Centrais Elétricas do Estado de

Goiás (CELG) para os grupos tarifários Anexo B e C, considerando o período seco, no qual efetivamente se pratica a irrigação em Goiás, e a tarifa verde horosazonal (anexo C).

$$CO = C_{\text{manutenção}} + C_{\text{energia}} \quad [41]$$

em que:

CO = custo operacional (R\$);

$C_{\text{manutenção}}$ = custo de manutenção do sistema (R\$);

C_{energia} = custo da energia elétrica (R\$).

Tabela 11. Valores de vida útil e taxas de manutenção de componentes de sistemas de irrigação.

Componente	Vida útil (anos)	Manutenção anual (% do valor novo)
Estação de bombeamento (estrutura)	20 a 40	0,5 a 1,5
Bomba centrífuga	16 a 25	3,0 a 5,0
Motor elétrico	20 a 25	1,5 a 2,5
Estruturas de concreto	15 a 25	0,5 a 1,5
Tubo de aço enterrado	15 a 25	0,25 a 0,5
Tubo de alumínio sob pressão	10 a 20	1,5 a 2,5
Tubo de aço galvanizado na superfície	10 a 20	1,0 a 2,0
Tubo de aço na superfície	10 a 12	1,0 a 2,0
Aspersor fixo	7 a 10	5,0 a 8,0
Aspersor móvel	10 a 15	5,0 a 8,0

Fonte: Proni (1987).

A combinação otimizada dos diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora e do conjunto motor e bomba foi selecionada a que apresentou o menor custo total, dado pela soma dos custos de investimento e operacional.

3.3 UTILIZAÇÃO DO CONVERTOR DE FREQUÊNCIA

Visando a redução de energia consumida, analisou-se o emprego do conversor de frequência, com intuito de regular de forma não dissipativa a rotação do conjunto motobomba, de modo a manter a vazão, para as diferentes posições da linha lateral ao longo de um giro completo do equipamento pivô central. Para tal, fez-se o estudo da variação da pressão no ponto pivô e da altura manométrica, para as posições da linha lateral, especificadas na Tabela 8, página 54. Nesta análise, considerou-se a configuração do sistema otimizado.

Foi elaborada uma planilha para o equacionamento que utilizou, além do estudo topográfico, o diâmetro da linha lateral e da adutora selecionada pelo método do diâmetro econômico, selecionando o sistema com menor valor e de menor potência do conjunto motobomba. A análise foi realizada para uma volta completa da linha lateral do sistema pivô central, determinando a pressão na base (P_{in}) e a altura manométrica para diferentes posições distanciadas radialmente formando ângulos de 15° ao longo da circunferência descrita pela última torre.

No cálculo da P_{in} , para cada posição da linha lateral, considerou-se a posição do aspersor com o valor de menor pressão. A variação da pressão ao longo da linha lateral não é linear como em tubulações com vazões constantes, portanto a posição de ocorrência da pressão mínima varia em função das condições do relevo. A pressão mínima ocorrerá no início da linha lateral quando a declividade do terreno (i) for negativa (linha em declive) e a diferença de nível (Δz) entre o início e o final da linha for igual ou maior que a perda de carga, ou seja: $i < 0$ e $\Delta z \geq hf_{pivô}$. A pressão mínima ocorrerá no final da linha lateral quando a declividade do terreno for positiva (linha em aclave), ou seja: $i > 0$. Quando a declividade (i) da linha lateral for negativa (linha em declive) e a diferença entre o início e o final da linha lateral for menor que a perda de carga do pivô, ou seja: $i < 0$ e $\Delta z < hf_{pivô}$; a pressão mínima estará em uma posição intermediária. Segundo Carvalho & Oliveira (2008), para se determinar a distância entre a base e o ponto de menor pressão utiliza-se a seguinte equação:

$$I = L \sqrt{1 - \frac{i}{J} \frac{\Delta z}{L}^{0,54}} \quad [42]$$

$$hf_{pivô} = J \cdot I \quad [43]$$

em que:

I = distância entre o pivô e o ponto de menor pressão (m);

L = comprimento da linha lateral (m);

J = perda de carga unitária ($m \cdot m^{-1}$).

A perda de carga unitária foi determinada pela equação de Hazen-Williams, considerando o comprimento total da linha lateral, corrigida pelo fator que leva em

consideração a redução da vazão ao longo da linha lateral proposto por Scaloppi & Allen (1993).

A variação no desnível geométrico da linha lateral (z) em função do giro da linha lateral móvel, resulta na variação da altura manométrica total do sistema, o qual resulta em potencial economia de energia elétrica consumida, quando se utiliza o inversor de frequência.

Empregando o aplicativo desenvolvido por Medeiros (2005), fez-se a análise do período de recuperação do capital investido na aquisição do inversor de frequência com a redução anual da energia elétrica consumida. Nesta análise foi considerado o tempo de irrigação 1200 horas para cultura do feijão, os custos do inversor de frequência obtidos no mercado, a taxa de juros do COPOM (COPOM, 2008), os custos da energia elétrica da CELG (CELG, 2008) e a vida útil do equipamento.

Para se calcular o retorno do investimento necessário para utilização com inversor de frequência foi utilizado o método da taxa interna de retorno (TIR), que é um dos métodos de análise de investimentos, seja para avaliar a viabilidade de projetos ou acompanhar e comparar a rentabilidade de investimentos.

A TIR é a taxa necessária para igualar o valor de um investimento (valor presente) com os seus respectivos retornos futuros ou saldos de caixa, ou seja, é aquela taxa que zera o valor presente líquido (VPL) (Balarine, 2002). O VPL sendo usada em análise de investimentos significa taxa de retorno de um projeto (Equação 44).

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{|C_t|}{(1+i)^t} = 0 \quad [44]$$

em que:

VLP= valor presente líquido

R_t = receitas líquidas em cada momento t do projeto (custos da energia evitada);

C_t = custos líquidos, em módulo, em cada momento t do projeto (investimento);

$t = 0, 1, 2, \dots, n$;

$i = \text{TIR}$.

Considerando a taxa de juros de mercado, o comportamento da TIR, pode-se fazer a seguinte análise:

Se $TIR > SELIC$ - projeto economicamente satisfatório;

Se $TIR < SELIC$ - projeto economicamente insatisfatório;

Se $TIR = SELIC$ - projeto economicamente indiferente, ou seja, não há retorno do investimento nem prejuízo;

A TIR é usada como método de análise de investimentos, em que o investimento será economicamente atraente se a TIR for maior do que a taxa mínima de atratividade (taxa de retorno esperado pelo investimento). A TIR também é utilizada na comparação entre dois ou mais projetos de investimentos, quando estes forem mutuamente excludentes. Neste caso, o projeto que apresentar o maior valor da TIR será o projeto economicamente mais atraente.

3.4 ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO PIVÔ CENTRAL E SISTEMAS DE PLANTIO

Nesta análise foram simulados os potenciais de consumo de energia elétrica no sistema pivô central operando em diferentes condições de uniformidade de aplicação de água e de condições climáticas, irrigando feijão de inverno, para os sistemas plantio direto e convencional. Para tal, foi desenvolvida uma planilha eletrônica para a análise nas diversas condições de operação, cujas informações de entrada foram os dados climáticos, valores de coeficientes de uniformidade de aplicação de água, bem como os valores dos coeficientes de cultura do feijão, cultivado nos sistemas plantio direto e convencional.

A distribuição de água e a eficiência de irrigação por aspersão são afetadas pela variação de vazão dos aspersores, do perfil de distribuição de água dos aspersores e, principalmente pela ação do vento; e a perda de água devido à evaporação direta durante a aspersão e na superfície do solo (Frizzone, 1992).

Os dados climáticos utilizados nesta análise foram: umidade relativa, velocidade do vento e a evaporação do tanque Classe A, por serem os que mais interferem no desempenho de sistemas de irrigação por aspersão. Com base na série histórica de 24 anos de observação diária (1983 a 2007), coletada na estação meteorológica central da Embrapa Arroz e Feijão, fez-se inicialmente uma análise da frequência dos dados

empregados, para o período seco de maio a outubro, quando se cultiva no Estado de Goiás o feijão de inverno. O consumo de energia foram analisados para duas condições, ou seja, com base nos valores médios dos dados climáticos e nas maiores ocorrências na análise frequencial.

As condições climáticas afetam diretamente a eficiência de aplicação do sistema de irrigação, que por sua vez reflete no consumo de energia. Para a simulação da eficiência de aplicação, considerando as condições climáticas médias e de maior ocorrência, empregou-se a equação apresentada a seguir:

$$E_a = CUC \cdot E_{ap} \quad [45]$$

em que:

E_a = eficiência da aplicação do sistema;

E_{ap} = eficiência da aplicação potencial;

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen de aplicação de água.

Os valores médios de CUC para equipamentos do tipo pivô central são da ordem de 85% a 95% (ASAE, 1996). Nas simulações foram utilizados valores de CUC variando entre 80% a 95%, que segundo Bonomo (1999) e Bernardo et al. (2006), podem ser considerados com admissíveis para sistemas de irrigação por aspersão.

Na determinação da eficiência de aplicação potencial, empregou-se a metodologia proposta por Keller (1984), em função da evapotranspiração da cultura de referência, velocidade do vento e do índice de pulverização do jato do aspersor (CI). Segundo o mesmo autor, o jato é considerado muito pulverizado (gotas pequenas) para valores de $CI > 17$ e pouco pulverizado para valores de $CI < 7$ (gotas grandes). Segundo Bernardo et al. (2006), um jato muito pulverizado está sujeito à deriva pelo vento reduzindo assim a eficiência de aplicação, demandando portanto, uma maior lâmina de irrigação o que reflete em um aumento no consumo de energia (Bonomo, 1999). A equação 46 proposta por Keller (1984) foi empregada na determinação da E_{ap} para $7 < CI < 17$.

$$E_{ap} = 0,976 + 0,005ET_o - 0,00017ET_o^2 + 0,0012V_v - CI[0,00043ET_o + 0,00018V_v + 0,000016ET_oV_v] \quad [46]$$

em que:

E_{ap} = eficiência da aplicação potencial;

V_v = velocidade do vento (km d^{-1});

ET_o = evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

CI = índice de pulverização do jato do aspersor.

A evapotranspiração da referência foi estimada utilizando o método do tanque Classe A (Allen et al., 1998), instalado na estação climatológica da Embrapa Arroz e Feijão, cujo raio de bordadura gramada ao redor do tanque é de 5,0 m. A ET_o foi obtida pelo produto da evaporação do tanque Classe A de maior ocorrência no período de cultivo do feijão de inverno, extraída da série histórica, pelo coeficiente do tanque (K_t) obtido pela Equação 47, em função da velocidade do vento medido a 2 m de altura, umidade relativa e raio de bordadura do tanque circundado por grama (Bernardo et al., 2006).

$$K_t = 0,108 - 28,6 \cdot 10^{-3} V_v + 42,2 \cdot 10^{-3} \ln(R_{\text{tanque}}) + 0,1434 \ln(\text{UR}) - 0,631 \cdot 10^{-3} [\ln(R_{\text{tanque}})]^2 \ln(\text{UR}) \quad [47]$$

em que:

K_t = coeficiente do tanque classe A;

V_v = velocidade do vento medido a 2 m de altura (m s^{-1});

R_{tanque} = raio de bordadura gramada ao redor do tanque (m);

UR = umidade relativa (%).

Baseado na demanda hídrica da área a ser irrigada, corrigida pelo número máximo de horas que o equipamento pode operar a cada dia, perdas de água que ocorrem antes da sua infiltração no solo e na fração de área que recebe a lâmina deficitária, foi calculado segundo Colombo (2003) a taxa de reposição diária do pivô (TRD) dada por:

$$\text{TRD} = \frac{ET_c}{E_a} \cdot \frac{24}{\text{JORNADA}} \cdot \frac{1}{L_{ad}} \cdot \frac{1}{P_e} \quad [48]$$

em que:

TRD = taxa de reposição diária do pivô (mm);

ET_c = evapotranspiração da cultura do feijão (mm d^{-1});

JORNADA = número de horas trabalhadas no dia;

L_{ad} = lâmina aplicada associada á diferentes níveis de área deficientemente irrigada;

P_e = perda de água por escoamento superficial.

A evapotranspiração do feijão foi obtida pelo produto da ET_0 pelo coeficiente de cultura (K_c), considerando os sistemas plantio direto e convencional, no período de máxima demanda de água da cultura, ou seja, no período de floração e enchimento de grãos, de 1,06 obtido Moreira et al. (1999) e 1,28 por Steinmetz (1983), respectivamente.

O consumo da energia elétrica foi obtido com relação à fração da área de déficit, sendo esta, a fração da área irrigada que recebe lâmina de irrigação menor que a necessária (Bernardo et al., 2006).

O valor adimensional de lâmina aplicada (L_{ad}), está associado aos diferentes níveis de área deficientemente irrigada, para os diferentes níveis de probabilidade acumulada, baseado na distribuição estatística normal, é calculada pela Equação 49 (Colombo, 2003):

$$L_{ad} = 1 + CV Z_{ad} \quad [49]$$

em que:

Z_{ad} = variável reduzida da distribuição normal correspondente a lâmina de aplicação (L_{ad}), que tem uma probabilidade de ocorrência acumulada igual a fração de área deficientemente irrigada;

CV = coeficiente de variação da distribuição das lâminas aplicadas.

No cálculo da L_{ad} foram consideradas as frações da área deficientemente irrigadas (Z_{ad}) variando de 5% a 50%, e para a estimativa do CV foi considerada a sua equivalência com o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) que foi demonstrado por Hart & Reynolds (1965) para o caso da distribuição normal, ou seja:

$$CV = \frac{(1 - CUC)}{\sqrt{p}} \quad [50]$$

Nos cálculos da taxa de reposição diária do pivô, para todas as condições de análise, as perdas de água por escoamento superficial foram consideradas de 5% do total aplicado, valor considerado como razoável por Colombo (2003).

De posse dos valores das taxas de reposição diária do pivô, para todas as situações analisadas, calculou-se a vazão que permitiu assim a análise do consumo de energia.

$$Q = 10 \frac{A \text{ TRD}}{\text{JORNADA}} \quad [51]$$

em que:

Q = vazão ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$);

A = área irrigada (ha).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO

A análise econômica da linha lateral e linha principal (adutora) utilizaram vazões de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ com custos (variáveis, fixos e totais) para o recalque, por meio de diferentes combinações de diâmetros da tubulação e comprimento; obtendo a combinação para o qual os custos forem os menores, segundo metodologia proposta por Bernardo et al. (2006).

4.1.1 Dimensionamento para a linha lateral do pivô central

Para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do sistema pivô central empregado neste estudo, considerando os diâmetros comerciais de 168,28 mm (6 5/8'') e 203 mm (8'') e as combinações PC1 a PC7 desses diâmetros conforme Tabela 9, para as vazões de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, os valores das perdas de carga ($hf_{\text{pivô}}$) e da pressão na entrada da linha lateral (P_{in}) do pivô central estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Perda de carga ($hf_{\text{pivô}}$) e pressão na entrada da linha lateral (P_{in}) do pivô central para as diferentes combinações de diâmetros e vazão.

Pivô ¹	$Q = 172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$		$Q = 246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$	
	$hf_{\text{pivô}}$ (m)	P_{in} (m)	$hf_{\text{pivô}}$ (m)	P_{in} (m)
PC1	6,6	36,9	12,8	43,1
PC2	6,5	36,8	12,7	43,0
PC3	6,4	36,7	12,4	42,7
PC4	6,1	36,4	11,8	42,1
PC5	5,6	35,9	10,8	41,1
PC6	4,9	35,2	9,4	39,7
PC7	4,0	34,3	7,8	38,1

¹ PC1 A PC7 (combinações de diâmetros para linha lateral do pivô central conforme Tabela 10).

Na Tabela 12 observa-se que, para uma mesma vazão, há uma redução nos valores de perda de carga e da pressão na entrada da linha lateral com o aumento do

diâmetro. As maiores perda de carga foram obtidas para a configuração PC1 em que todo o comprimento da linha lateral é composto pelo diâmetro de 168,28 mm (6 5/8''). A menor perda de carga foi obtida configuração PC7, em que o pivô central é composto de 203 mm (8'') com balanço de diâmetro de 168,28 mm (6 5/8''). Para a mesma configuração, observa-se um aumento nos valores da perda de carga e pressão na entrada da linha lateral com o aumento da vazão, devido o aumento na turbulência proporcionada pelo escoamento da água.

Nos cálculos o fator de correção da perda de carga (F_r) na linha lateral do pivô central foi de 0,54, conforme os valores encontrados por Colombo (2003), o qual considera para a maioria dos equipamentos pivô central, a perda de carga na linha lateral do pivô, diferentemente daquela que ocorreria em uma tubulação de mesmo diâmetro e comprimento igual ao raio do pivô conduzindo uma vazão constante no pivô central sem saídas laterais.

O custo da linha lateral do pivô central inicialmente considera os diâmetros de 168,28 mm (6 5/8'' polegadas) e 203 mm (8'' polegadas), que são os valores mais comuns no mercado de instalação de pivôs centrais. O custo fixo ou total para a linha lateral do pivô central é a soma dos custos das tubulações dos vãos iniciais, intermediários e balanço para as sete combinações possíveis da linha lateral de pivô central a serem realizadas no sistema de irrigação (Tabela 13).

Tabela 13. Custo do pivô (R\$*) para as diferentes combinações de diâmetro da linha lateral.

Pivô ¹	Inicial	Intermediário	Balanço	Custo fixo
PC1	27154,90	162989,18	13355,85	203499,94
PC2	30820,47	162989,18	13355,85	207165,50
PC3	30820,47	166656,09	13355,85	210832,40
PC4	30820,47	170322,99	13355,85	214499,31
PC5	30820,47	173989,90	13355,85	218166,21
PC6	30820,47	177656,80	13355,85	221833,12
PC7	30820,47	181323,71	13355,85	225500,02

¹ PC1 A PC7 (combinações de diâmetros para linha lateral do pivô central conforme Tabela 10).

*valor cotado em março 2009.

Os equipamentos configurados com diâmetros de tubulação menores proporcionam uma redução no custo de investimento para a aquisição do sistema, ou seja, do custo fixo. Por outro lado, como as perdas são maiores requer uma maior potência instalada no bombeamento, proporcionando um maior consumo de energia.

A Tabela 13 mostra os custos com a implementação do sistema para a combinação da tubulação da linha lateral, pode-se observar que o diâmetro de menor tamanho tem seu custo total de R\$ 203.499,94, e os custos aumentam com o aumento do diâmetro da tubulação. Esses custos são válidos para o sistema com vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ou $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

4.1.2 Dimensionamento para a adutora do pivô central

Com relação ao dimensionamento da linha adutora, foram calculadas as perdas de carga na tubulação adutora, sucção e total, levando-se em consideração as perdas de carga localizadas, para as diferentes combinações de composição da adutora apresentadas na metodologia (Tabela 10) e para as vazões de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (Tabela 14). Pode-se fazer a mesma discussão empregada na análise da linha lateral do pivô central, ou seja, para uma mesma vazão observa-se um aumento da perda de carga total. Com a redução dos diâmetros e dos trechos de menores diâmetros empregados nas diferentes combinações de composição da adutora, e para uma mesma combinação, observa-se um aumento da perda de carga total com o aumento da vazão.

Tabela 14. Perda de carga total (hf_{total}), na adutora ($hf_{adutora}$) e sucção ($hf_{sucção}$) para as diferentes combinações de diâmetros da adutora e vazão.

Adutora ¹	$Q = 172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$			$Q = 246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$		
	$hf_{adutora}$ (m)	$hf_{sucção}$ (m)	hf_{total} (m)	$hf_{adutora}$ (m)	$hf_{sucção}$ (m)	hf_{total} (m)
A1	1,78	0,32	2,10	3,45	0,62	4,07
A2	2,38	0,32	2,70	4,62	0,62	5,24
A3	3,00	0,32	3,32	5,82	0,62	6,44
A4	3,60	0,32	3,92	6,98	0,62	7,60
A5	4,30	0,32	4,62	8,33	0,62	8,95
A6	6,31	0,32	6,62	12,22	0,62	12,84
A7	8,36	0,32	8,68	16,21	0,62	16,83
A8	10,37	0,32	10,69	20,10	0,62	20,72
A9	12,63	0,32	12,95	24,48	0,62	25,10
A10	15,41	0,32	15,73	29,87	0,62	30,49
A11	18,25	0,32	18,57	35,38	0,62	36,00
A12	21,03	0,32	21,35	40,76	0,62	41,38
A13	24,10	0,32	24,42	46,72	0,62	47,34
A14	30,60	0,32	30,92	59,31	0,62	59,93
A15	37,25	0,32	37,57	72,20	0,62	72,82
A16	43,75	0,32	44,07	84,80	0,62	85,42

¹ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).

A Tabela 15 apresenta os valores dos custos de investimento na aquisição da adutora para as diferentes combinações de diâmetros, da sucção e total. Observa-se uma redução dos custos fixos com a diminuição dos diâmetros da tubulação (combinações A1 a A7), por outro lado, haverá um aumento da potência instalada da bomba e motor elétrico empregado no acionamento e do consumo de energia, devido ao aumento das perdas de carga. A adutora A16 foi a que proporcionou o menor custo fixo total, porém foi a que proporcionou as maiores perdas de carga, o que há proporcionou uma maior potência instalada do conjunto motobomba.

Tabela 15. Custo fixo (R\$)* da adutora ($CF_{adutora}$), sucção ($CF_{sucção}$) e total (CF_{total}) para as diferentes combinações de diâmetros da adutora do pivô central.

Adutora ¹	$CF_{adutora}$	$CF_{sucção}$	CF_{total}
A1	122354,61	2453,10	124807,71
A2	116764,61	2453,10	119217,71
A3	111044,61	2453,10	113497,71
A4	105454,61	2453,10	107907,71
A5	98577,30	2022,37	100599,67
A6	92127,30	2022,37	94149,67
A7	85527,30	2022,37	87549,67
A8	79077,30	2022,37	81099,67
A9	71698,84	1693,33	73392,17
A10	68688,84	1693,33	70382,17
A11	65608,84	1693,33	67302,17
A12	62598,84	1693,33	64292,17
A13	59299,94	1555,83	60855,77
A14	55558,94	1555,83	57114,77
A15	51730,94	1555,83	53286,77
A16	47989,94	1555,83	49545,77

¹ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).

* valor cotado em março 2009.

A análise otimizada empregada na seleção da bomba hidráulica, conforme descrito na metodologia e empregando os catálogos técnicos das bombas KSB (KSB, 2003) foram selecionadas os modelos WKL e Meganorm para as rotações de 1750 rpm e 3500 rpm, respectivamente. A seleção dos motores elétricos de acionamento das bombas, baseou-se nas potências exigidas para as diferentes combinações do equipamento pivô central e adutora, rotações da bomba. Foram também considerados os motores padrão e de alto rendimento de fabricação da WEG, (WEG, 2005).

A Tabela 16 apresenta os modelos de bomba e motor de todas as combinações possíveis de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de

172,5 m³h⁻¹, rotação de 1750 rpm e motores elétricos padrão e de alto rendimento. Para as demais combinações de vazão e rotação podem ser observadas nas Tabelas 1A, 2A e 3A , do Apêndice A.

O modelo de bomba é a WLK 100/3 e 100/4, as quais foram escolhidas segundo Chaudhry (1987) cujo princípio é a máxima eficiência esperada pelo sistema de irrigação, ficando o rendimento para a bomba WLK 100/3 e 100/4 em 72% na rotação de 1750 rpm.

Tabela 16. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de 172,5 m³h⁻¹, rotação de 1750 rpm e motor padrão e de alto rendimento.

Comb. ¹	Pivô ²	Adutora ³	Hman ⁴ (m)	Potência (cv)	Bomba			Motor padrão modelo W21		Motor de alto rendimento modelo AR Plus	
					Modelo WKL	Rendimento (%)	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)
C 1	PC1	A1	67,99	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 2	PC1	A2	68,59	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 3	PC1	A3	69,20	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 4	PC1	A4	69,81	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 5	PC1	A5	70,50	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 6	PC1	A6	72,51	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 7	PC1	A7	74,57	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 8	PC1	A8	76,58	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 9	PC1	A9	78,83	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 10	PC1	A10	81,61	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 11	PC1	A11	84,46	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 12	PC1	A12	87,23	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 13	PC1	A13	90,31	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 14	PC1	A14	96,80	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 15	PC1	A15	103,45	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 16	PC1	A16	109,95	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 17	PC2	A1	67,95	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 18	PC2	A2	68,55	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 19	PC2	A3	69,17	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 20	PC2	A4	69,77	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 21	PC2	A5	70,46	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 22	PC2	A6	72,47	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 23	PC2	A7	74,53	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 24	PC2	A8	76,54	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 25	PC2	A9	78,80	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 26	PC2	A10	81,58	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 27	PC2	A11	84,42	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 28	PC2	A12	87,20	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 29	PC2	A13	90,27	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 30	PC2	A14	96,77	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 31	PC2	A15	103,42	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25

Continua ...

Tabela 16. Continuação...

C 32	PC2	A16	109,92	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 33	PC3	A1	67,81	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 34	PC3	A2	68,41	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 35	PC3	A3	69,02	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 36	PC3	A4	69,63	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 37	PC3	A5	70,32	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 38	PC3	A6	72,33	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 39	PC3	A7	74,39	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 40	PC3	A8	76,40	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 41	PC3	A9	78,65	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 42	PC3	A10	81,43	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 43	PC3	A11	84,27	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 44	PC3	A12	87,05	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 45	PC3	A13	90,12	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 46	PC3	A14	96,62	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 47	PC3	A15	103,27	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 48	PC3	A16	109,77	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 49	PC4	A1	67,48	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 50	PC4	A2	68,08	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 51	PC4	A3	68,70	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 52	PC4	A4	69,30	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 53	PC4	A5	69,99	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 54	PC4	A6	72,00	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 55	PC4	A7	74,06	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 56	PC4	A8	76,07	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 57	PC4	A9	78,33	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 58	PC4	A10	81,11	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 59	PC4	A11	83,95	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 60	PC4	A12	86,73	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 61	PC4	A13	89,80	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 62	PC4	A14	96,30	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 63	PC4	A15	102,95	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 64	PC4	A16	109,45	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 65	PC5	A1	66,96	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 66	PC5	A2	67,56	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 67	PC5	A3	68,18	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 68	PC5	A4	68,78	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 69	PC5	A5	69,48	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 70	PC5	A6	71,49	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 71	PC5	A7	73,54	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 72	PC5	A8	75,55	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 73	PC5	A9	77,81	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 74	PC5	A10	80,59	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 75	PC5	A11	83,43	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 76	PC5	A12	86,21	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 77	PC5	A13	89,28	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 78	PC5	A14	95,78	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 79	PC5	A15	102,43	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 80	PC5	A16	108,93	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 81	PC6	A1	66,26	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 82	PC6	A2	66,87	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65

Continua...

Tabela 16. Continuação...

C 83	PC6	A3	67,48	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 84	PC6	A4	68,08	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 85	PC6	A5	68,78	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 86	PC6	A6	70,79	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 87	PC6	A7	72,84	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 88	PC6	A8	74,85	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 89	PC6	A9	77,11	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 90	PC6	A10	79,89	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 91	PC6	A11	82,73	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 92	PC6	A12	85,51	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 93	PC6	A13	88,58	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 94	PC6	A14	95,08	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 95	PC6	A15	101,73	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 96	PC6	A16	108,23	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 97	PC7	A1	65,42	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 98	PC7	A2	66,03	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 99	PC7	A3	66,64	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 100	PC7	A4	67,24	60	100/3	72	15912,80	92,20	6645,78	93,40	9102,65
C 101	PC7	A5	67,94	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 102	PC7	A6	69,95	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 103	PC7	A7	72,00	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 104	PC7	A8	74,01	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 105	PC7	A9	76,27	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 106	PC7	A10	79,05	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 107	PC7	A11	81,89	75	100/3	72	15912,80	92,00	7597,22	93,60	10349,20
C 108	PC7	A12	84,67	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 109	PC7	A13	87,74	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 110	PC7	A14	94,24	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 111	PC7	A15	100,89	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25
C 112	PC7	A16	107,39	100	100/4	72	17881,96	93,00	8917,41	94,20	12628,25

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11); ⁴ Hman (altura manométrica total).

Para a escolha do motor, o índice de carregamento foi imperativo, segundo Fitzgerald et al. (1997), pois ao se analisar as curvas características dos motores, verifica-se que tanto o rendimento quanto o fator de potência decrescem com a redução do índice de carregamento do motor, ou seja, quanto menor este índice menor a eficiência. Na maioria das vezes nem sempre é possível ajustar a potência do motor àquela efetivamente necessária, e isto ocorre principalmente por que os motores são oferecidos em potências predeterminadas, e a fabricação especial de um motor com potência diferente do padrão do fabricante, seria antieconômica. Segundo WEG (1998), quando o regime de trabalho for contínuo, deve-se ajustar a carga ao motor para operar entre 75% e 100% da potência nominal, correspondendo à faixa de melhor rendimento. Nos cálculos tentou-se obter o índice de carregamento máximo, porém a média foi de 85%.

Levando-se em conta todas as combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para as vazões de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, com rotações de 1750 rpm e 3500 rpm e motor padrão e alto rendimento, escolheu-se o sistema de irrigação por meio do custo total de investimento anualizado (CT). O custo total é a soma dos custos de investimentos (CI), que são os gastos com linha lateral, adutora, bomba e motor, e os custos operacionais (CO), que são gastos com manutenção e de energia, empregando o equacionamento apresentado na metodologia.

Na Tabela 17, o sistema de irrigação operando com rotação de 1750 rpm, os resultados mostraram que a combinação do pivô central C11 composta da adutora A11 (comprimento da adutora com 50% de diâmetro com 8" polegadas e 50% de 7") combinado com a configuração PC1 (diâmetro da linha lateral com 6 5/8") é a de menor custo total, com potência de 75 cv. A combinação da adutora A11 com as demais configurações da linha lateral, resulta em maior custo total do sistema. Segundo Carvalho & Oliveira (2008), para diâmetro maior os custos operacionais são menores, mas o custo de investimento da tubulação será elevado. Em contrapartida, para diâmetro menor os custos operacionais são maiores, mas o custo de investimento da tubulação será menor. As demais combinações de vazão, rotação e custos do sistema de bombeamento podem ser observadas nas Tabelas 1B, 2B e 3B (Apêndice B).

Tabela 17. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, rotação de 1750 rpm e motor padrão e de alto rendimento.

Combinações ¹	Pivô ²	Adutora ³	Motor padrão		Motor de alto rendimento			
			Custos de Investimentos CI (R\$)	Custos Operacionais CO (R\$)	Custos Totais CT (R\$)	Custos de Investimentos CI (R\$)	Custos Operacionais CO (R\$)	Custos Totais CT(R\$)
C 1	PC1	A1	52346,64	9047,49	61394,13	52756,10	8918,92	61675,02
C 2	PC1	A2	51514,91	9101,69	60616,60	51924,37	8971,91	60896,28
C 3	PC1	A3	50663,83	9157,16	59820,99	51073,30	9026,14	60099,43
C 4	PC1	A4	49832,10	9211,36	59043,47	50241,57	9079,13	59320,70
C 5	PC1	A5	48744,75	9271,23	58015,97	49154,21	9137,60	58291,81
C 6	PC1	A6	47785,06	9488,51	57273,57	48194,52	9350,84	57545,36
C 7	PC1	A7	46803,05	9710,85	56513,90	47212,51	9569,04	56781,56
C 8	PC1	A8	45843,36	9928,14	55771,49	46252,82	9782,29	56035,11
C 9	PC1	A9	44696,57	10171,04	54867,61	45106,03	10020,65	55126,68
C 10	PC1	A10	44248,71	10489,00	54737,72	44658,18	10333,02	54991,20
C 11	PC1	A11	43790,44	10814,36	54604,80	44199,91	10652,66	54852,57
C 12	PC1	A12	43832,00	11031,73	54863,73	44384,14	10913,41	55297,55
C 13	PC1	A13	43320,71	11379,08	54699,79	43872,84	11256,21	55129,04
C 14	PC1	A14	42764,09	12124,54	54888,62	43316,22	11992,02	55308,24

Continua...

Tabela 17. Continuação.

C 15	PC1	A15	42194,52	12887,33	55081,85	42746,65	12744,95	55491,60
C 16	PC1	A16	41637,90	13632,78	55270,68	42190,03	13480,77	55670,80
C 17	PC2	A1	52892,03	9054,00	61946,03	53301,50	8925,50	62227,00
C 18	PC2	A2	52060,30	9108,21	61168,51	52469,77	8978,50	61448,27
C 19	PC2	A3	51209,23	9163,67	60372,90	51618,69	9032,72	60651,42
C 20	PC2	A4	50377,50	9217,88	59595,37	50786,96	9085,72	59872,68
C 21	PC2	A5	49290,14	9277,74	58567,88	49699,61	9144,19	58843,79
C 22	PC2	A6	48330,45	9495,03	57825,48	48739,92	9357,43	58097,35
C 23	PC2	A7	47348,44	9717,36	57065,81	47757,91	9575,63	57333,54
C 24	PC2	A8	46388,75	9934,65	56323,40	46798,22	9788,88	56587,09
C 25	PC2	A9	45241,96	10177,56	55419,52	45651,43	10027,24	55678,66
C 26	PC2	A10	44794,11	10495,52	55289,62	45203,57	10339,61	55543,18
C 27	PC2	A11	44335,84	10820,87	55156,71	44745,30	10659,25	55404,55
C 28	PC2	A12	44377,40	11038,29	55415,69	44929,53	10920,02	55849,56
C 29	PC2	A13	43866,10	11385,64	55251,74	44418,23	11262,82	55681,06
C 30	PC2	A14	43309,48	12131,10	55440,58	43861,61	11998,64	55860,25
C 31	PC2	A15	42739,92	12893,89	55633,80	43292,05	12751,57	56043,61
C 32	PC2	A16	42183,30	13639,34	55822,64	42735,43	13487,38	56222,81
C 33	PC3	A1	53437,63	9048,05	62485,68	53847,09	8919,85	62766,94
C 34	PC3	A2	52605,90	9102,26	61708,16	53015,36	8972,84	61988,20
C 35	PC3	A3	51754,83	9157,72	60912,55	52164,29	9027,07	61191,35
C 36	PC3	A4	50923,09	9211,93	60135,02	51332,56	9080,06	60412,62
C 37	PC3	A5	49835,74	9271,79	59107,53	50245,20	9138,53	59383,73
C 38	PC3	A6	48876,05	9489,08	58365,13	49285,51	9351,77	58637,28
C 39	PC3	A7	47894,04	9711,42	57605,46	48303,50	9569,97	57873,48
C 40	PC3	A8	46934,35	9928,70	56863,05	47343,81	9783,22	57127,03
C 41	PC3	A9	45787,56	10171,61	55959,17	46197,02	10021,58	56218,60
C 42	PC3	A10	45339,70	10489,57	55829,27	45749,17	10333,95	56083,12
C 43	PC3	A11	44881,43	10814,93	55696,36	45290,90	10653,59	55944,49
C 44	PC3	A12	44923,00	11032,53	55955,52	45475,13	10914,47	56389,60
C 45	PC3	A13	44411,70	11379,88	55791,57	44963,83	11257,27	56221,10
C 46	PC3	A14	43855,08	12125,33	55980,41	44407,21	11993,09	56400,29
C 47	PC3	A15	43285,51	12888,12	56173,63	43837,64	12746,01	56583,66
C 48	PC3	A16	42728,89	13633,58	56362,47	43281,02	13481,83	56762,85
C 49	PC4	A1	53841,66	9000,66	62842,32	54207,22	8906,17	63113,39
C 50	PC4	A2	53151,49	9074,92	62226,42	53560,96	8946,16	62507,12
C 51	PC4	A3	52300,42	9130,39	61430,81	52709,89	9000,38	61710,27
C 52	PC4	A4	51468,69	9184,59	60653,28	51878,15	9053,38	60931,53
C 53	PC4	A5	50381,33	9244,46	59625,79	50790,80	9111,85	59902,65
C 54	PC4	A6	49421,64	9461,74	58883,39	49831,11	9325,09	59156,20
C 55	PC4	A7	48439,63	9684,08	58123,72	48849,10	9543,29	58392,39
C 56	PC4	A8	47479,95	9901,37	57381,31	47889,41	9756,54	57645,95
C 57	PC4	A9	46333,15	10144,27	56477,43	46742,62	9994,90	56737,52
C 58	PC4	A10	45885,30	10462,24	56347,53	46294,76	10307,27	56602,03
C 59	PC4	A11	45427,03	10787,59	56214,62	45836,49	10626,91	56463,40
C 60	PC4	A12	45468,59	11005,60	56474,19	46020,72	10888,03	56908,75
C 61	PC4	A13	44957,29	11352,95	56310,25	45509,42	11230,83	56740,25
C 62	PC4	A14	44400,67	12098,41	56499,08	44952,80	11966,64	56919,45
C 63	PC4	A15	43831,11	12861,20	56692,31	44383,24	12719,57	57102,81
C 64	PC4	A16	43274,49	13606,65	56881,14	43826,62	13455,39	57282,01
C 65	PC5	A1	54387,26	8950,61	63337,87	54752,81	8856,90	63609,71

Continua...

Tabela 17. Continuação.

C 66	PC5	A2	53555,53	9004,66	62560,19	53921,08	8910,04	62831,12
C 67	PC5	A3	52846,02	9080,20	61926,22	53255,48	8951,24	62206,72
C 68	PC5	A4	52014,29	9134,41	61148,69	52423,75	9004,24	61427,99
C 69	PC5	A5	50926,93	9194,27	60121,20	51336,39	9062,71	60399,10
C 70	PC5	A6	49967,24	9411,56	59378,80	50376,70	9275,95	59652,65
C 71	PC5	A7	48985,23	9633,90	58619,13	49394,70	9494,15	58888,85
C 72	PC5	A8	48025,54	9851,18	57876,72	48435,01	9707,40	58142,40
C 73	PC5	A9	46878,75	10094,09	56972,84	47288,21	9945,76	57233,97
C 74	PC5	A10	46430,89	10412,05	56842,95	46840,36	10258,13	57098,49
C 75	PC5	A11	45972,62	10737,41	56710,03	46382,09	10577,77	56959,86
C 76	PC5	A12	46014,19	10956,07	56970,26	46566,32	10839,27	57405,59
C 77	PC5	A13	45502,89	11303,43	56806,31	46055,02	11182,07	57237,09
C 78	PC5	A14	44946,27	12048,88	56995,15	45498,40	11917,89	57416,29
C 79	PC5	A15	44376,70	12811,67	57188,37	44928,84	12670,81	57599,65
C 80	PC5	A16	43820,08	13557,12	57377,21	44372,22	13406,63	57778,84
C 81	PC6	A1	54932,85	8879,55	63812,40	55298,41	8786,89	64085,30
C 82	PC6	A2	54101,12	8933,60	63034,72	54466,68	8840,04	63306,71
C 83	PC6	A3	53250,05	8988,91	62238,96	53615,60	8894,42	62510,02
C 84	PC6	A4	52559,88	9063,17	61623,05	52969,35	8934,40	61903,75
C 85	PC6	A5	51472,52	9123,04	60595,56	51881,99	8992,87	60874,86
C 86	PC6	A6	50512,83	9340,32	59853,16	50922,30	9206,12	60128,42
C 87	PC6	A7	49530,83	9562,66	59093,49	49940,29	9424,32	59364,61
C 88	PC6	A8	48571,14	9779,95	58351,08	48980,60	9637,56	58618,16
C 89	PC6	A9	47424,34	10022,85	57447,20	47833,81	9875,92	57709,73
C 90	PC6	A10	46976,49	10340,81	57317,30	47385,95	10188,30	57574,25
C 91	PC6	A11	46518,22	10666,17	57184,39	46927,68	10507,94	57435,62
C 92	PC6	A12	46559,78	10885,72	57445,50	47111,91	10769,95	57881,87
C 93	PC6	A13	46048,48	11233,07	57281,56	46600,62	11112,75	57713,37
C 94	PC6	A14	45491,86	11978,53	57470,39	46044,00	11848,57	57892,56
C 95	PC6	A15	44922,30	12741,32	57663,62	45474,43	12601,49	58075,93
C 96	PC6	A16	44365,68	13486,77	57852,45	44917,81	13337,31	58255,12
C 97	PC7	A1	55478,45	8791,77	64270,22	55844,00	8700,38	64544,38
C 98	PC7	A2	54646,72	8845,82	63492,54	55012,27	8753,52	63765,80
C 99	PC7	A3	53795,64	8901,13	62696,77	54161,20	8807,90	62969,10
C 100	PC7	A4	52963,91	8955,18	61919,09	53329,47	8861,04	62190,51
C 101	PC7	A5	52018,12	9035,04	61053,16	52427,58	8906,57	61334,15
C 102	PC7	A6	51058,43	9252,33	60310,76	51467,89	9119,81	60587,71
C 103	PC7	A7	50076,42	9474,66	59551,09	50485,89	9338,01	59823,90
C 104	PC7	A8	49116,73	9691,95	58808,68	49526,20	9551,26	59077,45
C 105	PC7	A9	47969,94	9934,86	57904,80	48379,40	9789,62	58169,02
C 106	PC7	A10	47522,08	10252,82	57774,90	47931,55	10101,99	58033,54
C 107	PC7	A11	47063,81	10578,17	57641,99	47473,28	10421,63	57894,91
C 108	PC7	A12	47105,38	10798,79	57904,17	47657,51	10684,27	58341,78
C 109	PC7	A13	46594,08	11146,14	57740,22	47146,21	11027,06	58173,28
C 110	PC7	A14	46037,46	11891,59	57929,05	46589,59	11762,88	58352,47
C 111	PC7	A15	45467,89	12654,38	58122,28	46020,03	12515,81	58535,84
C 112	PC7	A16	44911,27	13399,84	58311,11	45463,41	13251,62	58715,03

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).

Ao se analisar o sistema para rotações de 3500 rpm, o pivô PC1 (diâmetro da linha lateral com 6 5/8") com a combinação A12 (comprimento da adutora com 25% de diâmetro com 8" polegadas e 75% de 7") e motor padrão, obteve-se a melhor relação custo benefício com motor padrão de potência de 75 cv, o que resulta em uma redução de 25% no consumo de energia para o sistema já implementado na Embrapa, com o custo total de R\$ 52.344,11, conforme Tabela 1B do Apêndice B.

Foi observado que para o sistema com vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ os valores da altura manométrica total são os mesmos, e que a potência mais adequada para o sistema é de 75 cv, demonstrando que o fator decisivo na escolha foi o custo total anualizado do sistema.

O dimensionamento para o pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ foi feito com motor padrão e de alto rendimento com rotação de 1750 rpm e com motor padrão e motor de alto rendimento com rotação de 3500 rpm, conforme Tabelas 2A e 3A do Apêndice A.

Para o sistema com vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, o pivô PC1 (diâmetro da linha lateral com 6 5/8") com a combinação A5 (comprimento da adutora com diâmetro com 10") e motor padrão de 3500 rpm (Tabela 3A do Apêndice A), foi o de melhor relação custo benefício (Tabela 3B do Apêndice B), resultando em um motor com potência de 100 cv. O que verifica uma redução de 25% no consumo de energia para o sistema com metodologia convencional de projeto, que foi de 125 cv.

Os resultados mostraram que o uso de rotações mais elevadas representam melhores rendimento do sistema, diminuindo assim o consumo de energia elétrica. O uso de rotações de 3500 rpm não é muito utilizado pelas empresas de irrigação, prevalecendo o de 1750 rpm que nesse caso não foi a melhor opção.

O uso de motores de alto rendimento em relação ao custo benefício, não foi melhor que o padrão, devido o alto valor de custo de investimento, conforme Albuquerque (1982). No entanto foi observado que o custo total do motor de alto rendimento ficou bem próximo do motor padrão.

4.2 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DA ADUTORA

Foi realizado um estudo comparativo do diâmetro encontrado pelo método do diâmetro econômico com outros métodos de dimensionamento como:

a) Método de Bresse, uma das primeiras fórmulas da hidráulica para o dimensionamento econômico de tubulações de recalque, e que ainda é atualmente usada. O critério de dimensionamento desenvolvido por Bresse tem um grau de incerteza elevado, já que o coeficiente K é função de diversos fatores (Azevedo Netto et al., 1998). Segundo Ávila (1974), o coeficiente K varia de 0,7 a 1,6 conforme uma velocidade média fixa da água na tubulação. A fórmula de Bresse é apresentada a seguir:

$$D = K\sqrt{Q} \quad [52]$$

Em que :

D = diâmetro, m;

Q = vazão, m^3s^{-1} ;

K = coeficiente de Bresse.

b) Método da velocidade máxima de escoamento, utiliza como critério básico para dimensionar uma adutora que a velocidade máxima de escoamento não deve ultrapassar 2 m s^{-1} , este limite é estabelecido para evitar: Sobre pressão elevada quando há interrupção do fluxo (golpe de Aríete); Vibrações na tubulação que reduzem a vida útil; Perda de pressão excessiva já que a mesma é diretamente proporcional à velocidade da água. Costuma-se também estabelecer um limite mínimo de velocidade para evitar a deposição de partículas que possam estar presentes na água, em geral, $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (Jardim, 1992, Bernardo et al., 2006).

c) Método dos 20% da pressão da linha lateral (PLL), utiliza o conceito que deve-se permitir no máximo uma variação de vazão de 10% entre os aspersores extremos na lateral. Assumindo que todos os aspersores são iguais (teoricamente todos apresentam a mesma área da secção transversal do bocal e o mesmo coeficiente de descarga), cuja vazão é função da pressão, para uma variação de vazão de 10%, a pressão pode variar de aproximadamente 20%. A variação de 10% da vazão assegura uma regularidade e uniformidade aceitável ao longo do comprimento da linha lateral, sem maiores efeitos na distribuição da água para a cultura. Para assegurar uma variação de 10% na vazão entre os aspersores extremos, ao longo de toda a tubulação, variação de pressão permitida é 21%. A variação de pressão é expressa em relação a pressão de serviço do aspersor. Hidraulicamente, variação de pressão em uma tubulação de condução de água é sinônimo

de perda de carga (hf), assim, a máxima perda de carga permitida na Linha Lateral de aspersores será de 20% da pressão de serviço, $hf_{Max} = 0,20$ Ps (Biscaro, 2009).

Na Tabela 18 mostra os valores dos diâmetros obtidos pelo método do diâmetro econômico proposto considerando os diâmetros ótimos com os demais métodos citados.

Tabela 18. Diâmetro obtido da adutora para diferentes métodos de dimensionamento.

Diferentes rotações e vazões	Diâmetro da adutora conforme método empregado			
	Dimensionamento econômico	Velocidade de escoamento (= $2,0 \text{ m s}^{-1}$)	20% da pressão no início do pivô (Pi)	Bresser
$Q=1725,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ Rotação 1750 rpm	Tubulação A11 50% com 7'' e 50% com 8''	100% com 7'' $V=1,98 \text{ m s}^{-1}$ $hf = 19 \text{ mca}$	100% com 10''	Para $k=1,1$ 100% com 10'' Para $k=0,9$ 100% com 8''
$Q=1725,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ Rotação 3500 rpm	Tubulação A12 75% com 7'' e 25% com 8''	100% com 7'' $V=1,98 \text{ m s}^{-1}$ $hf = 19 \text{ mca}$	100% com 10''	Para $k=1,1$ 100% com 10'' Para $k=0,9$ 100% com 8''
$Q=246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ Rotação 1750 rpm	Tubulação A9 100% com 8''	100% com 8'' $V=2,1 \text{ m s}^{-1}$ $hf = 19,2 \text{ mca}$	100% com 10''	Para $k=1,1$ 100% com 12'' Para $k=0,9$ 100% com 10''
$Q=246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ Rotação 3500 rpm	Tubulação A5 100% com 10''	100% com 8'' $V=2,1 \text{ m s}^{-1}$ $hf = 19,2 \text{ mca}$	100% com 10''	Para $k=1,1$ 100% com 12'' Para $k=0,9$ 100% com 10''

O método que mais se aproximou do diâmetro encontrado pelo método proposto foi da velocidade máxima de escoamento divergindo somente em um diâmetro, da tubulação A5 que tem 10''. Os demais divergiram e muito do valor proposto pelo método econômico tendo somente um diâmetro igual, da tubulação A5. Os resultados demonstram que há divergência nos resultados, e que nem sempre mesmo utilizando o método da velocidade máxima de escoamento, que foi o mais próximo do valor encontrado significa é a melhor opção.

4.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Para o estudo com uso do inversor frequência utilizou-se a configuração de menor custo total anualizado, ou seja, configuração motor padrão 3500 rpm com potência de 75 cv, adutora A12 (comprimento da adutora com 25% de diâmetro com 8'' e 75% de 7'') e pivô PC1 (diâmetro da linha lateral com 6 5/8'') para vazão $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Para a vazão

de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, motor padrão de 3500 rpm com potência de 100 cv, pivô PC1 (diâmetro da linha lateral de 6 5/8") com a combinação A5 (comprimento da adutora com diâmetro com 10").

Foram utilizados os seguintes dados para a análise: lâmina bruta diária utilizada de 7,0 mm, tempo de irrigação de 21 horas para vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e tempo de irrigação de 17 horas para vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, raio irrigado de 410 m, pressão dos aspersores de 15 m, tempo de funcionamento de 1200 h por ano, e tarifas de energia apresentados nos Anexos A e B.

Por meio dos cálculos foi possível analisar o retorno associado à taxa de juros, períodos de pagamento do capital (amortização), redução de potência e tempos de funcionamento, permitindo-se avaliar a viabilidade do inversor de frequência. Tomando-se como referência o uso do inversor de frequência para os resultados obtidos de maior eficiência no dimensionamento econômico obteve-se economia de energia elétrica, confirmando as conclusões segundo Medeiros (2005).

4.3.1 Variação da pressão ao longo de um giro do pivô central

A Figura 12 apresenta as variações da pressão na entrada da linha lateral e da altura manométrica em função do ângulo de giro do pivô central. Na referida figura pode-se observar que, tanto a pressão na entrada da linha lateral como a altura manométrica seguem as variações do nível do terreno, em que os maiores valores são observados para o ponto de maior cota, o qual exigirá maior potência do conjunto motobomba.

Cabe ressaltar que os valores foram obtidos por meio da simulação das pressões de início da linha lateral, necessárias para o fornecimento da lâmina de água do projeto à cultura, com a utilização do inversor de frequência. Segundo Oliveira Filho et al. (2003), a análise, na parte descendente do terreno, linha lateral situada abaixo da reta transversal à declividade média pertencente ao plano do pivô, ocorrem os mínimos requisitos de altura manométrica; este fato se atribui ao incremento de energia gravitacional advinda do desnível descendente do terreno.

A Figura 13 mostra as diferenças de pressão (ΔH) do sistema com o ângulo de giro do pivô central, em que, essas diferenças resultam na redução do consumo de energia elétrica total, observa na referida figura, que a maior diferença no consumo de energia elétrica é obtida quando a linha lateral do pivô central estiver no declive máximo em

relação a potência projetada do conjunto motobomba para atender o ponto de máxima altura manométrica.

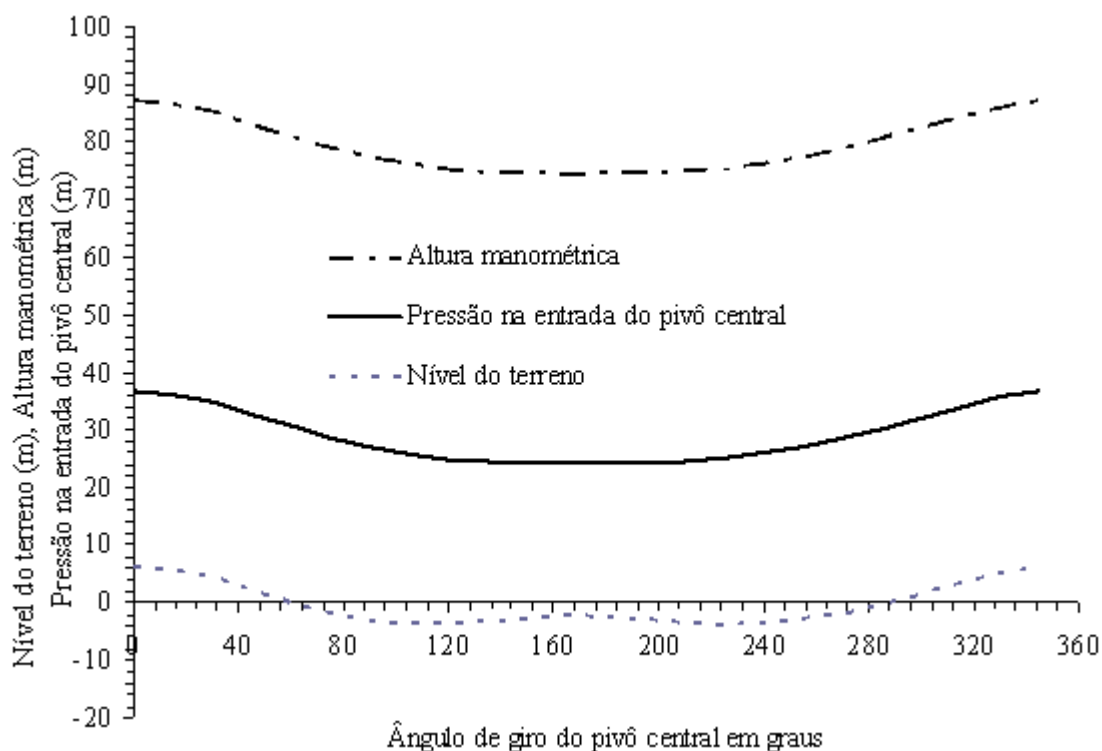


Figura 12. Variações do nível do terreno, pressão na base do pivô central e pressão na bomba em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

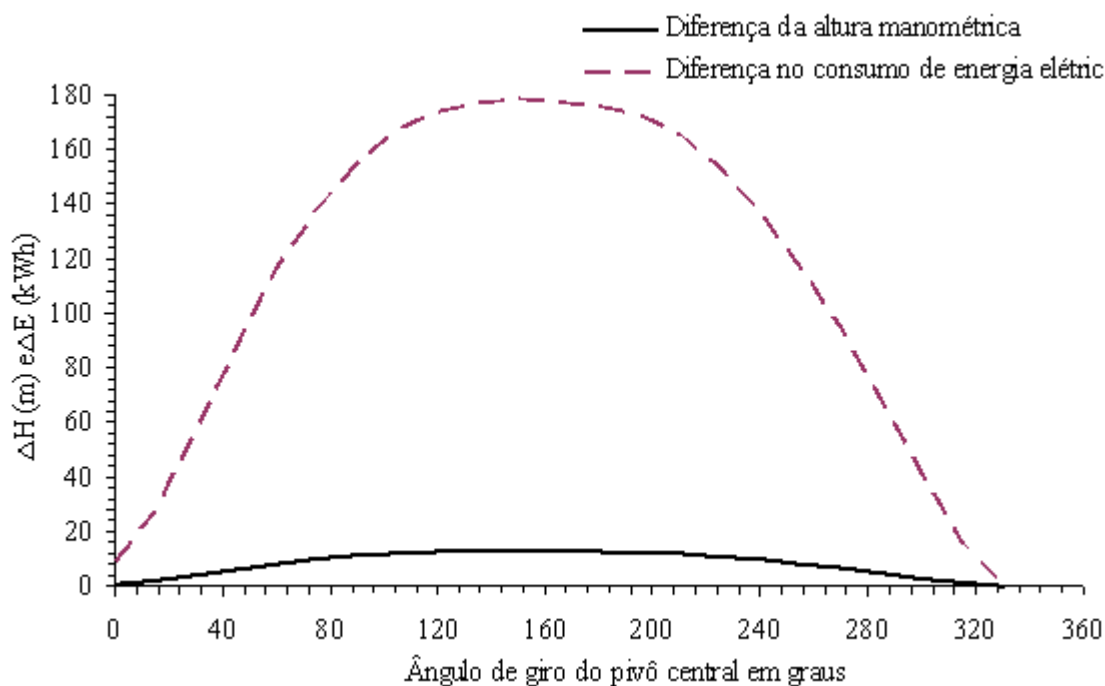


Figura 13. Diferença da altura manométrica (ΔH) e do consumo de energia elétrica (ΔE) em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

As Figuras 14 e 15 apresentam as variações da P_{in} , H e as diferenças ΔH e ΔE para a vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, em que observa-se o mesmo comportamento.

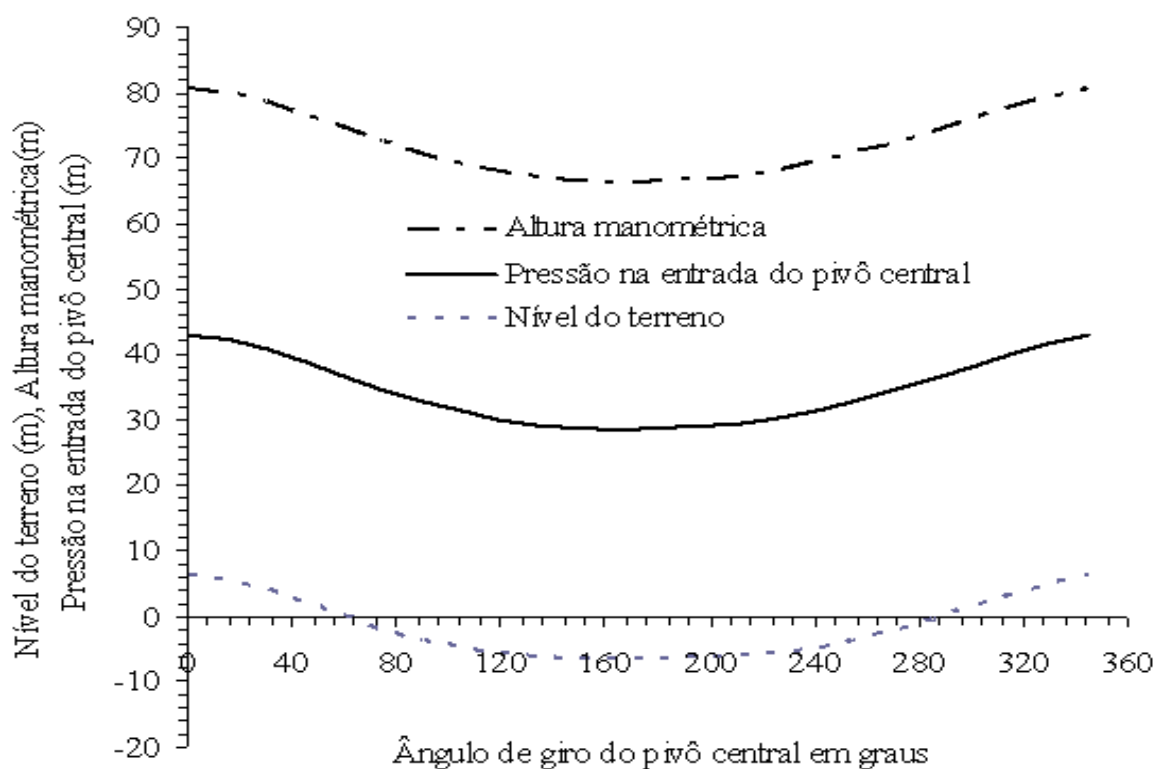


Figura 14. Variações do nível do terreno, pressão na base do pivô central, pressão na bomba em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

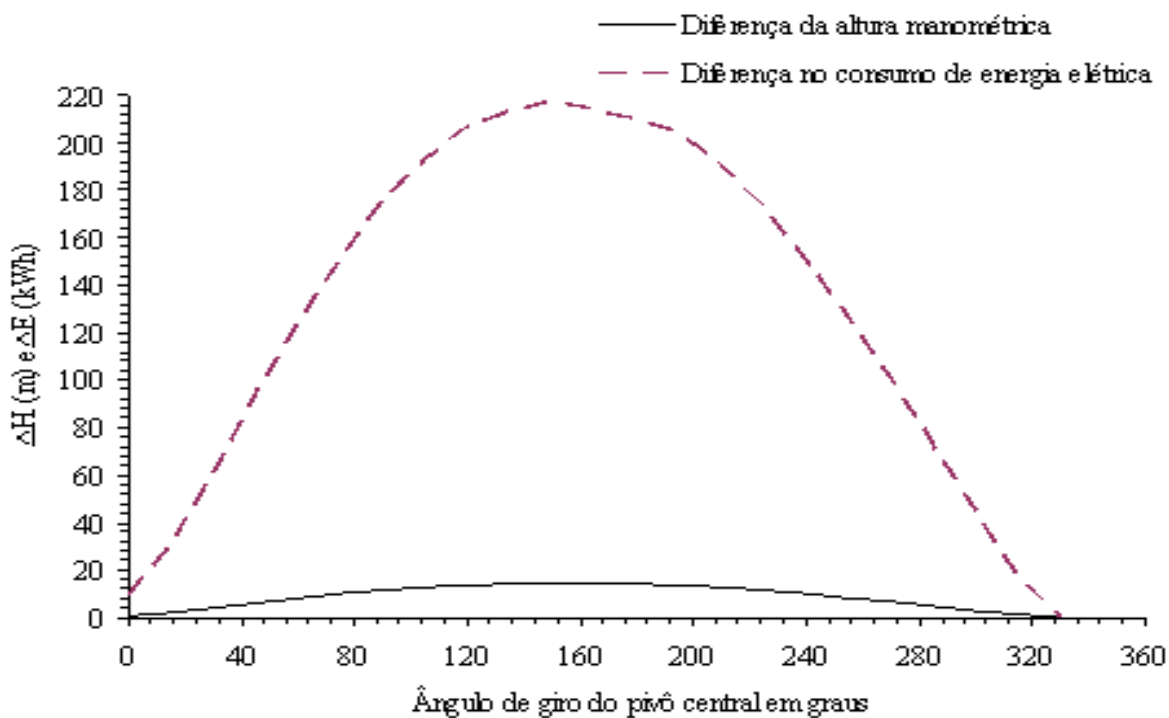


Figura 15. Diferença da altura manométrica (ΔH) e do consumo de energia elétrica (ΔE) em função do ângulo de giro do pivô central com vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

4.3.2 Retorno financeiro do investimento

Para a vazão de 172,5 m³h⁻¹ foi obtida uma economia de energia de 9,23 %, enquanto para a vazão de 246,6 m³h⁻¹ proporcionou uma economia de 10,6% (Tabelas 18 e 19).

A soma do percentual de economia com inversor de frequência e o percentual da análise de diâmetro econômico, resulta em uma economia global de 31,92% de energia elétrica para o sistema com vazão de 172,5 m³h⁻¹ e motor padrão de 3500 rpm com 75 cv de potência.

Para o sistema proposto com vazão de 246,6 m³h⁻¹ e motor padrão de 3500 rpm com 100 cv de potência a economia global em relação ao sistema projetado para atender a vazão de 246,6 m³h⁻¹ foi de 30,60% de energia elétrica.

4.3.3 Retorno financeiro do pivô central com vazão de 172,5 m³ h⁻¹

O retorno do investimento utilizando o método da taxa de retorno interno (TIR), para o sistema com inversor de frequência e vazão de 172,5 m³h⁻¹ com potência de 75 cv, é de longo prazo. Isto se deve a taxa de juros de 6,52% a.a (Tabela 19), ser menor que a taxa básica de juros adotada de 12,25% a.a, conforme ata do COPOM número 135^a para o mês de julho (COPOM, 2008).

Na Tabela 19 o potencial de economia no consumo de energia elétrica foi de 9,23% e os gastos com energia elétrica utilizando o inversor de frequência reduziram em 13,39%.

Tabela 19. Análise financeira para o sistema pivô central com vazão de 172,5 m³h⁻¹.

Tarifa Horosazonal Verde	
Dados de Consumo de Energia	
Tarifa (Demanda) em R\$/kWh	8,3
Tarifa (Consumo no Horário Reservado) em R\$/kWh	0,0237
Tarifa (Consumo no Horário Fora de Ponta) em R\$/kWh	0,11866
Taxa básica de juros ao ano (%)	6,52
Dados do Sistema	
Potência Reduzida kW	5,39
Rendimento do motor em %	92
Rendimento da bomba em %	76,3

Continua...

Tabela 19. Continuação.

Potência do motor em cv	75
Percentual de redução do consumo (%)	9,23
Duração do equipamento em anos	20
Tempo de funcionamento (h/ano)	1200
Gastos com Implementação e Manutenção	
Implementação do sistema em R\$	2000,00
Implementação do acionamento (Inversor de frequência) em R\$	11250,00
Manutenção e mão de obra em R\$	1000,00
Análise do retorno do investimento	
Fator de recuperação de capital	0,090900627
Custos fixos anualizados dos investimentos (R\$)	1295,33
Custos operacional anualizados (R\$)	1295,37
Valor presente líquido (R\$)	-0,04
Análise da redução dos custos com energia elétrica	
Potência consumida kW	58,37
Gastos de energia elétrica sem inversor (R\$)	9675,82
Gastos de energia elétrica com inversor (R\$)	8380,45
Redução do custo da energia elétrica (%)	13,39

4.3.4 Retorno financeiro do pivô central com vazão de 246,6 m³h⁻¹

O sistema com vazão de 246,6 m³h⁻¹ e potência de 100cv a taxa de retorno financeiro foi de 9,48% a.a, logo, o projeto terá retorno, mas em longo prazo (Tabela 20). Para a análise foi considerada a taxa básica de juro com 12,25% a.a conforme ata do COPOM número 135^a para o mês de julho (COPOM, 2008).

Na Tabela 20 a economia no consumo de energia elétrica foi de 10,6 % e os gastos com energia elétrica utilizando o inversor de frequência reduziram em 14,46%.

Tabela 20. Análise financeira para o sistema pivô central com vazão de 246,6 m³h⁻¹.

Tarifa Horosazonal Verde	
Dados de Consumo de Energia	
Tarifa (Demanda) em R\$/kWh	8,3
Tarifa (Consumo no Horário Reservado) em R\$/kWh	0,0237
Tarifa (Consumo no Horário Fora de Ponta) em R\$/kWh	0,11866
Taxa básica de juros ao ano (%)	9,48
Dado do Sistema	
Potência Reduzida kW	7,61
Rendimento do motor em %	93,14

Continua...

Tabela 20. Continuação.

Rendimento da bomba em %	81,2
Potência do motor em cv	100
Percentual de redução do consumo (%)	10,6
Duração do equipamento em anos	20
Tempo de funcionamento (h/ano)	1200
Gastos com Implementação e Manutenção	
Implementação do sistema em R\$	2000,00
Implementação do acionamento em (Inversor de frequência)R\$	15000,00
Manutenção e mão de obra em R\$	1000,00
Análise do Retorno do investimento	
Fator de recuperação de capital	0,113318461
Custos fixos anualizados dos investimentos (R\$)	2039,73
Custos operacional anualizados (R\$)	2039,14
Valor presente líquido (R\$)	0,59
Análise da redução dos custos com energia elétrica	
Potência consumida kW	71,82
Gastos de energia elétrica sem inversor (R\$)	14099,61
Gastos de energia elétrica com inversor (R\$)	12060,47
Redução do custo da energia elétrica (%)	14,46

4.4 ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E SISTEMAS DE PLANTIO DA CULTURA DO FEIJOEIRO

A Tabela 21 apresenta a frequência de ocorrência da umidade relativa, e foi escolhido o valor de 60% de umidade para representar a maioria das ocorrências no intervalo de 50% a 70%. Para a condição extrema, foi utilizado o valor de 25% de umidade. Este valor está no intervalo de 25 a 30% de umidade, sendo pequena sua ocorrência, com frequência percentual de 1,84 %.

Tabela 21. Distribuição de frequência da umidade relativa do ar obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.

Umidade (%)	Frequência	Frequência (%)	Valores Utilizadores
0-25	21	0,46	-
25-30	84	1,84	Valor mínimo 25%
30-35	160	3,50	-
35-40	254	5,56	-
40-45	371	8,11	-
45-50	426	9,32	-

Continua...

Tabela 21. Continuação.

50-55	532	11,64	-
55-60	558	12,20	Valor de 60 %
60-65	568	12,42	-
65-70	472	10,32	-
70-75	370	8,09	-
75-80	281	6,15	-
80-85	236	5,16	-
85-90	145	3,17	-
90-95	78	1,71	-
95-100	16	0,35	-

Na Tabela 22 o valor escolhido para a velocidade do vento no período foi de 1 m s^{-1} , que corresponde a maioria da ocorrência na faixa de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ a $1,5 \text{ m s}^{-1}$, e pode-se verificar que a frequência percentual foi de 65,65%. Para a condição extrema o valor escolhido para velocidade do vento foi de $2,2 \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 22. Distribuição de frequência da velocidade do vento obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.

Velocidade do vento (ms^{-1})	Frequência	Frequência (%)	Valores Utilizadores
0,0-0,5	792	17,22	-
0,5-1,0	1806	39,27	Valor de $1,0 \text{ m s}^{-1}$
1,0-1,5	1213	26,38	-
1,5-2,0	512	11,13	-
2,0-2,5	212	4,61	-
2,5-3,0	51	1,11	Valor máximo $2,2 \text{ m s}^{-1}$
3,0-3,5	12	0,26	-
3,5-4,0	1	0,02	-

Na Tabela 23 o valor para a condição extrema foi de 12 mm de evaporação do Tanque classe A, e valor de 6 mm para faixa entre 4 mm a 8 mm, tendo aproximadamente uma frequência percentual de 66,17 %.

Tabela 23. Distribuição de frequência da evaporação do Tanque Classe A obtida pela análise das séries históricas para a época de plantio do feijão irrigado em Goiás.

Evaporação Tanque classe A (mm)	Frequência	Frequência(%)	Valores Utilizadores
0,0-2,0	150	3,35	-
2,0-4,0	640	14,30	-
4,0-6,0	1693	37,82	Valor de 6,0 mm
6,0-8,0	1269	28,35	-
8,0-10,0	526	11,75	-
10,0-12,0	152	3,40	-

Continua...

Tabela 23. Continuação.

12,0-14,0	37	0,83	Valor máximo 12 mm
14,0-16,0	4	0,09	-
16,0-18,0	2	0,04	-
18,0-20,0	2	0,04	-
20,0-22,0	1	0,02	-

Nos cálculos da evapotranspiração de referência (ET_o) e da cultura (ET_c) foi considerado o período de maior demanda de água da cultura, do feijão de inverno, que segundo Silveira (1981), o período de floração é o de maior consumo de água da cultura. O valor da evapotranspiração da cultura é maior na floração (Tabelas 24 e 25) do que na fase de enchimento dos grãos do feijão, o que demanda mais água, sendo que para a situação extrema das variáveis climáticas os valores de ET_o e ET_c são muito maiores, exigindo uma quantidade de água maior.

Tabela 24. Cálculo da ET_o e ET_c para o período de 35 a 60 dias de idade do feijoeiro (floração).

Valores climáticos máximos									
ECA ¹	UR ²	Vv ³	Kt ⁴	ET _o ⁵	Kc ⁶		ET _c ⁷ (mm d ⁻¹)		
(mm d ⁻¹)	(%)	(m s ⁻¹)			PC ⁸	PD ⁹	PC ⁸	PD ⁹	
12,0	25	2,0	0,58	6,90	1,28	1,06	8,83	7,31	
Valores climáticos médios									
ECA ¹	UR ²	Vv ³	Kt ⁴	ET _o ⁵	Kc ⁶		ET _c ⁷ (mm d ⁻¹)		
(mm d ⁻¹)	(%)	(m s ⁻¹)			PC ⁸	PD ⁹	PC ⁸	PD ⁹	
6,0	60	1,0	0,73	4,37	1,28	1,06	5,59	4,63	

¹ ECA (evapotranspiração tanque classe A); ² UR (umidade relativa do ar); ³ Vv (velocidade do vento); ⁴ Kt (coeficiente do tanque classe A); ⁵ ET_o (evapotranspiração de referência); ⁶ Kc (coeficiente de cultura); ⁷ ET_c (evapotranspiração de referência da cultura); ⁸ PD (plantio convencional); ⁹ PD (plantio direto).

Tabela 25. Cálculo da ET_o e ET_c para o período de 60 a 80 dias de idade do feijoeiro (enchimento dos grãos).

Valores climáticos máximos									
ECA ¹	UR ²	Vv ³	Kt ⁴	ET _o ⁵	Kc ⁶		ET _c ⁷ (mm d ⁻¹)		
(mm d ⁻¹)	(%)	(m s ⁻¹)			PC ⁸	PD ⁹	PC ⁸	PD ⁹	
12,0	25	2,0	0,58	6,90	1,04	0,89	7,18	6,14	
Valores climáticos médios									
ECA ¹	UR ²	Vv ³	Kt ⁴	ET _o ⁵	Kc ⁶		ET _c ⁷ (mm d ⁻¹)		
(mm d ⁻¹)	(%)	(m s ⁻¹)			PC ⁸	PD ⁹	PC ⁸	PD ⁹	
6,0	60	1,0	0,73	4,37	1,04	0,89	4,54	3,89	

¹ ECA (evaporação tanque classe A); ² UR (umidade relativa do ar); ³ Vv (velocidade do vento); ⁴ Kt (coeficiente do tanque classe A); ⁵ ET_o (evapotranspiração de referência); ⁶ Kc (coeficiente de cultura); ⁷ ET_c (evapotranspiração da cultura); ⁸ PD (plantio convencional); ⁹ PD (plantio direto).

Os valores da evapotranspiração da cultura dependem diretamente da evapotranspiração de referência e do coeficiente de cultura (K_c). A E_{To} depende das condições climáticas a qual afeta a E_{Tc} , ou seja, a E_{Tc} depende dos dados climáticos; os valores de K_c depende do tipo de plantio se é direto ou convencional. Para condições climáticas extremas a E_{Tc} é maior tanto no período de floração quanto de enchimento dos grãos do feijão, sendo maior na floração com plantio convencional (Tabelas 24 e 25). Para valores de dados climáticos médios a E_{Tc} é maior na fase de floração em plantio convencional. Em plantio direto os valores da E_{Tc} são menores do que em plantio convencional, De acordo com Oliveira et al. (2000), o sistema plantio direto proporciona economia de água de irrigação, que corresponde a uma redução de 20% do total da água aplicada em relação ao plantio convencional.

Na Tabela 26 apresenta da eficiência de aplicação (E_a) para os valores fixos do coeficiente de uniformidade Christiansen (CUC) e do índice de pulverização, na qual verifica-se que os valores (E_a) são diretamente proporcional ao CUC.

Tabela 26. Eficiência da aplicação de água do sistema de irrigação pivô central.

Índice de pulverização do jato do aspersor (CI) ¹	Evapotranspiração de referência (mm d ⁻¹)	Velocidade do vento (km d ⁻¹)	CUC ²	Eficiência da aplicação potencial (E_{ap}) (%)	Eficiência da aplicação do sistema (E_a) (%)
Valores climáticos máximos					
7			0,80	84	67
7			0,85	84	71
7			0,90	84	75
7	6,90	172,80	0,95	84	80
17			0,80	31	24
17			0,85	31	26
17			0,90	31	28
17			0,95	31	29
Valores climáticos médios					
7			0,80	93	75
7			0,85	93	79
7			0,90	93	84
7	4,37	86,40	0,95	93	89
17			0,80	70	56
17			0,85	70	59
17			0,90	70	63
17			0,95	70	66

¹ CI (jato é considerado muito pulverizado para valores de CI maior que 17 e pouco pulverizado para valores de CI menor que 7); ² CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen).

A eficiência da aplicação de água do sistema também aumenta com a redução do índice de pulverização. Segundo Olitta (1984), a ação do vento afeta a distribuição de água pelo aspersor, causando distorção no raio de alcance, no tamanho das gotas na proporção de sua velocidade, obtendo assim um grau de pulverização mais ou menos acentuado, alterando a eficiência da aplicação do sistema de irrigação.

Foi observado na Tabela 26 que a eficiência da aplicação de água do sistema é maior quando se utiliza os valores climáticos médios, e diminui quando os valores climáticos são extremos.

4.4.1 Análise do consumo de energia elétrica para diferentes condições climáticas e sistemas de plantio

Para a análise do consumo de energia elétrica foi usado o valor de 5% para perda de água por escoamento superficial, altura manométrica de 87,23 m e rendimento do conjunto motobomba de 70,2%, considerando o sistema com linha lateral do pivô central PC1 (diâmetro da linha lateral com 6 5/8"), com a combinação A12 (comprimento da adutora com 25% de diâmetro com 8" polegadas e 75 % de 7"), e motor padrão com rotação 3500 rpm.

Nas Tabelas 27 e 28 verifica-se que o acréscimo da fração da área de déficit implica em um menor consumo de água e energia elétrica, principalmente para o índice de pulverização mais baixo.

O CUC influencia na taxa de reposição diária, sendo que quanto menor o CUC maior a taxa de reposição e maior a vazão do sistema, e conseqüentemente maior o consumo de energia elétrica.

Pode-se observar que o tipo de plantio também afeta o consumo de energia elétrica. Para o plantio direto, o consumo de energia elétrica é menor que em plantio convencional, devido ao menor consumo de água naquele tipo de plantio.

Os resultados apresentados na Tabela 27 são para valores médios climáticos, em que o consumo de energia é menor e quando comparados com os obtidos para as condições climáticas extremas (Tabela 28).

Tabela 27. Análise do consumo de energia elétrica para diferentes valores de fração da área de déficit, com valores climáticos médios.

Índice de pulverização do jato do aspersor (CI) ¹	CUC ²	Fração da área de déficit	Taxa de reposição (mm d ⁻¹)		Vazão (m ³ h ⁻¹)		Potência no eixo (cv)		Energia consumida por dia (kWh)	
			PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴
7	0,80	0,05	15,31	12,68	338,57	280,37	151,92	125,81	2408,27	1994,35
7	0,85		12,26	10,15	271,10	224,51	121,65	100,74	1928,39	1596,94
7	0,90		10,08	8,34	222,80	184,50	99,97	82,79	1584,78	1312,39
7	0,95		8,45	7,00	186,81	154,70	83,83	69,42	1328,83	1100,43
7	0,80	0,10	13,26	10,98	293,14	242,76	131,54	108,93	2085,16	1726,77
7	0,85		11,16	9,24	246,71	204,31	110,70	91,67	1754,87	1453,25
7	0,90		9,53	7,89	210,71	174,49	94,55	78,30	1498,81	1241,20
7	0,95		8,24	6,82	182,19	150,87	81,75	67,70	1295,93	1073,19
7	0,80	0,15	12,16	10,07	268,81	222,61	120,62	99,89	1912,08	1583,44
7	0,85		10,52	8,71	232,59	192,61	104,37	86,43	1654,44	1370,08
7	0,90		9,19	7,61	203,27	168,33	91,21	75,53	1445,89	1197,38
7	0,95		8,10	6,71	179,20	148,40	80,41	66,59	1274,64	1055,56
7	0,80	0,20	11,40	9,44	252,17	208,83	113,15	93,71	1793,74	1485,44
7	0,85		10,06	8,33	222,47	184,23	99,82	82,67	1582,46	1310,47
7	0,90		8,94	7,41	197,72	163,74	88,72	73,47	1406,42	1164,69
7	0,95		8,00	6,62	176,89	146,48	79,37	65,73	1258,22	1041,96
7	0,80	0,25	10,83	8,97	239,46	198,30	107,45	88,98	1703,31	1410,55
7	0,85		9,70	8,03	214,46	177,60	96,23	79,69	1525,51	1263,32
7	0,90		8,74	7,24	193,20	159,99	86,69	71,79	1374,24	1138,04
7	0,95		7,91	6,55	174,95	144,88	78,50	65,01	1244,46	1030,57
7	0,80	0,30	10,36	8,58	229,09	189,71	102,79	85,13	1629,53	1349,45
7	0,85		9,40	7,78	207,75	172,04	93,22	77,20	1477,76	1223,77
7	0,90		8,56	7,09	189,31	156,77	84,94	70,35	1346,57	1115,13
7	0,95		7,84	6,49	173,25	143,47	77,74	64,38	1232,35	1020,54
7	0,80	0,35	9,96	8,25	220,25	182,39	98,83	81,84	1566,65	1297,38
7	0,85		9,13	7,56	201,89	167,19	90,59	75,02	1436,11	1189,27
7	0,90		8,40	6,96	185,84	153,90	83,39	69,06	1321,91	1094,71
7	0,95		7,77	6,43	171,70	142,19	77,05	63,80	1221,35	1011,43
7	0,80	0,40	9,61	7,96	212,47	175,95	95,34	78,95	1511,31	1251,55
7	0,85		8,89	7,36	196,63	162,84	88,23	73,07	1398,69	1158,29
7	0,90		8,26	6,84	182,67	151,27	81,96	67,88	1299,33	1076,01
7	0,95		7,70	6,38	170,26	141,00	76,40	63,27	1211,08	1002,93
7	0,80	0,45	9,29	7,69	205,44	170,13	92,19	76,34	1461,36	1210,19
7	0,85		8,67	7,18	191,80	158,83	86,06	71,27	1364,31	1129,82
7	0,90		8,13	6,73	179,70	148,81	80,63	66,77	1278,20	1058,51
7	0,95		7,64	6,33	168,89	139,86	75,78	62,76	1201,32	994,84
7	0,80	0,50	9,00	7,45	198,97	164,78	89,28	73,94	1415,33	1172,07

Continua...

Tabela 27. Continuação.

7	0,85		8,47	7,01	187,27	155,08	84,03	69,59	1332,08	1103,12
7	0,90		8,00	6,62	176,87	146,47	79,36	65,72	1258,07	1041,84
7	0,95		7,58	6,28	167,56	138,76	75,19	62,26	1191,86	987,01
17	0,80	0,05	20,45	16,93	452,17	374,45	202,89	168,02	3216,33	2663,53
17	0,85		16,37	13,56	362,07	299,84	162,46	134,54	2575,43	2132,78
17	0,90		13,46	11,14	297,55	246,41	133,52	110,57	2116,53	1752,75
17	0,95		11,28	9,34	249,50	206,61	111,95	92,71	1774,70	1469,67
17	0,80	0,10	17,71	14,66	391,50	324,21	175,67	145,48	2784,81	2306,17
17	0,85		14,90	12,34	329,49	272,86	147,85	122,43	2343,70	1940,88
17	0,90		12,73	10,54	281,41	233,04	126,27	104,57	2001,71	1657,67
17	0,95		11,00	9,11	243,32	201,50	109,18	90,42	1730,77	1433,29
17	0,80	0,15	16,24	13,45	359,00	297,30	161,09	133,40	2553,66	2114,75
17	0,85		14,05	11,63	310,63	257,24	139,38	115,43	2209,56	1829,79
17	0,90		12,28	10,17	271,47	224,81	121,81	100,88	1931,04	1599,14
17	0,95		10,82	8,96	239,32	198,19	107,39	88,93	1702,34	1409,75
17	0,80	0,20	15,23	12,61	336,79	278,90	151,12	125,15	2395,61	1983,87
17	0,85		13,44	11,13	297,12	246,05	133,32	110,41	2113,43	1750,18
17	0,90		11,94	9,89	264,06	218,68	118,49	98,12	1878,33	1555,49
17	0,95		10,68	8,85	236,24	195,63	106,00	87,78	1680,40	1391,58
17	0,80	0,25	14,46	11,98	319,81	264,84	143,50	118,84	2274,83	1883,85
17	0,85		12,95	10,73	286,42	237,20	128,52	106,43	2037,38	1687,21
17	0,90		11,67	9,66	258,02	213,67	115,78	95,88	1835,35	1519,90
17	0,95		10,57	8,75	233,65	193,50	104,84	86,82	1662,02	1376,36
17	0,80	0,30	13,84	11,46	305,95	253,37	137,29	113,69	2176,30	1802,25
17	0,85		12,55	10,39	277,46	229,77	124,50	103,10	1973,61	1634,39
17	0,90		11,43	9,47	252,83	209,37	113,45	93,95	1798,40	1489,30
17	0,95		10,46	8,67	231,38	191,61	103,82	85,98	1645,86	1362,97
17	0,80	0,35	13,30	11,02	294,15	243,59	131,99	109,30	2092,31	1732,70
17	0,85		12,19	10,10	269,64	223,29	120,99	100,20	1917,97	1588,32
17	0,90		11,22	9,30	248,20	205,54	111,37	92,23	1765,46	1462,02
17	0,95		10,37	8,59	229,32	189,90	102,90	85,21	1631,16	1350,80
17	0,80	0,40	12,83	10,63	283,76	234,99	127,33	105,44	2018,41	1671,49
17	0,85		11,88	9,84	262,61	217,48	117,84	97,58	1868,01	1546,94
17	0,90		11,03	9,14	243,96	202,03	109,47	90,65	1735,30	1437,05
17	0,95		10,28	8,52	227,39	188,31	102,03	84,50	1617,45	1339,45
17	0,80	0,45	12,41	10,28	274,38	227,22	123,12	101,96	1951,70	1616,25
17	0,85		11,58	9,59	256,16	212,13	114,94	95,19	1822,08	1508,91
17	0,90		10,85	8,99	239,99	198,74	107,69	89,18	1707,09	1413,68
17	0,95		10,20	8,45	225,55	186,79	101,21	83,81	1604,40	1328,65
17	0,80	0,50	12,02	9,95	265,74	220,06	119,24	98,75	1890,23	1565,34
17	0,85		11,31	9,37	250,11	207,12	112,23	92,94	1779,04	1473,27

Continua...

Tabela 27. Continuação.

17	0,90	10,68	8,85	236,21	195,61	105,99	87,77	1680,20	1391,42
17	0,95	10,12	8,38	223,78	185,32	100,41	83,15	1591,77	1318,18

¹ CI (jato é considerado muito pulverizado para valores de CI maior que 17 e pouco pulverizado para valores de CI menor que 7); ² CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen); ³ PC (plantio convencional); ⁴ PD (Plantio direto).

Tabela 28. Análise do consumo de energia elétrica para diferentes valores de fração da área de déficit, com valores climáticos extremos.

Índice de pulverização do jato do aspersor (CI) ¹	CUC ²	Fração da área de déficit	Taxa de reposição (mm d ⁻¹)		Vazão (m ³ h ⁻¹)		Potência no eixo (cv)		Energia consumida por dia (kWh)	
			PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴	PC ³	PD ⁴
7	0,80	0,05	26,98	22,34	596,54	494,01	267,68	221,67	4243,54	3514,18
7	0,85		21,60	17,89	477,67	395,57	214,34	177,50	3397,76	2813,77
7	0,90		17,75	14,70	392,56	325,09	176,15	145,87	2792,33	2312,40
7	0,95		14,89	12,33	329,16	272,58	147,70	122,31	2341,35	1938,93
7	0,80	0,10	23,36	19,34	516,51	427,73	231,76	191,93	3674,00	3042,53
7	0,85		19,66	16,28	434,69	359,98	195,05	161,53	3092,04	2560,59
7	0,90		16,79	13,90	371,26	307,45	166,59	137,96	2640,86	2186,96
7	0,95		14,52	12,02	321,01	265,84	144,04	119,28	2283,40	1890,94
7	0,80	0,15	21,42	17,74	473,63	392,23	212,53	176,00	3369,03	2789,98
7	0,85		18,53	15,35	409,81	339,38	183,89	152,28	2915,07	2414,04
7	0,90		16,20	13,41	358,16	296,60	160,71	133,09	2547,61	2109,74
7	0,95		14,28	11,82	315,74	261,47	141,68	117,33	2245,89	1859,87
7	0,80	0,20	20,09	16,64	444,32	367,95	199,37	165,11	3160,53	2617,31
7	0,85		17,73	14,68	391,98	324,61	175,89	145,66	2788,24	2309,01
7	0,90		15,76	13,05	348,38	288,50	156,32	129,45	2478,08	2052,16
7	0,95		14,10	11,67	311,67	258,10	139,85	115,81	2216,94	1835,90
7	0,80	0,25	19,08	15,80	421,92	349,40	189,32	156,78	3001,18	2485,35
7	0,85		17,09	14,15	377,88	312,93	169,56	140,42	2687,91	2225,93
7	0,90		15,39	12,75	340,41	281,90	152,75	126,49	2421,38	2005,20
7	0,95		13,94	11,54	308,26	255,28	138,32	114,55	2192,70	1815,83
7	0,80	0,30	18,25	15,12	403,64	334,27	181,12	149,99	2871,18	2377,70
7	0,85		16,55	13,71	366,05	303,14	164,25	136,02	2603,77	2156,25
7	0,90		15,08	12,49	333,55	276,22	149,67	123,95	2372,62	1964,83
7	0,95		13,81	11,43	305,26	252,79	136,98	113,43	2171,37	1798,17
7	0,80	0,35	17,55	14,53	388,07	321,37	174,13	144,20	2760,38	2285,94
7	0,85		16,09	13,32	355,73	294,59	159,62	132,19	2530,38	2095,47
7	0,90		14,81	12,26	327,45	271,17	146,93	121,68	2329,17	1928,84
7	0,95		13,68	11,33	302,54	250,54	135,75	112,42	2151,98	1782,11
7	0,80	0,40	16,93	14,02	374,36	310,02	167,98	139,11	2662,88	2205,19
7	0,85		15,67	12,98	346,46	286,92	155,46	128,74	2464,46	2040,88

Continua...

Tabela 28. Continuação.

7	0,90		14,56	12,05	321,85	266,53	144,42	119,60	2289,38	1895,89
7	0,95		13,57	11,24	299,99	248,43	134,61	111,47	2133,90	1767,13
7	0,80	0,45	16,37	13,56	361,99	299,77	162,43	134,51	2574,88	2132,32
7	0,85		15,28	12,66	337,95	279,86	151,64	125,58	2403,87	1990,70
7	0,90		14,32	11,86	316,62	262,20	142,07	117,65	2252,16	1865,07
7	0,95		13,46	11,14	297,57	246,43	133,53	110,58	2116,69	1752,88
7	0,80	0,50	15,86	13,13	350,59	290,33	157,31	130,27	2493,77	2065,15
7	0,85		14,92	12,36	329,96	273,25	148,06	122,61	2347,08	1943,67
7	0,90		14,09	11,67	311,63	258,07	139,83	115,80	2216,69	1835,69
7	0,95		13,35	11,06	295,23	244,49	132,47	109,70	2100,02	1739,08
17	0,80	0,05	73,80	61,12	1631,94	1351,45	732,28	606,42	11608,26	9613,09
17	0,85		59,10	48,94	1306,75	1082,16	586,36	485,58	9295,14	7697,54
17	0,90		48,57	40,22	1073,91	889,33	481,88	399,06	7638,88	6325,95
17	0,95		40,72	33,72	900,47	745,70	404,05	334,61	6405,17	5304,28
17	0,80	0,10	63,90	52,92	1412,99	1170,13	634,03	525,06	10050,83	8323,34
17	0,85		53,78	44,54	1189,18	984,79	533,60	441,89	8458,79	7004,93
17	0,90		45,93	38,04	1015,65	841,09	455,74	377,41	7224,51	5982,79
17	0,95		39,72	32,89	878,18	727,24	394,05	326,32	6246,61	5172,98
17	0,80	0,15	58,60	48,53	1295,70	1073,01	581,40	481,47	9216,54	7632,45
17	0,85		50,70	41,99	1121,12	928,42	503,06	416,60	7974,66	6604,02
17	0,90		44,31	36,70	979,79	811,39	439,65	364,08	6969,43	5771,56
17	0,95		39,06	32,35	863,75	715,29	387,58	320,96	6144,00	5088,00
17	0,80	0,20	54,97	45,52	1215,52	1006,60	545,42	451,67	8646,15	7160,09
17	0,85		48,50	40,16	1072,34	888,03	481,17	398,47	7627,70	6316,69
17	0,90		43,10	35,69	953,05	789,25	427,65	354,15	6779,19	5614,02
17	0,95		38,56	31,93	852,62	706,08	382,58	316,83	6064,81	5022,42
17	0,80	0,25	52,20	43,23	1154,23	955,85	517,92	428,90	8210,23	6799,10
17	0,85		46,75	38,72	1033,75	856,08	463,86	384,13	7353,23	6089,40
17	0,90		42,12	34,88	931,24	771,19	417,86	346,04	6624,08	5485,57
17	0,95		38,14	31,58	843,30	698,35	378,40	313,36	5998,49	4967,50
17	0,80	0,30	49,94	41,36	1104,24	914,45	495,49	410,32	7854,60	6504,59
17	0,85		45,29	37,50	1001,39	829,28	449,34	372,11	7123,06	5898,78
17	0,90		41,27	34,17	912,49	755,66	409,45	339,07	6490,71	5375,12
17	0,95		48,01	39,76	1061,62	879,16	476,37	394,49	7551,49	6253,58
17	0,80	0,35	44,01	36,45	973,16	805,90	436,67	361,62	6922,27	5732,51
17	0,85		40,51	33,55	895,78	741,82	401,95	332,86	6371,83	5276,67
17	0,90		37,43	31,00	827,64	685,39	371,37	307,54	5887,10	4875,26
17	0,95		46,32	38,36	1024,12	848,10	459,54	380,56	7284,74	6032,68
17	0,80	0,40	42,86	35,50	947,81	784,91	425,30	352,20	6741,94	5583,17
17	0,85		39,82	32,98	880,48	729,15	395,08	327,18	6262,98	5186,53
17	0,90		37,12	30,74	820,68	679,63	368,25	304,96	5837,63	4834,29

Continua...

Tabela 28. Continuação.

17	0,95		44,79	37,09	990,28	820,07	444,35	367,98	7044,01	5833,32
17	0,80	0,45	41,81	34,62	924,51	765,61	414,84	343,54	6576,18	5445,90
17	0,85		39,17	32,44	866,16	717,29	388,66	321,86	6161,15	5102,20
17	0,90		36,82	30,49	814,06	674,15	365,28	302,50	5790,55	4795,30
17	0,95		43,37	35,92	959,09	794,24	430,36	356,39	6822,13	5649,58
17	0,80	0,50	40,82	33,81	902,67	747,52	405,04	335,42	6420,83	5317,25
17	0,85		38,56	31,93	852,52	705,99	382,54	316,79	6064,11	5021,84
17	0,90		36,53	30,25	807,65	668,84	362,40	300,12	5744,95	4757,54
17	0,95		73,80	61,12	1631,94	1351,45	732,28	606,42	11608,26	9613,09

¹ CI (jato é considerado muito pulverizado para valores de CI maior que 17 e pouco pulverizado para valores de CI menor que 7); ² CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen); ³ PC (plantio convencional); ⁴ PD (Plantio direto).

Nas Tabelas 27 e 28, observa-se que o aumento da fração da área de déficit gera uma diminuição do consumo de energia elétrica do sistema e, conseqüentemente, uma redução nos custos com energia elétrica. Segundo Frizzone et al. (1997) sob o foco econômico, podem-se aplicar menores lâminas de água em relação à irrigação plena com conseqüente redução da produtividade da cultura, com vantagens significativas: redução dos custos da irrigação e dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena, podendo aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas.

5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi a verificação do dimensionamento econômico dos variados tipos de diâmetro de tubulação e suas combinações, com preços de mercado, obtendo assim uma diversidade de opções para tubulação da adutora e linha lateral do pivô central. A análise o diâmetro ótimo ajudou na escolha do sistema de bombeamento, o que permitiu a otimização do sistema de irrigação pivô central, considerando rotações para a bomba de 1750 rpm e 3500 rpm e utilizando motores elétricos padrão e de alto rendimento.

Com o sistema base localizado na Embrapa Arroz e Feijão podem-se comparar os cálculos realizados, obtendo uma economia de energia elétrica de 25% considerando o uso do diâmetro econômico tanto para vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ quanto para vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Para o sistema com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a potência do motor elétrico que era de 100 cv caiu para 75 cv e o de vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de 125cv para 100 cv.

Para análise com uso inversor de frequência com motor de 75 cv e vazão de projeto de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, resulta em uma economia de 9,23%, e para análise com motor de 100cv e vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ resulta em uma economia de 10,6%.

Esses resultados somados aos anteriores da uma economia para o pivô central com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e motor com 75 cv de potência a economia global em relação ao instalado de 31,92 % de energia elétrica. Para o sistema proposto com vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e motor com 100 cv de potência uma economia global em relação ao projetado para atender a vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ foi de 30,6 % de energia elétrica.

A análise do retorno do investimento considerando o uso do sistema com inversor de frequência resulta em uma taxa de retorno do investimento de 6,52 % a.a, para o sistema com vazão de $172,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e potência de 75cv; para o sistema com vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e potência de 100cv a taxa de retorno financeiro foi de 9,48% a.a. O projeto tem retorno, mas de longo prazo ou seja inviável a curto prazo, considerando a taxa básica de juro com 12,25 % a.a.

Foi verificado que para rotações mais elevadas os rendimentos globais do sistema tiveram um aumento significativo, resultando em um sistema operando com

velocidades de 3500 rpm; foi observado que para rotações mais elevadas os custos totais ficaram mais baixos do que o sistema operando com rotações de 1750 rpm.

Na análise com uso dos motores padrão e de alto rendimento, os motores padrão obtiveram um custo total do sistema menor do que os de alto rendimento, mas esta diferença não foi muito significativa ficando os valores bem próximos. Esta diferença foi devido ao preço ainda dos motores de alto rendimento serem mais altos do que os motores padrão.

O consumo de energia elétrica aumenta quando os dados climáticos são extremos, ou seja, velocidade do vento e evaporação do tanque classe A elevadas com umidade relativa do ar baixa. Outro fator que afetou o consumo de energia foi o tipo de plantio, no plantio direto o consumo de energia elétrica é menor do que em plantio convencional.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Resolução homologatória Nº 704, de 9 de setembro de 2008a**. Brasília, 2008. 3 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/reh2009879.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, módulo 8 - qualidade da energia elétrica, de 16 de dezembro de 2008b**. Brasília, 2008. 53 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_0.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Resolução normativa Nº 207, de 9 de janeiro de 2006**. Brasília, 2006. 3 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006207.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Resolução Nº 540, de 1 de outubro de 2002**. Brasília, 2002. 2 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/res2002540.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Resolução Nº 456, de 29 de novembro de 2000a**. Brasília, 2000. 75 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Manual para elaboração do programa anual de combate ao desperdício de energia elétrica. junho/ 2000b**. Brasília, p. 38-45, 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20 dez. 2008.

ALBUQUERQUE, P. C. Motores de alto rendimento: vale a pena pagar mais? **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, v.10, n.103, p. 16-18, Mar. 1982.

ALVES FILHO, A. S. **Distribuição de água na superfície e no perfil do solo aplicada por um pivô central**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

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

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, L. F. C.; MELO, A. O. Verificação das relações de rateaux pelo emprego de um inversor de frequência, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 523-525, set. 2002.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements**. FAO: Irrigation and Drainage, Roma, n. 56, 1998. 300 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, ASAE, Standard engineering practices data: EP 458. **Field evaluation of microirrigation systems**. St. Joseph: ASAE, p. 792-797. 1996.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, ANA. Agricultura irrigada: estudo técnico preliminar, Brasília, 2004. 107 p.

ANDRADE, C. de L. T. de; BRITO, R. A. L. Métodos de irrigação e quimigação. In: CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHAES, P. C. (Ed.). **A cultura do milho**. 1. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. v. 1, cap. 15, p. 449-489.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FRIZZONE, J. A.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; RODRIGUES, B. H. N. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 2, p. 301-305, mai. 2001.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; RODRIGUES, B. H. N.; ATHAYDE SOBRINHO, C.; MELO, F. B.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Produtividade e qualidade de frutos de melancia em função de diferentes níveis de irrigação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 43-46, 1997.

ANDRADE, R. S.; MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; CARVALHO, J. A. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 35-38, jan. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 7094: Máquinas elétricas Girantes: Motores de Indução – Especificação**. Rio de Janeiro, Fev. 2003. 6 p.

ÁVILA, G. S. **Hidraulica General: fundamentos**. v. 1. México, Editorial Limusa S. A., 1974. 551 p.

AZEVEDO, B. M.; BASTOS, F. G. C.; VIANA, T. V. A.; REGO, J. L. Efeitos de níveis de irrigação na cultura da melancia. **Revista Ciência Agronômicas**, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 9-15, jan. 2005.

- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.
- BASTOS, E. A. Distribuição de frequência da evapotranspiração potencial de Teresina-PI através do modelo de Gumbel. **Revista Engenharia Agrícola**. Campinas, v.14, n.1, p. 99-104. 1994.
- BATISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte: UFMG, 2003. 440 p.
- BRAGA, A. L.; OLIVEIRA, J. C. Identificação e quantificação de áreas irrigadas por pivô central utilizando imagens CCD/CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005. Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, p. 849-856, 2005. 1 CD-ROM.
- BERNARDO S.; SOARES A. A.; MANTOVANI E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BISCARO, G.A. **Sistemas de irrigação por aspersão**. 1 ed. Dourados: UFGD, 2009. 134p.
- BONOMO, R. **Análise da cafeicultura irrigada em áreas de cerrado de Minas Gerais**. 1999. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- CAMPANA S.; OLIVEIRA FILHO, D.; SOARES A. A.; OLIVEIRA R. A. Adequação de força motriz em sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000. Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: NIPE UNICAMP, 2000. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200030&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 dez. 2009.
- CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**, Lavras: UFLA, 2008. 354 p.
- CENDES, F. **Proposta de automação de sistema de irrigação com pivô central baseado em microprocessadores**. 2004. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.
- CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**, 2 ed. New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1987. 521 p.
- CHRISTOFIDIS, D. Água um desafio para a sustentabilidade do setor agropecuário. In: Instituto FNP (Org.). **AGRIANUAL 2007**, 12 ed. São Paulo: FNP, 2007, v.1 p. 37-42.
- CHU, S. T.; MOE, D. L. Hydraulics of a center-pivot systems. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 5, p. 894-896, 1972.
- COLOMBO, A. Pivô Central. In: Jarbas Honório de Miranda; Regina Célia de Mattos Pires. (Org.). **Irrigação**. 1 ed. Piracicaba: Funep, 2003, v. 2, p. 209-258.

COMISSÃO DE POLÍTICAS MONETÁRIAS, COPOM. **Atas do COPOM 135ª Reunião, Banco Central do Brasil, de 3 de junho de 2008**. Brasília, 2008. 8 p. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?COPOM135>>, Acesso em: 20 dez. 2008.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE GOIÁS, CELG. **Boletim de Tarifa Convencional N° 01/2008, de 12 de setembro de 2007**. Goiânia, 2008. 1 p. Disponível em: <<http://celgd.celg.com.br/paginas/servicos/tarifaConvencional.aspx>>. Acesso em: 15 nov. 2008.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE GOIÁS, CELG. **Boletim de Tarifa Hora Sazonal - N° 01/2008, de 12 de setembro de 2007**. Goiânia, 2008. 1 p. Disponível em: <<http://celgd.celg.com.br/paginas/servicos/tarifaHoraSazonal.aspx>>. Acesso em: 15 nov. 2008.

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

DORF, R. C. **The electrical engineering handbook**. 1 ed. Boca Raton: The Institute of the Electrical and Electronic Engineering, 1993, 2661 p.

ESPINDULA NETO, D. ; MANTOVANI, E. C.; OLIVEIRA FILHO, D.; SILVEIRA, S. F. R. ; RAMOS, M. M. Uso Racional de Energia Elétrica na Cafeicultura Irrigada por Pivô Central . In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada, 6., 2003. Araguari, MG. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2003, 2003. p. 170-174.

FERERES, E. Papel de la fisiología vegetal en la microirrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado. Ponencia em: Seminário Latinoamericano de Microirrigación, 4., 1981. Barquisimeto, Venezuela. **Anais...** San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 1981. p.1-23.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JÚNIOR. C.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas - conversão eletromecânica da energia - processos, dispositivos e sistemas**. 1 ed. São Paulo: McGraw Hill, 1997, 554 p.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia agrícola**. Piracicaba, v. 55, n.1, p. 119-127, 1998.

FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba: ESALQ/USP, Deptº de Engenharia Rural, 1992. 53 p. (Série didática, 3)

FRIZZONE, J. A.; COELHO, R. D.; DOURADO NETO, D.; SOLIANI, R. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: na application to the Senador Nilo Coelho Project. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.54, n. 1, p. 36-148, 1997.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 20 nov. 2008.

HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical design of sprinkler systems. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 8, p. 83-89, 1965.

JARDIM, S. B. **Sistemas de Bombeamento**. 1 ed. Porto Alegre: Sagra-dc Luzzatto, 1992. 164 p.

JORDAN, E. H.; **Energy efficient electric motors and their applications**, 1 ed. New York And London: Plenum Press, 1994, 188 p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KELLER, J. **Sprinkle and trickle irrigation**. Logan: Utah State University, 1984. 621 p.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F. Pressure distribution on a center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 13 n. 5, p. 556-558. 1970.

KSB, Bombas Hidráulicas S.A. Linhas de bombas KSB: Manuais técnicos, **Catálogo eletrônico**. Vársea Paulista: KSB, 2003. Versão 1.1, 1 CD-ROM.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O Uso da Irrigação no Brasil. In: FREITAS M A V (Ed.). **Estado das Águas no Brasil**. Brasília: Ministério das Minas e Energias (MME), 1999, p. 73-82

LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE J. A.; COST, R. N. T.; SOUZA, F.; PEREIRA, A. S.; MACHADO, C. C.; VALNIR JÚNIOR, M. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p. 201-209. Mai. 2003.

MAGALHÃES, C. M. S.; TOSTES, M. E. L.; SILVA, R. D. S.; BEZERRA, U. H. Análise harmônica dos impactos de conversores de frequência em uma indústria de petróleo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), 3., 2010. Belém. **Anais...** Belém: UFPA, 2010. 1 CD-ROM.

MANTOVANI, E. V.; RAMOS, M. M. Manejo da irrigação. In: COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. (Ed.). **Quimigação**. Brasília: Embrapa, p. 129-58, 1994

MANTOVANI, E. C. ; TEIXEIRA, M. B. ; REIS, C. G. ; VICENTE, M. R. Análise do Consumo de Água Para as Regiões do Triângulo Mineiro e Oeste da Bahia Utilizando o Programa Computacional Irriga. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada, 6., Araguari. **Anais...** Uberlândia : UFU, 2003. p.185-191. 1 CD-ROM.

MARCUZZO, F. F. N. **Sistemas de otimização hidráulica e econômica de rede de irrigação localizada usando algoritmos genéticos**. 2008, 361 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

MARIOTONI, C. A.; DORES; L. A. C. B. Avaliação do consumo de energia elétrica na irrigação: auto-propelido versus pivô central móvel no município de Mogi Guaçu SP. In:

Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 4., 2004, Itajubá. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético(SBPE), 2004. Impresso.

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).

MEDEIROS, A. M. M. **Potencial de economia de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central com uso de inversor de frequência no estado de Goiás**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.

MEDEIROS, P. C.; GOMES, H. P. Metodologia de otimização integrada para o dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 331-335. set. 1999.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; RAMOS, M. M.; MANTOVANI, E. C.; SOUZA, J. A. A. Avaliação da eficiência do uso da energia elétrica no perímetro irrigado de Pirapora, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 394-398. mai. 2003.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F. Sistema radicular do feijoeiro afetado pelo preparo do solo e pela lâmina de irrigação. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25., 1995, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 1746-1748. 1995.

MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. da; SILVEIRA, P. M. Irrigação do feijoeiro no sistema plantio direto. **Circular Técnica 33**, Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 31 p, 1999.

NASCIMENTO, J. L.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Demanda total de água do feijoeiro nos sistemas de plantio convencional e direto. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 159-161. mai. 2001.

OLITTA, A. F. L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1984. 267 p.

OLIVEIRA, L. F. C.; NASCIMENTO, J. L.; STONE, L. F. Demanda total de água do feijoeiro nos sistemas de plantio convencional e direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...** Jaboticaba: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), 2000. 1 CD-ROM.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 2 ed. São Carlos: EESC USP, 1999. 519 p.

PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO, PRONI. **Tempo de irrigar: manual do irrigante**. São Paulo: Mater (Fundação Victor Civita), 1987. 160 p.

QUEIROZ T. M.; BORTREL T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p. 44-54. Jan. 2008.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999. 828 p.

RASSINI J. B.; FERREIRA R. P.; MOREIRA A.; TUPY O.; MENDONÇA F. C.; BERNARDI A. C. C. **Cultivo da Alfafa**. 2. ed. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste. Versão Eletrônica, nov. 2007. 37 p. Disponível em: <http://sistema.sdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Alfafa/SistemaProducaoAlfafa_2ed/index.htm>. Acesso em: 24 mar. 2008

RIBEIRO, M. C. **Estudo sobre a racionalização do uso de energia na irrigação**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

RIZZO, H. F.; GLD - O retorno do investimento em inversores de frequência para ventiladores e bombas, **Eletricidade Moderna**, São Paulo, v.20, n. 211, p. 54-60, 1991.

SOUZA, L. O. C. **Avaliação de sistema de irrigação por gotejamento utilizado na cafeicultura irrigada**. 2000. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

SANTANA, M. J. **Resposta do feijoeiro a diferentes níveis de reposição e épocas de suspensão da irrigação**. 2007. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2007.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T. **Cultivo do cafeeiro irrigado em plantio circular sob pivô central**, Belo Horizonte: Editora O Lutador, 2002. 251 p.

SCALLOPI, E. J. Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário – EPAMIG**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 54-63. 1986.

SCALLOPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of center pivot laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)**, v. 19, n. 3, p. 554-567, 1993.

SILVEIRA, P. M.; FONSECA, J. R.; GUIMARÃES, C. M. **Consumo de água pelo feijão de 3ª época irrigado por aspersão**. Goiânia: Embrapa-CNPAF, 1981. 5 p. (Embrapa-CNPAF. Comunicado Técnico, 9)

SOUZA, J. L. M. **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. 2001. 253 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2001.

STEINMETZ, S. Evapotranspiração máxima no cultivo do feijão de inverno. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 3, 1983, Campinas. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 273-28, 1983.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841. 2000.

TEIXEIRA, A. S. Estudo do efeito de diferentes tipos de emissores na performance de um sistema de irrigação por aspersão pivô-central. 1992. 68 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1992.

VILELA L. A. A. Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central. 2002. 127 f. Tese (Doutorado em irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

WEG, **Economia de energia em motores elétricos.** Jaraguá do Sul: WEG, v.1, 1998. 24 p.

WEG, **Motores Elétricos, Linhas de Produtos, Características, Especificações Instalações, Manutenções.** Jaraguá do Sul:WEG, 2005. 157 p.

WEG, **CFW-09 Inversores de frequência.** Jaraguá do Sul: WEG, 2008. 24 p.

ANEXOS

Anexo A. Dados técnicos do pivô.	110
Anexo B. Tarifa convencional.	113
Anexo C. Tarifa horo-sazonal.	114

Anexo A. Dados técnicos do pivô.

FICHA TECNICA DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO TIPO “PIVO CENTRAL”

NOME : EMBRAPA-CNPAF

NETSI : HO52/95

Data: 27 março 1996

PC No. : 1

I. INFORMAÇÕES GERAIS :

- ÁREA A SER IRRIGADA	53,1 ha
- LÂMINA BRUTA	7,8 m
- TURNO DIARIO DE REGA	24,0 h
- VAZÃO DO PROJETO	172,5 m ³ h ⁻¹
- TEMPO DE GIRO A 100%	17,3 h
- POT. MOTOR ÚLTIMA TORRE	1 cv
- VELOCIDADE DA ÚLT. TORRE	140,0 m h ⁻¹

II. DADOS DO PIVÔ :

MODELO: N65A 10LM B3E

SENDO TOTAL DE 10 TORRES, COM:

10 - Lances médios de 38,6m:	386,0 m
** RAI0 DA ULTIMA TORRE	386,0 m
- Lance Balanço de	24,0 m
** Comprimento da tubulação	410 m
- Alcance do ultimo spray	1 m
** Raio Irrigado.....	411 m
- Vão livre sob estrutura	2,7 m

III. MODELO E TIPO DE ASPERSOR :

- ASPERSOR FIXO DE BAIXA PRESSÃO COM PE4NDURAI5.	
- Pressão de serviço	15 mca

IV. CALCULO DA PRESSÃO NO PONTO DO PIVÔ

- Pressão do último aspersor:	15,0 mca
- Perdas na V. R. P.:	5,0 mca
- Altura do aspersor:	4,0 mca
- Perdas na Tubulação Aérea:	9,6 mca
- Desnível PP-PA:	2,0 mca

** PRESSÃO NA TORRE CENTRAL: 35,6 mca

V. CARACTERISTICAS DA ADUTORA 1^o. TRECHO

?	Material:	aço zn
?	Classe de pressão:	C20
?	Diâmetro nominal:	159 mm
?	Coefficiente de atrito:	135
?	Comprimento:	1038 m
?	Hf no trecho:	37,5 m
?	Velocidade:	2,4 m s ⁻¹

VI. CALCULO DA ALTURA MANOMETRICA TOTAL

- PRESÃO NO PONTO DO PIVÔ:	35,6 mca
- DESNÍVEL DO CENTRO A MOTOBOMBA:	26,0 mca
- PERDAS DE CARGA NA ADUTORA:	37,4 mca
- PRESSÃO NA ENTRADA DA ADUTORA:	99,2 mca
- Altura de sucção:	3,0 mca
- Perdas Localizadas:	4,0 mca
- ALTURA MANOMETRICA TOTAL:	106,1 mca

VII. ESTUDO DE GOLPE DE ARIETE.

- DADOS:	Coefficiente K= 0,5 celeridade 984m
- sobre pressão negativa:	106 mca
- sobre pressão positiva:	243 mca
- sobre pressão acumulada:	349 mca

VIII. SELEÇÃO DO CONJUNTO MOTOBOMBA.

8.1. BOMBA

- MODELO:	TK 150-50 (KSB WKL 100/4)
- O ROTOR:	265 mm
- VAZÃO:	172 m ³ h ⁻¹
- H. MAN.:	106 mca
- Eficiência:	70 %
- P. eixo:	96,7 cv
- NPSH:	3,0 mca

8.2 M0TOR

- Classe:	IP 54 B
- Potência:	100 cv
- Rotação:	1750 rpm
- Consumo:	71 kWh
- Tensão:	380 V

8.3 Conjunto de sucção (velocidade: 0,98 m s⁻¹)

- Tipo: sucção
- Diâmetro: 250 mm
- Material: aço zn
- Engate: flange
- GTDD. Discriminação
 - 1 redução excêntrica
 - 1 curva de 90 graus
 - 2 tubos com 2,0 m
 - 1 Válvula de pé com crivo

8.4 Conjunto de saída:

- diâmetro: 159 mm
- Material: aço Zn
- Engate: flange
- GTDD. Discriminação
 - 1 redução concêntrica
 - 1 válvula de retenção com bay pass
 - 1 registro gaveta
 - 1 curva de 90 graus com bujão
 - 1 curva dupla
 - 1 tubo com 1,0 m

IX. Tabela de precipitação

Dados do projeto:

- Área irrigada: 53,1 ha
- Vazão: 172,5 m³ h⁻¹
- Lâmina bruta: 7,8 mm
- Turno de rega: 24,0 horas
- Velocidade ultima torre: 140,0 m h⁻¹

Velocidade percentual (%)	Tempo de giro (horas)	Lâmina bruta (mm)
40	43,3	14,1 mm
50	34,6	11,3 mm
60	28,9	9,4 mm
70	24,7	8,0 mm
80	21,7	7,0 mm
90	19,2	6,3 mm
100	17,3	5,6 mm

Anexo B. Tarifa convencional.

BOLETIM DE TARIFA CONVENCIONAL Nº 02/2008
CELG DISTRIBUIÇÃO-CELG D
DC-SUPERINTENDÊNCIA DE COMERCIALIZAÇÃO
DC-DEPARTAMENTO DE GESTÃO COMERCIAL

SUBGRUPO	DEMANDA (R\$/kW)	CONSUMO (R\$/kWh)	
A3a (30 kV a 44 kV)	24,94	0,12158	
A4 (2,3 kV a 25 kV)	25,90	0,12625	
AS (Subterrâneo) NÃO CONSTA DA RES ANEEL 704/2008			
A3a (30 kV a 44 kV)	Rural e Residencial	24,94	
A4 (2,3 kV a 25 kV)	Rural e Residencial	25,90	
AS (Subterrâneo) NÃO CONSTA DA RES ANEEL 704/2008	Rural e Residencial	0,12158	
		0,12625	
B1-RESIDENCIAL NORMAL		0,29353	
B1-RESIDENCIAL BAIXA RENDA			
Consumo mensal até 30 kWh	Diferença de 65% do normal	0,10234	
Consumo mensal de 31 até 100 kWh	Diferença de 40% do normal	0,17545	
Consumo mensal de 101 até 220 kWh	Diferença de 10,00% do normal	0,17614	
Consumo mensal superior ao limite regional 220 kWh	Diferença de 0% do normal	0,26416	
B2-RURAL		0,18343	
B2-COOPERATIVA ELETRIFICAÇÃO RURAL		0,13346	
B2-SERVIÇO DE IRRIGAÇÃO		0,16865	
B3-DEMAIS CLASSES - (INDUSTRIAL - COMERCIAL - SERVIÇOS - PODER PÚBLICO - SERVIÇO PÚBLICO - CONSUMO PRÓPRIO).		0,29266	
B4-ILUMINAÇÃO PÚBLICA			
B4a - Rede de Distribuição		0,15077	
B4b - Bulbo da Lâmpada		0,16546	
TAXAS MÍNIMAS –GRUPO “B” (valores sem os tributos-ICMS,PIS/CONFINS)			
CLASSES	MONOFÁSICO 30 kWh	BIFÁSICO 50 kWh	TRIFÁSICO 100 kWh
RESIDENCIAL	8,81	14,68	29,35
RESIDENCIAL BAIXA RENDA	3,07	-	-
RURAL COM INSCRIÇÃO ESTADUAL	5,50	9,17	18,34
DEMAIS CLASSES	8,78	14,63	29,27
TAXAS DE SERVIÇOS:	GRUPO “B”		
	MONOFÁSICO	BIFÁSICO	TRIFÁSICO
VISTORIA	3,85	5,51	11,02
CUSTO RELIGAÇÃO NORMAL	4,40	6,06	18,20
AFERIÇÃO DE MEDIDOR	4,96	8,27	11,02
EMIÇÃO DE 2a. VIA DA FATURA	1,64	1,64	1,64
CUSTO RELIGAÇÃO A REVELIA (SEM FRAUDE) **	44,14	66,22	110,38
VERIFICAÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO	4,96	8,27	9,93
CUSTO RELIGAÇÃO DE URGÊNCIA	22,07	33,11	55,19
			GRUPO “A”
			33,11
			55,19
			55,19
			3,30
			220,76
			55,19
			110,38
* Autorizado pela Resolução ANEEL Nº 383 de 10/09/01			
** Conforme Art. 92 da Resolução ANEEL Nº 456 de 29/11/00.			
ICMS - Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços - Lei nº 10.720/88 / Lei nº 11.651/91 - Código Tributário Estadual - Lei nº 15.051/04			
- Classe Rural com Inscrição Estadual - Alíquota de 12% - Aplicação: Tarifa/1 -(ICMS+PIS+COFINS) x Consumo e/ou Demanda			
- Classe Residencial monofásico com consumo entre 51 e 80 kWh - Alíquota de 25% - Aplicação : Tarifa/1-(ICMS+PIS+COFINS) x Consumo			
- Demais CLASSES - Alíquota de 29%. Aplicação: Consumo e/ou Demanda x Tarifa/1 -(ICMS+PIS+COFINS)			
- Consumidor residencial com consumo até 50 kWh é isento de ICMS.			
- Consumidor rural com Inscrição Estadual : até 50 kWh é isento de ICMS			
RESOLUÇÕES:			
2 - Tarifa Fiscal : DNAEE 02/96 de 04/01/96. Data da aplicação: 05/01/96. VALOR DA TARIFA R\$ 64,48			
3 - Condições Gerais de Fornecimento: ANEEL 456 de 29/11/00. Data da aplicação: 30/11/00.			
DESCONTOS:			
1 -Serviços Públicos de: Água, Esgoto e Saneamento aplicar desconto de 15% sobre consumo e/ou demanda			
2- Rural Grupo A, desconto de 10% sobre consumo e demanda.			
3 - Irrigantes (conforme Resolução 207/06 ANEEL) : Grupo "A" 80%			
Grupo "B" 67%			
OBSERVAÇÃO: 1 - O índice médio do reajuste da tarifa é de 0,00 para Grupo "B" e 0,00 para o Grupo "A".			
2 - PIS/PASEP e COFINS - Aplicável nos moldes do ICMS, base de cálculo venda energia.			
Fonte: CELG (2008)			

Anexo C. Tarifa horo-sazonal.

BOLETIM DE TARIFA HORO-SAZONAL Nº 02/2008
CELG DISTRIBUIÇÃO-CELG D
DC-SUPERINTENDÊNCIA DE CORMERCIALIZAÇÃO
DC-DEPARTAMENTO DE GESTÃO COMERCIAL

TARIFA HORO-SAZONAL AZUL						
Segmento Horário Subgrupo	DEMANDA (R\$/kW)		CONSUMO (R\$/kWh)			
	Ponta	Fora de Ponta	Ponta		F. de Ponta	
			Seca	Úmida	Seca	Úmida
A1 (230kV ou mais)	4,23	0,00	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A2 (88kV a 138 kV)	15,19	2,35	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A3 (69kV)	23,69	5,09	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A3a (30 a 44kV)	29,23	8,02	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A4 (2,3 a 25kV)	30,16	8,30	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
AS (Subterrâneo)	NÃO CONSTA DA RES ANEEL 704/2008					
Rural e Residencial						
A3 (69kV)	23,69	5,09	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A3a (30 a 44kV)	29,23	8,02	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848
A4 (2,3 a 25kV)	30,16	8,30	0,18771	0,17018	0,11866	0,10848

TARIFA HORO-SAZONAL VERDE						
Segmento Horário Subgrupo	DEMANDA (R\$/kW)	CONSUMO (R\$/kWh)				
		Ponta		Fora de Ponta		
		Seca	Úmida	Seca	Úmida	
A3a (30 a 44kV)	8,02	0,68622	0,66869	0,11866	0,10848	
A4 (2,3 a 25kV)	8,30	0,67303	0,65550	0,11866	0,10848	
AS (Subterrâneo)	NÃO CONSTA DA RES ANEEL 704/2008					
Rural e Residencial						
A3a (30 a 44kV)	8,02	0,68622	0,66869	0,11866	0,10848	
A4 (2,3 a 25kV)	8,30	0,67303	0,65550	0,11866	0,10848	

TARIFA DE ULTRAPASSAGEM HORO-SAZONAL AZUL			TARIFA DE ULTRAPASSAGEM HORO-SAZONAL VERDE		
Segmento Horário Subgrupo	Demanda (R\$/kW)		Subgrupo	Demanda (R\$/kW)	
	Ponta	F. de Ponta		Período Seco ou Úmido	
				Seca ou Úmida	Seca ou Úmida
A1 (230kV ou mais)	12,69	0,00	A3a (30 a 44kV)	24,06	
A2 (88kV a 138 kV)	45,57	7,05	A4 (2,3 a 25kV)	24,90	
A3 (69kV)	71,07	15,27	AS (Subterrâneo)	-	
A3a (30 a 44kV)	87,69	24,06	Rural e Residencial	-	
A4 (2,3 a 25kV)	90,48	24,90	A3a (30 a 44kV)	24,06	
AS (Subterrâneo)	-	-	A4 (2,3 a 25kV)	24,90	
Rural e Residencial			DESCONTOS PERCENTUAIS		
A3 (69kV)	71,07	15,27	UNIDADE CONSUMIDORA	Demanda	Consumo
A3a (30 a 44kV)	87,69	24,06	Rural - Grupo A	10,00	10,00
A4 (2,3 a 25kV)	90,48	24,90	Cooperativas - Grupo A	50,00	50,00
			Água, Esgoto e Saneam. - Grupo A	15,00	15,00
			Água, Esgoto e Saneam. - Grupo B	-	15,00

NOTA:

Horário de Ponta - das 18:00 às 21:00h (3 h)
Horário Fora de Ponta - das 06:00 às 18:00h e 21:00 às 21:30 h (12h e 30min)
Horário Reservado - das 21:30 às 06:00h (08h 30min)
Período Seco - maio a novembro
Período Úmido - dezembro a abril

ICMS - Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços - Lei nº 10.720/88 / Lei nº 11.651/91 - Código Tributário Estadual - Lei nº 15.051/04
- Classe Rural com Inscrição Estadual - Alíquota de 12% - Aplicação: Tarifa/1-(ICMS+PIS+COFINS) x Consumo e/ou Demanda
- Classe Residencial monofásico com consumo entre 51 e 80 kWh - Alíquota de 25% - Aplicação : Tarifa/1-(ICMS+PIS+COFINS) x Consumo

RESOLUÇÃO:

1 - Tarifas de Fornecimento: ANEEL 1.056 de 08/09/2010 Anexos VIII, VIII-AX e VIII-B
2 - Tarifa Fiscal : DNAEE 02/96 DE 04/01/96. Data da aplicação: 05/01/96. VALOR DA TARIFA R\$ 64,48
3- Condições Gerais de Fornecimento: ANEEL 456 de 29/11/00. Data de aplicação: 30/11/00.

DESCONTOS:

1 -Serviços Públicos de: Água, Esgoto e Saneamento aplicar desconto de 15% sobre consumo e/ou demanda
2 - Rural Grupo A, desconto de 10% sobre consumo e demanda.
3 - Irrigantes (conforme Resolução 207/06 ANEEL) : Grupo "A" 80%
Grupo "B" 67%

OBSERVAÇÃO: 1 - O índice médio do reajuste da tarifa é de 0,00 para Grupo "B" e 0,00 para o Grupo "A".
2 - Os valores da tarifa de emergencia-auto produtor continuará sendo das resoluções ANEEL 509 de 11/09/02 e 510 de 12/09/02 até definição posterior da ANEEL.
3 - PIS/PASEP e COFINS - Aplicável nos moldes do ICMS, base de cálculo venda energia.

Fonte: CELG (2008)

APÊNDICES

Apêndice A	Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora...	116
Apêndice B	Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora	124

Apêndice A. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora.

Tabela 1.A. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de $172,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, rotação de 3500 rpm e motor padrão e alto rendimento.

Combinação ¹	Pivô ²	Adutora ³	Hman ⁴ (m)	Potência (cv)	Bomba			Motor padrão modelo W21		Motor alto rendimento modelo AR Plus	
					Rendimento (%)	Modelo Meganorm	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)
C 1	PC1	A1	67,99	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 2	PC1	A2	68,59	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 3	PC1	A3	69,20	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 4	PC1	A4	69,81	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 5	PC1	A5	70,50	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 6	PC1	A6	72,51	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 7	PC1	A7	74,57	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 8	PC1	A8	76,58	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 9	PC1	A9	78,83	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 10	PC1	A10	81,61	75	76,70	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 11	PC1	A11	84,46	75	76,50	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 12	PC1	A12	87,23	75	76,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 13	PC1	A13	90,31	100	76,10	80-200	5632,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 14	PC1	A14	96,80	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 15	PC1	A15	103,45	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 16	PC1	A16	109,95	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 17	PC2	A1	67,95	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 18	PC2	A2	68,55	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 19	PC2	A3	69,17	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 20	PC2	A4	69,77	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 21	PC2	A5	70,46	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 22	PC2	A6	72,47	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 23	PC2	A7	74,53	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 24	PC2	A8	76,54	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 25	PC2	A9	78,80	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 26	PC2	A10	81,58	75	76,70	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 27	PC2	A11	84,42	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 28	PC2	A12	87,20	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 29	PC2	A13	90,27	100	76,10	80-200	5632,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 30	PC2	A14	96,77	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 31	PC2	A15	103,42	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 32	PC2	A16	109,92	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 33	PC3	A1	67,81	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 34	PC3	A2	68,41	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 35	PC3	A3	69,02	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 36	PC3	A4	69,63	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 37	PC3	A5	70,32	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 38	PC3	A6	72,33	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 39	PC3	A7	74,39	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 40	PC3	A8	76,40	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 41	PC3	A9	78,65	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 42	PC3	A10	81,43	75	76,70	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72

Continua...

Tabela I.A. Continuação.

C 43	PC3	A11	84,27	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 44	PC3	A12	87,05	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 45	PC3	A13	90,12	100	76,10	80-200	5632,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 46	PC3	A14	96,62	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 47	PC3	A15	103,27	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 48	PC3	A16	109,77	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 49	PC4	A1	67,48	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 50	PC4	A2	68,08	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 51	PC4	A3	68,70	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 52	PC4	A4	69,30	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 53	PC4	A5	69,99	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 54	PC4	A6	72,00	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 55	PC4	A7	74,06	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 56	PC4	A8	76,07	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 57	PC4	A9	78,33	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 58	PC4	A10	81,11	75	76,70	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 59	PC4	A11	83,95	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 60	PC4	A12	86,73	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 61	PC4	A13	89,80	100	76,10	80-200	5632,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 62	PC4	A14	96,30	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 63	PC4	A15	102,95	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 64	PC4	A16	109,45	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 65	PC5	A1	66,96	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 66	PC5	A2	67,56	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 67	PC5	A3	68,18	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 68	PC5	A4	68,78	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 69	PC5	A5	69,48	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 70	PC5	A6	71,49	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 71	PC5	A7	73,54	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 72	PC5	A8	75,55	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 73	PC5	A9	77,81	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 74	PC5	A10	80,59	75	76,70	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 75	PC5	A11	83,43	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 76	PC5	A12	86,21	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 77	PC5	A13	89,28	75	76,10	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,80	10322,72
C 78	PC5	A14	95,78	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 79	PC5	A15	102,43	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 80	PC5	A16	108,93	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 81	PC6	A1	66,26	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 82	PC6	A2	66,87	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 83	PC6	A3	67,48	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 84	PC6	A4	68,08	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 85	PC6	A5	68,78	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 86	PC6	A6	70,79	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 87	PC6	A7	72,84	75	77,30	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 88	PC6	A8	74,85	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 89	PC6	A9	77,11	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 90	PC6	A10	79,89	75	76,70	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 91	PC6	A11	82,73	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 92	PC6	A12	85,51	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 93	PC6	A13	88,58	75	76,10	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,80	10322,72

Continua...

Tabela 1.A. Continuação.

C 94	PC6	A14	95,08	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 95	PC6	A15	101,73	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 96	PC6	A16	108,23	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 97	PC7	A1	65,42	60	78,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 98	PC7	A2	66,03	60	78,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 99	PC7	A3	66,64	60	78,10	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 100	PC7	A4	67,24	60	77,90	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 101	PC7	A5	67,94	60	77,70	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 102	PC7	A6	69,95	60	77,50	80-200	5410,00	91,00	7110,35	92,50	9570,67
C 103	PC7	A7	72,00	60	77,30	80-200	5410,00	91,00	7110,35	93,00	9570,67
C 104	PC7	A8	74,01	75	77,10	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 105	PC7	A9	76,27	75	76,90	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 106	PC7	A10	79,05	75	76,70	80-200	5410,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 107	PC7	A11	81,89	75	76,50	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 108	PC7	A12	84,67	75	76,30	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,00	10322,72
C 109	PC7	A13	87,74	75	76,10	80-200	5632,00	92,00	7871,85	93,80	10322,72
C 110	PC7	A14	94,24	100	76,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 111	PC7	A15	100,89	100	75,50	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04
C 112	PC7	A16	107,39	100	75,00	80-250	6095,00	92,30	9413,65	93,80	13521,04

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11); ⁴ Hman (altura manométrica total).

Tabela 2.A. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de 246,6 m³h⁻¹, rotação de 1750 rpm e motor padrão e alto rendimento.

Combinação1	Pivô2	Adutora3	Hman4 (m)	Potência (cv)	Bomba			Motor padrão modelo W21		Motor alto rendimento modelo AR Plus	
					Rendimento (%)	Modelo WKL	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)
C 1	PC1	A1	76,14	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 2	PC1	A2	77,31	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 3	PC1	A3	78,50	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 4	PC1	A4	79,67	125	72,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 5	PC1	A5	81,01	125	73,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 6	PC1	A6	84,91	125	73,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 7	PC1	A7	88,89	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 8	PC1	A8	92,79	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 9	PC1	A9	97,17	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 10	PC1	A10	102,55	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 11	PC1	A11	108,06	150	77,70	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 12	PC1	A12	113,45	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 13	PC1	A13	119,40	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 14	PC1	A14	132,00	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 15	PC1	A15	144,89	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 16	PC1	A16	157,49	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 17	PC2	A1	76,07	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 18	PC2	A2	77,23	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 19	PC2	A3	78,43	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 20	PC2	A4	79,59	125	72,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 21	PC2	A5	80,94	125	73,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 22	PC2	A6	84,83	125	73,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33

Continua...

Tabela 2.A. Continuação.

C 23	PC2	A7	88,82	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 24	PC2	A8	92,71	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 25	PC2	A9	97,09	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 26	PC2	A10	102,48	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 27	PC2	A11	107,99	150	77,70	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 28	PC2	A12	113,37	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 29	PC2	A13	119,33	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 30	PC2	A14	131,93	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 31	PC2	A15	144,82	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 32	PC2	A16	157,41	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 33	PC3	A1	75,79	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 34	PC3	A2	76,96	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 35	PC3	A3	78,15	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 36	PC3	A4	79,32	125	72,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 37	PC3	A5	80,66	125	73,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 38	PC3	A6	84,56	125	73,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 39	PC3	A7	88,54	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 40	PC3	A8	92,44	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 41	PC3	A9	96,82	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 42	PC3	A10	102,20	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 43	PC3	A11	107,71	150	77,70	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 44	PC3	A12	113,10	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 45	PC3	A13	119,05	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 46	PC3	A14	131,65	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 47	PC3	A15	144,54	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 48	PC3	A16	157,14	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 49	PC4	A1	75,16	100	76,60	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 50	PC4	A2	76,33	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 51	PC4	A3	77,52	100	77,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 52	PC4	A4	78,69	100	71,90	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 53	PC4	A5	80,03	125	72,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 54	PC4	A6	83,93	125	73,80	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 55	PC4	A7	87,91	125	74,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 56	PC4	A8	91,81	125	75,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 57	PC4	A9	96,19	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 58	PC4	A10	101,57	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 59	PC4	A11	107,08	150	77,70	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 60	PC4	A12	112,47	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 61	PC4	A13	118,42	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 62	PC4	A14	131,02	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 63	PC4	A15	143,91	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 64	PC4	A16	156,51	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 65	PC5	A1	74,15	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 66	PC5	A2	75,32	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 67	PC5	A3	76,51	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 68	PC5	A4	77,68	100	72,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 69	PC5	A5	79,02	100	73,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 70	PC5	A6	82,92	125	73,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 71	PC5	A7	86,91	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 72	PC5	A8	90,80	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 73	PC5	A9	95,18	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33

Continua...

Tabela 2.A. Continuação.

C 74	PC5	A10	100,56	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 75	PC5	A11	106,07	125	77,70	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 76	PC5	A12	111,46	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 77	PC5	A13	117,41	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 78	PC5	A14	130,01	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 79	PC5	A15	142,90	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 80	PC5	A16	155,50	200	76,90	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 81	PC6	A1	72,80	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 82	PC6	A2	73,97	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 83	PC6	A3	75,16	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 84	PC6	A4	76,33	100	72,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 85	PC6	A5	77,67	100	73,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 86	PC6	A6	81,57	125	73,90	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 87	PC6	A7	85,55	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 88	PC6	A8	89,45	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 89	PC6	A9	93,83	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 90	PC6	A10	99,21	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 91	PC6	A11	104,72	125	77,70	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 92	PC6	A12	110,11	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 93	PC6	A13	116,06	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 94	PC6	A14	128,66	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 95	PC6	A15	141,55	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 96	PC6	A16	154,15	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95
C 97	PC7	A1	71,17	100	76,80	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 98	PC7	A2	72,34	100	76,90	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 99	PC7	A3	73,53	100	78,00	125/2	14774,36	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 100	PC7	A4	74,70	100	72,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 101	PC7	A5	76,04	100	73,00	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 102	PC7	A6	79,94	100	73,90	125/3	16932,96	93,00	8917,41	94,50	12628,66
C 103	PC7	A7	83,92	125	75,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 104	PC7	A8	87,82	125	76,00	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 105	PC7	A9	92,20	125	77,10	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 106	PC7	A10	97,58	125	77,60	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 107	PC7	A11	103,09	125	77,70	125/3	16932,96	93,00	13210,93	94,50	17498,33
C 108	PC7	A12	108,48	150	77,80	125/3	16932,96	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 109	PC7	A13	114,43	150	75,20	125/4	19524,54	93,00	13947,44	95,00	21356,53
C 110	PC7	A14	127,03	175	77,20	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 111	PC7	A15	139,92	175	77,70	125/4	19524,54	93,50	16956,78	95,00	25144,99
C 112	PC7	A16	152,52	200	77,00	125/5	20213,08	93,50	18063,29	95,00	27134,95

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11); ⁴ Hman (altura manométrica total).

Tabela 3.A. Modelos de bomba e motor elétrico e seus custos para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de $246,6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, rotação de 3500 rpm e motor padrão e alto rendimento

Combinação ¹	Pivô ²	Adutora ³	Hman ⁴ (m)	Potência (cv)	Bomba			Motor padrão modelo W21		Motor alto rendimento modelo AR Plus	
					Rendimento (%)	Modelo Meganorm	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)	Rendimento (%)	Custo (R\$)
C 1	PC1	A1	76,14	100	80,80	80-200	5410,00	92,89	9413,65	94,10	13521,04
C 2	PC1	A2	77,31	100	80,90	80-200	5410,00	92,95	9413,65	94,10	13521,04

Continua...

Tabela 3.A. Continuação.

C 3	PC1	A3	78,50	100	81,00	80-200	5410,00	93,01	9413,65	94,10	13521,04
C 4	PC1	A4	79,67	100	81,10	80-200	5410,00	93,07	9413,65	94,10	13521,04
C 5	PC1	A5	81,01	100	81,20	80-200	5410,00	93,14	9413,65	94,10	13521,04
C 6	PC1	A6	84,91	125	74,40	80-250	6095,00	92,52	13306,36	94,10	18563,75
C 7	PC1	A7	88,89	125	74,73	80-250	6095,00	92,78	13306,36	94,10	18563,75
C 8	PC1	A8	92,79	125	75,00	80-250	6095,00	93,04	13306,36	94,10	18563,75
C 9	PC1	A9	97,17	125	75,40	80-250	6095,00	93,32	13306,36	94,10	18563,75
C 10	PC1	A10	102,55	125	75,73	80-250	6095,00	93,67	13306,36	94,10	18563,75
C 11	PC1	A11	108,06	150	76,00	80-250	6095,00	92,43	14842,54	94,10	20996,45
C 12	PC1	A12	113,45	150	77,30	80-250	6095,00	92,67	14842,54	94,10	20996,45
C 13	PC1	A13	119,40	-	-	-	-	-	-	-	-
C 14	PC1	A14	132,00	-	-	-	-	-	-	-	-
C 15	PC1	A15	144,89	-	-	-	-	-	-	-	-
C 16	PC1	A16	157,49	-	-	-	-	-	-	-	-
C 17	PC2	A1	76,07	100	80,80	80-200	5410,00	92,88	9413,65	94,10	13521,04
C 18	PC2	A2	77,23	100	80,90	80-200	5410,00	92,94	9413,65	94,10	13521,04
C 19	PC2	A3	78,43	100	81,00	80-200	5410,00	93,00	9413,65	94,10	13521,04
C 20	PC2	A4	79,59	100	81,10	80-200	5410,00	93,06	9413,65	94,10	13521,04
C 21	PC2	A5	80,94	100	81,20	80-200	5410,00	93,13	9413,65	94,10	13521,04
C 22	PC2	A6	84,83	100	74,40	80-250	6095,00	93,79	9413,65	94,10	18563,75
C 23	PC2	A7	88,82	100	74,73	80-250	6095,00	94,01	9413,65	94,10	18563,75
C 24	PC2	A8	92,71	125	75,00	80-250	6095,00	93,10	13306,36	94,10	18563,75
C 25	PC2	A9	97,09	125	75,40	80-250	6095,00	93,29	13306,36	94,10	18563,75
C 26	PC2	A10	102,48	125	75,73	80-250	6095,00	93,53	13306,36	94,10	18563,75
C 27	PC2	A11	107,99	150	76,00	80-250	6095,00	92,91	14842,54	94,10	20996,45
C 28	PC2	A12	113,37	150	77,30	80-250	6095,00	93,05	14842,54	94,10	20996,45
C 29	PC2	A13	119,33	-	-	-	-	-	-	-	-
C 30	PC2	A14	131,93	-	-	-	-	-	-	-	-
C 31	PC2	A15	144,82	-	-	-	-	-	-	-	-
C 32	PC2	A16	157,41	-	-	-	-	-	-	-	-
C 33	PC3	A1	75,79	100	80,80	80-200	5410,00	92,87	9413,65	94,10	13521,04
C 34	PC3	A2	76,96	100	80,90	80-200	5410,00	92,93	9413,65	94,10	13521,04
C 35	PC3	A3	78,15	100	81,00	80-200	5410,00	92,99	9413,65	94,10	13521,04
C 36	PC3	A4	79,32	100	81,10	80-200	5410,00	93,05	9413,65	94,10	13521,04
C 37	PC3	A5	80,66	125	81,20	80-200	5410,00	92,21	9413,65	94,10	13521,04
C 38	PC3	A6	84,56	125	74,40	80-250	6095,00	92,74	9413,65	94,10	18563,75
C 39	PC3	A7	88,54	125	74,73	80-250	6095,00	92,91	9413,65	94,10	18563,75
C 40	PC3	A8	92,44	125	75,00	80-250	6095,00	93,09	13306,36	94,10	18563,75
C 41	PC3	A9	96,82	125	75,40	80-250	6095,00	93,27	13306,36	94,10	18563,75
C 42	PC3	A10	102,20	125	75,73	80-250	6095,00	93,51	13306,36	94,10	18563,75
C 43	PC3	A11	107,71	150	76,00	80-250	6095,00	92,90	14842,54	94,10	20996,45
C 44	PC3	A12	113,10	150	77,30	80-250	6095,00	93,04	14842,54	94,10	20996,45
C 45	PC3	A13	119,05	-	-	-	-	-	-	-	-
C 46	PC3	A14	131,65	-	-	-	-	-	-	-	-
C 47	PC3	A15	144,54	-	-	-	-	-	-	-	-
C 48	PC3	A16	157,14	-	-	-	-	-	-	-	-
C 49	PC4	A1	75,16	100	80,80	80-200	5410,00	92,83	9413,65	94,10	13521,04
C 50	PC4	A2	76,33	100	80,90	80-200	5410,00	92,89	9413,65	94,10	13521,04
C 51	PC4	A3	77,52	100	81,00	80-200	5410,00	92,95	9413,65	94,10	13521,04
C 52	PC4	A4	78,69	100	81,10	80-200	5410,00	93,01	9413,65	94,10	13521,04
C 53	PC4	A5	80,03	125	81,20	80-200	5410,00	92,18	9413,65	94,10	13521,04

Continua...

Tabela 3.A. Continuação.

C 54	PC4	A6	83,93	125	74,40	80-250	6095,00	92,70	9413,65	94,10	18563,75
C 55	PC4	A7	87,91	125	74,73	80-250	6095,00	92,88	9413,65	94,10	18563,75
C 56	PC4	A8	91,81	125	75,00	80-250	6095,00	93,06	13306,36	94,10	18563,75
C 57	PC4	A9	96,19	125	75,40	80-250	6095,00	93,24	13306,36	94,10	18563,75
C 58	PC4	A10	101,57	125	75,73	80-250	6095,00	93,48	13306,36	94,10	18563,75
C 59	PC4	A11	107,08	150	76,00	80-250	6095,00	92,87	14842,54	94,10	20996,45
C 60	PC4	A12	112,47	150	77,30	80-250	6095,00	93,01	14842,54	94,10	20996,45
C 61	PC4	A13	118,42	-	-	-	-	-	-	-	-
C 62	PC4	A14	131,02	-	-	-	-	-	-	-	-
C 63	PC4	A15	143,91	-	-	-	-	-	-	-	-
C 64	PC4	A16	156,51	-	-	-	-	-	-	-	-
C 65	PC5	A1	74,15	100	80,80	80-200	5410,00	92,77	9413,65	94,10	13521,04
C 66	PC5	A2	75,32	100	80,90	80-200	5410,00	92,83	9413,65	94,10	13521,04
C 67	PC5	A3	76,51	100	81,00	80-200	5410,00	92,90	9413,65	94,10	13521,04
C 68	PC5	A4	77,68	100	81,10	80-200	5410,00	92,96	9413,65	94,10	13521,04
C 69	PC5	A5	79,02	100	81,20	80-200	5410,00	93,03	9413,65	94,10	13521,04
C 70	PC5	A6	82,92	100	74,40	80-250	6095,00	93,67	9413,65	94,10	18563,75
C 71	PC5	A7	86,91	100	74,73	80-250	6095,00	93,89	9413,65	94,10	18563,75
C 72	PC5	A8	90,80	125	75,00	80-250	6095,00	93,01	13306,36	94,10	18563,75
C 73	PC5	A9	95,18	125	75,40	80-250	6095,00	93,19	13306,36	94,10	18563,75
C 74	PC5	A10	100,56	125	75,73	80-250	6095,00	93,43	13306,36	94,10	18563,75
C 75	PC5	A11	106,07	150	76,00	80-250	6095,00	92,83	14842,54	94,10	20996,45
C 76	PC5	A12	111,46	150	77,30	80-250	6095,00	92,97	14842,54	94,10	20996,45
C 77	PC5	A13	117,41	-	-	-	-	-	-	-	-
C 78	PC5	A14	130,01	-	-	-	-	-	-	-	-
C 79	PC5	A15	142,90	-	-	-	-	-	-	-	-
C 80	PC5	A16	155,50	-	-	-	-	-	-	-	-
C 81	PC6	A1	72,80	100	80,80	80-200	5410,00	92,70	9413,65	94,10	13521,04
C 82	PC6	A2	73,97	100	80,90	80-200	5410,00	92,76	9413,65	94,10	13521,04
C 83	PC6	A3	75,16	100	81,00	80-200	5410,00	92,82	9413,65	94,10	13521,04
C 84	PC6	A4	76,33	100	81,10	80-200	5410,00	92,88	9413,65	94,10	13521,04
C 85	PC6	A5	77,67	100	81,20	80-200	5410,00	92,95	9413,65	94,10	13521,04
C 86	PC6	A6	81,57	100	74,40	80-250	6095,00	93,59	9413,65	94,10	18563,75
C 87	PC6	A7	85,55	100	74,73	80-250	6095,00	93,81	9413,65	94,10	18563,75
C 88	PC6	A8	89,45	125	75,00	80-250	6095,00	92,94	13306,36	94,10	18563,75
C 89	PC6	A9	93,83	125	75,40	80-250	6095,00	93,13	13306,36	94,10	18563,75
C 90	PC6	A10	99,21	125	75,73	80-250	6095,00	93,37	13306,36	94,10	18563,75
C 91	PC6	A11	104,72	150	76,00	80-250	6095,00	92,78	14842,54	94,10	20996,45
C 92	PC6	A12	110,11	150	77,30	80-250	6095,00	92,92	14842,54	94,10	20996,45
C 93	PC6	A13	116,06	-	-	-	-	-	-	-	-
C 94	PC6	A14	128,66	-	-	-	-	-	-	-	-
C 95	PC6	A15	141,55	-	-	-	-	-	-	-	-
C 96	PC6	A16	154,15	-	-	-	-	-	-	-	-
C 97	PC7	A1	71,17	100	80,80	80-200	5410,00	92,61	9413,65	94,10	13521,04
C 98	PC7	A2	72,34	100	80,90	80-200	5410,00	92,67	9413,65	94,10	13521,04
C 99	PC7	A3	73,53	100	81,00	80-200	5410,00	92,73	9413,65	94,10	13521,04
C 100	PC7	A4	74,70	100	81,10	80-200	5410,00	92,79	9413,65	94,10	13521,04
C 101	PC7	A5	76,04	100	81,20	80-250	6095,00	92,86	9413,65	94,10	13521,04
C 102	PC7	A6	79,94	100	74,40	80-250	6095,00	93,49	9413,65	94,10	18563,75
C 103	PC7	A7	83,92	100	74,73	80-200	5410,00	93,71	9413,65	94,10	18563,75
C 104	PC7	A8	87,82	125	75,00	80-250	6095,00	92,86	13306,36	94,10	18563,75

Continua...

Tabela 3.A. Continuação.

C 105	PC7	A9	92,20	125	75,40	80-250	6095,00	93,05	13306,36	94,10	18563,75
C 106	PC7	A10	97,58	125	75,73	80-250	6095,00	93,29	13306,36	94,10	18563,75
C 107	PC7	A11	103,09	125	76,00	80-250	6095,00	93,54	14842,54	94,10	20996,45
C 108	PC7	A12	108,48	150	77,30	80-250	6095,00	92,86	14842,54	94,10	20996,45
C 109	PC7	A13	114,43	-	-	-	-	-	-	-	-
C 110	PC7	A14	127,03	-	-	-	-	-	-	-	-
C 111	PC7	A15	139,92	-	-	-	-	-	-	-	-
C 112	PC7	A16	152,52	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11); ⁴ Hman (altura manométrica total).

Apêndice B. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora

Tabela 1.B. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de 172,5 m³h⁻¹, rotação de 3500 rpm e motor padrão e alto rendimento.

Combinação ¹	Pivô ²	Adutora ³	Motor padrão			Motor alto rendimento		
			Custos de investimentos CI (R\$)	Custos operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)	Custos de investimentos CI (R\$)	Custos operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)
C 1	PC1	A1	50711,50	8432,96	59144,45	51077,56	8319,97	59397,54
C 2	PC1	A2	49879,76	8501,13	58380,89	50245,83	8386,77	58632,60
C 3	PC1	A3	49028,69	8570,88	57599,57	49394,76	8455,12	57849,87
C 4	PC1	A4	48196,96	8639,93	56836,89	48563,03	8522,77	57085,80
C 5	PC1	A5	47109,60	8714,39	55824,00	47475,67	8595,68	56071,35
C 6	PC1	A6	46149,91	8937,37	55087,28	46515,98	8814,73	55330,71
C 7	PC1	A7	45281,21	9078,78	54359,99	45645,87	8998,19	54644,06
C 8	PC1	A8	44321,52	9301,62	53623,14	44686,18	9218,43	53904,61
C 9	PC1	A9	43174,73	9549,48	52724,20	43539,39	9463,37	53002,76
C 10	PC1	A10	42726,87	9870,05	52596,93	43091,53	9780,41	52871,94
C 11	PC1	A11	42268,60	10199,30	52467,90	42633,26	10106,02	52739,28
C 12	PC1	A12	41820,74	10523,36	52344,11	42185,41	10426,49	52611,90
C 13	PC1	A13	41571,88	10853,15	52425,03	42183,01	10705,11	52888,13
C 14	PC1	A14	41084,15	11578,79	52662,94	41695,28	11418,99	53114,27
C 15	PC1	A15	40514,58	12382,53	52897,11	41125,72	12209,69	53335,41
C 16	PC1	A16	39957,96	13180,37	53138,34	40569,10	12994,60	53563,70
C 17	PC2	A1	51256,89	8439,79	59696,68	51622,96	8326,87	59949,83
C 18	PC2	A2	50425,16	8507,95	58933,11	50791,23	8393,66	59184,89
C 19	PC2	A3	49574,09	8577,69	58151,78	49940,15	8461,99	58402,15
C 20	PC2	A4	48742,35	8646,73	57389,08	49108,42	8529,64	57638,06
C 21	PC2	A5	47655,00	8721,18	56376,18	48021,07	8602,54	56623,60
C 22	PC2	A6	46695,31	8944,15	55639,46	47061,38	8821,57	55882,95
C 23	PC2	A7	45826,60	9085,59	54912,20	46191,27	9005,05	55196,31
C 24	PC2	A8	44866,91	9308,43	54175,34	45231,58	9225,28	54456,85
C 25	PC2	A9	43720,12	9556,27	53276,39	44084,78	9470,21	53554,99
C 26	PC2	A10	43272,27	9876,84	53149,10	43669,96	9787,89	53457,85
C 27	PC2	A11	42814,00	10206,08	53020,07	43211,69	10113,49	53325,18
C 28	PC2	A12	42366,14	10530,12	52896,26	42763,83	10433,96	53197,79
C 29	PC2	A13	42117,28	10859,92	52977,19	42728,41	10711,94	53440,35
C 30	PC2	A14	41629,54	11585,54	53215,09	42240,68	11425,81	53666,49
C 31	PC2	A15	41059,98	12389,26	53449,24	41671,11	12216,49	53887,60
C 32	PC2	A16	40503,36	13187,08	53690,44	41114,49	13001,37	54115,87
C 33	PC3	A1	51385,45	8426,73	59812,18	52168,56	8322,41	60490,96
C 34	PC3	A2	50553,72	8494,85	59048,56	51336,82	8389,15	59725,98
C 35	PC3	A3	49702,64	8564,55	58267,19	50485,75	8457,45	58943,20
C 36	PC3	A4	48870,91	8633,55	57504,46	49654,02	8525,05	58179,07
C 37	PC3	A5	47783,55	8707,96	56491,52	48566,66	8597,91	57164,57
C 38	PC3	A6	46823,86	8930,88	55754,75	47606,97	8816,91	56423,88
C 39	PC3	A7	45955,16	9072,46	55027,62	46736,86	9000,43	55737,29
C 40	PC3	A8	44995,47	9295,26	54290,72	45777,17	9220,62	54997,79
C 41	PC3	A9	43848,68	9543,06	53391,73	44630,38	9465,51	54095,89
C 42	PC3	A10	43400,82	9863,58	53264,41	44215,56	9783,15	53998,71

Continua...

Tabela 1.B. Continuação.

C 43	PC3	A11	42942,55	10192,78	53135,33	43757,28	10108,71	53865,99
C 44	PC3	A12	42494,70	10516,78	53011,48	43309,43	10429,13	53738,56
C 45	PC3	A13	42245,83	10846,59	53092,42	43274,01	10707,21	53981,22
C 46	PC3	A14	41758,10	11572,20	53330,30	42786,28	11421,06	54207,33
C 47	PC3	A15	41188,54	12375,80	53564,34	42216,71	12211,63	54428,34
C 48	PC3	A16	40631,92	13173,52	53805,43	41660,09	12996,41	54656,50
C 49	PC4	A1	51514,00	8393,83	59907,84	52714,15	8298,43	61012,58
C 50	PC4	A2	50682,27	8461,86	59144,14	51882,42	8365,08	60247,50
C 51	PC4	A3	49831,20	8531,48	58362,67	51031,35	8433,29	59464,64
C 52	PC4	A4	48999,47	8600,38	57599,85	50199,61	8500,81	58700,42
C 53	PC4	A5	47912,11	8674,70	56586,81	49112,26	8573,57	57685,83
C 54	PC4	A6	46952,42	8897,53	55849,95	48152,57	8792,48	56945,05
C 55	PC4	A7	46083,72	9039,41	55123,12	47282,46	8976,10	56258,55
C 56	PC4	A8	45124,03	9262,11	54386,14	46322,77	9196,20	55518,96
C 57	PC4	A9	43977,23	9509,82	53487,05	45175,98	9440,99	54616,97
C 58	PC4	A10	43529,38	9830,25	53359,63	44761,15	9758,55	54519,70
C 59	PC4	A11	43071,11	10159,35	53230,46	44302,88	10084,01	54386,89
C 60	PC4	A12	42623,25	10483,26	53106,52	43855,03	10404,34	54259,37
C 61	PC4	A13	42374,39	10813,09	53187,48	43819,60	10682,63	54502,23
C 62	PC4	A14	41886,66	11538,65	53425,31	43331,87	11396,43	54728,30
C 63	PC4	A15	41317,09	12342,02	53659,11	42762,31	12186,77	54949,08
C 64	PC4	A16	40760,47	13139,49	53899,96	42205,69	12971,31	55177,00
C 65	PC5	A1	51642,56	8339,75	59982,31	53259,75	8253,60	61513,35
C 66	PC5	A2	50810,83	8407,64	59218,46	52428,02	8320,12	60748,13
C 67	PC5	A3	49959,75	8477,10	58436,86	51576,94	8388,18	59965,12
C 68	PC5	A4	49128,02	8545,86	57673,88	50745,21	8455,56	59200,77
C 69	PC5	A5	48040,67	8620,04	56660,70	49657,85	8528,18	58186,03
C 70	PC5	A6	47080,98	8842,72	55923,70	48698,16	8746,94	57445,10
C 71	PC5	A7	46212,27	8985,07	55197,34	47828,05	8930,71	56758,76
C 72	PC5	A8	45252,58	9207,63	54460,21	46868,36	9150,67	56019,03
C 73	PC5	A9	44105,79	9455,19	53560,98	45721,57	9395,32	55116,89
C 74	PC5	A10	43657,93	9775,47	53433,40	45306,75	9712,72	55019,47
C 75	PC5	A11	43199,66	10104,42	53304,09	44848,48	10038,04	54886,52
C 76	PC5	A12	42751,81	10428,18	53179,99	44400,62	10358,22	54758,84
C 77	PC5	A13	42240,51	10785,11	53025,62	43889,32	10627,33	54516,65
C 78	PC5	A14	42015,21	11483,53	53498,74	43877,47	11350,57	55228,04
C 79	PC5	A15	41445,65	12286,51	53732,16	43307,90	12140,54	55448,44
C 80	PC5	A16	40889,03	13083,60	53972,63	42751,28	12924,69	55675,98
C 81	PC6	A1	51771,12	8266,15	60037,26	53805,34	8189,58	61994,92
C 82	PC6	A2	50939,39	8333,84	59273,22	52973,61	8255,90	61229,51
C 83	PC6	A3	50088,31	8403,11	58491,42	52122,54	8323,77	60446,31
C 84	PC6	A4	49256,58	8471,67	57728,25	51290,81	8390,95	59681,76
C 85	PC6	A5	48169,22	8545,65	56714,87	50203,45	8463,38	58666,83
C 86	PC6	A6	47209,53	8768,13	55977,67	49243,76	8681,94	57925,70
C 87	PC6	A7	46340,83	8911,13	55251,96	48373,65	8865,93	57239,58
C 88	PC6	A8	45381,14	9133,48	54514,62	47413,96	9085,69	56499,65
C 89	PC6	A9	44234,35	9380,84	53615,19	46267,17	9330,14	55597,31
C 90	PC6	A10	43786,49	9700,93	53487,42	45819,31	9646,69	55466,00
C 91	PC6	A11	43328,22	10029,68	53357,90	45394,07	9972,47	55366,54
C 92	PC6	A12	42880,37	10353,23	53233,60	44946,22	10292,45	55238,66
C 93	PC6	A13	42369,07	10709,95	53079,02	44434,92	10562,01	54996,93

Continua...

Tabela 1.B. Continuação.

C 94	PC6	A14	42143,77	11408,53	53552,30	44423,06	11285,15	55708,22
C 95	PC6	A15	41574,21	12211,00	53785,21	43853,50	12074,61	55928,11
C 96	PC6	A16	41017,59	13007,56	54025,15	43296,88	12858,26	56155,13
C 97	PC7	A1	51899,67	8177,00	60076,68	54350,94	8110,26	62461,20
C 98	PC7	A2	51067,94	8244,46	59312,40	53519,21	8176,35	61695,56
C 99	PC7	A3	50216,87	8313,49	58530,36	52668,13	8243,99	60912,13
C 100	PC7	A4	49385,14	8381,82	57766,96	51836,40	8310,94	60147,34
C 101	PC7	A5	48297,78	8455,56	56753,34	50749,04	8383,13	59132,18
C 102	PC7	A6	47338,09	8677,81	56015,90	49789,36	8601,46	58390,82
C 103	PC7	A7	46356,08	8906,03	55262,11	48807,35	8783,47	57590,82
C 104	PC7	A8	45509,70	9043,69	54553,38	47959,55	9005,23	56964,78
C 105	PC7	A9	44362,90	9290,81	53653,71	46812,76	9249,44	56062,21
C 106	PC7	A10	43915,05	9610,65	53525,70	46364,91	9565,75	55930,66
C 107	PC7	A11	43456,78	9939,16	53395,94	45939,67	9891,29	55830,96
C 108	PC7	A12	43008,92	10262,47	53271,39	45491,81	10211,03	55702,84
C 109	PC7	A13	42497,62	10618,95	53116,57	44980,51	10481,14	55461,65
C 110	PC7	A14	42272,33	11317,70	53590,03	44968,66	11204,16	56172,82
C 111	PC7	A15	41702,76	12119,55	53822,32	44399,09	11993,01	56392,10
C 112	PC7	A16	41146,14	12915,49	54061,63	43842,47	12776,04	56618,51

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).

Tabela 2.B. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de 246,6 m³h⁻¹, rotação de 1750 rpm e motor padrão e alto rendimento.

Combinação ¹	Pivô ²	Adutora ³	Motor padrão			Motor alto rendimento		
			Custos de investimentos CI (R\$)	Custos de operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)	Custos de investimentos CI (R\$)	Custos de operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)
C 1	PC1	A1	52373,68	15115,05	67488,73	52925,87	15046,74	67972,62
C 2	PC1	A2	51541,95	15295,43	66837,38	52094,14	15080,06	67174,20
C 3	PC1	A3	50690,88	15294,46	65985,33	51243,07	15078,82	66321,89
C 4	PC1	A4	50819,15	16717,04	67536,19	51457,07	16480,58	67937,65
C 5	PC1	A5	49731,79	16741,52	66473,31	50369,71	16504,33	66874,04
C 6	PC1	A6	48772,10	17278,49	66050,60	49410,02	17032,47	66442,50
C 7	PC1	A7	47790,10	17773,85	65563,95	48428,01	17519,66	65947,67
C 8	PC1	A8	46830,41	18260,64	65091,05	47468,32	17998,42	65466,74
C 9	PC1	A9	45683,61	18796,46	64480,07	46321,53	18525,36	64846,89
C 10	PC1	A10	45235,76	19656,96	64892,72	45873,68	19372,07	65245,74
C 11	PC1	A11	44887,07	20632,14	65519,22	45989,46	20238,73	66228,19
C 12	PC1	A12	44439,22	21579,98	66019,19	45541,61	21166,42	66708,03
C 13	PC1	A13	44313,52	23416,33	67729,85	45415,91	22964,07	68379,97
C 14	PC1	A14	44204,65	25016,29	69220,94	45422,97	24659,62	70082,59
C 15	PC1	A15	43635,09	27191,18	70826,27	44853,41	26799,99	71653,40
C 16	PC1	A16	43345,55	29733,80	73079,36	44695,32	29305,01	74000,32
C 17	PC2	A1	52919,08	15112,58	68031,66	53471,27	14900,54	68371,81
C 18	PC2	A2	52087,34	15292,98	67380,33	52639,54	15077,82	67717,36
C 19	PC2	A3	51236,27	15292,19	66528,47	51788,46	15076,77	66865,24
C 20	PC2	A4	51364,55	16713,68	68078,23	52002,46	16477,45	68479,91
C 21	PC2	A5	50277,19	16738,36	67015,55	50915,11	16501,39	67416,50
C 22	PC2	A6	49317,50	17275,50	66593,00	49955,42	17029,70	66985,12

Continua...

Tabela 2.B. Continuação.

C 23	PC2	A7	48335,49	17771,06	66106,56	48973,41	17517,09	66490,50
C 24	PC2	A8	47375,80	18258,04	65633,84	48013,72	17996,02	66009,74
C 25	PC2	A9	46229,01	18794,04	65023,05	46866,93	18523,16	65390,08
C 26	PC2	A10	45781,15	19654,63	65435,79	46419,07	19369,95	65789,02
C 27	PC2	A11	45432,47	20629,83	66062,30	46534,86	20236,70	66771,56
C 28	PC2	A12	44984,61	21577,68	66562,29	46087,00	21164,40	67251,41
C 29	PC2	A13	44858,91	23413,58	68272,49	45961,30	22961,60	68922,90
C 30	PC2	A14	44750,05	25013,96	69764,01	45968,37	24657,50	70625,87
C 31	PC2	A15	44180,48	27188,94	71369,42	45398,80	26797,96	72196,76
C 32	PC2	A16	43890,95	29731,44	73622,39	45240,71	29302,85	74543,57
C 33	PC3	A1	53464,67	15072,19	68536,86	54016,86	14860,96	68877,83
C 34	PC3	A2	52632,94	15252,66	67885,60	53185,13	15038,30	68223,44
C 35	PC3	A3	51781,87	15252,59	67034,46	52334,06	15037,97	67372,03
C 36	PC3	A4	51910,14	16669,87	68580,01	52548,06	16434,50	68982,56
C 37	PC3	A5	50822,78	16695,29	67518,08	51460,70	16459,18	67919,88
C 38	PC3	A6	49863,09	17233,09	67096,19	50501,01	16988,14	67489,15
C 39	PC3	A7	48881,09	17729,44	66610,52	49519,00	17476,30	66995,30
C 40	PC3	A8	47921,40	18217,10	66138,50	48559,31	17955,91	66515,23
C 41	PC3	A9	46774,60	18753,85	65528,45	47412,52	18483,77	65896,30
C 42	PC3	A10	46326,75	19614,77	65941,52	46964,67	19330,89	66295,55
C 43	PC3	A11	45978,06	20590,03	66568,09	47080,46	20197,96	67278,42
C 44	PC3	A12	45530,21	21537,94	67068,15	46632,60	21125,73	67758,33
C 45	PC3	A13	45404,51	23372,10	68776,60	46506,90	22921,22	69428,12
C 46	PC3	A14	45295,64	24974,11	70269,75	46513,96	24618,45	71132,41
C 47	PC3	A15	44726,08	27149,41	71875,49	45944,40	26759,22	72703,62
C 48	PC3	A16	44436,54	29691,46	74128,00	45786,31	29263,67	75049,98
C 49	PC4	A1	54010,27	15002,96	69013,22	54562,46	14793,01	69355,47
C 50	PC4	A2	53178,54	15165,66	68344,19	53730,73	14952,86	68683,59
C 51	PC4	A3	52327,46	15167,00	67494,46	52879,66	14953,91	67833,56
C 52	PC4	A4	51816,91	16565,41	68382,32	52369,10	16329,96	68699,06
C 53	PC4	A5	51368,38	16605,09	67973,46	52006,30	16370,58	68376,88
C 54	PC4	A6	50408,69	17144,87	67553,56	51046,61	16901,49	67948,10
C 55	PC4	A7	49426,68	17643,36	67070,05	50064,60	17391,76	67456,36
C 56	PC4	A8	48466,99	18132,97	66599,96	49104,91	17873,29	66978,20
C 57	PC4	A9	47320,20	18648,81	65969,01	47958,12	18380,58	66338,70
C 58	PC4	A10	46872,34	19510,48	66382,82	47510,26	19228,43	66738,69
C 59	PC4	A11	46523,66	20485,89	67009,55	47626,05	20096,25	67722,30
C 60	PC4	A12	46075,80	21433,95	67509,76	47178,20	21024,16	68202,36
C 61	PC4	A13	45950,10	23264,13	69214,24	47052,50	22815,76	69868,25
C 62	PC4	A14	45841,24	24869,84	70711,08	47059,56	24516,00	71575,56
C 63	PC4	A15	45271,68	27045,89	72317,56	46489,99	26657,51	73147,50
C 64	PC4	A16	44982,14	29586,89	74569,03	46331,90	29160,93	75492,83
C 65	PC5	A1	54555,86	14791,67	69347,53	55108,06	14585,25	69693,30
C 66	PC5	A2	53724,13	14972,53	68696,66	54276,32	14762,97	69039,30
C 67	PC5	A3	52873,06	14976,72	67849,78	53425,25	14766,83	68192,08
C 68	PC5	A4	52362,50	16356,42	68718,92	52914,70	16124,46	69039,15
C 69	PC5	A5	51275,15	16386,26	67661,41	51827,34	16153,48	67980,82
C 70	PC5	A6	50954,29	16940,71	67895,00	51592,20	16700,75	68292,95
C 71	PC5	A7	49972,28	17441,67	67413,94	50610,20	17193,44	67803,63
C 72	PC5	A8	49012,59	17933,40	66945,99	49650,51	17677,06	67327,57
C 73	PC5	A9	47865,80	18474,50	66340,30	48503,71	18209,21	66712,93

Continua...

Tabela 2.B. Continuação.

C 74	PC5	A10	47417,94	19337,37	66755,31	48055,86	19058,23	67114,09
C 75	PC5	A11	46959,67	20310,82	67270,49	47597,59	20016,10	67613,68
C 76	PC5	A12	46621,40	21261,31	67882,71	47723,79	20855,39	68579,18
C 77	PC5	A13	46495,70	23085,15	69580,85	47598,09	22640,77	70238,86
C 78	PC5	A14	46386,84	24696,77	71083,60	47605,15	24345,83	71950,98
C 79	PC5	A15	45817,27	26873,99	72691,26	47035,59	26488,50	73524,09
C 80	PC5	A16	45527,74	29450,40	74978,14	46877,50	29026,77	75904,27
C 81	PC6	A1	55101,46	14552,57	69654,03	55653,65	14350,11	70003,77
C 82	PC6	A2	54269,73	14733,76	69003,48	54821,92	14528,16	69350,08
C 83	PC6	A3	53418,65	14741,47	68160,12	53970,85	14535,48	68506,33
C 84	PC6	A4	52908,10	16100,65	69008,75	53460,29	15872,92	69333,22
C 85	PC6	A5	51820,74	16134,15	67954,89	52372,94	15905,54	68278,48
C 86	PC6	A6	51499,88	16691,80	68191,68	52137,80	16455,96	68593,76
C 87	PC6	A7	50517,87	17196,57	67714,44	51155,79	16952,40	68108,19
C 88	PC6	A8	49558,18	17691,67	67249,85	50196,10	17439,34	67635,44
C 89	PC6	A9	48411,39	18236,38	66647,77	49049,31	17975,04	67024,35
C 90	PC6	A10	47963,54	19100,84	67064,38	48601,45	18825,64	67427,09
C 91	PC6	A11	47505,27	20074,62	67579,89	48143,18	19783,81	67927,00
C 92	PC6	A12	47167,00	21025,43	68192,42	48269,39	20624,69	68894,08
C 93	PC6	A13	47041,29	22840,73	69882,02	48143,69	22401,72	70545,41
C 94	PC6	A14	46932,43	24460,29	71392,72	48150,75	24113,26	72264,01
C 95	PC6	A15	46362,87	26639,11	73001,98	47581,18	26257,50	73838,68
C 96	PC6	A16	46073,33	29176,22	75249,55	47423,10	28757,09	76180,18
C 97	PC7	A1	55647,05	14262,47	69909,52	56199,25	14064,79	70264,03
C 98	PC7	A2	54815,32	14444,04	69259,37	55367,52	14243,22	69610,73
C 99	PC7	A3	53964,25	14456,00	68420,25	54516,44	14254,71	68771,15
C 100	PC7	A4	53453,69	15790,48	69244,17	54005,89	15567,85	69573,74
C 101	PC7	A5	52366,34	15828,37	68194,71	52918,53	15604,80	68523,33
C 102	PC7	A6	51406,65	16377,11	67783,75	51958,84	16144,52	68103,36
C 103	PC7	A7	51063,47	16899,24	67962,70	51701,39	16659,96	68361,35
C 104	PC7	A8	50103,78	17398,40	67502,18	50741,70	17150,90	67892,59
C 105	PC7	A9	48956,99	17947,44	66904,43	49594,91	17690,86	67285,77
C 106	PC7	A10	48509,13	18813,84	67322,97	49147,05	18543,37	67690,42
C 107	PC7	A11	48050,86	19788,00	67838,86	48688,78	19501,92	68190,70
C 108	PC7	A12	47712,59	20739,19	68451,78	48814,98	20344,71	69159,70
C 109	PC7	A13	47586,89	22544,22	70131,11	48689,28	22111,69	70800,97
C 110	PC7	A14	47478,03	24173,35	71651,37	48696,34	23831,02	72527,37
C 111	PC7	A15	46908,46	26354,08	73262,54	48126,78	25977,14	74103,92
C 112	PC7	A16	46618,93	28888,50	75507,43	47968,69	28474,08	76442,78

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora); ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).

Tabela 3.B. Análise econômica para as diferentes combinações de diâmetros da linha lateral do pivô central e da adutora para a vazão de $246,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, rotação de 3500 rpm e motor padrão e alto rendimento.

Combinação ¹	Pivô ²	Adutora ³	Motor padrão			Motor alto rendimento		
			Custos de investimentos CI (R\$)	Custos de operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)	Custos de investimentos CI (R\$)	Custos de operacionais CO (R\$)	Custos totais CT (R\$)
C1	PC1	A1	51087,23	14409,29	65496,52	51665,34	14248,16	65913,50
C2	PC1	A2	50255,50	14572,18	64827,68	50833,60	14417,47	65251,07

Continua...

Tabela 3.B. Continuação.

C 3	PC1	A3	49404,43	14738,53	64142,96	49982,53	14590,62	64573,15
C 4	PC1	A4	48572,70	14900,06	63472,76	49150,80	14759,01	63909,81
C 5	PC1	A5	47485,34	15085,26	62570,60	48063,44	14952,46	63015,91
C 6	PC1	A6	47173,73	17220,90	64394,63	47955,97	16963,31	64919,29
C 7	PC1	A7	46191,72	17842,39	64034,11	46973,97	17620,99	64594,95
C 8	PC1	A8	45232,03	18452,26	63684,30	46014,28	18270,10	64284,37
C 9	PC1	A9	44085,24	19105,42	63190,66	44867,48	18969,57	63837,05
C 10	PC1	A10	43637,39	19950,22	63587,61	44419,63	19879,07	64298,70
C 11	PC1	A11	43407,68	21168,74	64576,42	44323,32	20826,45	65149,76
C 12	PC1	A12	42959,83	21758,83	64718,65	43875,46	21459,10	65334,56
C 13	PC1	A13	42448,53	-	-	43364,16	-	-
C 14	PC1	A14	41891,91	-	-	42807,54	-	-
C 15	PC1	A15	41322,34	-	-	42237,98	-	-
C 16	PC1	A16	40765,72	-	-	41681,36	-	-
C 17	PC2	A1	51599,60	14407,39	66006,99	52210,73	14246,51	66457,24
C 18	PC2	A2	50767,87	14570,32	65338,18	51379,00	14415,83	65794,83
C 19	PC2	A3	49916,79	14736,70	64653,49	50527,93	14589,00	65116,92
C 20	PC2	A4	49085,06	14898,26	63983,32	49696,20	14757,40	64453,59
C 21	PC2	A5	47997,70	15083,49	63081,20	48608,84	14950,87	63559,71
C 22	PC2	A6	47139,93	16986,19	64126,12	48501,37	16960,57	65461,94
C 23	PC2	A7	46157,93	17606,92	63764,85	47519,36	17618,31	65137,67
C 24	PC2	A8	45777,43	18438,18	64215,61	46559,67	18267,47	64827,14
C 25	PC2	A9	44630,64	19108,66	63739,30	45412,88	18967,01	64379,89
C 26	PC2	A10	44182,78	19977,25	64160,03	44965,02	19876,57	64841,59
C 27	PC2	A11	43953,08	21061,15	65014,23	44868,71	20824,00	65692,71
C 28	PC2	A12	43505,22	21671,06	65176,29	44420,86	21456,87	65877,73
C 29	PC2	A13	42993,92	-	-	43909,56	-	-
C 30	PC2	A14	41629,54	-	-	43352,94	-	-
C 31	PC2	A15	41059,98	-	-	42783,37	-	-
C 32	PC2	A16	40503,36	-	-	42226,75	-	-
C 33	PC3	A1	52145,19	14371,73	66516,92	52756,33	14209,22	66965,55
C 34	PC3	A2	51313,46	14534,77	65848,23	51924,60	14378,60	66303,20
C 35	PC3	A3	50462,39	14701,27	65163,66	51073,52	14551,83	65625,35
C 36	PC3	A4	49630,66	14862,95	64493,61	50241,79	14720,29	64962,08
C 37	PC3	A5	48543,30	15186,82	63730,12	49154,43	14913,82	64068,26
C 38	PC3	A6	47685,53	17126,51	64812,04	49046,97	16919,14	65966,11
C 39	PC3	A7	46703,52	17762,42	64465,94	48064,96	17577,11	65642,07
C 40	PC3	A8	46323,03	18399,15	64722,17	47105,27	18226,46	65331,72
C 41	PC3	A9	45176,23	19070,10	64246,33	45958,48	18926,28	64884,75
C 42	PC3	A10	44728,38	19939,15	64667,53	45510,62	19836,06	65346,68
C 43	PC3	A11	44498,67	21022,58	65521,25	45414,31	20783,67	66197,98
C 44	PC3	A12	44050,82	21633,47	65684,29	44966,45	21417,41	66383,86
C 45	PC3	A13	43539,52	-	-	44455,15	-	-
C 46	PC3	A14	42175,14	-	-	43898,53	-	-
C 47	PC3	A15	41605,58	-	-	43328,97	-	-
C 48	PC3	A16	41048,96	-	-	42772,35	-	-
C 49	PC4	A1	52690,79	14276,92	66967,70	53301,92	14110,79	67412,71
C 50	PC4	A2	51859,06	14440,22	66299,28	52470,19	14280,30	66750,50
C 51	PC4	A3	51007,98	14607,00	65614,98	51619,12	14453,67	66072,79
C 52	PC4	A4	50176,25	14768,94	64945,19	50787,39	14622,26	65409,65
C 53	PC4	A5	49088,90	15091,03	64179,93	49700,03	14815,93	64515,96

Continua...

Tabela 3.B. Continuação.

C 54	PC4	A6	48231,13	17022,28	65253,41	49592,56	16811,31	66403,87
C 55	PC4	A7	47249,12	17659,13	64908,25	48610,55	17469,80	66080,35
C 56	PC4	A8	46868,62	18296,70	65165,32	47650,86	18119,57	65770,43
C 57	PC4	A9	45721,83	18968,71	64690,54	46504,07	18820,01	65324,08
C 58	PC4	A10	45273,97	19838,82	65112,79	46056,22	19730,31	65786,52
C 59	PC4	A11	45044,27	20921,17	65965,44	45959,90	20678,33	66638,23
C 60	PC4	A12	44596,41	21534,28	66130,70	45512,05	21314,02	66826,07
C 61	PC4	A13	44085,12	-	-	45000,75	-	-
C 62	PC4	A14	42720,74	-	-	44444,13	-	-
C 63	PC4	A15	42151,17	-	-	43874,57	-	-
C 64	PC4	A16	41594,55	-	-	43317,95	-	-
C 65	PC5	A1	53236,38	14118,77	67355,15	53847,52	13947,03	67794,55
C 66	PC5	A2	52404,65	14282,50	66687,16	53015,79	14116,76	67132,55
C 67	PC5	A3	51553,58	14449,71	66003,29	52164,71	14290,34	66455,06
C 68	PC5	A4	50721,85	14612,08	65333,93	51332,98	14459,15	65792,13
C 69	PC5	A5	49634,49	14798,19	64432,68	50245,63	14653,03	64898,66
C 70	PC5	A6	48776,72	16676,61	65453,33	50138,16	16632,52	66770,68
C 71	PC5	A7	47794,71	17300,46	65095,17	49156,15	17291,85	66448,00
C 72	PC5	A8	47414,22	18126,37	65540,59	48196,46	17942,30	66138,76
C 73	PC5	A9	46267,42	18800,07	65067,49	47049,67	18643,74	65693,41
C 74	PC5	A10	45819,57	19671,88	65491,44	46601,81	19554,85	66156,66
C 75	PC5	A11	45589,87	20752,54	66342,41	46505,50	20503,54	67009,04
C 76	PC5	A12	45142,01	21369,20	66511,21	46057,65	21142,36	67200,00
C 77	PC5	A13	44630,71	-	-	45546,35	-	-
C 78	PC5	A14	43266,33	-	-	44989,73	-	-
C 79	PC5	A15	42696,77	-	-	44420,16	-	-
C 80	PC5	A16	42140,15	-	-	43863,54	-	-
C 81	PC6	A1	53781,98	13902,04	67684,02	54393,11	13723,09	68116,20
C 82	PC6	A2	52950,25	14066,35	67016,60	53561,38	13893,11	67454,49
C 83	PC6	A3	52099,17	14234,15	66333,32	52710,31	14066,98	66777,29
C 84	PC6	A4	51267,44	14397,09	65664,53	51878,58	14236,07	66114,65
C 85	PC6	A5	50180,09	14583,81	64763,90	50791,22	14430,24	65221,46
C 86	PC6	A6	49322,32	16445,00	65767,32	50683,75	16388,37	67072,13
C 87	PC6	A7	48340,31	17071,06	65411,37	49701,74	17048,83	66750,57
C 88	PC6	A8	47959,81	17893,29	65853,10	48742,05	17700,19	66442,25
C 89	PC6	A9	46813,02	18569,26	65382,28	47595,26	18402,98	65998,24
C 90	PC6	A10	46365,16	19443,36	65808,52	47147,41	19315,18	66462,59
C 91	PC6	A11	46135,46	20521,80	66657,26	47051,10	20264,76	67315,86
C 92	PC6	A12	45687,61	21143,24	66830,85	46603,24	20907,78	67511,02
C 93	PC6	A13	45176,31	-	-	46091,94	-	-
C 94	PC6	A14	43811,93	-	-	45535,32	-	-
C 95	PC6	A15	43242,36	-	-	44965,76	-	-
C 96	PC6	A16	42685,74	-	-	44307,22	-	-
C 97	PC7	A1	54327,57	13638,37	67965,94	54938,71	13451,23	68389,94
C 98	PC7	A2	53495,84	13803,38	67299,23	54106,98	13621,60	67728,58
C 99	PC7	A3	52644,77	13971,88	66616,65	53255,90	13795,82	67051,72
C 100	PC7	A4	51813,04	14135,52	65948,55	52424,17	13965,26	66389,43
C 101	PC7	A5	50725,68	14322,99	65048,67	51438,74	14161,82	65600,55
C 102	PC7	A6	49867,91	16163,35	66031,26	51229,35	16092,19	67321,54
C 103	PC7	A7	48885,90	16792,08	65677,98	50145,42	16751,96	66897,38
C 104	PC7	A8	48505,41	17609,97	66115,38	49287,65	17406,47	66694,12

Continua...

Tabela 3.B. Continuação.

C 105	PC7	A9	47358,62	18288,69	65647,31	48140,86	18110,87	66251,73
C 106	PC7	A10	46910,76	19165,55	66076,31	47693,00	19024,39	66717,40
C 107	PC7	A11	46681,06	20070,89	66751,95	47596,69	19975,04	67571,73
C 108	PC7	A12	46233,20	20868,60	67101,80	47148,84	20623,12	67771,95
C 109	PC7	A13	45721,90	-	-	46637,54	-	-
C 110	PC7	A14	44357,52	-	-	46080,92	-	-
C 111	PC7	A15	43787,96	-	-	45511,35	-	-
C 112	PC7	A16	43231,34	-	-	44954,73	-	-

¹ Combinações (combinação entre diâmetro da linha lateral do pivô central e diâmetro da adutora) ; ² PC1 a PC7 (combinações do diâmetro da linha lateral do pivô central conforme Tabela 10); ³ A1 a A16 (combinações do diâmetro da adutora conforme Tabela 11).