



PAULO HENRIQUE CRUZ PEREIRA

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO
POR PIVÔ CENTRAL: UMA PROPOSTA PARA
MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ATRAVÉS DO USO DE CONTROLADORES
LÓGICOS PROGRAMÁVEIS EM CONJUNTO COM
INVERSOR DE FREQUÊNCIA E REDE SEM FIO
*ZIGBEE***

**LAVRAS - MG
2011**

PAULO HENRIQUE CRUZ PEREIRA

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL:
UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ATRAVÉS DO USO DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS
EM CONJUNTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA E REDE SEM FIO
*ZIGBEE***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Giovanni Francisco Rabelo

Coorientador

PhD. Alberto Colombo

**LAVRAS - MG
2011**

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

Pereira, Paulo Henrique Cruz.

Sistema automatizado de irrigação por pivô central : uma proposta para melhoria da eficiência energética através do uso de controladores lógicos programáveis em conjunto com inversor de frequência e rede sem fio ZigBee / Paulo Henrique Cruz Pereira. – Lavras : UFLA, 2011.

132 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Giovanni Francisco Rabelo.

Bibliografia.

1. Automação. 2. CLP. 3. Redes industriais. 4. Energia rural. 5. Modbus. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.587

PAULO HENRIQUE CRUZ PEREIRA

**SISTEMA AUTOMATIZADO DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL:
UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
ATRAVÉS DO USO DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS
EM CONJUNTO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA E REDE SEM FIO
*ZIGBEE***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 16 de dezembro de 2011

Prof. Dr. Willian Soares Lacerda	UFLA
Profª. Dra. Juliana Vilela Lourençoni Botega	CEFET/MG
Profª. Dra. Lane Maria Rabelo Baccarini	UFSJ
Prof. Dr. Geraldo Magela Damasceno	CEFET/MG
Prof. Dr. Danton Diego Ferreira	UFLA

Dr. Giovanni Francisco Rabelo
Orientador

**LAVRAS - MG
2011**

*A Fernanda, minha esposa, a Anna Paula e a Rafaella, minhas filhas, pela paciência e compreensão nos momentos de estudos e trabalhos.
Aos meus pais pela dedicação e esforços empreendidos na minha formação pessoal e profissional.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade concedida para realização do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento das pesquisas realizadas, neste trabalho, Processo 483.525/2007-2.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento das pesquisas realizadas, neste trabalho, Processo CAG-1607/06 e Processo APQ-02656-10.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG) pela concessão da bolsa de auxílio a capacitação dos docentes.

Aos professores do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos e harmoniosa convivência, bem como a secretária do departamento Srta. Greice.

Ao professor Dr. Giovanni Francisco Rabelo pela orientação, paciência, amizade, dedicação e seus ensinamentos, que foram de grande relevância para a realização deste trabalho.

Ao professor PhD. Alberto Colombo pela oportunidade, amizade, companheirismo, dedicação, orientação e ensinamentos, que foram de grande valia para a realização deste trabalho.

Aos amigos graduandos, Randal e Renato, o mestrando João, e o doutorando Lessandro, pelas preciosas ajudas na condução dos experimentos.

“Sem a curiosidade que me move, que me inquieta, que me insere na busca, não aprendo nem ensino.”

Paulo Freire

RESUMO

A instalação de um sistema automatizado, constituído por um controlador lógico programável, sensores de pressão, umidade e posicionamento, inversor de frequência e o uso de redes industriais, para o controle da estação de bombeamento do pivô central, do Campus da UFLA, permitiu: (1) determinar, sob condições reais de funcionamento em campo, os valores ideais dos parâmetros de operação do conjunto motobomba nas diversas posições angulares assumidas pela lateral móvel do pivô (i - altura manométrica total variando entre 77,6 e 85,2 mca, ii - rotação da bomba variando entre 3.250 e 3.390 rpm, e iii - frequência de alimentação do motor elétrico de acionamento da bomba variando entre 57,03 e 54,66 Hz); (2) demonstrar através da proximidade observada entre os valores ideais de operação do conjunto motobomba determinados em campo e os previstos pelo processo teórico de cálculo, que o processo de cálculo proposto permite prever com precisão os valores ideais dos parâmetros de operação da bomba nas diversas posições angulares assumidas pela lateral móvel; e (3) constatar que as diferentes estratégias testadas de controle da frequência de alimentação do motor de acionamento da bomba são equivalentes, permitindo alcançar uma redução no consumo de energia de cerca de 19%, resultante da redução do valor da potência elétrica média consumida em um giro completo da lateral móvel de 13,2kW (sem inversor) para 10,8kW (com inversor). Além da redução no consumo de energia elétrica alcançada com o uso do inversor, foi também observada uma melhora no fator de potência, que passou de 0,84 para 0,88.

Palavras-chave: Automação. Eficiência Energética. Irrigação. Pivô Central. Zigbee.

ABSTRACT

The installation of an automated system consisting of a programmable logic controller, pressure sensors, moisture and positioning, variable frequency drive and the use of networks industrial for the pumping station control of the central pivot, Campus UFLA, allowed: (1) determine, under actual operating conditions in the field, the optimal values of the operation parameters of motor pump in different angular positions assumed by the mobile side of the pivot (i - gauge total height varying between 77.6 and 85.2 mca, ii - pump speed varied between 3.250 and 3.390 rpm; and iii - supply frequency of electric motor of pump drive ranging between 57.03 and 54.66 Hz); (2) demonstrate, through proximity observed between the ideal values of operation of motor-pump certain in field and those predicted by theoretical calculation process, the calculation procedure proposed allows to accurately predict the optimal values of the parameters of pump operation in various angular positions assumed by the mobile side, and (3) stated that the various strategies tested of control the supply frequency of the motor drive pump are equivalent, allowing to achieve a reduction in energy consumption about 19%, resulting from the reduction of the average electrical power consumed one full turn in the mobile side of 13.2 kW (without inverter) to 10.8 kW (with inverter). Besides the reduction in energy consumption achieved by using the inverter, also observed an improvement in power factor, which increased from 0.84 to 0.88.

Keywords: Automation. Energy Efficiency. Irrigation. Central Pivot. Zigbee.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Vista aérea da cultura de café irrigada por pivô central, Campus da UFLA.....	21
Figura 2	Diagrama de bloco do inversor de frequência utilizado neste trabalho.....	38
Figura 3	Representação do modelo equivalente, por fase, do motor de indução	39
Figura 4	Modelo equivalente com referimento do rotor para o estator	39
Figura 5	Curvas conjugado <i>versus</i> rotação de um motor elétrico operando com diferentes frequências na alimentação elétrica do motor (30 e 60 Hz)	42
Figura 6	Pirâmide de Automação	44
Figura 7	Exemplo de um sistema de controle, em malha fechada, e seus componentes.....	46
Figura 8	Representação de um sistema de controle com Controlador Lógico Programável	49
Figura 9	Diagrama de blocos do Controlador Lógico Programável.....	50
Figura 10	Visão construtiva de um encoder	56
Figura 11	Princípio de funcionamento de célula para medição de força e/ou pressão, utilizando-se LVDT.....	57
Figura 12	Princípio de funcionamento de um LVDT	58
Figura 13	Exemplo de um transdutor de pressão do tipo semiconductor.....	59
Figura 14	Exemplo de uma rede industrial e seus níveis.....	61
Figura 15	Distância da rede <i>ModBus</i> -RS485 em função da taxa de transmissão de dados.....	63
Figura 16	Frame da mensagem no modo <i>ModBus</i> -RTU	65

Figura 17	Exemplo da ligação de um <i>CompoBus</i> ® para longas distâncias...	67
Figura 18	Comprimento dos cabos (linhas) de um padrão <i>CompoBus</i> ®.....	68
Figura 19	Comparação do <i>ZigBee</i> com outras tecnologias <i>wireless</i> (alcance <i>versus</i> taxa de transmissão).....	70
Figura 20	Visão geral do sistema de controle automatizado adotado que permitiu o controle da frequência do conjunto motobomba.....	75
Figura 21	Detalhamento do pivô central instalado no campus da UFLA.....	76
Figura 22	Foto do pivô central do Campus da ULFA em funcionamento de irrigação.....	78
Figura 23	Esboço do plano de inclinação (declividade) do pivô central instalado no Campus da UFLA	78
Figura 24	Esquema da topografia da área irrigada pelo pivô, assumida pela última torre	79
Figura 25	Foto do inversor de frequência instalado dentro do painel de proteção	81
Figura 26	Curva altura manométrica total <i>versus</i> vazão.....	82
Figura 27	Curva rendimento <i>versus</i> vazão	83
Figura 28	Transdutores de pressão instalados na unidade de bombeamento	84
Figura 29	Esquema da instalação da reatância de rede ao inversor de frequência.....	84
Figura 30	Utilização do tacômetro para leitura da rotação do eixo do conjunto motobomba.....	85
Figura 31	Medidor digital Spectrum K, da Nansem (a) e <i>software</i> da DRACO versão 3.2 (b).....	86
Figura 32	Instalação dos <i>data loggers</i> ao longo da linha lateral móvel do pivô central.....	88

Figura 33	Sensores de pressão HBM, modelo P15RVA1/10B (a) e posição instalada dos sensores de pressão HBM no mesmo ponto de tomada de pressão dos <i>data loggers</i> (b)	90
Figura 34	(a) Unidade remota da OMRON, modelo SRT2-AD04 e (b) instalação das unidade remotas ao longo da linha lateral móvel do pivô.....	90
Figura 35	Esboço do Sistema de Controle (posição x pressão x frequência), com seus componentes e tipos de redes de comunicação envolvidas	93
Figura 36	Exemplo de um Programa <i>Ladder</i> com a utilização dos endereços <i>ModBus</i> -RTU para CLP e inversor, em um ambiente OMRON	95
Figura 37	Fluxograma simplificado, com as principais etapas, da lógica de programação realizada no Controlador Lógico Programável (CLP).....	97
Figura 38	Esboço do sistema de instalação dos microcontroladores <i>ZigBee</i> ao longo da área irrigada pelo pivô central	99
Figura 39	Fluxograma da lógica de programação realizada no FFD _{principal} ..	100
Figura 40	Fluxograma da lógica de programação realizada no FFD _{eixo} e RFD _{leitura}	101
Figura 41	Representação gráfica P&ID (<i>Piping and Instrumentation Diagram</i> – Diagrama de Tubulação e Instrumentação), conforme padronização ISA (<i>The Instrumentation, Systems and Automation Society</i>), norma S5.1	102
Figura 42	Variação da cota da última torre em relação à cota arbitrária da base do ponto do pivô (cota 100).....	107
Figura 43	Valores de rotação do eixo do conjunto motobomba	107

Figura 44	Comparação dos valores medidos de altura manométrica total (HMT) com os valores estimados pela equação 37.....	108
Figura 45	Estimativas de torque requerido no eixo de acionamento da bomba (τ em Nm) obtidas com as equações 42 e 31.....	109
Figura 46	Comparação de potências mecânicas calculadas (Equações 32 e 41) e potência ativa medida.....	109
Figura 47	Monitoramento do posicionamento da lateral (A)	110
Figura 48	Leitura do vacuômetro na entrada da bomba (B).....	110
Figura 49	Diferença da carga de pressão entre saída da bomba e a torre central (C).....	112
Figura 50	Monitoramento: (A) da cota da última torre da lateral; (B) da frequência da rede elétrica de alimentação do motor controlada pelo inversor; (C) da rotação do eixo de acionamento da bomba; e (D) da carga de pressão no tubo de subida do ponto do pivô durante o giro completo da lateral do pivô.....	118
Figura 51	Monitoramento da carga de pressão em quatro pontos distintos da lateral móvel do pivô operando sem (A) e com a implantação de um inversor de frequência na unidade de bombeamento (B) e monitoramento da cota da última torre da lateral (C)	122
Figura 52	Potência ativa e potência mecânica no eixo durante o giro da lateral do pivô com a unidade de bombeamento operando com e sem o controle de um inversor de frequência	125

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1	Descrição das linguagens segundo a norma IEC 61131-3	52
Quadro 2	Exemplo de códigos hexadecimal das funções mais usadas no <i>MODBUS</i>	65
Quadro 3	Características principais do periférico de comunicação <i>CompoBus SRM21</i>	67
Quadro 4	Características técnicas do pivô central Valley utilizado nos ensaios	77
Tabela 1	Características e benefícios do controlador lógico programável	50
Tabela 2	Comprimentos máximos dos cabos para SRT2	68
Tabela 3	Carga mínima de pressão requerida na entrada da válvula reguladora de pressão em função do modelo e da vazão na válvula - Dados das curvas da Senninger	92
Tabela 4	Coefficientes da equação da curva HMT x Q da bomba Imbil BEK 40	104
Tabela 5	Coefficientes da equação da curva rendimento x Q da bomba Imbil BEK 40	105
Tabela 6	Estimativas da altura manométrica total (HMT_{α}) e da velocidade angular do eixo de acionamento da bomba (ω_{α}) em função do posicionamento da linha lateral do pivô	114
Tabela 7	Estimativas das exigências de torque, rotação do eixo e frequência da rede elétrica modificada pelo inversor, em função do posicionamento da linha lateral do pivô	115

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_r	vazão no interior da lateral móvel na distância r do ponto do pivô ($m^3 \cdot s^{-1}$);
Q_0	vazão total do sistema ($m^3 \cdot s^{-1}$);
r	distância desde o ponto do pivô (m);
L_{eq}	comprimento equivalente da linha lateral (m);
L	comprimento total da linha lateral (m);
Q_c	vazão do canhão ($m^3 \cdot s^{-1}$);
J_r	perda de carga unitária na distância r do ponto do pivô ($m \cdot m^{-1}$);
E, n, m	constantes empíricas;
D	diâmetro interno da tubulação (m);
K_{HW}	fator empírico com valor de $10,67 s^{1,852} \cdot m^{-0,68}$;
C_{HW}	Coefficiente adimensional de Hazen-Williams relativo ao material de construção da lateral;
α	ângulo de posicionamento da linha lateral móvel do pivô central;
r_α	distância, na posição α , o ponto do pivô até o ponto de mínima pressão da lateral (m);
s_α	declividade da linha lateral na posição α ;
F_r	fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r ;
H_{pp_α}	carga de pressão requerida, na posição α , na base do ponto do pivô, (mca);
hf_{TS}	perda de carga no tubo de subida do ponto do pivô (mca);
ΔE_E	carga da altura de instalação dos emissores em relação ao solo (mca);
HS_{min}	carga piezométrica da pressão mínima de serviço dos emissores (mca);

HMT_{α}	altura manométrica total requerida na posição α (mca);
ΔE_S	carga da altura geométrica de sucção (mca);
hf_S	perda de carga na tubulação de sucção (mca);
ΔE_A	carga do desnível geométrico entre o eixo da bomba e a base do ponto do pivô (mca);
hf_A	perda de carga na adutora do pivô (mca);
λQ	vazão bombeada adimensional;
Q	vazão bombeada ($m^3 \cdot s^{-1}$);
φ	diâmetro do rotor (m);
ω	velocidade angular do rotor ($rad \cdot s^{-1}$);
λH	altura manométrica adimensional;
HMT	altura manométrica total (m);
$f(x)$	característica hidráulica de desempenho desejada (altura manométrica total, rendimento etc.);
x	variável independente (vazão);
j	coeficientes polinomiais ($j = 0, 1, 2$ e 3);
N_r	número de rotores da bomba considerada;
a_H, b_H, c_H, d_H	coeficientes de ajuste da curva característica da bomba;
η_b	rendimento hidráulico da bomba ($0 \leq \eta_b \leq 1$);
$a_{\eta}, b_{\eta}, c_{\eta}, d_{\eta}$	coeficientes de ajuste da equação de rendimento da bomba;
PM_{eixo}	potência mecânica no eixo da bomba (W);
γ	peso específico da água ($N \cdot m^{-3}$);
τ	torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba (N.m);
n_e	rotação do eixo do motor (rpm);
τ_n	conjugado nominal do motor (N.m);
n_S	rotação síncrona do motor (rpm);
n_n	rotação nominal do motor (rpm);

f	frequência da rede elétrica de alimentação do motor (Hz);
p	número de polos do enrolamento do motor;
V_{TH}	tensão de Thévenin aos pontos "a" e "b";
jX_s	reatância do estator (ohms);
R_s	resistência do estator (ohms);
R_r	resistência do rotor (ohms);
s	escorregamento;
V_s	tensão aplicada ao estator (V);
R_m	resistência de dispersão (ohms);
jX_m	reatância de dispersão (ohms);
P_t	potência total transferida (W);
N_{fases}	número de fases do estator;
I_r	corrente do rotor (A);
T_d	torque desenvolvido pelo motor (N.m);
ω_s	frequência síncrona ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$);
$(n_s)_{fn}$	rotação síncrona com a frequência nominal da rede elétrica (rpm);
$(n_n)_{fn}$	rotação nominal com a frequência nominal da rede elétrica (rpm);
$(n_s)_f$	rotação síncrona com uma dada frequência f da rede elétrica (rpm);
$(n_e)_f$	rotação sob o conjugado τ com a frequência f da rede elétrica (rpm);
MIT	motor de indução trifásico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	20
2	REFERENCIAL TEORICO	23
2.1	Pivô central	23
2.1.1	Características hidráulicas do pivô central	24
2.1.2	Caracterização hidráulica das bombas centrífugas	31
2.2	Motores elétricos	34
2.2.1	Inversores de frequência	36
2.2.2	Motores elétricos operando com inversor de frequência	38
2.3	Automação Industrial	43
2.3.1	Controladores lógicos programáveis	45
2.3.1.1	Programação <i>Ladder</i>	51
2.3.3	Sensoriamento	53
2.3.2.1	Encoder absoluto	56
2.3.2.2	Transdutor de pressão	57
2.3.2.2.1	LVDT	58
2.3.2.2.2	Piezoelétrico	59
2.3.4	Redes industriais	60
2.3.4.1	Padrão <i>ModBus</i>	62
2.3.4.2	Padrão <i>CompoBus</i>[®]	66
2.3.4.3	Padrão <i>ZigBee</i>	69
2.3.5	Sistemas Supervisórios tipo SCADA	71
3	MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1	O pivô central e seu conjunto motobomba	76
3.2	Monitoramento da motobomba	83

3.3	Monitoramento da tubulação do pivô	86
3.4	Definição das condições ideais para cada posição da lateral móvel do pivô	90
3.5	Estratégias de controle da frequência da rede.....	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
4.1	Modelagem do conjunto motobomba	104
4.2	Adequação da modelagem do conjunto motobomba sem o inversor.....	106
4.3	Modelagem do sistema operando com inversor.....	110
4.4	Adequação da modelagem do sistema operando com inversor.....	116
4.5	Redução do consumo de energia	124
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
6	CONCLUSÃO	128
	REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados pelo Brasil, que vem retomando seu crescimento, assim como de outros países, é a crescente demanda energética. Soluções, a curto prazo, demandam grande investimento em geração de energia elétrica, principalmente. Uma alternativa rápida para tal desafio pode ser a utilização racional das formas de energia disponíveis. O uso mais eficiente da energia libera excedentes que atenuam a taxa de crescimento da demanda, permitindo um tempo maior para a implementação de novas fontes de energia.

1.1 Justificativa

O incremento esperado na utilização de inversores de frequência em conjunto com controladores lógicos programáveis e rede sem fio, *ZigBee*, em sistemas de irrigação do tipo pivô central não tem sido observado, apesar da necessidade de aumentar a eficiência do uso da energia elétrica disponível e das vantagens comparativas de algumas áreas irrigadas. Três fatores contribuem para a continuidade deste quadro de estagnação no uso de tais tecnologias em sistemas de irrigação: (i) as estratégias para controle automatizado dos inversores de frequência, nos pivôs centrais, ainda apresentam desafios na área de irrigação, (ii) existem discrepâncias entre valores esperados e valores realizados (observados) de redução no consumo de energia elétrica; e, (iii) são raras as oportunidades de se observar equipamentos de irrigação do tipo pivô central operando com inversores de frequência em conjunto com outras tecnologias.

Destaca-se que em sistemas de irrigação tipo pivô central, em que é possível variar a pressão de água aplicada em função da declividade do solo, bem como da lâmina de água em função da umidade do solo, mantendo-se

constante a lâmina de água aplicada na cultura irrigada, que deve-se, obrigatoriamente, manter-se uma pressão de água superior ao da válvula reguladora dos aspersores. Assim, atender-se-á a condição de mesma lâmina de água aplicada à cultura irrigada (lâmina de água constante independentemente da pressão aplicada).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo promover, através da instalação de um controlador lógico programável e um inversor de frequência, no pivô central, existente no Campus da UFLA (Figura 1), ações que contribuam para eliminação dos três fatores restritivos, citados anteriormente, segundo o seguinte roteiro:

- a) Determinar, sob condições reais de funcionamento, dos valores ideais dos parâmetros de operação da bomba (i-altura manométrica total, ii- rotação, e iii - frequência de alimentação do motor de acionamento) associados às diversas posições angulares assumidas pela lateral móvel.
- b) Realizar avaliação comparativa dos processos teóricos de cálculo que permitem prever os valores ideais dos parâmetros de operação da bomba associados às diversas posições angulares da lateral móvel, conforme proposto por Azevedo (2003) - cálculo do nível de redução de consumo de energia a ser atingido com a introdução de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central.
- c) Realizar avaliação comparativa da eficácia do inversor de frequência em conjunto com controlador lógico programável (quantificada através da proximidade entre valores medidos e valores

ideais dos parâmetros de operação da bomba), sob o controle da frequência de alimentação do motor de acionamento da bomba (seleção contínua e automática da frequência de alimentação do motor).



Figura 1 Vista aérea da cultura de café irrigada por pivô central, Campus da UFLA
Fonte: Mapas ... (2011)

Desta forma o trabalho apresenta, no Capítulo 2 - Referencial Teórico, toda a fundamentação adotada que permite o cálculo dos dados para parametrização dos sistemas de irrigação por pivô central via controlador lógico programável.

Já o Capítulo 3, Materiais e Métodos, descrevem-se todos os equipamentos utilizados, neste trabalho, bem como suas instalações, programações e interligações que permitiram a realização do levantamento de dados de campo, durante a operacionalização do sistema de irrigação.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, realizam-se discussões comparativas entre o memorial de cálculo, parametrização, e os resultados quantitativos obtidos, no campo, através do monitoramento dos sensores a fim

de se avaliar a minimização do consumo energético para o sistema de irrigação por pivô central, quando da utilização de um inversor de frequência em conjunto com o controlador lógico programável.

O Capítulo 5, Considerações Finais, sugere-se possíveis temas de trabalhos futuros.

Finalmente, o Capítulo 6, Conclusão, apresenta-se os resultados em conformidade com os objetivos citados anteriormente, propiciando-se uma verificação da efetividade deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 Pivô central

Desde seu patenteamento, em 1952, o pivô central vem ocupando cada vez mais seu espaço em todo o mundo, sendo atualmente, o sistema de irrigação por aspersão de maior aceitação. Aplica-se a um amplo elenco de culturas, incluindo graníferas, hortaliças, café, forrageiras e gramíneas, estas inclusive, em associação ao pastejo natural de animais criados extensivamente (JACINTO, 2001).

Segundo Rodrigues (1999), o pivô central é um sistema constituído por uma linha lateral móvel, girando em torno de um ponto fixo, que irriga uma área circular. Emissores instalados ao longo da linha lateral móvel são responsáveis pela distribuição da água na área irrigada. Dessa forma, a velocidade tangencial de deslocamento dos emissores aumenta do centro para a periferia da área irrigada. O aumento da velocidade tangencial de deslocamento dos emissores reduz o tempo disponível para aplicação da água por unidade de largura do padrão molhado, fazendo com que a intensidade de precipitação proporcionada pelos emissores também aumente (HEERMANN; KOHL, 1983).

A velocidade de rotação da lateral móvel é controlada por um relé percentual, instalado na caixa de controle da torre central do pivô, que comanda a velocidade da última torre (FARIA; VIEIRA, 1986).

Uma unidade de bombeamento é normalmente instalada junto ao ponto de captação de água para o pivô central e uma adutora é utilizada para conduzir a água bombeada até o ponto fixo, localizado no centro da área irrigada (AZEVEDO, 2003).

Segundo Campana et al. (2000), a demanda de potência para acionamento da unidade de bombeamento será menor quando o pivô estiver

irrigando a faixa de menor requisito de altura manométrica e a demanda de potência será máxima quando o pivô estiver irrigando a posição correspondente à maior altura manométrica.

2.1.1 Características hidráulicas do pivô central

Em qualquer distância r , tomada ao longo do comprimento L da linha lateral de um pivô central ($0 \leq r \leq L$), a vazão no interior da linha lateral pode ser calculada pela seguinte expressão (VALIANTZAS; DERCAS, 2005):

$$Q_r = Q_0 \left[1 - \left(\frac{r}{Leq} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que,

Q_r = vazão no interior da lateral móvel na distância r do ponto do pivô (m^3/s);

Q_0 = vazão total do sistema ($m^3 \cdot s^{-1}$);

r = distância desde o ponto do pivô (m); e

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m).

O comprimento equivalente da linha lateral do pivô é determinado com auxílio da relação entre a vazão total do pivô e a vazão do canhão final do pivô:

$$Leq = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{Q_c}{Q_0}}} \quad (2)$$

onde,

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m);

L = comprimento total da linha lateral (m);

Q_0 = vazão total do sistema ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_c = vazão do canhão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Em decorrência da variação da vazão ao longo do comprimento da linha lateral, também ocorre, mesmo nos trechos de diâmetro constante, variação no valor na taxa de perda de carga ao longo da linha lateral do pivô.

Para Souza (2011), dentre as equações para estimar a perda de carga, em condutos forçados com seção circular e área constante, que utilizam o fator de atrito, a mais usada é a Equação Universal, ou seja:

$$J = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{8f}{D^5} \cdot \frac{Q^2}{\rho^2 g} \quad (3)$$

onde:

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

f = fator de atrito (adimensional);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

V = velocidade média do fluido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

g = aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

Q = vazão média do fluido ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Segundo Scaloppi e Allen (1993), as equações utilizadas para cálculo da perda de carga unitária, em qualquer distância r do ponto do pivô, apresentam a seguinte formulação geral:

$$J_r = \frac{E \cdot Q_r^m}{D^n} \quad (4)$$

onde:

J_r = perda de carga unitária na distância r do ponto do pivô (m.m^{-1});

E, n, m = constantes empíricas;

Q_r = vazão no interior da lateral móvel na distância r do ponto do pivô (m^3/s);

D = diâmetro interno da tubulação (m).

De acordo com Colombo et al. (2003), quando a fórmula de Hazen-Williams é utilizada para cálculo da perda de carga unitária, a equação 4 toma o seguinte formato:

$$J_r = \frac{K_{HW}}{C_{HW}} \frac{Q_r^{1,852}}{D^{4,87}} \quad (5)$$

onde:

J_r = perda de carga unitária na distância r do ponto do pivô (m.m^{-1});

K_{HW} = fator empírico com valor de $10,67 \text{ s}^{1,852} \cdot \text{m}^{-0,68}$;

Q_r = vazão no interior da lateral móvel na distância r do ponto do pivô (m^3/s);

C_{HW} = coeficiente adimensional de Hazen-Williams relativo ao material de construção da lateral (aço zincado – valor adotado de 140);

D = diâmetro interno da tubulação (m).

Segundo Azevedo (2003), nas diferentes posições assumidas pela lateral durante o seu giro, que podem ser identificadas pelo ângulo α ($0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$), o cálculo da distância r_α até o ponto de menor pressão da lateral é feito considerando três situações distintas:

(a) Quando, no sentido do fluxo, a linha lateral assume uma posição ascendente, ou em nível, o ponto de mínima pressão sempre se localiza no final da lateral:

$$r_{\alpha} = L \quad \text{quando} \quad s_{\alpha} \geq 0 \quad (5a)$$

onde:

r_{α} = distância, na posição α , o ponto do pivô até o ponto de mínima pressão da lateral (m);

L = comprimento total da linha lateral (m);

s_{α} = declividade da linha lateral na posição α ($s_{\alpha} > 0$ para deslocamento ascendente da água, e $s_{\alpha} < 0$ para deslocamento descendente da água).

(b) Quando, no sentido do fluxo, a linha lateral assume uma declividade descendente, com um valor absoluto menor que o da taxa de perda de carga no início da lateral ($J_r \rightarrow 0$), o ponto de mínima pressão encontra-se em uma posição intermediária entre o início e o fim da linha lateral. A distância até este ponto intermediário, no caso em que $J_r = 0$ é calculado com base na fórmula de Hazen-Williams, é dada por:

$$r_{\alpha} = Leq \sqrt{1 - \left(\frac{|s_{\alpha}|}{J_{r \rightarrow 0}} \right)^{0,54}} \quad \text{quando} \quad s_{\alpha} < 0 \quad \text{e} \quad |s_{\alpha}| < J_{r=0} \quad (5b)$$

onde:

r_{α} = distância, na posição α , o ponto do pivô até o ponto de mínima pressão da lateral (m);

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m);

s_α = declividade da linha lateral na posição;

J_r = perda de carga unitária no início da lateral ($m \cdot m^{-1}$).

(iii) Quando, no sentido do fluxo, a linha lateral assume uma declividade descendente com um valor absoluto maior que o da taxa de perda de carga no início da lateral ($J_r \rightarrow 0$), o ponto de mínima pressão está localizado no início da linha lateral:

$$r_\alpha = 0 \quad \text{quando} \quad s_\alpha = 0 \quad \text{e} \quad |s_\alpha| \geq J_{r \rightarrow 0} \quad (5c)$$

Em decorrência da variação da taxa de perda de carga ao longo da lateral, o valor acumulado da perda de carga entre o topo do ponto do pivô em um ponto localizado a uma distância r é calculado com auxílio da expressão geral:

$$hf_r = J_{r \rightarrow 0} \cdot Leq \cdot F_r \quad (6)$$

onde:

hf_r = perda de carga em um ponto localizado a distância r (mca);

J_r = taxa de perda de carga no início da lateral ($m \cdot m^{-1}$);

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m);

F_r = fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r .

No caso particular da fórmula de Hazen-Williams, o fator de correção F_r pode ser calculado pela expressão proposta por Scaloppi e Allen (1993):

$$F_r = \frac{r}{L_{eq}} - \frac{1,852}{3} \cdot \left(\frac{r}{L_{eq}}\right)^3 + \frac{1,578}{10} \cdot \left(\frac{r}{L_{eq}}\right)^5 + \frac{0,236}{42} \cdot \left(\frac{r}{L_{eq}}\right)^7 + \dots \quad (7)$$

onde:

F_r = fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r;

r = distância desde o ponto do pivô central (m);

L_{eq} = comprimento equivalente da linha lateral (m).

Valiantzas e Dercas (2005) também desenvolveram uma fórmula para cálculo do fator de correção F_r , que para o caso particular da Fórmula de Hazen-Williams assume o seguinte formato:

$$F_r = \frac{r_\alpha}{L_{eq}} - \frac{1,85}{3} \left(\frac{r}{L_{eq}}\right)^3 + \frac{(0,85)}{(5,15)} \cdot \left(\frac{r}{L_{eq}}\right)^{5,15} \quad (8)$$

onde:

F_r = fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r;

r = distância desde o ponto do pivô central (m);

L_{eq} = comprimento equivalente da linha lateral (m).

De acordo com Azevedo (2003), para cada posição α assumida pela linha lateral do pivô, a carga de pressão requerida na base do ponto do pivô (H_{pp_α}) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$H_{pp_\alpha} = hf_{TS} + \Delta E_E + r_\alpha \cdot s_\alpha + J_{r \rightarrow 0} \cdot L_{eq} \cdot F_{r=r_\alpha} + HS_{\min} \quad (9)$$

onde:

Hpp_α = carga de pressão requerida, na posição α , na base do ponto do pivô, (mca);

hf_{TS} = perda de carga no tubo de subida do ponto do pivô (mca);

ΔE_E = carga da altura de instalação dos emissores em relação ao solo (mca);

r_α = distância, na posição α , o ponto do pivô até o ponto de mínima pressão da lateral (m);

s_α = declividade da linha lateral na posição;

F_r = fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r;

J_r = taxa de perda de carga no início da lateral ($m \cdot m^{-1}$);

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m);

HS_{min} = carga piezométrica da pressão mínima de serviço dos emissores (mca).

Segundo Azevedo (2003), nas diferentes posições assumidas pela linha lateral móvel de um pivô central durante o seu giro, a altura manométrica total da unidade de bombeamento que proporciona, no ponto de menor pressão da linha lateral, uma carga de pressão equivalente a carga de pressão mínima de serviço dos emissores, é dada por:

$$HMT_\alpha = \Delta E_S + hf_S + \Delta E_A + hf_A + Hpp_\alpha \quad (10)$$

onde:

HMT_α = altura manométrica total requerida na posição α (mca);

ΔE_S = carga da altura geométrica de sucção (mca);

hf_S = perda de carga na tubulação de sucção (mca);

ΔE_A = carga do desnível geométrico entre o eixo da bomba e a base do ponto do pivô (mca);

hf_A = perda de carga na adutora do pivô (mca);

H_{pp_α} = carga de pressão requerida, na posição α , na base do ponto do pivô, (mca).

2.1.2 Caracterização hidráulica das bombas centrífugas

Em sistema de irrigação do tipo pivô central, a movimentação da lateral provoca variação na elevação topográfica da mesma, resultando em diferentes requisitos de altura manométrica. A ausência de variação de vazão do sistema é obtida através do uso de válvulas reguladoras de pressão instaladas na base de cada emissor (KELLER; BLIESNER, 1990). Estas válvulas reguladoras evitam que as variações na elevação topográfica da linha lateral afetem a uniformidade de aplicação de água.

Segundo Carvalho e Oliveira (2008) e Macyntire (1987), instalações de bombeamento, sujeitas a variações nos valores de descarga e/ou altura manométrica, requerem que a unidade de bombeamento acompanhe estas variações com alteração na sua velocidade de rotação.

Alcântara (1988) recomenda que alterações nas curvas características (vazão *versus* altura manométrica e vazão *versus* rendimento) das bombas centrífugas, decorrentes de alterações nos valores de diâmetro e/ou de velocidade de rotação do rotor, sejam modeladas através da adimensionalização dos valores de vazão e altura manométrica:

$$\lambda Q = \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \quad (11)$$

$$\lambda H = \frac{g \cdot HMT}{\varphi^2 \cdot \omega^2} \quad (12)$$

onde:

λQ = vazão bombeada adimensional;
 Q = vazão bombeada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);
 φ = diâmetro do rotor (m);
 ω = velocidade angular do rotor ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$);
 λH = altura manométrica adimensional;
 HMT = altura manométrica total (mca);
 g = aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Mello (1999) e Yanagi Júnior et al. (1997) utilizaram um polinômio cúbico para a representação das curvas características das bombas centrífugas:

$$f_{(x)} = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad (13)$$

onde:

$f_{(x)}$ = característica hidráulica de desempenho desejada (altura manométrica total, rendimento etc.);

x = variável independente (vazão).

Azevedo (2003) utilizou polinômios de terceiro grau, e a adimensionalização recomenda por Alcântara (1988), para representar as curvas de altura manométrica total e rendimento através das seguintes expressões:

$$HMT = \frac{Nr \cdot \varphi^2 \cdot \omega^2}{g} \left[a_H + b_H \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} + c_H \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^2 + d_H \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^3 \right] \quad (14)$$

onde:

HMT = altura manométrica total (m);

Nr = número de rotores da bomba considerada;

φ = diâmetro do rotor (m);

ω = velocidade angular do rotor ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$);

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

a_H, b_H, c_H, d_H = coeficientes de ajuste da curva característica da bomba.

$$\eta_b = a_\eta + b_\eta \cdot \frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} + c_\eta \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^2 + d_\eta \left(\frac{Q}{\varphi^3 \cdot \omega} \right)^3 \quad (15)$$

onde:

η_b = rendimento hidráulico da bomba ($0 \leq \eta_b \leq 1$);

$a_\eta, b_\eta, c_\eta, d_\eta$ = coeficientes de ajuste da equação de rendimento da bomba;

φ = diâmetro do rotor (m);

ω = velocidade angular do rotor ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$);

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

A potência mecânica requerida no eixo de acionamento de uma bomba é dada pela seguinte equação:

$$PM_{eixo} = \frac{Q \cdot HMT \cdot \gamma}{\eta_b} \quad (16)$$

onde:

PM_{eixo} = potência mecânica no eixo da bomba (W);

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

HMT = altura manométrica total (m);

γ = peso específico da água ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$).

O torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba é calculado com base na potência e na velocidade angular do eixo:

$$\tau = \frac{PM_{eixo}}{\omega} \quad (17)$$

onde:

τ = torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba (N.m);

PM_{eixo} = potência mecânica no eixo da bomba (W);

ω = velocidade angular do eixo (rad.s^{-1}).

2.2 Motores elétricos

Sabe-se que a transformação entre a velocidade de rotação do eixo de um motor e a sua velocidade angular é dada por:

$$\omega = \frac{n_e}{60} \cdot 2\pi \quad (18)$$

onde:

ω = velocidade angular do eixo (rad.s^{-1});

n_e = velocidade de rotação do eixo do motor (rpm).

Quando os valores nominais de frequência e tensão da rede elétrica de alimentação de um motor de indução trifásico são atendidos, a linearização da curva do conjugado *versus* rotação do motor permite estimar com precisão o conjugado em função do valor da rotação do motor (SILVA, 1999; WEG, 2009). Esta linearização pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{\tau_n \cdot (n_s - n_e)}{n_s - n_n} \quad \text{válida para } n_n \leq n_e \leq n_s \quad (19)$$

onde:

τ = conjugado no eixo do motor operando com rotação n (N.m);

τ_n = conjugado nominal do motor (N.m);

n_s = rotação síncrona do motor (rpm);

n_n = rotação nominal do motor (rpm);

n_e = velocidade de rotação do eixo do motor (rpm).

Já a velocidade síncrona de um motor elétrico é dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (20)$$

onde:

n_s = rotação síncrona do motor (rpm);

f = frequência da rede elétrica de alimentação do motor (Hz);

p = número de polos do enrolamento do motor.

De acordo com Saidur (2010), a análise do desempenho de motores elétricos deve sempre considerar o seu fator de potência e o seu rendimento (η_m). O fator de potência (F_p) é a relação entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA).

A potência aparente ou total (S), que é expressa em kVA, é resultado da soma vetorial da potência ativa (P) com a potência reativa (Q):

$$F_p = \frac{\text{Potência Ativa (kW)}}{\text{Potência Aparente (kVA)}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos f \quad (21)$$

onde:

F_p = fator de potência (adimensional), também simbolizado por $\cos f$;

P = potência ativa (kW);

Q = potência reativa (kVAR);

S = potência aparente (kVA).

Os motores elétricos de indução convertem 80-90% da potência aparente absorvida em trabalho útil. O restante da energia é necessário para manter o campo eletromagnético do motor. Como este campo é oscilante, o valor médio consumido é zero e a chamada potência reativa não é registrada no medidor de kW. Apesar de não realizar trabalho, a energia reativa circula nas linhas de transmissão e drena a capacidade de geração de energia do fornecedor.

O rendimento (η_m) é a relação entre a potência fornecida ou potência mecânica disponível no eixo e a potência ativa consumida:

$$\eta_M = \frac{PM_{eixo}}{Pa} \quad (22)$$

onde:

PM_{eixo} = potência mecânica no eixo do motor (kW);

Pa = potência ativa consumida pelo motor (kW).

2.2.1 Inversores de frequência

O controle de velocidade de um motor de indução pode ser facilmente realizado através da variação da frequência, e se esta for aplicada com uma tensão de alimentação adequada ao estator, poderá se obter como resultado um torque constante sobre uma larga faixa de velocidade.

Segundo Franchi (2010), o inversor de frequência permite o acionamento de motores de indução com frequências entre 1 a 60 Hz com um torque constante, sem aquecimentos anormais nem vibrações fora de ordem.

A variação de frequência pode ser obtida com o auxílio de um inversor de frequência. Este dispositivo é capaz de converter um sinal contínuo (CC) em um sinal alternado (CA) com variações de frequência e amplitude.

O princípio básico de funcionamento dar-se-á, primeiramente, através de um conversor CA-CC (normalmente realizado com uma ponte de diodo), a seguir filtra-se o sinal resultante da conversão de forma a obter um sinal contínuo final. Após essa fase, o sinal passa por um bloco de potência com finalidade única de fornecer um sinal alternado na saída, através da abertura e fechamento dos interruptores estáticos (geralmente IGBT's ou MOSFET) com frequência definida pela técnica de modulação.

Portanto, um inversor de frequência transforma a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Com a variação da tensão de alimentação do motor, varia-se também a velocidade do campo girante e, conseqüentemente a velocidade mecânica do motor (WEG, 2006).

A Figura 2 ilustra um diagrama de bloco de tal processo de transformação de uma tensão de amplitude e frequência constante (rede elétrica) em uma tensão de amplitude e frequência variáveis.

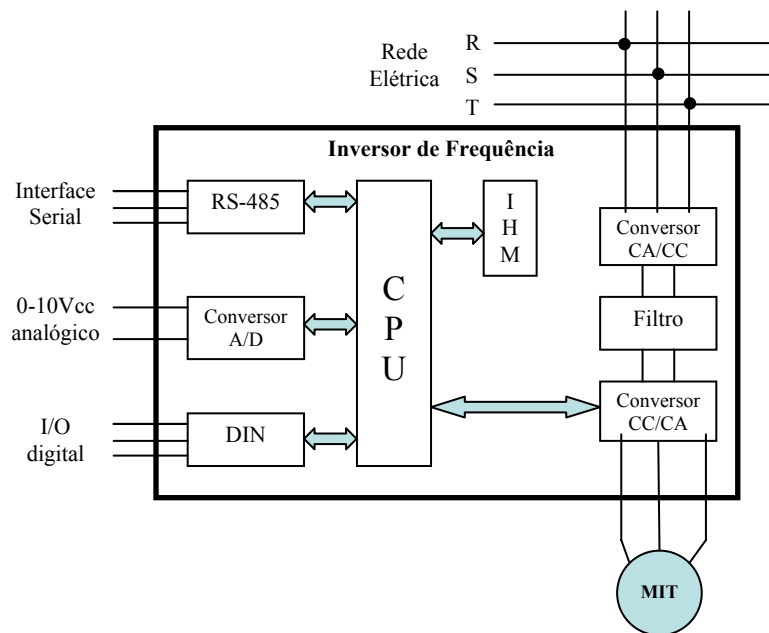


Figura 2 Diagrama de bloco do inversor de frequência utilizado neste trabalho
 Fonte: Franchi (2010)

2.2.2 Motores elétricos operando com inversor de frequência

O comportamento da curva “conjugado *versus* rotação” de um motor de indução trifásico que é alimentado através de um inversor de frequência apresenta algumas diferenças em relação ao comportamento de um motor alimentado diretamente da rede elétrica. Nas várias frequências da rede fornecidas pelo inversor, a diferença, em RPM, entre a rotação com torque nulo (rotação síncrona) e a rotação com torque nominal é sempre igual (FRANCHI, 2010).

De acordo com Franchi (2010), os motores de indução são equivalentes a um transformador, em que o primário é o estator e o secundário é o rotor, o que permite simular seu comportamento em regime permanente, por fase.

Conforme Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008), a representação de um motor pode ser feita conforme a Figura 3.

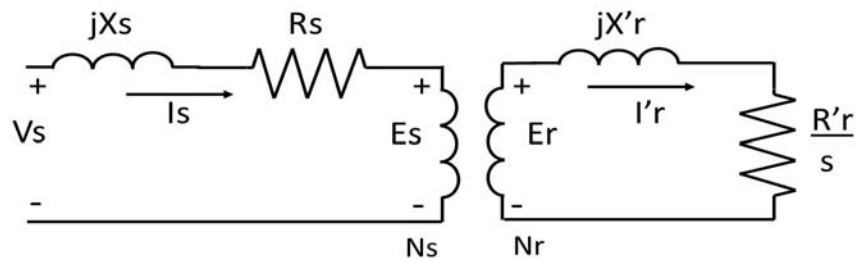


Figura 3 Representação do modelo equivalente, por fase, do motor de indução
Fonte: Adaptado de Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008)

Na Figura 4 está representado, segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008), o circuito que equivale a todo o lado do rotor para o estator. Pode-se analisar a semelhança com o circuito equivalente de um transformador, onde R_m e X_m representam, respectivamente, a resistência e reatância de dispersão.

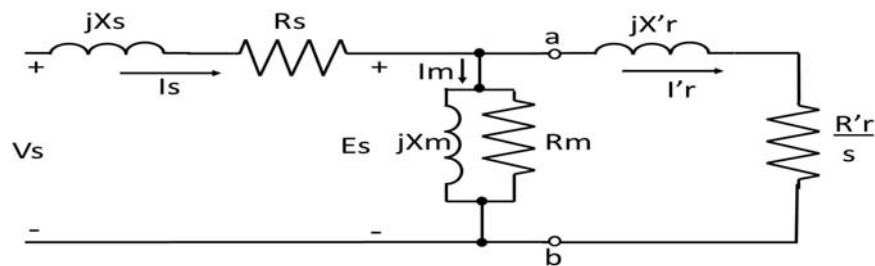


Figura 4 Modelo equivalente com referimento do rotor para o estator
Fonte: Adaptado de Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008)

De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008), para a maioria dos motores de indução, erros desprezíveis surgirão se a resistência de dispersão for desprezada ($R_m \rightarrow \infty$).

Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008), a tensão (V_{TH}) e a corrente (I_{TH}) de Thévenin aplicadas aos pontos "a" e "b" são:

$$V_{TH} = V_s \left[\frac{jX_m}{R_s + (jX_m + jX_s)} \right] \quad (23)$$

$$I_r = \frac{V_{TH}}{\frac{jX_m \times (R_s + jX_s)}{jX_m + (R_s + jX_s)} + jX'_r + \frac{R'_r}{s}} \quad (24)$$

onde:

V_{TH} = tensão de Thévenin aos pontos "a" e "b";

I_r = corrente de rotor aos pontos "a" e "b" (A);

jX_s = reatância do estator (ohms);

R_s = resistência do estator (ohms);

R'_r = resistência do rotor (ohms);

jX'_r = reatância do rotor (ohms);

s = escorregamento;

V_s = tensão aplicada ao estator (Volt);

jX_m = reatância de dispersão (ohms).

De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008), a potência total (P_t) presente no entreferro que é transferida para o rotor, é dado por:

$$P_t = n_{fases} \times I_r^2 \times \frac{R'_r}{s} \quad (25)$$

onde:

P_t = potência total transferida (W);

n_{fases} = número de fases do estator (neste caso igual a 3);

I_r = corrente do rotor (A);

R_r = resistência do rotor (ohms);

s = escorregamento.

Tem-se que o torque desenvolvido (T_d) pelo motor de indução é:

$$T_d = \frac{P_t}{\omega_s} \quad (26)$$

onde:

T_d = torque desenvolvido pelo motor (N.m);

P_t = potência total transferida (W);

ω_s = frequência síncrona ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).

Portanto, pode-se chegar a uma nova equação do torque desenvolvido pelas equações 23, 24 e 25 em 26, conforme proposta por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008):

$$T_d = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{\text{fases}} \cdot V_s^2 \cdot R_r / s}{(R_s + R_r / s)^2 + (X_s + X_r)^2} \right] \quad (27)$$

onde:

T_d = torque desenvolvido pelo motor (N.m);

ω_s = frequência síncrona ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$);

n_{fases} = número de fases do estator;

R_r = resistência do rotor (ohms);

s = escorregamento;

R_s = resistência do estator (ohms);

V_s = tensão aplicada ao estator (Volt);

X_s = reatância do estator (ohms);

X_r = reatância do rotor (ohms).

De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Umans (2008) e Franchi (2009b), a partir da equação 27 é possível observar que, se for mantido constante a relação entre tensão e frequência é possível que o torque também se mantenha. Essa regra será válida até a frequência nominal da máquina (motor de indução), pois nesta frequência deve ser aplicada a tensão nominal.

Na Figura 5 é ilustrado o comportamento de um motor de quatro polos no qual a diferença entre a rotação com torque nulo (rotação síncrona) e a rotação com torque nominal é constante e igual a 50rpm. No caso, para frequências de alimentação elétrica do motor iguais a 30 e 60 Hz, os valores da rotação síncrona e da rotação com torque nominal seriam, respectivamente, 900 e 850 rpm, para 30 Hz, 1.800 e 1.750 rpm, para 60 Hz.

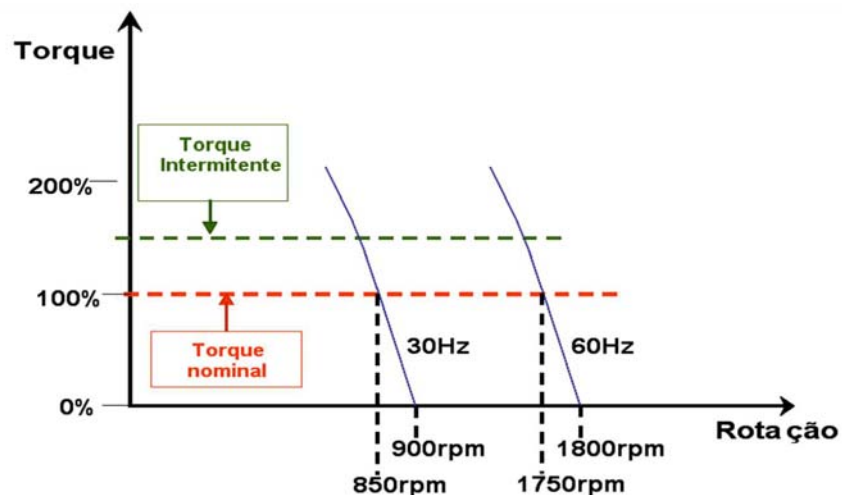


Figura 5 Curvas conjugado *versus* rotação de um motor elétrico operando com diferentes frequências na alimentação elétrica do motor (30 e 60 Hz)
Fonte: Adaptado de Franchi (2009)

Em decorrência da diferença constante entre a rotação síncrona e a rotação sob torque nominal, que ocorre nos motores de indução trifásico controlados por inversores de frequência, pode-se estabelecer, para as diferentes frequências da rede elétrica de alimentação, a seguinte relação entre torque nominal e torque de trabalho:

$$\frac{\tau_n}{(n_s)_{fn} - (n_n)_{fn}} = \frac{\tau}{(n_s)_f - (n_e)_f} \quad (28)$$

onde:

τ_n = torque, ou conjugado nominal do motor (N.m);

$(n_s)_{fn}$ = rotação síncrona com a frequência nominal da rede elétrica (rpm);

$(n_n)_{fn}$ = rotação nominal com a frequência nominal da rede elétrica (rpm);

$(n_s)_f$ = rotação síncrona com uma dada frequência f da rede elétrica (rpm);

$(n_e)_f$ = rotação sob o conjugado τ com a frequência f da rede elétrica (rpm).

2.3 Automação Industrial

Segundo Moraes (2010), entende-se por automação qualquer sistema apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, da rapidez da produção ou da redução de custos, assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias e dos serviços.

A automação envolve a implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo sistemas supervisórios e interfaces homem-máquina que possam auxiliar os operadores no exercício da supervisão e da análise dos problemas que porventura venham a ocorrer.

A vantagem de utilizar sistemas que envolvam diretamente a informatização é a possibilidade da expansão, utilizando recursos de fácil acesso; nesse contexto, são de extraordinária importância os controladores lógicos programáveis (CLP's), que tornam a automação industrial uma realidade onipresente, conforme descreve Moraes (2010).

A automação industrial exige a realização de muitas funções. A Figura 6 representa a chamada Pirâmide de Automação e seus diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial.

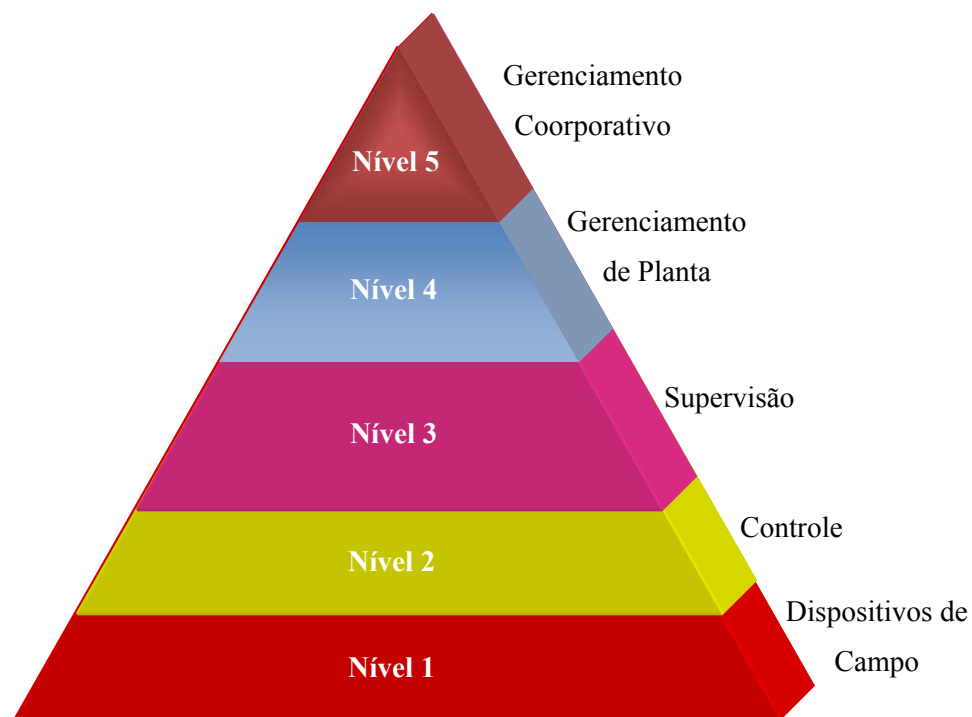


Figura 6 Pirâmide de Automação
Fonte: Adaptado de Moraes (2010)

A partir da Figura 6 é possível fazer uma breve descrição de cada nível, Moraes (2010).

- a) Nível 1: é o nível das máquinas, dos dispositivos e dos componentes da planta (chão de fábrica).
- b) Nível 2: é o nível dos controladores digitais, dinâmicos e lógicos, e de algum tipo de supervisão associado ao processo. Aqui encontram-se concentradores de informações sobre o Nível 1, e as interfaces homem-máquina (IHM).
- c) Nível 3: permite o controle produtivo da planta; normalmente é constituído por bancos de dados com informações dos índices de qualidade da produção, índices de produtividade, relatórios e estatísticas de processo, algoritmos de otimização da operação produtiva.
- d) Nível 4: é o nível responsável pela programação e pelo planejamento da produção, realizando o controle e a logística dos suprimentos.
- e) Nível 5: é o nível responsável pela administração dos recursos da empresa, em que se encontram os *softwares* para gestão de vendas e gestão financeira; é também onde se realizam a decisão e o gerenciamento de todo o sistema.

2.3.1 Controladores lógicos programáveis

Um sistema de controle é um dispositivo (controlador) ou conjunto de dispositivos (controladores) que comandam o comportamento de outros dispositivos (equipamentos, atuadores, etc.). Atualmente, todo processo necessita de algum tipo de controlador para garantir uma melhor segurança e viabilidade econômica. Desde os processos mais simples (do tipo liga-desliga de um ventilador em função de uma temperatura pré-estabelecida) aos processos mais complexos (como a planta de um reator nuclear para produção de energia

elétrica). Portanto, sistema pode ser definido como um dispositivo abstrato que recebe entradas e produz saídas como resposta a essas entradas.

Na prática, os blocos de um sistema de controle são dispositivos que exercem determinadas funções. A Figura 7 demonstra um sistema simples típico com alguns desses dispositivos.

Vale destacar que sistemas práticos podem sofrer, conforme Figura 7, ações de distúrbios e ruídos, isto é, variações que não podem ser controladas, mas afetam a operação e, por isso, precisam muitas vezes ser minimizadas através de dispositivos de compensação, filtragem, etc. Exemplo: vibrações, interferências eletromagnéticas, efeitos harmônicos, etc.

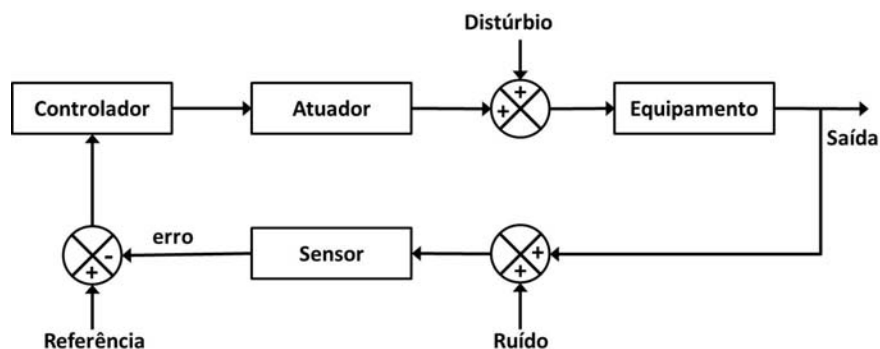


Figura 7 Exemplo de um sistema de controle, em malha fechada, e seus componentes

Fonte: Adaptado de Rosário (2005)

Com a industrialização da eletrônica, os custos diminuíram, ao mesmo tempo em que a flexibilidade aumentou, permitindo a utilização de comandos eletrônicos em larga escala.

Mas alguns problemas persistiram, e quem sentia estes problemas de forma significativa era a indústria automobilística, pois a cada ano com o lançamento de novos modelos, muitos painéis de comandos elétricos eram sucateados, pois os custos para alteração eram maiores do que a instalação de novos painéis de comandos elétricos.

Segundo Franchi e Camargo (2009), o Controlador Lógico Programável (CLP) foi desenvolvido a partir de uma demanda existente na indústria automotiva norte-americana. Suas primeiras aplicações foram na *Hydronic Division da General Motors*, em 1968, devido a grande dificuldade de mudar a lógica de controle de painéis de comando a cada mudança na linha de montagem, que implicavam em altos gastos de tempo e de dinheiro.

Historicamente, os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) tiveram a seguinte evolução: de 1970 a 1974, em adição às funções de intertravamento e sequenciamento (lógica), foram acrescentadas funções de temporização e contagem, funções aritméticas, manipulação de dados e introdução de terminais de programação de CRT (*Cathode Ray Tube*).

De 1975 a 1979 foram incrementados ainda, maiores recursos de *software* que propiciaram expansões na capacidade de memória, controles analógicos de malha fechada com algoritmos PID, utilização de estações remotas de interfaces de E/S (Entradas e Saídas) e a comunicação com outros equipamentos “inteligentes”.

Um Controlador Lógico Programável (CLP), ou do inglês *Programmable Logic Controllers* (PLC), é definido pelo IEC - (*International Electrotechnical Commission* (apud FRANCHI; CAMARGO, 2009) como:

Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para armazenamento interno das instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas.

De acordo com a definição da NEMA - *National Electrical Manufacturers Association* (apud FRANCHI; CAMARGO, 2009) é:

Um equipamento eletrônico que funciona digitalmente e que utiliza uma memória programável para armazenamento interno de instruções para implementar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, registro e controle de tempos, contadores e operações aritméticas para controlar, através de módulos de entrada/saída digitais (LIGA/DESLIGA) ou analógicas (1-5Vcc, 4-20mA, etc), vários tipos de máquinas ou processos.

Com os desenvolvimentos deste período, o Controlador Lógico Programável (CLP) passou a substituir o microcomputador em muitas aplicações industriais.

Com o advento dos controladores lógicos programáveis as alterações nos painéis de comando ficaram basicamente reduzidos a alteração de *software* o que garante maior agilidade e flexibilidade. A Figura 8 exemplifica um sistema de controle com controlador lógico programável.

De acordo com Franchi e Camargo (2009), os controladores lógicos programáveis são projetados e construídos para operarem em ambientes severos, portanto devem resistir a altas temperaturas, ruídos elétricos, poluição atmosférica, ambientes úmidos, etc.

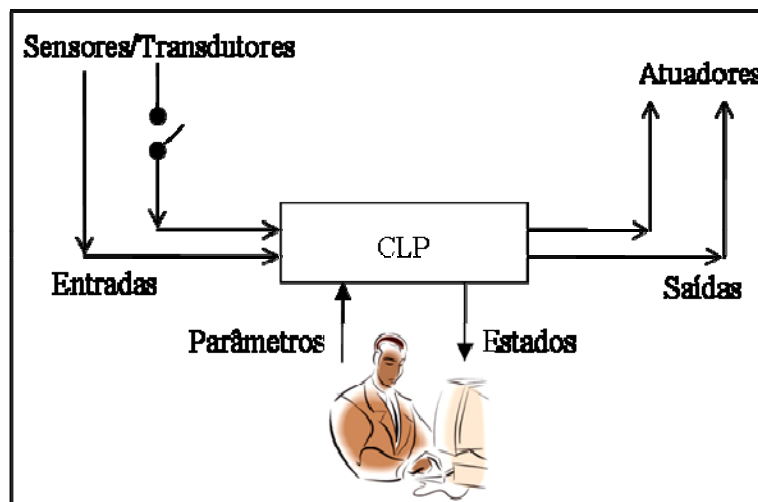


Figura 8 Representação de um sistema de controle com Controlador Lógico Programável

Fonte: Adaptado de Franchi e Camargo (2009)

A arquitetura de um controlador lógico programável (Figura 9) pode ser dividida em:

- a) Unidade Central de Processamento (CPU): comanda todas as atividades do controlador, sendo formada por dois elementos - processador e sistema de memória.
- b) Sistema de Interface de Entrada/Saída (I/O): por onde o controlador realiza a coleta de dados digitais/analógicos (entradas) através dos sensores ou transdutores, bem como fornece os sinais digitais/analógicos (saídas) para os atuadores (motores, lâmpadas, bobinas de contadores, eletroválvulas, etc.).
- c) Unidade de Comunicação: normalmente utilizada para realizar a programação do controlador, bem como sua comunicação com demais periféricos, como por exemplo, em uma rede industrial de instrumentos e sistemas supervisórios.

- d) Fonte de Alimentação: responsável pelo funcionamento da energia necessária para alimentação da CPU e dos módulos de entrada e saída, fornecendo todos os níveis de tensão exigidos para as operações internas do controlador.

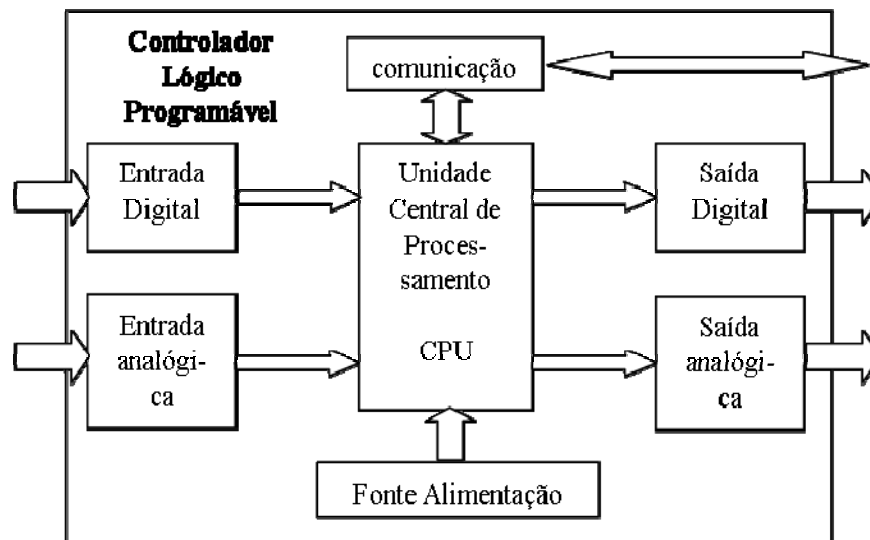


Figura 9 Diagrama de blocos do Controlador Lógico Programável
Fonte: Adaptado Rosário (2005)

Na Tabela 1, representam-se os benefícios da utilização de um controlador lógico programável em função de suas características, em um dado sistema de controle.

Tabela 1 Características e benefícios do controlador lógico programável

Característica do Sistema com CLP	Benefícios
Uso de componentes de estado sólido	Alta confiabilidade
Memória programável	Simplifica mudança Flexibiliza o controle

“continua”

Tabela 1 “conclusão”

Característica do Sistema com CLP	Benefícios
Microprocessador	Capacidade de comunicação Alto nível de performance Alta qualidade dos produtos Possibilidade de trabalhar com muitas funções simultaneamente
Contadores/temporizadores (<i>software</i>)	Facilidade para alterar presets Elimina <i>hardware</i>
Controle de relés via <i>software</i>	Reduz custo em <i>hardware</i> /cabeamento Redução de espaço físico Flexibilidade para instalação
Arquitetura modular	Facilmente instalado Redução de custos de <i>hardware</i> Expansibilidade
Variiedades de interfaces de I/O	Controle de uma grande variedade Elimina um controle dedicado
Estações remotas de I/O	Elimina cabeamentos longos Reduz tempo de manutenção
Indicadores de diagnóstico	Sinaliza a operação correta/incorrecta do sistema de controle
Interfaces modulares de I/O	Facilita a manutenção Facilita o cabeamento
Variáveis de sistema alocadas na memória de dados	Facilita gerenciamento/manutenção Podem ser colocadas na forma de um relatório de saída

2.3.1.1 Programação *Ladder*

A linguagem *Ladder* é uma linguagem gráfica baseada na lógica de relés e contatos elétricos para realização de circuitos de comandos de acionamentos (FRANCHI; CAMARGO, 2009)

A linguagem de programação *Ladder* foi a primeira que surgiu para programação dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Para que obtivesse uma aceitação imediata no mercado, seus projetistas consideraram que ela deveria evitar uma mudança de paradigma muito brusca. Portanto, deveria ser algo familiar para os profissionais de manutenção elétrica, como os eletricitistas e engenheiros eletricitistas. Dessa forma ela foi desenvolvida com os

mesmos conceitos dos diagramas de comandos elétricos que utilizam bobinas e contatos.

Na linguagem *Ladder*, cada contato pode assumir dois estados (fechado ou aberto). Isso representa uma variável booleana, ou seja, uma variável que assume um de dois estados (verdadeiro ou falso, "0" ou "1").

Cada linha do diagrama *Ladder* permite programar desde funções binárias até funções digitais complexas.

Toda bobina pode gerar contatos (abertos ou fechados), os quais ficam sob seu comando. Tal instrução deve constar obrigatoriamente na última coluna, correspondente à saída (ROSÁRIO, 2005).

De acordo com Franchi e Camargo (2009), visando atender aos diversos segmentos da indústria, incluindo seus usuários, e uniformizar as várias metodologias de programação dos controladores industriais, a norma IEC 61131-3 definiu sintática e semanticamente cinco linguagens de programação (Quadro 1):

- a) Diagrama de Blocos e Funções (FDB).
- b) Linguagem *Ladder* (LD).
- c) Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC ou *Grafcet*).
- d) Lista de Instruções (IL).
- e) Texto Estruturado (ST).

Quadro 1 Descrição das linguagens segundo a norma IEC 61131-3

Linguagem	Modo
Texto Estruturado (ST)	Texto
Lista de Instruções (IL)	
Diagrama de Blocos e Funções (FDB)	Gráfico
<i>Ladder</i> (LD)	
Sequenciamento Gráfico de Funções (<i>Grafcet</i>)	

Segundo Franchi e Camargo (2009) a linguagem *Ladder* possui as seguintes vantagens:

- a) possibilidade de uma rápida adaptação do pessoal técnico;
- b) possibilidade de aproveitamento do raciocínio lógico na elaboração de um comando feito com relés;
- c) fácil recomposição do diagrama original a partir do programa de aplicação;
- d) fácil visualização dos estados das variáveis sobre o diagrama *Ladder*, permitindo uma rápida depuração e manutenção do *software*;
- e) documentação fácil e clara;
- f) símbolos padronizados e mundialmente aceitos pelos fabricantes e usuários;
- g) técnica de programação mais difundida e aceita industrialmente.

Como desvantagens citam-se (FRANCHI; CAMARGO, 2009):

- a) sua utilização em programas extensos e com lógicas mais complexas é bastante difícil;
- b) programadores não familiarizados com a operação de relés tendem a ter dificuldades com essa linguagem; e
- c) edição mais lenta.

2.3.3 Sensoriamento

O uso de sensores e transdutores para detecção dos mais variados tipos de grandezas físicas e/ou posição, presença, etc.; são fundamentais para monitorar, regular e controlar a automação das máquinas/equipamentos dos mais diferentes tipos de processos. A este tipo de utilização dar-se-á o nome de sensoriamento.

Para Rosário (2005), sensores são elementos provedores de informação para os sistemas de automação. Eles podem ser utilizados no controle de processos discretos, com a medição das variáveis lógicas ou booleanas, e no controle de processos contínuos, em que normalmente se medem grandezas analógicas. Utilizados como detectores de erro, também chamados de comparadores, são dispositivos ou uma combinação de dispositivos empregados em sistemas automáticos de controle para determinar a diferença entre o valor da variável de saída e o valor desejado de entrada.

Ainda, de acordo com Rosário (2005), um sensor pode fornecer direta ou indiretamente um sinal que indica uma determinada grandeza física convertida em um sinal elétrico. Quando opera diretamente, sob a mesma forma de energia, é chamado de transdutor. O sensor de operação indireta altera suas propriedades, como resistência, a capacitância ou a indutância, sob a ação de uma grandeza de forma mais ou menos proporcional.

Pode-se dividir os sensores em dois tipos:

- a) sensores analógicos: produz continuamente uma grande faixa de variação, como por exemplo: 0 a 10Vcc, 4 a 20mA, etc.;
- b) sensores digitais: apresenta somente dois valores de seu estado, ou seja, 0 ou 1.

Atualmente, dispõe-se de uma grande variedade de tipos de sensores devido à existência de uma gama de necessidades de controle para processos contínuos e/ou discretos, bem como ao elevado número de soluções industriais.

Pode-se destacar dentre todos os tipos de sensores, os que mais são utilizados:

- a) de proximidade: mecânicos, ópticos, indutivos, capacitivos e ultrassom;
- b) de posição e velocidade: potenciômetros, LVDT, encoders absoluto e relativos, e tacogeradores;
- c) de força e pressão;
- d) analógico de temperatura (termopar); e
- e) de vibração e aceleração.

Para Rosário (2005) as principais características de um sensor são:

- a) linearidade: grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física;
- b) faixa de atuação: intervalo de valores da grandeza em que pode ser utilizado o sensor, sem causar sua destruição ou imprecisão na leitura;
- c) acurácia: razão entre o valor real e o valor medido pelo sensor;
- d) resolução: grandeza relacionada ao grau de precisão de leitura do sensor;
- e) sensibilidade: índice associado à acurácia, resolução, faixa de atuação, repetibilidade e a distância de detecção;
- f) tipos de sinais de entrada e saída: tipo de grandeza a ser medido (entrada) e a grandeza física necessária para se alimentar os controladores ou indicadores de processos (saída).

Neste trabalho foram utilizados sensores de:

- a) posição: encoder absoluto;
- b) pressão; e

- c) unidade relativa do solo, conforme proposto por Silva, Lima e Rodrigues (2007).

2.3.2.1 Encoder absoluto

Encoders são sensores digitais comumente utilizados para fornecer a realimentação de posição em atuadores. São compostos por discos de vidro ou plásticos que giram entre uma fonte de luz (LED) e fotodetectores (ROSÁRIO, 2005).

Dessa forma, o disco é codificado com setores alternados de transparência e opacidade (Figura 10), gerando pulsos de luz e escuridão quando há rotação do disco.

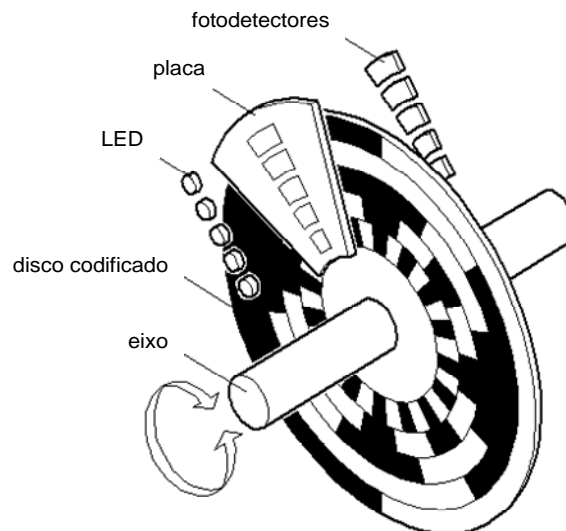


Figura 10 Visão construtiva de um encoder
Fonte: Adaptado de Rosário (2005)

Os encoders absolutos possuem um único sistema de codificação associado a cada posição angular, desta forma, sua principal vantagem é a

ausência de necessidade de inicialização de posição. Sua codificação de posição é realizada em código binário *Gray*.

2.3.2.2 Transdutor de pressão

A medida de grandezas de força e pressão é realizada, de acordo com Rosário (2005), de modo indireto a partir de desenvolvimento de um mecanismo de medida da deflexão de uma superfície (Figura 11), no qual pode-se citar:

- a) arranjo físico para utilização de LVDT;
- b) utilização de ponte de extensômetros em superfície metálica que tenha sua resistência alterada quando deformada;
- c) utilização de materiais piezoelétricos que gerem variação de corrente quando deformados.

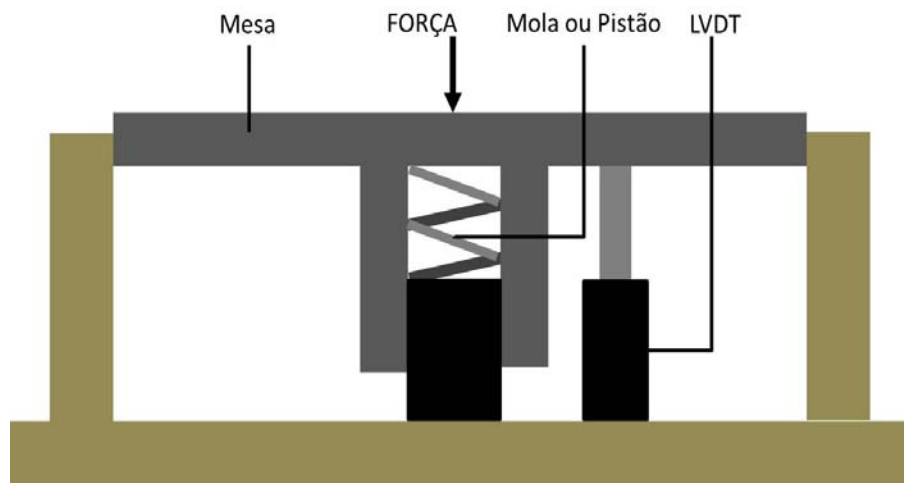


Figura 11 Princípio de funcionamento de célula para medição de força e/ou pressão, utilizando-se LVDT

Fonte: Rosário (2005)

2.3.2.2.1 LVDT

Um transformador linear variável, também conhecido como LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), é um sensor para medida de deslocamento linear (ROSÁRIO, 2005), por esta razão, o mesmo também é conhecido como sensor de deslocamento linear.

O LVDT consiste de um núcleo magnético que se move no interior de um cilindro, a carcaça do cilindro contém um núcleo primário, que pode se mover em função de um sinal de frequência (tensão elétrica), e dois cilindros secundários que detectam a frequência na tensão com uma magnitude igual ao seu deslocamento (Figura 12), o que torna este sensor muito sensível.

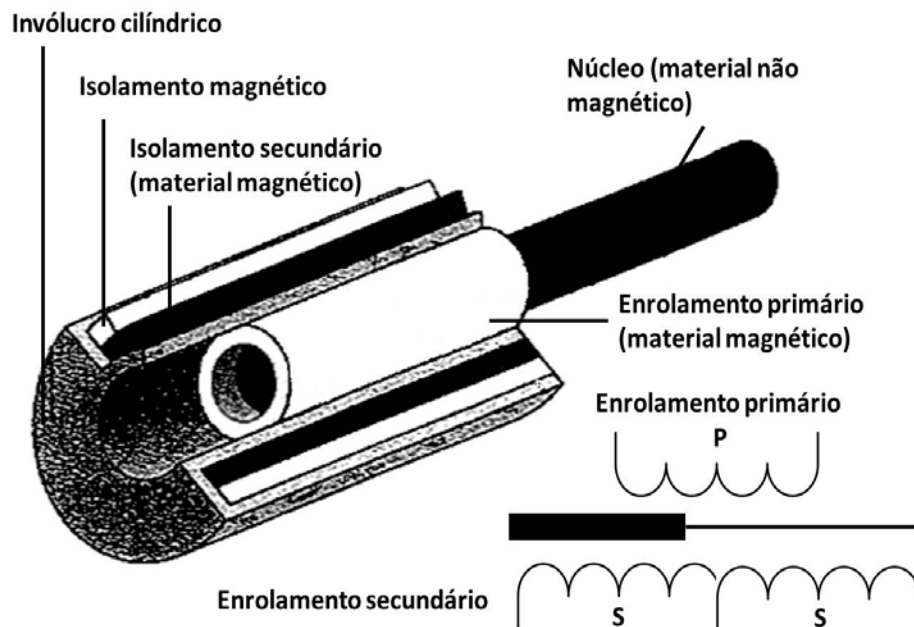


Figura 12 Princípio de funcionamento de um LVDT
Fonte: Rosário (2005)

2.3.2.2 Piezoelétrico

Materiais piezoelétricos são aqueles que geram variação de corrente quando deformados.

Os transdutores de pressão que utilizam materiais piezoelétricos também são conhecidos como transdutores de pressão do tipo semiconductor. Este tipo de transdutor é utilizado numa ampla gama de aplicações que vão desde equipamentos de consumo até equipamentos médicos, aeroespaciais e para a indústria.

O princípio de funcionamento, neste tipo de transdutor, para medição de pressão é a partir da diferença entre a pressão de referência (normalmente o vácuo) e a pressão que se deseja medir.

Pode-se observar na Figura 13 que nesse tipo de transdutor existe uma cavidade selada em que é feito o vácuo. Portanto, a pressão nessa cavidade serve de referência para o sensor.

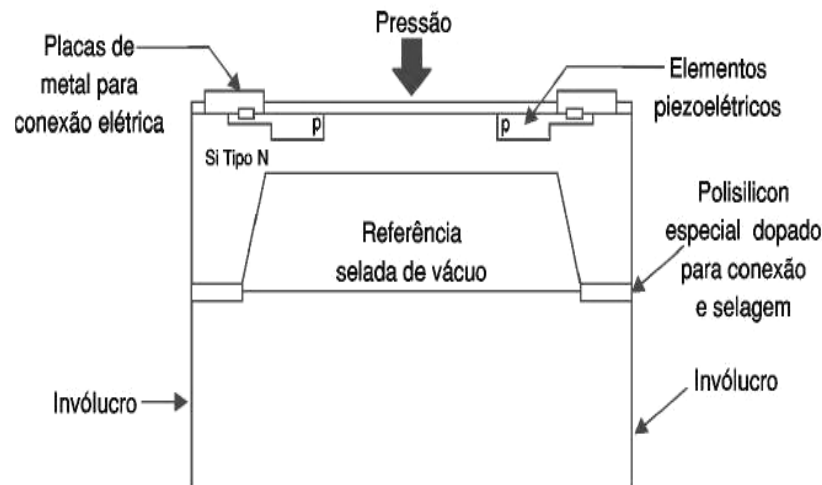


Figura 13 Exemplo de um transdutor de pressão do tipo semiconductor
Fonte: Adaptado de Kilian (2004)

2.3.4 Redes industriais

Atualmente, as redes industriais realizam uma revolução comparável a feita pela Internet na comunicação. Hoje, controladores lógicos programáveis, expansões, interfaces homem-máquina, inversores de frequência e medidores de grandezas, controladores de processos, sistemas supervisórios e outros elementos, formam redes complexas em fábricas (Figura 14), permitindo que a informação flua de forma instantânea e precisa ao longo de todas as etapas de produção, supervisão, gerenciamento e planejamento (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Segundo Rosário (2005), vários fatores motivaram a utilização das redes de comunicação industrial, tais como:

- a) sistemas completos interligados;
- b) possibilidade de obter dados confiáveis para tomada de decisão;
- c) redução de custos operacionais e de investimentos, graças ao compartilhamento de recursos;
- d) maior competitividade dentro do mercado;
- e) integração operacional.

Dentre os tipos de padrões utilizados nas redes industriais pode-se citar:

- a) ModBus;
- b) ProfiBus;
- c) Foundation;
- d) AS-i;
- e) CAN;
- f) CompoBus;
- g) Lonworks;

- h) Hart;
- i) InterBus-s;
- j) EIB;
- k) BACnet;
- l) ZigBee.

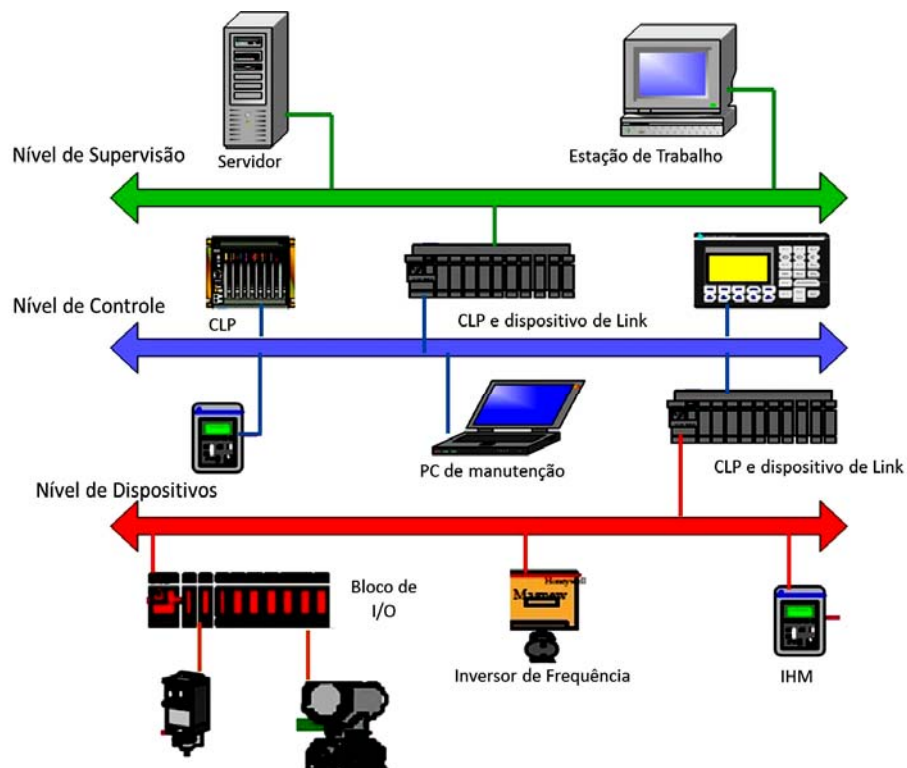


Figura 14 Exemplo de uma rede industrial e seus níveis
 Fonte: Adaptado de Franchi (2009)

Neste trabalho optou-se pela utilização dos padrões *ModBus*, *CompoBus®* e *ZigBee* devido à facilidade, disponibilidade interna dos

equipamentos adquiridos e, no caso do *ZigBee*, a utilização de uma rede sem fio de baixo custo.

2.3.4.1. Padrão *ModBus*

O *ModBus* é um padrão para barramentos de campo criado pela MODICON, empresa fabricante de produtos para automação. Porém, atualmente, é um padrão aberto que é utilizado por milhares de fabricantes de dispositivos para automação (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Esse padrão é baseado no modelo mestre-escravo, ou seja, os dispositivos escravos não podem comunicar entre si, ou seja, toda comunicação deve passar por um mestre. O mestre pode requisitar dados de um escravo em específico ou pode enviar uma mensagem comum a todos os escravos da rede.

Como a rede é única para interligação de todos os dispositivos, seja ele mestre ou escravo, e esta rede é bidirecional, é necessário designar um endereço para cada dispositivo. Tal endereçamento pode variar de 0 a 247, sendo que o mestre sempre é o endereço (nó) "0" e os escravos podendo variar de 1 a 247.

De acordo com Albuquerque e Alexandria (2009), o mestre possui quatro atribuições principais:

- a) assegurar a troca de informação;
- b) assegurar o diálogo com o operador do sistema;
- c) assegurar um diálogo com outros mestres ou computador para uma gestão centralizada do conjunto do processo; e
- d) assegurar a programação ou passagem de parâmetros para os escravos a fim de obter a flexibilidade da produção.

Segundo Rosário (2005) a utilização da tecnologia *ModBus* permite reduzir o sistema de controle em termos de *hardware* devido à grande redução de I/Os, substituídas por uma interface de comunicação que forma uma rede.

Para Rosário (2005), essa tecnologia requer apenas 2 fios para transmissão e recepção dos dados. Suas características elétricas da interface de comunicação digital bidirecional, entre circuitos baseados em tensão diferencial balanceada, proporciona altas taxas de transmissão (até 10Mbps), a longas distâncias (1.200 metros), alta imunidade a ruídos e conexões multiponto (Figura 15).

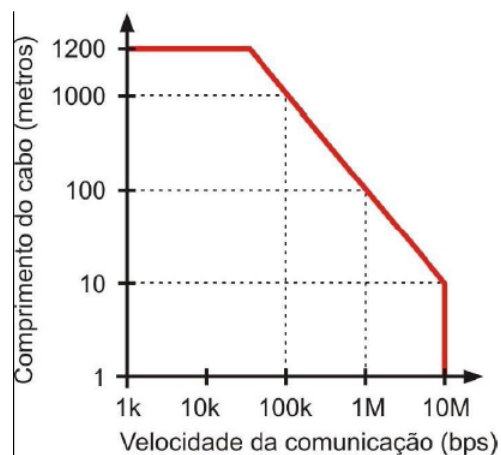


Figura 15 Distância da rede *ModBus*-RS485 em função da taxa de transmissão de dados

Fonte: Adaptado de Modicon (1996)

Nesse tipo de padrão as trocas de informações são realizadas por iniciativa do mestre no instante do envio da requisição. O escravo de destino a interpreta e envia uma resposta.

Cada um dos serviços possui um formato de mensagem para a solicitação (requisição) e outro para a resposta.

O formato dos pacotes de comunicação entre mestre e escravos pode ser feito nos modos RTU e ASCII (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009):

- a) *ModBus* ASCII: transmite dados codificados em caracteres ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) de sete *bits*. Este modo consome mais recursos da rede.
- b) *ModBus* RTU: neste modo os dados são transmitidos em formato binário de oito *bits*. Cada *byte* na mensagem contém dois caracteres hexadecimais de quatro *bits* cada. Foi o modo utilizado neste trabalho.

O frame de mensagem do modo *ModBus*-RTU (Figura 16) é composto por:

- a) *START*: composto por 4 períodos de tempos para inicialização e sincronismo dos escravos.
- b) *ADDRESS*: endereço dos escravos (1 *byte* - 1 a 247).
- c) *FUNCTION*: código da função (1 *byte*) a realizar ou já realizada.
- d) *DATA*: são os dados a serem transmitidos ou a serem lidos do escravo (inicialmente o *byte* menos significativo e em seguida o *byte* mais significativo).
- e) *CHECKSUM*: palavra de controle (2 *bytes*), que serve para detectar os erros de transmissão do tipo CRC-16 (*Cyclic Redundancy Check*). É calculada sobre 16 *bits*, a partir de todos os *bytes* da transmissão, com exclusão do próprio CRC. Utiliza-se o polinômio $X^{15}+X^{13}+1$ (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

<i>START</i>	<i>ADDRESS</i>	<i>FUNCTION</i>	<i>DATA</i>	<i>CHECKSUM</i>	<i>END</i>
T ₁ ...T ₄	8 bits	8 bits	n x 8 bits	16 bits (CRC)	T ₁ ...T ₄

Figura 16 Frame da mensagem no modo *ModBus*-RTU

Fonte: Adaptado (OMORON, 2008)

De Albuquerque e Alexandria (2009) destaca-se que o padrão *ModBus* define algumas regras de temporização a ser respeitadas. O tempo de linha inativa entre *bytes* de uma mesma mensagem (requisição ou resposta) não pode exceder a 1,5 tempos de *byte*. Por exemplo, para uma taxa de 9600bps, considerando o frame do *ModBus*-RTU de 48 *bits*, o tempo de *byte* é de aproximadamente 5ms, ou seja, o tempo de linha inativa seria de no máximo 7,5ms. Entre duas mensagens consecutivas (requisição e resposta, ou resposta e requisição), deve existir um tempo mínimo de inatividade na linha de 3,5 tempos de *byte* (17,5ms para o mesmo exemplo).

O atraso máximo para uma resposta de um escravo após a solicitação do mestre deve ser configurado no mestre através da opção de *time-out*. Para que, caso o mestre não detecte nenhuma resposta, após o tempo de *time-out*, o mestre enviará novamente a requisição.

No Quadro 2 demonstra-se as principais funções *ModBus* e seus respectivos códigos, em hexadecimal.

Quadro 2 Exemplo de códigos hexadecimal das funções mais usadas no *MODBUS*

CÓDIGO HEXA	FUNÇÃO
01	Leitura de 1 <i>bit</i> , simples bobina
02	Leitura de n <i>bits</i> (entradas discretas)
05	Escrita de 1 <i>bit</i> , simples bobina
06	Escrita de 1 palavra, apresenta um registro
08	Diagnóstico
0F	Escrita de n <i>bits</i> .

2.3.4.2 Padrão *CompoBus*®

O *CompoBus* é um padrão para sistemas remotos de entrada e saída (Remote I/O) de comunicação com fiação reduzida que mantém a funcionalidade e facilidade de uso do sinal original proporcionando maior velocidade, maior distância e comunicação altamente confiáveis (OMRON, 2007).

O *CompoBus* permite a conexão de até 32 dispositivos de entrada e saída (I/O) escravos a uma unidade mestre usando apenas dois fios de sinal, mesmo em linhas de produção longas que requerem múltiplos controle I/O.

Este padrão é proprietário, ou seja, ele é fechado e é de propriedade da OMRON, portanto só pode ser utilizados em equipamentos e dispositivos da marca OMRON.

Cada unidade mestre pode ser conectada a até 32 escravos de vários tipos, incluindo os terminais I/O e terminais do sensor, e permite I / O para comunicação com até 256 pontos (128 entradas, 128 saídas).

Dados de I/O podem ser trocados entre o mestre e os escravos sem necessidade de qualquer programação especial para as comunicações. As informações para cada escravo são trocadas entre os escravos e as correspondentes I/O na área do mestre, simplesmente definindo o número do nó de cada escravo (OMRON, 2007).

A unidade mestre do padrão *CompoBus*® já pode estar embutida em um controlador lógico programável (CLP) ou pode ser anexo a ele, sendo neste último caso, através do periférico SRM21 (Quadro 3), sendo necessariamente todos da marca OMRON.

A OMRON dispõe de dois tipos de unidades remotas (Remote I/O) que são as Séries SRT1/SRT2. A série SRT1 fornece escravos que suportam apenas o modo de alta velocidade de comunicação. Já os escravos da série SRT2

suportam altas velocidades de comunicação e longas distâncias de comunicações, já que são versões atualizadas.

Quadro 3 Características principais do periférico de comunicação *CompoBus* SRM21

ITEM	Unidade Mestre SRM21
Porta de Comunicação <i>CompoBus</i>	Sim
Capacidade de Programação	4k words
Número Máximo de I/O	256 (128 entradas e 128 saídas)
Número de pontos por pontos de nó	8 pontos
Número dos nós das entradas ou saídas utilizadas no mestre	IN0 até IN7 e/ou OUT0 até OUT7

Fonte: Adaptado (OMRON, 2007)

Para longas distâncias, a comunicação através da linha principal, de até 500m, é possível controlar dispositivos de I/O em uma vasta área de aplicação, usando-se somente 2 fios condutores. Neste caso, porém, cada ramal pode ser conectado somente a um único escravo, porque o ramal não pode ser mais ramificado. Além disso, o mestre deve estar conectado a uma ou outra extremidade da linha principal (Figura 17).

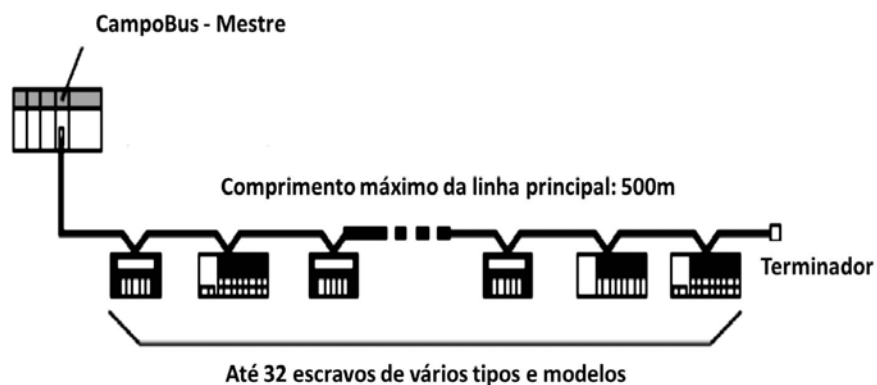


Figura 17 Exemplo da ligação de um *CompoBus*® para longas distâncias

Fonte: Adaptado (OMRON, 2007)

O comprimento da linha principal (“*Main line length*”) é o comprimento total do cabo de conexão desde o mestre até do resistor de terminação (“*Terminator*”), instalado ao final da linha principal. O comprimento da linha de ramal é o comprimento de um cabo de conexão de um escravo para a linha principal (“*Branch line length*”) e o comprimento total da linha ramo é a soma dos comprimentos de todos os ramos do sistema (“*Total branch line length*”), conforme Figura 18.

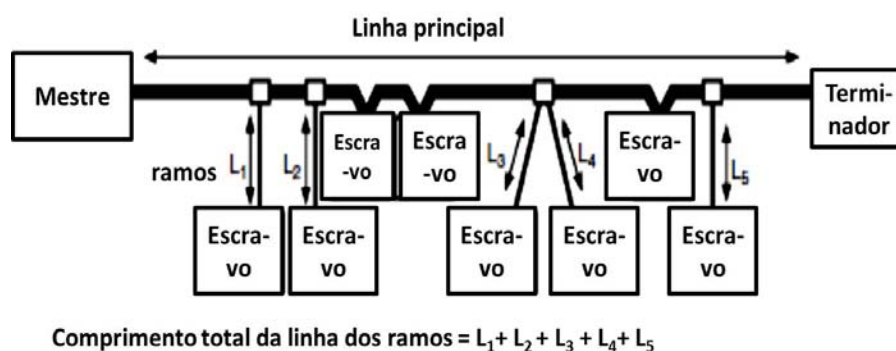


Figura 18 Comprimento dos cabos (linhas) de um padrão *CompoBus*®
Fonte: (OMRON, 2007)

O comprimento máximo da linha principal, da linha ramal dependerá do tipo do cabo e do número de escravos a ser utilizado, como representa a Tabela 2.

Tabela 2 Comprimentos máximos dos cabos para SRT2

Modo de Comunicação	Tipo de cabo	Comprimento Máximo do Cabo (m)		
		Linha Principal	Linha de ramal	Total dos ramos
Longas distâncias (SRT2)	2 condutores	500	6	120
	4 condutores		200	
	Flat		200	

Fonte: Adaptado (OMRON, 2007)

2.3.4.3. Padrão *ZigBee*

O padrão *ZigBee* foi desenvolvido para se tornar uma alternativa de comunicação em redes sem fio que não necessitem de soluções complexas para seu controle, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um padrão de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade (PINHEIRO, 2009).

Os dispositivos baseados na tecnologia *ZigBee* operam na faixa ISM (*Industrial Scientific Medical*) que não requer licença para funcionamento, incluindo as faixas de 2,4GHz (Global), 915Mhz (América) e 868Mhz (Europa) e com taxas de transferência de dados de 250kbps em 2,4GHz, 40kbps em 915Mhz e 20kbps em 868Mhz.

O padrão oferece, atualmente, interfaces com velocidades de conexão compreendidas entre 10Kbps e 115Kbps e com um alcance de transmissão entre 10m e 100m, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características ambientais (obstáculos físicos, interferência eletromagnética, etc.), o que representa uma das vantagens, devido a relação custo-benefício-complexidade, em se utilizar tal padrão em relação a outros padrões de comunicação sem fio (Figura 19).

Da obra de Caprile (2009), o módulo XBee-Pro ZB apresenta uma potência de saída de 10mW e uma sensibilidade do receptor de -102dBm. Desta forma, permite operar a mais de 1.500m em espaços abertos e até 120m em espaço fechados (urbanos).

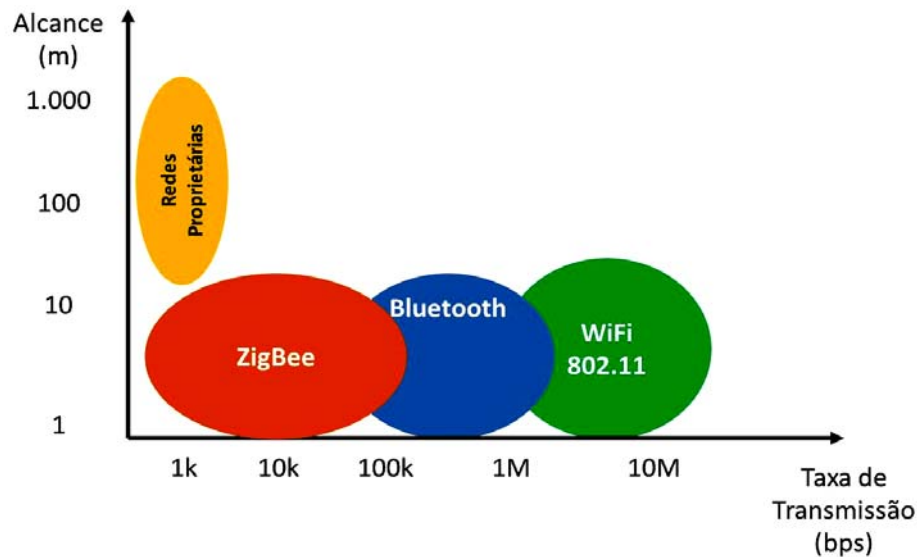


Figura 19 Comparação do *ZigBee* com outras tecnologias *wireless* (alcance *versus* taxa de transmissão)

Fonte: Pinheiro (2009)

De acordo com Pinheiro (2009), quanto ao problema de alimentação, os módulos podem ser alimentados até mesmo por baterias (pilhas) comuns, sendo que sua vida útil está relacionada diretamente com a capacidade da bateria e a aplicação a que se destina. Nesse aspecto, o padrão *ZigBee* foi projetado para suportar aplicações com o mínimo de consumo, que segundo Caprile (2009), a corrente de operação está por volta de 50mA, tanto para transmissão quanto para recepção e a tensão de operação é de 3 a 3,3Vcc.

Com relação a segurança dos dados, o padrão *ZigBee* adotou a proposta de um novo algoritmo de segurança, baseado na simplificação do algoritmo de roteamento AODV (*Ad-hoc On-demand Distance Vector*). Esta proposta foi adotada como parte da especificação IEEE 802.15.4.

A camada MAC utiliza o padrão AES (*Advanced Encryption Standard*) como seu algoritmo de criptografia, descrevendo uma variedade de rotinas de segurança. Estas rotinas têm como objetivo prover a confidencialidade, a

integridade e a autenticidade dos frames da camada MAC. A camada MAC faz o processamento de segurança, mas são as camadas superiores que controlam o processo, ajustando as chaves de criptografia e determinando os níveis de segurança que deverão ser usados. Quando a camada MAC transmite (ou recebe) um frame, verifica o destino (a fonte do frame), recupera a chave associada com esse destino (fonte), e usa então esta chave para processar o frame de acordo com a rotina de segurança designada para a chave que está sendo usada. Cada chave é associada a uma única rotina de segurança e o cabeçalho do frame MAC possui um *bit* que especifica se a segurança para o frame está habilitada ou não.

Com relação ao tipo de tráfego, o padrão *ZigBee* é muito flexível, já que está baseado no IEEE 802.15-4, o que permite assegurar o transporte de tráfego como por exemplo:

- a) dados periódicos, provenientes de sensores;
- b) dados intermitentes, provenientes de interruptores e chaves;
- c) dados provenientes repetitivos de baixa latência como, por exemplo, um *mouse*.

Para o caso específico dos dispositivos *ZigBee*, comercializados pela empresa Albacore, no Brasil, representantes da empresa DIGI, de onde se adquiriu os dispositivos *ZigBee*, deste trabalho, o ambiente de programação pode ser o CodeWarrior da Freescale, a linguagem C ou Assembler com compilador da Digi. Neste trabalho, utilizou-se a linguagem C devido a sua familiaridade.

Para Pinheiro (2009), a tecnologia *ZigBee* surge como uma alternativa viável que possibilita a utilização dos sistemas de controle sem fio em dispositivos mais simples.

2.3.5. Sistemas Supervisórios tipo SCADA

Um sistema supervisorio do tipo SCADA (*supervisory control and data acquisition* - sistema de controle e aquisiçao de dados) é um sistema responsável pela coleta e transferencia de dados lógicos e analógicos sobre o estado corrente de um dado processo produtivo, pela exibição desses dados na sala de controle e pelo comando remoto de dispositivos (automaticamente ou por iniciativa do operador), Albuquerque e Alexandria (2009).

Segundo Rosário (2005), o termo SCADA é designado como sistema de supervisao e controle e atualmente é responsável pelo monitoramento de variáveis de controle de um sistema, com o objetivo principal de fornecer subsídios ao operador para controlar ou monitorar um processo automatizado mais rapidamente, permitindo a leitura das variáveis em tempo real e o gerenciamento e controle do processo automatizado.

Atualmente, os sistemas SCADA podem ser utilizados como interface gráfica Homem-Máquina amigável, os quais utilizam as tecnologias da computação e da comunicação que permite a supervisao e/ou controle de sistemas automatizados.

Rosário (2005) afirma que o sistema SCADA tem como objetivo proporcionar o desenvolvimento de sistemas de controle por meio de controladores lógicos programáveis (CLP) industriais, com a visualização e o fornecimento de informações para usuários autorizados, a fim de permitir a conectividade, a visualização e os níveis de controle, e ainda a hierarquia da automação, tendo como resultado custos reduzidos de desenvolvimento e manutenção.

Um sistema de supervisao, do tipo SCADA, deve possuir as principais características:

- a) gerar gráficos para controle de variáveis;

- b) permitir programação de tarefas;
- c) gerar relatórios;
- d) ter uma ou mais estação de trabalho;
- e) permitir o controle e monitoramento do sistema;
- f) permitir o monitoramento de variáveis; e
- g) possuir interface gráfica do sistema.

Um sistema de supervisão permite uma visão global do sistema, além de obtenção de informações em tempo real de históricos do comportamento do sistema, como também a possibilidade de um Controle Estatístico do Processo (CEP), monitoração de alarmes/eventos, valores mínimos e máximos, além de permitir um sincronismo perfeito de funcionamento e programação global de horários de funcionamento, por exemplo, para períodos noturnos com tarifas reduzidas de energia elétrica.

Os *softwares* SCADA contam com muitos recursos prontos que um aplicativo de supervisão em automação normalmente utiliza, como exemplo, os objetos de interface com o usuário: telas, botões, campos de entrada de valores, gráficos, *browsers*, objetos de recursos internos (interface de banco de dados, servidor de alarmes, *drives*, fórmulas) e muitas outras facilidades (ALBUQUERQUE; ALEXANDRIA, 2009).

Hoje em dia, existem diversos tipos de fabricantes e fornecedores de *software* para desenvolvimento de sistemas SCADA. Muitos deles são dedicados, específicos para determinados equipamentos e outros são de uso geral, flexíveis e permitem a elaboração de aplicativos para os mais diversos níveis. Entre estes *softwares* pode-se destacar: *Elipse E3*, *WinCC*, *LabView*, *IN TOUCH* e *Lintouch*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução deste trabalho, primeiramente, foi necessário realizar um mapeamento da área irrigada quanto à umidade e declividade, o que demanda a instalação de sensores e transdutores de umidade em toda a área. Entretanto, a instalação de sensores que comunicam com o inversor de frequência, demanda cabos de comunicação, o que, na maioria das vezes é inviável devido às perdas, pois os sinais apresentam pequenas variações e, também devido a problemas técnicos para instalação enterrada. Outro fator limitante desta relação inversor de frequência e sensores é o limite de sensores a serem utilizados, por isso resolveu-se adotar a utilização de um controlador lógico programável, como sendo a unidade central de processamento de dados, ou seja, os sinais dos sensores são direcionados e analisados pelo controlador lógico programável e este envia um sinal para o inversor de frequência para ajustar a rotação do motor da bomba d'água, tudo em função da declividade e da umidade do solo.

O trabalho, também incorpora a instalação sensores de medição de umidade relativa do solo acoplados a microcontroladores com tecnologia *Zigbee*, que enviam as informações a uma central, o controlador lógico programável, que analisará os dados, iniciando ou não o processo de irrigação por pivô central, conforme a análise dos dados.

Para determinação de posicionamento da linha lateral do pivô central foi instalado um encoder absoluto no ponto do pivô (torre central), onde o sinal também era enviado para mesma central de processamento de dados dos sensores de umidade (o controlador lógico programável). Ao longo da linha lateral móvel, instalou-se 4 sensores de pressão, porém utilizando uma comunicação por fios no padrão *CompoBus®*, da Omron, utilizando-se somente 3 fios, tanto para alimentação elétrica como sinais de comunicação, interligados

a unidades remotas de comunicação, da Omron, para geração de pontos de endereços distintos para cada um dos sensores de pressão.

Os sensores de pressão, instalados ao longo da linha lateral do pivô central, eram os responsáveis pelo monitoramento da pressão de água, que também enviavam os sinais para a central, a fim de se garantir a pressão mínima do sistema, de forma a não se afetar a lâmina de água aplicada a cultura irrigada.

Portanto, o sistema de irrigação foi dotado de um controlador lógico programável, um encoder absoluto, um conjunto de sensores de umidade, um outro de sensores de pressão, unidades remotas de comunicação e um inversor de frequência, todos instalados no pivô central existente no Campus da UFLA, visando implantar a estrutura mínima necessária para execução de trabalhos de pesquisa voltados ao desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos, que contribuíssem para a disseminação do uso de sistemas automáticos de irrigação, com o objetivo de redução do consumo de energia elétrica.

Uma visão geral do sistema de controle automatizado, diagrama de blocos, está ilustrado na Figura 20.

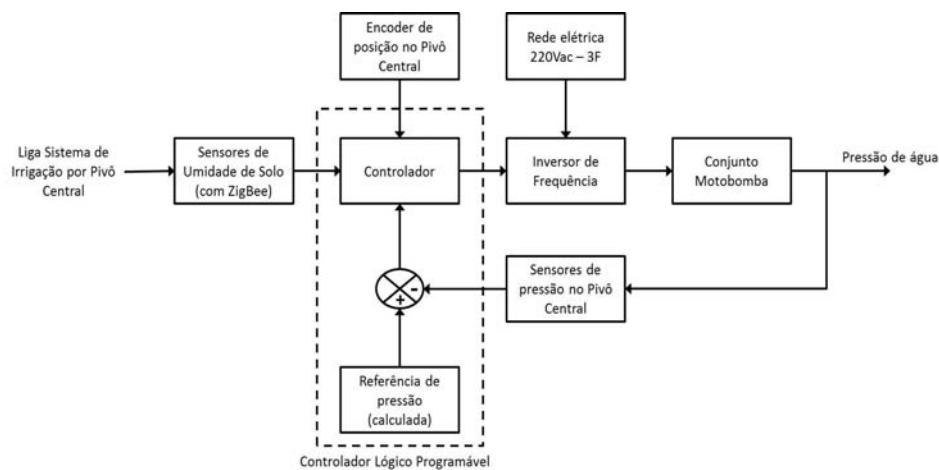


Figura 20 Visão geral do sistema de controle automatizado adotado que permitiu o controle da frequência do conjunto motobomba

3.1 O pivô central e seu conjunto motobomba

O trabalho foi conduzido em um pivô central, modelo Valley 4071-8000-VSN/2-94, Figura 21, instalado no campus da Universidade Federal de Lavras - UFLA (Lavras, Sul de Minas Gerais, altitude média 910m, 21°13'44" S e 44°58'39" W), cujas características técnicas são representadas no Quadro 4.

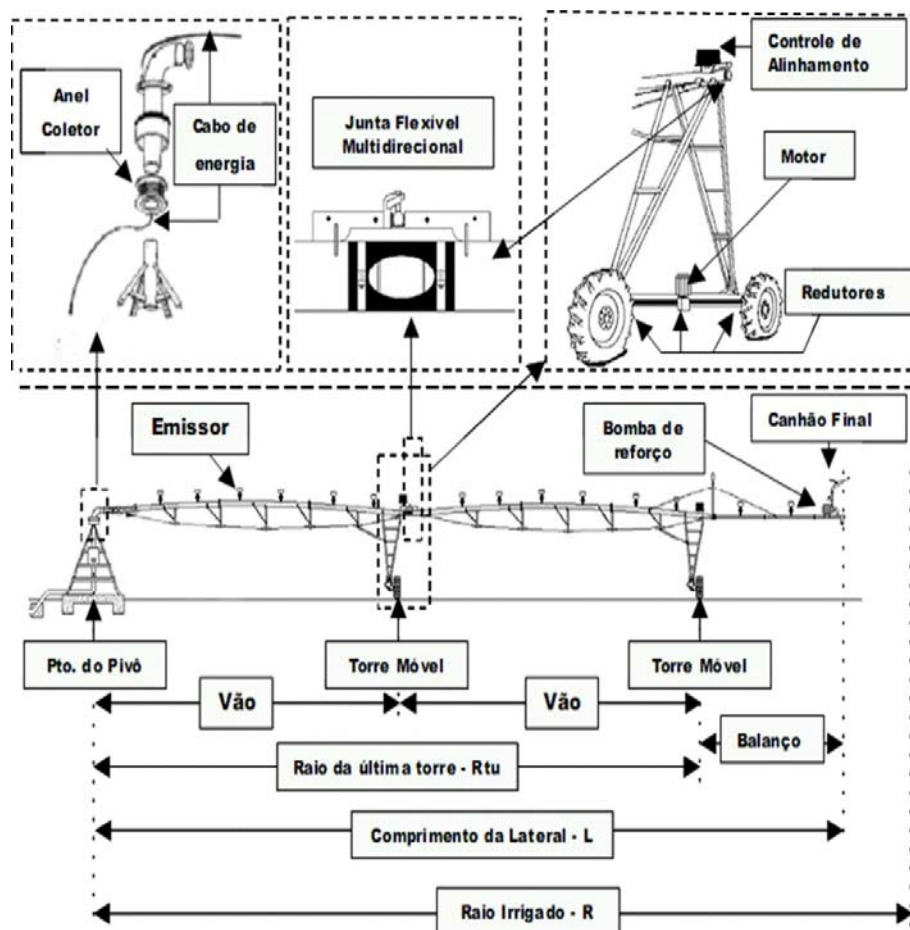


Figura 21 Detalhamento do pivô central instalado no campus da UFLA
Fonte: Adaptado (COLOMBO, 2006)

Quadro 4 Características técnicas do pivô central Valley utilizado nos ensaios

1 CARACTERÍSTICAS DO PIVÔ CENTRAL	
Marca / Modelo	Valley/4071-8000-VSN/2-94
Comprimento dos Vãos / Comp. Total:	34,6m + 34,4m + 3m (balanço sem canhão) / 72m
Diâmetro da Tubulação dos Vãos	6 5/8" (163mm)
Raio da Última Torre/Tempo de Giro	69,0 m / 1,71 h
Raio Irrigado/ Área Irrigada/ Giro	75,3 m / 1,8 ha / 360°
Vazão Total/Lâmina Bruta de 24horas	21,35 m ³ /h / 28,8 mm / 24 horas
2 TUBULAÇÃO ADUTORA	
Material/Diâmetro/Comprimento	Aço Zincado / 70 mm / 258 m
3 ALTURA MANÔMETRICA TOTAL/ NPSH DISPONÍVEL	
Carga de Pressão no Final da Lateral	20,00 mca
Carga do Desnível Ponto do Pivô –Ponto Mais Alto	8,00 mca
Perda de Carga na Lateral do Pivô	0,02 mca
Carga da Altura dos Aspersores	4,55 mca
Carga de Pressão no Ponto do Pivô	32,58 mca
Carga do Desnível Motobomba - Ponto do Pivô	34,00 mca
Perda de Carga na Adutora	12,42 mca
Carga da Altura Máxima de Sucção Prevista	3,00 mca
Perdas Localizadas	3,25 mca
Altura Manométrica Total	85,25 mca
NPSH Disponível no Local	5,31 mca
4. UNIDADE DE BOMBEAMENTO	
Descrição do Tipo de Bombeamento:	Normal Sem Associação
4.1 Dados da Bomba	4.2 Dados do Motor
Marca/Modelo: IMBIL / BEK 40/3	Marca: WEG
Diâmetro do Rotor(ES): 3 x 145mm	Fases: Trifásico
Vazão / HMT: 21,35m ³ /h e 105,00m	Rot. Nominal/Polos: 3540 rpm/2
Rend. / NPSHreq: 62,5% / 3,5mca	Potência Nominal: 15 kW/20CV
Pot.no Eixo Acionamento: 13,4 CV	Tensão/Corrente: 220V/ 50 A

O pivô irriga uma lavoura de café (Figura 22) que, conforme indicado no esquema da área ilustrado na Figura 24, apresenta um desnível geométrico de 18,1 m entre o ponto mais alto (cota 108m) e o ponto mais baixo da área irrigada (cota 89,9m). Um esboço deste desnível está representado na Figura 23.



Figura 22 Foto do pivô central do Campus da ULFA em funcionamento de irrigação

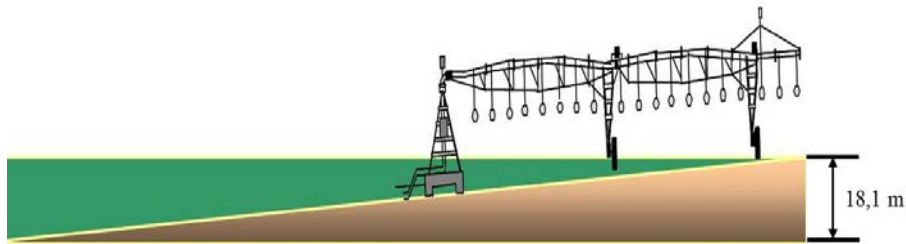


Figura 23 Esboço do plano de inclinação (declividade) do pivô central instalado no Campus da UFLA

Os ângulos que identificam o posicionamento da lateral móvel durante o seu giro e as correspondentes cotas arbitrárias do rastro da última torre móvel, que foram estabelecidas, considerando o ponto do pivô (centro da área irrigada) localizado na cota arbitrária 100m, são também ilustrados na Figura 24. No levantamento altimétrico das cotas da última torre, o seu deslocamento, em graus, foi determinado baseado em uma razão fixa de 12,04 m de deslocamento no rastro para cada 10° de giro. Essa relação foi determinada em função do comprimento total do círculo delimitado pela última torre, que apresentava um raio de 69 m 9 (Quadro 4).

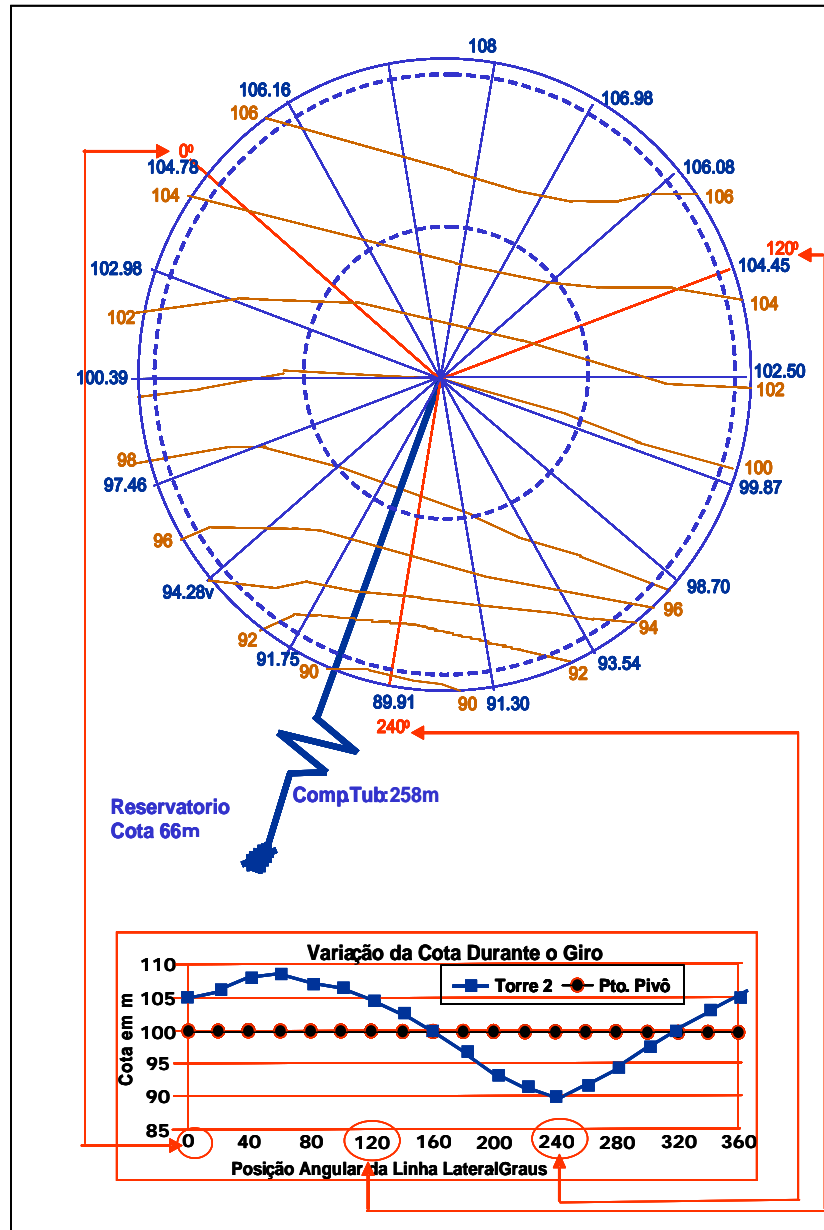


Figura 24 Esquema da topografia da área irrigada pelo pivô, assumida pela última torre

Uma bomba centrífuga, da marca Imbil, modelo BEK 40/3, com 3 rotores de 145mm, é utilizada no abastecimento de água do pivô. A bomba é acionada por um motor de indução trifásico, do tipo gaiola, com dois polos, da marca WEG, com potência nominal de 15kW, frequência nominal de 60Hz e rotação nominal de 3540 rpm.

Os valores da potência nominal no eixo de acionamento ($PM_n = 15\text{kW}$) e da rotação nominal ($n_n = 3540 \text{ rpm}$) declarados na placa de identificação do motor elétrico permitiram determinar o valor do seu torque nominal ($\tau_n = 40,46 \text{ N.m}$). Essas informações associadas ao valor da rotação síncrona do motor ($n_s = 3600\text{rpm}$) permitem estabelecer, de acordo com as equações 19 e 17, as seguintes expressões matemáticas para estimativa do torque no eixo de acionamento da bomba (τ em N.m) e da potência mecânica (PM em W) em função da rotação do eixo da bomba (n_e em rpm):

$$\tau = \frac{40,46 \cdot (3600 - n_e)}{3600 - 3540} \quad \text{válida para } 3540 \leq n_e \leq 3600 \quad (29)$$

$$PM = 4,237 \cdot \frac{(3600 - n_e)}{(3600 - 3540)} n_e \quad \text{válida para } 3540 \leq n_e \leq 3600 \quad (30)$$

Quando o motor elétrico, de 2 polos, da unidade de bombeamento é alimentado pelo inversor de frequência, com qualquer valor de frequência da rede (f), as equações 29 e 30 tomam a forma generalizada estabelecida na equação 28:

$$\tau = \frac{40,46 \cdot (60f - n_e)}{60} \quad \text{válida para } 60f - 60 \leq n_e \leq 60f \quad (31)$$

$$PM = 4,237 \frac{(60f - n_e)}{60} n_e \quad \text{válida para } 60f - 60 \leq n_e \leq 60 \quad (32)$$

Para permitir variações da rotação do eixo de acionamento da bomba, através de variações da frequência da rede elétrica de alimentação do motor, foi instalado um inversor de frequência, da marca OMRON, modelo 3G3RX-A2150, 220V/15kW na rede elétrica de alimentação do motor (Figura 25).



Figura 25 Foto do inversor de frequência instalado dentro do painel de proteção

As curvas de altura manométrica *versus* vazão e rendimento *versus* vazão, da bomba IMBIL BEK 40 operando com rotores de 140 e 150 mm e rotação de 3500 rpm, estão ilustrados nas Figura 26 e Figura 27. Na Figura 26, estão demonstrados os 4 pares, conforme proposto por Azevedo (2003), de pontos lidos na curva vazão *versus* altura manométrica total ($Q = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HMT = 44,5m; $Q = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HMT = 43m; $Q = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HMT = 40m; $Q = 30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HMT = 33m) que, quando associados às demais características operacionais da bomba ($Nr = 1$, $\phi = 0,15\text{m}$, $\omega = 366,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), permitiram determinar as constantes a_H , b_H , c_H e d_H da equação 14.

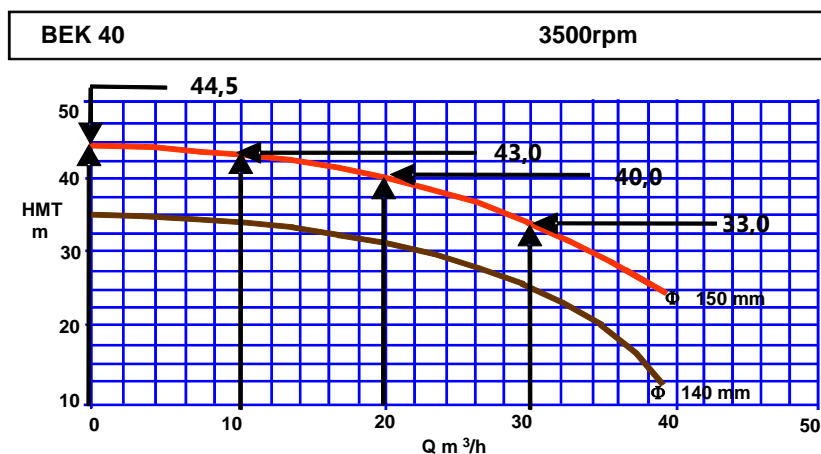


Figura 26 Curva altura manométrica total *versus* vazão
 Fonte: Adaptado (CATÁLOGO..., 1997)

Na Figura 27, são demonstrados os 4 pares de pontos lidos, conforme proposto por Azevedo (2003), na curva de vazão *versus* rendimento ($Q = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $\eta = 0,4$; $Q = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $\eta = 0,6$; $Q = 28 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $\eta = 0,64$; $Q = 34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, $\eta = 0,6$) que, quando associados às demais características operacionais ($Nr = 1$, $\phi = 0,15\text{m}$ e $\omega = 366,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), permitiram determinar as constantes a_η , b_η , c_η , e d_η da equação 15.

Antes do início das avaliações, foi verificado se as montagens dos bocais dos emissores e das válvulas reguladoras de pressão estavam de acordo com a listagem fornecida pelo fabricante do pivô. Ao longo desta verificação, constatou-se que os três primeiros emissores da lateral móvel não estavam presentes. Em função disso, o valor considerado da vazão do pivô foi reduzido de $21,35 \text{ m}^3/\text{h}$ (94 gpm), como declarado no Quadro 4, para $21 \text{ m}^3/\text{h}$ ($92,09 \text{ gpm} = 94 \text{ gpm} - 0,5 \text{ gpm} - 0,63 \text{ gpm} - 0,78 \text{ gpm}$).

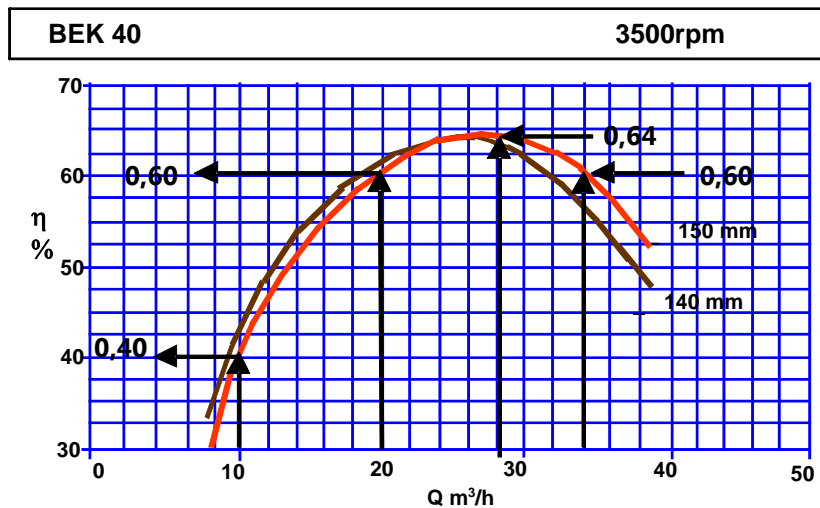


Figura 27 Curva rendimento *versus* vazão
 Fonte: Adaptado (CATÁLOGO..., 1997)

3.2 Monitoramento da motobomba

O monitoramento da altura manométrica total fornecida pela bomba foi efetuado com a instalação de transdutores de pressão no corpo da bomba (um transdutor de pressão absoluta na entrada da bomba e um transdutor de pressão relativa na saída da mesma, Figura 28). Os transdutores instalados na unidade de bombeamento tinham uma saída RS232, que permitiu, com auxílio de um *software* específico, o armazenamento, em computador, dos dados de pressão de entrada e pressão de saída, coletados com intervalos de tempo de 10 segundos.

Devido a problemas de distorção harmônica gerada, na rede elétrica, pelo inversor de frequência, foi necessária a instalação de uma reatância de rede no ramal de entrada de alimentação da rede do inversor de frequência. Conforme Franchi (2009), recomenda-se a instalação das reatâncias de rede para minimizar sobretensões transitórias, reduzir harmônicas, melhorar o fator de potência, diminuir a distorção de tensão na rede de alimentação.



Figura 28 Transdutores de pressão instalados na unidade de bombeamento

A Figura 29 exemplifica o modo como foi realizada a instalação da reatância de rede em conjunto com o inversor de frequência.

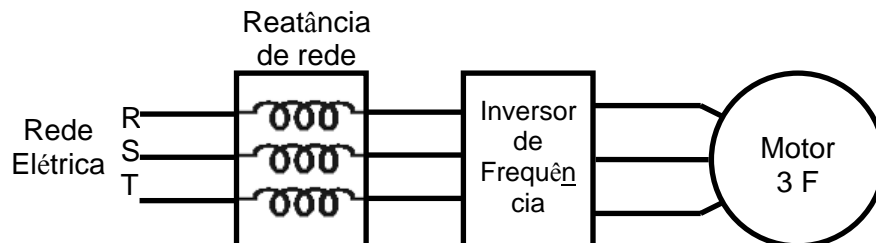


Figura 29 Esquema da instalação da reatância de rede ao inversor de frequência
Fonte: Adaptado (FRANCHI, 2009)

Para assegurar, nos diferentes testes realizados, que o registro gaveta instalado na saída da bomba estivesse completamente aberto, não afetando os valores de pressão da água fornecida ao pivô, um terceiro transdutor de pressão foi instalado após o registro gaveta da bomba.

A rotação do eixo de acionamento da bomba (eixo do motor elétrico) foi determinada com um tacômetro ótico (Figura 30).

Os parâmetros da rede elétrica de alimentação do motor e do inversor de frequência, que permitiram estabelecer o consumo de energia elétrica, foram monitorados com a instalação, na entrada de alimentação do conjunto motobomba, de um medidor digital (Spectrum K da Nansen), cujos valores de leitura foram registrados, via PC, utilizando-se o *software* DRACO, versão 3.2, com comunicação por RS232 (Figura 31).



Figura 30 Utilização do tacômetro para leitura da rotação do eixo do conjunto motobomba

Durante o giro do pivô, foram determinados a tensão elétrica, a corrente elétrica, as potências ativa, reativa e aparente, o fator de potência e o diagrama fasorial da energia elétrica total, consumida pelo conjunto inversor e motobomba.

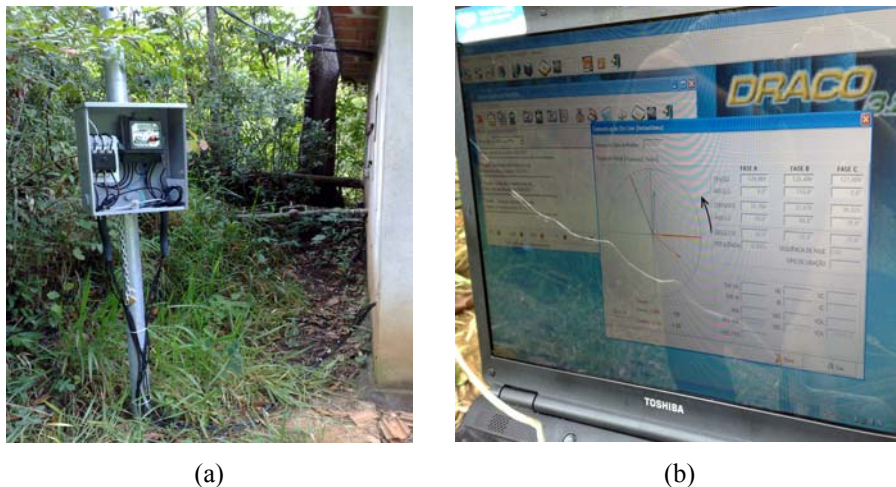


Figura 31 Medidor digital Spectrum K, da Nansem (a) e *software* da DRACO versão 3.2 (b)

3.3 Monitoramento da tubulação do pivô

Tendo em vista que no pivô central Valley 4071-8000-VSN/2-94 foi instalado um painel modelo *SELECT*, o monitoramento da posição da lateral foi realizado pelo registro, em intervalos regulares de 2 minutos, da leitura do ângulo de posicionamento da lateral móvel mostrado no painel do pivô.

Levando em conta a inexistência de um ponto de tomada da pressão na base da torre central do pivô, conforme implícito nas equações 9 e 10, optou-se por controlar a pressão no tubo de subida do pivô em uma tomada de pressão situada na mesma altura de instalação dos emissores em relação ao solo (ΔE_E).

Em decorrência da instalação de: (a) um vacuômetro na entrada da bomba, (b) um manômetro na saída da bomba, e (c) um manômetro no tubo de subida da torre central, na mesma elevação em relação à superfície do solo dos emissores, os termos das equações 9 e 10 foram agrupados de uma forma mais adequada:

$$HMT = LV + LM_B \quad (33)$$

$$LV = hf_s + \Delta E_s \quad (34)$$

$$LM_B - LM_{TS} = hf_A + \Delta E_A + hf_{TS} + \Delta E_E \quad (35)$$

$$ECP_\alpha = LMT_{TS} - r_\alpha \cdot s_\alpha - J_{r=0} \cdot Leq \cdot F_{r=r\alpha} - HS_{\min} \quad (36)$$

onde:

HMT = altura manométrica total (mca);

LV = leitura do vacuômetro na entrada da bomba (mca);

LM_B = leitura do manômetro no corpo da bomba (mca);

hf_s = perda de carga na tubulação de sucção (mca);

ΔE_s = carga da altura geométrica de sucção (mca);

LM_{TS} = leitura do manômetro no tubo de subida do ponto do pivô (mca);

hf_A = perda de carga na adutora do pivô central (mca);

ΔE_A = carga do desnível geométrico entre o eixo da bomba e a base do ponto do pivô central;

hf_{TS} = perda de carga no tubo de subida do ponto do pivô central (mca);

ΔE_E = carga da altura de instalação dos emissores em relação ao solo (mca);

ECP_α = excesso de carga piezométrica no ponto de mínima pressão da posição α (mca);

r_α = distância, na posição α, o ponto do pivô até o ponto de mínima pressão da lateral (m);

Leq = comprimento equivalente da linha lateral (m);

s_α = declividade da linha lateral na posição α (s_α > 0 para deslocamento ascendente da água, e s_α < 0 para deslocamento descendente da água);

J_r = perda de carga na distância r do ponto do pivô central (m.m⁻¹);

Fr = fator adimensional de correção do cálculo da perda de carga até o ponto r;

HS_{\min} = carga piezométrica da pressão mínima de serviço dos emissores (mca).

Nas equações 33, 34, 35 e 36 fica implícito que a componente cinética da energia da água bombeada foi desprezada.

Para o monitoramento da pressão ao longo da lateral móvel do pivô foram instalados 05 (cinco) *data loggers*, *pressure loggers* marca Dikson, modelo PL300, em quatro posições diferentes da lateral. Estes equipamentos foram colocados dentro de caixas de aço zincado pintadas de branco e revestidas de isopor, para minimizar as variações de temperatura no interior das mesmas que pudessem influenciar na coleta e armazenamento dos dados de pressão (Figura 32).



Figura 32 Instalação dos *data loggers* ao longo da linha lateral móvel do pivô central

O primeiro *data logger* foi instalado a uma distância de 34,7 m do ponto do pivô, o segundo a 56,2 m, o terceiro, o quarto e quinto a 71,7 m do ponto do pivô. Os quatro primeiros *data loggers* foram conectados ao tubo de descida dos emissores, imediatamente antes da válvula reguladora de pressão. Somente o quinto *data logger* foi conectado ao tubo de descida do emissor em um ponto localizado após a válvula reguladora de pressão do último emissor do pivô, de

forma a permitir a verificação do adequado funcionamento da válvula reguladora de pressão.

Foi adotado um intervalo de 20s para coleta dos dados de pressão ao longo da lateral móvel, planejando-se manter a durabilidade das baterias internas e ao mesmo tempo, coletar-se um número expressivo de dados em relação ao tempo de giro do pivô geral, de 1h42min. Ao fim da movimentação da lateral do pivô, um cabo USB, de 5m de comprimento, foi utilizado para transferir os dados adquiridos pelos *pressure loggers* para um computador. A leitura da carga de pressão registrada pelos *data loggers* foi acrescida de 2,5 mca, devido ao desnível vertical entre o ponto de instalação dos instrumentos na lateral móvel do pivô e o ponto de tomada de pressão no tubo de descida dos emissores.

A fim de se garantir a confiabilidade e permitir-se a comparação de dados, foram instalados, ao longo da linha lateral móvel do pivô central e no mesmo ponto de tomada de pressão dos *data loggers*, quatros sensores de pressão da marca HBM, modelo P15RVA1/10B, com alimentação de 18 a 30 Vcc, sinal de saída de 0 a 10Vcc e pressão de trabalho de 0 a 10 bar, conforme ilustra a Figura 33.

O monitoramento e coleta de dados dos sensores de pressão da HBM, pelo controlador lógico programável, foi realizado através da instalação de uma rede com padrão de comunicação em *CompoBus*®, da OMRON.

Este padrão foi escolhido, pois permite a interligação de vários sensores utilizando somente 2 fios conectados a unidades remotas de endereçamento, que funcionaram como um amplificador de sinal enviado dos sensores para o controlador lógico programável (utilizado como central de controle e processamento do sistema de irrigação, neste trabalho).



Figura 33 Sensores de pressão HBM, modelo P15RVA1/10B (a) e posição instalada dos sensores de pressão HBM no mesmo ponto de tomada de pressão dos *data loggers* (b)

As unidades remotas, da marca OMRON, eram do modelo SRT2-AD04, que permitiam a instalação de até 04 sensores por unidade. Devida à distância entre os pontos de monitoramento de pressão ao longo da linha lateral móvel, optou-se pela instalação de uma unidade de terminal remota para cada um dos sensores. Os endereços dos nós da rede foram especificados de 1 a 4, mesma sequência da numeração dos *data loggers*, também instalados ao longo da linha lateral móvel do pivô (Figura 34).



Figura 34 (a) Unidade remota da OMRON, modelo SRT2-AD04 e (b) instalação das unidade remotas ao longo da linha lateral móvel do pivô

3.4 Definição das condições ideais para cada posição da lateral móvel do pivô

Em cada posição angular assumida pela lateral móvel do pivô, a condição ideal de funcionamento da unidade de bombeamento foi definida pelo Menor Valor de Rotação do eixo de acionamento da bomba que assegura a Menor Pressão de Entrada Requerida pela válvula reguladora de pressão localizada no Ponto de Mínima Pressão da lateral móvel do pivô.

Com base nos modelos das válvulas reguladoras de pressão instaladas no pivô (*Senninger Pressure Master Regulator*, modelos PMR-20LF e PMR20MF) e nas vazões dos emissores instalados no pivô (mínima de 0,51GPM e máxima de 7,5 GPM), o valor da menor pressão de entrada requerida pela válvula reguladora foi definido de acordo com os critérios ilustrados na

Tabela 3.

Nas posições da lateral que requerem um fluxo ascendente de água no interior da mesma, o ponto de mínima pressão localiza-se na extremidade externa da lateral móvel, onde a vazão do emissor é maior (7,5 GPM) e o modelo de válvula reguladora apresenta maior capacidade de fluxo (modelo PMR-20MF, para vazões de 2 a 20 GPM). Neste caso, de acordo com a

Tabela 3, a carga mínima de pressão requerida seria 17,6 mca. Nas posições da lateral que requerem um do fluxo descendente de água no interior da mesma, o ponto de mínima pressão tende a se aproximar da torre central do pivô, em uma região onde a vazão dos emissores é menor (0,51 gpm) e onde predominam válvulas reguladoras de menor capacidade de fluxo (modelo PMR-20LF, para vazões de 0,1 a 8 gpm). Neste caso, de acordo com a Tabela 3, a carga mínima de pressão seria 16,9 mca.

Posteriormente, tendo em vista que, de acordo com a Quadro 4, o fabricante do pivô indica uma carga mínima de pressão ao longo da lateral móvel do pivô de 20mca, que inclui uma pequena margem de segurança em relação ao valor recomendado pela curva do fabricante das válvulas (18,3 mca), foi estabelecido que a condição ideal de funcionamento da unidade de

bombeamento é identificada pelo MENOR VALOR DE ROTAÇÃO do eixo de acionamento da bomba que assegura uma CARGA DE PRESSÃO DE 20mca na entrada da válvula reguladora de pressão instalada NO PONTO DE MÍNIMA PRESSÃO da lateral móvel do pivô.

Tabela 3 Carga mínima de pressão requerida na entrada da válvula reguladora de pressão em função do modelo e da vazão na válvula - Dados das curvas da Senninger

Modelo da Válvula Reguladora de Pressão	Vazão (gpm)	Pressão Mínima (psi)	Carga Mínima (mca)
PMR 20MF	20	26	18,3
	16	25	17,6
	10	25	17,6
	2	25	17,6
	8	25	17,6
PMR 20LF	6	25	17,6
	3,5	24	16,9
	0,1	24	16,9

3.5 Estratégias de controle da frequência da rede

O controle automatizado da frequência da rede elétrica de alimentação do motor, utilizado no acionamento da bomba que fornece água ao pivô foi realizado através da utilização de um Controlador Lógico Programável (CLP), da OMRON, modelo CP1H-X40DT1-D, em comunicação *ModBus*, via RS485, com o inversor de frequência (Figura 35).

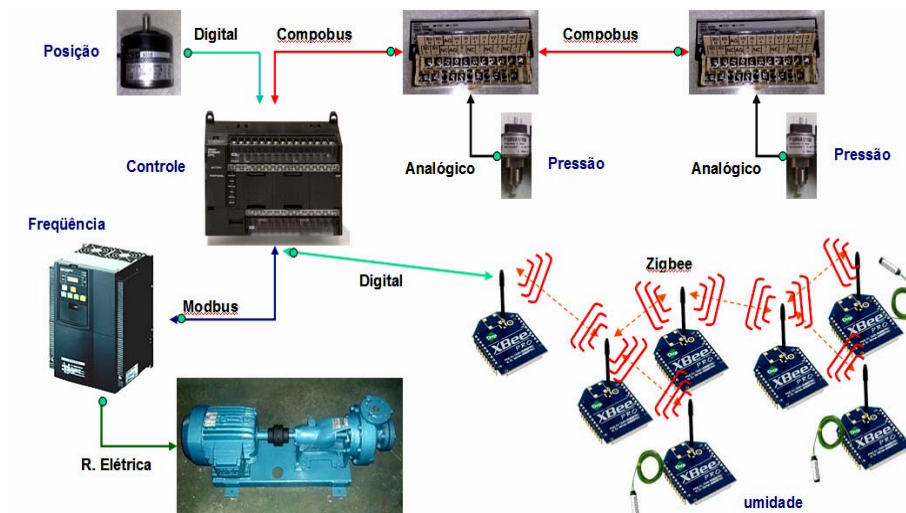


Figura 35 Esboço do Sistema de Controle (posição x pressão x frequência), com seus componentes e tipos de redes de comunicação envolvidas

A comunicação *ModBus*, RS 485, é amplamente utilizada na indústria devido a sua facilidade de programação, flexibilidade e confiabilidade no tráfego das informações, o que determinou sua escolha neste projeto, bem como a sua utilização em 2 fios. A configuração da rede *ModBus* foi definida na topologia mestre-escravo, onde o CLP é o mestre da rede e o inversor de frequência o escravo.

Para verificação da umidade de solo foi utilizado microcontroladores com tecnologia *ZigBee* incorporada em conjunto com sensores de umidade de solo. Utilizou-se o módulo de microcontrolador Digi XBee-PRO ZB (S2B), com conector RPSMA, *Extended-Range*, programável e devidamente acoplados na placa serial INT700, para módulo *Digi XBee (Interface Serial RS232)*, ambos os produtos adquiridos da empresa Albacore.

Essa junção do microcontrolador com *ZigBee* e sensor de umidade foi adotada a fim de se evitar cabos espelhados ao longo do terreno, onde se encontrava a cultura irrigada, uma vez que toda a transmissão de sinal é realizada por uma rede sem fio (*ZigBee*).

Todo o controle do sistema foi realizado pelo CLP que foi parametrizado e programado, através da linguagem *Ladder*, de forma que os dados, referentes a cada uma das estratégias de controle avaliadas, eram recebidos e processados. Após o processamento dos dados, o CLP enviava ao inversor o valor da frequência da rede de alimentação do motor que resulta no menor valor de rotação do eixo de acionamento da bomba assegurando uma carga de pressão mínima de 20mca, na entrada da válvula reguladora de pressão, instalada no ponto de mínima pressão da lateral móvel do pivô.

A Figura 37 demonstra, de forma simplificada e com as principais etapas, o fluxograma da lógica de programação do CLP.

Para se utilizar a comunicação *ModBus*, RS485, entre o inversor de frequência e o controlador lógico programável é necessário configurar alguns parâmetros do inversor de frequência, a saber:

- a) **A001**: Seleção de Frequência de Referência – padrão 02 (*Digital Operator*) para o valor 03 (*ModBus*).
- b) **A002**: Seleção do comando de RUN – padrão 02 (*Digital Operator*) para o valor 03 (*ModBus*).

Já do lado do controlador lógico programável (CLP) é necessário utilizar os seguintes códigos (*FUNCTION*), na programação *Ladder* (Figura 36).

Pode-se utilizar os endereços de memória dedicados a este tipo de padrão, ou seja:

- a) **D32200**: nó a ser endereçado.
- b) **D32201**: código da função a ser utilizada.
- c) **D32202**: comprimento do *byte*.
- d) **D32203**: parâmetro do inversor a ser alterado.

e) **D32204**: valor do parâmetro no qual será setado.

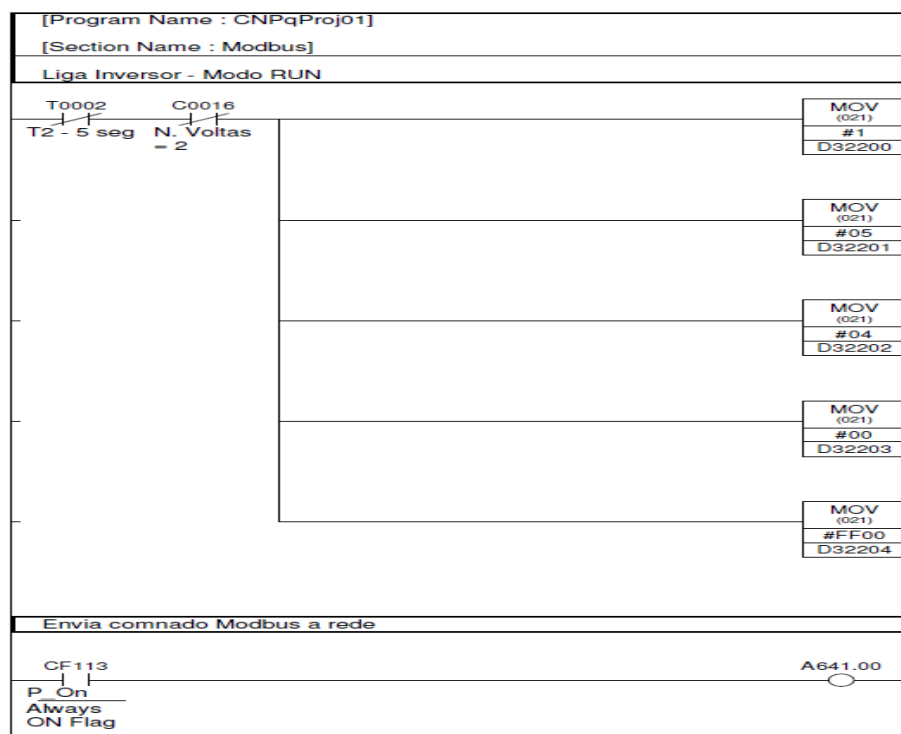


Figura 36 Exemplo de um Programa *Ladder* com a utilização dos endereços *ModBus*-RTU para CLP e inversor, em um ambiente OMRON

Outra facilidade do controlador lógico programável, da OMRON, é a possibilidade de se utilizar o *bit* A641.00, que quando ativado transmite os conteúdos dos endereços de memória de D32200 a D32204 para rede *ModBus* RS485. Ressalta-se que os valores dos conteúdos dos endereços de memória D devem ser em hexadecimal a partir do binário BCD.

No caso da estratégia baseada na posição do pivô central, foi utilizado um encoder absoluto da marca OMRON, modelo E6C3-AG5B, com precisão de 360°/rotação, codificado em 9 *bits*, ligado em entradas digitais do CLP, o que permitiu um controle de posicionamento constante da lateral móvel do pivô,

garantindo a redundância do sistema, uma vez que o painel do próprio pivô, também fornece o posicionamento do mesmo.

Já no caso da estratégia baseada na aquisição de dados da pressão ao longo da linha lateral móvel do pivô, foram instalados 4 sensores de pressão da marca HBM, com unidades remotas de aquisição de dados, da OMRON, modelo SRT2-AD04, em uma rede *CompoBus*®, conforme já citado anteriormente.

Para definição do início de ciclo de operação utilizou-se de monitoramento por sensores de umidade de solo interligados a microcontroladores, com tecnologia de comunicação sem fio, com padrão *ZigBee*, já incorporados a estes microcontroladores, conforme já descrito anteriormente.

Estes microcontroladores criam, automaticamente, uma rede entre si, de forma que a cada grupo de 04 (quatro controladores) forneçam os dados obtidos da umidade do solo a um único microcontrolador de seu grupo (FFD_{eixo}), permitindo-se assim a cobertura de uma maior distância sem a necessidade de interligação de fios entre eles, passando ao longo da cultura irrigada.

Os pontos mais distantes da linha irrigada foram configurados por um RFD (*Reduced Function Device*) uma vez que é limitado a uma configuração com topologia em estrela, não podendo atuar como um coordenador da rede. Portanto, este tipo de dispositivo pode comunicar-se apenas com um coordenador de rede. Tais dispositivos são de construção mais simples e, portanto, utilizados somente para transmissão de dados do sensor de umidade. Estes componentes foram definidos como RFD_{leitura} .

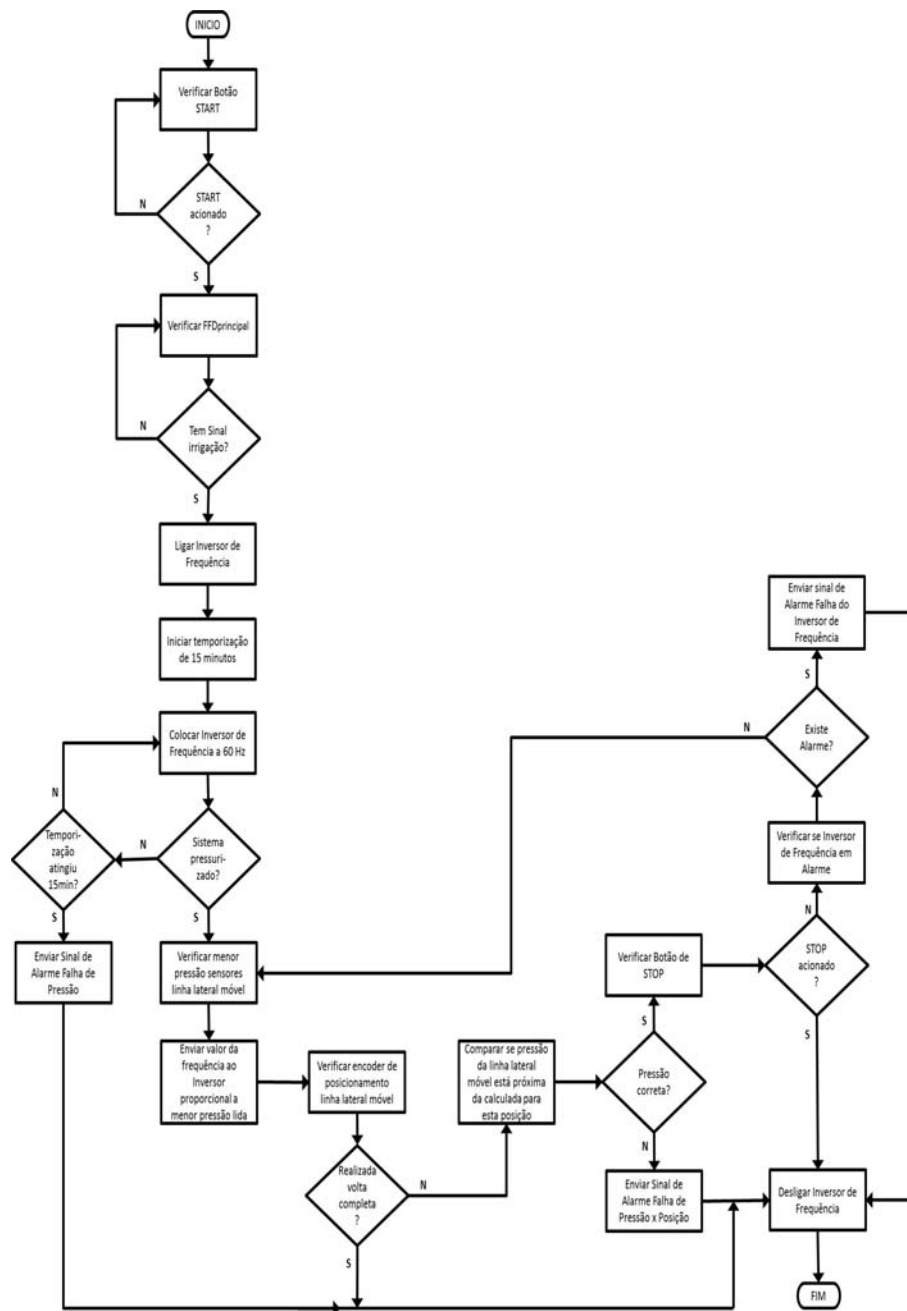


Figura 37 Fluxograma simplificado, com as principais etapas, da lógica de programação realizada no Controlador Lógico Programável (CLP)

Já os pontos intermediários, da linha irrigada, foram formados por FFD (*Full Function Device*) que funcionaram em toda a topologia do padrão, podendo ou não desempenhar a função de coordenador da rede e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos. Trata-se de dispositivos de construção mais complexa e foram denominados de FFD_{eixo-leitura}.

Os coordenadores também foram do tipo FFD e chamados de FFD_{eixo}.

Por fim teremos o FFD_{principal} que foi o responsável pela comunicação digital com o controlador lógico programável, ou seja, este enviará um sinal de nível alto (+Vcc) a uma entrada do controlador lógico quando houver a necessidade de irrigação da cultura. Caso contrário o sinal a ser enviado será de nível baixo (GND).

A Figura 38 ilustra um esboço de como foi implementada a instalação dos sensores de umidade de solo e os seus respectivos microcontroladores *ZigBee*.

A distância entre as zonas onde se encontravam os módulos de *ZigBee* foi de 18m (comprimento total da linha lateral móvel = 72m dividida em 4 zonas – regiões circulares).

A Figura 39 representa o fluxograma da lógica de programação realizada no FFD_{principal} onde pode-se constatar que o processo de comunicação do FFD_{principal} com os FFD_{eixo} e os RFD_{leitura} inicia-se somente após o operador ter iniciado o processo de autoirrigação, ou seja, somente quando o processo se encontra em *START*. Caso contrário, o FFD_{principal} permanecerá em modo de hibernação, sem realizar nenhuma atividade, por 2 (dois) minutos.

Já a Figura 40 representa a fluxograma da lógica de programação realizada nos FFD_{eixo} e RFD_{leitura} onde percebe-se que os mesmos só entrarão em modo de operação quando houver uma solicitação de sinal pelo FFD_{principal}, caso contrário continuaram em modo *stand by* (consumo mínimo de energia).

Destaca-se que a opção pelo modo *stand by*, nos FFD_{eixo} e $RFD_{leitura}$ foi configurado somente nestes dispositivos por serem energizados por baterias independentes da energização da rede elétrica de energização do sistema de irrigação do pivô central.

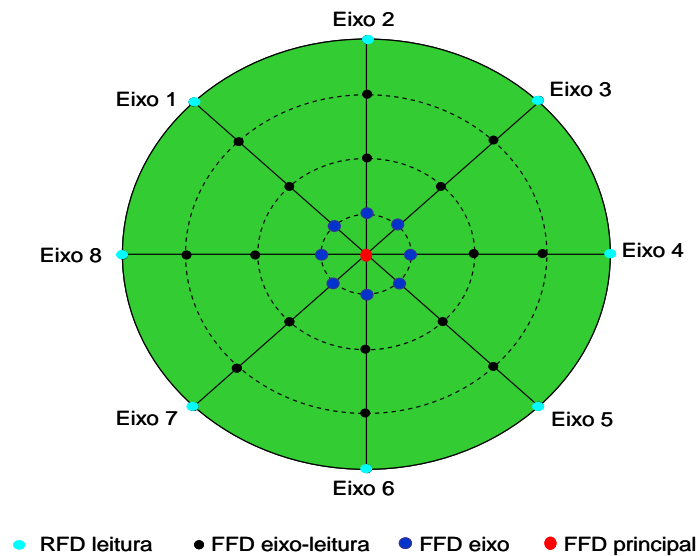


Figura 38 Esboço do sistema de instalação dos microcontroladores *ZigBee* ao longo da área irrigada pelo pivô central

A Figura 41 é uma representação gráfica P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram* – Diagrama de Tubulação e Instrumentação), de padronização ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*), norma S5.1, conforme Bega (2006), o que permite uma visualização completa da instrumentação utilizada no sistema de irrigação, no campus da UFLA, instalada para execução deste trabalho.

De acordo com Bega (2006), a padronização ISA, norma S5.1, considera que cada instrumento ou função programada será identificada por um conjunto de letras e um conjunto de algarismos. A primeira letra do conjunto de letras

indica a variável medida/controlada e as letras subsequentes indicam a função que o instrumento desempenha na malha de controle.

Para completar a identificação acrescentou-se um sufixo, que neste trabalho, indica o número do instrumento/sensor, como forma de diferenciação entre os diversos instrumentos/sensores com a mesma denominação.

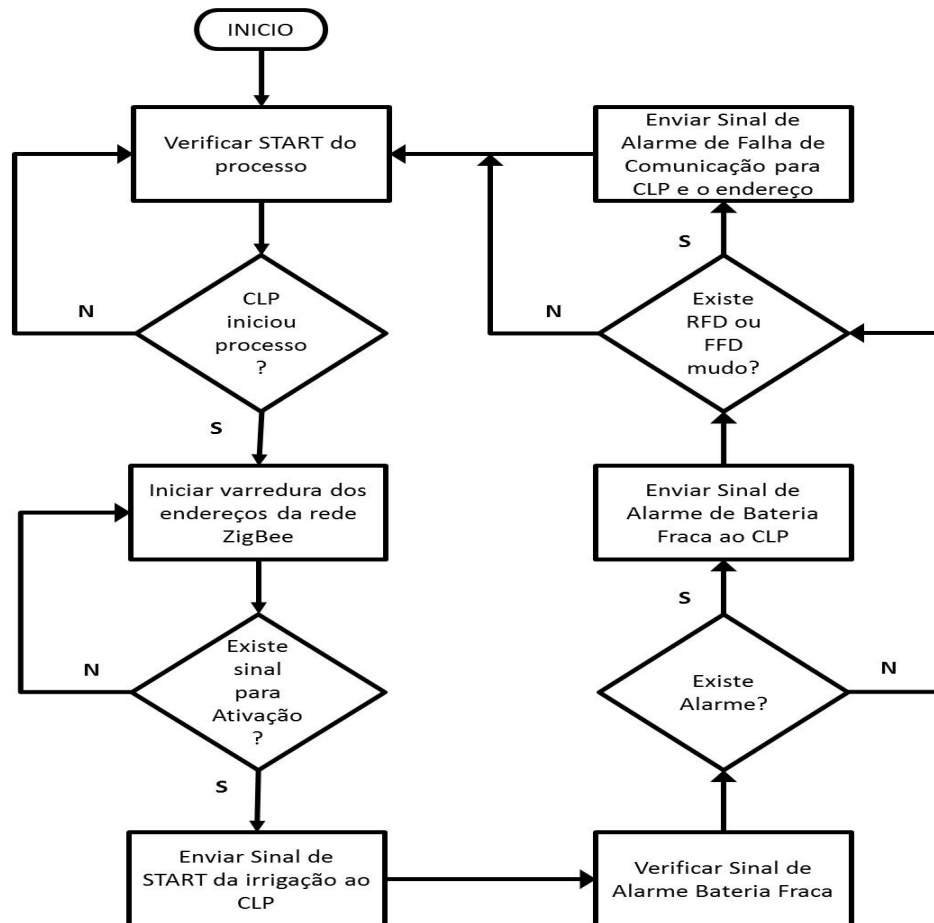


Figura 39 Fluxograma da lógica de programação realizada no FFD_{principal}

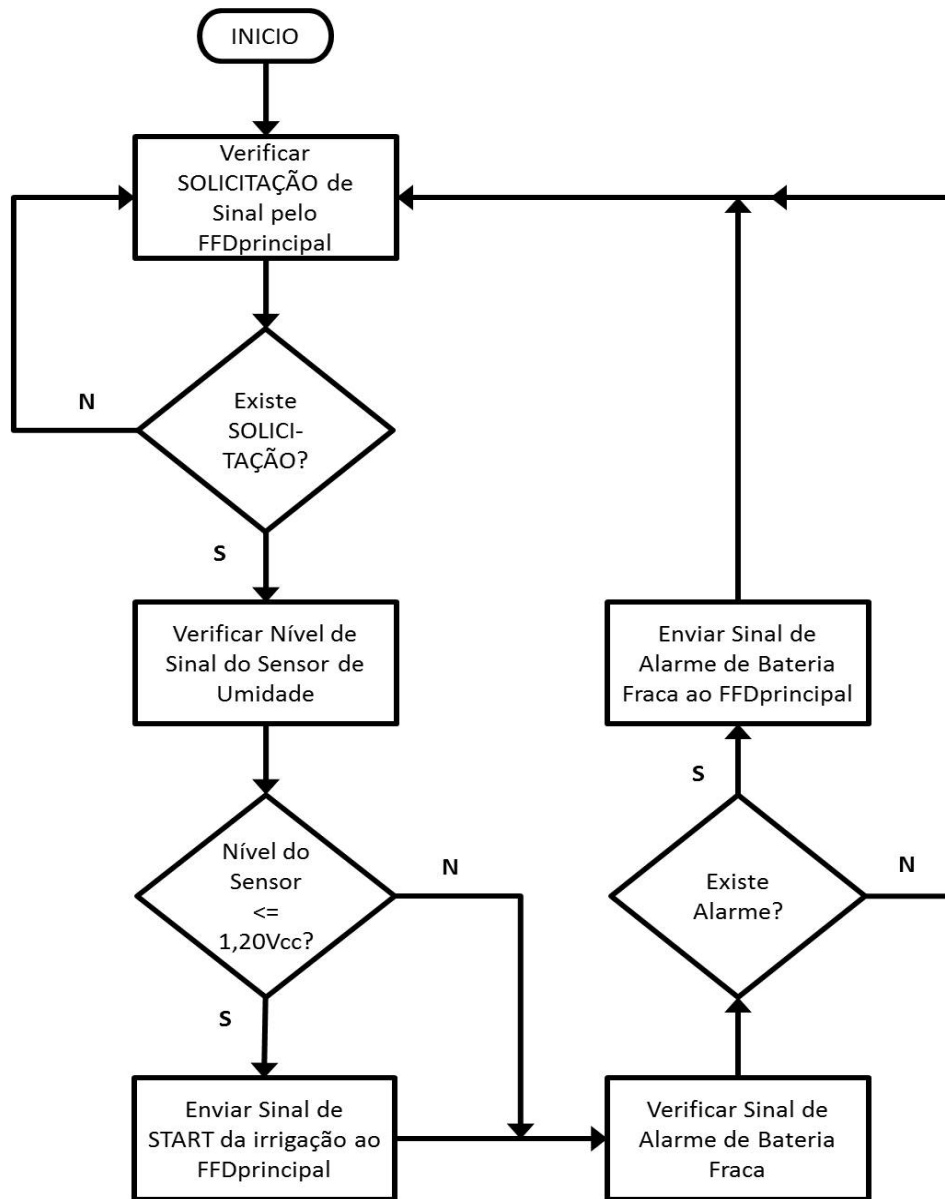


Figura 40 Fluxograma da lógica de programação realizada no FFD_{eixo} e RFD_{leitura}

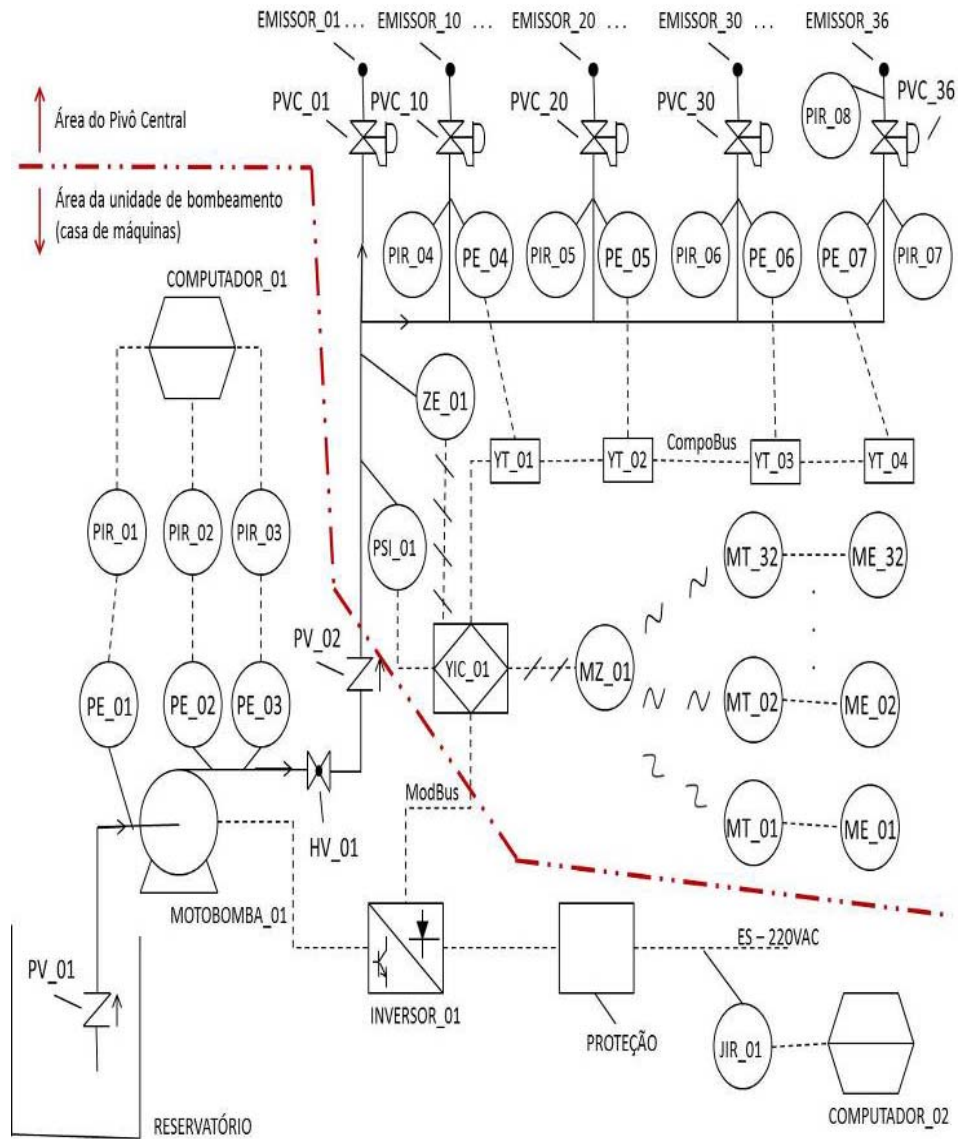


Figura 41 Representação gráfica P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram – Diagrama de Tubulação e Instrumentação*), conforme padronização ISA (*The Instrumentation, Systems and Automation Society*), norma S5.1

Portanto, a simbologia para Figura 41, conforme ISA-S5.1, é dada da seguinte forma:

PV_xx = válvula de retenção.

PE_xx = sensor de pressão.

PIR_xx = indicador e registrador de pressão.

HV_xx = registro de gaveta (válvula manual).

PEI_xx = sensor e indicador de pressão.

PVC_xx = válvula controladora de pressão (válvula reguladora);

ZE_xx = sensor de posição (encoder).

ME_xx = sensor de umidade de solo.

MT_xx = transmissor de umidade de solo (*ZigBee*).

MZ_xx = atuador de umidade de solo (*ZigBee*).

YIC_xx = controlador lógico programável (CLP).

YT_xx = transmissor de estado (unidade remota *CompoBus*®).

JIR_xx = indicador e registrador de potência (medidor de energia).

_____ = suprimento ou impulso.

-- \ -- = sinal binário elétrico.

----- = sinal elétrico.

~~~~ = sinal eletromagnético não guiado (transmissão sem fio).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modelagem do conjunto motobomba

Na Tabela 4 são demonstrados os valores das constantes  $a_H$ ,  $b_H$ ,  $c_H$  e  $d_H$  da equação 14, que foram ajustados em função dos 4 pares de valores de altura manométrica total *versus* vazão, lidos na curva da bomba (Figura 26).

Tabela 4 Coeficientes da equação da curva HMT x Q da bomba Imbil BEK 40  
Coeficientes empíricos da equação da curva vazão *versus* altura manométrica Total  
(Eq.14)

| $a_H$                   | $b_H$   | $c_H$                | $d_H$                 |
|-------------------------|---------|----------------------|-----------------------|
| $1,4400 \times 10^{-1}$ | -1,4844 | $9,9155 \times 10^1$ | $-1,0303 \times 10^5$ |

Quando os valores ajustados de  $a_H$ ,  $b_H$ ,  $c_H$  e  $d_H$ , representados na Tabela 4, são associados às demais características descritivas da bomba ( $N_r = 3$  e  $\varphi = 0,145\text{m}$ ) e à vazão de projeto de  $21 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q = 5,833 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), a equação 14 toma a seguinte forma, que é mais adequada para determinação da altura manométrica da bomba (HMT em mca) em função dos valores de velocidade angular ( $\omega$  em  $\text{rad.s}^{-1}$ ) do eixo de acionamento da bomba:

$$HMT = 9,262 \times 10^{-4} \cdot \omega^2 - 1,870 \times 10^{-2} \cdot \omega + 2,335 - 4,642 \times 10^3 \cdot \omega^{-1} \quad (37)$$

Na Tabela 6 são demonstrados os valores ajustados dos coeficientes  $a_\eta$ ,  $b_\eta$ ,  $c_\eta$ , e  $d_\eta$ , da equação 15, que foram ajustados em função dos 4 pares de valores de rendimento da bomba *versus* vazão, lidos na curva da bomba (Figura 27).

Tabela 5 Coeficientes da equação da curva rendimento x Q da bomba Imbil BEK 40

| Coeficientes empíricos da equação da curva vazão <i>versus</i> altura manométrica Total (Eq.14) |                     |                      |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| $a_{\eta}$                                                                                      | $b_{\eta}$          | $c_{\eta}$           | $d_{\eta}$              |
| $3.333 \times 10^{-2}$                                                                          | $2.004 \times 10^2$ | $-1.653 \times 10^4$ | $-3.725 \times 10^{-9}$ |

Quando os valores ajustados representados na Tabela 6 de  $a_{\eta}$ ,  $b_{\eta}$ ,  $c_{\eta}$  e  $d_{\eta}$ , são associados às demais características descritivas da bomba ( $\varphi = 0,145\text{m}$ ) e à vazão de projeto de  $21 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q = 5,833 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), a equação 15 toma a seguinte forma, que é mais adequada para determinação do rendimento da bomba ( $0 \leq \eta_b \leq 1$ ) em função dos valores de velocidade angular ( $\omega$  em  $\text{rad.s}^{-1}$ ) do eixo de acionamento da bomba:

$$h_b = 3,333' 10^{-2} + 3,840' 10^2 \omega^{-1} - 6,050' 10^4 \omega^{-2} - 2,610' 10^{-8} \omega^{-3} \quad (38)$$

A inserção, na equação 16, do valor da vazão de projeto ( $Q = 5,833 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), do peso específico do fluido bombeado ( $\gamma = 9777 \text{ Nm}^{-3}$ ) e das equações 37 e 38 resulta na seguinte equação, que permite calcular a potência mecânica requerida no eixo de acionamento da bomba ( $PM_{\text{eixo}}$  em W) em função dos valores de velocidade angular ( $\omega$  em  $\text{rad.s}^{-1}$ ) do eixo de acionamento da bomba:

$$PM_{\text{eixo}} = \frac{5,298' 10^{-2} \omega^2 - 1,042 \omega + 1,332' 10^2 - 2,647' 10^5 \omega^{-1}}{3,333' 10^{-2} + 3,840' 10^2 \omega^{-1} - 6,050' 10^4 \omega^{-2} - 2,610' 10^{-8} \omega^{-3}} \quad (39)$$

Finalmente, o torque, ou conjugado, requerido no eixo de acionamento da bomba ( $\tau$  em N.m) em função dos valores de velocidade angular ( $\omega$  em  $\text{rad.s}^{-1}$ ) é dado pela seguinte expressão:

$$\tau = \frac{5,298' \cdot 10^{-2} w^2 - 1,042w + 1,332' \cdot 10^2 - 2,647' \cdot 10^5 w^{-1}}{3,333' \cdot 10^{-2} \times w + 3,840' \cdot 10^2 - 6,050' \cdot 10^4 w^{-1} - 2,610' \cdot 10^{-8} w^{-2}} \quad (40)$$

Em termos de rotação do eixo de acionamento da bomba ( $n_e$  em rpm), as equações 39 e 40 assumem a seguinte representação:

$$PM_{eixo} = \frac{5,810' \cdot 10^{-4} \times n_e^2 - 1,091' \cdot 10^{-1} \times n_e + 1,332' \cdot 10^2 - 2,528' \cdot 10^6 \times n_e^{-1}}{3,333' \cdot 10^{-2} + 3,661' \cdot 10^3 \times n_e^{-1} - 5,517' \cdot 10^6 \times n_e^{-2} - 2,273' \cdot 10^{-5} \times n_e^{-3}} \quad (41)$$

$$\tau = \frac{1,743 \times 10^{-2} \cdot n_e^2 - 3,273 \cdot n_e + 3,996 \times 10^3 - 7,584 \times 10^7 \cdot n_e^{-1}}{1,047 \times 10^{-1} \cdot n_e + 1,15 \times 10^4 - 1,732 \times 10^7 \cdot n_e^{-1} - 7,141 \times 10^{-5} \cdot n_e^{-2}} \quad (42)$$

#### 4.2 Adequação da modelagem do conjunto motobomba sem o inversor

Primeiramente, realizou-se um levantamento de dados do sistema de irrigação, em estudo, sem a inclusão do inversor de frequência, ao longo de um giro completo da lateral móvel do pivô, para monitoramento das condições operacionais do conjunto motobomba.

Na Figura 42 está ilustrada a variação da cota da última torre em relação à cota arbitrária da base do ponto do pivô (cota 100).

Na sequência (Figura 43), são demonstrados os valores de rotação do eixo do conjunto motobomba ( $n_e$  em rpm) que foram determinados com o uso do tacômetro ótico. Os valores de rotação do eixo foram convertidos no seu valor equivalente de velocidade angular ( $\omega$ ) e aplicados na equação 37, para estimativa da altura manométrica total (HMT) fornecida pelo conjunto motobomba.

Na Figura 44 é possível comparar valores medidos de altura manométrica total, determinados através da equação 33, que requer as leituras do vacuômetro e do manômetro instalados no corpo da bomba, com valores de

HMT estimados através da inserção na equação 37 dos valores observados de velocidade angular do eixo de acionamento da bomba.

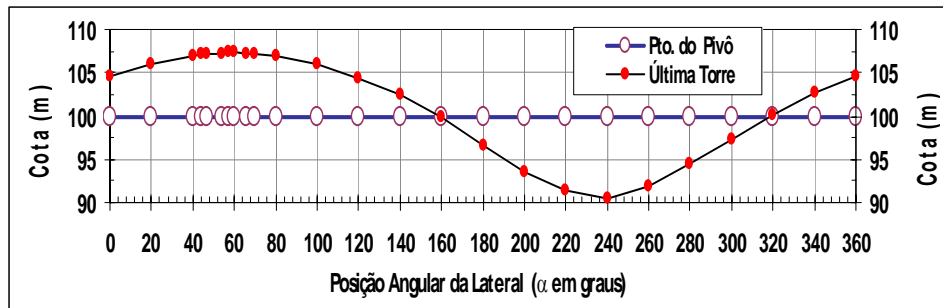


Figura 42 Variação da cota da última torre em relação à cota arbitrária da base do ponto do pivô (cota 100)

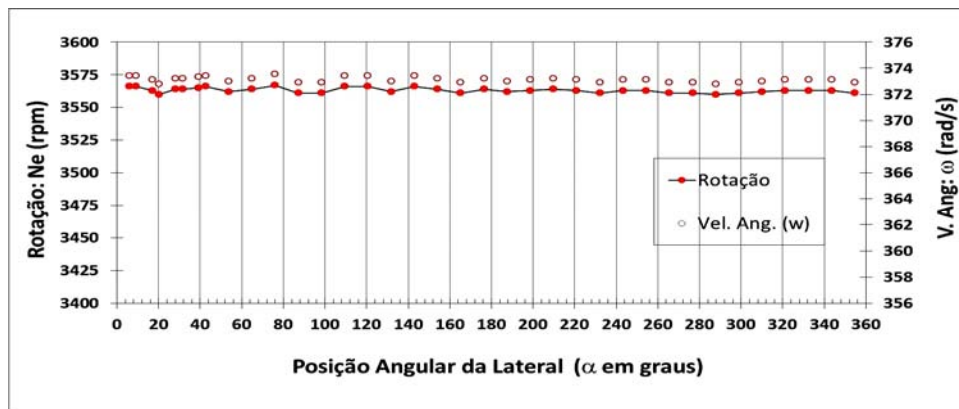


Figura 43 Valores de rotação do eixo do conjunto motobomba

No que diz respeito à análise da adequação dos valores de HMT previstos pela equação 37, que assume um valor constante de vazão e requer valores observados de velocidade angular do eixo (tacômetro), a comparação entre as médias dos valores previstos pela equação 37 (112,24m) e a média dos valores observados em campo (111,3m) demonstra que esta equação superestima os valores de HMT em cerca de 2%.

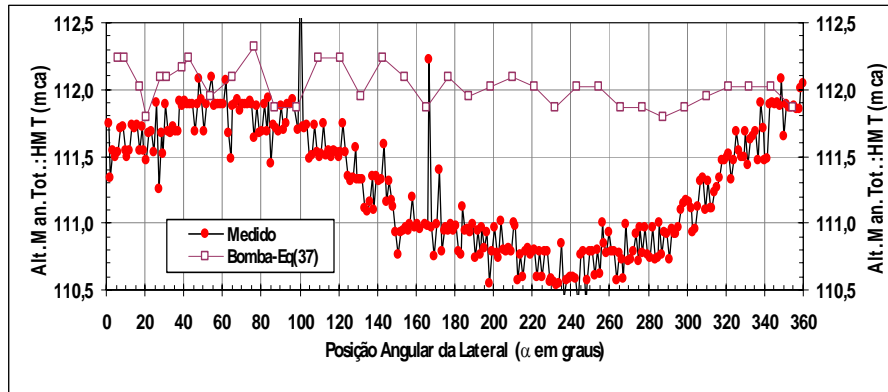


Figura 44 Comparação dos valores medidos de altura manométrica total (HMT) com os valores estimados pela equação 37

Na Figura 45 é possível comparar estimativas de torque requerido no eixo de acionamento da bomba ( $\tau$  em N.m), obtidas com as equações 42 e 31. Ao comparar estes valores, deve-se considerar que a equação 42 foi obtida com base em parâmetros da curva da bomba, enquanto a equação 31 foi determinada com base em parâmetros da placa do motor elétrico. O valor médio de torque no eixo de acionamento da bomba (27,4 N.m) estimado com base nos parâmetros hidráulicos foi 11% maior que o valor médio estimado com base nas características do motor elétrico usado (24,8 N.m). Esta diferença é favorável ao projetista, uma vez que não existe o risco de se sobrecarregar o motor com uma carga maior do que aquela suportada pelo motor. Por outro lado, essa “folga” contribui para diminuir o carregamento relativo do motor, conforme determinado pela relação torque no eixo/torque nominal, podendo resultar em redução do rendimento do motor elétrico e no fator de potência. O carregamento relativo do motor estimado com base nos parâmetros da bomba é da ordem de 67%, enquanto o carregamento relativo calculado com base nos parâmetros do motor é ordem de 61%.

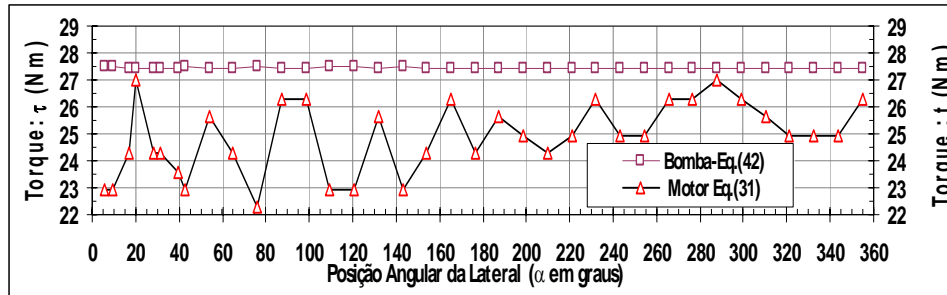


Figura 45 Estimativas de torque requerido no eixo de acionamento da bomba ( $\tau$  em N.m) obtidas com as equações 42 e 31

A baixa eficiência deste motor elétrico operando sem inversor de frequência pode também ser inferida pela relação entre os valores médios de potência ativa, consumida pelo motor e potência mecânica disponível no eixo do motor (Eq. 22). Levando-se em conta a média (13,23 kW) dos valores de potência ativa, demonstrados na Figura 46, e a média (10,20 kW) do valor de potência no eixo, calculada com parâmetros da bomba (Eq. 39), chega-se a uma estimativa de rendimento do motor da ordem de 77%. Se os valores de potência mecânica disponível no eixo são estimados através de parâmetros do motor elétrico (Eq. 32), a estimativa de rendimento do motor é da ordem de 70%.

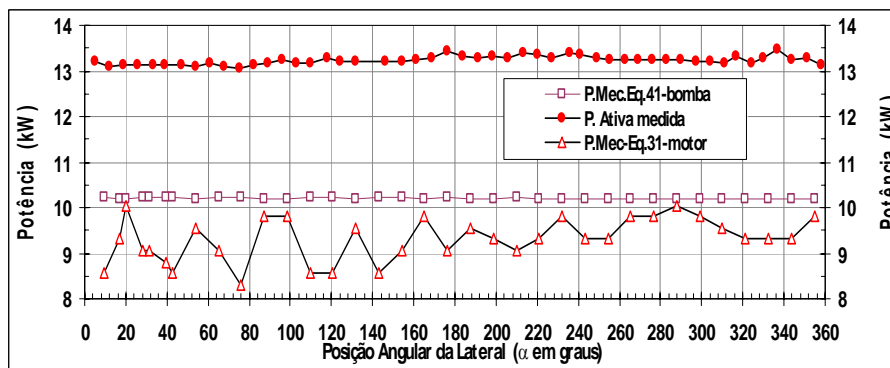


Figura 46 Comparação de potências mecânicas calculadas (Equações 32 e 41) e potência ativa medida

### 4.3 Modelagem do sistema operando com inversor

Na Figura 48, são demonstrados os resultados do monitoramento da leitura do vacuômetro instalado na entrada da bomba, da leitura do manômetro no tubo de subida da torre central do pivô e da diferença entre as leituras do manômetro instalado na saída da bomba e do manômetro instalado tubo de subida da torre central do pivô, na mesma altura de instalação dos emissores. Visando facilitar a interpretação dos resultados, a variação da cota da última torre em relação à cota arbitrária da base do ponto do pivô (cota 100) é também representada na Figura 47.

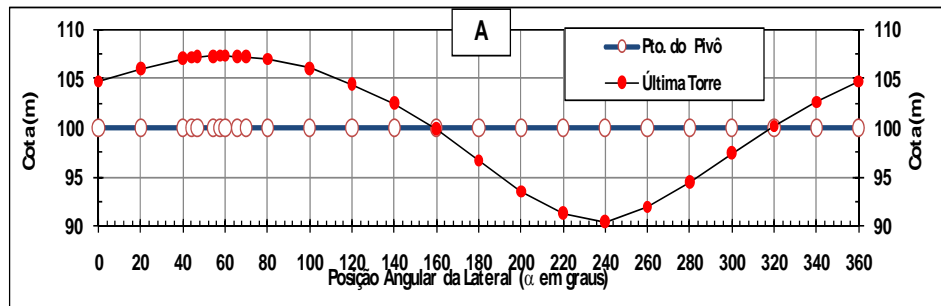


Figura 47 Monitoramento do posicionamento da lateral (A)

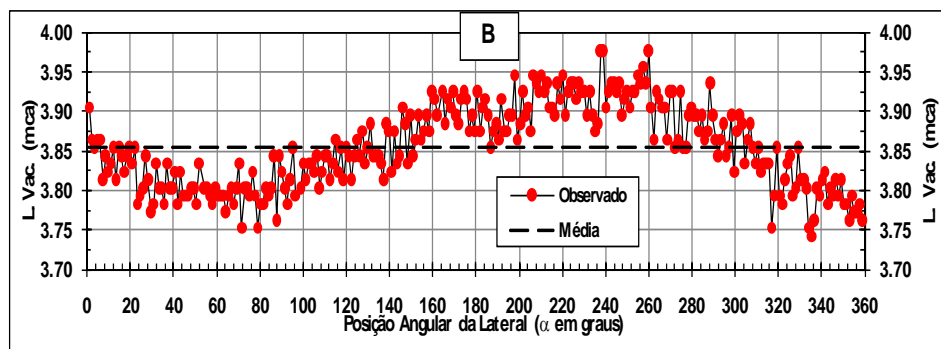


Figura 48 Leitura do vacuômetro na entrada da bomba (B)

Durante o giro da lateral móvel, o valor da leitura do vacuômetro oscilou entre 3,9 e 3,7 mca, com valor médio de 3,85 mca. Os valores lidos no vacuômetro instalado na entrada da bomba também oscilaram de forma sincronizada com o posicionamento da extremidade da linha lateral móvel, conforme descrito na Figura 48. Quando a extremidade da lateral móvel ocupa as posições mais elevadas do terreno, a redução da pressão disponível na entrada dos emissores reduz a vazão do sistema. A redução da vazão causa redução da velocidade da água e da perda de carga no interior tubulação de sucção, com conseqüente redução nos valores de leitura do vacuômetro (LV se aproxima de 3,7 mca). Quando a extremidade da lateral se posiciona nas menores cotas do terreno, o excesso de pressão disponível na entrada dos emissores aumenta a vazão do sistema. O aumento da vazão causa aumento da velocidade da água e na perda de carga no interior tubulação de sucção, com conseqüente aumento nos valores de leitura do vacuômetro (LV se aproxima de 3,9 mca). No entanto, é preciso ressaltar que essa variação é relativamente pequena, quando comparada com a variação de cota experimentada pela extremidade da lateral.

Deve-se ressaltar que, no momento das determinações da leitura do vacuômetro, a altura geométrica de sucção ( $\Delta E_s$ ) observada era de apenas 1,8m, ao invés de 3,0 m, conforme indicado da ficha de projeto (Quadro 4), indicando, de acordo com a equação 34 que, em média, a perda de carga na tubulação de sucção ( $hf_s$ ) é da ordem de 1,95 mca.

Na Figura 49 é demonstrado que, durante o giro da lateral móvel, a diferença entre as leituras do manômetro instalado na saída da bomba e do manômetro instalado no tubo de subida da torre central do pivô ( $LM_B - LM_{TS}$ ), na mesma altura de instalação dos emissores, oscilou entre 65,5 e 68,0 mca, com um valor médio 66,87mca.



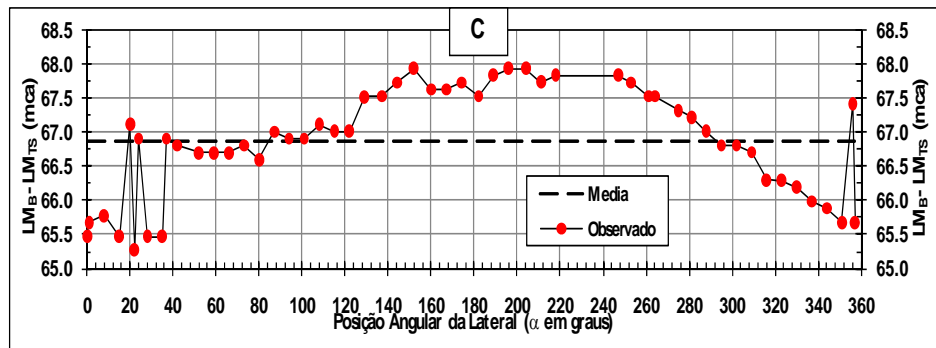


Figura 49 Diferença da carga de pressão entre saída da bomba e a torre central (C)

De acordo com a equação 30, este valor médio de 66,87 mca, resulta da soma do desnível geométrico entre a saída da bomba e o ponto de tomada de pressão na torre de subida no ponto do pivô ( $\Delta E_A + \Delta E_E$ ) e a perda de carga no trecho de tubulação que tem início na saída da bomba e vai até o ponto de instalação do manômetro no tubo de subida da torre central do pivô ( $hf_A + hf_{TS}$ ). Na ficha técnica do pivô, representada no Quadro 4, o valor desta soma foi declarado como sendo igual a 54,22 m (4,55m da altura dos emissores + 34,0m do desnível da adutora + 12,42m da perda na adutora + 3,25 m de perdas localizadas).

Levando-se em conta o valor médio da leitura do vacuômetro ( $\Delta E_s + hf_s = 3,85$  mca), o valor médio da diferença de leitura entre os manômetros na saída da bomba e no tubo de subida ( $\Delta E_A + \Delta E_E + hf_A + hf_{TS} = 66,87$  mca.), a carga mínima já estabelecida de ( $H_{smin} = 20$  mca), o comprimento equivalente do pivô de 72 m e uma taxa de perda de carga no início da linha lateral de  $5,66 \times 10^{-4}$  m/m ( $J_{r,0}$  computado com C de Hazen Williams de 140, devido ao fato de ter sido este o valor utilizado em projeto do pivô central do Campus da UFLA, vazão de  $5,83 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e diâmetro interno de 163 mm), a equação 10, que permite

calcular a altura manométrica total requerida nas diferentes posições angulares assumidas pela linha lateral móvel do pivô, toma a seguinte forma:

$$HMT_{\alpha} = 90,7 + r_{\alpha} \cdot s_{\alpha} + 0,041 \cdot F_{r_{\alpha}} \quad (43)$$

No desenvolvimento da equação 43 fica implícito, pelo emprego das constantes 90,7 mca e 0,041 mca, que as pequenas variações de vazão do sistema, que causaram pequenas alterações nos elementos que compõem estes parâmetros, foram desprezadas, isto é, foi considerado que as válvulas reguladoras de pressão instaladas ao longo do pivô são capazes de regular perfeitamente a vazão total do sistema. A adoção desta hipótese se justifica porque, por ocasião da instalação de um inversor de frequência, as condições extremas de variação de pressão ao longo da lateral móvel que ocorreram durante a determinação destes parâmetros serão amenizadas pelo inversor.

Na Tabela 6, são demonstrados, para diferentes valores assumidos pelo ângulo  $\alpha$  durante o giro da lateral (Figura 24), os valores calculados, com a equação 43, da altura manométrica total ( $HMT_{\alpha}$ ) que proporciona, no ponto de menor pressão da linha lateral ( $r_{\alpha}$ ), uma carga de pressão equivalente a carga de pressão mínima de serviço dos emissores ( $HS_{\min}$ ). Nesta tabela, são também apresentados os valores de velocidade angular do eixo de acionamento da bomba ( $\omega$ ), que de acordo com a solução inversa da equação 37 ( $HMT$  versus  $\omega$ ) resultam nos valores desejados de  $HMT_{\alpha}$ . Os valores de  $r_{\alpha}$  representados na Tabela 6 foram computados de acordo com os critérios dados pelas equações 5a, 5b e 5c. No caso particular deste pivô, que tem uma taxa de perda de carga no início da lateral muito baixa ( $J_{r \rightarrow 0} = 5,66 \times 10^{-4}$  m/m), uma declividade descendente de apenas 0,0566% já é suficiente para fazer com que o ponto de menor pressão se desloque da ponta ( $r_{\alpha} = 72$ m) para o ponto do pivô ( $r_{\alpha} = 0$ m).

Os valores de  $Fr_\alpha$  demonstrados na Tabela 6 foram determinados através da equação 7.

A comparação entre os valores calculados de HMT representados na Tabela 6, que variam entre 90,7 e 98,4 mca, e os valores de HMT observados em campo, que, conforme demonstrado na Figura 44, oscilam entre 110,5 e 112,5 mca, permite inferir que, no caso do pivô analisado, existe excesso de pressão que pode ser reduzido com a instalação de um inversor de frequência.

Estimativas dos valores da frequência da rede a ser fornecida pelo inversor durante o giro da lateral do pivô são demonstradas na Tabela 7. Nesta tabela, os valores representados de rotação ( $n_e$  em rpm) foram obtidos pela conversão da velocidade angular ( $\omega$ ) da Tabela 6. Os valores de torque requerido ( $\tau$ ) no eixo foram calculados através da equação 42 e o valor da frequência da rede de alimentação ( $f$ ) foi determinado através da inversão da equação 31.

De acordo com os dados representados na Tabela 7, estima-se que a rotação da bomba, que quando operando sem inversor é da ordem de 3563 rpm (Figura 43), pode ser reduzida para valores entre 3264 rpm (lateral móvel descendente) e 3375 rpm (lateral no ponto mais alto do terreno).

Tabela 6 Estimativas da altura manométrica total ( $HMT_\alpha$ ) e da velocidade angular do eixo de acionamento da bomba ( $\omega_\alpha$ ) em função do posicionamento da linha lateral do pivô

| Posição<br>$\alpha$ | Cota da<br>última<br>torre | Declividade<br>do terreno<br>$S_\alpha$ | Raio do<br>ponto de<br>mínima<br>pressão -<br>$r_\alpha$ | Fração<br>da perda<br>total -<br>$Fr_\alpha$ | $HMT_\alpha$ | Velocidade<br>angular do<br>eixo - $\omega$ |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|
| grau                | m                          | m/m                                     | m                                                        |                                              | mca          | rad.s <sup>-1</sup>                         |
| 0                   | 104,7                      | 0,06812                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 95,6         | 349,3                                       |
| 20                  | 106,0                      | 0,08739                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 97,0         | 351,3                                       |
| 40                  | 107,0                      | 0,10203                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 98,1         | 352,9                                       |
| 44                  | 107,2                      | 0,10449                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 98,2         | 353,1                                       |
| 47                  | 107,2                      | 0,10478                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 98,3         | 353,2                                       |
| 54                  | 107,3                      | 0,10543                                 | 72                                                       | 0,546                                        | 98,3         | 353,2                                       |

“continua”

Tabela 6 “conclusão”

| Posição $\alpha$ | Cota da última torre | Declividade do terreno $S\alpha$ | Raio do ponto de mínima pressão - $r\alpha$ | Fração da perda total - $Fra$ | HMT $\alpha$ | Velocidade angular do eixo - $\omega$ |
|------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| grau             | m                    | m/m                              | m                                           |                               | mca          | rad.s <sup>-1</sup>                   |
| 58               | 107,4                | 0,10681                          | 72                                          | 0,546                         | 98,4         | 353,4                                 |
| 60               | 107,4                | 0,10652                          | 72                                          | 0,546                         | 98,4         | 353,4                                 |
| 66               | 107,3                | 0,10536                          | 72                                          | 0,546                         | 98,3         | 353,2                                 |
| 70               | 107,2                | 0,10478                          | 72                                          | 0,546                         | 98,3         | 353,2                                 |
| 80               | 107,0                | 0,10114                          | 72                                          | 0,546                         | 98,0         | 352,8                                 |
| 100              | 106,1                | 0,08810                          | 72                                          | 0,546                         | 97,1         | 351,4                                 |
| 120              | 104,4                | 0,06448                          | 72                                          | 0,546                         | 95,4         | 348,9                                 |
| 140              | 102,5                | 0,03609                          | 72                                          | 0,546                         | 93,3         | 345,8                                 |
| 160              | 99,9                 | -0,00194                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 180              | 96,7                 | -0,04788                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 200              | 93,5                 | -0,09377                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 220              | 91,3                 | -0,12604                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 240              | 90,4                 | -0,13887                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 260              | 92,0                 | -0,11667                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 280              | 94,4                 | -0,08072                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 300              | 97,4                 | -0,03768                         | 0                                           | 0                             | 90,7         | 341,8                                 |
| 320              | 100,2                | 0,00275                          | 72                                          | 0,546                         | 90,9         | 342,1                                 |
| 340              | 102,6                | 0,03812                          | 72                                          | 0,546                         | 93,5         | 346,0                                 |
| 360              | 104,7                | 0,06812                          | 72                                          | 0,546                         | 95,6         | 349,3                                 |

Tabela 7 Estimativas das exigências de torque, rotação do eixo e frequência da rede elétrica modificada pelo inversor, em função do posicionamento da linha lateral do pivô

| Pos $\alpha$ | Rot. ne | Torque $\tau$ | Freq. f | Pos. $\alpha$ | Rot. ne | Torque $\tau$ | Freq. f |
|--------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| grau         | rpm     | N.m           | Hz      | grau          | rpm     | N.m           | Hz      |
| 0            | 3335,2  | 24,66         | 56,2    | 140           | 3301,8  | 24,27         | 55,6    |
| 20           | 3354,8  | 24,90         | 56,5    | 160           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 40           | 3369,8  | 25,08         | 56,8    | 180           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 44           | 3372,3  | 25,11         | 56,8    | 200           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 47           | 3372,6  | 25,11         | 56,8    | 220           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 54           | 3373,2  | 25,12         | 56,8    | 240           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 58           | 3374,7  | 25,14         | 56,9    | 260           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 60           | 3374,4  | 25,13         | 56,9    | 280           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 66           | 3373,2  | 25,12         | 56,8    | 300           | 3263,7  | 23,83         | 55,0    |
| 70           | 3372,6  | 25,11         | 56,8    | 320           | 3267,0  | 23,86         | 55,0    |
| 80           | 3368,9  | 25,07         | 56,8    | 340           | 3303,9  | 24,30         | 55,7    |

“continua”

Tabela 7 “conclusão”

| <b>Pos</b><br><b><math>\alpha</math></b><br><b>grau</b> | <b>Rot.</b><br><b>ne</b><br><b>rpm</b> | <b>Torque</b><br><b><math>\tau</math></b><br><b>N.m</b> | <b>Freq.</b><br><b>f</b><br><b>Hz</b> | <b>Pos.</b><br><b><math>\alpha</math></b><br><b>grau</b> | <b>Rot.</b><br><b>ne</b><br><b>rpm</b> | <b>Torque</b><br><b><math>\tau</math></b><br><b>N.m</b> | <b>Freq. f</b><br><b>Hz</b> |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 100                                                     | 3355,5                                 | 24,91                                                   | 56,5                                  | 360                                                      | 3335,2                                 | 24,66                                                   | 56,2                        |
| 120                                                     | 3331,7                                 | 24,62                                                   | 56,1                                  |                                                          |                                        |                                                         |                             |

Para esta mesma variação dos valores de rotação, as estimativas de potência mecânica requerida no eixo, obtidas com a equação 41, resultam em valores variando entre um mínimo de 8,14 kW (3264 rpm), um máximo de 8,88 kW (3375 rpm) e uma média de 8,53 kW. Estes valores são menores que o valor médio de 10,22 kW (3563 rpm) demonstrado na Figura 46 para o caso do sistema operando sem inversor. Desta forma, estima-se que a implantação de um inversor de frequência promova uma redução na potência mecânica de acionamento da ordem de 17%.

#### 4.4 Adequação da modelagem do sistema operando com inversor

Na Figura 50 são demonstrados dados coletados enquanto a unidade de bombeamento do pivô operava sob controle do inversor. Na Figura 50A, é representada a variação da cota da última torre da lateral durante o seu giro em torno do ponto do pivô. Nas Figura 50B e Figura 50C, sob a legenda “Projetado”, estão representados os valores listados na Tabela 7 de frequência da rede e rotação do eixo de acionamento, que representam os valores que se pretendia alcançar com a instalação do inversor de frequência na unidade de bombeamento. Nestas mesmas figuras, sob a legenda “Medido”, são demonstrados valores de frequência e de rotação do eixo de acionamento do motor que foram medidos, enquanto a unidade de bombeamento operava sob controle do inversor. De acordo o mesmo critério adotado nas Figura 50B e Figura 50C, na Figura 50D, estão representados valores de carga de pressão

disponíveis no ponto do pivô que também foram identificados pelas legendas “Projetado” e ”Medido”. Nesta figura, foi acrescentada a série “Bomba Eq.37”, para identificar valores de carga de pressão disponível no ponto do pivô que foram calculados, através da equação 37, com valores de velocidade angular ( $\omega$ ) correspondentes aos valores medidos de rotação do eixo da bomba ( $n_e$ ) representados na Figura 50C.

De uma maneira geral, as diversas estratégias adotadas para o controle da frequência da rede de alimentação do motor, e conseqüentemente da rotação da bomba, forneceram resultados muito próximos do projetado. Estas estratégias permitiram fazer com que o conjunto motobomba operasse com valores de frequência da rede e de rotação do eixo que fossem proporcionais às diferenças de elevação entre o ponto do pivô e o ponto de mínima pressão da lateral, conforme identificado na Tabela 6.

Nos trechos nos quais a lateral assume posições angulares com valores de  $\alpha$  variando de  $0^\circ$  a  $160^\circ$  e de  $320^\circ$  a  $360^\circ$ , devido ao posicionamento ascendente do fluxo de água no interior da lateral móvel (Figura 50A), o ponto de mínima pressão da lateral permanece estacionado na ponta externa da lateral ( $r_\alpha = 72\text{m}$ , na Tabela 6).

Nesta situação, a manutenção de uma carga constante de pressão no ponto de mínima pressão da lateral, com valor igual ao projetado ( $HS_{\min} = 20$  mca), sem qualquer excesso ou falta, requer que a frequência da rede elétrica (Figura 50B) e a rotação do eixo de acionamento da bomba (Figura 50B) assumam valores proporcionais à diferenças de cota entre o ponto do pivô e a ponta externa da lateral (Figura 50A).

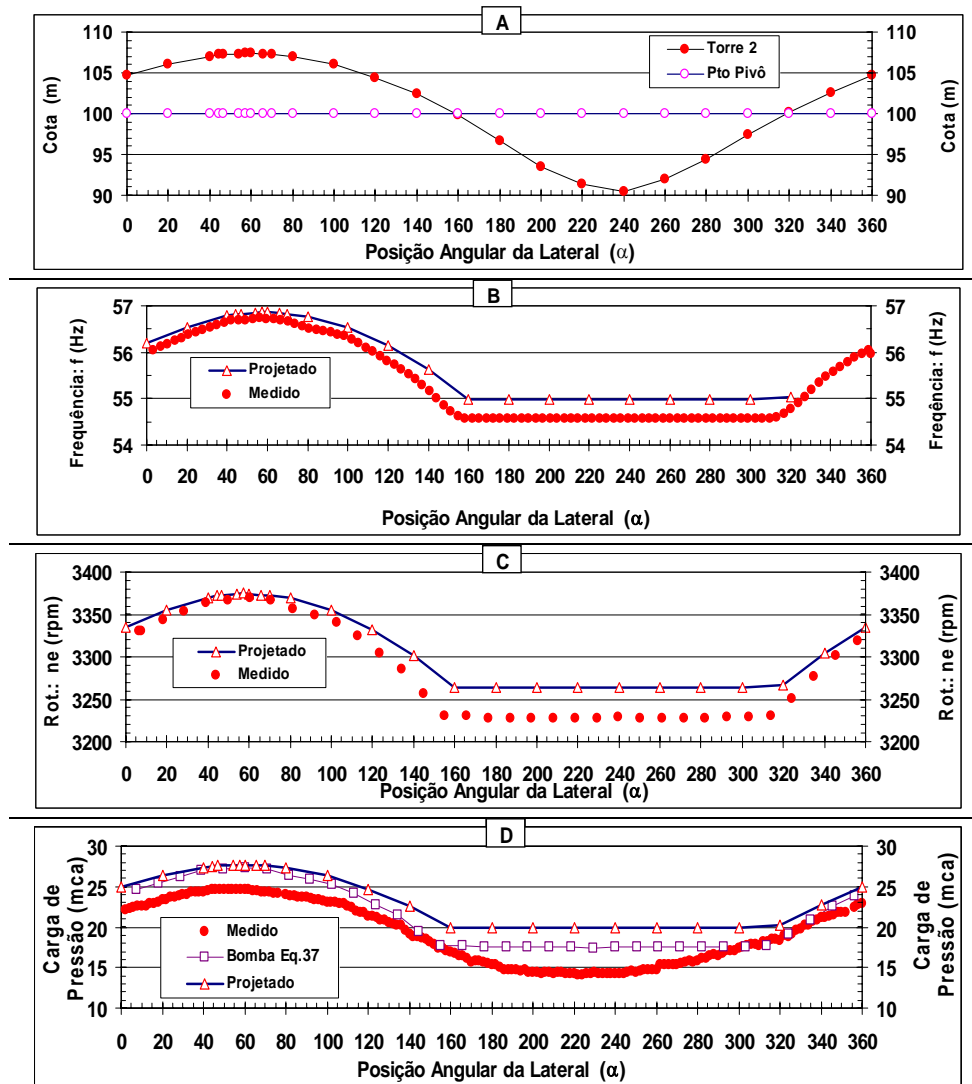


Figura 50 Monitoramento: (A) da cota da última torre da lateral; (B) da frequência da rede elétrica de alimentação do motor controlada pelo inversor; (C) da rotação do eixo de acionamento da bomba; e (D) da carga de pressão no tubo de subida do ponto do pivô durante o giro completo da lateral do pivô

Uma situação diferente ocorre no trecho no qual a lateral do pivô assume posições angulares, com valores de  $\alpha$  variando entre  $160^\circ$  e  $320^\circ$ . Neste trecho,

devido ao fluxo descendente de água no interior da lateral (Figura 50A), que faz com que o ganho de pressão devido ao desnível geométrico seja capaz de superar os reduzidíssimos valores de taxa de perda de carga no interior desta linha lateral, o ponto de mínima pressão fica estacionado na posição correspondente ao tubo de subida do ponto do pivô ( $r_\alpha=0$ , na Tabela 6). Nesta situação, não é necessário alterar o valor da frequência da rede elétrica acima do valor requerido para atingir a pressão mínima projetada, uma vez que a movimentação da lateral não causa qualquer alteração na cota relativa do ponto de mínima pressão.

As diferenças entre os valores das séries “Projetado” e “Medido” demonstradas nas Figura 50B, Figura 50C e Figura 50D, refletem as dificuldades encontradas ao se tentar automatizar o processo de sincronização do posicionamento da lateral, que era medido no ponto do pivô, com o valor da frequência da rede elétrica a ser fornecido pelo inversor instalado na casa de bombas, que estava localizada uma distância de 258m do ponto do pivô (Figura 24).

Em termos absolutos, a maior diferença entre os valores de frequência da rede demonstrada na Figura 50B é de 0,5 Hz (“Projetado”= 55 Hz e ”Medido”= 54,5 Hz). Em decorrência desta diferença, as maiores diferenças entre os valores de rotação do eixo (Figura 50C) e de carga de pressão no ponto do pivô (Figura 50D) foram, respectivamente, 30 rpm (“Projetado”= 3260 rpm e ”Medido”=3230 rpm) e 5,8 mca (“Projetado”= 20mca e ”Medido”=14,2 mca).

No entanto, mesmo nos trechos do deslocamento da lateral nos quais a estratégia de controle do inversor foi capaz de fornecer valores “Medidos” de frequência da rede muito próximos dos valores estabelecidos na série “Projetado” ( $0^\circ < \alpha < 80^\circ$  e  $320^\circ < \alpha < 360^\circ$ , na Figura 50B), os valores de pressão disponível da série “Medidos” ficaram abaixo daqueles estabelecidos na série “Projetado”.



Na Figura 50D, no trecho em que a lateral do pivô assume posições angulares com  $\alpha$  variando entre  $160^\circ$  e  $320^\circ$ , é possível observar que as diferenças entre os valores de pressão das séries “Projetado” e “Medido” são resultantes da soma de dois desvios de naturezas distintas: (i) desvios decorrentes das diferença entre valores de frequência projetados e valores de frequência efetivamente aplicados; e (ii) desvios entre valores de HMT estimados através da equação 37 e valores de HMT realmente fornecidos pela bomba .

Levando-se em conta que os valores de pressão da série “Bomba Eq. 37” foram calculados pela equação 37 com valores de velocidade angular ( $\omega$ ) correspondentes aos valores medidos de rotação do eixo da bomba ( $n_e$ ) que foram representados na Figura 50C, as diferenças entre esta séries indicam que, mesmo tendo-se êxito em aplicar exatamente as frequências descritas na Tabela 7, os valores de carga pressão poderiam ser até 3,0 mca menores que os projetados. Desta forma, as diferenças demonstradas na Figura 50D entre os valores de carga de pressão das séries “Bomba Eq. 37” e “Medido”, que atingem valores de até 3,0 mca, representam a grandeza dos erros nos valores de carga de pressão disponível, decorrentes das estimativas de HMT efetuadas através da equação 37.

Ainda, de acordo com esta linha de pensamento, a grandeza dos erros nos valores de carga de pressão disponível, decorrentes de erros na aplicação dos valores projetados de frequência da rede, pode ser mensurada através da diferença entre o erro total, calculado pela diferença “Projetado” - “Medido”, e o erro devido às estimativas de HMT, que foi mensurado pelas diferenças entre os valores de pressão das séries “Bomba Eq 37”- “Medido”.

De acordo com os valores representados na Figura 50D, este processo de cálculo indica que os desvios nos valores de frequência da rede causaram diferenças nos valores de carga de pressão da ordem de até 2,8 mca. Desta

forma, conclui-se que a diferença máxima de 5,8 mca (“Projetado”= 20mca e ”Medido”=14,8 mca), observada entre os valores de carga de pressão representados na Figura 50D, pode ser atribuída a uma diferença de pressão de 2,8 mca, oriunda da aplicação de um valor de frequência da rede 0,5 Hz abaixo do projetado, somada com outra diferença de pressão, de aproximadamente 3,0m, oriunda das estimativas de carga de pressão fornecidas pela equação 37.

Na Figura 51 estão representados valores da carga de pressão em quatro pontos distintos da lateral móvel do pivô ( $R_s = 0; 34,7; 56,2$  e  $71,4m$ ) que foram coletados ao longo de um giro completo da linha lateral.

Na Figura 51A são demonstrados dados coletados enquanto a unidade de bombeamento operava sem o controle do inversor e na Figura 51C, está representada a cota da última torre da lateral móvel durante o seu giro em torno do ponto do pivô. Na Figura 51B, são demonstrados dados coletados enquanto a unidade de bombeamento operava sob controle do inversor, e também linhas horizontais demarcando, respectivamente, a pressão mínima requerida na entrada das válvulas reguladoras de pressão instaladas nas proximidades do ponto do pivô ( $H_{s_0} = 16,9$  mca, conforme

Tabela 3) e a pressão mínima requerida na entrada das válvulas reguladoras de pressão instaladas próximas à extremidade externa da lateral ( $H_{s_{72}} = 17,6$  mca, de acordo com a Tabela 3).

A rápida mudança de posição do ponto de mínima pressão da lateral, de  $r_\alpha = 72m$  para  $r_\alpha = 0$ , que ocorre nas proximidades de  $\alpha = 160^\circ$  e  $\alpha = 320^\circ$ , que foi prevista na Tabela 6, pode ser observada nas Figura 51A e Figura 51B.

No entanto, é preciso ressaltar que esta rápida movimentação do ponto de mínima pressão, ao longo do comprimento total da lateral móvel do pivô, é uma particularidade específica do pivô analisado, decorrente das reduzidíssimas

taxas de perda de carga no interior da sua linha lateral (menores que  $5,66 \times 10^{-4}$  m/m).

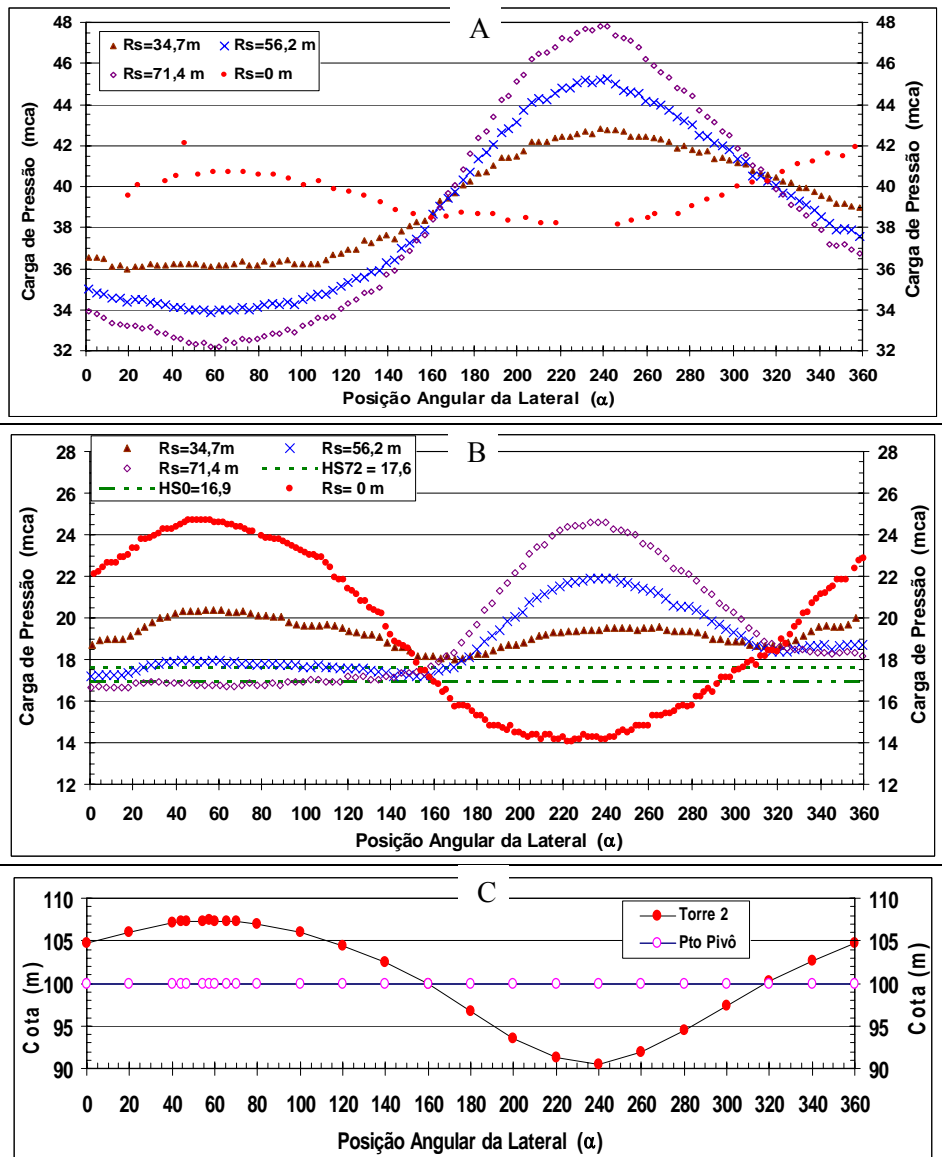


Figura 51 Monitoramento da carga de pressão em quatro pontos distintos da lateral móvel do pivô operando sem (A) e com a implantação de um inversor de frequência na unidade de bombeamento (B) e monitoramento da cota da última torre da lateral (C)

Normalmente, esta movimentação do ponto de mínima pressão, a partir da extremidade externa da lateral em direção à extremidade interna da lateral localizada no ponto do pivô, se faz de forma mais gradual, ao longo de uma faixa muito mais ampla de valores de  $\alpha$ .

Em termos da adequação da redução de pressão obtida com o uso do inversor, é preciso analisar duas situações distintas, que são demonstradas na Figura 51B. Nos trechos do deslocamento da lateral móvel compreendidos entre  $0^\circ < \alpha < 160^\circ$  e  $320^\circ < \alpha < 360^\circ$ , o valor da pressão disponível no ponto de mínima pressão da lateral ( $R_s = 72\text{m}$ ) ficou abaixo do valor projetado de 20mca ( $HS_{\min}$ ), mas ficou acima do valor mínimo ( $HS_{72} = 17,6 \text{ mca}$ ) requerido pelas válvulas reguladoras de pressão instaladas neste ponto. No entanto, no trecho do deslocamento compreendido entre  $160^\circ < \alpha < 320^\circ$ , o valor da pressão disponível no ponto de mínima pressão da lateral ( $R_s = 0 \text{ m}$ ) ficou abaixo do valor projetado de 20mca e também ficou abaixo do valor mínimo requerido ( $HS_0 = 16,9 \text{ mca}$ ) pelas válvulas reguladoras de pressão instaladas próximas a este ponto.

Estas duas situações distintas ocorreram porque, de acordo com dados representados na Figura 50, nos trechos compreendidos entre  $0^\circ < \alpha < 160^\circ$  e  $320^\circ < \alpha < 360^\circ$  os erros inerentes ao processo de controle da pressão não ocorreram da mesma forma aditiva que foi observada no trecho entre  $160^\circ < \alpha < 320^\circ$ .

Nos trechos compreendidos entre  $0^\circ < \alpha < 160^\circ$  e  $320^\circ < \alpha < 360^\circ$ , os valores projetados frequência da rede foram praticamente alcançados (Figura 50B), ocorrendo apenas diferenças em valores pressão decorrentes de erros nas estimativas dos valores de pressão fornecidos pela bomba, obtidos com a equação 37 (Figura 50D). Desta forma, nestes trechos, os erros nas estimativas dos valores de pressão fornecidas pela equação 37 foram compensados pela

margem de segurança adotada nos cálculos ( $H_{smin} = 20$  mca ao invés de 17,6 mca).

No trecho compreendido entre  $160^\circ < \alpha < 320^\circ$ , os desvios entre valores projetados de frequência da rede e valores medidos de frequência da rede (Figura 50B) introduziram alterações nos valores de pressão que se somaram aos erros decorrentes das estimativas de pressão dadas pela equação 37. Desta forma, neste trecho, o efeito aditivo dos erros superou o valor da margem de segurança adotada nos cálculos, fazendo com que o valor mínimo de pressão requerido pelas válvulas reguladoras de pressão ( $HS_0 = 16,9$  mca) instaladas nas proximidades do ponto do pivô não fosse alcançado.

A análise dos dados da Figura 51B permite inferir que, para efeito de cálculo das frequências da rede a serem aplicadas pelo inversor, uma margem de segurança no valor de projeto de  $HS_{min}$  de pelo menos 6m deve ser adotada. Isto é, ao invés de se adotar  $HS_{min}$  com valor de 20mca, conforme é feito nos projetos que não envolvem o uso de um inversor, recomenda-se adotar um valor de  $HS_{min}$  de 24mca, que corresponde à soma do erro total das estimativas de pressão (6,0 mca) com o valor mínimo requerido pelas válvulas reguladoras da ponta do pivô ( $HS_{72} = 17,6$  mca). Evidentemente, a grandeza da margem de segurança dos cálculos de pressão apresentada neste estudo é específica para o equipamento avaliado, pois é resultado do grau de precisão com que foi possível atribuir valores de frequência da rede ao motor da unidade de bombeamento e do grau de precisão das informações relativas ao desempenho hidráulico do pivô. No entanto, esta margem de segurança pode servir como ponto de partida para outros projetos envolvendo o uso de inversores em equipamentos do tipo pivô central.

#### **4.5 Redução do consumo de energia**

Na Figura 52, são demonstrados valores de potência ativa, medidos ao longo de um giro completo da linha lateral móvel do pivô. Nesta figura, estão também representados valores de potência mecânica no eixo de acionamento do motor, que foram calculados pela equação 41 com valores medidos de rotação do eixo de acionamento da bomba. Essas séries de dados foram tomadas sob duas condições operacionais distintas: (i) com a unidade de bombeamento sendo controlada pelo inversor de frequência (P.Ativa COM e P.Eixo COM) e (ii) com a unidade de bombeamento sem o controle do inversor (P.Ativa SEM e P.Eixo SEM).

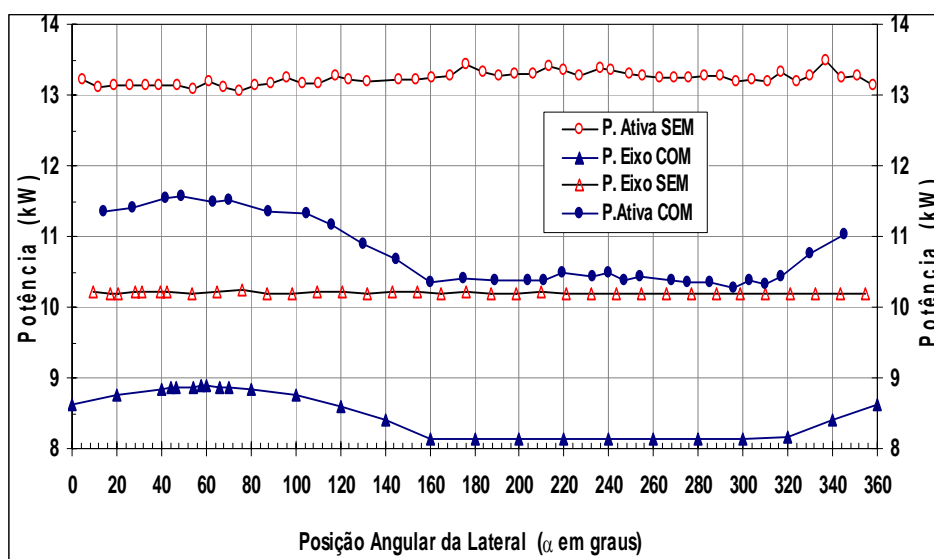


Figura 52 Potência ativa e potência mecânica no eixo durante o giro da lateral do pivô com a unidade de bombeamento operando com e sem o controle de um inversor de frequência

Os valores médios de potência ativa por giro completo (13,23kW sem o inversor e 10,75kW com o inversor) indicam uma redução de consumo de energia da ordem de 19% quando o inversor é utilizado. A razão potência no eixo/potência ativa ( $8,53/10,75=0,79$ ) determinada enquanto a unidade de

bombeamento operava sob controle do inversor foi pouco superior ao valor determinado sem o controle do inversor ( $10,20/13,23=0,77$ ), indicando que o inversor promoveu uma pequena melhora no rendimento do motor.

Além da redução do consumo de energia e da melhora no rendimento do motor, foi também observada uma melhora no fator de potência, que passou de 0,84 para 0,88 (da ordem de 5%). Esta melhora pode significar em uma economia efetiva com relação ao banco de capacitores que seriam necessários para finalizar a correção do fator de potência para no mínimo 0,92, quando de sua instalação e manutenção.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sugere-se, como os próximos passos a serem realizados para a melhoria do projeto, o desenvolvimento e implantação do sistema de monitoramento do sistema supervisorio via padrão *Ethernet*, permitindo assim seu acesso pela *web* (internet). Pois dessa forma pode-se promover o monitoramento e controle remoto das condições de operação do pivô central.

Destaca-se que, os eletrodos utilizados para determinar a umidade de solo seguiram como proposto por Silva, Lima e Rodrigues (2007), onde este sistema emite um sinal digital quando há a necessidade de reposição de água no solo. Escolheu-se este tipo de sensoriamento devido a sua facilidade de construção e sua comprovada eficiência, embora aconselha-se um melhor estudo devido as características do solo onde o mesmo poderá ser aplicado.



## 6 CONCLUSÃO

A implantação de um inversor de frequência em conjunto com o controlador lógico programável, na unidade de bombeamento do pivô central avaliado, promoveu: (i) redução no excesso de pressão experimentado pelas válvulas reguladoras de pressão da lateral; (ii) redução no consumo de energia ao longo do giro da lateral; (iii) aumento no rendimento do motor elétrico; e (iv) aumento no fator de potência.

Confirmou-se, com este trabalho, que o modelo proposto por Azevedo (2003) para adimensionalização das curvas manométrica total *versus* vazão e de rendimento *versus* vazão, para bombas, apresenta um resultado satisfatório para determinação dos valores calculados das rotações do conjunto motobomba.

Destaca-se que a aplicação da automação por meio de padrão de comunicação é um processo irreversível para a modernização de um setor automatizado. Neste sentido, dentre os diversos tipos de padrão de comunicação existentes, para barramento de campo de equipamentos de automação, os padrões *ModBus* e *CompoBus*® mostraram-se confiáveis e robustas para este tipo de aplicação, que é extremamente exposta as condições naturais do meio em que se encontra (chuva, sol, dia, noite, calor, frio, ventos, etc.).

Finaliza-se desafiando a imaginação para os novos tempos, novos procedimentos, novas estruturas para os sistemas automatizados, nova cultura, atualização permanente do conhecimento. O futuro da automação está associado à tecnologia das comunicações e ao aperfeiçoamento dos equipamentos. Entre as futuras ferramentas podem ser mencionadas as redes neurais artificiais, a bioautomação, a lógica Fuzzy, o biocomputador, a nanotecnologia, a lógica por DNA, entre outros. No que diz respeito à gestão de lucros e/ou prejuízos, a aplicação da automação é irreversível (ROSÁRIO, 2005).

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. U. B.; ALEXANDRIA, A. R. **Redes industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído**. São Paulo: Ensino Profissional, 2009. 258 p.
- ALCÂNTARA, W. Estações de bombeamento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. p. 107-208.
- AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central**. 2003. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- BEGA, E. A. et. al. **Instrumentação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 583 p.
- CAMPANA, S. et al. Adequação de força motriz em sistemas de irrigação por aspersão convencional e pivô central. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3., 2000a, Campinas. **Anais...**Campinas: [s.n.], 2000. 1 CD ROM.
- CAPRILE, S. R. **XBee: desarrollo de aplicaciones com comunicaci3n remota baseadas em m3dulos ZigBee y 802.15.4**. Buenos Aires: Gran Aldea, 2009. 362 p.
- CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação**. Lavras: UFLA, 2008. 354 p.
- CATÁLOGO de Bombas Imbil: modelo IBEK. Itapira: Imbil, 1997. 35 p.
- COLOMBO, A. et al. Inversores de frequência em sistemas de irrigação do tipo pivô central operando com associação de bombas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiania. **Anais...** Jaboticabal : Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 1-4.
- COLOMBO, A. **Pivo Central – ENG 510 e 850**. Lavras: UFLA, 2006. 40 p. Notas de Aula.
- FARIA, M. A.; VIERA, I. J. Irrigação por aspersão: sistema mais usado no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 27-39, jul. 1986.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. **Máquinas elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 648 p.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2010. 250 p.

FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009. 352 p.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequências: teoria e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009. 192 p.

HEERMANN, D. F.; KOHL, R. A. Fluid dynamics of sprinkler systems. In: JENSEN, M. E. **Desing and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: Americam Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 583-618.

JACINTO, L. U. A pecuária do futuro com ajuda da irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 51, p. 50-54, 2001.

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

KILIAN, C. **Modern control technology: components & systems**. 2nd ed. [S. l.]: Thomson Learning, 2004. cap. 6.

LIMA, A. S. Uso de inversor de frequência em sistema do tipo pivô central e seu efeito na lâmina e uniformidade de distribuição de água. 2009. 104 p. Tese (Doutorado em Agroeconomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009.

MACYNTIRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 667 p.

MAPAS: foto da região do pivô central no campus da UFLA. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&tab=ll> ->. Acesso em: 7 maio 2011.

MASIERO L. A. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; OLIVEIRA, R. A. Utilização de inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de irrigação por pivô central. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 7, p. 35-45, 1999.

MELLO, H. G. G. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência**. [S. l.]: WEG, nov./dez. 1999. Matéria Técnica.

MESQUITA, A. L. A. et al. Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 6., 2006, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SEREA, 2006. Disponível em: [http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page\\_id=171](http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=171)>. Acesso em: 18 nov. 2011.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 347 p.

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

OMRON. **CompoBus/S - Operation Manual**. Arquivo eletrônico M11W2661207.pdf. USA. 2007. Disponível em: <<http://www.omorn247.com>>. Acesso em: 19 jan. 2011.

PINHEIRO, J. M. **As redes ZigBee**. São Paulo: [s. n.], 2009. Disponível em: <<http://www2.eletronica.org/artigos/electronica-digital/as-redes-com-zigbee>>. Acesso em: 23 fev. 2009.

RODRIGUES, L. N. **Modelo para o dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por pivô central**. 1999. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

ROSÁRIO, J. M. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 350 p.

SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, San Diego, v. 14, p. 877–898, 2010. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)>. Acesso em: 12 out. 2011.

SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of center pivots laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 3, p. 554-567, 1993.

SILVA, I. L. S.; LIMA, L. K. C.; RODRIGUES, J. C. Sistema de irrigação automatizado baseado na umidade do solo. 2007. Disponível em: <<http://www3.iesam-a.edu.br/ojs/index.php/computacao/article/viewFile/120/107>>. Acesso em: 23 set. 2011.

SILVA, M. C. I. Cálculo das perdas para diversas condições de carga. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, v. 27, n. 306, p.74-83, set. 1999.

SOUZA, J. A. R.; MOREIRA, D. A.; DENICULI, W. Modelagem da perda de carga em tubulações comerciais, conduzindo água residuária. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 3, p. 255-261, 2011.

VALIANTZAS, J. D.; DERCAS, N. Hydraulic analysis of multidiameter center-pivot sprinkler laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 2, p. 137-146, 2005.

WEG. **Catálogo eletrônico de produtos**. Jaraguá do Sul, 2006. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 22 out. 2009.

WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. Jaraguá do Sul, 2006. Disponível em: <[http://www.poli.br/~marcilio/Inversores/Inversores%20de%20Frequ%EAncia%20%20Guia%20de%20Aplica%E7%E3o%20\(3%20ed\)%20%5BWEG%5D.pdf](http://www.poli.br/~marcilio/Inversores/Inversores%20de%20Frequ%EAncia%20%20Guia%20de%20Aplica%E7%E3o%20(3%20ed)%20%5BWEG%5D.pdf)>. Acesso em: 22 out. 2009

WEG. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Jaraguá do Sul, 2009. Guia técnico.

YANAGI JÚNIOR, T.; FERREIRA, E.; COLOMBO, A. Método matemático para estimativa analítica das curvas de desempenho de bombas centrifugas. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 484-490, 1997.

YUNSEOP, J. K.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. **IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement**, New York, v. 57, n. 7, p. 1379-1387, July 2008.