

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA
ACIONAMENTO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM
IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

JOÃO ALBERTO BORGES DE ARAÚJO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas do Campus de Botucatu - UNESP, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração - Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP

Abril de 2000

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA
ACIONAMENTO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO EM
IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO**

JOÃO ALBERTO BORGES DE ARAÚJO

**Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim
(Orientador)**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas do Campus de
Botucatu - UNESP, para obtenção do título
de Mestre em Agronomia, Área de
Concentração - Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU - SP

Abril de 2000

*À minha esposa Diva Maria,
aos meus filhos Juninho e Mariana
pelo apoio, carinho e compreensão.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Primeiro a Deus pelo dom da vida e realização deste trabalho.
- Aos meus pais Sérgio e Maria de Lourdes e aos meus irmãos Antonio Sérgio e Marisa que tanto se esforçaram para que eu pudesse completar meus estudos, apoiando-me e incentivando-me.
- Ao Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim pela orientação, colaboração e amizade durante o curso e na realização deste trabalho.
- Aos professores Antônio de Pádua Sousa, Antonio Evaldo klar , Raimundo Leite Cruz , Nelson Miguel Teixeira e Sérgio Campos e demais professores do Curso pelo apoio e amizade.
- Aos amigos José Fernando Presenço e Marcos Brandão pela amizade, respeito e colaboração na realização deste trabalho.
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural e, em particular ao desenhista Silvio, e ao estagiário Wesley, pela dedicação, paciência, amizade e apoio na montagem do trabalho;
- Aos amigos da Escola Técnica Industrial pelo apoio e incentivo;
- Á Faculdade de Ciências Agrônômicas e ao curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem pela oportunidade da realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1 RESUMO	1
1.1 Summary	2
2 INTRODUÇÃO.....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 Motores elétricos de indução	6
3.1.1 Princípio de Funcionamento	7
3.1.2 Rotação de sincronismo	8
3.1.3 Escorregamento de fase	8
3.1.4 Frequência do rotor	10
3.1.5 Momento de torção (conjugado)	10
3.1.6 Motor tipo gaiola de esquilo	11
3.2 Fator de potência.....	12
3.2.1 Compensação da potência reativa	13
3.3 Rendimento de uma máquina elétrica.....	13
3.4 Bombas hidráulicas.....	14
3.4.1 Classificação das bombas.....	14
3.4.2 Potência absorvida e rendimento de bombas hidráulicas.....	16
3.4.2.1 Potência absorvida	16
3.4.2.2 Rendimento de uma bomba hidráulica	17
3.4.2.3 Rendimento global.....	17
3.4.3 Curvas características de bombas centrifugas.....	17
3.5 Medidas de pressão e vazão.....	19

3.5.1 Medidas de pressão	19
3.5.1.1 Elementos de medição de pressão	20
3.5.1.2 Tubo de Bourdon	21
3.5.1.3 Sensor de pressão piezoresistivo	21
3.5.1.4 Transdutor de pressão	21
3.5.2 Medidas de vazão	22
3.6 Acionamento de motores de indução	23
3.6.1 Controle de rotação por regulação de tensão	23
3.6.2 Controle de rotação com o uso de inversores	24
3.6.3 Inversores trifásicos	25
3.6.4 Acionamento a frequência fixa	25
3.6.5 Acionamento por inversor a corrente constante	26
3.6.6 Acionamento por meio de cicloconversores	26
3.6.7 Acionamento com inversor transistorizado	27
3.6.8 Inversores escalares e inversores vetoriais	27
3.6.8.1 Inversores escalares	27
3.6.9 Inversores vetoriais de fluxo	29
3.7 Acionamentos com rotação controlada para bombeamento	30
3.7.1 Fundamentos teóricos	32
3.7.1.1 Conversão eletrônica da frequência	32
3.7.1.2 Efeitos da modulação PWM	35
3.7.1.3 Efeito das harmônicas	36
3.8 Automação	38

3.8.1 Caracterização de um sistema de controle	42
3.8.2 Condicionadores de sinal	45
3.8.3 Sistemas de regulação	45
3.8.4 Controlador Lógico Programável (CLP).....	45
3.8.4.1 Partes constituintes de um CLP	45
3.8.5 Linguagem de programação do CLP.	47
3.8.6 Características da linguagem Step 5	48
3.8.6.1 Instrução Normalmente Aberto (NA).....	48
3.8.6.2 Instrução Normalmente Fechado (N.F.)	49
3.8.6.3 Instrução energizar saída	50
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	52
4.1 Material.....	52
4.1.1 Sistema Convencional de Irrigação por Aspersão	52
4.1.2 Sistema de Irrigação por Aspersão com Inversor	56
4.2 Métodos	58
4.2.1 Acionamento de sistemas de bombeamento do tipo convencional.....	58
4.2.2 Acionamento de sistemas de bombeamento com rotação variável.....	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1 Sistemas de Bombeamento convencional	62
5.2 Proposta do sistema de Bombeamento com Inversor de Frequência.....	68
6 CONCLUSÕES	76
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE I	82

1 RESUMO

O sistema de bombeamento pressurizado convencional de rotação fixa que utiliza motor elétrico no acionamento, é analisado sob o aspecto do sistema de comando e controle, baseando-se em curvas e tabelas construídas para análise do comportamento hidráulico e elétrico do sistema, porém quando comparado com sistema de rotação variável apresentam desvantagens, quanto a eficiência desses parâmetros.

Esta pesquisa tem como ponto principal, analisar teoricamente o comportamento hidráulico e mecânico dos acionamentos convencionais com rotação fixa de um sistema de irrigação por aspersão, e propor a aplicação de um sistema automatizado de controle de rotação, por inversor de frequência e controlador lógico programável, sobre um conjunto motobomba, visando a racionalização de energia elétrica.

Na proposta de automação do sistema, determina-se uma pressão constante na saída da bomba, que controla a rotação do motor pelo inversor de frequência, em função da altura manométrica e da vazão requerida, com isso, melhorando as condições de corrente para o motor em operação com partidas e desligamentos suaves, e possibilita o redimensionamento do motor elétrico para um potência menor na razão de 33 %.

APPLICATION OF THE FREQUENCY INVERTER FOR DRIVE PUMPING IN ASPERSION IRRIGATION SYSTEMS.

Botucatu, 2000. 84p. Dissertação de Mestrado em Agronomia (Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP.

Author: João Alberto Borges de Araújo

Adviser: Prof. Dr Odivaldo José Seraphim

1.1 Summary

The conventional pressurized pumping systems of fixed rotation that uses electrical devices for driving, is analyzed under the aspect of the command system and control, being based on curves and tables constructed to analyze of the hydraulical and electric behavior of the system, however when compared with system of variable rotation they present disadvantages, concerning to the efficiency of these parameters. This research has as main point, analyze theoretically to the hydraulical and mechanical behavior of the conventional drive with fixed rotation of a system of irrigation for aspersion, and to consider the application of a system automatized of rotation control, for frequency inverter and programmable logical controller, on the combine electrical pump, aiming the rationalization of electric energy. In the proposal of automation of the system, a constant pressure in the output of the pump is determined, that controls the rotation of the engine for the frequency invertor, in function of the manometric height and the required outflow, with this, improving the factor of power with the own correction for a value close to the ideal and the current conditions for the engine in operation with soft starts and power off, preventing high requests of the start current.

2 INTRODUÇÃO

Os acionadores eletrônicos têm revolucionado o uso da eletricidade como força motriz. O primeiro impacto surgiu com substituição do sistema ward-leonard de controle de rotação de motores de corrente contínua pelo retificador a SCR's. No entanto, o maior impacto se deu com o aparecimento dos semicondutores de última geração, que têm permitido a construção de conversores eletrônicos de tensão e frequência com melhores desempenho.

O motor síncrono e o de indução deixaram de ser motores de rotação fixa e passaram a poder operar com rotação variável, viabilizando o controle final da vazão de fluxo por meio do motocompressor, da ou do motoventilador, em substituição à válvulas de controle.

Os primeiros estudos sobre a viabilidade de aplicação de conversores eletrônicos de frequência na Petrobras foram iniciados na década de 80. Após a

realização de vários testes, eles vêm sendo utilizados progressivamente, com diversos objetivos e funções que vão além do uso racional de energia elétrica.

A racionalização do uso de energia elétrica é uma preocupação em nível nacional, uma vez que a maioria dos cursos d'água com capacidade de geração de energia elétrica já está sendo utilizada e há escassez de recursos para a construção de novas usinas, no meio rural, é um interesse tanto das concessionárias e da sociedade quanto do agricultor a racionalização de energia elétrica, haja visto que a implantação de sistemas de eletrificação rural pode atingir um custo 400 (%) mais alto do que aquele de sistemas urbanos similares, em razão da necessidade de vencer grandes distâncias, com baixa densidade de consumo por quilômetro de rede de eletrificação, em oposição à eletrificação no meio urbano que tem altas densidades de consumo, sendo a irrigação responsável por grande parte do consumo de energia elétrica no meio rural, que pode representar cerca de 30% dos custos de produção.

Dentro desse contexto de economia de energia e sabendo-se que a irrigação pressurizada se mostra em todo o mundo como uma fase importante no processo produtivo principalmente em regiões com grandes déficits hídricos, deve-se otimizar seu uso para atender os aspectos econômicos e sociais, visando obter custos menores de produção.

O bombeamento pressurizado que utiliza motores elétricos no acionamento, é o referencial que será analisado sob o aspecto do sistema de comando e controle, pois é objetivada a otimização do consumo de energia elétrica do sistema. Aspectos como rendimento do motor, fator de potência condições de partida e facilidade de controle devem ser abordadas para se conseguir a otimização do sistema de irrigação.

Este trabalho tem como objetivo propor substituição de um sistema de irrigação convencional por aspersão, com rotação fixa, por um sistema automatizado de acionamento com rotação variável e pressão constante, utilizando o inversor de frequência atuando diretamente na rotação do conjunto motobomba, auxiliado por um transdutor de pressão, e por um controlador lógico programável (CLP) como simulador de abertura e fechamento de válvulas solenóides, responsável pelo controle das parcelas irrigadas, bem como pelo exato dimensionamento do projeto sobre a necessidade de aplicação de água, pontos estes principais nas pesquisas de uso racional e conservação de energia elétrica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Economizar eletricidade significa obter o melhor resultado com menor consumo possível, pois garante a energia para o futuro, preserva o meio ambiente e reduz despesas, sem que haja prejuízo de qualidade.

3.1 Motores elétricos de indução

Segundo Martignoni (1978), A Maioria dos motores elétricos empregados são do tipo assíncrono, também chamados motores de indução e devido ao fato de os mesmos possuírem importantes qualidades, tais como: construção simples, custo reduzido, vida útil longa, facilidade de manobra de manutenção, segundo Fitzgerald et al (1977), o motor de indução trifásico consiste em um enrolamento no estator e de um rotor. O motor de gaiola é formado por barras condutoras colocadas em ranhuras de ferro e curto – circuitados em cada extremidade por anéis condutores.

Segundo Mammede Filho (1989) o motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica disponível no eixo do mesmo. Há vários tipos

de motor elétrico empregado em instalações elétricas, porém, devido à sua simplicidade e ausência de coletor, o mais usado é o motor assíncrono de indução.

O motor de indução é constituído por duas partes básicas distintas:

- a) Estator, formado por 3 elementos: carcaça, que corresponde à estrutura de suporte do rotor; núcleo, constituído de chapas magnéticas e enrolamentos, adequadamente dimensionados e dispostos sobre o núcleo.
- b) Rotor, também formado por 3 elementos básicos: núcleo, enrolamentos e o eixo.

Segundo Dawes (1969), o motor de indução, dentre os motores de corrente alternada, é o de mais extenso uso. Deve-se esta preferência a sua robustez, simplicidade, ausência de coletor.

3.1.1 Princípio de Funcionamento

Segundo Mammede Filho (1989), o funcionamento de um motor de indução baseia-se no princípio da formação de um campo magnético rotativo produzindo no estator pela passagem da corrente alternada em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, desloca-se em torno do rotor, gerando neste, corrente induzida que tende a opor-se ao campo rotativo, sendo, o rotor, arrastado por este.

O rotor não atinge a rotação do campo rotativo, pois, do contrário não haveria geração de correntes induzidas, e desta forma eliminaria o trabalho magnético rotórico responsável pelo trabalho mecânico do rotor.

Segundo Martignoni (1978), o efeito da variação do fluxo, produzido pelo campo rotativo que se desloca no enrolamento do estator, geram no rotor correntes induzidas que tentam se opor à causa que produz. O rotor não pode alcançar a rotação do campo rotativo, pois se isso ocorresse, não haveria mais geração de correntes induzidas e

desaparecia o efeito magnético rotórico necessário para manter o rotor em movimento. O sistema induzido pode acompanhar a rotação do campo indutor, mas a sua rotação inferior, a fim de gerar a corrente induzida e, por conseguinte a reação motora.

Depreende-se que o motor assíncrono é constituído por um sistema estatórico promovido de enrolamentos indutores, que são ligados com a linha de alimentação e de um sistema rotórico que constitui o induzido. O sistema estatórico produz o campo rotativo, enquanto o sistema rotórico é constituído por sistemas elétricos fechados percorrido pelas correntes produzidas pelo efeito eletromagnético do campo rotativo. O sistema indutor e induzido são chamados respectivamente de primário e secundário como nos transformadores.

3.1.2 Rotação de sincronismo

Segundo Dawes (1969), a rotação do campo rotativo tem nome de rotação de sincronismo do motor. A rotação de sincronismo pode ser determinada utilizando a Equação 1.

$$N = 120 \cdot \frac{f}{P} \quad (1)$$

Onde:

N = rotação de sincronismo (RPM),

f = frequência (Hz),

P = número de pólos da máquina.

3.1.3 Escorregamento de fase

Segundo Martignoni (1978), a força eletromotriz é gerada por efeito de variação do fluxo produzido no campo rotórico sobre os condutores induzidos tais variações de fluxo são máximas quando o rotor está parado.

Nestas condições as variações de fluxo que os condutores induzidos sofrem, correspondem ao número de rotação por minuto do campo rotativo, dado pela Equação 2.

$$n_1 = \frac{60 \cdot f1}{P} \quad (2)$$

Onde:

n_1 = rotação do campo rotativo, em rpm;

$f1$ = frequência da rede de alimentação, em Hertz;

P = número de pares de pólos.

Uma vez o rotor em movimento, acompanhando o sentido do campo rotativo, o número de variações de fluxo que os condutores induzidos sofrem, diminui. Assim, se o motor rodar com n_2 rotações por minuto, nos condutores induzidos resulta $n_1 - n_2$. O número de rotações por minuto do rotor é sempre inferior a n_1 , pois se n_2 fosse igual a n_1 não se verificaria mais variação de fluxo nos condutores induzidos e deixaria-se de gerar a força eletromotriz e a corrente rotórica, ficando nula a ação motora. A diferença $n_1 - n_2$ representa o número de rotações por minuto com que o campo rotórico desliza com respeito aos condutores induzidos, pelo que se chama rotação de escorregamento.

Representa-se o número de rotações por minuto que o rotor perde, em relação ao campo rotativo. Portanto, o escorregamento pode ser dado percentualmente utilizando-se a Equação 3:

$$S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Quando o rotor estiver parado temos:

$$n_2 = 0; S = 1; S\% = 100 \%$$

Quando o rotor estiver em vazio:

$$n_2 \cong n_1; S\% = 0$$

Com carga nominal, os motores possuem escorregamento que varia entre 1% até 5%.

3.1.4 Frequência do rotor

Segundo Dawes (1969), a frequência das correntes induzidas no rotor (f_2) é igual ao produto da frequência do estator (f_1) pelo escorregamento de fase, conforme a Equação 4.

$$f_2 = S \cdot f_1 \quad (4)$$

3.1.5 Momento de torção (conjugado)

Segundo Mamede (1989), o momento de torção (torque), mede o esforço necessário que deve ter o motor para girar o seu eixo, podendo ser definido em diferentes fases de acionamento do motor.

Conjugado nominal (C_N)

É aquele que o motor desenvolve a potência nominal, quando submetido a frequência e tensão nominal.

Conjugado de partida

É aquele desenvolvido pelo motor sob condições de frequência e tensão nominais durante a partida. Deve ser de valor elevado, a fim de o motor poder acionar a carga desde a posição de inércia até a rotação nominal.

Conjugado máximo (C_{max})

É o maior conjugado produzido pelo motor, sem ficar sujeito a variações bruscas de rotação.

Conjugado mínimo (C_{min})

É o menor conjugado obtido, na faixa de rotação compreendida entre o valor zero e conjugado máximo.

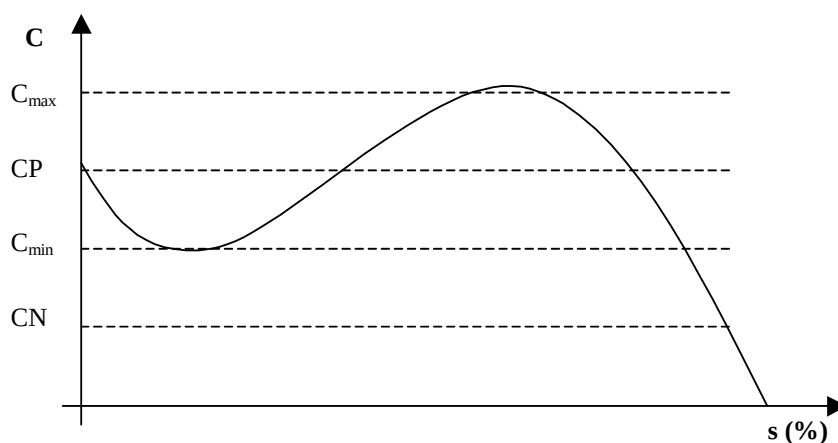


Figura 01 - Curva dos conjugados.

3.1.6 Motor tipo gaiola de esquilo

Segundo Dawes (1969), é o mais simples, e de uso generalizado. O núcleo do rotor fabrica-se em aço ranhurado. A armadura é feita com barras de cobre ou de alumínio fundido. Possui as seguintes características:

- ⇒ Escorregamento de fase (s), em motores até 50 HP, da ordem de 1 a 2%. Para motores maiores pode atingir de 8 a 10%,
- ⇒ Fator de potência ($\cos \phi$), cresce com a carga e alcança o seu valor máximo próximo a condição nominal de funcionamento do motor. Daí em diante, O fator de potência volta a baixar com aumento adicional de carga.
- ⇒ Rendimento (η), sobe com rapidez até atingir seu maior valor, próximo à carga nominal; após decresce com o aumento da carga,

⇒ Corrente de partida (I_p), consome uma alta corrente de partida, sob baixo fator de potência, o que faz desenvolver um baixo torque de partida,

⇒ Torque; o motor desenvolve um torque para determinado deslizamento de fase que é proporcional ao quadrado da voltagem de linha, é dado pela Equação 5.

$$T = k \cdot V_l^2 \quad (5)$$

Onde:

T = torque motor,

k = constante da máquina,

V_l = voltagem da linha de alimentação.

3.2 Fator de potência

Segundo Spitta (1978), os usuários de energia elétrica são providos de cargas resistivas e indutivas,. As cargas resistivas absorvem potência ativa e as cargas indutivas, potência reativa, e a soma geométrica destas potências resulta na potência aparente, podendo ser representada pela Figura 02.

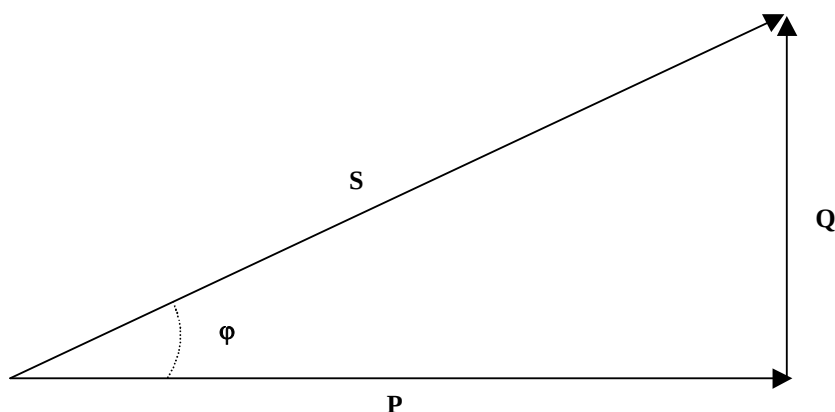


Figura 02 - Triângulo de potência.

Onde :

P = potência ativa (kW),

Q = potência reativa (kVAr),

S = potência aparente (kVA).

O coseno do ângulo ϕ é chamado de fator de potência.

A potência ativa é a potência que gera trabalho e a potência reativa é usada para magnetizar enrolamentos e produzir campo magnético girante.

A potência reativa é uma carga adicional aos geradores, às linhas de distribuição e aos transformadores. Logo as companhias de energia exigem que o fator de potência seja superior a um valor mínimo, caso contrário, será cobrado multas do consumidor. Os motores e as lâmpadas fluorescentes são grandes consumidores de potência reativa.

3.2.1 Compensação da potência reativa

Segundo Spitta (1978), pode-se manter o fator de potência mínimo exigido pela companhia distribuidora conectando-se capacitores de grande capacidade em paralelo com as cargas indutivas. O uso de motores síncronos também é uma possibilidade.

3.3 Rendimento de uma máquina elétrica

Segundo Natale (1996), o rendimento de um sistema é o quociente da potência oferecida P_s pela recebida P_E , valor esse dado em porcentagem pela Equação 6.

$$\eta \quad \% = \frac{P_s}{P_E} \cdot 100 \quad (6)$$

Para o caso de um motor elétrico, é o quociente da potência mecânica P_M que oferece pela potência elétrica P_E recebida, dado pela Equação 7.

$$\eta \quad \% = \frac{P_M}{P_E} \cdot 100 \quad (7)$$

Se tivermos dois sistemas, ou duas máquinas M_1 e M_2 , o rendimento do conjunto é igual ao produto de cada uma das máquinas, conforme Equação 8.

$$\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (8)$$

3.4 Bombas hidráulicas

Segundo Manual de treinamento da KSB (1991), bombas hidráulicas são máquinas operatrizes hidráulicas que transferem energia ao fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte desta energia ao fluido, sob forma de energia de pressão energia cinética ou ambas.

3.4.1 Classificação das bombas

Segundo Manual de treinamento da KSB (1991), as bombas hidráulicas podem ser classificadas em duas grandes categorias:

- ⇒ Bombas centrífugas (turbobombas),
- ⇒ Bombas volumétricas (deslocamento positivo).

Bombas centrífugas

É a bomba que tem por princípio de funcionamento, a transferencia de energia mecânica para o fluído a ser bombeado em forma de energia cinética. Esta energia é

transformada em energia potencial (energia de pressão), sendo esta sua característica principal. O movimento rotacional de um motor inserido em uma carcaça é o órgão responsável por tal transformação.

Bombas centrífugas radiais

É quando a direção do fluído bombeado é perpendicular ao eixo de rotação.

Bomba centrífuga de fluxo misto

Quando a direção do fluido bombeado é inclinada em relação ao eixo de rotação.

Bomba centrífuga de fluxo axial

Quando a direção do fluído bombeado é paralela em relação ao eixo.

Bomba volumétrica (deslocamento positivo)

É o tipo de bomba que tem por característica de funcionamento a transferência direta de energia mecânica cedida pela fonte motora em energia potencial.

Esta transferência é obtida pela movimentação de um órgão mecânico da bomba que obriga fluido a executar o mesmo movimento do qual ele está animado.

Bombas de êmbolo

O órgão que produz o movimento do fluido é um pistão que, em movimentos alternativos, aspira e expulsa fluido bombeado.

Bombas rotativa

É a bomba comandada por um movimento de rotação, o funcionamento consiste no preenchimento dos interstícios entre o rotor e a carcaça, sendo que o somatório de todos corresponde a vazão total fornecida pela bomba.

3.4.2 Potência absorvida e rendimento de bombas hidráulicas

De acordo com Paiva (1993) a eficiência de uma bomba é dada pela relação entre os valores equivalentes a potência hidráulica fornecida pela bomba e a potência exigida pela mesma numa determinada condição de funcionamento. Portanto se conclui que bombas mal dimensionadas poderão elevar a vazão desejada com baixa eficiência consumindo mais energia que a necessária.

3.4.2.1 Potência absorvida

É a energia que a bomba hidráulica consome ao transportar o líquido na vazão desejada, à altura estabelecida, como o rendimento esperado.

É função de duas outras potências envolvidas no funcionamento de uma bomba:

- potência hidráulica,
- potência útil.

Na prática diária usa-se apenas a potência motriz para determinar a potência do motor elétrico, necessário ao acionamento da bomba, dado pela Equação 9.

$$P_M = \frac{Q \cdot H \cdot 0,37}{\eta} \quad (9)$$

Onde:

P_M = Potência motriz absorvida, em (cv);

Q = vazão pretendida, em (m³/h);

H = altura de elevação, em metros;

0,37 = constante de ajuste das unidades;

η = rendimento da bomba.

3.4.2.2 Rendimento de uma bomba hidráulica

É a relação entre a energia oferecida pela máquina motriz (motor) e a absorvida pela máquina operatriz (bomba).

O rendimento global de uma bomba hidráulica se divide em:

- *Rendimento hidráulico*: leva em consideração o acabamento interno superficial do rotor e da carcaça. Variando com o tamanho da bomba de 50 a 90%.
- *Rendimento mecânico*: leva em consideração que apenas uma parte da potência necessária ao acionamento da bomba é usado para bombear. O restante se perde por atrito.

3.4.2.3 Rendimento global

O rendimento global, relação entre a potência hidráulica e a potência absorvida pela bomba é dada pela Equação 10 (Schneider, 1990).

$$\eta = \frac{Q \cdot H \cdot 0,37}{P_M} \quad (10)$$

3.4.3 Curvas características de bombas centrífugas

Segundo Schneider (1990), a curva característica de uma bomba é a expressão cartesiana de suas características de funcionamento, com altura manométrica na ordenada, e a vazão na abscissa, em torno dos quais se expressam o rendimento, as perdas internas e a potência absorvida. É função particular do projeto e da aplicação requerida de cada bomba, dependendo do tipo e quantidade de rotor utilizado, tipo de carcaça, sentido de fluxo, rotação específica, etc.

A curva possui um ponto de trabalho característico (ponto ótimo de funcionamento), onde apresenta o melhor rendimento.

As curvas características podem ser *estáveis* ou *instáveis*.

Estáveis: são aquelas que para uma determinada altura corresponde a uma única vazão.

Instáveis: são aquelas que para uma determinada altura corresponde a duas ou mais vazões.

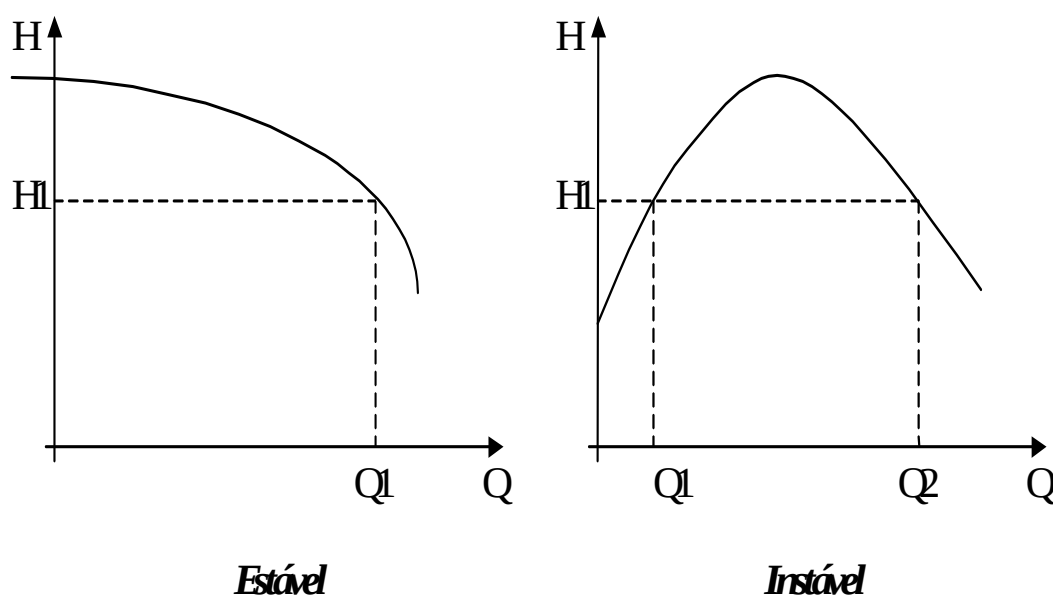


Figura 03 - Curvas características das bombas hidráulicas.

3.5 Medidas de pressão e vazão

3.5.1 Medidas de pressão

Segundo Sighieri & Nishinari (1977), “pressão” é a relação entre uma força e a superfície sobre a qual ela atua.

Segundo Zoerb (1991), pressão é a força por unidade de área exercida por um gás, líquido ou sólido.

Normalmente a pressão é medida em relação à pressão atmosférica (P_{atm}) existente no local. Pode ser medida como pressão absoluta (P_{abs}), pressão manométrica (P_{man}) ou pressão efetiva.

A pressão absoluta é a pressão positiva a partir do vácuo perfeito, ou seja, a soma da pressão atmosférica do local e a pressão manométrica, conforme Equação 13:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man} \quad (13)$$

Onde :

P_{Abs} = Pressão absoluta.

P_{atm} = Pressão atmosférica local.

P_{man} = Pressão manométrica

Vácuo ou depressão pode ser definido como um espaço gasoso onde a pressão está abaixo da atmosférica, de acordo com a Equação 14:

$$V = P_{atm} - P_{man} \quad (14)$$

Onde:

V = Vácuo ou depressão

P_{atm} = Pressão atmosférica local.

P_{man} = Pressão manométrica

Correspondendo ao tipo de pressão a que se destina a medição, existem três categorias de medidores de pressão:

- I - Medidores de pressão absoluta,
- II - Medidores de pressão efetiva,
- III - Medidores de pressão diferencial.

3.5.1.1 Elementos de medição de pressão

Segundo Sighieri & Nishinari (1977), os dispositivos utilizados nas tomadas de impulso (medição de pressão), podem ser classificados de acordo com seu princípio de funcionamento:

I - Por equilíbrio de uma pressão desconhecida contra força conhecida:

- a) Colunas de líquido,
- b) Campânula,
- c) D/p cell.

II - Por meio de deformação de um material elástico:

- a) Tubo de Bourdon,
- b) Membrana,
- c) Fole.

III - Por meio de uma variação de uma propriedade física:

- a) Strain gage,
- b) Material piezoresistivo.

3.5.1.2 Tubo de Bourdon

Segundo Zoerb (1991), o tubo de Bourdon, é um dos mais comuns elementos de medição de pressão. É formado por um tubo metálico de secção transversal elíptica que tende a tornar-se circular quando uma pressão interna é aplicada.

Segundo Sighieri & Nishinari (1977), o do tipo C é para uso geral até 1000 kg/cm^2 . O tipo espiral é para pressão entre 1 e 15 kg/cm^2 e o tipohelicoidal é para pressões acima de 15 kg/cm^2 . Os tipos espiral e helicoidal são para manômetros de maior precisão.

3.5.1.3 Sensor de pressão piezoresistivo

Segundo Zoerb (1991), durante os anos 80, os sensores constituídos com base no silício foram substituindo os outros tipos em diversas aplicações. Apresenta várias vantagens como maior elasticidade, menor fadiga e custo, porque pode ser feito com o mesmo material e a mesma técnica empregada em circuitos integrados. Entretanto são mais sensíveis à variação de temperatura necessitando de circuitos de compensação.

O sensor de pressão piezoresistivo consiste de um diafragma de silício no qual é difundido (difusão) resistores.

Fisicamente os resistores fazem parte de um diafragma mas eletricamente funcionam como strain-gages.

3.5.1.4 Transdutor de pressão

Um transdutor pode ser definido como um dispositivo eletro-mecânico que produz uma saída proporcional ao fenômeno, como uma pressão a ser medida. Converte

uma forma de energia em uma corrente ou voltagem elétrica proporcional. Geralmente manômetros para líquidos, tubos de Bourdon ou outro meio mecânico de medição são usados quando uma “pressão estática” está sendo medida. Nos casos de uma pressão dinâmica, ou de leituras remotas, é necessário o uso de transdutores associados a equipamentos eletrônicos.

3.5.2 Medidas de vazão

Segundo Sighieri & Nishinari (1977), a vazão é a quantidade do fluxo em relação ao tempo.

A medição de vazão é a única que deve ser feita com fluído em movimento, ao passo que as outras medições, como pressão e temperatura podem ser feitas com o fluído estático. Para se medir vazão, na maioria dos casos, deve-se colocar algum obstáculo ao fluxo na tubulação, o que irá provocar perturbação no mesmo, causando perdas de carga.

Existem três tipos fundamentais de medidores de vazão:

I - Diretos, Indiretos, Especiais.

I - Medidores indiretos:

a) Orifício, Bocal, Venturi, Dall, Pitot, Cotovelo especial,

b) Rotânero, Vertedor, Calha de Parshall.

II - Medidores diretos:

a) Disco mutante, Pistão flutuante, Rodas ovais, Roots, Hélice e Turbina.

III - Medidores especiais:

a) Eletromagnético, Ultra-sônico, Mass-flow, Fio-quente.

3.6 Acionamento de motores de indução

3.6.1 Controle de rotação por regulação de tensão

Segundo Lander (1988), é possível algum ajuste de rotação no motor de indução em gaiola pela redução da tensão no estator com um conseqüente aumento no escorregamento. Podem ser utilizados tiristores, onde o controle do ângulo de disparo alteram a tensão reduzindo o valor eficaz total sobre o motor, conforme a Figura 04.

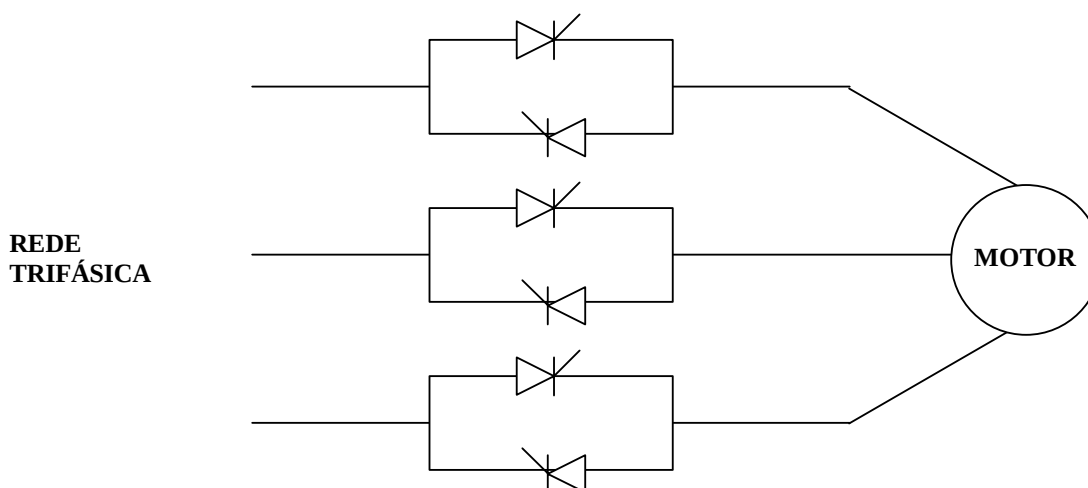


Figura 04 - Controle de rotação por regulação de tensão.

Essa forma de ajuste de rotação deve ser utilizada somente em cargas onde o aumento da rotação não necessita de um torque constante, como em ventiladores.

Sabe-se que os motores elétricos são equipamentos que, dentro de certos limites técnicos fornecem a quantidade de energia mecânica demandada em função da condição de carga (Fitzgerald et al. 1977; Dorf, 1993) isto significa que o rendimento do motor poderá ser insatisfatório, o que ocorre quando a carga demandada é muito inferior a

potência nominal nesse caso o uso de força motriz poderá ser racionalizado por meio do dimensionamento adequado dos motores elétricos, do uso de motores eficientes e, ou do uso de inversores de frequência que são dispositivos da eletrônica de potência, que permite mudar, dentre outras variáveis, a frequência de alimentação de determinada carga elétrica, numa faixa de variação de 1,5 a 400Hz, YASKAWA e EBERLE (1997). Os inversores ajustam a frequência de motores elétricos de modo a manter, no mínimo, o rendimento nominal, isto é, o rendimento do motor para a condição de 100% da carga nominal, Hanson ; Weigand & Orloff (1996). Esta característica, portanto, faz dos inversores de frequência um dispositivo com grande potencial para conservação de energia elétrica por meio do controle da frequência de alimentação de motores adequados a mesma solicitação de carga.

Os inversores de frequência apresentam outras vantagens, como: (i) controle do tempo de aceleração, e conseqüentemente da corrente de partida (que pode corresponder entre 0,8 a 1,5 vezes a corrente nominal do motor) e (ii) baixo consumo de potência reativa, e outras. O baixo consumo de potência reativa em diminuição da demanda em kVA, ao elevar o fator de potência para um valor maior que o mínimo exigido pelas concessionárias de energia elétrica, podendo atingir valores próximos a 1,00.

3.6.2 Controle de rotação com o uso de inversores

Segundo Fingini (1982), os inversores estáticos podem ser empregados para a alimentação de motores assíncronos, geralmente trifásicos essencialmente em três casos: alimentação de emergência, por meio de baterias; alimentação de motores que devem funcionar a frequências diferentes da rede, alimentação de motores assíncronos a fim de regular sua rotação.

Em todas estas aplicações, em geral, são empregados motores trifásicos, é necessário, portanto prever inversores trifásicos onde seja exigida a variação de rotação à frequência e tensão variáveis.

3.6.3 Inversores trifásicos

Segundo Fingini (1982), os inversores trifásicos podem ser executados reagrupando-se três inversores monofásicos, ou realizando-se diretamente uma ligação trifásica.

3.6.4 Acionamento a frequência fixa

Segundo Fingini (1982), os acionamentos a frequência fixa se compõem de um conversor trifásico CA/CA, ou seja, de um grupo retificador e de um inversor. Deve-se considerar que os motores assíncronos apresentam uma corrente de partida 5 a 6 vezes a corrente nominal. Portanto, o inversor deve ser dimensionado para fornecer a corrente em questão, Figura 05.

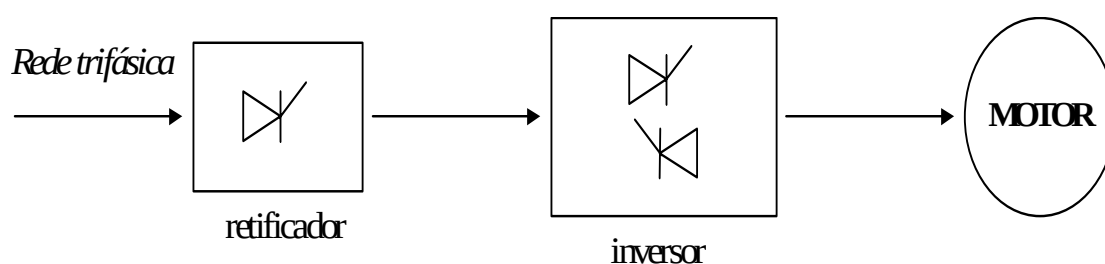


Figura 05 - Acionamento a frequência vertical.

Segundo Fingini (1982), nos acionamentos a frequência variável existe o problema de se regular a tensão proporcionalmente à frequência de saída.

Segundo Lander (1988), em um projeto de acionamento de motores de indução deve-se levar em conta a relação tensão / frequência para a manutenção do fluxo no estator.

Em baixas frequências, a tensão no estator deverá ser um pouco acrescida para manter o fluxo constante, levando em conta a perda na impedância do mesmo.

Essa regulação pode ser efetuada das seguintes maneiras:

1. regulando o valor da tensão contínua,
2. pulsando uma tensão contínua,
3. parcializando a tensão alternada,
4. ligando-se na saída um autotransformador de relação variável.

3.6.5 Acionamento por inversor a corrente constante

Segundo Lander (1988), este tipo de acionamento é ideal para aplicações em que uma mudança de torque violenta deve ser evitada. Se houver um curto-circuito em um dos terminais do motor, o circuito inversor não será danificado, pela limitação de corrente.

3.6.6 Acionamento por meio de cicloconversores

Segundo Fingini (1982), este tipo de acionamento é empregado, especialmente para acionar motores assíncronos de grande potência com frequências relativamente baixas.

Consta de um inversor que fornece uma tensão alternada em onda quadrada, com frequência cerca de 10 vezes superior aquela que se quer obter, três conversores monofásicos reversíveis que modulam a tensão alternada conforme a frequência

que se quer obter na saída, uma harmônica fundamental na frequência que se deseja para os motores.

Segundo Lander (1988), a técnica de aplicação de cicloconversor é atraente pelo fato de existir a capacidade de regeneração e operação em quatro quadrantes, mas por outro lado, é de custo muito elevado pelo número de tiristores e pelo complexo circuito de disparo usado.

3.6.7 Acionamento com inversor transistorizado

Segundo Lander (1988), é possível a utilização de transmissores para o acionamento de motores de corrente alternada.

Os transmissores podem ser chaveados de maneira a gerar uma onda próxima a quadrada ou modulação por largura de pulso (PWM).

3.6.8 Inversores escalares e inversores vetoriais

3.6.8.1 Inversores escalares

Segundo Di Grazia (1998), grande parte das aplicações de inversores de frequência, como bombas e ventiladores, necessitam apenas de variação de rotação e partidas suaves, sendo atendidas plenamente com o uso de inversores com tecnologia escalar ou tensão / frequência.

Algumas outras aplicações como elevadores, guinchos, bobinadeiras, necessitam, além do controle de rotação o controle do torque, operações em baixíssimas rotações e alta rotação de resposta, sendo atendidas com inversores de tecnologia vetorial de tensão ou de fluxo.

Os inversores escalares produzem uma saída trifásica com tensão (V) e frequência (f) variáveis de acordo com uma curva (V/f) pré definidas. Dependendo do fabricante, o inversor pode possuir diversas curvas tensão / frequência destinadas às aplicações como bombas e ventiladores. Em linha geral, podemos dizer que os inversores escalares são fontes de alimentação com valores de tensão / frequência pré determinados dentro de toda a faixa de variação de rotação. Considerando-se que o torque no eixo do motor é proporcional à relação tensão / frequência, os inversores escalares irão disponibilizar ao motor torques pré definidos, não compensando as necessidades de torque adicionais requeridos por determinadas cargas.

Segundo Masiero (1999), em suas conclusões apresentadas no trabalho sobre o uso de inversores de frequência em sistemas de irrigação por pivô central instalados em terrenos com declividade de 5 a 15%, é economicamente viável, o número de horas de funcionamento anual, a tarifa de energia, o custo inicial do inversor de frequência, o custo de energia acima da inflação e a taxa de juros são os principais parâmetros técnicos – econômicos que poderão decidir se é viável investir em tal sistema .

Durante a simulação, observou-se alguns parâmetros de projeto que não foram lineares, como por exemplo : (i) raio do pivô central; (ii) declividade do terreno; (iii) a relação altura manométrica e vazão fatos observados devido à não uniformidades de potências disponíveis no mercado de motores elétricos e modelos de bombas centrífugas, bem como à grande variação de rendimentos destas bombas em sistemas que operam com carga variável (altura manométrica) portanto conclui-se que a viabilidade econômica do sistema de irrigação com o inversor de frequência é em função das características de projeto e das variações desta ao longo do perfil irrigado, sendo necessário

análise econômica de cada projeto, a fim de auxiliar na tomada de decisão , ressaltando que os resultados são simulados para sistema de irrigação por pivô central, corretamente dimensionados.

Masiero (1999), sugere a aplicação de inversores de frequência em outros tipos de sistemas de irrigação e de bombeamento de água , que apresentam viabilidade ainda maior em sistemas de irrigação por aspersão , apesar do custo inicial do inversor é necessário considerar que economizar energia é um benefício social, principalmente em períodos de menor oferta de energia, isto é período seco .

3.6.9 Inversores vetoriais de fluxo

Segundo Di Grazia (1998), os inversores vetoriais de fluxo produzem uma saída trifásica com tensão (V) e frequência (f) controladas independentemente, não seguindo a curva V/f pré fixada.

Mantendo o fluxo magnético do motor constante e controlada diretamente, o torque do eixo do motor controlando-se a corrente rotórica do mesmo. Os inversores vetoriais são mais complexos que os inversores escalares necessitam maior capacidade de processamento e da programação de todos os parâmetros do motor.

Os inversores escalares são utilizados para acionamento de bombas, ventiladores, e outras máquinas de fluxo.

Os inversores vetoriais são utilizados em elevadores, pórticos, laminadores etc. A Figura 06 apresenta as curvas características desses inversores.

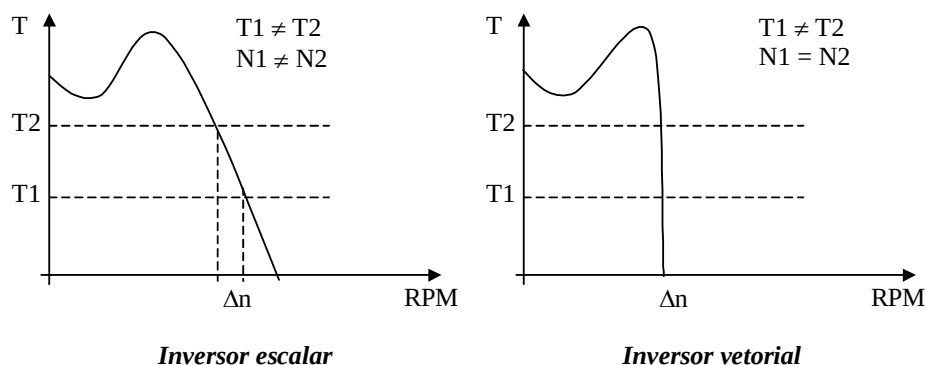


Figura 06 - Curva característica dos inversores escalar e vetorial.

3.7 Acionamentos com rotação controlada para bombeamento

É usual encontrar motores elétricos em condições operacionais que favorecem o desperdício de energia. O conjunto motobomba ou motoventilador, tradicionalmente, opera com a rotação nominal fixa. E a válvula de controle, dimensionada para uma capacidade de vazão em média 40% a 68% superior à vazão máxima do processo, normalmente opera entreaberta, restringindo ou circulando o fluxo para determinar as condições operacionais desejadas.

Os acionadores eletrônicos têm revolucionado o uso da eletricidade como força motriz. O primeiro impacto surgiu com substituição do sistema ward-leonard de controle de rotação de motores de corrente contínua pelo retificador a SCRs. No entanto, o maior impacto se deu com o aparecimento dos semicondutores de última geração, que têm permitido a construção de conversores eletrônicos de tensão e frequência com melhores desempenho.

O motor síncrono e o de indução deixaram de ser motores de rotação fixa e passaram a poder operar com rotação variável, viabilizando o controle final da vazão de fluxo por meio do motocompressor, da ou do motoventilador, em substituição à válvulas de controle.

A utilização de acionadores eletrônicos de frequência variável, em substituição à válvula de controle, apresenta um potencial médio teórico de conservação de energia da ordem 30%, segundo Alves (1989). E adquiriu viabilidade técnico-econômica devido aos recentes avanços em dispositivos semicondutores de potência como o transistor bipolar de porta-gatilho isolada (IGBT), aplicado no estágio inversor dos conversores eletrônicos de frequência CA-CA com elevadas frequências de chaveamento, para modulação por largura de pulso (PWM),

Os primeiros estudos sobre a viabilidade de aplicação de conservadores eletrônicos de frequência na Petrobras foram iniciados na década de 80. Após a realização de vários testes, eles vêm sendo utilizados progressivamente, com diversos objetivos e funções que vão além do uso racional de energia elétrica. Atualmente, o conversor eletrônico frequência mais utilizado em baixa e média potência é o VSI PWM, devido a razões técnico-econômicas

A Petrobras, o Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e a UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro iniciaram em março de 1994 um projeto, financiado parcialmente pelo Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica e pela Eletrobrás, para determinar a conservação de energia que poderia ser obtida em instalações petroquímicas com aplicação da tecnologia dos conversores eletrônicos de frequência, apresentado por Américo (1995).

Salazar (1999), descreve, a implementação de duas aplicações de acionadores eletrônicos de rotação variável VSI PWM: o primeiro, de potência nominal de 55 KW e, o segundo, de 45 KW, em substituição à válvula de controle no processo de bombeamento de petróleo bruto entre duas estações coletoras de produção da Petrobras. Essa duas aplicações aumentaram a eficiência energéticas do processo, a vida útil das s e a integridade física dos oleodutos.

O autor ainda analisou a economia de energia, com a melhora do fator de potência e de carga, e substituição das válvulas de controle de vazão pela variação direta da rotação de rotação dos motores elétricos. Essas são algumas vantagens obtidas pela Petrobras com a aplicação de conversores de frequência no controle automático de bombas, ventiladores e compressores em duas estações coletoras de petróleo bruto.

3.7.1 Fundamentos teóricos

3.7.1.1 Conversão eletrônica da frequência

Um acionador eletrônico de frequência variável é um equipamento destinado à variação de rotação, controle e proteção de motores elétricos de indução. Existem três tipos básicos de conversores eletrônicos de frequência, que se diferem pelo modelo de controle :

- CSI - inversor de corrente imposta;
- VSI PAM - inversor de tensão com modulação por amplitude de pulsos; e
- VSI PWM - inversor de tensão com modulação por largura de pulsos.

Um conversor VSI PWM é composto por uma ponte trifásica de entrada não controlada, de seis ou 12 diodos, que retifica a tensão trifásica da rede e alimenta um barramento intermediário chamado circuito intermediário de corrente contínua. Nesse circuito, existe um filtro LC ou RC passa-baixas que, além de filtrar as ondulações (ripple) do sinal de tensão que vêm do estágio retificador, também protege a rede contra harmônicos gerados pelo estágio inversor.

O circuito intermediário de corrente contínua alimenta com tensão fixa a ponte inversora VSI que, por meio de um controle chamado modulação por largura de pulsos (PWM), entrega uma tensão PWM trifásica com valor eficaz variável, proporcional linearmente à sua frequência. A Figura 07 ilustra o diagrama simplificado de blocos de um conversor eletrônico de frequência VSI PWM em malha de controle externa aberta.

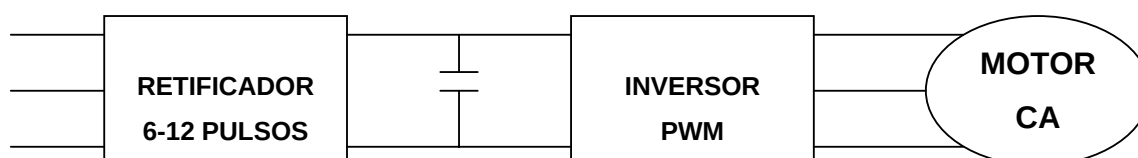


Figura 07 – Diagrama simplificado de blocos de um conversor VSI PWM.

O princípio de controle utilizado pelos conversores eletrônicos de frequência VSI - PWM baseia-se na necessidade de variar a rotação dos motores sem que o torque seja comprometido. Para tanto, basta assegurar que o fluxo magnético girante: produzido no interior da máquina de indução mantenha-se constante, independentemente da frequência.

Por meio de modelos matemáticos aplicados às máquinas de indução, prova-se que o fluxo magnético depende da relação entre a tensão e frequência que alimentam o estator, (Bose, 1997). Como o torque é obtido a partir da interação magnética do fluxo com a corrente rotórica (dependente da carga), podemos afirmar que, para que uma determinada carga mantenha o torque constante, basta manter a relação tensão e frequência constante. Entretanto, em baixa frequência, o fluxo magnético no air-gap é reduzido, devido à redução da impedância do estator. e a tensão deve ser aumentada para manter o torque nominal. Esse tipo de controle é conhecido como volts/hertz.

O controle em malha fechada é normalmente requerido para satisfazer as especificações de desempenho em regime permanente e transitório dos acionadores eletrônicos CA/CA. As estratégias de controle podem ser a escalar, a vetorial ou a adaptativa :

- no controle escalar, apenas as amplitudes das variáveis são controladas;
- no controle vetorial, as amplitudes e fases das variáveis são controladas; e
- no controle adaptativo, os parâmetros do controlador são continuamente autoajustados, adaptando-se às variações do sistema.

O sistema de controle é geralmente caracterizado por uma hierarquia de controle, em que os elos externos controlam os internos. Assim, numa aplicação de controle do nível de um líquido em um vaso de pressão, o elo externo é originado no transmissor de nível e, após a comparação com a referência de nível no controlador proporcional -integral -derivativo (PID), o sinal de correção passa a ser a referência de frequência para os elos de controle interno, volts/hertz constante, do inversor VSI PWM.

3.7.1.2 Efeitos da modulação PWM

O modulador por largura de pulso(PWM) é um circuito que transforma um sinal contínuo em pulsos. Esses pulsos devem representar o nível de corrente contínua do sinal mais suas variações no tempo. Os pulsos possuem frequência fixa e as suas larguras variam conforme o sinal de entrada e de referência. É necessário que exista uma relação entre o sinal de entrada e os pulsos.

Usando um transistor (IGBT) estaremos limitados a 30 kHz, com 400 A e 1200 V. Para a construção de inversores que usam a técnica da eliminação de harmônicos, são usados circuitos com microprocessadores para gerar a comutação em tempo real. Mesmo os microprocessadores mais rápidos não possuem tempo disponível para resolver esse sistema a cada ciclo.

A razão de modulação de frequência (mf) é a razão entre a frequência de comutação e a frequência do sinal senoidal fundamental de saída. Com o aumento de (mf), muitos harmônicos podem ser eliminados e um filtro LC pode ser usado com vistas a obter uma onda senoidal para o estator do motor elétrico.

Quando o acionador está operando em condições de vazio, a tensão intermediária de corrente contínua (V_d), que é aproximadamente $1,41 V_{rede}$, é comutada pelo estágio inversor gerando um trem de pulsos. Esses pulsos de tensão na saída são propagados como onda ao longo do cabo, com impedância característica Z_c , e são refletidos nos terminais do motor elétrico devido a uma maior impedância característica do motor $Z_m \gg Z_c$.

O valor da tensão nos terminais do motor V_m é máximo se o tempo de subida dos pulsos de tensão for menor que o dobro do tempo de propagação da onda de tensão

entre o inversor e o motor. Esse valor máximo da tensão nos terminais do motor é dimensionado pela Equação 15, dada por:

$$V_m = r \cdot V_d \quad (15)$$

onde o fator de reflexão

$$r = 2 \cdot Z_m / (Z_m + Z_c) \quad (16)$$

Para cabos longos, a tensão nos terminais do motor é quase duas vezes a tensão intermediária V_d . Em princípio, a isolação do motor está sujeita ao mesmo efeito de uma sobretensão de chaveamento ou de descarga atmosférica. São diferenciados três tipos de fadiga: fadiga de isolação de fase, fadiga de isolação principal e fadiga de isolação do enrolamento.

3.7.1.3 Efeito das harmônicas

Por se tratar de acionamento não-linear, o conversor eletrônico de frequência comporta-se como fonte que injeta correntes harmônicas no sistema elétrico, distorcendo a forma de onda senoidal de frequência fundamental igual a 60 Hz, (Antipoff, 1992).

Essas correntes elétricas distorcidas, fluindo através das impedâncias, produzem formas de onda de tensão também distorcidas; no sistema elétrico, embora essas formas de onda de tensão sejam muito menos distorcidas que as das correntes elétricas.

As ordens de harmônicas teóricas possíveis de serem geradas por um conversor eletrônico a semicondutor são dadas pela Equação 17:

$$h = k \cdot q \pm 1 \quad (17)$$

onde:

h = ordem da harmônica;

k = número inteiro { 1, 2, 3, 4, }; e

q = número de pulsos do estágio retificador.

Num conversor eletrônico de frequência com retificador de seis pulsos, as harmônicas características são as harmônicas ímpares não múltiplas de três: por exemplo: 5ª ordem, 7ª ordem, 11ª ordem e 13ª ordem. As amplitudes teóricas por unidade das correntes elétricas harmônicas produzidas por um conversor eletrônico são iguais ao inverso da ordem harmônica h . Em outras palavras, a da 5ª ordem é 0,20 pu e a da 7ª ordem é 0,14 pu. Esses são os valores para uma forma de onda quadrada ideal.

A capacitância dos cabos, transformadores e redes de distribuição nos sistemas elétricos industriais normalmente é pequena. Essa capacitância, em associação com os valores em regime das indutâncias dos transformadores, cabos e redes de distribuição é ressonante em frequências muito altas, da ordem de kHz.

Entretanto, quando a compensação de potência reativa, implementada com capacitores para melhoria do fator de potência, é usada com esses conversores eletrônicos de frequência, condições de ressonância podem ocorrer e resultar em elevados níveis de distorção harmônica de corrente e de tensão - caso a condição de ressonância acontecer em uma harmônica associada às cargas não-lineares.

A ordem da harmônica de ressonância de um sistema elétrico, com relação à frequência fundamental de 60 Hz. pode ser determinada a partir da Equação 18.

$$h_R = (MV_{Acc}/MV_{Arc})^{1/2} \quad (18)$$

onde:

h_R = ordem da harmônica ressonante;

MVA_{cc} = potência de curto-circuito. e MVA_{arc} = potência do banco de capacitores.

Há elevada probabilidade de efeitos indesejados com a injeção de harmônicas quando, simultaneamente, a frequência de ressonância do sistema elétrico coincidir ou estiver próxima da frequência das correntes injetadas pelo conversor eletrônico e a relação de curto-circuito (RCC) for menor que 20, sendo:

$$RCC = MVA_{cc}/M_w \text{ conversor} \quad (19)$$

O dimensionamento dos efeitos das harmônicas nos vários elementos de um sistema elétrico de potência e as suas tolerâncias estão especificados na norma IEEE 519 de 1992. Os requisitos para interligação com o motor de indução dotado de rotor curto-circuitado tipo gaiola de esquilo são determinados na publicação Nema n-º MG 1.

3.8 Automação

Oliveira (1993), descreve o crescente desenvolvimento das atividades relacionadas com controladores lógicos programáveis (CLP) nos dias atuais, o que não era comum nos anos anteriores, abordando parâmetros que estão presentes na automação de indústria e empregando as técnicas e conceitos de programação detalhados.

Segundo Hernandez (1987), com os equipamentos existentes atualmente no mercado, consegue-se diversos níveis de automação com o uso de microprocessadores ou uma programação automática na irrigação. A seleção do nível de automatismo correto para cada caso, deve ser baseada em critérios técnicos, econômicos e preferenciais do agricultor.

Pizzaro (1990), cita as vantagens da automação para cada área agrícola da irrigação:

- Melhor administração da propriedade ou projeto agrícola;
- Economia de mão-de-obra, de água, de energia e de fertilizantes;
- Economia no custo de funcionamento, consumindo energia elétrica nas horas de menor custo;
- Permite programar a irrigação em função da umidade do solo, temperatura do ar, evapotranspiração e vento.

Dodi (1990), construíram um sistema coletor automático para ensaio de microaspersores, utilizando transdutores em substituição aos coletores adicionais. Estes transdutores, quando alimentados por um circuito oscilador, geram um sinal elétrico proporcional a grandeza medida (nível do líquido). O sinal fornecido a um sistema de aquisição de dados a partir do interfaceamento A/D (analógico/digital), possibilita a avaliação do perfil de distribuição, bem como a uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação, como em qualquer outro sistema que necessite da leitura da lâmina d'água.

Em 1987, o Ministério da Indústria e do Comércio em conjunto com o Secretaria de Tecnologia da Indústria (STI), financiou um projeto desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Rural e pelo Centro de Informática na Agricultura da USP de Piracicaba, desenvolvendo um microcomputador dedicado à aquisição de dados em campo para máquinas agrícolas.

Seguindo os exemplos de Spiess (1983) e Fisher & Wallender (1988), Seginer et al. (1992), construíram um sistema composto de tanque de água e bomba de pressão alimentando continuamente um aspersor, cuja precipitação era recolhida em um conjunto de

receptores interligados a um transdutor de pressão. As leituras e acionamento das válvulas solenóides eram controladas por um computador, o que permitia análise contínua da precipitação.

Campos (1985), cita que na indústria, o computador e o microprocessador estão sendo empregados para facilitar e melhorar os serviços, reduzir gastos e aumentar a produção. A automação visa o controle da máquina, isto é, ligá-la, desligá-la, movimentá-la, sinalizar defeitos e até gerar relatórios operacionais, mas sempre atrás dessas operações está o microcomputador.

Oliveira (1993), descreve uma linha de produção simplificada, onde se tem a entrada de matéria-prima e a saída do produto final acabado. Existem três etapas de produção entre a entrada e a saída do produto, sendo o transporte da matéria-prima realizado por uma correia transportadora, acionada por um motor elétrico, sem o controle do CLP (Controlador lógico Programável).

Segundo o Manual Siemens (1980), a micro-eletrônica invade os setores produtivos das indústrias, propiciando a automação. O processo de automação não atinge apenas a produção em si, substituindo o trabalho braçal por robôs e máquinas com comando numérico computadorizado, mas permite enormes ganhos de produtividade, ao integrar tarefas distintas com a elaboração de projetos, o gerenciamento administrativo e a manufatura.

Allen Bradley (1985), cita em seu manual que na automação, o uso real baseado nos exemplos de programação. Alguns itens que devem ser avaliados:

- Instalações elétricas compatíveis com os pontos de entrada/saída;
- Chaves de proteção no Hardware;

- Tipos e formas de endereçamento;
- Estrutura da palavra;
- Tipos e formas de sinais aceitáveis;
- Compatibilidade dos equipamentos eletro-mecânicos.

Natale (1995), cita que o controle de processos industriais ou automação da manufatura é , sem dúvida, uma das aplicações de maior impacto, onde se alcançou o maior sucesso com os microprocessadores. O controlador lógico programável pode ao mesmo tempo automatizar uma grande quantidade de informações, substituindo assim o homem com mais precisão, confiabilidade, custo e rapidez.

As variáveis de entrada do controlador lógico programável ou variáveis controladas do sistema informam em cada instante as condições do processo. Isso é feito por um deslocamento mecânico, posição de uma haste fim-de-curso, temperatura de um termostato, pressão, etc., que dão entrada no controlador lógico programável através de um nível lógico binário (ou zero ou um) ou nível de sinal analógico. Segundo o programa armazenado na memória do controlador que atua sobre o processo através de suas saídas, acionando reles, controladores, válvulas, etc., realizando desde uma simples operação mecânica em uma máquina-ferramenta até o controle total de uma linha de montagem industrial.

Sistemas desse tipo são ditos de tempo real, ou seja, as informações de entrada são analisadas, as decisões tomadas, os comandos ou acionamentos são enviados as saídas, tudo concomitantemente com o desenrolar do processo. Nos sistemas de tempo real, portanto, o computador trabalha em paralelo com o sistema ou processo, controlando, processando e acionando.

Segundo Natale (1995) devemos lembrar que o trabalho de automação industrial era antigamente realizado por meio de circuitos e reles acionadores. A partir dos desenhos representativos dos controles industriais, eram elaboradas listas de trabalho e posteriormente eram montados em armários elétricos todos esses comandos. Assim, quando era necessário efetuar uma modificação no comando, por qualquer motivo, isso implicava em um rearranjo na montagem, via de regra cansativa, demorada e dispendiosa. Para quem não tem uma idéia do que era o processo, uma modificação às vezes implicava em uma nos armários elétricos. As substituições das peças em caso de manutenção de montagem, tornavam-se difíceis, quando não impossíveis.

3.8.1 Caracterização de um sistema de controle

De acordo com Distefano et al. (1978), um sistema de controle é uma disposição de componente físicos, conectados ou relacionados de tal maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas.

Estímulo, ou excitação, aplicado a um sistema é conhecido como entrada, e a resposta obtida de um sistema de controle é chamado de saída.

Os sistemas de controle podem ter mais do que uma entrada ou saída.

Definem-se, também, três tipos básicos de sistemas de controle:

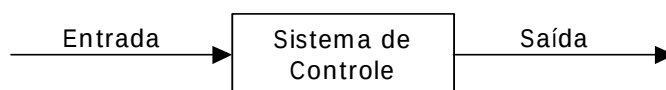
1. Sistema de controle artificiais.
2. Sistema de controle naturais.
3. Sistema de controle naturais-artificiais.

Nos sistemas artificiais não há a interferência humana no controle. Em sistemas naturais-artificiais há uma interação entre o homem e o equipamento de controle. Nos sistemas naturais o controle é conseguido através da ação exclusivamente humana.

Classificam-se, também, os sistemas de controle em sistemas de (A) malha aberta e sistemas de (B) malha fechada, dados pelos diagramas da Figura 08.

No sistema de malha aberta, a ação de controle é independente da saída. No sistema de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da saída.

A)



B)

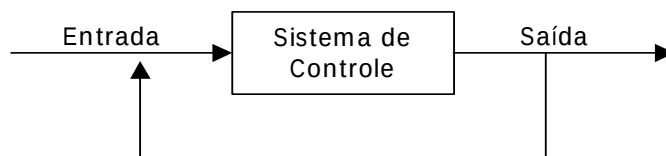


Figura 08 - A) Sistema de controle de malha aberta, B) Sistema de controle de malha fechada.

De acordo com Bolton (1985), num sistema de controle de malha fechada há uma entrada de referência para o elemento de controle. Há uma malha de realimentação, a partir da saída para a entrada do elemento de controle. A diferença entre o sinal de controle e o sinal da malha de realimentação é chamada de sinal de erro, mostrado na Figura 09.

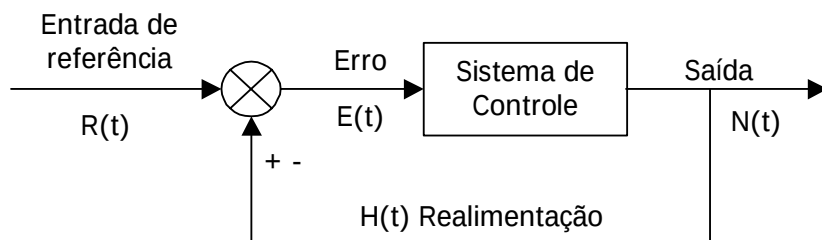


Figura 09 - Sistema de controle de malha fechada realimentado.

Distefano et al (1978), define sistema de realimentação negativa e sistema de realimentação positiva.

Num sistema de realimentação negativa, o sinal de realimentação é substituído do sinal de referência conforme Equação 20.

$$E(t) = R(t) - H(t) \quad (20)$$

Num sistema de realimentação positiva, o sinal de realimentação é somado ao sinal de referência conforme Equação 21.

$$E(t) = R(t) + H(t) \quad (21)$$

De acordo com Bolton (1985), o objetivo de um sistema de controle é manter uma saída uniforme, constante para uma dada referência de entrada.

Sistema de regulação ON-OFF

A saída $m(t)$ possui apenas dois estados: acionado ou não acionado.

Sistema de regulação proporcional

O sinal de saída é proporcional ao sinal de erro.

Sistema de controle integral

O sinal de saída comporta-se como uma integral do sinal de erro.

Sistema de controle proporcional e integral

O sinal de saída é um sinal proporcional e integral do erro isto é, sofre a ação proporcional e integral do sinal de erro.

Sistema de controle proporcional-integral-derivativo(PID)

É aquele em que a saída é proporcional à integral e à derivada do sinal de erro.

3.8.2 Condicionadores de sinal

Segundo Bolton (1985), condicionador de sinal é o elemento do controle que tem a função de modificar a dimensão e a forma dos sinais para indicação.

Segundo Mitchel (1991), o termo condicionador de sinal descreve uma manipulação proposital de um sinal. Inclui filtragem, amplificação, computação, simulação e circuitos de controle. Os condicionadores de sinal podem ser compostos de dispositivos passivos e ativos. Os passivos são construídos por componentes que só dissipam energia. Os ativos, são componentes que incorporam energia ao circuito.

3.8.3 Sistemas de regulação

Segundo Natale (1996), os reguladores são partes integrantes do controle e se compõem a partir de amplificadores operacionais. A saída de um regulador é função do valor desejado $R(t)$ e o valor atual (informado) $H(t)$, ou seja, a saída varia em função do sinal de erro $E(t)$.

3.8.4 Controlador Lógico Programável (CLP)

Segundo Natale (1995), o CLP consiste em um microcomputador dedicado à realização de tarefas específicas para atender a uma nova necessidade definida em projeto, ou seja, onde existir um sistema a ser controlado ou automatizado, Na Figura 08 observamos um esquema simplificado de controle com Controladores Lógicos programáveis.

3.8.4.1 Partes constituintes de um CLP

O CLP possui um microprocessador que realiza as seguintes funções:

- ⇒ Processamento de programas;
- ⇒ Varreduras das entradas e saídas,

- ⇒ Programação das memórias externas;
- ⇒ Atender a entrada serial quando é colocado o terminal de programação.

Nos controladores programáveis, coloca-se o programa do usuário na memória EPROM, e na RAM cópia do programa e os dados temporários do sistema.

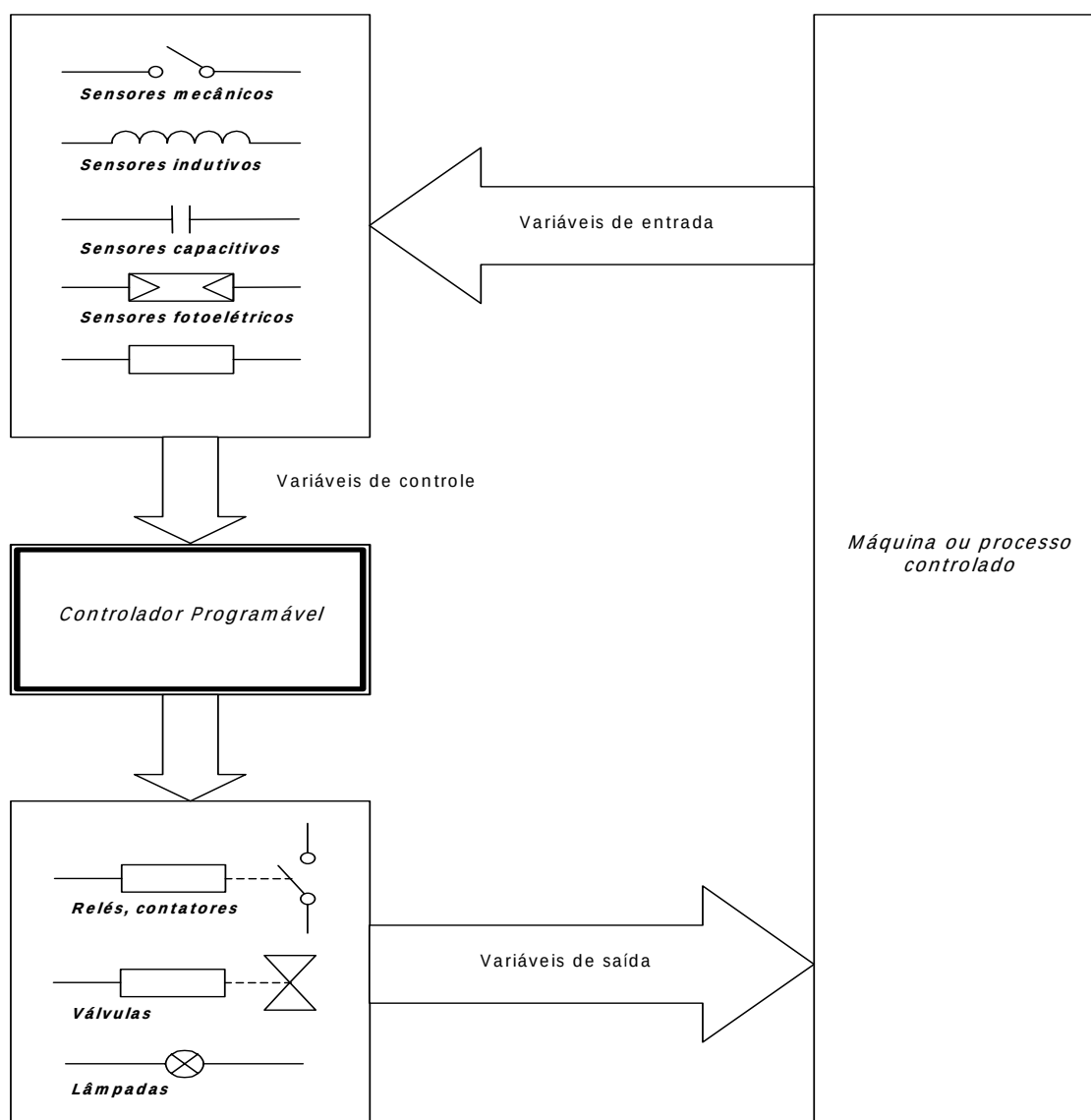


Figura 10 - Esquema simplificado de controle através de CLP (Natale, 1995)

Quando a alimentação é ligada, o controlador é posto em operação, o conteúdo da memória externa (EPROM) é copiado na memória interna RAM e de lá executado juntamente com os dados do sistema ou imagem do processo de entrada e saída.

O controle de processos industriais ou automação da manufatura é uma das aplicações de maior impacto.

Pode ser aplicado na indústria, na agronomia, em sistemas de irrigação ou onde se necessite a automação de sistemas.

3.8.5 Linguagem de programação do CLP.

A linguagem de programação Step 5, foi desenvolvida por várias empresas (WEG, Metal Leve, Siemens, Allen, Bradley, etc.). As instruções mais freqüentemente usadas em um programa em linguagem Step 5 são as instruções “Normalmente Aberto” (N.A.), “Normalmente Fechado” (N.F.) e “Energizar Saída”, conforme ilustra a Figura 11. Estas instruções são representadas na forma de símbolos colocados nas linhas do programa (é por isso que os usuários de CLPs conhecem a descrição da linguagem Step 5 como “simbologia de contato”).

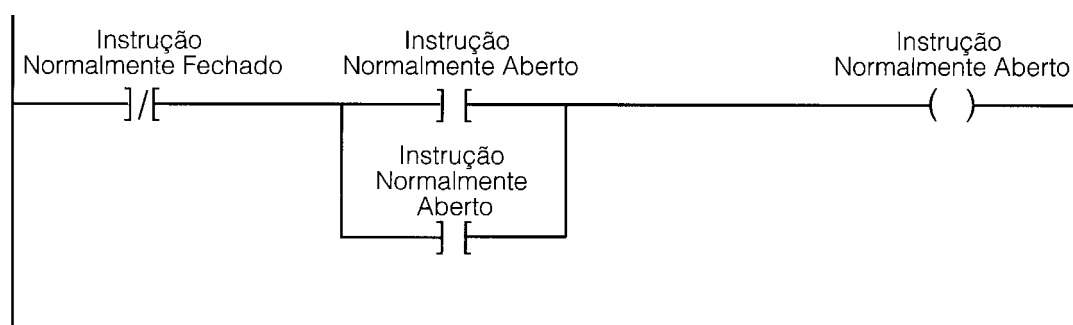


Figura 11 - Instrução Normalmente Aberto - NA e Normalmente Fechado - NF

3.8.6 Características da linguagem Step 5

3.8.6.1 Instrução Normalmente Aberto (NA)

Uma instrução Normalmente Aberto procura um local da memória do CLP onde exista uma condição energizada ou seja, ela verifica se o elemento de memória (bit) correspondente ao endereço da instrução está “Energizado” (binário 1). Se o CLP detecta uma condição Energizado, a instrução é verdadeira e tem continuidade lógica.

Por exemplo, um botão N.A. (BP1) está ligado ao terminal de entrada I/3 no CLP. O programa Step 5 contém a linha seguinte, como mostra a Figura 12.

Quando o botão BP1 é pressionado (On), esse estado energizado (On) é gravado na memória do CLP na posição I/3 da tabela imagem de entrada. Quando se fizer a varredura da linha que contém a instrução N.A. no endereço I/3, esta instrução será identificada como Verdadeira e, portanto, o CLP energizará a saída O/4 durante a varredura de saídas.

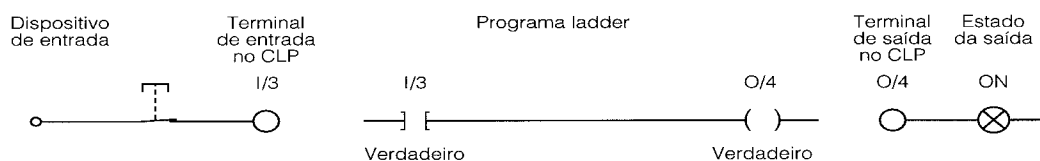


Figura 12 - Instrução normalmente aberto (NA)

Quando o botão é liberado, o estado Off (desenergizado) é gravado no endereço I/3. A instrução N.A. torna-se Falsa e a linha perde a continuidade lógica, mostrada na Figura 13. Durante a varredura das saídas do CLP, a saída O/4 ficará desenergizada.

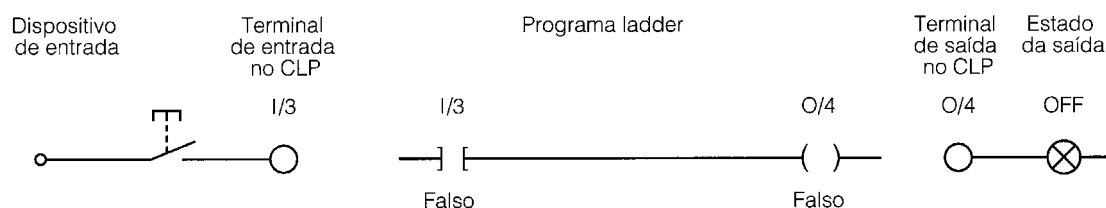


Figura 13 - Instrução normalmente aberto (NA)

3.8.6.2 Instrução Normalmente Fechado (N.F.)

Uma instrução Normalmente Fechado procura um local da memória do CLP onde exista uma condição desenergizada ou seja, ela verifica se o elemento de memória (bit) corresponde ao endereço da instrução está “Desenergizado” (binário 0). Se o CLP detecta uma condição desenergizada, a instrução é Verdadeira e tem continuidade lógica.

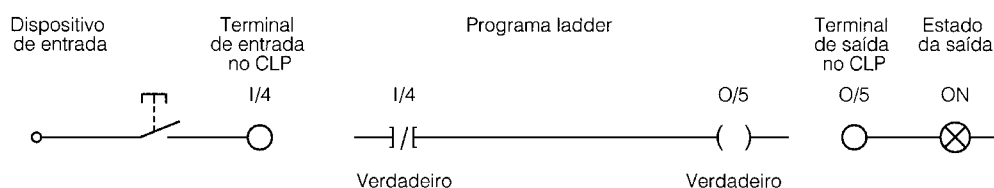


Figura 14 - Instrução normalmente fechado (NF)

Por exemplo, um botão N.F. (PB1) está ligado ao terminal de entrada I/4 no CLP. O programa em Step 5 contém a linha seguinte na Figura 14, onde a entrada I/4 esta programada com uma instrução N.F.

Quando o botão PB1 não está pressionado (Off), esse estado desenergizado fica gravado na memória do CLP na posição I/4 da tabela imagem de entrada. Quando se fizer a varredura da linha que contém a instrução N.F. no endereço I/4, esta

instrução será identificada como Verdadeira e, portanto, o CLP energizará a saída O/5 durante a varredura das saídas do CLP.

Quando o botão é pressionado, o estado On é gravado no endereço I/4. A instrução N.F. torna-se Falsa e a linha perde a continuidade lógica, conforme a Figura 15, e durante a varredura das saídas do CLP, a saída O/5 ficará desenergizada.

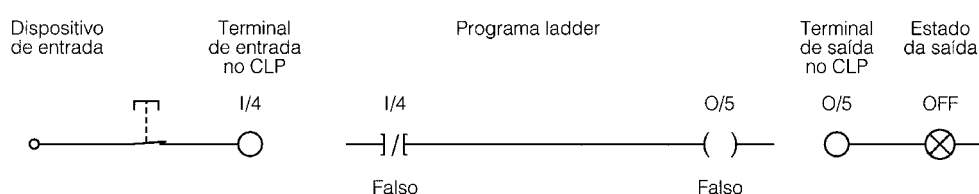


Figura 15 - Instrução normalmente fechado (NF)

3.8.6.3 Instrução energizar saída

Controlada pelas instruções de condição que a precedem em uma linha, a instrução Energizar Saída (OTE) energiza um elemento (bit) na tabela imagem de saída quando as condições da linha são Verdadeiras.

A instrução Energizar Saída equivale, nos diagramas elétricos, a uma bobina de relé.

Quando existe continuidade lógica em uma linha a condição energizada (binário 1) é gravada no local da memória associado instrução Energizar Saída. Se o endereço for o de um dispositivo de saída externo, o CLP energiza a saída durante a varredura de saídas. Se a linha for Falsa, o CLP desenergiza a saída. A instrução Energizar Saída controla dispositivos reais (válvulas solenóides, motores, lâmpadas, etc.) ou elementos (bit) internos.

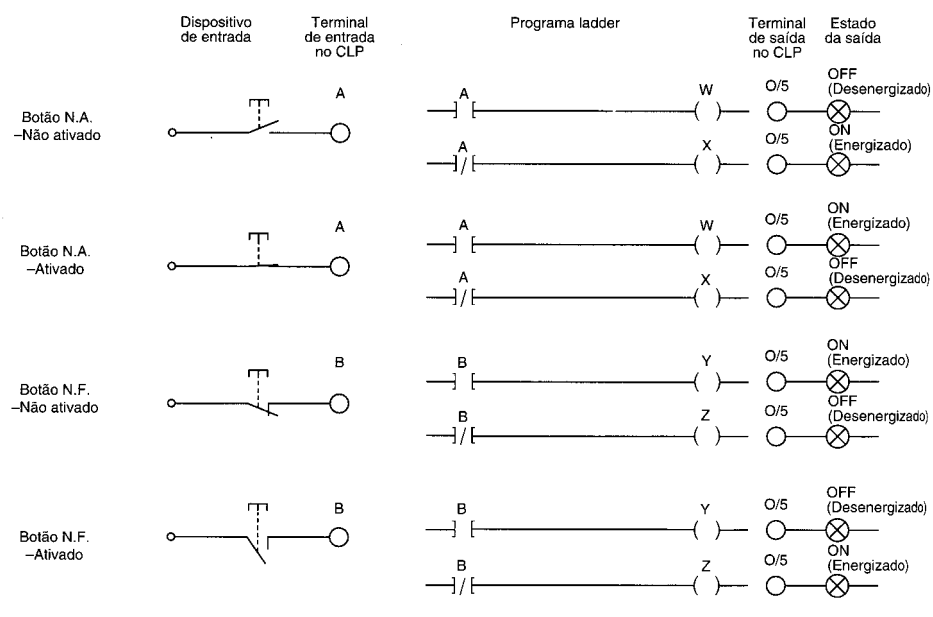


Figura 16 - Exemplo de um Diagrama da Linguagem Step 5.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Sistema Convencional de Irrigação por Aspersão

Para a realização desta pesquisa foi considerado um projeto de sistema de irrigação por aspersão, com acionamento do conjunto motobomba do tipo convencional, elaborado sobre uma área de 18.000 m², com solo predominante de Latossolo Vermelho, com aclividade de 3,5 % , dividida em 10 parcelas, tendo em cada parcela uma linha lateral composta por três aspersores rotativos distribuídos a cada 18 m. A vazão de trabalho de cada aspersor foi definida em 3,45 m³/h e pressão de serviço em 30 mca.

O desenvolvimento do projeto obedeceu as formulações propostas por Hazen & Willams', apresentadas por Bernardo (1995). Os dados de vazão, altura manométrica e potência são fornecidos sobre a curva característica da bomba centrífuga, dimensionada para o sistema de irrigação, apresentados na Figura 17. O Lay out com as características técnicas do projeto estão definidos na Figura 18 e no Quadro 01.

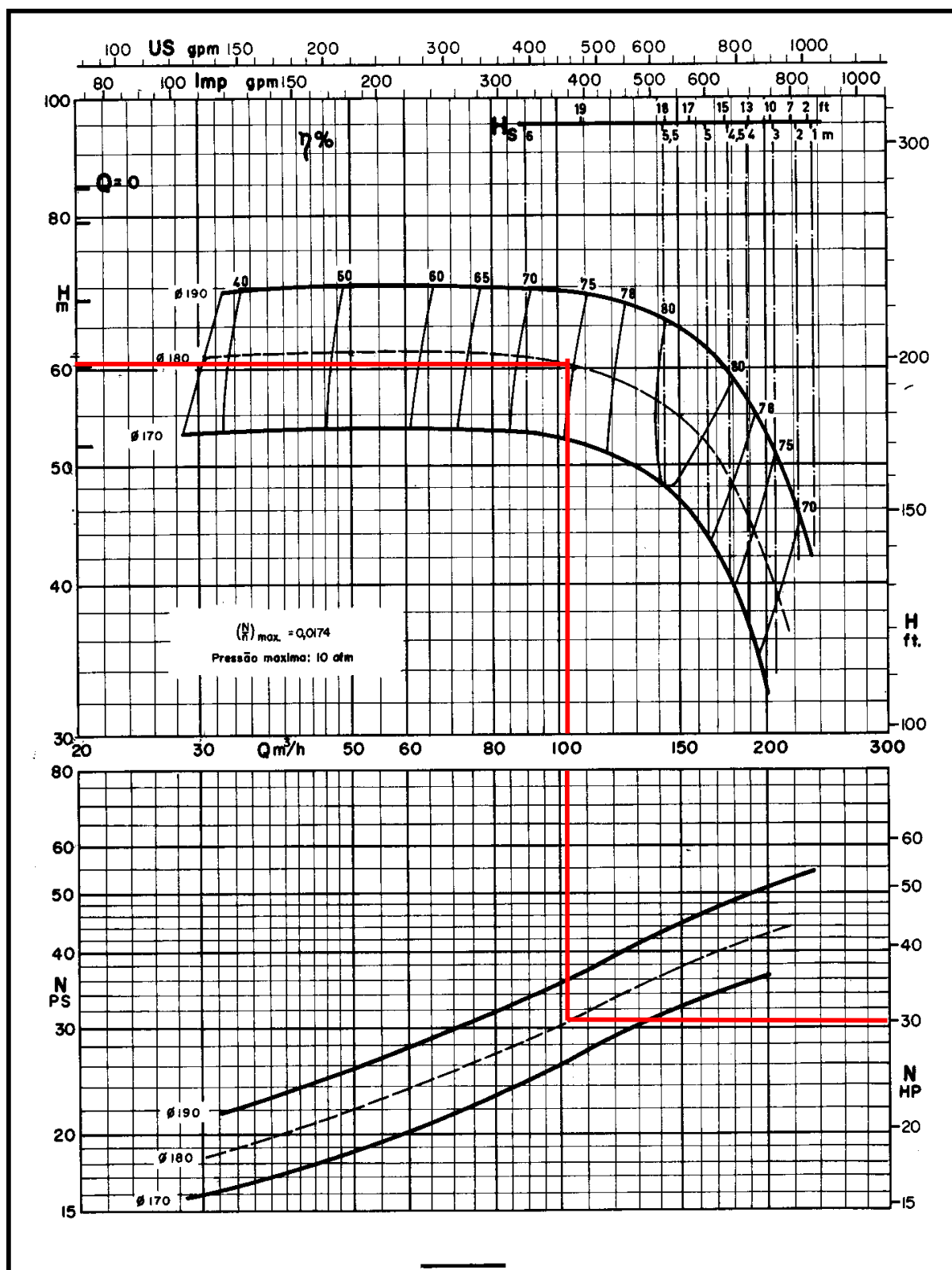


Figura 17 – Curvas Característica da Bomba centrífuga Marca: KSB Mod: ETANORM 80-20

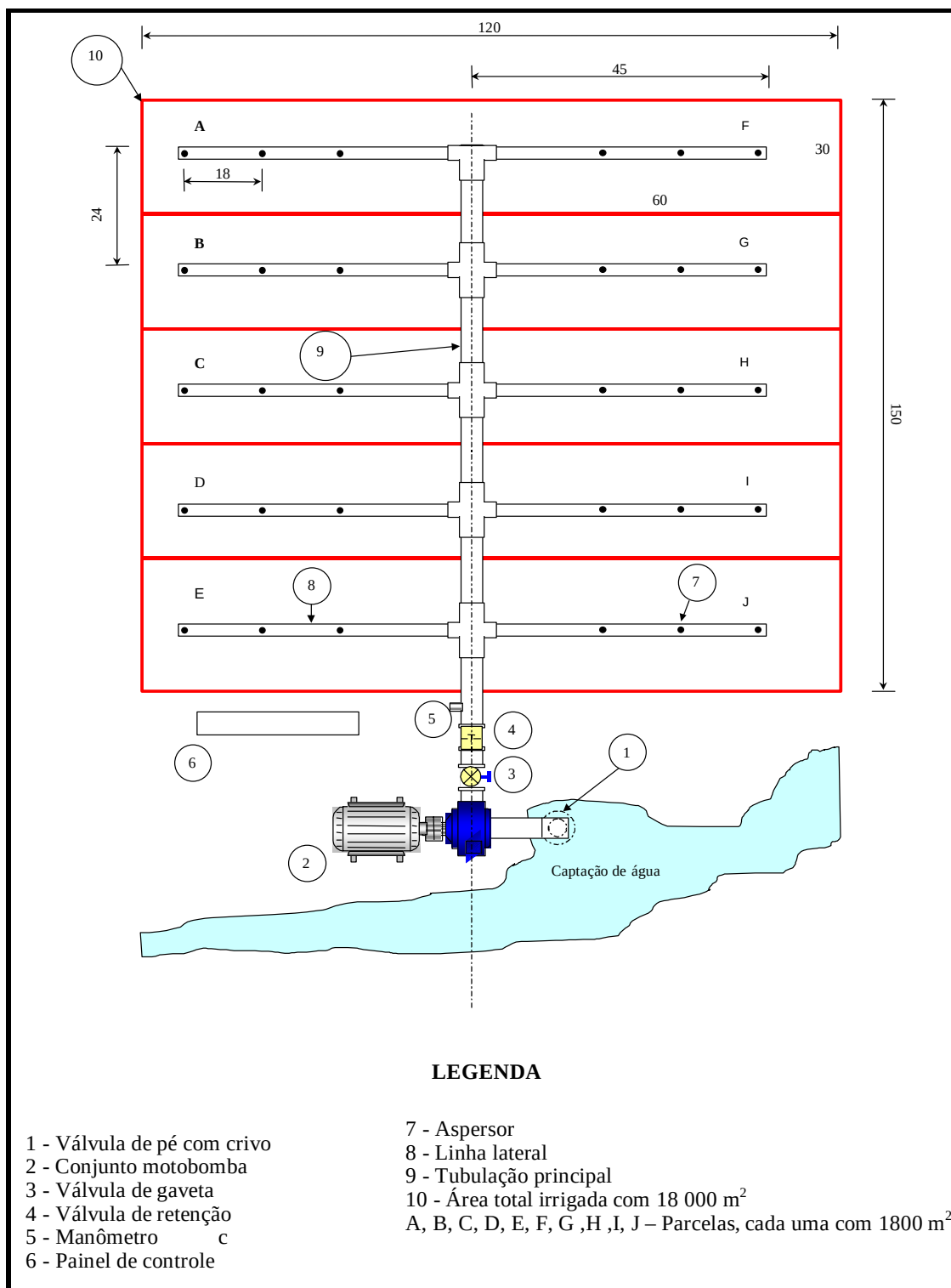


Figura 18 – Lay out do sistema de irrigação com acionamento convencional.

Quadro 01 – Relação dos materiais e equipamentos dimensionados para o projeto de irrigação por aspersão, com acionamento convencional.

Conjunto

Bomba	Motor
Marca: KSB	Marca: WEG
Modelo: ETANORM 80-20	Tipo: Motor de Indução Trifásico
Diâmetro do rotor: 180 mm	Potência nominal instalada 30 HP
Rotação máxima: 3530 rpm	Rotação: 3530 rpm
Diâmetro da tubulação de sucção: 6"	Tensão de alimentação: 220 /380 V
Diâmetro da tubulação de recalque: 5"	Partida: Estrela / Triângulo
Diâmetro da tubulação das linhas laterais: 2"	

Tubulação e conexões

Sucção	Recalque
1 Válvula de pé com crivo	144 m de tubo de aço zincado de 5"
5 m de tubo de aço zincado de 6"	6 cruzeta de 6" para 2"
1 redução excêntrica de 6" para 5"	1 T de 6" para 2"
1 curva de 6"	1 válvula de retenção
	1 válvula de gaveta
Tubulação das linhas laterais	
450 m ² de tubo de aço zincado de 2"	1 Voltímetro com escala de 0 a 300 Volts, precisão de 1 volts
10 tampões de 2"	1 Amperímetro com escala de 0 a 150 Amperes,
30 aspersores ASBRASIL - vazão: 10,45 m ³ /h, pressão: 30 mca, raio de alcance: 15 m	1 Chave de Partida Automática Y/Δ
30 tripés de 2 m para suporte dos aspersores	

4.1.2 Sistema de Irrigação por Aspersão com Inversor

No Quadro 02 e na Figura 19 tem-se a relação dos equipamentos e o novo Lay aut do sistema de irrigação com a proposta de automação, utilizando o Inversor de Frequência e o CLP – Controlador Lógico Programável, para acionamento do conjunto motobomba com variação de rotação em função da vazão e da pressão mantida constante.

Quadro 02 – Características técnicas dos principais equipamentos utilizados na proposta de automação.

Item	DESCRIÇÃO
1	Inversor de Frequência, com controle escalar, torque boost em toda faixa de operação, capacidade de 24 KVA e corrente nominal de 64 A, e capacidade de sobrecarga 120% da corrente nominal de saída do inversor por 01 minuto, com Controlador PID e reator CC incorporado.
2	Controlador Lógico programável com 16 entradas e 16 saídas a relé.
3	Transdutor de pressão para água potável, grau de proteção R65, faixa de pressão 0 a 10 bar, pressão admissível 50 bar, alimentação 24 Vcc a 2 fios, indicação digital por display de 7 segmentos, sinal de saída 0 – 10 V.
4	Tacômetro digital, com escala 6 a 30.000 rpm e precisão de 1rpm
5	Válvulas solenóides 2”, alimentação 24 V _{cc} .

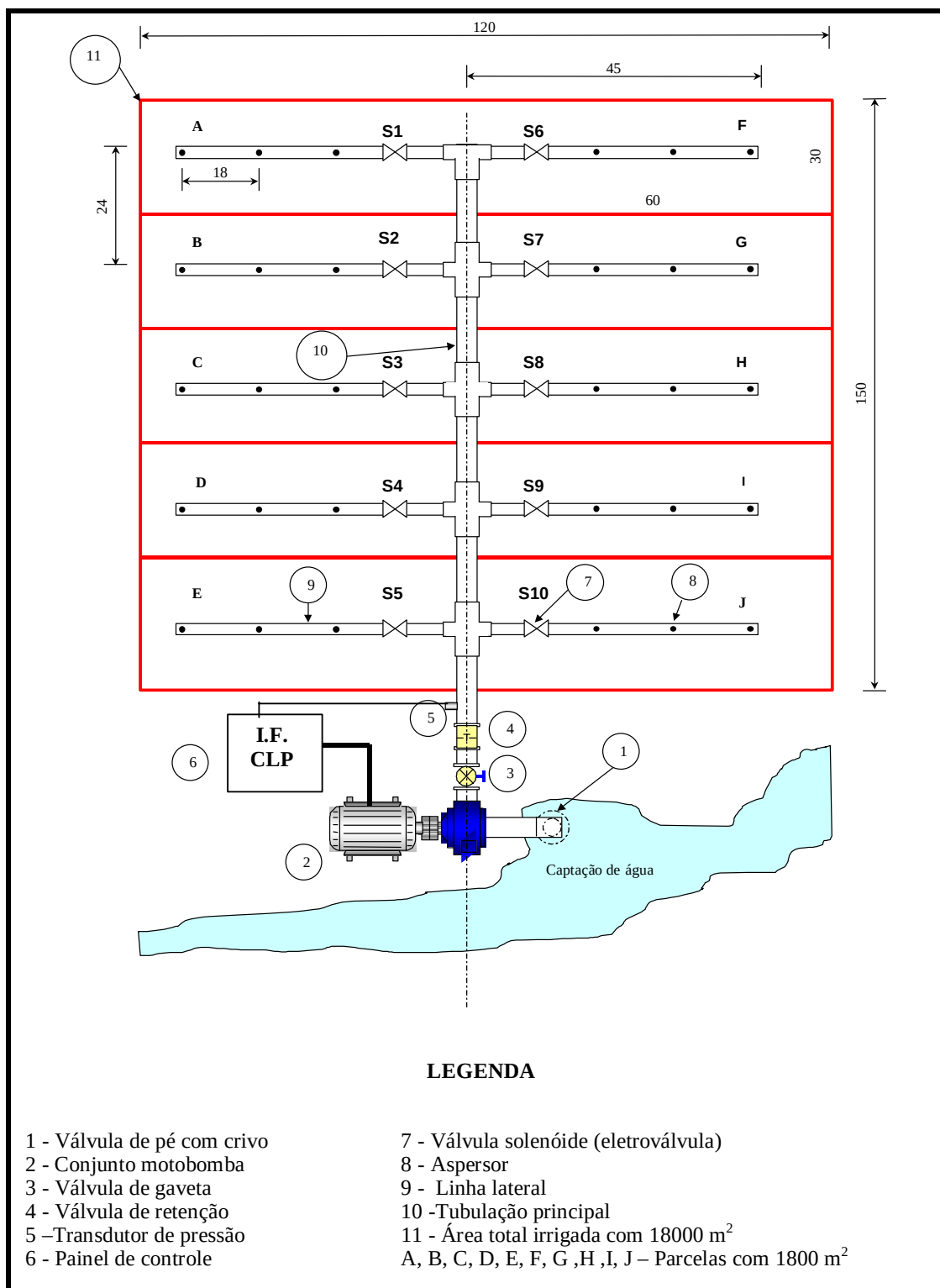


Figura 19 – Lay out do sistema de irrigação com a proposta de automação.

4.2 Métodos

No sistema convencional de bombeamento para irrigação por aspersão, as parcelas irrigadas em função da quantidade de água necessária, modifica a vazão na saída da bomba hidráulica, implicando uma variação na pressão do sistema, e como não há alteração na rotação da bomba, a tubulação de recalque opera em pressão de serviço acima da especificada, havendo um consumo elevado de água, com uso desnecessário nas parcelas com potencial hídrico em condições satisfatória, e de energia elétrica.

Para eliminar este problema propõe-se elaborar um estudo de aplicação de um sistema de acionamento com rotação variável através do inversor de frequência, e altura manométrica constante.

4.2.1 Acionamento de sistemas de bombeamento do tipo convencional

Para compreender o funcionamento do inversor de frequência, foi primeiramente analisado o comportamento teórico de um sistema convencional com variação de rotação em função da vazão, altura manométrica e potência hidráulica no eixo da bomba, considerando as situações de irrigação e operação do sistema, simulando o comportamento hidráulico do conjunto através das equações de similaridade, dadas pela Equações de 22 a 24, utilizando-se dos dados dimensionados inicialmente no projeto de irrigação, com acionamento convencional de rotação fixa.

Variação da vazão (varia diretamente proporcional a variação da rotação)

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (22)$$

onde:

q_1 = vazão da bomba operando na rotação η_1

q_2 = vazão da bomba operando na rotação η_2

η_1 = rotação especificada na bomba.

η_2 = rotação desejada na bomba.

Variação da pressão (varia proporcional ao quadrado da variação da rotação)

$$\frac{H\eta'_1}{H\eta'_2} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^2 \quad (23)$$

onde:

$H\eta_1$ = altura manométrica da bomba operando na rotação η_1 .

$H\eta_2$ = altura manométrica da bomba operando na rotação η_2 .

Variação da potência (varia proporcional ao cubo da variação da rotação)

$$\frac{Pa_1}{Pa_2} = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^3 \quad (24)$$

Pa_1 = potência absorvida pela na rotação η_1 .

Pa_2 = potência absorvida pela na rotação η_2 .

Com a aplicação da Equação 23, foi possível obter as novas curvas do sistema com referencia a curva original da bomba (vazão x altura manométrica), que foi projetada para operar em rotação fixa, obtendo-se em função da variação de rotação o ponto

de funcionamento de cada nova situação, em função da vazão, potência hidráulica e altura manométrica, considerando as situações de operação do sistema de irrigação .

4.2.2 Acionamento de sistemas de bombeamento com rotação variável

O acionamento de sistemas de bombeamento com rotação variável, através de inversor de frequência, que terá um transdutor de pressão instalado na tubulação de recalque logo após a saída da bomba, que emitirá um sinal elétrico a um CLP (Controlador lógico Programável), que representa um determinado valor de pressão fixo o qual manterá o sistema de irrigação em equilíbrio, determinado através das condições de operação do sistema. O sinal de pressão deverá ser processado pelo CLP através de um programa lógico dedicado, que comandará o inversor a fornecer ao motor uma determinada corrente na frequência necessária, correspondente a rotação requerida para a manutenção da pressão. Desta forma, sempre que houver elevação na pressão do sistema, o inversor reduzirá a rotação do conjunto e vice-versa, até que o sistema encontre seu ponto de equilíbrio.

Para atender as necessidades de acionamento do sistema de bombeamento com rotação variável do sistema de irrigação, foi elaborado um projeto de automação, obedecendo normas da ABNT, e especificações técnicas dos fabricantes dos componentes envolvidos, tais como: inversor de frequência; transdutor de pressão; válvulas solenóides, relés; Controlador Lógico Programável – CLP;

O CLP além de controlar o inversor através do transdutor de pressão, também tem a finalidade de controlar a abertura e fechamento das válvulas solenóides instaladas nas linhas laterais do sistema de irrigação, conforme a lógica de irrigação apresentada no Quadro 03.

Para se verificar e quantificar os valores da potência hidráulica requerida no sistema convencional de rotação fixa e o de rotação variável, utilizou-se da curva original da bomba, e das curvas corrigidas em função da vazão necessária solicitada, dado pelas situações de operação do sistema de irrigação, o que possibilitou um redimensionamento da potência hidráulica necessária e do motor elétrico, através da variação de rotação em função da altura manométrica e da vazão, considerando as situações de irrigação programadas pelo CLP.

QUADRO 03 – Situações de irrigação para programação do CLP.

Lógica de irrigação
Situação 1 ----- todas abertas
Situação 2 ----- S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ e S ₅ abertas
Situação 3 ----- S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅ e S ₆ abertas
Situação 4 ----- S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅ , S ₆ e S ₇ abertas
Situação 5 ----- S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅ , S ₆ , S ₇ e S ₈ abertas
Situação 6 ----- S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , S ₅ , S ₆ , S ₇ , S ₈ e S ₉ abertas

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistemas de Bombeamento Convencional com Rotação Fixa e Variável.

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se as equações de similaridade para simular a variação da velocidade de 1750 rpm a 3500 rpm, adotando-se um incremento de 50 rpm, para uma vazão inicial de 103,5m e altura manométrica de 61mca, considerando uma potência de 30 HP, determinada para o sistema de irrigação, demonstrado no Anexo 1. Com estes dados fornecidos pelo Quadro 04 e Figura 20, tem-se uma demonstração do comportamento da vazão, pressão e potência em função desta faixa de rotação.

Com as dez linhas laterais abertas em sistema de irrigação utilizando-se do acionamento convencional de rotação fixa, estabeleceu as vazões necessárias para o funcionamento das demais linhas laterais, fixando a vazão mínima de 51,75 m³/h, correspondendo a 5 linhas laterais abertas, e rotação de 1750 rpm, condição esta necessária para o bom funcionamento do motor elétrico o qual não poderá operar com rotação inferior a 50% da rotação nominal de 3500 rpm, valor este especificado pelos fabricantes em razão do sistema ficar prejudicado pela falta de refrigeração, portanto

adotando-se uma velocidade mínima de 1750 rpm, parâmetros estes que podem ser observado no Quadro 04 e na Figura 20 fornecidos em %.

QUADRO 04 – Valores da Vazão (Q), Altura Manométrica (HM) e Potência (N), em função da rotação (rpm)

<i>rpm</i>	<i>Q (m³/h)</i>	<i>HM (mca)</i>	<i>HM (atm)</i>	<i>P (HP)</i>	<i>Δ rpm</i>	<i>Δ rpm %</i>
1750	51,75	15,02	1,50	3,75	1750	50,00%
1800	53,23	15,89	1,59	4,08	1700	48,57%
1850	54,71	16,79	1,68	4,43	1650	47,14%
1900	56,19	17,71	1,77	4,80	1600	45,71%
1950	57,66	18,65	1,86	5,19	1550	44,29%
2000	59,14	19,62	1,96	5,60	1500	42,86%
2050	60,62	20,61	2,06	6,03	1450	41,43%
2100	62,10	21,63	2,16	6,48	1400	40,00%
2150	63,58	22,67	2,27	6,95	1350	38,57%
2200	65,06	23,74	2,37	7,45	1300	37,14%
2250	66,54	24,83	2,48	7,97	1250	35,71%
2300	68,01	25,94	2,59	8,51	1200	34,29%
2350	69,49	27,09	2,71	9,08	1150	32,86%
2400	70,97	28,25	2,82	9,67	1100	31,43%
2450	72,45	29,44	2,94	10,29	1050	30,00%
2500	73,93	30,65	3,07	10,93	1000	28,57%
2550	75,41	31,89	3,19	11,60	950	27,14%
2600	76,89	33,15	3,32	12,30	900	25,71%
2650	78,36	34,44	3,44	13,02	850	24,29%
2700	79,84	35,75	3,58	13,77	800	22,86%
2750	81,32	37,09	3,71	14,55	750	21,43%
2800	82,80	38,45	3,85	15,36	700	20,00%
2850	84,28	39,84	3,98	16,20	650	18,57%
2900	85,76	41,25	4,12	17,07	600	17,14%
2950	87,24	42,68	4,27	17,96	550	15,71%
3000	88,71	44,14	4,41	18,89	500	14,29%
3050	90,19	45,62	4,56	19,85	450	12,86%
3100	91,67	47,13	4,71	20,85	400	11,43%
3150	93,15	48,66	4,87	21,87	350	10,00%
3200	94,63	50,22	5,02	22,93	300	8,57%
3250	96,11	51,80	5,18	24,02	250	7,14%
3300	97,59	53,41	5,34	25,15	200	5,71%
3350	99,06	55,04	5,50	26,31	150	4,29%
3400	100,54	56,70	5,67	27,50	100	2,86%
3450	102,02	58,38	5,84	28,73	50	1,43%
3500	103,50	60,08	6,01	30,00	0	0,00%

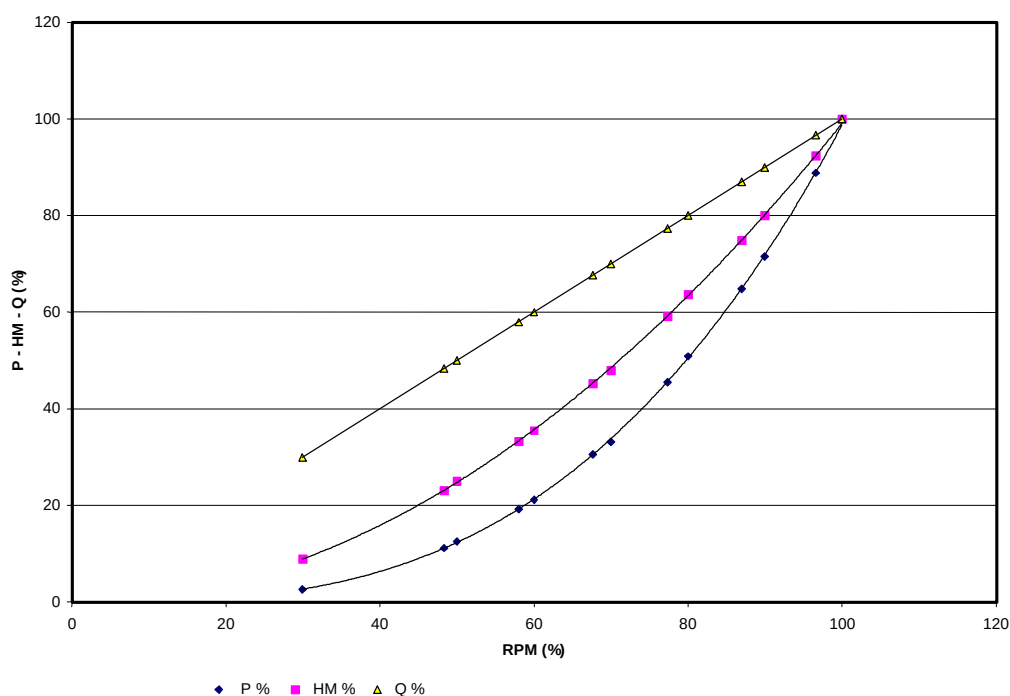


Figura 20 – Curvas características do sistema de bombeamento considerando a variação de velocidade, geradas pelas Equações de Similaridade.

QUADRO 05 – Valores da Altura Manométrica (HM), em função da variação de rotação e da Vazão (Q)

Vazão (m ³ /h)	Rotação da bomba (rpm)					
	3500	3150	2800	2450	2100	1750
31	61.5	49.81	39.35	30.12	22.12	15.36
50	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
52	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
60	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
62	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
70	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
72	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
80	62	50,22	39,68	30,38	22,32	15,5
83	61,2	49,81	39,35	30,12	22,12	15,36
90	61	49,41	39,04	29,89	21,96	15,25
93	61	49,41	39,04	29,89	21,96	15,25
100	61	49,41	39,04	29,89	21,96	15,25
104	61	49,41	39,04	29,67	21,65	14,93
120	59	47,79	37,76	28,91	21,24	14,75
140	56	45,36	35,84	27,44	20,16	14
160	52	42,12	33,27	25,28	18,54	12,79
190	45	36,45	28,8	22,05	16,02	11,25
200	41	33,21	26,24	20,09	14,76	10,25

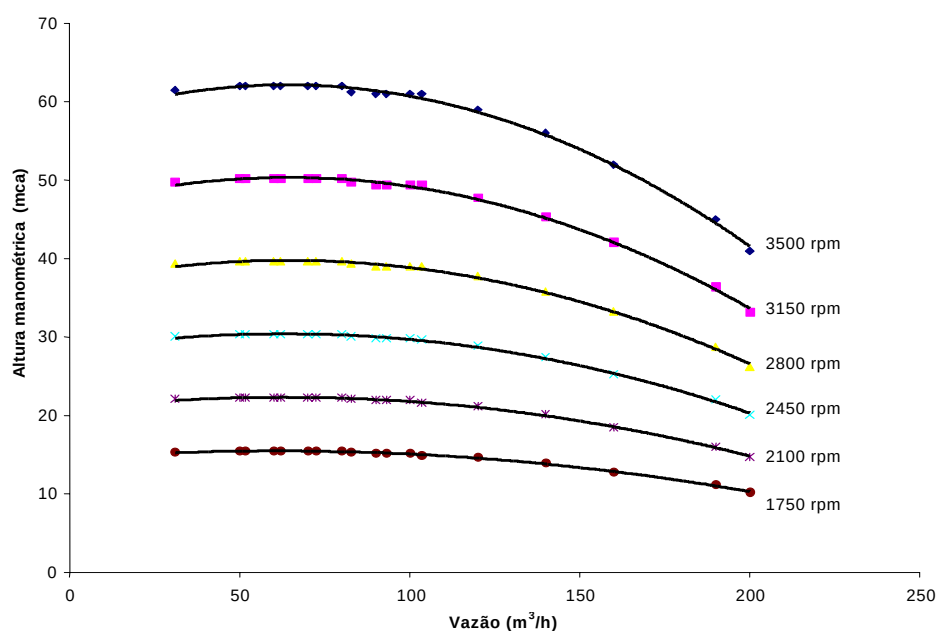


Figura 21 – Curvas de Vazão x Altura manométrica, em função da variação de rotação, geradas a partir da curva característica da bomba.

QUADRO 06 - Equações de regressão das curvas da Altura Manométrica x Vazão, para as rotações referentes ao número de linhas laterais ligadas.

Nº de linhas	rpm	Q (	HM (mca)	Equação	R2
10	3500	103,50	60,08	$y = -0,0011x^2 + 0,1426x +$	0,9968
9	3150	93,15	48,66	$y = -0,0009x^2 + 0,1163x +$	0,9973
8	2800	82,80	38,45	$y = -0,0007 x^2 + 0,0919x +$	0,9973
7	2450	72,45	29,44	$y = -0,0005 x^2 + 0,0684x +$	0,9976
6	2100	62,10	21,63	$y = -0,0004 x^2 + 0,0501x +$	0,9982
5	1750	51,75	15,02	$y = -0,0003 x^2 + 0,0333x +$	0,9966

No Quadro 06 tem-se as equações de regressão das curvas da Figura 21, referentes à altura manométrica x vazão, nas rotações calculadas para o número de linhas laterais abertas no sistema convencional, considerando esta variação da rotação executada diretamente no eixo da bomba.

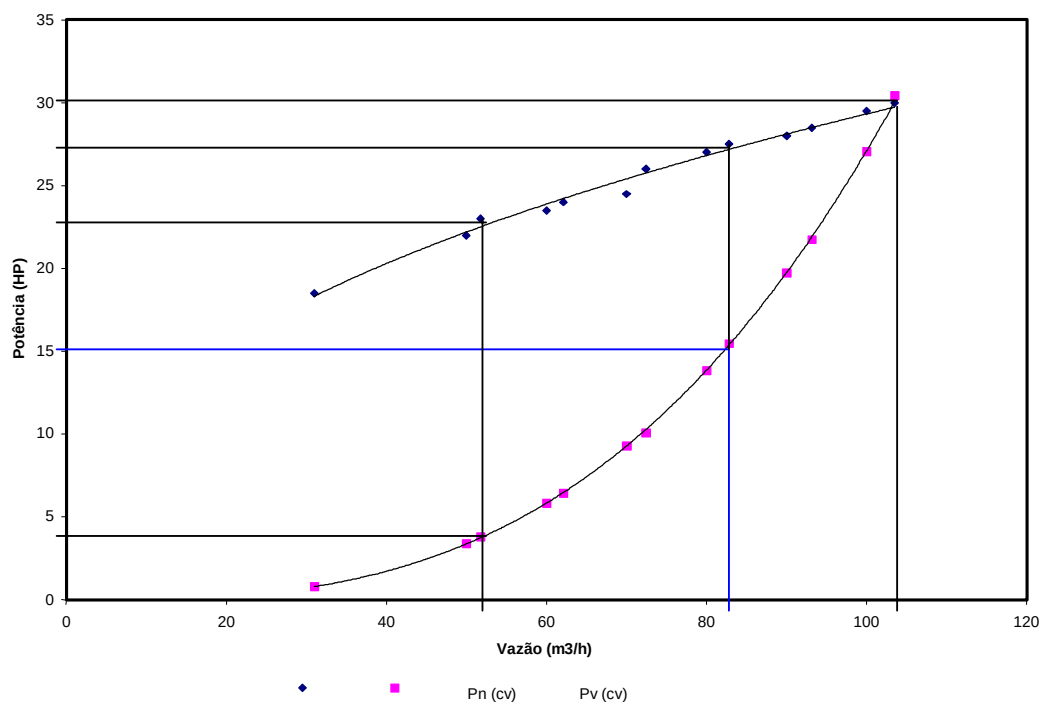


Figura 22 – Curva característica da potência nominal (Pn) da bomba com rotação fixa e da potência com rotação variável, em função da vazão.

As curvas dada pela Figura 22 mostram que a potência hidráulica necessária para bombeamento da vazão requerida no sistema convencional de rotação fixa é bem superior que no sistema de rotação variável, pois estas sofrem alterações com a variação de rotação, onde pode-se observar que quanto menor for a vazão, menor será a potência hidráulica consumida pelo sistema de bombeamento, fator este que ocorre com o sistema de rotação fixa numa razão bem inferior.

Pode-se observar na Figura 22, que para o bombeamento de uma vazão de 51,75 m³/h, na rotação mínima de 1750 rpm, temos para o sistema de rotação variável uma potência de 3,75 HP e para o bombeamento com rotação fixa, a bomba opera com uma potência de 23 HP. Portanto, enquanto no acionamento com rotação fixa a potência de operação do sistema de bombeamento convencional de irrigação varia de 23 a

30 HP, no sistema de acionamento com rotação variável, de 1750 a 3500 rpm, a potência varia de 3,75 a 30 HP, acarretando redução do consumo de energia elétrica, porém, através do método de variação de rotação convencional, isto é, aplicado direto no eixo da bomba, o motor elétrico quando operar abaixo de 50% de sua potência nominal, e com rotação inferior a 3500 rpm, os parâmetros elétricos envolvidos sofrerão alteração significativas, como o aumento da corrente, baixo rendimento e baixo fator de potência, curva característica do motor elétrico de indução trifásico, fornecida pelo fabricante WEG (1999).

Para comprovar os dados de menor solicitação de potência hidráulica no sistema de acionamento com variação da rotação sobre o sistema convencional de rotação fixa, pode-se observar na Figura 23 que a variação de rotação está diretamente vinculada com a vazão solicitada e altura manométrica.

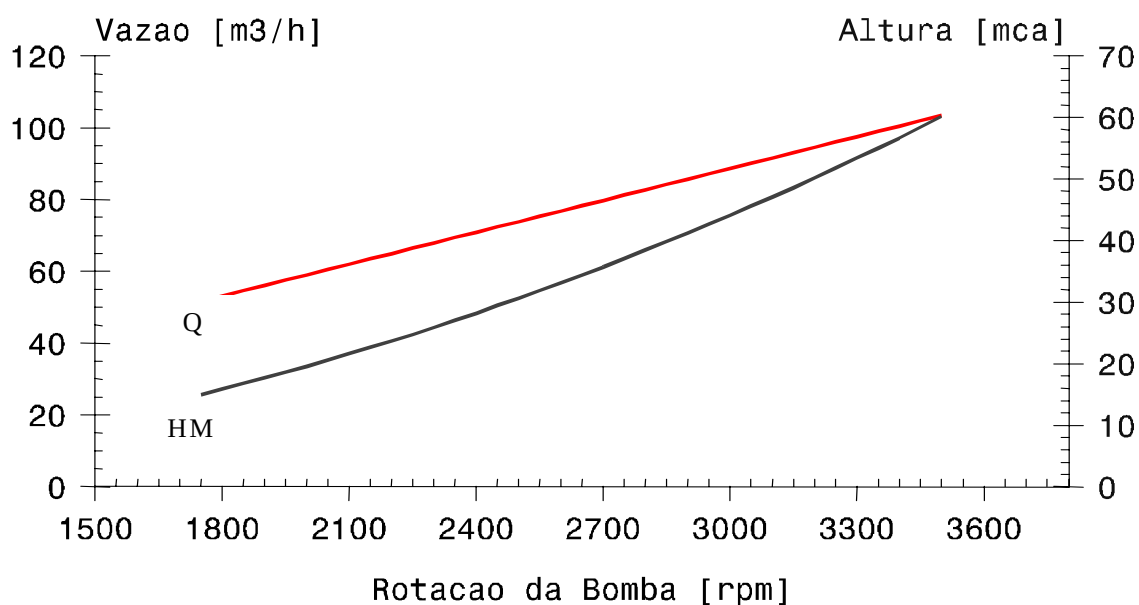


Figura 23 – Curvas combinadas da vazão (Q) e da altura manométrica (HM), em função da variação da rotação.

5.2 Proposta do Sistema de Bombeamento com Inversor de Frequência

Utilizando-se das curvas (vazão x altura manométrica) na faixa de rotação compreendida entre 1750 a 3500 rpm, referentes às Figura 21 e 22, construiu-se um diagrama com a finalidade de interpretar os parâmetros hidráulicos e mecânicos envolvidos no sistema de variação de rotação com inversor de frequência, operando com altura manométrica fixa de 35 mca na tubulação de recalque, valor este dimensionado no projeto de irrigação para manter as linhas laterais em condições de funcionamento. Para tanto foi analisado o comportamento hidráulico do sistema convencional de variação de rotação, caracterizado na Figura 24, pela intersecção da reta AEB e a curva CD, a qual representa o comportamento do funcionamento do sistema com inversor de frequência na faixa a ser controlado pelo transdutor de pressão instalado na tubulação de recalque, tendo a finalidade de manter a vazão mínima de 51,75 m³/h e a vazão máxima de 103,5 m³/h.

Portanto, as diferentes vazões solicitadas ao sistema de bombeamento será controlada pela variação de rotação do conjunto motobomba, mantendo uma variação aproximadamente de 2450 a 2800 rpm, para uma oscilação na altura manométrica de 30 a 40 mca, como se observa na Figura 25, obtendo-se ainda uma razão de grandeza dos valores da frequência de alimentação do motor elétrico e do sinal transmitido pelo transdutor de pressão.

Mantendo-se a altura manométrica em 35 mca e as correspondentes vazões, a potência mecânica solicitada no eixo da bomba terá uma variação 8,4 a 16,8 HP.

No Quadro 07 tem-se uma comparação dos parâmetros mecânicos e hidráulicos para os três tipos de acionamento do conjunto motobomba, isto é, com rotação fixa, rotação variável convencional e com rotação variável através do inversor.

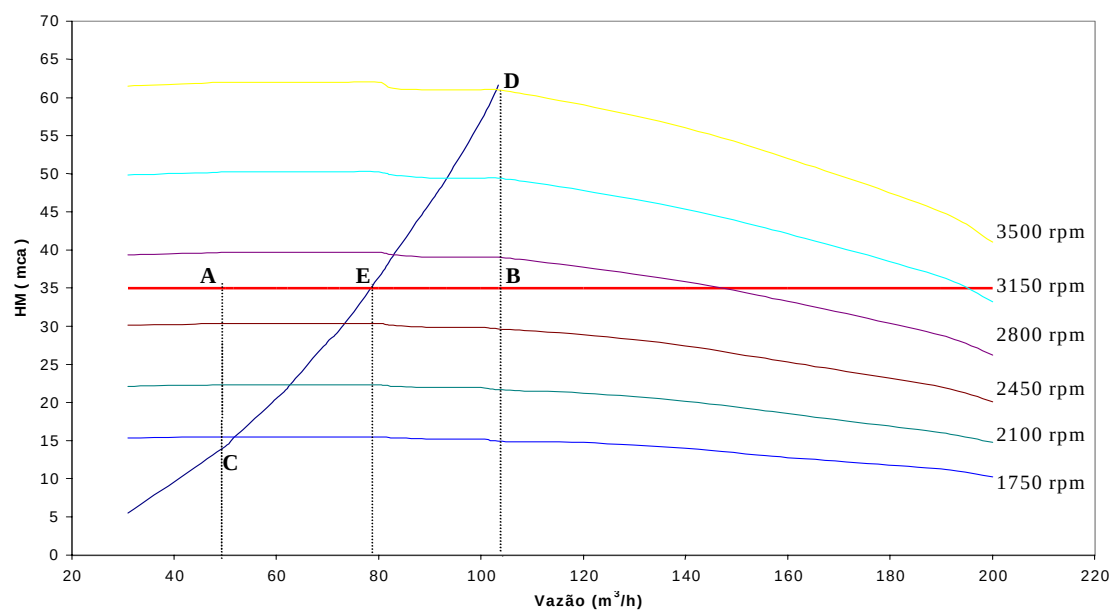


Figura 24 – Diagrama da variação de rotação em função da vazão e altura manométrica.

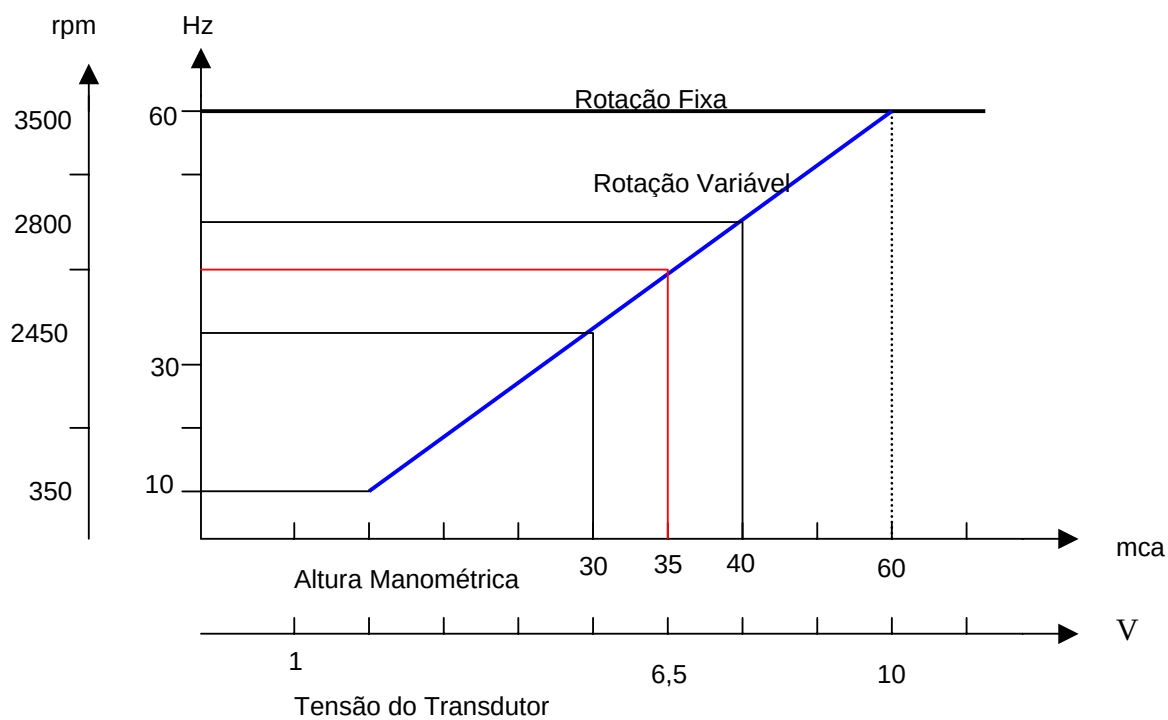


Figura 25 – Curva do comportamento do acionamento com rotação fixa e variável.

O sinal elétrico transmitido pelo transdutor de pressão deverá ser processado por um CLP através de um programa lógico dedicado, que comandará o inversor a fornecer ao motor uma determinada corrente na frequência necessária, correspondente a velocidade requerida para a manutenção da pressão. Desta forma, sempre que houver elevação na pressão do sistema, o inversor reduzirá a velocidade do conjunto motobomba e vice-versa, até que o sistema encontre seu ponto de equilíbrio.

O CLP além de controlar o inversor através do transdutor de pressão, também tem a finalidade de controlar a abertura e fechamento das válvulas solenóides instaladas nas linhas laterais do sistema de irrigação, conforme nova configuração do lay out do sistema de irrigação, e da proposta de automação apresentada no diagrama esquemático da Figura 26.

O inversor de frequência na sua parametrização, será programado para trabalhar com a frequência compatível com rotação na condição de pressão constante, e será informado de qualquer variação ocorrida durante a operação, o que fará com que a rotação do rotor da bomba se adeque à situação instantânea, fazendo com que a pressão estabilize em função da vazão solicitada, quando do fechamento ou abertura das eletro-válvulas no sistema. Portanto, dentro da faixa programada de pressão em função da vazão, haverá uma estabilização para cada nova situação instantânea, adequando a vazão e pressão necessária para a irrigação das parcelas ou num todo. Isto, leva também a se operar com no mínimo cinco linhas abertas, pois, uma vazão necessária para quatro linhas ou menos seria contra indicado devido a necessidade de se operar com uma rotação maior ou igual a 50% da nominal.

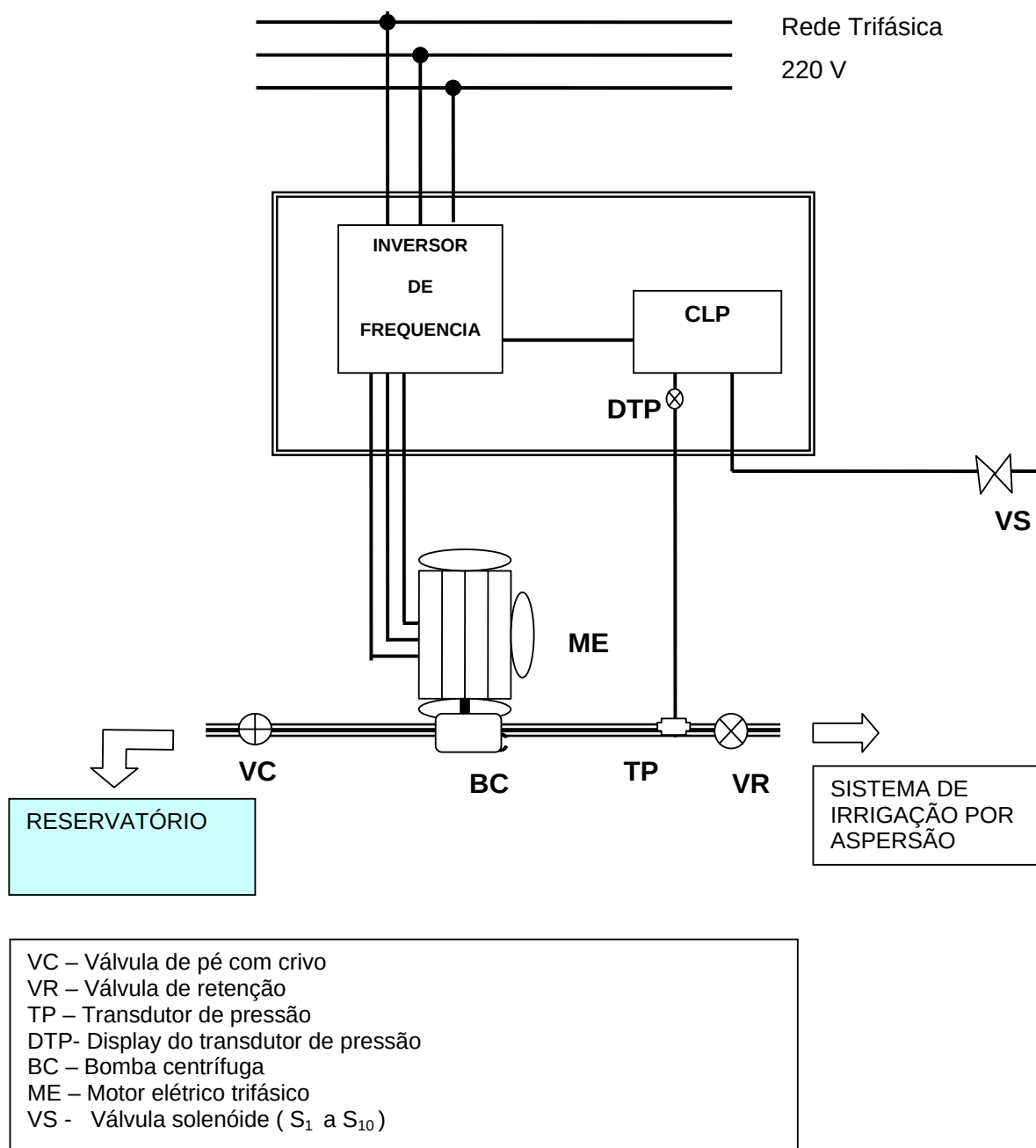


Figura 26 – Diagrama esquemático da proposta de automação do sistema de irrigação por aspersão

Quadro 07 – Parâmetros eletromecânicos e hidráulicos para os três tipos de acionamento.

Parâmetros	Sistema de acionamento		
	Rotação Fixa Convencional	Rotação Variável	
		Sem Inversor	Com Inversor
Altura Manométrica (mca)	61 a 62	15,2 a 61	30 a 40
Rotação (rpm)	3500	1750 a 3500	2450 a 2800
Vazão (m ³ /h)	103,5	51,8 a 103,5	51,8 a 103,5
Potência Mecânica (HP)	23 a 30	3,8 a 30	8,4 a 16,8

A lógica de controle da irrigação nas diversas áreas, inicialmente fará com que todas as válvulas solenóides estejam abertas (S₁). Isto levará a uma vazão de projeto de 103,5 m³/h. Posteriormente variar-se-ão as áreas que estarão sendo irrigadas. A lógica da irrigação será comandada por um CLP, que determinara o tempo de irrigação e as áreas a serem irrigadas, com uma altura manométrica programada em 35 mca, independente das parcelas irrigadas, , controlado pelo CLP, através da programação apresentada no Apêndice I.

O sistema proposto em questão, é de operação confiável e traz grandes vantagens. Seu uso já foi testado no sistema bombeamento de água potável e saneamento pela SABESP, e pela UNESP - Campus de Botucatu no sistema de abastecimento d'água de todo complexo da unidade de Rubião Júnior, sua utilização tem sido satisfatória nestes locais, trazendo uma economia de energia da ordem de 35 (%).

Para comprovar os valores, exatos da variação da rotação e da potência desenvolvida pelo motor deve-se ser analisado através medições dos parâmetros elétricos mecânicos e hidráulicos envolvidos, pois o objetivo desta pesquisa foi de primeiramente propor a utilização do inversor de frequência em sistema de irrigação por aspersão e elaborar teoricamente o comportamento deste sistema de acionamento, apresentado pelo Quadro 07, o

qual já foi utilizado experimentalmente em sistema de irrigação por pivô central, segundo Masiero (1999), obtendo-se resultado significativos na ordem de 30 (%) na redução do consumo de energia elétrica, o mesmo ocorrendo no acionamento em sistema de bombeamento de petróleo em pesquisa realizada por Salazar (1999), nas instalações da Petrobras, que demonstrou economia de energia obtida a partir da melhora do fator de potência e de carga, com a exclusão das válvulas de controle de vazão, que são substituída pela variação direta da velocidade de rotação desse equipamentos.

As Figuras de 27 a 30 representam as características elétricas do acionamento de motores elétricos de indução trifásico com rotação fixa e rotação variável com inversor de frequência, referentes as curvas de corrente, tensão, frequência e velocidade.

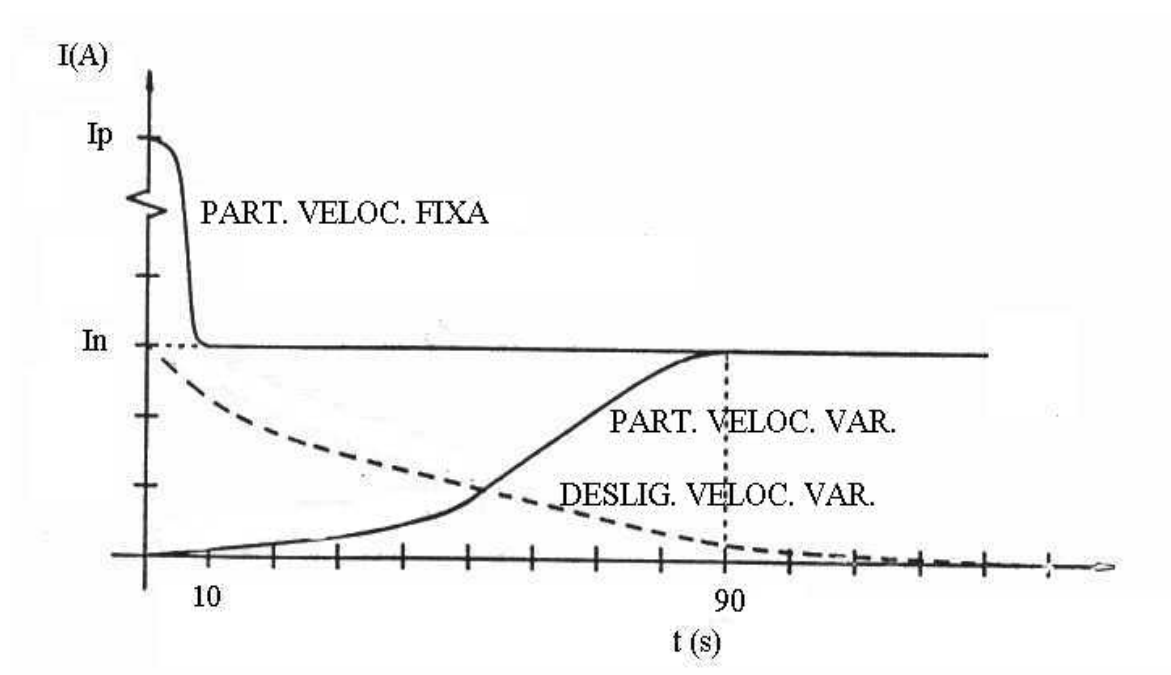


Figura 27 – Curvas da corrente na partida e desligamento do motor em função do tempo.

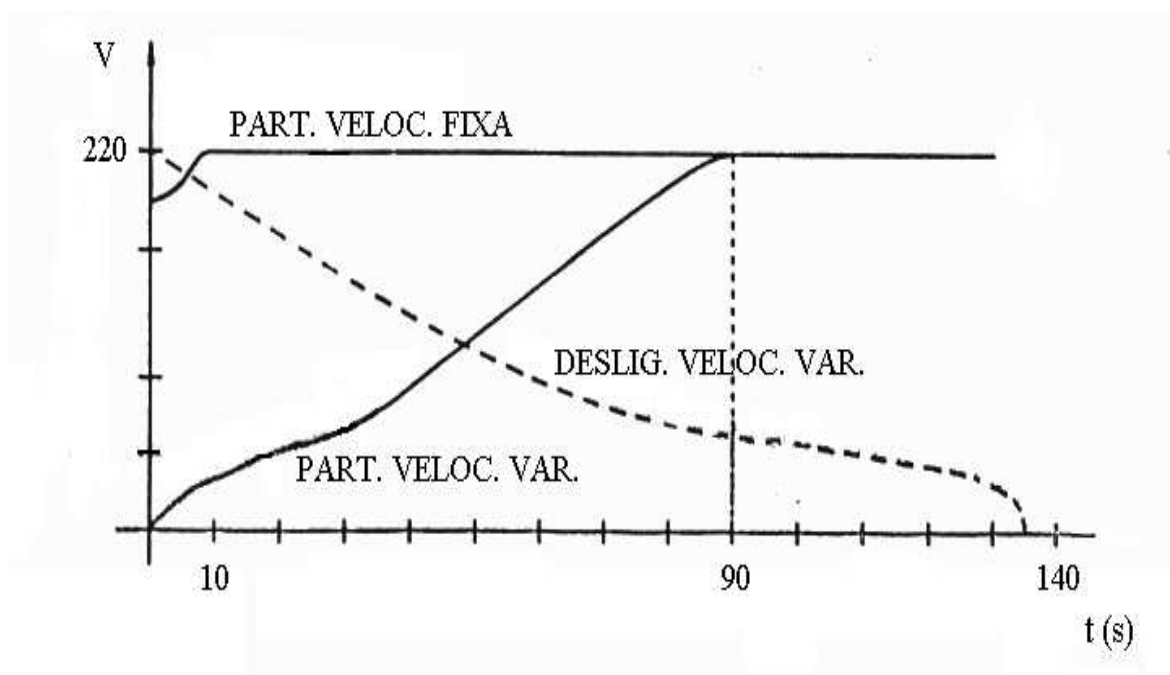


Figura 28 – Curvas da tensão na partida e desligamento do motor em função do tempo.

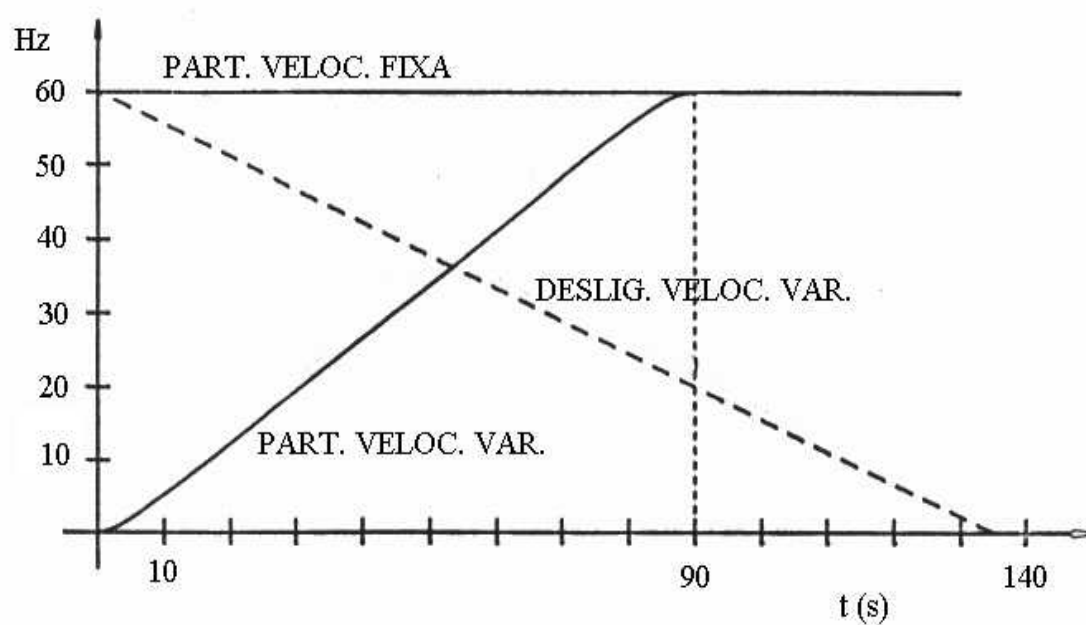


Figura 29 – Curvas da frequência na partida e desligamento do motor em função do tempo.

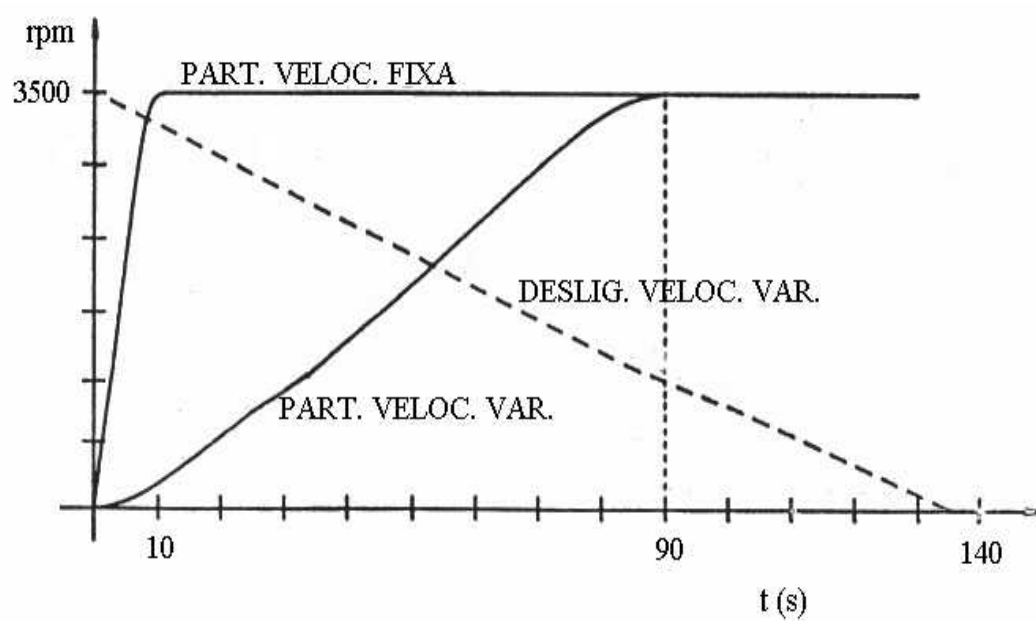


Figura 30 – Curvas da velocidade na partida e desligamento do motor em função do tempo.

6 CONCLUSÕES

A utilização de inversores de frequência no acionamento de sistemas de bombeamento para irrigação, pode ser viável, desde que, as características de funcionamento do sistema apresente condições de operação que tenha variações de vazão e pressão nas tubulações, necessitando de controle sobre a rotação, partida e desligamento do motor elétrico, com a finalidade principal de conservação e racionalização de energia elétrica, assim como outras vantagens, destacando-se:

- eliminação de alta corrente e adequação do torque na partida;
- melhoria do controle na distribuição de água nas parcelas irrigadas, evitando vazamento provocado por sobre pressão;
- manutenção do rendimento do acionamento em faixa de velocidade;
- melhoria do fator de potência;
- aumento da vida útil do equipamentos eletro-mecânicos e hidráulicos;

- redução de consumo da energia elétrica;
- diminuição do impacto provocado pelo fenômeno destrutivo do golpe de aríete, devido ao desligamento suave através do circuito de rampa inerentes ao desligamento do conjunto motobomba;
- otimização e simplificação dos projetos elétricos, potência instalada e proteções;
- possibilidade de interligação com sistemas de automação;

Observa-se com essas vantagens, tanto elétricas como hidráulicas, que o sistema é viável, porém os dados representam teoricamente uma proposta de automação sobre um sistema de irrigação por aspersão, sendo necessário a realização de uma análise econômica para se aplicar na prática a instalação de tais equipamentos.

A proposta deste trabalho, contribui com o pequeno e médio agricultor, quanto a economia de energia elétrica, no acionamento de sistemas de bombeamento, no consumo de água na irrigação por aspersão, na flexibilidade do cultivo de varias culturas ao mesmo tempo numa mesma área agrícola, o que representa aumento de produtividade.

Mantendo-se a altura manométrica em 35 mca e as correspondentes vazões, a potência mecânica calculada no eixo da bomba apresentou variação de 8,4 a 16,8 HP, com isso, pode-se se ter um redimensionamento do motor elétrico para 20 HP, referente ao projeto original do sistema de irrigação, no qual o motor dimensionado foi de 30 HP. .Esta redução de 33% na potência, concorda com os dados práticos observados em outras instalações similares, quando analisado o consumo de energia elétrica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹

ALLEN BRADLEY G. *Communication controlex module user*. Publication 1771. New York:

Allen Bradley, 1985. 90p.

ANTIPOFF, C.B., PARREIRA, A.L. Identificação de harmônicos em sistema com

conversores a semicondutores. São Paulo: *Eletricidade Moderna*, Jan/ 1992.

ALVES, G.A. *Economia de Energia em bombas, compressores e ventiladores*, Rio de Janeiro: Relatório Técnico EPOT 53, cepel. 1989.

AMERICO, M., STERPHAN, R., Lima, A.G.G., Rodrigues, A. Conservação de energia elétrica com acionamentos eletrônicos na indústria petroquímica, SIMPÓSIO NACIONAL DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS EM ELETRICIDADE E ELETRÔNICA, 8, Florianópolis. *Anais...* XIII SNPTEE, 1995. P.43-55.

BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 595p

BOLTON, W. *Instrumentação e controle*. São Paulo: Hemus, 1985. 197p.

* UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA.//Faculdade de Ciências Agrônomicas.//Normas para a elaboração de dissertações e teses.//Botucatu,1997.// 35p.

BOSE, B.K. *Power eletronics and variable frequency drives technology and applications*.

New York: IEEE PRESS, 1977. 95p.

CAMPOS, G.L. Robótica “ESTADO DA ARTE”. SOBNACON, 6, São Paulo. *Anais...*

1985. 98p.

DAWES, C.L. *Curso de eletrotécnica*, Porto Alegre: Editora Globo, 1969. 700p.

DI GRAZIA, MS. REVISTA DE AUTOMAÇÃO, São Caetano do Sul: Editora Elin Técnica,

v.1, n.3. 1998.

DISTEFANO, J.J., STUBBERUD, A.R., WILLIANS, L.J. *Sistema de retroação e controle*.

São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 480p.

DODI JÚNIOR, C. Construção de um sistema Coletor Automático para Ensaio de

Microaspersores. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19,

1990, Piracicaba. *Anais ...* Jaboticabal: SBEA. 1990. p. 628-634.

DORF, R.C. *The eletrical engineering hand book*: Boca Raton, The institute of The Eletrical

and Electronic Engineering, 1993. 110p.

FINGINI, G. *Eletrônica industrial*: Editora Hemus, 1982. 336p

FISHER, G.R.; WALLENDER, W.W. Collector Size and Test duration effects on ssplinker

Water distribution measurements Trans. s.l.:sn. *ASAE (Na.Soc. Agric. Eng.)*, p.538-42.

1988.

FTZGERALD, A.E., HIGGINBOTHAN, D.E., GRABEL, A. *Engenharia elétrica*. São

Paulo: Editora MacGraw Hill do Brasil, 1977. 743p.

- HANSON, B.; Weigand, C.; Orloff S.; Performance of eletric irrigation pumping plants using variable frequency drives. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, may/june, 1996. P.179-182.
- HERNANDEZ, A.J.M.; LÓPEZ, J.R.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F.G.;
Automatization in EL Riego Localizado-Curso International de Riego. Localizado-
Madrid-España, cap.6. p105-119, 1987.
- KSB. *Manual de treinamento para instalação e manutenção de bombas*. São Paulo: KSB, 1991. 60p.
- LANDER, C.W. *Eletrônica industrial teoria e aplicação*. São Paulo: Editora Mac Graw Hill, 1988. 426p.
- MACHADO, J. M. O. Conservar a Energia é Preservar o Ambiente. Artigo Técnico, s.l.;s.n. Dez. 1994.
- MAMMED FILHO, J. *Instalações elétricas industriais*. 3^a Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científico, 1989. 528p.
- MARTIGNONI, A. *Máquinas de corrente alternada*, Editora Globo, Porto Alegre, 1978, 410p.
- MASIEIRO, L.A.M.; OLIVEIRA, D.F.; OLIVIRA, R. Utilização de inversores de frequência para racionalização do uso da energia elétrica em sistema de irrigação do tipo pivô central *.Engenharia na Agricultura*, Viçosa,v.7, n.1 p.35-45,jan./mar.,1999.
- MITCHELL, B. W. F. Signal conditioning In instrumentatition and measurement for environmental science. 3 ed. Michigan : s.l.;s.n. 1991. P.1001-19
- NATALE, F. *Automação industrial*. São Paulo: ed Érica, 1995. 312p.

- NATALE, F. *Técnicas acionamento- conversores C.A/ C.C e motor C.C.* São Paulo: Érica, 1996. 120p.
- NATALE, F. *Automação Industrial* . São Paulo : Érica , 1995. 312p.
- OLIVEIRA, J.C.P. *Controlador Programável*. São Paulo : Makron Books, 1993. 199 p.
- PAIVA, J. B. *Caderno Didático da Disciplina de Hidráulica*: UFSM, 1993. 32p.
- PIZZARO,F. *Automatization in Riegos localizados de Alta Frecuencia*. Madrid: Artes Gráficas Palerno, 1990, cap.13. p.359-67
- SALAZAR, A. O., NASCIMENTO, E.F. *Acionamento de velocidade controlada para bombeamento de petróleo, conferência em aplicações industriais. Eletricidade Moderna*. Aranda Editora, n.303, jun/99, p. 162-171. 1999.
- SCHNEIDER . *Manual de treinamento para instalação e manutenção de bombas centrífugas*. São Paulo: Schneider, 1990. 60p.
- SIEMENS S/A. *Manual de cursos para aparelhos de automatização*. São Paulo: Ed. Siemens, 1980. 146p.
- SIGHIERI, L., NISHINARI. *Controle automático de processos industriais*, 2^a Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977. 120p.
- SPITTA, A.F. *Instalações elétricas*. Madrid: Editora Dossat, 1978. 806p.
- TEIXEIRA, H.A. *Influência de concentração de areia nas curvas características das bombas centrífugas*. São Carlos, SP: USP. 1973. p.44, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de São Carlos.
- ZOERB, Z. *Instrumentation and measurement for enviromental sciences*. Michigan, s.n. 1991. p.1-18.

APÊNDICE I

Programa para o controlador lógico programável – CLP

O programa do CLP foi desenvolvido para controlar a abertura e o fechamento das eletro-válvulas em turno de irrigação temporizada, podendo ser adaptado para diferentes culturas instalada em uma determinada parcela em função do lay out da área proposto neste trabalho e do diagrama de programação do sistema das Figuras 31 e 32.

Modo de controle : A área é composta de 10 parcelas, sendo a variação do sistema entre o máximo de 10 e o mínimo de 5 parcelas em operação de irrigação

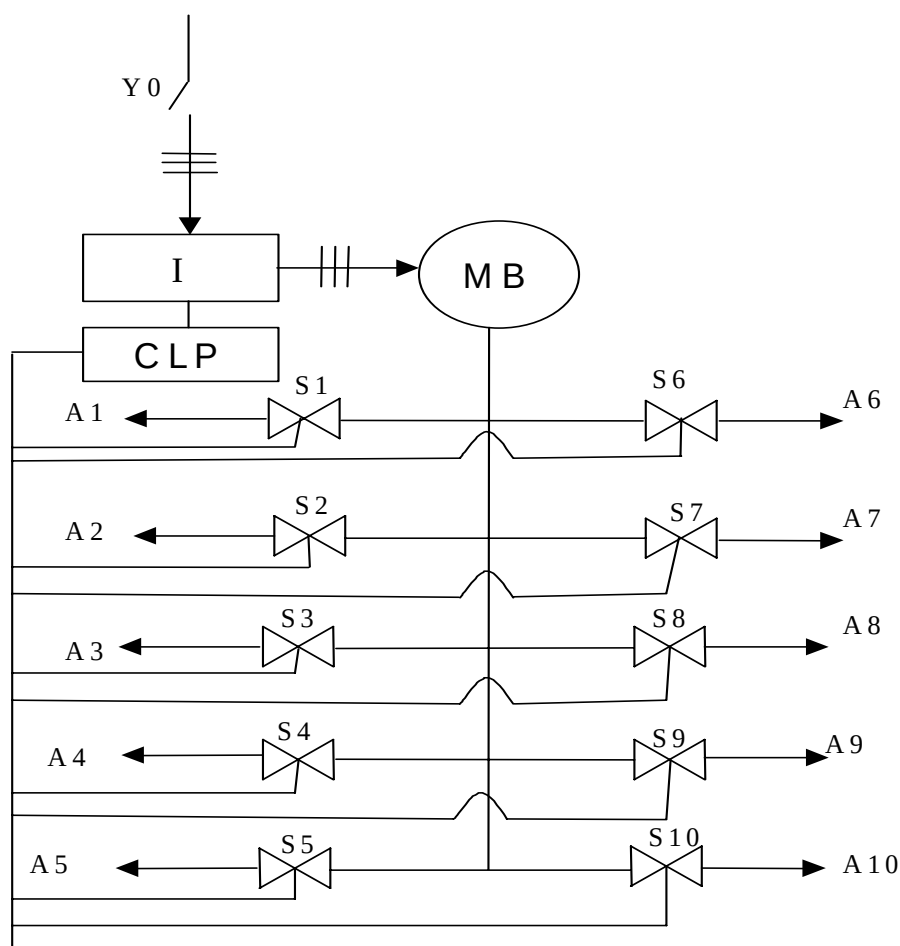


Figura 31- Diagrama de programação do sistema de irrigação.

Situações de Controle

- 1- todas as eletro-válvulas abertas (t_0)
- 2- eletro-válvula - 10 fechada e as restantes abertas (t_1)
- 3- eletro-válvulas - 9 e 10 fechadas (t_2)
- 4- eletro-válvulas - 8 a 10 fechadas (t_3)
- 5- eletro-válvulas - 7 a 10 fechadas (t_4)
- 6- eletro-válvulas - 6 a 10 fechadas (t_5)

Tempo de irrigação : indicado por (t_n), pois depende da cultura que deve receber a irrigação a lâmina de água necessária.

Observação: o programa foi desenvolvido para teste do controle com inversor de frequência, poderá ser alterado para outras aplicações.

A reinicialização ocorrerá manualmente através de Chave xo (liga –desliga-liga)

Onde :

S= eletro-válvula

X_n= entrada

Y_n = Saída

T_n = numero do temporizador

t_n = tempo programado

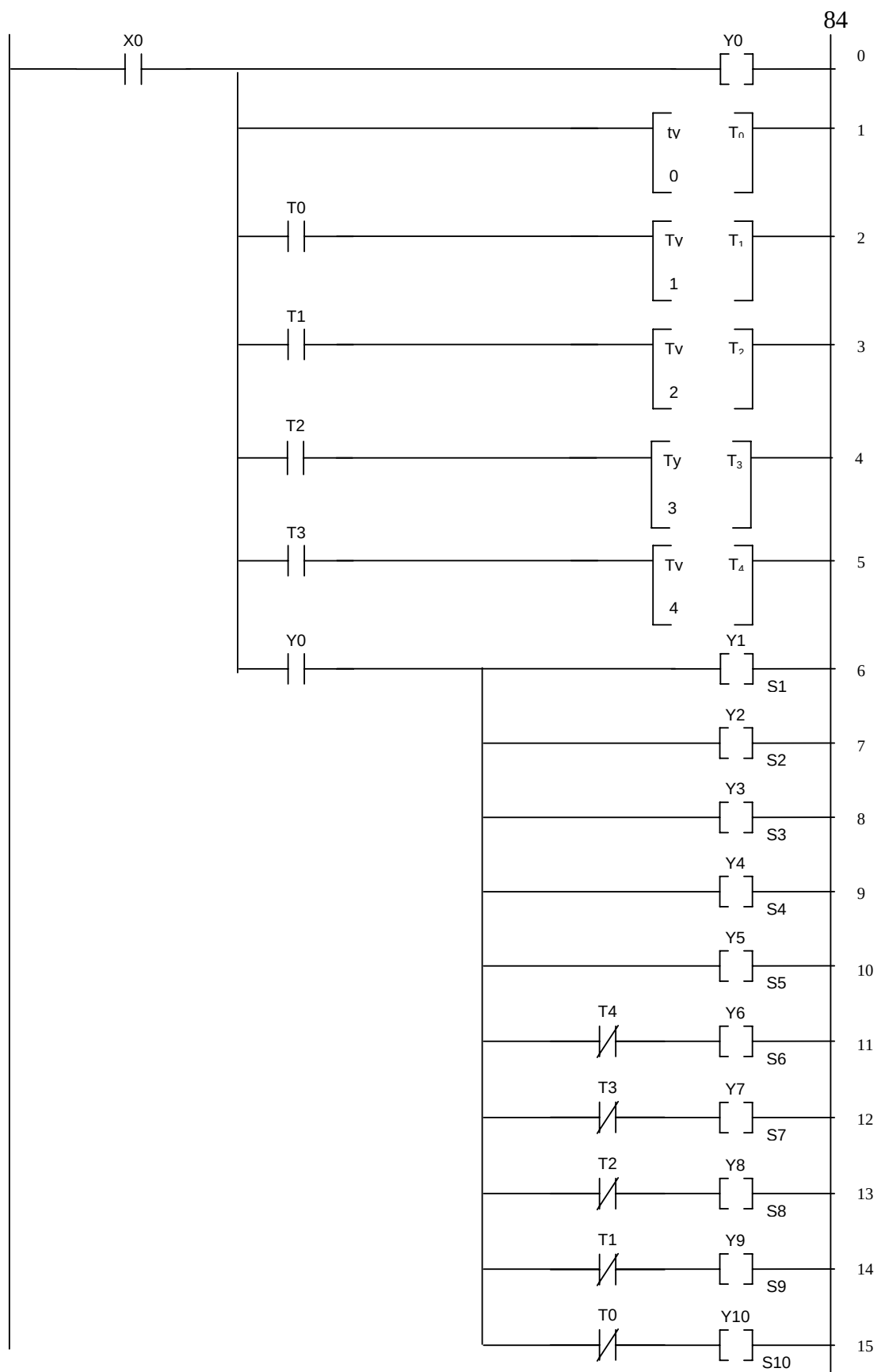


Figura 32 – Diagrama de Programação do CLP na Linguagem Step -5.