

# Eficiência Energética em Sistemas de Irrigação do Tipo Pivô Central

José Wilson L. Nerys, Antonio M. de Oliveira, Antônio Marcos de M. Medeiros, Rafael Nielson e Márcio Leonel S. Miguel

## Resumo

O presente informe técnico apresenta o projeto completo de implantação de dois sistemas de controle para acionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central de 40 cv e outro de 100 cv, ambos localizados na Embrapa Arroz e Feijão, no município de Santo Antônio de Goiás. O projeto é o desdobramento de um projeto de pesquisa e desenvolvimento cujo objetivo era estabelecer uma metodologia de controle de pivôs centrais que resultasse em economia de energia elétrica e desenvolver um equipamento microcontrolado capaz de implementar em sistemas reais a metodologia desenvolvida. São apresentados os objetivos gerais e específicos do projeto, a estimação de economia de energia para os dois pivôs, os sistemas implantados e os resultados obtidos. São apresentadas ainda as linhas gerais de uma nova proposta de um projeto de pesquisa e outro de eficiência energética, como complementos do projeto executado.

## Palavras-Chave

Conversor de Frequência, Eficiência Energética, Pivôs Centrais, Sistemas de Controle, Sistemas de Irrigação

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado de Goiás é um estado predominantemente agrícola e possui hoje mais de 2000 sistemas de irrigação do tipo pivô central. Aproximadamente 57% desses sistemas irrigam áreas superiores a 50 hectares [1]. Em sua grande maioria, esses sistemas de irrigação utilizam motores de indução sem controle de velocidade, o que torna o controle de vazão dependente de ação humana no ajuste de válvulas e outros dispositivos para a obtenção do nível mais adequado de vazão para cada ponto da área irrigada. Esse tipo de controle é denominado de controle dissipativo porque ele modifica a curva do sistema, inserindo perda de carga [2].

O projeto implantado utiliza método não dissipativo, que consiste em alterar a curva da bomba atuando no controle de velocidade do motor de indução utilizando um conversor de frequência (inversor). A referência de velocidade para o inversor é gerada a partir de um sistema desenvolvido numa parceria CELG/UFG, P&D ciclo 2000/2001 e 2001/2002. O sistema de controle leva em consideração a topografia da área irrigada, a partir da informação de pressão em dois pontos do sistema: próximo à torre central e na outra extremidade da linha lateral. O sistema permite a redução de consumo de energia elétrica em duas situações típicas: nos casos de sobre-dimensionamento do sistema de recalque e nos sistemas onde há uma diferença significativa de pressão entre o ponto central do pivô e a parte mais alta da área irrigada [3,4].

Numa etapa anterior ao presente projeto foram analisados os dados de 178 sistemas de pivôs do Estado de Goiás. Desses sistemas, 65% dos motores possuem potência superior a 125 cv. Acima desse valor, as potências padronizadas mais utilizadas nos sistemas do estado são de 150 cv, 175 cv, 200 cv e 250 cv, não existindo valores comerciais intermediários. Isso significa que nos casos de cálculo intermediário, faz-se a opção pela potência subsequente, o que pode implicar em um sobre-dimensionamento superior a 20 cv. O controle já desenvolvido permite que o motor forneça apenas a potência necessária para garantir uma irrigação uniforme, sem exceder a pressão de projeto. Nesse conjunto analisado, quanto à inclinação do terreno, verifica-se que 63% dos pivôs apresentam inclinação superior a 8 mca, que resultam em economia de energia superior a 10%.

O objetivo geral consistia na implantação de um projeto piloto de sistema de irrigação do tipo pivô central do-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Eficiência Energética regulado pela ANEEL e consta dos Anais do II Seminário de Eficiência Energética no Setor Elétrico (II SEENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

José Wilson L. Nerys e Antonio M. de Oliveira trabalham na 'Universidade Federal de Goiás' (e-mails: jwlnerys@gmail.com; melo@eee.ufg.br).

Antônio Marcos de M. Medeiros trabalha na 'Universidade Paulista – UNIP' (e-mail: amarcosmedeiros@yahoo.com.br)

Rafael Nielson e Márcio Leonel S. Miguel trabalham na 'CELG Distribuição S.A.' (e-mails: nielson@celg.com.br e marcio.lsm@celg.com.br).

tado de sistema de controle automatizado de otimização do uso de energia elétrica, levando em conta a topografia do terreno. Esse projeto piloto deverá servir de base para a implantação da metodologia desenvolvida em outros sistemas de pivô central no Estado de Goiás. O objetivo específico consistiu na implantação de dois sistemas automáticos de controle de velocidade para o conjunto motor-bomba dos sistemas de pivô central de 40 cv e 100 cv da Embrapa Arroz e Feijão.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram a metodologia adotada para o cálculo da economia de energia nos sistemas de pivôs centrais e a metodologia de controle do conjunto motor-bomba.

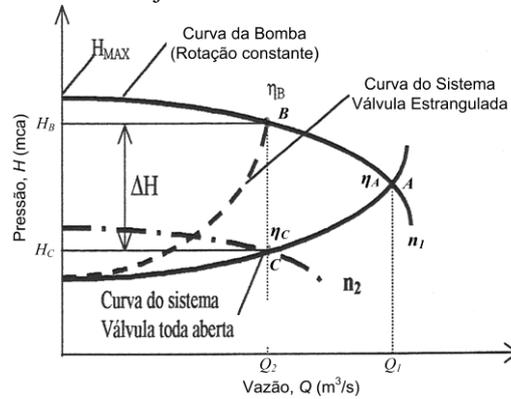


Figura 1 : Curva Pressão Manométrica versus Vazão do sistema e da bomba

Na Figura 1, supondo inicialmente que a bomba está operando com vazão  $Q_1$  (no ponto A) e deseja-se alterar esta vazão para  $Q_2$ , o ajuste desejado pode ser obtido através de dois métodos distintos:

(i) Método dissipativo: utiliza-se válvulas de estrangulamento para alterar a curva do sistema até que esta encontre a curva da bomba no ponto de vazão  $Q_2$  (ponto B) e pressão  $H_B$ . Isso implica na introdução de perda de carga no sistema.

(ii) Método não dissipativo: neste método ajusta-se a curva da bomba, através do controle de velocidade, até esta curva encontrar a curva do sistema no ponto de vazão  $Q_2$  (ponto C) e pressão  $H_C$ , menor que  $H_B$ .

A economia de energia é proporcional à diferença de pressão ( $H_B - H_C$ ) e é dada pela expressão [5]:

$$E_{ECON} = \frac{\rho g (H_B - H_C) Q_2}{\eta} \times t \times 10^{-3} \quad (1)$$

onde  $E_{ECON}$  (kWh) é a energia economizada;  $H_B$  (mca) é a pressão para a vazão  $Q_2$  ( $m^3/s$ ), com ação da válvula estranguladora;  $H_C$  (mca) é a pressão para a vazão  $Q_2$ , com variação de velocidade do eixo da bomba;  $Q_2$  é a vazão reduzida nos pontos B e C;  $\eta$  é o rendimento da bomba nas condições do ponto B;  $g$  é a aceleração da gravidade,  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $\rho$  é a massa específica da água,  $1000 \text{ kg/m}^3$  e  $t$  (h) é o tempo de operação com vazão  $Q_2$ .

O método descrito é usado no programa que faz a estimação de economia a partir dos dados de projeto do sistema de pivô central. A comprovação da efetividade da estimação é feita comparando-se o consumo de energia elétrica para uma volta completa do pivô, sem controle de pressão, com o consumo com controle de pressão.

A Figura 2 mostra o esquemático de um sistema de pivô central e a curva do regulador de pressão dos aspersores. Destacam-se os aspersores das extremidades da linha lateral, onde são adaptados transdutores de pressão.

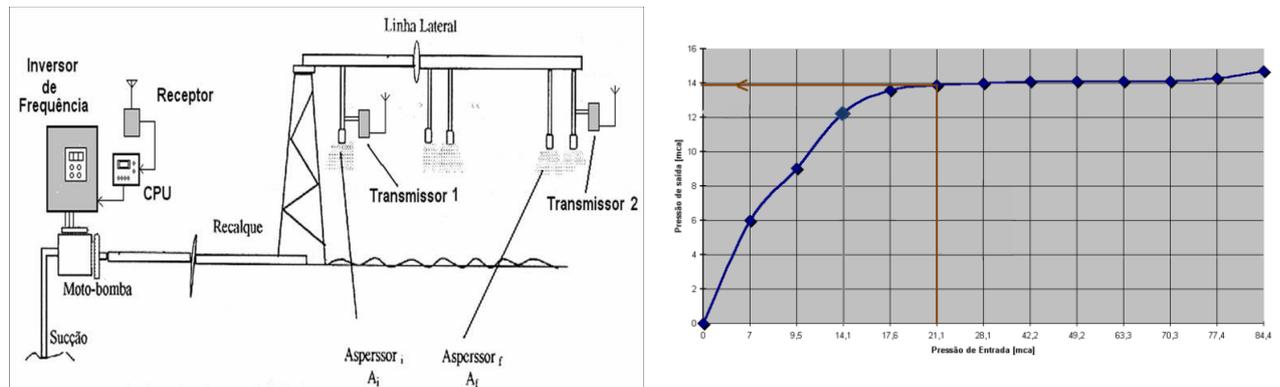


Figura 2: Sistema de pivô central e curva do regulador de pressão

As pressões lidas são enviadas para a central de processamento de dados (CPU), onde são usadas para ajuste da velocidade do conjunto motor-bomba. A presença de reguladores na entrada de cada aspersor garante uma pressão de saída constante, independente da pressão ao longo da linha lateral.

Verifica-se, da curva do regulador de pressão, que para uma pressão de entrada na faixa de 21 mca a 77 mca, a pressão de saída mantém-se em 14 mca. Essa característica do regulador de pressão é fundamental para a metodologia adotada. O objetivo do sistema de controle é manter a pressão na linha lateral em seus valores mínimos, dentro de sua faixa de operação. Assim, quando a extremidade externa da linha lateral está na parte mais baixa do terreno, o controle mantém a pressão de entrada do regulador da extremidade interna em seu valor mínimo; e quando a extremidade externa está na parte mais alta do terreno, o controle mantém a pressão de entrada do regulador mais externo em seu valor mínimo. Dessa forma, garante-se uma pressão de saída constante e com um gasto mínimo de energia. A Tabela I apresenta um quadro-resumo do projeto desenvolvido.

Tabela I. Quadro resumo do projeto de Eficiência Energética.

<b>Quadro resumo do projeto</b>	
Título do projeto	Eficiência Energética em Sistemas de Irrigação do Tipo Pivô Central
Concessionária	CELG Distribuição S.A.
ESCO	Universidade Federal de Goiás – UFG
Cliente	Embrapa Arroz e Feijão – Unidade de Santo Antônio de Goiás
Valor investido	R\$ 152.654,98
Modalidade	Projeto realizado com recursos não reembolsáveis.
Tipo	Rural

## 2. ELABORAÇÃO DO TRABALHO

### 2.1. ETAPAS DO PROJETO

O projeto foi executado de acordo com as seguintes etapas:

1. Análise Inicial – nesta etapa as instalações elétricas e hidráulicas dos pivôs da Embrapa Arroz e Feijão foram verificadas visando a definição das modificações necessárias para a implantação do sistema de controle.
2. Medições Preliminares – nesta etapa foram realizadas medições do consumo de energia dos pivôs para uma volta completa, sem sistema de controle de velocidade.
3. Projeto das Modificações – com o objetivo de evitar interrupções nas irrigações em andamento, optou-se por implementar redundâncias para os sistemas existentes. O sistema de 40 cv era acionado através de uma chave estrela-série/estrela-paralela. Assim, foi implementado um sistema que permite o acionamento através de uma versão mais moderna de chave estrela-série/estrela-paralela ou através do conversor de frequência. O sistema de 100 cv era acionado através de chave compensadora. Foi implementado um quadro de distribuição com inter-travamento que permite o acionamento do motor através da chave compensadora ou através do inversor.
4. Implementação das Modificações – após a compra dos equipamentos necessários as implementações foram feitas inicialmente para o sistema de 40 cv e, posteriormente, para o sistema de 100 cv.
5. Monitoramento e Medições – foram instalados analisadores de energia para registro das grandezas elétricas para uma volta completa dos sistemas de pivô central. Essas grandezas foram comparadas com as medições realizadas para operação sem controle de velocidade.
6. Relatórios – foram apresentados relatórios ao final de cada etapa e ao final do projeto geral.

### 2.2. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Durante a execução do projeto vários fatores contribuíram para o atraso do projeto. Dentre esses fatores destacam-se, para o pivô de 40 cv: falta de energia, por motivos diversos, em várias das visitas da equipe; quadro de comando do motor de 40 cv apresentava ausência de uma das conexões previstas em projeto; a antena utilizada inicialmente no projeto de 40 cv não era adequada, dificultando a transmissão de dados ao longo da linha lateral e do centro do pivô para a casa de comando; danificação de equipamentos por descargas atmosféricas; necessidade de ajustes no programa de controle do inversor e nos parâmetros do inversor, uma vez que o ajuste anterior, adequado ao laboratório, não se mostrou adequado para as condições de campo; danos ao equipamento da extremidade externa da linha lateral, em razão de vibração nessa extremidade. A solução inicial para o problema de vibração foi a mudança do tipo de conexão da antena e a melhor fixação da haste de sustentação dos aspersores, onde o equipamento estava conectado. Posteriormente optou-se por fixar o equipamento na base do pivô central,

deixando apenas o transdutor de pressão conectado ao aspersor; danificação, após o segundo ano de uso, dos equipamentos de aquisição de dados, devido a infiltração de água.

Os fatores principais relativos ao pivô de 100 cv são: interferência entre a transmissão do centro do pivô para a bomba e a recepção da extremidade externa para o centro do pivô, devido ao uso de frequências muito próximas e a proximidade das antenas de recepção e transmissão. Na solução, as antenas foram afastadas e foi utilizado sinal de habilitação, de modo que recepção e transmissão não ocorressem simultaneamente; interferência eletromagnética no sistema de controle dentro do painel do inversor de 100 cv. Foi necessária a instalação de uma caixa blindada na parte externa do inversor e o uso de filtros capacitivos para a alimentação do sistema de controle; falhas intermitentes no anel coletor do pivô central causavam afundamentos de tensão e desligamentos do sistema de aquisição de dados da linha lateral. A limpeza do anel coletor e a substituição da fonte do sistema de aquisição por uma fonte mais robusta sanaram o problema; as transmissões do sistema de 100 cv apresentavam erros de transmissão dependendo da localização do pivô central na área irrigada, devido a distância entre o pivô e a captação de água. A mitigação do problema foi obtida com a redução da taxa de transmissão.

### 2.3. IMPACTOS SÓCIO-AMBIENTAIS

A contribuição do projeto para o meio ambiente está no melhor aproveitamento dos recursos naturais de água e energia elétrica para a irrigação. O uso do projeto em larga escala deverá contribuir de forma mais efetiva com a redução dos custos de produção agrícola do estado, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, uma vez que reduzirá a necessidade imediata de investimentos em geração de energia elétrica. Como consequência, a concessionária consolida-se como empresa que efetivamente atua na preservação do meio ambiente.

A visão do cliente beneficiário, Embrapa Arroz e Feijão, sobre o projeto, pode ser medida a partir da opção de sempre operar o sistema com o uso do sistema de controle implantado e a disponibilização de outros sistemas para novos projetos.

## 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1. METODOLOGIA DE VERIFICAÇÃO DE RESULTADOS

A verificação dos resultados de economia de energia foi executada através da comparação entre os valores medidos para operação com e sem controle de velocidade para os pivôs de 40 cv e de 100 cv. Os resultados medidos foram ainda utilizados para validação da metodologia de estimação da economia de energia a partir dos dados do pivô. Além do percentual de economia de energia outras grandezas foram estimadas, tais como tempo de retorno de investimento e redução de demanda na ponta.

A Figura 5 mostra uma das unidades de aquisição de dados de pressão, a unidade de controle do inversor e o inversor de frequência para o sistema de pivô central de 40 cv.



Figura 5: Unidade de aquisição de dados, unidade de controle e inversor de frequência

### 3.2. RESULTADOS ESTIMADOS E EXPERIMENTAIS

A Tabela II apresenta os resultados de estimação e medidos para os pivôs de 40 cv e de 100 cv. O sistema de 40 cv permaneceu em operação por um período de 12 horas e 50 minutos sem controle de velocidade e pelo mesmo período com controle de velocidade. O retorno do investimento é de 8,7 meses, supondo que o pivô opera 12 horas por dia, durante 120 dias no ano. A comparação efetivada para o sistema de 100 cv corresponde a um período de 10 horas e 15 minutos de operação. O retorno do investimento é em 29,1 meses, supondo que o pivô opera 12 horas por dia, durante 120 dias no ano.

Tabela II. Estimação e resultados experimentais dos pivôs centrais de 40 cv e 100 cv

<b>Grandezas analisadas</b>	<b>40 cv</b>	<b>100 cv</b>
Tempo estimado de retorno do investimento	8,7 meses	29,1 meses
Estimativa do custo da energia evitada fora da ponta	R\$ 84,5 / MWh	R\$ 84,5 / MWh
Estimativa do custo da energia evitada no horário reservado	R\$ 16,9 / MWh	R\$ 16,9 / MWh
Estimativa de redução da demanda na ponta	11,65 kW	5,98 kW
Estimativa de economia de energia elétrica	35,61%	7,31%
Consumo medido de energia elétrica sem controle de velocidade	369,57 kWh	685,81 kWh
Consumo medido de energia elétrica com controle de velocidade	244,16 kWh	689,94 kWh
Economia medida de energia elétrica	33,93%	-0,60%

A Tabela mostra que não houve economia de energia para o pivô de 100 cv, conforme estimado. No entanto, esse resultado deve-se a alguns fatores observados durante a execução do projeto: a medição para a operação sem controle de velocidade foi realizada para uma volta completa do pivô, em 2008 e não foi possível fazer uma volta completa com controle de velocidade, em 2009, porque uma área do pivô estava reservada para a criação de gado; a operação com controle de velocidade sofreu algumas interrupções devido a afundamentos de tensão, falhas no circuito de alimentação do sistema de controle e interrupção física devido a problemas mecânicos do pivô. Outro fator determinante foi o uso de uma pressão de referência conservadora para prevenir possíveis desligamentos com a oscilação da pressão do sistema e a impossibilidade de fazer um ajuste mais fino da pressão pelo uso de transdutores com fundo de escala de 300 mca, quando a pressão máxima do pivô de 100 cv era de 80 mca.

#### 4. CONCLUSÕES

A implementação do presente projeto atendeu quase que totalmente os objetivos propostos no que se refere a eficiência energética. Os resultados do sistema de pivô central de 40 cv foram totalmente satisfatórios, uma vez que a economia de energia obtida (**33,93%**) equivale ao valor estimado (**35,61%**) e pode ser ainda maior, após o ajuste da referência de pressão para um valor menor do que o atual. No entanto, o resultado obtido (**- 0,60%**) para o sistema de pivô de 100 cv não corresponde ao valor estimado (**7,31%**). Dentre as justificativas apresentadas para o resultado encontrado, destaca-se a impossibilidade de operar o sistema para uma volta completa durante a operação com controle de pressão e as inúmeras interrupções por razões diversas.

Apesar do resultado “negativo” para o sistema de 100 cv, destaca-se que o projeto mostrou-se viável tecnicamente e as melhorias implementadas permitem a implantação em larga escala em pivôs do Estado de Goiás, o que certamente resultará no uso mais racional da energia elétrica na irrigação, uma vez que a grande maioria dos sistemas de pivôs centrais são sobre-dimensionados, o que já permite a redução do consumo de energia, independente da inclinação do terreno. Outro aspecto a ser destacado é o aumento do fator de potência em ambos os casos, tanto para o sistema de 40 cv, quanto para o sistema de 100 cv, o que significa um melhor aproveitamento da energia disponível.

O próximo passo desse trabalho é o estudo e implantação de um sistema de controle para acionamento de um único conjunto motor-bomba que atenda simultaneamente a mais de um pivô central e a possibilidade de uso de PLC (Power Line Communication), ao invés da transmissão via rádio.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. M. Medeiros, L. F. C. de Oliveira ; J. W. L. Nerys, A. M. de Oliveira e E. G. Marra, “Potencial de Economia de Energia Elétrica em Pivô Central com Uso de Inversor de Frequência,” In: VIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada, Araguari - MG. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada. Araguari : Associação dos Cafeicultores de Araguari, 2006. v. 1. p. 45-49, 2006.
- [2] A. J. Alves, “Inversor de Frequência – Uma ferramenta para o acionamento e racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de irrigação a pivô central,” Dissertação de Mestrado, Coordenação Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, 2001.
- [3] A. J. Alves, L. F. O. Coutinho e A. M. de Oliveira, “Verificação das relações de rateaux pelo emprego de um inversor de frequência,” Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, V.6, n.3, p.523-525, 2002.
- [4] J. W. L. NERYYS, E. G. Marra, A. M. de Oliveira, A. M. M. Medeiros, F. Cendes, L. Matias, A. J. Alves e L. F. Coutinho, “Conversor de Frequência Aplicado na Eficientização de Sistemas de Irrigação do Tipo Pivô Central,” Eletrônica de Potência (Florianópolis), v. 11, p. 189-197, 2006.
- [5] T. Yanagi Jr., E. Ferreira, A. Colombo e C. R. Mello, “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.