



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO
INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS
DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO**

CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

1999



CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1999**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Mello, Carlos Rogério de

Avaliação da utilização do inversor de frequência em sistemas de bombeamento
para irrigação / Carlos Rogério de Mello. -- Lavras: UFLA, 1999.
87 p. : il.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Inversor de frequência. 2. Bombeamento – Instalação. 4. Irrigação. 5. Curva
de bomba. 6. Curva de tubulação. 7. Análise econômica. 8. Economia de energia. 9.
Bomba centrífuga. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

-628.52

CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO PARA IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

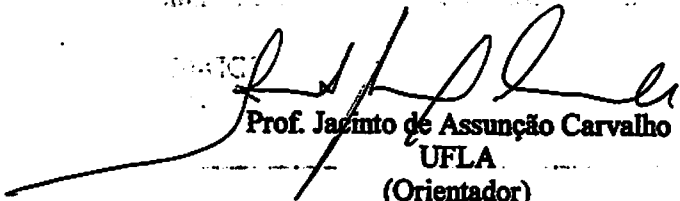
APROVADA em 06 de dezembro de 1999

Prof. Tarlei Arriel Botrel

ESALQ/USP

Prof. Geraldo Magela Pereira

UFLA



Prof. Jacinto de Assunção Carvalho

UFLA

(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

A DEUS, nosso Pai,

À minha mãe Cidinha e à memória de meu pai, Waldomiro;

À minha sobrinha Clara, ao meu irmão José Marcio, à minha cunhada

Nelli e ao meu grande amigo Djalma (*in memoriam*),

DEDICO E OFEREÇO.



AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras pela oportunidade de realização do curso.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo suporte financeiro deste projeto.

Ao prof. Jacinto de Assunção Carvalho pela oportunidade, orientação e amizade ao longo do curso.

Aos professores Tarlei Arriel Botrel e Geraldo Magela Pereira, membros da Banca Examinadora, pelas valiosas sugestões e observações.

Ao prof. Roberto Alves Braga Júnior pela ajuda imprescindível na instalação do inversor de frequência.

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Hidráulica da UFLA, em especial Oswaldo (“Neném”) pela amizade e pelo total apoio em todas as fases do projeto.

Ao prof. Antônio Marciano da Silva pela amizade e pela supervisão das minhas atividades de docência durante o curso.

Aos prof.^{rs} Joaquim Paulo da Silva, Tadayuki Yanagi Júnior e Daniel Furtado Ferreira, do Departamento de Ciências Exatas da UFLA, pela amizade e pela minha introdução à pesquisa científica.

Aos alunos de graduação, Carlos Henrique Reinato e Márcio José de Santana, pela ajuda desde a instalação do experimento até a coleta de dados.

Aos colegas de pós-graduação Maria Emília, Adão, Claudionor, Raimundo, Júlio, Felizardo e Ricardo (“Bob”) pela agradável “troca de experiências” e os três últimos, também, pela amizade desde os tempos de graduação.

Aos meus amigos Miguel, Rodrigo e Lênio pela sólida e sincera amizade de mais de 10 anos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Caracterização da situação energética de sistemas de irrigação	3
2.2 Aspectos econômicos relacionados à avaliação de equipamentos	9
2.3 Características do inversor de frequência	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Caracterização hidráulica das motobombas utilizadas sob diversas frequências de rotação	13
3.2 Análise de viabilidade	22
3.3 Exemplos de aplicação	25
3.3.1 Análise de projeto considerando diferentes demandas de altura manométrica	25
3.3.2 Análise de projeto considerando diferentes demandas de vazão ...	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Discussão geral	36
4.2 Análise dos exemplos de aplicação	50
4.2.1 Análise de viabilidade considerando diferentes demandas de altura manométrica	50
4.2.1.1 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 1	51
4.2.1.2 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 2	54

4.2.2 Análise de viabilidade considerando diferentes demandas de vazão	57
4.2.2.1 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 1	57
4.2.2.2 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 2	58
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO	66

LISTA DE SÍMBOLOS

PH	potência hidráulica (cv)
Q	vazão (m^3/h)
H_{man}	altura manométrica (mca)
γ	peso específico da água (kg/m^3)
PE	potência elétrica (cv)
T	tensão (V)
I	corrente (A)
$\cos \Phi$	fator de potência (decimal)
FRC	fator de recuperação do capital (decimal)
i	taxa de juros (decimal)
n	período de retorno do capital (anos)
CA	custo anualizado (R\$/ano)
CE	custo do equipamento (R\$)
EE	economia de energia (R\$/ano)
ΔP	redução de potência (kW)
T	tempo de irrigação (horas/ano)
PE	preço da energia (R\$/kWh)
RA	retorno anual (R\$/ano)
H	pressão (mca)
HG	altura geométrica (m)
L	Comprimento da tubulação (m)
D	diâmetro (m)
f	fator de atrito (decimal)

RESUMO

MELLO, Carlos Rogério de. Avaliação da utilização do inversor de frequência em sistemas de bombeamento para irrigação. Lavras: UFLA, 1999. 87p. (Dissertação - Mestrado em Eng. Agrícola, Irrigação e Drenagem)

O consumo de energia elétrica tem crescido acentuadamente na irrigação. Os controles de pressão e vazão necessários aos manejos da irrigação promovem desperdício de energia, aumentando os custos de produção. Assim, este trabalho objetiva avaliar o equipamento inversor de frequência, em instalações de bombeamento, visando aos manejos de sistemas de irrigação, através de redução da rotação das motobombas. Esta avaliação consiste de estudos da viabilidade econômica do mesmo, considerando custos e benefícios anuais. Para o custo anual, trabalhou-se com o fator de recuperação de capital a taxas de juros de 6, 9 e 12% ao ano e períodos de amortização de 5, 10 e 15 anos. O benefício foi a economia de energia gerada pelo equipamento através da redução de potência, tempos de funcionamento anuais e preço da energia. Foram construídas tabelas, relacionando estas grandezas, para permitir análise de várias situações de projeto. A seguir, foram desenvolvidos dois exemplos de análise em dois projetos de irrigação, estruturados nas características da instalação trabalhada. Para tanto, determinaram-se, no Laboratório de Hidráulica da UFLA, em Lavras, MG, as características hidráulicas (altura manométrica, potência ativa e rendimento) de duas motobombas, de 40 e 25 cv, controladas por um inversor de frequência de 40 cv, em circuito fechado, para diversas rotações promovidas pelo equipamento. Foram feitas comparações que consistem da avaliação da diferença de potência consumida pelo inversor de frequência e os procedimentos usuais de manejo da pressão e vazão. De maneira geral, verificou-se que a economia de energia proporcionada pelo inversor de frequência pode torná-lo viável à irrigação, devendo-se avaliar as reduções de potência que o mesmo produzirá, os tempos anuais da irrigação em questão e a forma como o equipamento poderá ser amortizado.

* Comitê Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho - UFLA (Orientador), Roberto Alves Braga Júnior - UFLA

ABSTRACT

MELLO, Carlos Rogério de. Evaluation of the utilization of frequency variable drive in pumping plants for irrigation. Lavras: UFLA, 1999. 87p. (Dissertation - Master of Science in Agricultural Engineering, Irrigation and Drainage) *

The consumption of electric energy in irrigation systems is increasing rapidly. The control of pressure and discharge, both necessary for the irrigation management, produces excessive waste of energy, increasing production costs. Thus, the purpose of this work was to assess the application of the frequency variable drive in pumping plants aiming at saving energy, through slowing down the pumps rotation. Economic analyses were performed to assess annualized equipment costs and energy savings obtained by using the drive. Annual costs were analysed with annual interest rates of 6, 9 e 12% and capital payback periods of 5, 10 and 15 years. The benefit brought by the equipment was saving energy through the reduction of the working hours of irrigation systems, generated power, and energy price. Tables were prepared to relate the economic variables to help assessing any design situation. Two examples of analyses were developed in two irrigation designs, both adjusted to the characteristics of the pumping plants. Firstly, it were determined, in the Hydraulic Laboratory of UFLA, Lavras, MG, the hydraulic characteristics (manometric height, engine power and efficiency) for two pumps, of 40 cv and 25 cv, considering several rotations, and using a frequency variable drive of 40 cv. Comparisons were made through the difference in consumed power by using the frequency variable drive and usual ways of pressure and discharge control. It was demonstrated that the saving of energy generated by using the frequency variable drive may become economically viable for irrigation. However, it is necessary to evaluate the power reduction generated by the equipment, the annual irrigation times and the forms of equipment amortization.

* Guidance Committee: Jacinto de Assunção Carvalho - UFLA (Major Professor), Roberto Alves Braga Júnior - UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A energia é o sustentáculo de todas as atividades econômicas, sejam elas de origem industrial, agrícola ou comercial, portanto é a responsável direta pela manutenção das atividades produtivas. O desenvolvimento da agricultura é de suma importância para a sociedade. Para isso é necessária a condução de pesquisas, que são distintas de acordo com as diversas partes de estudo que constituem o ramo Ciências Agrárias. Uma das maiores necessidades está relacionada à otimização do consumo de energia pelos sistemas de irrigação, que vem despertando interesse, não só da comunidade científica, como também de concessionárias de energia elétrica.

A energia elétrica é seguramente a mais usada na irrigação, pois constitui a forma mais eficiente e, portanto, econômica, para acionamentos de motores de indução, largamente aplicados em instalações de bombeamento. Deve-se ressaltar que há algumas exceções provocadas por isolamento geográfico, locais onde não há geração de energia elétrica ou que não fazem parte do sistema interligado de transmissão de energia, predominando aquelas oriundas de fontes petrolíferas.

A necessidade de racionalização de energia elétrica é urgente, uma vez que a capacidade de geração do país está sendo insuficiente para manter todos os processos produtivos, especialmente na região Sudeste. O estudo e o desenvolvimento de equipamentos que possam proporcionar redução no consumo de energia precisa ser estimulado e seu desempenho, assim como sua adaptação à atividade em questão, deve ser feito por técnicos especializados.

Alguns equipamentos têm sido aplicados à indústria com sucesso. O emprego de alguns destes equipamentos em sistemas de irrigação pode produzir

resultados satisfatórios quanto à redução de energia elétrica, necessitando-se, porém, de estudos sobre sua viabilidade econômica e desempenho dos dispositivos hidráulicos, sob influência destes equipamentos, ou seja, adaptação dos mesmos à realidade de um sistema de irrigação. Um destes possíveis equipamentos é o inversor de frequência.

Um equipamento essencial, que consome a maior parte da energia elétrica demandada em uma irrigação, são as bombas centrífugas, cuja condição de funcionamento caracterizará o desempenho hidráulico e energético do sistema de irrigação. No entanto, este equipamento, muitas vezes, é mal manejado, com o sistema de irrigação demandando uma quantidade excessiva de energia sem necessidade. Isto, além de agravar o problema de desperdício, proporciona aumento dos custos de produção, diminuindo ainda mais a competitividade dos produtos agrícolas brasileiros.

No setor industrial, bombas centrífugas vêm sendo utilizadas, associadas a inversores de frequência, objetivando redução do consumo de energia nas operações, via controle de rotação da bomba, fazendo com que a mesma forneça pressão e/ou vazão necessárias para cada situação específica.

Dentro do exposto, pretendeu-se com este trabalho, avaliar a viabilidade de utilização do equipamento inversor de frequência, considerando-se características típicas de irrigação, como controle de pressão ao longo das tomadas de irrigação e controle de vazão ao longo do ciclo de culturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da situação energética de sistemas de irrigação

No Brasil, a energia elétrica é quase que totalmente gerada por fonte hidráulica, correspondendo a 95% da geração total, devido às características físicas dos rios, especialmente da região Sudeste, e por ser a forma mais econômica de geração em grande escala (Ventura Filho, 1988).

Por algumas características deste tipo de fonte, especialmente o fato de ser susceptível ao ciclo hidrológico, o citado autor caracteriza um problema de déficit na geração, ocasionado pela ocorrência de uma “seqüência hidrológica desfavorável”, necessitando-se de racionamento no fornecimento de energia, sendo que, para o sistema interligado Sudeste/Centro-Oeste/Sul, os déficits estão próximos a 15%.

A demanda por energia elétrica proveniente do sistema interligado para irrigação tem aumentado acentuadamente nos últimos anos, pela necessidade de aumento da área irrigada e a sua maior eficiência, tanto técnica quanto econômica. Scalopi (1985) demonstrou obter reduções significativas nos custos com bombeamento, utilizando energia elétrica, comparando-se ao uso de óleo diesel.

Segundo Cordeiro (1988), há necessidade de que sejam feitos investimentos no setor energético, com a finalidade de aumentar a capacidade de geração de energia visando à irrigação, uma vez que o setor trabalha com grande possibilidade de racionamento e as demandas por irrigação têm aumentado, pois a agricultura está exigindo a adoção desta tecnologia para manter a produção estável em praticamente todo o ano.

O DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) atualmente ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou, a partir de 1980, tarifas diferenciadas para os consumidores que demandam cargas acima de 50 kW. Tais tarifas visam fazer com que os consumidores adotem um tipo de conduta visando à redução de custos e, indiretamente, ao consumo de energia no horário de ponta, no qual há grande concentração de carga (Comitê de Distribuição de Energia Elétrica, 1994).

Associado ao problema da capacidade de geração de energia elétrica e aumento do consumo em sistemas de irrigação, Hanson et al. (1996) citam que ocorrem problemas relacionados ao manejo da irrigação, onde se perde quantidade razoável de energia devido às características de um sistema de irrigação e ao desperdício proveniente de maus dimensionamentos.

A respeito do dimensionamento de sistemas de irrigação propriamente dito, Scalopi (1986) constatou uma série de problemas, especialmente nas instalações de bombeamento que, na maioria das vezes, trabalham em condições inadequadas, com os pontos de trabalho das bombas fora das reais necessidades do sistema.

Gilley e Watts (1977) avaliaram a possibilidade de redução do consumo energético em sistemas de irrigação por aspersão nos Estados Unidos, trabalhando sob diversas condições operacionais. Concluíram que é possível economizar de 40 a 50%, observando que há necessidade de investimento em equipamentos.

Com relação ao manejo da irrigação, o problema está na condição técnica de seu funcionamento. Este manejo está relacionado às necessidades hídricas de uma cultura e aos problemas gerados pela condição topográfica.

No primeiro caso, normalmente, uma cultura anual possui demandas diferenciadas pela sua fase de desenvolvimento, havendo necessidade de

diferentes volumes de água conforme o estágio em que se encontra (Doorenbos e Kassam, 1994). Neste caso, necessita-se aplicar controle da vazão.

Basicamente, trabalha-se com dois procedimentos para controle de vazão. Bernardo (1989) e Azevedo Netto e Alvarez (1991) citam-no, através de registro na saída das motobombas, que é uma prática mais comum. A Figura 1 mostra a operação de controle de vazão através de fechamento de válvula. Nota-se que há introdução de perda de carga na curva do sistema, proporcionando desperdício de energia.

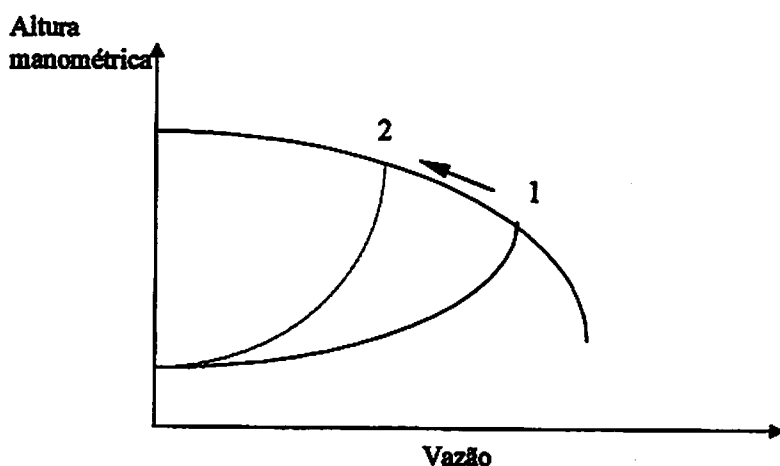


FIGURA 1. Variação da curva característica do sistema motivada pelo fechamento parcial da válvula de gaveta.

Outro manejo consiste em trabalhar com tempos menores de irrigação, aplicando-se a maior vazão, que proporciona a aplicação de volumes menores, não introduzindo perda de carga (Olitta, 1989; Vieira, 1986).

Conzett e Robeck (1983) afirmam que uma das formas de manejo adequado de um sistema de bombeamento visa reduzir vazão, isto é alterar a rotação da bomba até a obtenção da vazão necessária, de acordo com as leis de Rateaux. Isto não implica introdução de perda de carga e o tempo de funcionamento não é alterado.

Tiago Filho (1996) apresenta um equipamento próprio a produzir este efeito com rapidez e eficiência, o inversor de frequência, que é um equipamento eletro-eletrônico capaz de controlar a rotação de motores elétricos de indução mantendo-se uma relação entre frequência e tensão constante, onde reduzindo-se a tensão, através de transformador de tensão, reduz-se automaticamente a frequência, com conseqüente redução da corrente. Pela Figura 2 observa-se a economia potencial de energia que o inversor de frequência é capaz de proporcionar.

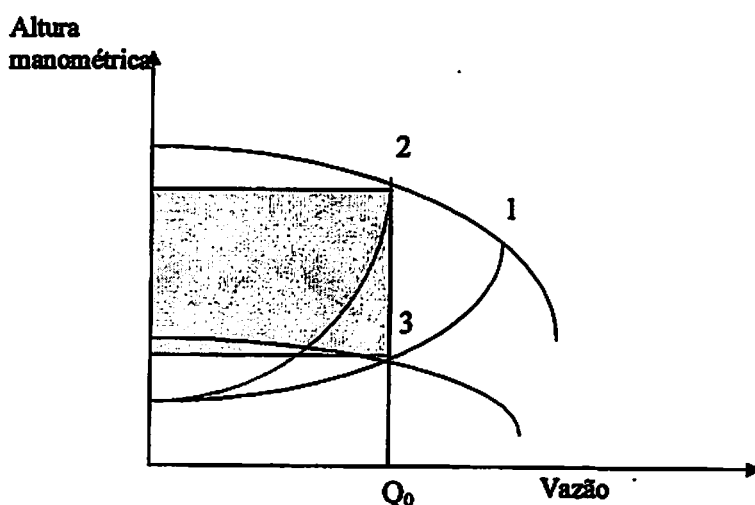


FIGURA 2. Representação da economia de energia (parte hachurada) com o uso do inversor de frequência em relação à manobra de válvula ($P=Q \times H_{man}$).

Segundo Viana et al. (s/d) e Tiago Filho (1996), o uso do inversor de frequência na indústria em sistemas de bombeamento visando controlar vazão é uma prática bastante comum, pois sua aplicabilidade econômica é justificável pela redução do consumo energético, em comparação a outros procedimentos, especialmente de fechamento de válvula. Deve-se ressaltar que na indústria, o tempo de funcionamento é alto, pois trabalha-se ao longo de todo o ano, durante 24 horas por dia.

Relativo às características de relevo, é típico o problema de irrigar áreas declivosas, em que pontos mais baixos recebem pressão além do necessário, que será desperdiçada a fim de manter o valor adequado ao equipamento de irrigação (Hanson et al., 1996). Esse é um problema que o técnico não pode resolver totalmente, a não ser que se adotem outras tecnologias.

Segundo Gomes (1997) e Keller e Bliesner (1990), é comum instalar válvulas ao longo de linhas de irrigação, para se obter valores de pressão necessários ao funcionamento dos equipamentos de irrigação, especialmente na aspersão, visando manter o grau de pulverização projetado para a respectiva cultura, implicando em perdas de carga adicionais ao sistema. Esta necessidade surge, porque no dimensionamento do sistema, considera-se a maior cota topográfica a ser irrigada como referência para os cálculos hidráulicos.

Assim como na indústria, na agricultura existe uma grande demanda por energia elétrica, especialmente em sistemas de irrigação por aspersão e suas derivações, notadamente, autopropelido e pivô central, que demandam um consumo elevado de potência associado a longos períodos de funcionamento. O problema de instalação de válvulas está no desperdício de energia elétrica gerado, aumentando os custos da irrigação e contribuindo para o problema do excesso de consumo de energia elétrica no país (Scaloppi, 1986).

Segundo Tiago Filho (1996), pode-se alterar o ponto de trabalho de uma motobomba sem introduzir perda de carga ou reduzir seu rendimento, proporcionando menor potência demandada. Assim, pode-se obter o ponto de trabalho adequado, mantendo-se a vazão necessária ao sistema e reduzindo-se a pressão a um nível compatível com o desnível topográfico.

Em termos hidráulicos, esta manobra significa que haverá uma curva da tubulação e uma curva característica da bomba, sob dada rotação, para cada tomada de irrigação e, conseqüentemente, um ponto de trabalho adequado. A Figura 3 permite verificar a alteração do ponto de trabalho da bomba mediante

diminuição da sua rotação, proporcionando um valor menor de altura manométrica, mantendo a vazão projetada, e gerando economia substancial de energia (área hachurada).

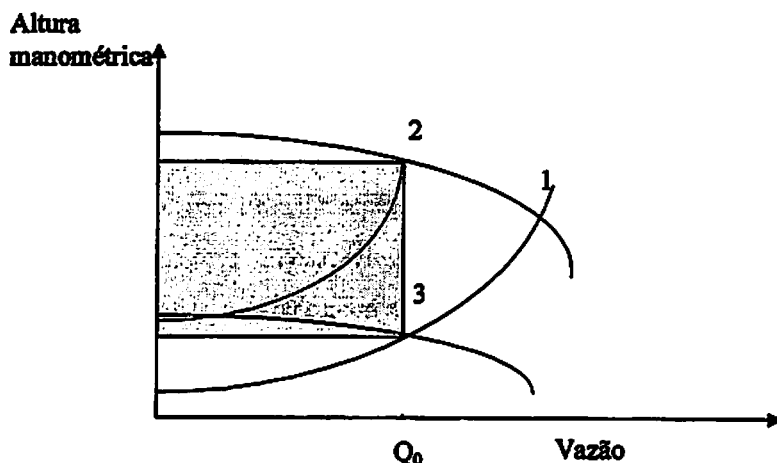


FIGURA 3. Representação da variação do ponto de trabalho da bomba sob redução de rotação para controle de pressão e economia potencial de energia (área hachurada).

A tendência atual de estudos na área de projetos agrícolas, especialmente irrigação, está concentrado na avaliação técnica e econômica de tecnologias que visam ao aumento de eficiência, uma vez que a globalização da economia exige do setor agrícola, que seja mais produtivo e ao mesmo tempo rentável. Para isto, há de se ressaltar que é de suma importância o estudo de novos equipamentos que poderão influir tanto na produção quanto na redução de custos de produção, especialmente quando geram diminuição do consumo energético, que é um dos grandes desafios do país para o próximo século.

2.2 Aspectos econômicos relacionados à avaliação de equipamentos

“Análise econômica verifica se os bens e serviços resultantes do projeto em análise justificam os investimentos realizados” (Dorfman, 1988). Nessa linha de raciocínio, o estudo de uma determinada tecnologia não deve ser direcionado apenas aos resultados técnicos da avaliação, uma vez que é indispensável uma ferramenta que possa ser utilizada para tomada de decisão, sendo esta a análise econômica (Reis, 1997).

Segundo Dorfman (1988), é de suma importância o conhecimento da vida útil do equipamento a ser utilizado, pois esse parâmetro pode influenciar diretamente na tomada de decisão. Sendo assim, o referido autor a define como sendo “o intervalo de tempo que vai do início da operação do projeto até o instante em que essa operação se realiza de forma não-econômica.” Em se tratando de equipamentos, a vida útil pode ser considerada aproximadamente igual à vida física do mesmo, uma vez que o uso deste terá retorno somente enquanto estiver, tecnicamente, em condições de funcionar. Define, ainda, período de análise como sendo o tempo que será considerado para avaliação econômica, devendo ser no máximo igual à vida útil do equipamento ou aquele exigido pelo financiamento.

De acordo com Hanson et al. (1996), o benefício gerado pelo inversor de frequência é a economia nos custos com energia, pois proporcionará uma redução na potência consumida pelo motor elétrico. A economia anual é obtida em função da redução de potência, número de horas de funcionamento durante o ano e do preço da energia elétrica (Arruda, 1988).

Em se tratando de um equipamento, o custo para sua aquisição pode ser anualizado, considerando-se um determinado período de depreciação, igual à sua vida útil e taxas de juros compatíveis com o mercado de aplicações financeiras (Hanson et al., 1996; Frizzzone et al., 1994; Gomes, 1997; Coelho, 1979). Esta

situação pode ser entendida como uma aquisição do equipamento, sem necessidade de empréstimo, com o irrigante dispondo de capital, podendo depreciá-lo ao longo de toda sua vida útil.

Pode-se trabalhar, porém, com anualização de equipamentos, considerando-se um financiamento. Negocia-se um período para seu pagamento, na maioria das vezes, inferior à vida útil do equipamento, trabalhando-se com uma certa taxa de juros sobre o valor do financiamento. Esta anualização caracteriza um fator de recuperação de capital superior à situação descrita anteriormente (Dorfman, 1988).

A análise de viabilidade é realizada comparando-se custos aos benefícios, podendo-se, segundo Dorfman (1988), calcular a relação entre ambos e interpretar este fator, conhecido como “relação custo-benefício”. É comum, também, simplesmente calcular a diferença entre o benefício e o custo, como realizado por Frizzone et al. (1994).

2.3 Características do inversor de frequência

Atualmente as instalações de bombeamento estão sendo enfocadas como um dos pontos chaves para obtenção de maximização da eficiência energética, tanto na indústria quanto na agropecuária, em que a potência elétrica consumida é o principal parâmetro em análise.

Tiago Filho (1996) registra que os sistemas convencionais de bombeamento, com rotação constante e uso de válvulas de controle, em grande parte do tempo, operam fora do ponto de trabalho projetado, gerando desperdício de energia. Cita, ainda, que uma das soluções para obtenção de pontos de trabalho adequados a cada situação operacional é o uso de controladores de velocidade no motor elétrico que neste caso, dispensa o uso de válvulas.

Existem algumas formas de controle de velocidades em motores elétricos que, segundo Doll (1984), citado por Tiago Filho (1996), podem ter características eletrônicas (controladores estáticos), mecânicas, eletromecânicas e hidráulicas.

Tiago Filho (1996) e Conzett e Robechek (1983) afirmam que os controladores estáticos têm se destacado, devido à presença cada vez maior da eletrônica em sua concepção, mencionando que esses controladores têm custo inferior para motores de corrente contínua. Contudo, de acordo com Stephan e Hanitsch (1994), o avanço da tecnologia está permitindo melhor desenvolvimento deste equipamento para motores de corrente alternada, que são os utilizados em instalações de bombeamento, reduzindo-se os custos para sua aquisição.

Os controladores estáticos normalmente utilizados são os inversores de frequência. Esses equipamentos permitem controlar e variar a velocidade de motores elétricos de indução trifásicos e monofásicos, trabalhando-se com controle escalar ou vetorial. Podem ser adquiridos avulsos ou montados em painéis com função de proteção e acionamento, com ou sem comando remoto. A Tabela 1 permite verificar a disponibilidade deste equipamento no mercado, mostrando as faixas de tensão e potência em que podem ser encontrados (Weg Automação, 1999).

TABELA 1. Faixas de potência disponíveis para os Inversores de frequência e suas respectivas tensões de funcionamento.

Alimentação (Vca)	Potência (cv)
Monofásica (220 ~ 230)	0,25 a 3,0 ; 2,0 a 60,0
Trifásica (380 ~ 480)	0,25 a 850
Trifásica (575)	5 a 30

Hanson et al. (1996) observam que os motores elétricos utilizados em instalações de bombeamento para irrigação têm rotação constante. Além disso, estas instalações são dimensionadas para situação extrema de vazão e/ou pressão e o manejo de irrigação exige variações em ambos.

Especificamente em irrigação, estes mesmos autores mostram que há necessidade de controle da pressão, quando o sistema de irrigação está numa área com declividade acentuada, uma vez que a pressão projetada para o sistema de bombeamento toma como referência a maior altura geométrica, havendo excesso para as tomadas localizadas em cotas inferiores.

Outro problema verificado é a necessidade de variação do volume de água a ser recalcado, uma vez que as culturas variam suas necessidades hídricas ao longo do seu desenvolvimento. Além disto, pode-se ter áreas irregulares, com linhas de irrigação diferentes, com necessidade de variação da vazão (Hanson et al., 1996).

Alguns resultados obtidos por Hanson et al. (1996) e Lambeth e Houston (1991), buscando controle de vazão, utilizando inversor de frequência, mostraram que este procedimento pode ser viável tanto técnica quanto economicamente.

Com isto, é importante que haja informações a respeito do uso deste equipamento na irrigação, para o ambiente econômico brasileiro, gerando um estudo de suma importância para tomada de decisão.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização hidráulica das motobombas utilizadas sob diversas frequências de rotação

Trabalhou-se com duas motobombas trifásicas de 40 cv e 25 cv, controladas por um inversor de frequência e conectadas a um circuito hidráulico fechado com retorno ao tanque de sucção, tendo-se um medidor de vazão eletrônico de pás instalado ao longo do mesmo. A altura manométrica foi obtida pela soma das leituras dos instrumentos (um manômetro de Bourdon instalado na saída da bomba e de um vacuômetro na entrada) uma vez que foram instalados praticamente ao mesmo nível.

Primeiramente, determinou-se a curva característica ($Q \times H_{man}$) para uma rotação de 3600 rpm (rotação nominal), trabalhando-se desde a vazão 0 ("shut off") até aproximadamente 110 m³/h, com incrementos próximos de 10 m³/h, utilizando um registro de gaveta na saída da bomba, para a motobomba de 40 cv. Para a motobomba de 25 cv, trabalhou-se com uma vazão máxima de 55 m³/h, a cada 8 m³/h aproximadamente. Obteve-se, para cada vazão, o valor da altura manométrica correspondente. Com o inversor de frequência, as bombas foram acionadas a rotações mais baixas, diminuindo cerca de 200 rpm até 3000 rpm. Para cada rotação obteve-se a curva de desempenho da bomba.

Com os dados de vazão e altura monométrica, calculou-se a potência hidráulica com a seguinte relação:

$$PH = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{270000} \quad (1)$$

Em que:

PH = potência hidráulica (cv);

Q = vazão (m³/h);

H_{man} = altura manométrica (mca);

γ = peso específico da água (1000 kg/m³).

A potência elétrica consumida pelo motor foi medida para cada vazão, utilizando-se 2 procedimentos: fazendo-se leituras da potência elétrica ativa, em watts (W) diretamente no painel do inversor de frequência, convertendo-a em cv e, como forma de se averiguar os valores, através de um medidor eletrônico microcomputadorizado, instalado pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), onde foram registradas leituras de tensão, corrente e fator de potência para cada carga (vazão) aplicada ao motor. Com estes dados, calculou-se a potência elétrica ativa para o motor através da equação 2:

$$PE = \frac{\sqrt{3} \cdot T \cdot I \cdot \cos \Phi}{735} \quad (2)$$

Em que

PE = potência elétrica (cv);

T = tensão (V);

I = corrente (A)

cos Φ = fator de potência (decimal).

Relacionando-se 1 e 2, obteve-se o rendimento global do sistema (motor + bomba) para cada vazão.

Com os valores de vazão e altura manométrica, ajustou-se um polinômio cúbico, da seguinte forma (Yanagi Júnior et al., 1997):

$$H_{\text{man}} = a + b \cdot Q + c \cdot Q^2 + d \cdot Q^3 \quad (3)$$

Em que:

H_{man} = altura manométrica (mca);

Q = vazão (m^3/h).

A potência elétrica ativa foi expressa, adequadamente, em função da vazão, conforme Arens e Porto (1989), por um polinômio quadrático:

$$PE = a_1 + b_1 \cdot Q + c_1 \cdot Q^2 \quad (4)$$

Em que:

PE = potência (cv);

Q = vazão (m^3/h).

Com estes ajustes polinomiais, caracterizaram-se os principais parâmetros hidráulicos das motobombas.

As Figuras 4 e 5 mostram as curvas características obtidas para as motobombas de 40 cv e 25 cv, respectivamente, com os valores de rotação trabalhados.

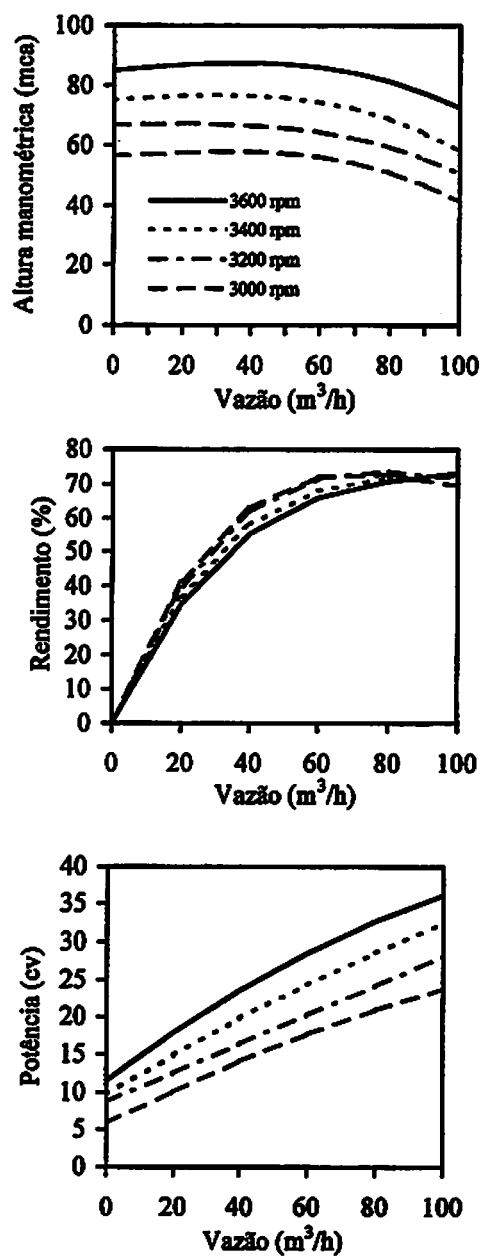


FIGURA 4. Curvas de desempenho, rendimento e potência para a motobomba de 40 cv para diversas rotações.

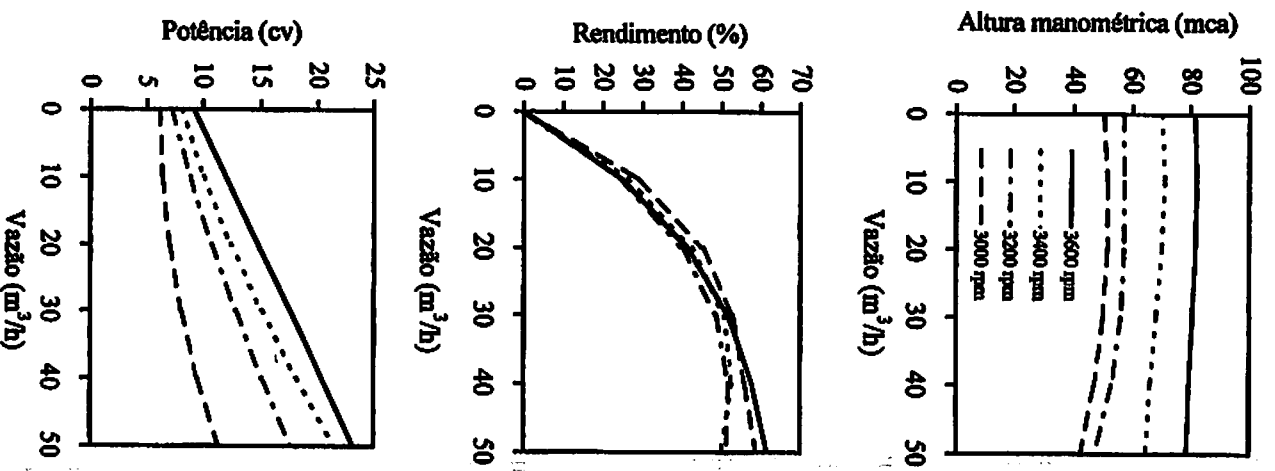


FIGURA 5. Curvas de desempenho, rendimento e potência para a motobomba de 25 cv para diversas rotações.

Pelas Tabelas 2 e 3 pode-se verificar para cada rotação, em rpm, os polinômios ajustados para a motobomba de 40 cv relacionando as principais grandezas hidráulicas em função da vazão, com seus respectivos coeficientes de determinação do ajuste.

TABELA 2. Curvas características ajustadas com seus respectivos coeficientes de determinação.

Rotação	Altura Manométrica (mca)	R ²
3600	$83,27 + 0,1485 \cdot Q - 0,0018087 \cdot Q^2 - 8,507 \times 10^{-6} \cdot Q^3$	93,8%
3400	$71,62 + 0,3194 \cdot Q - 0,005625 \cdot Q^2 + 1,6434 \times 10^{-5} \cdot Q^3$	95,2%
3200	$65,37 + 0,09128 \cdot Q - 8,808 \times 10^{-4} \cdot Q^2 - 1,151 \times 10^{-5} \cdot Q^3$	97,8%
3000	$55,09 + 0,1783 \cdot Q - 0,0022946 \cdot Q^2 - 5,1854 \times 10^{-6} \cdot Q^3$	96,35%

TABELA 3. Polinômios ajustados para a potência elétrica ativa do motor.

Rotação	Potência elétrica (cv)	R ²
3600	$11,53 + 0,34 \cdot Q - 9,197 \times 10^{-4} \cdot Q^2$	99,1%
3400	$9,72 + 0,268 \cdot Q - 4,079 \times 10^{-4} \cdot Q^2$	99,7%
3200	$8,66 + 0,192 \cdot Q + 2,873 \times 10^{-5} \cdot Q^2$	99,6%
3000	$5,76 + 0,225 \cdot Q - 4,355 \times 10^{-4} \cdot Q^2$	99,9%

Nas Tabelas 4 e 5 são mostrados os polinômios ajustados para a motobomba de 25 cv, com seus respectivos coeficientes de ajuste.

TABELA 4. Curvas características ajustadas com seus respectivos coeficientes de determinação.

Rotação	Altura Manométrica (mca)	R²
3600	$81,5 + 0,1535 \cdot Q - 0,008866 \cdot Q^2 + 9,371 \times 10^{-5} \cdot Q^3$	96,4%
3400	$70,2 + 0,2176 \cdot Q - 0,01354 \cdot Q^2 + 1,4046 \times 10^{-4} \cdot Q^3$	91,3%
3200	$57,03 - 0,002165 \cdot Q + 3,31 \times 10^{-3} \cdot Q^2 - 1,446 \times 10^{-4} \cdot Q^3$	98,3%
3000	$50,1 + 0,1989 \cdot Q - 0,006022 \cdot Q^2 - 2,334 \times 10^{-5} \cdot Q^3$	89,4%

TABELA 5. Polinômios ajustados para a potência elétrica ativa do motor.

Rotação	Potência elétrica (cv)	R²
3600	$9,17 + 0,277 \cdot Q + 7,313 \times 10^{-5} \cdot Q^2$	99,6%
3400	$8,05 + 0,182 \cdot Q + 1,727 \times 10^{-3} \cdot Q^2$	99,6%
3200	$7,13 + 0,157 \cdot Q + 1,064 \times 10^{-3} \cdot Q^2$	99,3%
3000	$6,07 + 0,07 \cdot Q + 2,069 \times 10^{-3} \cdot Q^2$	96,7%

As Figuras 6 e 7 mostram respectivamente o esquema hidráulico adotado e o inversor de frequência utilizado neste trabalho.

- 1 - Motor
- 2 - Bomba
- 3 - Manômetro
- 4 - Vacuômetro
- 5 - Válvula de gaveta
- 6 - Medidor de vazão
- 7 - Inversor de frequência
- 8 - Medidor de energia

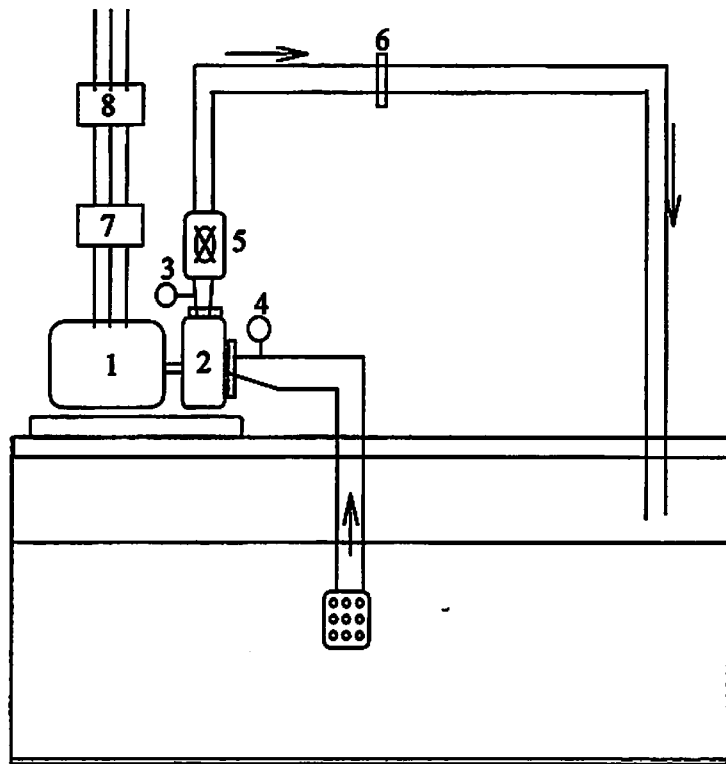


FIGURA 6. Esquema da instalação hidráulica deste trabalho.

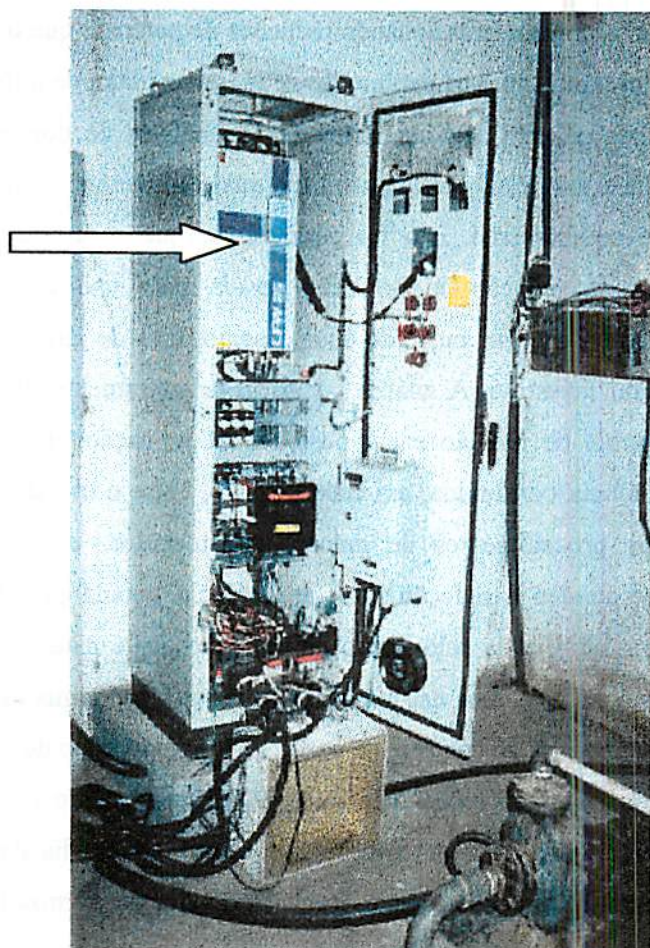
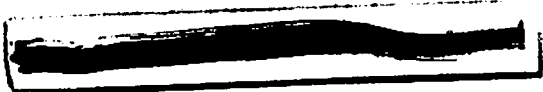


FIGURA 7. Inversor de frequência (seta) com sistemas de proteção e acionamento utilizado neste trabalho.



3.2 Análise de viabilidade

A avaliação da viabilidade econômica do inversor de frequência foi realizada, de maneira geral, relacionando reduções de potência que o inversor de frequência proporcionou com os parâmetros econômicos: taxa de juros e período de retorno do capital. Em seguida foram feitas análises de dois sistemas de irrigação, com base nos resultados gerais, cada qual caracterizando uma situação de emprego do equipamento. Isto foi possível, porque o retorno econômico depende apenas da redução de potência gerada pelo uso do inversor de frequência, preço da energia, custo do equipamento, taxa de juros e período de retorno do capital investido. A análise consistiu primeiramente de um projeto visando ao controle de pressão em 4 posições de irrigação; determinou-se a diferença de potência consumida, em cada posição, entre o uso do inversor de frequência e os procedimentos de manejo considerados, e a soma destas diferenças correspondeu à redução total de potência gerada pelo inversor de frequência, que multiplicada pelo tempo de irrigação das tomadas no ano (este tempo é o mesmo em cada uma das tomadas) promove a economia de energia no ano. O outro projeto visa ao controle de vazão ao longo do ciclo de uma cultura. Neste caso, determinou-se a redução de potência em cada estágio associada a um tempo de funcionamento durante o respectivo estágio. A média das reduções, ponderada pelo tempo em cada estágio, forneceu o valor economizado durante o ciclo da cultura.

Para isto, foram construídas tabelas relacionando a redução total de potência que o inversor de frequência proporcionou em função da taxa de juros, número de horas de funcionamento anual, períodos de retorno do capital e os retornos em termos de percentual sobre o valor do equipamento. Estas tabelas permitem avaliar a viabilidade do inversor de frequência, independentemente das características do sistema. As tabelas correspondentes aos preços atuais do

equipamento e da energia estão inseridas em Resultados e Discussão para análise. Foram construídas outras tabelas para diferentes valores do equipamento e da energia, os quais se encontram em anexo e poderão ser utilizadas para futuras análises.

Para anualização do capital investido, consideraram-se alguns valores para taxa de juros e períodos de retorno, trabalhando-se, respectivamente, com valores de 6, 9 e 12% e 5, 10 e 15 anos, sendo que a vida útil do equipamento foi de 15 anos, conforme fabricante. Esta anualização foi feita de acordo com Hanson et al. (1996) e Dorfman (1988), utilizando-se respectivamente as equações:

$$FRC = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (5)$$

$$CA = FRC \cdot CE \quad (6)$$

Em que:

CA = custo anualizado (R\$/ano);

FRC = fator de recuperação do capital (decimal);

CE = custo do equipamento (R\$);

i = taxa de juros (decimal);

n = período de retorno do capital investido (anos).

O benefício proporcionado pelo uso do equipamento consiste na redução de potência advinda do seu uso, comparado com os demais procedimentos de aplicação de água. O cálculo da economia de energia foi feito considerando-se tempos anuais de funcionamento do sistema de irrigação, seguindo metodologia adotada por Hanson et al. (1996). O preço da energia, considerando ICMS,

adotado neste trabalho foi de R\$ 0,11037/kWh para tarifa convencional. Adotou-se esta tarifação porque a potência instalada está abaixo de 50 kW (Comitê de Distribuição de Energia Elétrica, 1994). Este valor para energia está sendo praticado pela CEMIG desde abril de 1999, com base na resolução 58 da ANEEL de 07 de abril de 1999. Sendo assim, o cálculo foi realizado da seguinte forma:

$$EE = \Delta P \cdot T \cdot PE \quad (7)$$

Em que:

EE = economia de energia (R\$/ano);

ΔP = redução de potência avaliada (kW);

T = tempo de uso (horas/ano);

PE = preço da energia (R\$/kWh);

A seguir comparou-se a economia anual de energia com o custo anualizado do equipamento, chegando ao retorno anual:

$$RA = EE - CA \quad (8)$$

Em que:

RA = retorno anual proporcionado pelo inversor de frequência (R\$/ano);

Para as análises, trabalhou-se com um fator que foi obtido pela relação entre RA e o preço do equipamento, caracterizando um percentual sobre o valor do investimento que foi obtido como retorno.

Com relação ao preço do equipamento, consultaram-se alguns fabricantes nacionais, a fim de se conhecer o seu valor atual, encontrando-se R\$

6970,00 para um equipamento de 40 cv, sem IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados), totalizando aproximadamente, R\$ 7300,00. Para um inversor de frequência de 25 cv, o preço é de R\$ 6370,00 sem IPI, ficando o preço final em torno de R\$ 6700,00. Deve-se destacar que a aquisição do equipamento diretamente dos fabricantes, pode ter um custo relativamente reduzido, quando comparado à aquisição junto aos revendedores, além de se ter melhores condições de garantia e assistência técnica. Estas análises foram feitas com US\$ 1,00 correspondendo a R\$ 1,85.

3.3 Exemplos de aplicação

3.3.1 Análise de projeto considerando diferentes demandas de altura manométrica

Procurou-se projetar esta situação de análise utilizando a motobomba de 40 cv, de forma que a mesma estivesse ajustada à condição mais próxima possível do seu melhor desempenho. Sendo assim, determinou-se uma vazão de trabalho de 80 m³/h, com a motobomba sob condição de um rendimento global satisfatório.

O equipamento de irrigação utilizado é um autopropelido, cuja relação hidráulica é:

$$H = 0,00497 \times Q^2 \quad (9)$$

Em que:

H = pressão de serviço do canhão (mca);

Q = vazão (m³/h).

Consideraram-se 100 m o comprimento da mangueira de alimentação deste dispositivo, com um diâmetro de 100 mm e também, segundo Zaggo et al. (1988), uma rugosidade absoluta de 0,0070 mm. A tubulação principal foi dimensionada com o critério de velocidades econômicas (Bernardo, 1989 e Reis et al., 1998), calculando-se um diâmetro de 130 mm, de aço zincado, com rugosidade absoluta de 0,125 mm (Azevedo Netto e Alvarez, 1991).

As tomadas de irrigação foram dispostas a cada 72 m, sendo em número de 4, conforme Figura 8. A maior cota foi de 44,3 m e a menor de 22,1 m, caracterizando uma área com 10,3% de declividade média.

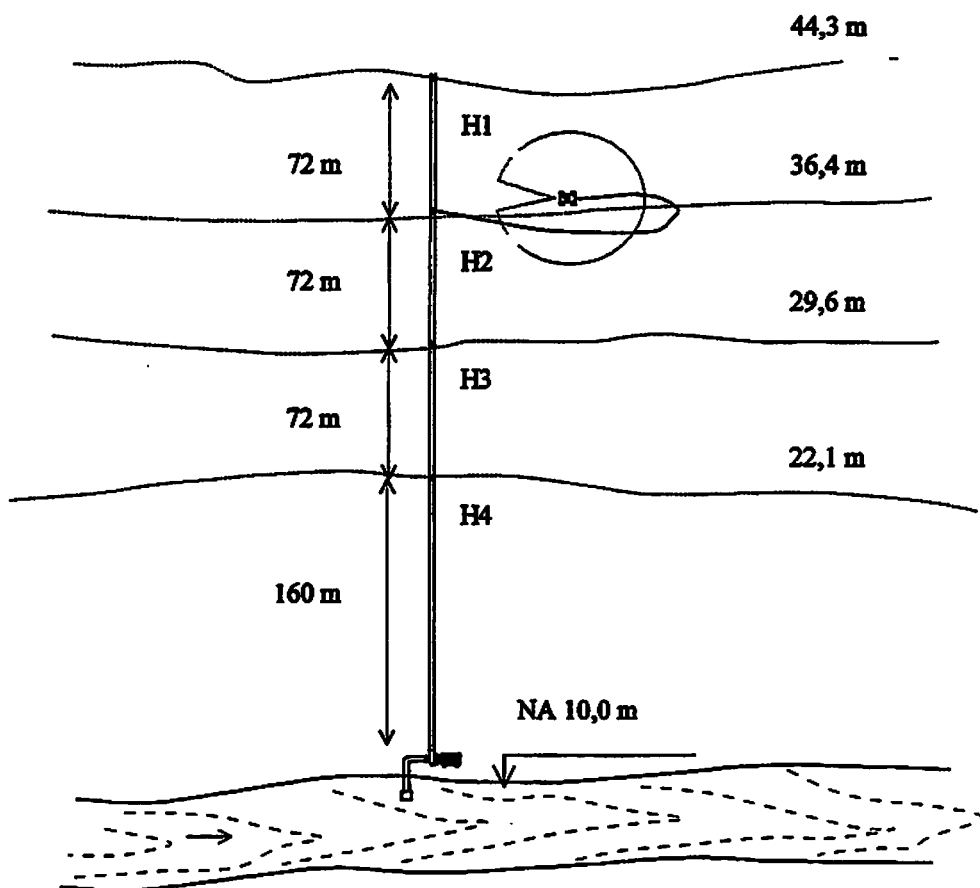


FIGURA 8. Croquis do sistema de irrigação (autopropeido).

A partir destas considerações, determinou-se uma equação da tubulação para cada tomada de irrigação, caracterizando 4 curvas de tubulação, da seguinte forma:

$$K = L \cdot \frac{f}{D^5} \cdot 0,08263 \quad (10)$$

$$H_{man} = HG + K \cdot Q^2 \quad (11)$$

Em que:

H_{man} = altura manométrica (mca);

HG = altura geométrica (m);

Q = vazão (m^3/h);

L = comprimento da tubulação (m);

D = diâmetro (m);

f = fator de atrito (adimensional).

Para o cálculo de f, verificou-se o respectivo regime hidráulico e utilizaram-se os modelos propostos por Mello et al. (1999). Na Tabela 6, tem-se as equações das 4 curvas da tubulação.

TABELA 6. Curvas do sistema calculadas para cada tomada de irrigação.

Tubulação	Equação
Tubulação 1	$H_{man} = 34,3 + 7,0096 \times 10^{-3} \cdot Q^2$
Tubulação 2	$H_{man} = 26,3 + 6,7534 \times 10^{-3} \cdot Q^2$
Tubulação 3	$H_{man} = 19,56 + 6,4973 \times 10^{-3} \cdot Q^2$
Tubulação 4	$H_{man} = 12,1 + 6,2411 \times 10^{-3} \cdot Q^2$

A Figura 9 permite verificar os pontos de trabalho da bomba para cada tomada de irrigação (pontos A1, B2, C2 e D2). Com o uso do inversor de frequência, varia a velocidade de rotação da bomba de forma a obter os novos pontos de operação para cada uma das curvas da tubulação (pontos A1, B1, C1, D1). Desta forma, para se obter a potência elétrica ativa consumida em cada ponto de trabalho da bomba, pode-se utilizar diretamente as equações da Tabela 3.

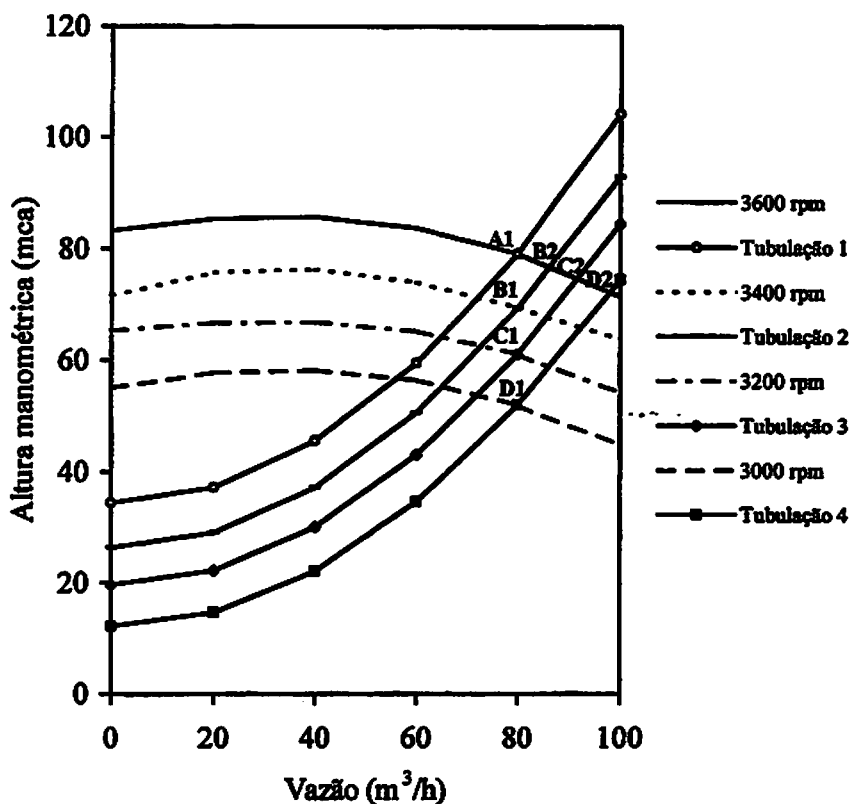


FIGURA 9. Representação das curvas características necessárias à situação criada, com as curvas de tubulação, uma para cada tomada de irrigação.

Procurou-se comparar o uso do inversor de frequência com alguns dos procedimentos mais comuns de controle de pressão na irrigação, com a bomba trabalhando à rotação de 3600 rpm (rotação nominal).

Procedimento 1: este procedimento pode ser considerado como o mais utilizado em projetos de irrigação, uma vez que é possível manter a qualidade, em termos de grau de pulverização do jato d'água e uniformidade, além de se ter facilidade de manejo na prática. Este manejo consiste na introdução de perda de carga accidental nas curvas do sistema (curvas do sistema 2, 3, e 4), transferindo o ponto de trabalho de B2, C2 e D2 para o ponto A1, provocando desperdício de energia. Esta perda de carga pode ser obtida mediante fechamento de registro na saída da motobomba ou através de válvulas, instaladas nas tomadas de irrigação, de forma a reduzir a vazão ao valor desejado, que neste caso é de $80 \text{ m}^3/\text{h}$. A Figura 10 representa esta situação.

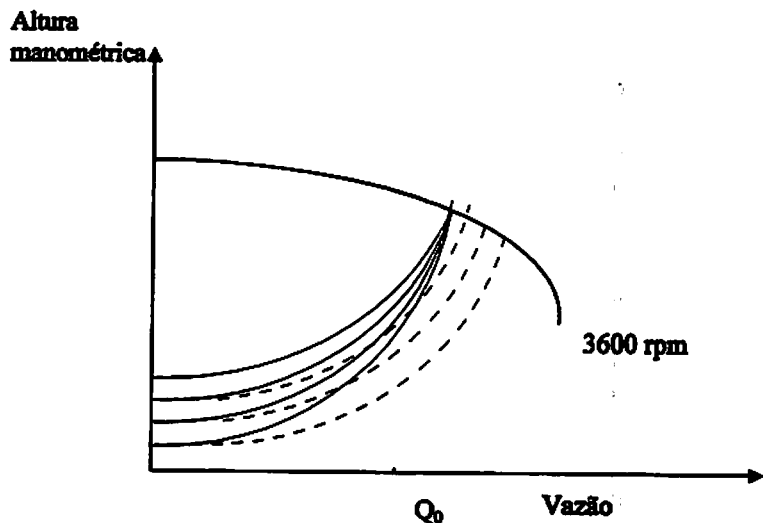


FIGURA 10. Representação do comportamento das curvas do sistema para o procedimento 1.

A potência consumida em cada tomada de irrigação corresponderá ao valor calculado para o ponto de trabalho A1 da motobomba (Tabela 3, polinômio correspondente à rotação de 3600 rpm).

Procedimento 2: para este caso, tem-se a situação de 4 curvas de tubulação, trabalhando com a bomba a 3600 rpm, com pontos de trabalho gerando valores de vazão acima de 80 m³/h (pontos B2, C2 e D2). Porém, aplica-se o mesmo volume de água em todas as tomadas de irrigação, levando-se em conta a quantidade aplicada na tomada de maior altura geométrica (ponto de trabalho A1), uma vez que esta foi determinada pelo projeto. Para que se aplique o mesmo volume nas demais tomadas, basta que a bomba trabalhe com tempos diferenciados os quais correspondem a um percentual do tempo necessário para irrigação da tomada do ponto mais alto (ponto de projeto). São obtidos dividindo-se a vazão do ponto de projeto pela vazão do ponto de trabalho correspondente (B2, C2, D2), provocada pelas curvas da tubulação. Deve-se ressaltar que este procedimento não implica na introdução de perda de carga, porém é de difícil aplicação prática sem automação do sistema.

Para obtenção da potência consumida em cada ponto de trabalho, basta substituir a respectiva vazão no polinômio, que relaciona potência e vazão, para a bomba a 3600 rpm, na Tabela 3.

As comparações foram feitas mediante a redução do consumo energético provocado pelo inversor de frequência em relação ao procedimento adotado. Por exemplo: quando o sistema estiver irrigando a tomada 2, cada um dos procedimentos implicará num consumo de potência neste ponto. A diferença entre a potência consumida no procedimento 1 e aquele obtido com inversor de frequência, proporciona a redução de potência neste ponto. Como tem-se 4 tomadas de irrigação e o mesmo tempo de irrigação em ambas, a redução total de potência foi dada pelo somatório das diferenças em cada ponto que,

multiplicado por um número de horas/ano em cada ponto, resultou na economia de energia ao ano.

Para as comparações entre o inversor de frequência e o procedimento 2, determinou-se qual o tempo necessário para se aplicar o mesmo volume de água trabalhando-se com uma vazão maior que a de projeto. Considerando-se a aplicação de 80 m^3 pelo ponto de trabalho A1 em 1 hora, houve um menor tempo para os demais pontos (B2, C2, D2), uma vez que as vazões destes são maiores que $80 \text{ m}^3/\text{h}$. Multiplicando-se a potência consumida em cada tomada pelo respectivo tempo necessário, encontrar-se-á o consumo de energia em cada tomada para o procedimento 2, para aplicar o mesmo volume que o ponto de trabalho A1 em 1 hora. A diferença entre este procedimento e o inversor de frequência resulta na redução da energia consumida mediante o uso do inversor de frequência em 1 hora. As análises subsequentes são semelhantes ao procedimento adotado no caso anterior.

3.3.2 Análise de projeto considerando diferentes demandas de vazão

Foi idealizado um projeto de irrigação visando ao controle de vazão, considerando-se a motobomba de 25 cv, dimensionada para sua condição ótima de rendimento, quando a mesma trabalha a uma vazão próxima de $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Considerou-se uma área irrigada de 18 ha, com desnível de 43,1 m em relação à captação, para irrigação por inundação de 6 tabuleiros de 3 ha cada. A jornada de trabalho foi de 15 horas diárias e a distância da área à captação, é de 600 m.

Escolheu-se uma tubulação de aço zincado, dimensionada pelo critério de velocidades econômicas, conforme Bernardo (1989) e Reis et al. (1998), encontrando-se um diâmetro nominal de 89 mm. A rugosidade absoluta, sugerida por Azevedo Netto e Alvarez (1991), para este material, foi de 0,125

mm. O cálculo da curva da tubulação para atender a maior demanda foi realizado utilizando-se as equações 10 e 11, chegando-se à seguinte forma:

$$H_{\text{man}} = 43,1 + 0,02051 \cdot Q^2 \quad (12)$$

Em que:

H_{man} = altura manométrica (mca);

Q = vazão (m^3/h).

Na Tabela 7 constam os parâmetros considerados para determinação das vazões necessárias a cada estágio da cultura.

TABELA 7. Representação dos parâmetros agrônômicos utilizados no projeto.

Estágio	Kc	Eto (mm/dia)	Etp (mm/dia)	Duração (dias)	Necessidade (m^3/dia)	Q (m^3/h)	Tempo total (h)
I	0,60	2,78	1,67	35	300	20,0	525
II	0,80	2,69	2,15	40	387	25,8	600
III	1,05	3,33	3,50	50	630	42,0	750
IV	0,85	3,35	2,85	35	513	34,2	525

Pela Figura 11 observam-se os pontos de trabalho da bomba, sob variação de rotação com a curva da tubulação gerada. Cada ponto de trabalho (A, B, C e D) fornece uma vazão correspondente à necessária em cada estágio.

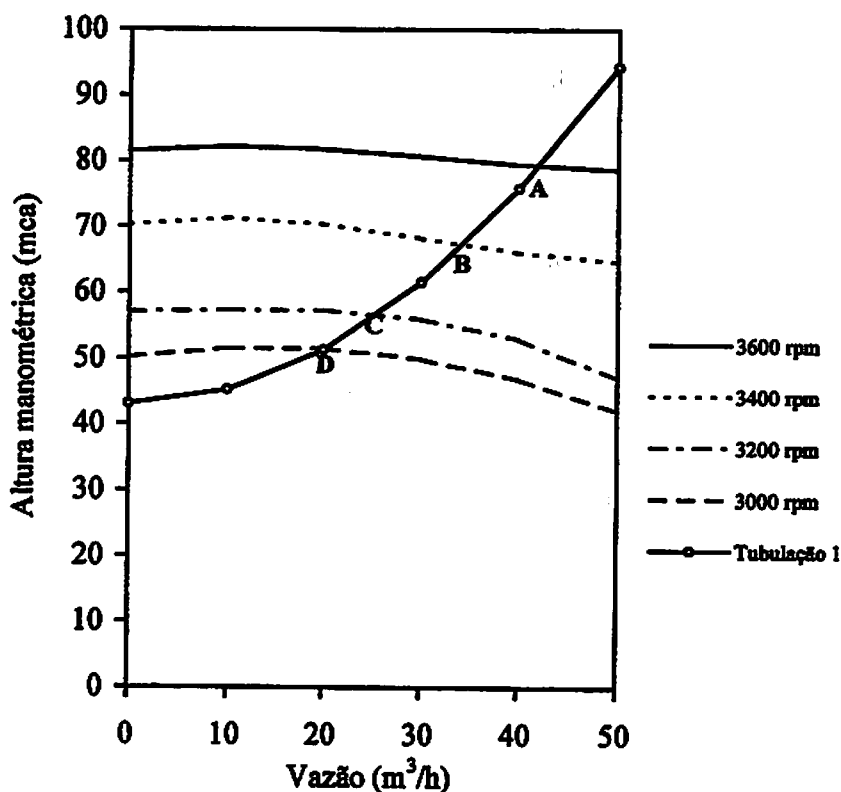


FIGURA 11. Representação dos pontos de trabalho para controle de vazão utilizando inversor de frequência.

A potência consumida por esta situação, em cada ponto de trabalho, pode ser obtida utilizando os polinômios da Tabela 5, que relacionam potência ativa e vazão, para a motobomba de 25 cv.

As comparações a serem feitas consideram os seguintes procedimentos de variação do volume de água aplicado:

Procedimento 1- Corresponde ao manejo em que a bomba trabalha a 3600 rpm e a vazão demandada em cada estágio é controlada por registro, introduzindo perda de carga accidental. Os pontos de trabalho A, B, C e D, gerados por este procedimento, fornecem a vazão necessária a cada estágio da cultura:

Tubulação 2 (ponto C, 4ª estágio) $\Rightarrow H_{man} = 43,1 + 0,031634 \cdot Q^2$

Tubulação 3 (ponto B, 2ª estágio) $\Rightarrow H_{man} = 43,1 + 0,05709 \cdot Q^2$

Tubulação 4 (ponto A, 1ª estágio) $\Rightarrow H_{man} = 43,1 + 0,09667 \cdot Q^2$

A Figura 12 mostra esta situação de trabalho.

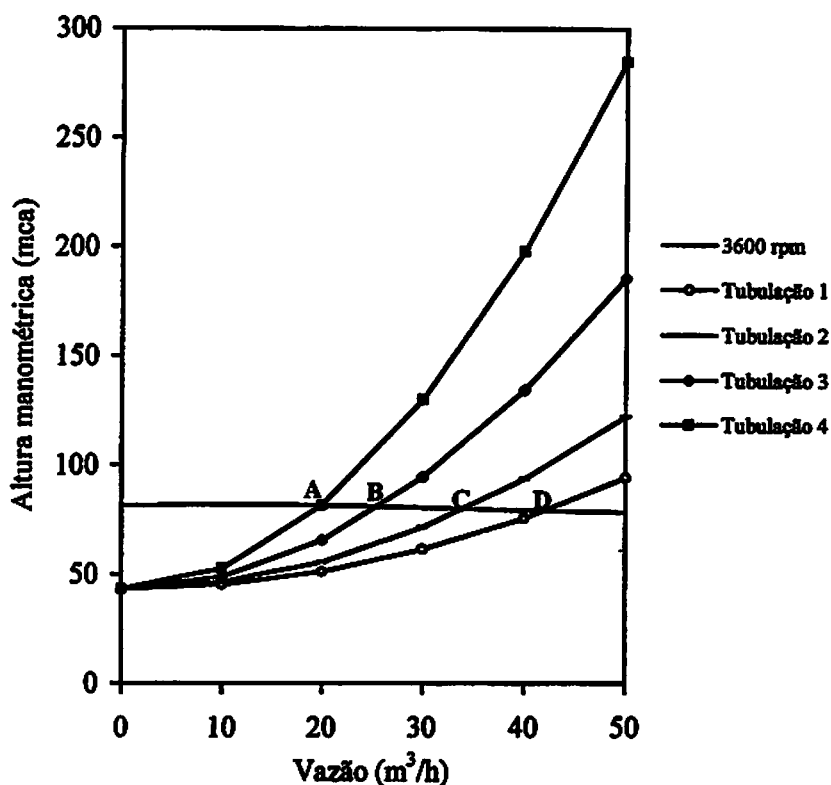


FIGURA 12. Representação dos pontos de trabalho da bomba sob fechamento de válvula para controle de vazão.

A potência consumida em cada ponto foi obtida com o polinômio correspondente à rotação de 3600 rpm, na Tabela 5.

Como os estágios da cultura têm duração diferente, considerou-se a economia de energia no ciclo como sendo a média das reduções de potência, provocada pelo inversor de frequência em cada estágio, ponderando-a pela duração do respectivo estágio. Esta média corresponderá ao valor médio economizado durante o uso do inversor de frequência.

Procedimento 2 – Este procedimento diz respeito ao manejo em que se trabalha com a vazão de projeto, porém, aplicando-a em tempos menores, a fim de se obter o volume necessário ao estágio em que se encontra a cultura.

Trabalha-se com um percentual do tempo projetado para o estágio de maior vazão. Este percentual é calculado dividindo-se a vazão necessária a cada estágio pela vazão máxima de projeto (vazão necessária ao 3º estágio). A energia consumida nos demais estágios corresponde à multiplicação da potência necessária ao 3º estágio por tempos menores. Para o 1º estágio, multiplica-se por 48% do tempo necessário ao 3º estágio; para o 2º estágio, 61% e para o 4º estágio, 81%. A diferença entre esta energia e a consumida, utilizando inversor de frequência, corresponde à economia obtida no estágio em 1 hora. A economia de energia foi calculada da mesma forma que no procedimento 1, ou seja, através da média ponderada pela duração do estágio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Discussão geral

A Tabela 8 (letras a, b e c) apresenta os retornos, em termos de percentual do valor investido na aquisição de um inversor de frequência de 40 cv, em função da redução de potência, tempos anuais de funcionamento e períodos para amortização. Valores negativos significam que o uso do equipamento não é viável. Através desta tabela, é possível analisar a viabilidade econômica deste inversor de frequência para várias situações, ou seja, para reduções de potência entre 3 e 30 cv proporcionada pelo seu uso, não interessando o sistema de irrigação, a condição topográfica, o número de tomadas de irrigação ou qualquer outro parâmetro de projeto.

A discussão será feita considerando as possibilidades econômicas mais usuais para aquisição do equipamento. Primeiramente, o irrigante pode financiar o capital necessário, tendo-se um dado período para pagamento, sob determinada taxa de juros anual, com período para amortização menor que a vida útil do equipamento.

Uma outra forma seria adquiri-lo sem necessidade de financiamento. Neste caso, o irrigante terá toda a vida útil do equipamento para amortizar o investimento, necessitando-se de um número de horas de uso por ano inferior ao da primeira opção, podendo-se, desta forma, facilitar o uso do inversor de frequência em sistemas de irrigação. A taxa de juros pode representar, neste caso, uma aplicação de mercado compatível com o valor do investimento como, por exemplo, caderneta de poupança, e a viabilidade terá de superar tais possibilidades de aplicação.

TABELA 8. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-22	-20,4	-17,1	-10,4	-12	-10,3	-7	-0,3	-8,7	-7	-3,7	3
5	-20,9	-18,2	-12,6	-1,5	-10,9	-8,1	-2,5	8,6	-7,6	-4,8	0,8	11,9
9	-18,6	-13,5	-3,2	17,3	-8,5	-3,4	6,9	27,4	-5,2	-0,1	10,2	30,7
17	-14,3	-4,9	14	51,7	-4,2	5,3	24,1	61,9	-0,9	8,6	27,5	65,2
24,4	-10,2	3,3	30,4	84,5	-0,1	13,5	40,6	94,8	3,2	16,8	43,9	98,1
30	-7,1	9,5	42,8	109,3	3	19,7	53	119,7	6,3	23	56,3	123

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-24	-22,4	-19,1	-12,4	-14	-12,3	-9	-2,3	-11	-9,1	-5,8	0,9
5	-22,9	-20,2	-14,6	-3,5	-12,9	-10,1	-4,5	6,6	-9,7	-6,9	-1,3	9,8
9	-20,7	-15,7	-5,8	14,2	-10,6	-5,6	4,4	24,4	-7,4	-2,4	7,6	27,6
17	-16,3	-6,9	12	49,7	-6,2	3,2	22,1	59,9	-3	6,5	25,3	63,1
24,4	-12,2	1,3	28,4	82,5	-2,1	11,5	38,6	92,8	1,1	14,7	41,8	96
30	-9,1	7,5	40,8	107,3	1	17,7	51	118	4,2	20,9	54,2	121

... continua ...

(b)

TABELA 8, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-26	-24,4	-21,1	-14,4	-16,1	-14,4	-11,1	-4,4	-13	-11,4	-8,1	-1,4
5	-24,9	-22,2	-16,6	-5,5	-15	-12,2	-6,6	4,5	-12	-9,2	-3,6	7,5
9	-22,7	-17,7	-7,8	12,2	-12,7	-7,7	2,3	22,3	-9,7	-4,7	5,3	25,3
17	-18,3	-8,9	10	47,7	-8,3	1,1	20	57,8	-5,3	4,2	23	60,8
24,4	-14,2	-0,7	26,4	80,5	-4,2	9,4	36,5	90,7	-1,2	12,4	39,5	93,7
30	-11,1	5,5	38,8	105,3	-1,1	15,6	48,9	115,6	1,9	18,6	51,9	119

N= período de amortização

(c)

Os gráficos da Figura 13 relacionam o retorno percentual sobre o preço do equipamento em função da potência reduzida pelo inversor de frequência, para taxas de juros de 6, 9 e 12%, com um período de retorno do capital de 5 anos. Neste caso, supõe-se que o irrigante irá financiar a aquisição do equipamento, pagando anuidades durante este período.

Para esta situação observa-se que, dispondo de um inversor de frequência de 40 cv, não é viável, sob qualquer taxa de juros, trabalhar com apenas 500 horas/ano, pois a necessidade de redução de potência seria muito alta para obtenção de retornos positivos. A partir de 1500 horas/ano, pode-se ter situações viáveis para qualquer taxa de juros, devendo-se na análise do projeto, verificar a redução de potência que o inversor de frequência é capaz de proporcionar, trabalhando-se com a menor taxa de juros possível. Percebe-se, por exemplo, que para 1500 horas/ano, a uma taxa de juros anual de 9%, há necessidade de uma redução total de potência no sistema de irrigação maior que 15,5 cv, para se ter retornos positivos. Os valores de 1500 horas/ano e taxa de juros de 9% são razoavelmente realistas em termos de tempo de irrigação (especialmente para região Sudeste do país) e mercado financeiro, respectivamente, podendo-se tomá-los como referência.

Para um sistema de irrigação que necessite de tempos de funcionamento acima de 2500 horas/ano, o inversor de frequência torna-se facilmente viável, independentemente da taxa de juros, uma vez que quanto maior o número de horas/ano, menores serão a necessidade de redução de potência e a influência da taxa de juros.

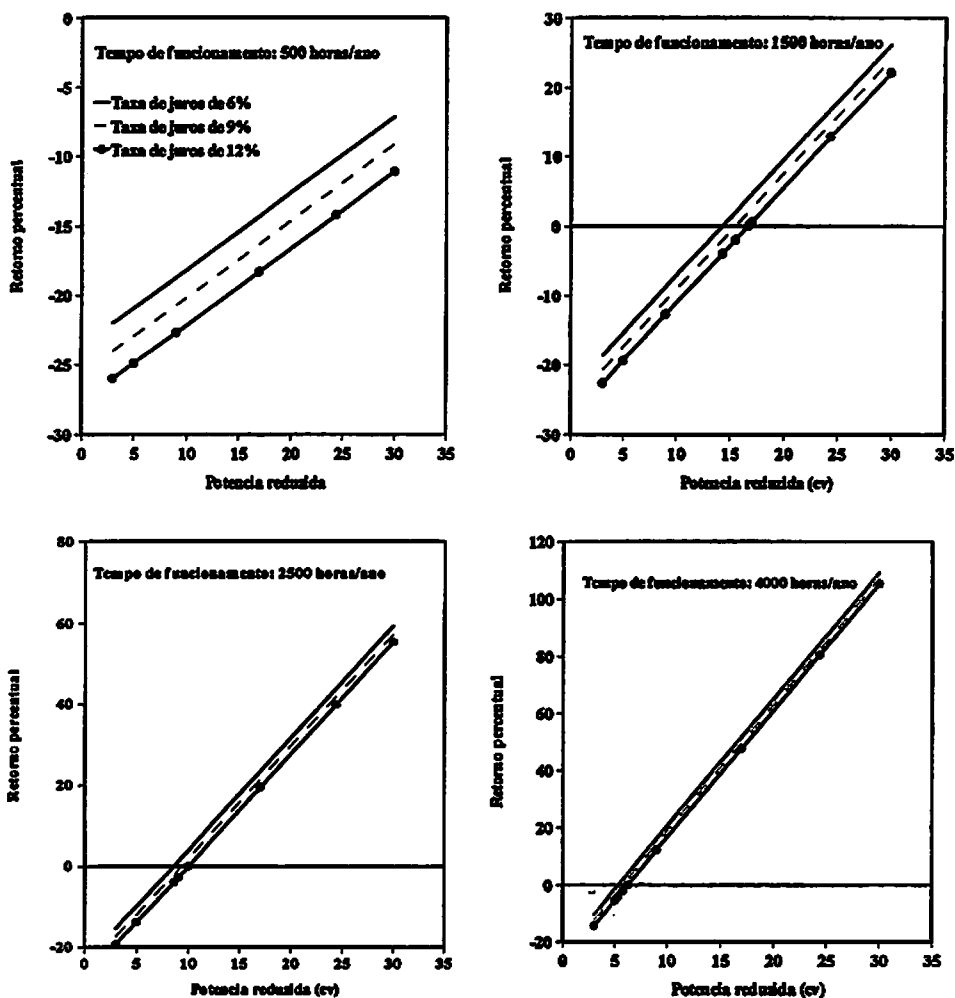


FIGURA 13. Representação da redução de potência e do retorno sobre o preço do equipamento de 40 cv para período de pagamento de 5 anos com taxas de juros de 6, 9 e 12%.

Os gráficos da Figura 14 relacionam as mesmas grandezas que os da Figura 13, porém para períodos de retorno do capital de 15 anos, igual à vida útil do equipamento, como sugerido pelo fabricante. Esta situação pode refletir a aquisição do equipamento sem necessidade de financiamento, com o irrigante dispondo de capital.

É possível verificar que, para um período de funcionamento de 500 horas/ano, já é viável o emprego do inversor de frequência, havendo necessidade de uma redução total de potência de aproximadamente 20 cv para uma taxa de juros de 9%. Comparativamente à avaliação de 5 anos para retorno do capital investido, nota-se que o tempo de 500 horas/ano já pode ser suficiente, dependendo da situação do projeto (redução de potência proporcionada). Pelo trabalho de Hanson et al. (1996), verifica-se que, para uma redução de potência da ordem de 20 HP (~ 20 cv), necessita-se de no mínimo 550 hs/ano, considerando uma taxa de juros de 5% e período de retorno do capital igual à vida útil do equipamento, que no caso foi de 10 anos, mostrando que os resultados estão em consonância com os obtidos pelos citados autores.

Com 1500 horas/ano de funcionamento, há necessidade de uma redução na potência de apenas 7,5 cv para uma taxa de juros de 9%, reforçando a condição de uso do equipamento em sistemas de irrigação. Comparando-se os períodos de retorno do capital, nota-se por exemplo, que dispendo de 5 anos, necessita-se reduzir o dobro de potência que para 15 anos, trabalhando-se com o mesmo tempo de funcionamento, verificando uma maior facilidade de emprego à irrigação para o segundo caso. Hanson et al. (1996) não trabalharam com reduções de potência de nível tão baixo, contudo, concluíram que baixas reduções da potência consumida necessitam de muitas horas de funcionamento por ano, podendo-se não justificar o uso do inversor de frequência na irrigação.

Para um sistema de irrigação em que o inversor de frequência reduz 7,5 cv em relação aos procedimentos mais comuns de manejo da água, o sistema de

bombeamento necessitaria trabalhar no mínimo 3500 horas/ano para pagamento em 5 anos, para não depender da taxa de juros. Este tempo é razoavelmente elevado para se aplicar à irrigação.

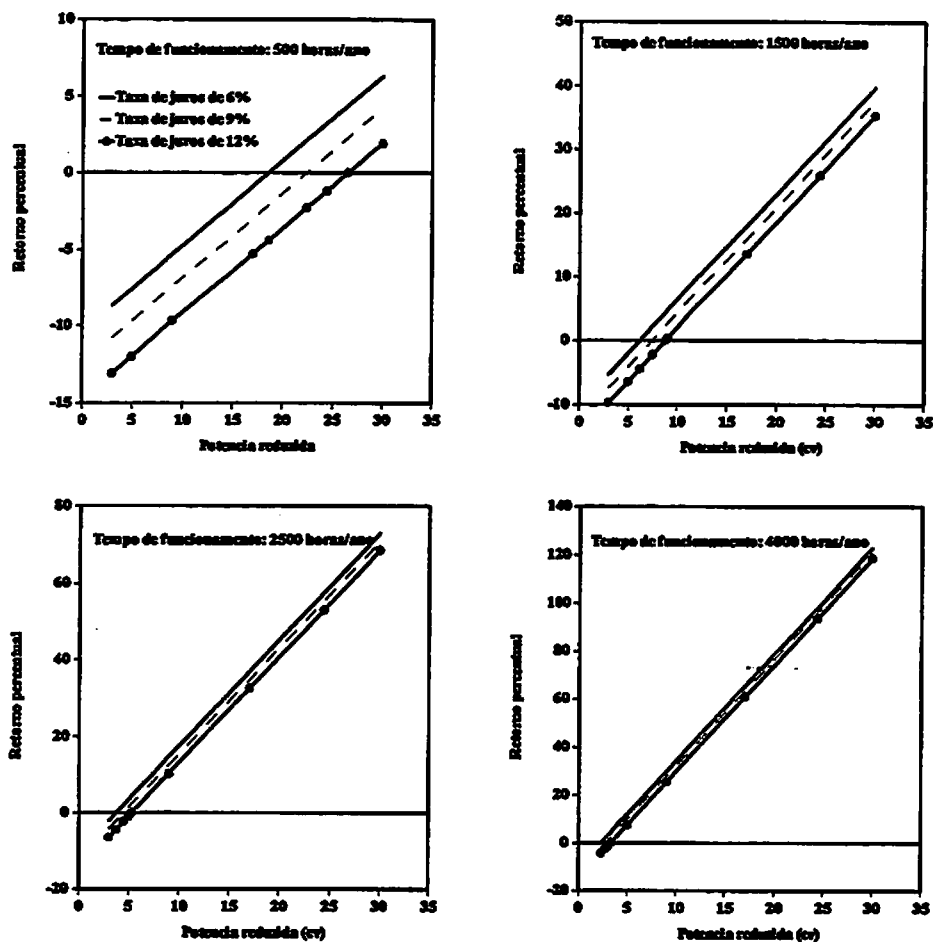


FIGURA 14. Representação da redução de potência e do retorno sobre o preço do equipamento de 40 cv para período de pagamento de 15 anos, com taxas de juros de 6, 9 e 12%.

Através da Tabela 9 é possível comparar várias situações de retorno associadas a taxas de juros, períodos de pagamento do capital, redução de potência e tempos de funcionamento, permitindo-se avaliar a viabilidade do inversor de frequência de 25 cv, uma vez que esta potência em sistemas de irrigação é razoavelmente freqüente (Gilley et al., 1983).

Tomando-se como referência 5 anos para pagamento do capital investido, o sistema deverá funcionar no mínimo 1500 horas/ano e o inversor de frequência proporcionar redução total de potência acima de 16 cv para haver retorno positivo, considerando taxa de juros de 12% ao ano.

Para esta situação, as anuidades são mais elevadas, uma vez que se dispõe de 5 anos para pagamento do capital. Assim, é preciso que haja reduções de potência e tempos de funcionamento anuais relativamente altos para proporcionar benefícios superiores aos custos. Estas características, segundo Hanson et al. (1996) e Scalopi (1986), podem ser limitantes para aplicação em sistemas de irrigação. Contudo, deve-se considerar que haveria pagamento do empréstimo neste período e ainda restariam 10 anos de uso do equipamento, sem custo.

Considerando-se 15 anos para pagamento e taxa de juros de 6%, caracterizando uma situação em que o irrigante dispõe de capital, podendo-se amortizar o equipamento ao longo de toda sua vida útil, trabalhando com 500 horas anuais e com redução de potência próxima de 20 cv, os retornos serão positivos. Deve-se ressaltar que este valor é relativo à redução total de potência, ou seja, deve-se somar as reduções em todas as tomadas de irrigação, não significando que um motor de 25 cv trabalhará com apenas 5 cv.

TABELA 9. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv em função do número de horas de funcionamento ao ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e períodos de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-23,4	-23,3	-22,8	-21,6	-13,3	-13,1	-12,7	-11,5	-10	-9,8	-9,4	-8,2
3	-21,9	-20,8	-18,3	-11	-11,8	-10,7	-8,1	-0,9	-8,5	-7,4	-4,8	2,4
7	-19,5	-16,9	-11	6	-9,3	-6,8	-0,9	16,1	-6,1	-3,5	2,4	19,4
12	-16,5	-12,1	-1,9	27,2	-6,3	-1,9	8,2	37,3	-3	1,3	11,5	40,6
16	-14	-8,2	5,4	44,2	-3,9	1,9	15,5	54,3	-0,6	5,2	18,8	57,6
20	-11,6	-4,3	12,6	61,2	-1,5	5,8	22,8	71,3	1,8	9,1	26,1	74,6

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-25,4	-25,2	-24,8	-23,6	-15,3	-15,1	-14,7	-13,5	-12	-12	-11,5	-10,3
3	-23,9	-22,8	-20,3	-13	-13,8	-12,7	-10,1	-2,8	-11	-9,5	-6,9	0,3
7	-21,5	-18,9	-13	4	-11,3	-8,8	-2,8	14,1	-8,2	-5,6	0,3	17,3
12	-18,4	-14,1	-3,9	25,2	-8,3	-3,9	6,2	35,4	-5,1	-0,8	9,4	38,5
16	-16	-10,2	3,4	42,2	-5,9	-0,1	13,5	52,3	-2,7	3,1	16,7	55,5
20	-13,6	-6,3	10,7	59,2	-3,5	3,8	20,8	69,3	-0,3	7	24	72,5

... continua ...

(b)

TABELA 9, Cont.

Redução de potência	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
(cv)												
0,5	-27,4	-27,3	-26,8	-25,6	-17,4	-17,2	-16,8	-15,6	-14	-14,2	-13,8	-12,6
3	-25,9	-24,8	-22,3	-15	-15,9	-14,8	-12,2	-5	-13	-11,8	-9,2	-1,9
7	-23,5	-20,9	-15	2	-13,5	-10,9	-5	12	-10	-7,9	-1,9	15
12	-20,5	-16,1	-5,9	23,2	-10,4	-6,1	4,1	33,2	-7,4	-3	7,1	36,3
16	-18	-12,2	1,4	40,2	-8	-2,2	11,4	50,2	-5	0,8	14,4	53,2
20	-15,6	-8,3	8,6	57,1	-5,6	1,7	18,7	67,2	-2,6	4,7	21,7	70,2

(c)

N= período de amortização

Considerando-se 1500 horas/ano, com reduções de 12 cv, os retornos são positivos independentemente da taxa de juros, sendo de aplicabilidade mais razoável à irrigação que a situação de 5 anos para pagamento. Avaliando-se, por exemplo, um tempo médio de funcionamento de 2000 horas ao longo do ciclo da cultura, com reduções médias de potência de 7 cv, a economia de energia seria suficiente para retornos positivos independentemente das taxas de juros, justificando o uso do equipamento, especialmente se trabalhar com duas safras anuais. Observa-se portanto, que dispor de 15 anos para pagamento, a aplicabilidade do inversor de frequência em sistemas de irrigação é justificável.

Observa-se que a situação de 5 anos para pagamento tem a vantagem de que, após o tempo estabelecido para pagamento do financiamento, o irrigante terá um período até o final da vida útil do equipamento em que o custo será nulo, podendo-se, a partir daí, reduzir o período de funcionamento. O maior inconveniente poderá ser a necessidade de um número de horas de funcionamento ao ano razoavelmente elevado durante o período de amortização, podendo-se comprometer a viabilidade econômica do inversor de frequência dentro de um manejo de irrigação, especialmente quando se tratar de regiões onde a irrigação tem por objetivo apenas suprir algum déficit hídrico proporcionado por uma distribuição irregular de chuvas ou por veranicos mais prolongados. Estas considerações devem ser ponderadas na tomada de decisão.

De maneira geral deve-se ter atenção especial para com os parâmetros tempo de funcionamento e redução de potência. Ambos são limitantes para tomada de decisão e devem ser cuidadosamente avaliados. Hanson et al. (1996) concluíram que em irrigação o tempo de funcionamento é extremamente determinístico em termos de consumo energético, devendo ser analisado com ponderação. Isto também pode ser observado neste trabalho.

Os gráficos da Figura 15 relacionam o retorno percentual em função da redução de potência, considerando um inversor de frequência de 25 cv e período de amortização de 5 anos, para as referidas taxas de juros e tempos anuais de funcionamento. Observa-se que este inversor de frequência não é viável se o funcionamento anual for de 500 horas, para qualquer taxa de juros.

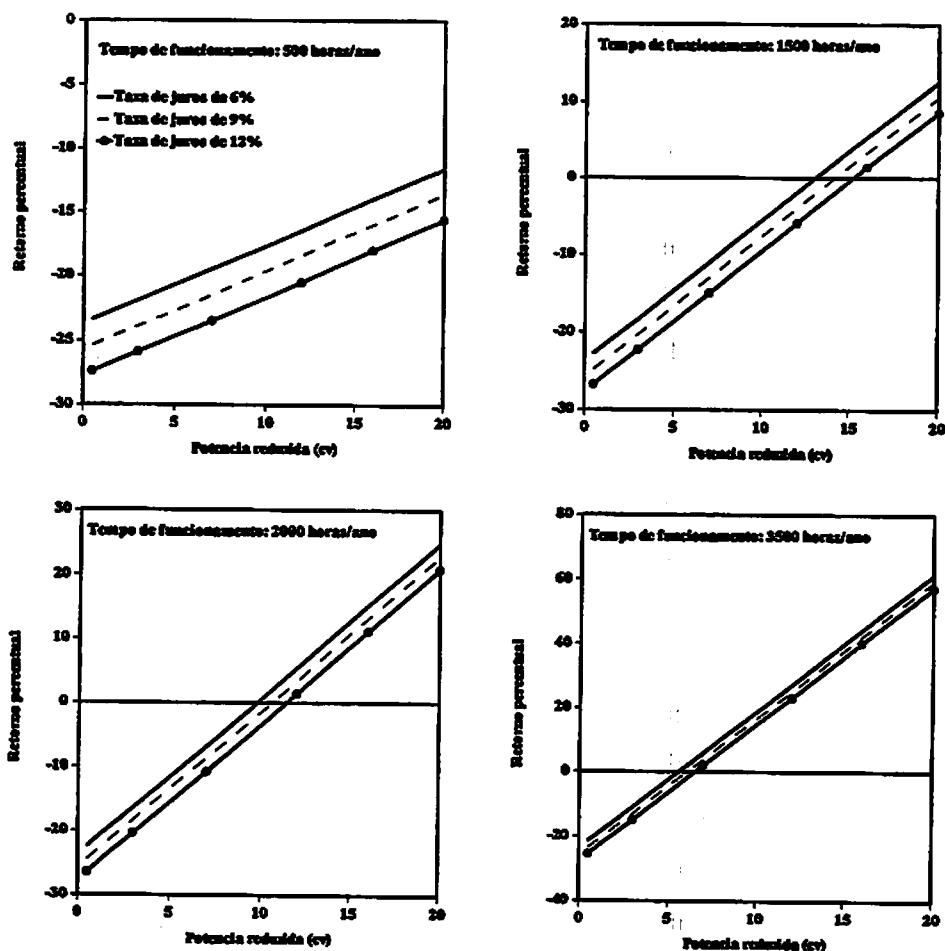


FIGURA 15. Representação da redução de potência e do retorno sobre o preço do equipamento de 25 cv para período de pagamento de 5 anos com taxas de juros de 6, 9 e 12%.

Considerando 1500 horas anuais e taxa de juros de 9%, observa-se que o equipamento torna-se viável para uma redução total de potência próxima de 13 cv. Com o equipamento de 40 cv, a redução total necessária para esta mesma situação é de 15,5 cv. A necessidade de redução de potência para ambos os inversores, para retornos positivos ser próxima, deve-se ao fato de que os preços do equipamento não estão, atualmente, proporcionais, à sua potência, como sugere Hanson et al. (1996), ou seja, o preço do inversor de frequência de 25 cv está relativamente alto, comparado ao de 40 cv.

Pela Figura 16, a qual considera situações de retorno para amortização em 15 anos, observa-se que o inversor de frequência pode ser viável para 500 horas anuais, desde que se trabalhe com taxa de juros menor que 9% e reduções de potência acima de 17 cv.

Considerando 1500 horas/ano e taxa de juros de 9%, há uma necessidade de redução total de potência de apenas 6,5 cv, mostrando que o equipamento pode ser viável.

Estas análises caracterizam a viabilidade de maneira geral e independem da forma como o inversor de frequência será utilizado. O que interessa para a definição da viabilidade é a redução total de potência que o equipamento irá proporcionar ao sistema de irrigação e especialmente, o manejo da irrigação, pois este definirá o tempo total de funcionamento do sistema de bombeamento durante o ano. Os tópicos seguintes analisam o funcionamento do inversor de frequência, aplicando-o aos principais manejos da irrigação, que são os controles de pressão e vazão, nos quais são sugeridos alguns procedimentos para análise da viabilidade econômica deste equipamento em projetos de irrigação.

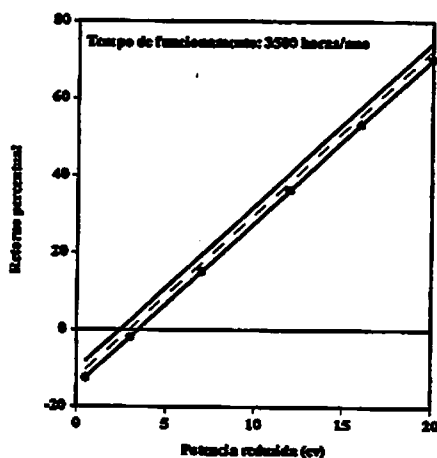
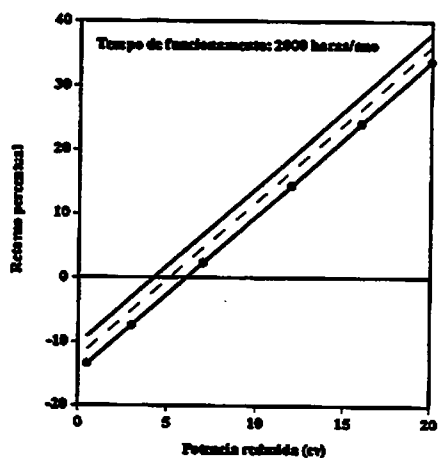
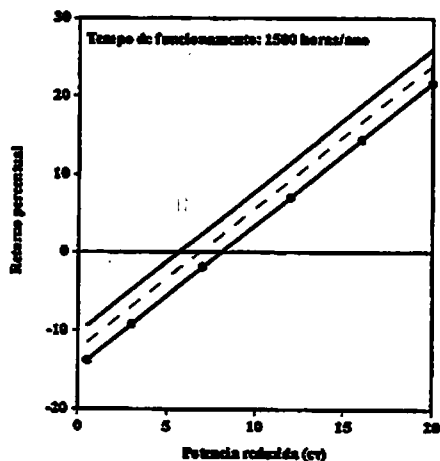
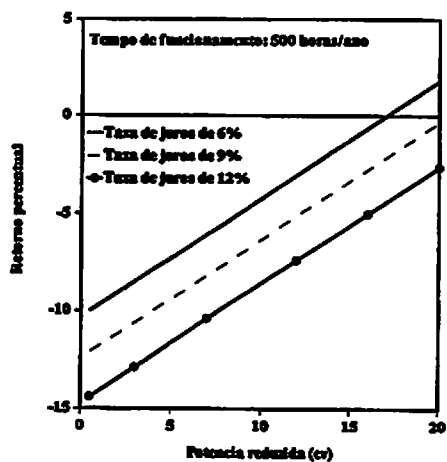


FIGURA 16. Representação da redução de potência e do retorno sobre o preço do equipamento de 25 cv para período de pagamento de 15 anos, com taxas de juros de 6, 9 e 12%.

4.2 Análise dos exemplos de aplicação

4.2.1 Análise de viabilidade considerando diferentes demandas de altura manométrica

A diferença entre o uso do inversor de frequência e os procedimentos de controle de pressão considerados, proporcionou reduções da potência consumida, para o projeto de irrigação em questão, de 24,4 cv e 17 cv respectivamente, para os procedimentos 1 e 2. A Figura 17 mostra a economia anual de energia proporcionada pelo inversor de frequência em função do número de horas trabalhadas por ano. Verifica-se que o manejo que proporcionou uma menor redução de energia pelo uso do inversor de frequência foi o procedimento 2, apesar de sua difícil aplicabilidade prática. Isto era de se esperar pelo fato de que não há introdução de perda de carga localizada por registros ou válvulas, não havendo desperdício de energia. Esta situação ocorreu pelo fato de que o inversor de frequência mantém a motobomba trabalhando à vazão de 80 m³/h, alterando apenas a rotação, o que de acordo com as leis de Rateaux, não altera o rendimento da bomba. O projeto foi dimensionado para o ponto de máximo rendimento, porém, trabalhando-se com o procedimento de tempos menores, possivelmente o rendimento da bomba tenha caído. Conforme verificado por Yanagi Junior et al. (1997), a curva de rendimento cresce até uma determinada vazão, vindo a decrescer a partir deste ponto, ou seja, para vazões maiores.

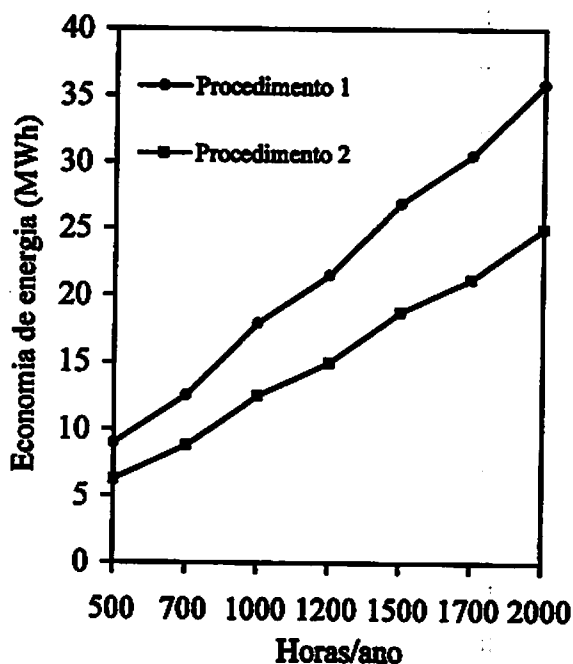


FIGURA 17. Representação da economia anual de energia, em MWh proporcionada pelo inversor de frequência, em comparação com os procedimentos considerados, em função do número de horas de trabalho por ano.

4.2.1.1 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 1

A Tabela 10 apresenta a redução de potência provocada pelo uso do inversor de frequência em relação ao procedimento 1 (fechamento de registro ou uso de válvula). Com a redução total, é possível, através da Tabela 8, realizar análises da viabilidade do equipamento para este projeto.

TABELA 10. Redução de potência proporcionada pelo inversor de frequência em relação ao procedimento 1.

Tomada de irrigação	Inversor de frequência (cv)	Procedimento 1 (cv)	Redução de potência (cv)
I	32,69	32,69	0
II	28,56	32,69	4,13
III	24,18	32,69	8,51
IV	20,96	32,69	11,73
		Total	24,37

Pela Figura 18, avalia-se o retorno percentual provocado pelo uso do inversor de frequência em comparação com o procedimento 1, para diversas situações de tempo anual de funcionamento e taxa de juros.

Para um período de pagamento de 5 anos, o tempo de irrigação em cada tomada deverá ser no mínimo 1000 horas/ano para uma taxa de juros entre 6 e 9%. Trabalhando-se com juros de 12% ao ano, necessita-se de pelo menos 1100 horas/ano.

Em se tratando de períodos de pagamento de 15 anos, o sistema poderá trabalhar 500 horas/ano, que haverá retornos positivos para taxas de juros inferiores a 9%. Para não haver dependência da taxa de juros e obter retornos positivos, há necessidade de aproximadamente 750 horas/ano de funcionamento da irrigação em cada tomada. Nota-se que o tempo necessário de funcionamento para haver retornos positivos, dispondo-se de 15 anos para pagamento, é consideravelmente inferior àquele necessário para 5 anos, proporcionando maior facilidade de emprego à irrigação.

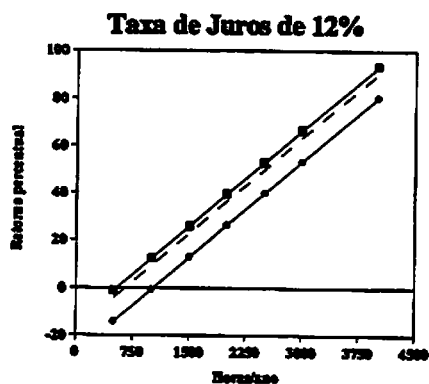
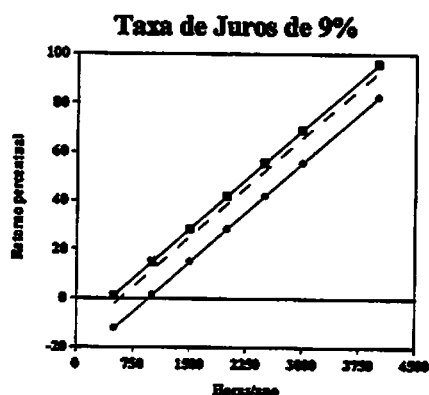
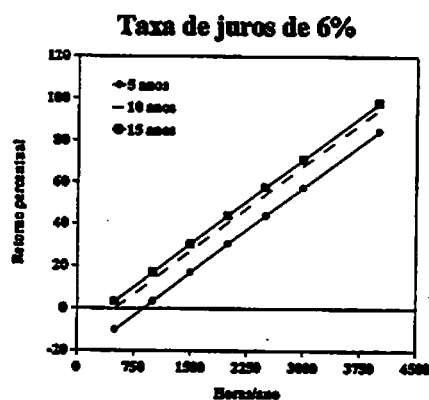


FIGURA 18. Comparação dos retornos, em termos percentuais, para diversas horas de funcionamento ao ano, taxas de juros e períodos de pagamento para o estudo comparativo 1.

Deve ser observado que este procedimento de controle de pressão é o mais empregado, pois mantém-se a uniformidade de lâmina aplicada e o grau de

pulverização da água, uma vez que a pressão e a vazão adequadas ao funcionamento do sistema serão empregadas.

4.2.1.2 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 2

Este estudo permite avaliar a viabilidade do inversor de frequência em comparação com o procedimento em que se trabalha com tempos menores de irrigação para vazões maiores aplicando-se o mesmo volume de água projetado. Este procedimento é, do ponto vista de consumo energético, o de melhor desempenho, apesar de seu manejo no campo, sem automação, ser relativamente complicado. A Tabela 11 permite verificar a redução de potência provocada pelo inversor de frequência durante 1 hora. Com a redução total, pode-se consultar a Tabela 8 para análise do retorno para esta comparação, de maneira semelhante ao caso anterior.

TABELA 11. Redução de potência provocada pelo inversor de frequência em relação ao procedimento 2, para o exemplo criado.

Tomada de irrigação	Inversor de frequência (cv em 1 hora)	Percentual do tempo	Procedimento 2 (cv)	Redução de potência (cv)
I	32,69	100,0	32,69	0
II	28,56	92,3	31,31	2,75
III	24,18	86,8	30,27	6,09
IV	20,96	81,1	29,13	8,17
			Total	17,0

Utilizando a Tabela 8, observa-se que, trabalhando-se com uma taxa de juros de 12% ao ano e períodos de pagamento de 5 anos (situação econômica menos favorável), o sistema deverá funcionar no mínimo 1500 hs/ano para não haver retorno negativo; ainda considerando-se este tempo de funcionamento, a uma taxa de juros de 9%, haverá retorno positivo próximo a 2% e a uma taxa de 6%, retorno positivo de 5%. Esta é uma situação em que a necessidade de funcionamento do inversor de frequência seja relativamente alta, tendo-se uma dificuldade maior para sua aplicação ao projeto. Se o manejo deste sistema de irrigação necessitar de um tempo de funcionamento inferior a 1500 horas/ano, o inversor de frequência não será viável, para um período de pagamento de 5 anos. A Figura 19 mostra esta situação. Em se tratando de período de pagamento de 10 anos, há uma grande redução no número de horas necessárias. Dispondo-se de 1000 horas/ano para uma taxa de juros de 12%, ocorrerá um pequeno retorno positivo de 1%; para período de pagamento de 15 anos, este retorno seria próximo de a 4%.

Objetivando uma análise mais próxima da situação que é praticada para equipamentos de irrigação, um período de pagamento de 5 anos a uma taxa de juros de 9% são parâmetros mais realistas e podem ser tomados como referência para um estudo definitivo da viabilidade. Com tais parâmetros, verifica-se que trabalhando 1500 horas/ano, haverá um retorno positivo sobre o preço do inversor de frequência de aproximadamente 3%, caracterizando a viabilidade do equipamento.

Deve-se considerar que, para período de pagamento de 5 anos, o irrigante quitaria o equipamento nos primeiros 5 anos de uso. Como o equipamento possui uma vida útil de 15 anos, o irrigante ainda teria 10 anos de uso tendo-se custo zero neste período, ou seja, o número de horas de funcionamento poderia ser reduzido, e ainda sim, o retorno ser positivo. Isto

pode ser feito se o número de horas de funcionamento for compatível com a necessidade de irrigação nos primeiros 5 anos.

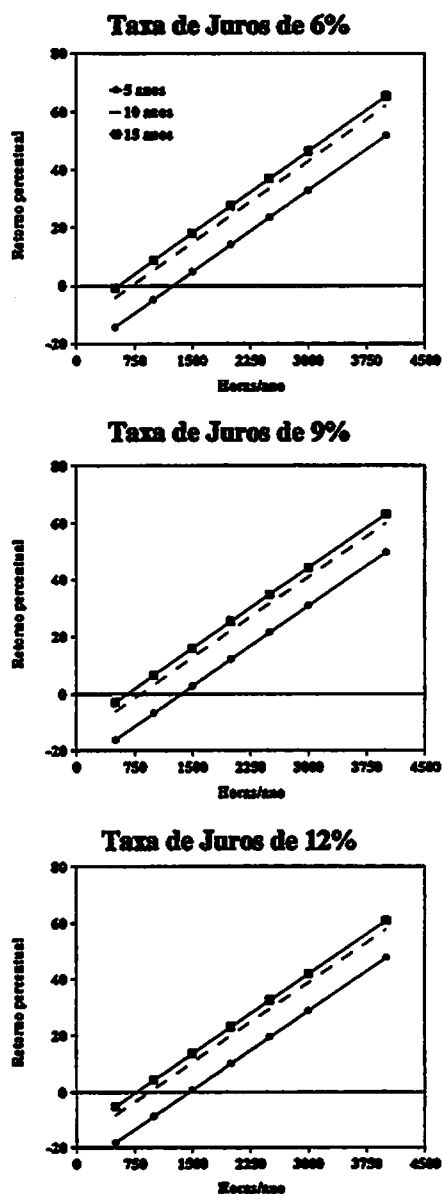


FIGURA 19. Comparação dos retornos, em termos percentuais, para diversas horas de funcionamento por ano, taxas de juros e períodos de pagamento para o estudo comparativo 2.

Para a análise em questão, verifica-se que de maneira geral, o sistema de irrigação deverá trabalhar com um número de horas de funcionamento ao ano superior a 500 horas, pois, caso contrário, a economia de energia não fornecerá um retorno positivo. Dispondo de 15 anos para pagamento do investimento e taxa de juros de 12% ao ano, se o irrigante trabalhar 1000 horas/ano, haverá um pequeno retorno positivo de 4,2% ao ano; isto quer dizer que haverá um "lucro" 4,2% maior que se o capital investido na aquisição do equipamento fosse colocado em uma aplicação financeira com taxas de juros de 12% ao ano (a caderneta de poupança está em torno de 6% ao ano). A viabilidade ou não do inversor de frequência depende, portanto, fundamentalmente do tempo necessário de irrigação.

4.2.2 Análise de viabilidade considerando diferentes demandas de vazão

4.2.2.1 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 1

A Tabela 12 mostra a redução de potência associada a tempos de funcionamento correspondentes a cada estágio de desenvolvimento da cultura, considerando-se o procedimento 1 de manejo da vazão (controle de vazão feito por registro).

Calculando-se a média da potência reduzida, ponderada pela duração de cada estágio, encontra-se uma redução de 4,45 cv em 1650 horas de uso do inversor de frequência para uma safra. Como se consideraram duas safras ao ano, o tempo total de funcionamento do equipamento ao ano será de 3300 horas. Pela Tabela 9, observa-se que o inversor de frequência não será viável para amortização em 5 anos. Contudo, considerando-se 10 anos para amortização, o equipamento será viável para taxas de juros inferiores a 9% e com 15 anos, será viável independentemente da taxa de juros.

TABELA 12. Reduções de potência proporcionadas pelo inversor de frequência em relação ao procedimento de fechamento de válvula.

Estágio	Q (m³/h)	Pot. 1 (cv)	Pot. 2 (cv)	ΔP (cv)	Tempo total (horas)
I	20,0	8,3	14,74	6,44	525
II	25,8	11,88	16,36	4,48	600
III	42,0	20,93	20,93	0	750
IV	34,2	16,29	18,73	2,44	525

Pot. 1 – potência gerada pelo uso do inversor de frequência

Pot. 2 – potência gerada pelo uso de válvula

ΔP – redução de potência

Se o irrigante dispuser de capital para aquisição do equipamento e conseqüentemente amortizá-lo ao longo de toda sua vida útil, o inversor de frequência será viável, obtendo-se retornos positivos consideráveis, independentemente da taxa de juros.

4.2.2.2 Comparação entre inversor de frequência e o procedimento de manejo 2

A Tabela 13 mostra a potência reduzida pelo inversor de frequência em comparação com o procedimento 2 (alteração do tempo de funcionamento, trabalhando-se com a vazão projetada).

Da mesma forma, a média ponderada da redução de potência para a primeira safra foi de 1,1 cv em 1650 horas de funcionamento do inversor de frequência. Com o tempo de funcionamento de 3300 horas, pela Tabela 9, o

inversor de frequência não será viável para qualquer período de amortização ou taxa de juros.

TABELA 13. Representação da redução de potência pelo uso do inversor de frequência em comparação com o procedimento de redução do tempo de bombeamento.

Estágio	Q1	Q2	E1 (kWh)	E2 (kWh)	Porcentagem do tempo	T1	ΔE (kWh)	Pot reduzida (cv)
I	20,0	42,0	6,102	7,385	48	525	1,283	1,75
II	25,8	42,0	8,733	9,385	61	600	0,652	0,90
III	42,0	42,0	15,386	15,386	100	750	0	0
IV	34,2	42,0	11,973	12,46	81	525	0,487	0,66

Q1 – Vazão aplicada pelo procedimento com inversor de frequência, em m³/h;

Q2 – Vazão aplicada pelo procedimento de variação do tempo de irrigação, em m³/h;

E1 – Energia consumida em 1 hora com inversor de frequência;

E2 – Energia consumida em um percentual de tempo necessário para aplicar volume correspondente ao aplicado pelo uso de inversor de frequência;

T1 – Tempo de trabalho com o inversor de frequência, em horas;

ΔE – Redução da energia consumida em 1 hora pelo uso do inversor de frequência;

Porcentagem de tempo – Corresponde ao percentual de tempo trabalhado pelo sistema de bombeamento para aplicar o mesmo volume que o procedimento com inversor de frequência à vazão Q2;

Pot. Reduzida – Redução de potência proporcionada pelo inversor de frequência em 1 hora.

Isto ocorreu devido ao fato de que as reduções de potência obtidas foram muito baixas, mostrando que a melhor opção para este irrigante controlar a vazão ao longo do ciclo da cultura, é variar o tempo de aplicação. Esta pequena economia de energia ocorreu porque houve grandes reduções de vazão. Com

isto, o tempo de funcionamento necessário às situações também ficou bastante reduzido, vindo a refletir no consumo energético, uma vez que este é função direta do tempo de funcionamento. O manejo econômico mais adequado inclui jornadas diárias de 7,2 horas durante o 1º estágio; 9,15 horas para o 2º estágio e 12,15 horas para o 4º estágio. Deve-se deixar claro que o inversor de frequência produziu economia de energia, contudo, esta economia, traduzida em retorno, não supera as anuidades necessárias para pagamento do equipamento.

5 CONCLUSÕES

- a) Para um tempo correspondente à vida útil do inversor de frequência para amortização do investimento, seu emprego pode ser viável, a partir de 500 horas anuais de funcionamento, independentemente da taxa de juros, devendo-se no entanto, avaliar cuidadosamente a redução de potência.
- b) Para período de amortização de 5 anos, o número de horas anuais necessárias para haver retornos positivos é relativamente alto, podendo-se comprometer o uso do inversor de frequência em sistemas de bombeamento para irrigação. Deve-se, neste caso, avaliar, além da redução de potência e tempo de funcionamento, a taxa de juros do financiamento.
- c) A viabilidade econômica do uso de inversor de frequência, em sistemas de irrigação, depende fundamentalmente das variáveis tempo de funcionamento da irrigação e redução de potência proporcionada pelo equipamento, devendo-se analisá-las da melhor forma possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENS, H.G.; PORTO, R. de M.** Para o desempenho de bombas. *Revista DAE*, São Paulo, Imprensa Oficial do Estado S.A – IMESP; v. 49, n.154, p.11-14, jan/mar. 1989.
- ARRUDA, M. A.** Análise de viabilidade da irrigação e participação da energia na composição de custos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE ENERGIA PARA IRRIGAÇÃO, 1, 1988, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: CEMIG, CODI, Ministério da Irrigação, 1988. p.235-243.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A.** *Manual de hidráulica*. 7. ed. São Paulo: E. Blücher, 1991. 335p.
- BERNARDO, S.** *Manual de irrigação*. 5. ed. Viçosa: UFV, 1989. 596p.
- COELHO, S. T.** *Matemática financeira e análise de investimentos*. São Paulo: Ed. Nacional, EDUSP, 1979. 279p.
- COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** *Tarifas Horosazonais azul e verde: manual de orientação ao consumidor*. 2. ed. Rio de Janeiro: CODI, 1994. 26p.
- CONZETT, J. C.; ROBECHKE, J. R.** Acionamentos de velocidade variável aplicados a bombas centrífugas. Tradução e adaptação de C. Racca. *Reliance Electric Ltda.*, São Paulo, p.1-8, julho. 1983.
- CORDEIRO, M. L. R.** Plano de obras de suporte elétrico para irrigação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE ENERGIA PARA IRRIGAÇÃO, 1, 1988, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: CEMIG, CODI, Ministério da Irrigação, 1988. p.83-103.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.** *Efeito da água no rendimento das culturas*. Tradução de Hans Raj Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. Tradução de: Yield response to water.
- DORFMAN, R.** Análise econômica de projetos de irrigação e drenagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, 1988,

Florianópolis. *Anais ... Florianópolis: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM*, 1988. p.225-302.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em cultura de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. *Engenharia Rural*, Piracicaba, v.5, n.1, p.34-53, 1994.

GILLEY, J. R.; MARTIN, D. L.; CLARK, R. N. Size distribution of the on-farm irrigation pumping plants in the U.S. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 26, n.2, p. 406-411, 1983.

GILLEY, J. R.; WATTS, D. G. Possible energy savings in irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, New York, v.103 (IR4), p.445-457, 1977.

GOMES, H.P. *Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1997. 390p.

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, New York, v.122, n.3, p.179-182, 1996.

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

LAMBETH, J.; HOUSTON, J. Adjustable frequency drives saves energy. *Water Environmental and Technology*. v.3, n.5, p.34-34, 1991.

MELLO, C.R. de, FERREIRA, D.F.; CARVALHO, J. A. Equações explícitas para o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 23, n.2, p. 365-371, 1999.

OLITTA, A.F.L. *Os métodos de irrigação*. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1989. 267p.

REIS, J.B.R.S. da; CARVALHO, J. A.; MELLO, C.R. Determinação do diâmetro de mínimo custo em instalações elevatórias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais ... Poços de Caldas: SBEA*, 1998. p.103-105.

REIS, R.P. *Introdução a teoria econômica*. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 107p.

SCALLOPI, E. J. Exigências de energia para irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.21, n.2, p.13-17, 1985.

SCALOPPI, E. J. Potencial para redução do consumo energético em irrigação. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 7, 1986, Brasília. **Anais ... Brasília: SOCIEDADE BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 1986. p. 833-852.

STEPHAN, R. M.; HANITSCH, R. Acionamento de máquinas elétricas e suas perspectivas. In: **WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; SUEMITSU, W. I.** Curso de atualização em eletrônica de potência e aplicações. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1994. 11p.

TIAGO FILHO, G. L. Uso de bombas com rotação variável. Itajubá: EFEL, 1996. 19p. Apostila.

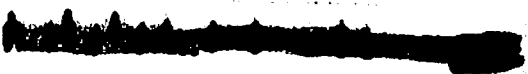
VENTURA FILHO, A. Disponibilidade de energia elétrica nos sistemas interligados no período 1989/95 – disponibilidade para atender aos projetos de irrigação. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE ENERGIA PARA IRRIGAÇÃO**, 1, 1988, Belo Horizonte. **Anais Belo Horizonte: CEMIG, CODI, Ministério da Irrigação**, 1988. p.33-50.

VIANA, A.N.; BRIGHENTI, D.; ALMEIDA, M.T. & NASCIMENTO, M.A. Comportamento, manutenção e especificação de bombas hidráulicas de fluxo e de deslocamento. Itajubá: FUPAI (Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria), s/d. 197 p. Apostila.

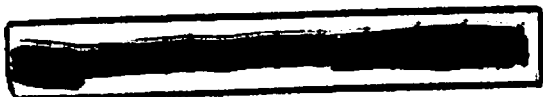
VIEIRA, D.B. Projeto de irrigação por aspersão. In: **BRASIL. Ministério da Irrigação. Programa Nacional de Irrigação. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA.** Curso de elaboração de projetos de irrigação. Brasília: PNI/Fundação CTH, 1986. p. 10.1-10.62.

WEG AUTOMAÇÃO. Inversores de frequência e acionamentos CA/CA. [on line]. http://www.weg.com.br/produtos/automação/port/inv_freq_acion.htm [Capturado em 06 de jun.1999].

YANAGI JUNIOR, T.; FERREIRA, E.; COLOMBO, A.; MELLO, C.R. de. Método matemático para a estimativa analítica das curvas de desempenho


de bombas centrífugas. *Revista Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 21, n.4, p.484-490, 1997.

ZAGGO, S. P.; COLOMBO, A.; GIL, O. F.; RESENDE, F. C. Características hidráulicas de mangueiras de borracha para utilização em sistemas de irrigação com aspersor autopropelido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 17, 1988, Sorocaba. Anais ... Sorocaba: SBEA, 1988. 18p.



ANEXO

ANEXO A

	Página
TABELA 1A Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 20% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	68
TABELA 2A Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	70
TABELA 3A Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	72
TABELA 4A Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	74
TABELA 5A Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 20% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	76

TABELA 6A	Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	78
TABELA 7A	Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	80
TABELA 8A	Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	82
TABELA 9A	Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando redução de 30% no mesmo e aumento de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	84
TABELA 10A	Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando redução de 30% no mesmo e aumento de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização	86

TABELA 1A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 20% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-21,9	-20,1	-16,5	-9,2	-11,8	-10	-6,3	1	-8,5	-6,7	-3	4,3
5	-20,7	-17,7	-11,6	0,5	-10,6	-7,5	-1,5	10,7	-7,3	-4,2	1,8	13,9
9	-18,3	-12,8	-1,9	19,9	-8,1	-2,7	8,2	30,1	-4,8	0,6	11,5	33,3
17	-13,4	-3,1	17,5	58,7	-3,3	7	27,6	68,8	0	10,3	30,9	72,1
24,4	-9	5,8	35,4	94,6	1,2	16	45,6	104,7	4,5	19,3	48,9	108
30	-5,6	12,6	49	121,7	4,6	22,8	59,1	131,9	7,9	26,1	62,4	135,2

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-23,9	-22,1	-18,4	-11,2	-13,8	-11,9	-8,3	-1	-11	-8,8	-5,1	2,1
5	-22,7	-19,6	-13,6	-1,5	-12,5	-9,5	-3,5	8,7	-9,4	-6,3	-0,3	11,8
9	-20,3	-14,8	-3,9	17,9	-10,1	-4,7	6,2	28,1	-7	-1,5	9,4	31,2
17	-15,4	-5,1	15,5	56,7	-5,3	5	25,6	66,9	-2,1	8,2	28,8	70
24,4	-10,9	3,9	33,4	92,6	-0,8	14	43,6	102,7	2,4	17,2	46,7	105,9
30	-7,5	10,7	47	119,8	2,6	20,8	57,2	129,9	5,8	24	60,3	133,1

(b)

... continua ...

TABELA 1A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-25,9	-24,1	-20,5	-13,2	-15,9	-14,1	-10,4	-3,2	-13	-11	-7,4	-0,1
5	-24,7	-21,7	-15,6	-3,5	-14,7	-11,6	-5,6	6,5	-12	-8,6	-2,6	9,6
9	-22,3	-16,8	-5,9	15,9	-12,2	-6,8	4,1	25,9	-9,2	-3,8	7,1	29
17	-17,4	-7,1	13,5	54,7	-7,4	2,9	23,5	64,7	-4,4	5,9	26,5	67,8
24,4	-13	1,8	31,4	90,6	-2,9	11,9	41,5	100,6	0,1	14,9	44,5	103,6
30	-9,6	8,6	45	117,7	0,5	18,7	55	127,8	3,5	21,7	58,1	130,8

N= período de amortização

(c)

TABELA 2A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-21,8	-19,8	-15,9	-8	-11,6	-9,7	-5,7	2,2	-8,3	-6,4	-2,4	5,5
5	-20,5	-17,2	-10,6	2,5	-10,3	-7	-0,5	12,7	-7	-3,7	2,8	16
9	-17,8	-11,9	-0,1	23,5	-7,7	-1,8	10	33,7	-4,4	1,5	13,3	37
17	-12,6	-1,4	20,9	65,6	-2,4	8,7	31,1	75,7	0,9	12	34,4	79
24,4	-7,7	8,3	40,3	104,4	2,4	18,5	50,5	114,6	5,7	21,7	53,8	117,9
30	-4	15,7	55,1	133,9	6,1	25,8	65,2	144	9,4	29,1	68,5	147,3

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-23,7	-21,8	-17,8	-10	-13,6	-11,6	-7,7	0,2	-10	-8,5	-4,5	3,3
5	-22,4	-19,1	-12,6	0,6	-12,3	-9	-2,4	10,7	-9	-5,8	0,7	13,9
9	-19,8	-13,9	-2,1	21,6	-9,7	-3,8	8,1	31,7	-6,5	-0,6	11,2	34,9
17	-14,5	-3,4	18,9	63,6	-4,4	6,7	29,1	73,7	-1,2	9,9	32,2	76,9
24,4	-9,7	6,3	38,4	102,5	0,4	16,5	48,5	112,6	3,6	19,6	51,7	115,8
30	-6	13,7	53,1	131,9	4,1	23,8	63,2	142	7,3	27	66,4	145,2

(b)

... continua ...

TABELA 2 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-25,8	-23,8	-19,9	-12	-15,7	-13,8	-9,8	-1,9	-13	-10,7	-6,8	1,1
5	-24,5	-21,2	-14,6	-1,5	-14,4	-11,1	-4,6	8,6	-11	-8,1	-1,5	11,6
9	-21,8	-15,9	-4,1	19,5	-11,8	-5,9	5,9	29,6	-8,8	-2,9	9	32,6
17	-16,6	-5,4	16,9	61,6	-6,5	4,6	27	71,6	-3,5	7,6	30	74,6
24,4	-11,7	4,3	36,3	100,4	-1,7	14,3	46,4	110,5	1,3	17,4	49,4	113,5
30	-8	11,7	51,1	129,8	2	21,7	61,1	139,9	5	24,7	64,1	142,9

N= período de amortização

(c)

TABELA 3A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	(cv)	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000
3	-22,2	-20,6	-17,5	-11,4	-12	-10,5	-7,4	-1,2	-8,7	-7,2	-4,1	2,1
5	-21,2	-18,6	-13,4	-3,1	-11	-8,4	-3,3	7	-7,7	-5,1	0	10,3
9	-19,1	-14,5	-5,2	13,4	-8,9	-4,3	5	23,6	-5,7	-1	8,3	26,9
17	-15	-6,2	11,3	46,4	-4,8	4	21,5	56,6	-1,5	7,2	24,8	59,9
24,4	-11,2	1,4	26,6	77	-1	11,6	36,8	87,1	2,3	14,9	40,1	90,4
30	-8,3	7,2	38,2	100,1	1,9	17,4	48,3	110,2	5,2	20,7	51,6	113,5

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-24,2	-22,6	-19,5	-13,3	-14	-12,5	-9,4	-3,2	-11	-9,3	-6,2	0
5	-23,1	-20,6	-15,4	-5,1	-13	-10,4	-5,3	5,1	-9,8	-7,3	-2,1	8,2
9	-21,1	-16,4	-7,1	11,4	-10,9	-6,3	3	21,6	-7,8	-3,1	6,2	24,7
17	-16,9	-8,2	9,4	44,5	-6,8	2	19,5	54,6	-3,6	5,1	22,7	57,8
24,4	-13,1	-0,5	24,6	75	-3	9,6	34,8	85,1	0,2	12,8	37,9	88,3
30	-10,2	5,2	36,2	98,1	-0,1	15,4	46,3	108,2	3,1	18,5	49,5	111,4

... continua ...

(b)

TABELA 3 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-26,2	-24,6	-21,5	-15,4	-16,2	-14,6	-11,5	-5,3	-13	-11,6	-8,5	-2,3
5	-25,2	-22,6	-17,4	-7,1	-15,1	-12,5	-7,4	2	-12	-9,5	-4,4	6
9	-23,1	-18,5	-9,2	9,4	-13,1	-8,4	0,9	19,4	-10	-5,4	3,9	22,5
17	-19	-10,2	7,3	42,4	-8,9	-0,2	17,4	52,5	-5,9	2,9	20,4	55,5
24,4	-15,2	-2,6	22,6	73	-5,1	7,5	32,7	83	-2,1	10,5	35,7	86
30	-12,3	3,2	34,2	96,1	-2,2	13,3	44,2	106,1	0,8	16,3	47,2	109,1

N= período de amortização

(c)

TABELA 4A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-22,4	-21,1	-18,5	-13,3	-12,3	-11	-8,4	-3,1	-9	-7,7	-5,1	0,2
5	-21,6	-19,4	-15	-6,3	-11,4	-9,2	-4,9	3,9	-8,1	-5,9	-1,6	7,2
9	-19,8	-15,9	-8	7,7	-9,7	-5,7	2,1	17,8	-6,4	-2,4	5,4	21,1
17	-16,3	-8,9	5,9	35,6	-6,2	1,3	16,1	45,8	-2,9	4,5	19,4	49,1
24,4	-13,1	-2,4	18,9	61,5	-2,9	7,7	29	71,6	0,4	11	32,3	74,9
30	-10,6	2,5	28,6	81	-0,5	12,6	38,8	91,2	2,8	15,9	42,1	94,5

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-24,4	-23,1	-20,5	-15,2	-14,3	-13	-10,3	-5,1	-11	-9,8	-7,2	-1,9
5	-23,5	-21,3	-17	-8,2	-13,4	-11,2	-6,8	1,9	-10	-8	-3,7	5,1
9	-21,8	-17,9	-10	5,7	-11,7	-7,7	0,1	15,9	-8,5	-4,6	3,3	19
17	-18,3	-10,9	4	33,7	-8,2	-0,7	14,1	43,8	-5	2,4	17,3	47
24,4	-15,1	-4,4	16,9	59,5	-4,9	5,7	27	69,6	-1,8	8,9	30,2	72,8
30	-12,6	0,5	26,7	79,1	-2,5	10,6	36,8	89,2	0,7	13,8	40	92,4

(b)

... continua ...

TABELA 4 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-26,4	-25,1	-22,5	-17,3	-16,4	-15,1	-12,5	-7,2	-13	-12,1	-9,4	-4,2
5	-25,6	-23,4	-19	-10,3	-15,5	-13,3	-9	-0,2	-12	-10,3	-5,9	2,8
9	-23,8	-19,9	-12	3,7	-13,8	-9,8	-2	13,7	-11	-6,8	1	16,8
17	-20,3	-12,9	1,9	31,6	-10,3	-2,9	12	41,7	-7,3	0,2	15	44,7
24,4	-17,1	-6,4	14,9	57,5	-7	3,6	24,9	67,5	-4	6,6	27,9	70,5
30	-14,6	-1,5	24,6	77	-4,6	8,5	34,7	87,1	-1,6	11,5	37,7	90,1

N= período de amortização

(c)

TABELA 5 A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 20% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-23,4	-23,2	-22,7	-21,4	-13,3	-13,1	-12,6	-11,3	-10	-9,8	-9,3	-8
3	-21,8	-20,6	-17,8	-9,8	-11,6	-10,4	-7,6	0,3	-8,3	-7,1	-4,3	3,6
7	-19,1	-16,3	-9,8	8,7	-9	-6,2	0,3	18,8	-5,7	-2,9	3,6	22,1
12	-15,8	-11	0,1	31,8	-5,7	-0,9	10,2	42	-2,4	2,4	13,5	45,3
16	-13,2	-6,8	8	50,3	-3	3,3	18,2	60,5	0,3	6,6	21,5	63,8
20	-10,5	-2,6	15,9	68,9	-0,4	7,6	26,1	79	2,9	10,9	29,4	82,3

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-25,4	-25,2	-24,7	-23,4	-15,2	-15,1	-14,6	-13,3	-12	-12	-11,4	-10,1
3	-23,7	-22,5	-19,8	-11,8	-13,6	-12,4	-9,6	-1,7	-10	-9,2	-6,5	1,5
7	-21,1	-18,3	-11,8	6,7	-10,9	-8,2	-1,7	16,8	-7,8	-5	1,5	20
12	-17,8	-13	-1,9	29,9	-7,6	-2,9	8,2	40	-4,5	0,3	11,4	43,2
16	-15,1	-8,8	6	48,4	-5	1,4	16,2	58,5	-1,8	4,5	19,3	61,7
20	-12,5	-4,5	14	66,9	-2,4	5,6	24,1	77	0,8	8,8	27,3	80,2

(b)

... continua ...

TABELA 5 A, Cont.

Redução de potência	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
(cv)												
0,5	-27,4	-27,2	-26,8	-25,4	-17,4	-17,2	-16,7	-15,4	-14	-14,2	-13,7	-12,4
3	-25,8	-24,6	-21,8	-13,9	-15,7	-14,5	-11,7	-3,8	-13	-11,5	-8,7	-0,8
7	-23,1	-20,3	-13,9	4,7	-13,1	-10,3	-3,8	14,7	-10	-7,3	-0,8	17,7
12	-19,8	-15	-3,9	27,8	-9,8	-5	6,1	37,9	-6,7	-2	9,1	40,9
16	-17,2	-10,8	4	46,3	-7,1	-0,8	14,1	56,4	-4,1	2,3	17,1	59,4
20	-14,5	-6,6	11,9	64,9	-4,5	3,5	22	74,9	-1,5	6,5	25	77,9

(c)

N= período de amortização

TABELA 6 A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 10% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-23,4	-23,2	-22,7	-21,2	-13,2	-13	-12,5	-11,1	-10	-9,7	-9,2	-7,8
3	-21,6	-20,3	-17,3	-8,7	-11,4	-10,2	-7,1	1,5	-8,1	-6,9	-3,8	4,8
7	-18,7	-15,7	-8,7	11,4	-8,6	-5,6	1,5	21,5	-5,3	-2,3	4,8	24,8
12	-15,1	-10	2,1	36,5	-5	0,2	12,2	46,6	-1,7	3,5	15,5	49,9
16	-12,3	-5,4	10,7	56,5	-2,1	4,8	20,8	66,7	1,2	8	24,1	70
20	-9,4	-0,8	19,3	76,6	0,7	9,3	29,4	86,7	4	12,6	32,7	90

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-25,4	-25,1	-24,6	-23,2	-15,2	-15	-14,5	-13,1	-12	-11,8	-11,3	-9,9
3	-23,6	-22,3	-19,3	-10,7	-13,4	-12,1	-9,1	-0,5	-10	-9	-6	2,6
7	-20,7	-17,7	-10,7	9,4	-10,6	-7,6	-0,5	19,5	-7,4	-4,4	2,6	22,7
12	-17,1	-12	0,1	34,5	-7	-1,8	10,2	44,6	-3,8	1,3	13,4	47,8
16	-14,2	-7,4	8,7	54,6	-4,1	2,8	18,8	64,7	-0,9	5,9	22	67,9
20	-11,4	-2,8	17,3	74,6	-1,2	7,4	27,4	84,7	1,9	10,5	30,6	87,9

(b)

... continua ...

TABELA 6 A, Cont.

Redução de potência	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	(cv)	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500
0,5	-27,4	-27,2	-26,7	-25,2	-17,3	-17,1	-16,6	-15,2	-14	-14,1	-13,6	-12,2
3	-25,6	-24,3	-21,3	-12,7	-15,6	-14,3	-11,3	-2,7	-13	-11,2	-8,2	0,4
7	-22,7	-19,7	-12,7	7,4	-12,7	-9,7	-2,7	17,4	-9,7	-6,7	0,4	20,4
12	-19,1	-14	-1,9	32,4	-9,1	-3,9	8,1	42,5	-6,1	-0,9	11,1	45,5
16	-16,3	-9,4	6,7	52,5	-6,2	0,6	16,7	62,6	-3,2	3,7	19,7	65,6
20	-13,4	-4,8	15,3	72,6	-3,4	5,2	25,3	82,6	-0,3	8,3	28,3	85,6

(c)

79 N= período de amortização

TABELA 7 A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 30% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-23,5	-23,3	-22,9	-21,8	-13,3	-13,1	-12,7	-11,6	-10	-9,8	-9,5	-8,3
3	-22,1	-21	-18,7	-11,9	-11,9	-10,9	-8,5	-1,8	-8,6	-7,6	-5,2	1,5
7	-19,8	-17,4	-11,9	3,8	-9,6	-7,3	-1,8	14	-6,4	-4	1,5	17,3
12	-17	-12,9	-3,5	23,6	-6,8	-2,8	6,7	33,7	-3,5	0,5	10	37
16	-14,7	-9,3	3,3	39,3	-4,6	0,8	13,4	49,5	-1,3	4,1	16,7	52,8
20	-12,5	-5,7	10	55,1	-2,3	4,4	20,2	65,2	1	7,7	23,5	68,5

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-25,4	-25,3	-24,9	-23,7	-15,3	-15,1	-14,7	-13,6	-12	-12	-11,6	-10,4
3	-24	-23	-20,6	-13,9	-13,9	-12,9	-10,5	-3,8	-11	-9,7	-7,3	-0,6
7	-21,8	-19,4	-13,9	1,9	-11,6	-9,3	-3,8	12	-8,5	-6,1	-0,6	15,2
12	-19	-14,9	-5,4	21,6	-8,8	-4,8	4,7	31,7	-5,7	-1,6	7,9	34,9
16	-16,7	-11,3	1,3	37,4	-6,6	-1,2	11,4	47,5	-3,4	2	14,6	50,7
20	-14,4	-7,7	8,1	53,1	-4,3	2,4	18,2	63,2	-1,1	5,6	21,4	66,4

(b)

... continua ...

TABELA 7 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-27,5	-27,3	-26,9	-25,8	-17,4	-17,2	-16,9	-15,7	-14	-14,2	-13,8	-12,7
3	-26,1	-25	-22,7	-15,9	-16	-15	-12,6	-5,9	-13	-12	-9,6	-2,9
7	-23,8	-21,4	-15,9	-0,2	-13,8	-11,4	-5,9	9,9	-11	-8,4	-2,9	12,9
12	-21	-16,9	-7,5	19,6	-10,9	-6,9	2,6	29,6	-7,9	-3,9	5,6	32,6
16	-18,7	-13,3	-0,7	35,3	-8,7	-3,3	9,3	45,4	-5,7	-0,3	12,3	48,4
20	-16,5	-9,7	6	51,1	-6,4	0,3	16,1	61,1	-3,4	3,3	19,1	64,1

81

N= período de amortização

(c)

TABELA 8 A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando aumento de 40% no mesmo e de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-23,5	-23,4	-23	-22,1	-13,4	-13,2	-12,9	-11,9	-10	-9,9	-9,6	-8,6
3	-22,3	-21,5	-19,5	-13,7	-12,2	-11,3	-9,3	-3,6	-8,9	-8	-6	-0,3
7	-20,4	-18,4	-13,7	-0,4	-10,3	-8,3	-3,6	9,8	-7	-5	-0,3	13
12	-18	-14,6	-6,6	16,3	-7,9	-4,4	3,6	26,4	-4,6	-1,1	6,9	29,7
16	-16,1	-11,5	-0,9	29,6	-6	-1,4	9,3	39,8	-2,7	1,9	12,6	43,1
20	-14,2	-8,5	4,8	43	-4,1	1,7	15	53,1	-0,8	4,9	18,3	56,4

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-25,5	-25,3	-25	-24	-15,3	-15,2	-14,9	-13,9	-12	-12	-11,7	-10,7
3	-24,3	-23,4	-21,4	-15,7	-14,2	-13,3	-11,3	-5,6	-11	-10,1	-8,1	-2,4
7	-22,4	-20,4	-15,7	-2,4	-12,2	-10,2	-5,6	7,8	-9,1	-7,1	-2,4	10,9
12	-20	-16,6	-8,6	14,3	-9,9	-6,4	1,6	24,4	-6,7	-3,3	4,7	27,6
16	-18,1	-13,5	-2,8	27,6	-8	-3,4	7,3	37,8	-4,8	-0,2	10,5	40,9
20	-16,2	-10,5	2,9	41	-6,1	-0,3	13	51,1	-2,9	2,8	16,2	54,3

(b)

... continua ...

TABELA 8 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-27,5	-27,4	-27	-26,1	-17,5	-17,3	-17	-16	-14	-14,3	-14	-13
3	-26,3	-25,5	-23,5	-17,7	-16,3	-15,4	-13,4	-7,7	-13	-12,4	-10,4	-4,7
7	-24,4	-22,4	-17,7	-4,4	-14,4	-12,4	-7,7	5,6	-11	-9,3	-4,7	8,7
12	-22	-18,6	-10,6	12,3	-12	-8,6	-0,5	22,3	-9	-5,5	2,5	25,3
16	-20,1	-15,5	-4,9	25,6	-10,1	-5,5	5,2	35,7	-7,1	-2,5	8,2	38,7
20	-18,2	-12,5	0,8	39	-8,2	-2,5	10,9	49	-5,2	0,6	13,9	52

(c)

∞ N= período de amortização

TABELA 9A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 40 cv, considerando redução de 30% no mesmo e aumento de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-10,6	-9,3	-6,6	-1,4	-5,5	-4,2	-1,6	3,7	-3,8	-2,5	0,1	5,3
5	-9,7	-7,5	-3,1	5,6	-4,6	-2,4	1,9	10,7	-3	-0,8	3,6	12,3
9	-7,9	-4	3,8	19,6	-2,9	1,1	8,9	24,6	-1,2	2,7	10,6	26,3
17	-4,4	3	17,8	47,5	0,6	8	22,9	52,6	2,3	9,7	24,5	54,2
24,4	-1,2	9,4	30,7	73,3	3,9	14,5	35,8	78,4	5,5	16,2	37,5	80,1
30	1,2	14,3	40,5	92,9	6,3	19,4	45,6	98	7,9	21	47,2	99,6

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-11,5	-10,2	-7,6	-2,4	-6,5	-5,2	-2,6	2,7	-4,9	-3,6	-1	4,3
5	-10,7	-8,5	-4,1	4,6	-5,6	-3,4	0,9	9,7	-4	-1,8	2,5	11,3
9	-8,9	-5	2,9	18,6	-3,9	0,1	7,9	23,6	-2,3	1,7	9,5	25,2
17	-5,4	2	16,8	46,5	-0,4	7,1	21,9	51,6	1,2	8,6	23,5	53,2
24,4	-2,2	8,4	29,8	72,4	2,9	13,5	34,8	77,4	4,4	15,1	36,4	79
30	0,2	13,3	39,5	91,9	5,3	18,4	44,6	97	6,9	20	46,2	98,6

(b)

... continua ...

TABELA 9 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000	500	1000	2000	4000
3	-12,6	-11,3	-8,6	-3,4	-7,5	-6,2	-3,6	1,6	-6	-4,7	-2,1	3,1
5	-11,7	-9,5	-5,1	3,6	-6,7	-4,5	-0,1	8,6	-5,2	-3	1,4	10,1
9	-9,9	-6	1,8	17,6	-4,9	-1	6,9	22,6	-3,4	0,5	8,4	24,1
17	-6,4	1	15,8	45,5	-1,4	6	20,8	50,5	0,1	7,5	22,3	52
24,4	-3,2	7,4	28,7	71,3	1,8	12,5	33,8	76,4	3,3	14	35,3	77,9
30	-0,8	12,3	38,5	90,9	4,2	17,3	43,5	95,9	5,8	18,9	45	97,4

N= período de amortização

(c)

TABELA 10 A. Retornos em termos percentuais sobre o preço do inversor de frequência de 25 cv, considerando redução de 30% no mesmo e aumento de 10% no kWh, em função do número de horas de funcionamento por ano, taxas de juros (a = 6%; b = 9%; c = 12%), redução de potência e período de amortização.

Redução de potência	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	(cv)	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500
0,5	-11,6	-11,5	-11,2	-10,2	-6,6	-6,4	-6,1	-5,1	-4,9	-4,8	-4,4	-3,5
3	-10,4	-9,6	-7,6	-1,9	-5,4	-4,5	-2,5	3,2	-3,7	-2,9	-0,9	4,9
7	-8,5	-6,5	-1,9	11,5	-3,5	-1,5	3,2	16,5	-1,8	0,2	4,9	18,2
12	-6,2	-2,7	5,3	28,1	-1,1	2,4	10,4	33,2	0,6	4	12	34,9
16	-4,2	0,3	11	41,5	0,8	5,4	16,1	46,6	2,5	7	17,7	48,2
20	-2,3	3,4	16,7	54,8	2,7	8,5	21,8	59,9	4,4	10,1	23,4	61,6

(a)

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-12,6	-12,5	-12,1	-11,2	-7,6	-7,4	-7,1	-6,1	-6	-5,8	-5,5	-4,5
3	-11,4	-10,6	-8,6	-2,9	-6,4	-5,5	-3,5	2,2	-4,8	-3,9	-1,9	3,8
7	-9,5	-7,5	-2,9	10,5	-4,5	-2,5	2,2	15,6	-2,9	-0,9	3,8	17,1
12	-7,1	-3,7	4,3	27,2	-2,1	1,4	9,4	32,2	-0,5	2,9	10,9	33,8
16	-5,2	-0,7	10	40,5	-0,2	4,4	15,1	45,6	1,4	6	16,7	47,2
20	-3,3	2,4	15,7	53,8	1,7	7,5	20,8	58,9	3,3	9	22,4	60,5

... continua ...

(b)

TABELA 10 A, Cont.

Redução de potência (cv)	N= 5 anos				N=10 anos				N=15 anos			
	Horas/ano											
	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500	500	800	1500	3500
0,5	-13,6	-13,5	-13,2	-12,2	-8,6	-8,5	-8,1	-7,2	-7,1	-7	-6,6	-5,7
3	-12,4	-11,6	-9,6	-3,9	-7,4	-6,6	-4,6	1,2	-5,9	-5,1	-3,1	2,7
7	-10,5	-8,5	-3,9	9,5	-5,5	-3,5	1,2	14,5	-4	-2	2,7	16
12	-8,2	-4,7	3,3	26,1	-3,1	0,3	8,3	31,2	-1,6	1,8	9,8	32,7
16	-6,2	-1,7	9	39,5	-1,2	3,3	14	44,5	0,3	4,9	15,5	46
20	-4,3	1,4	14,7	52,8	0,7	6,4	19,7	57,9	2,2	7,9	21,2	59,4

(c)

∞ N= período de amortização