

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2002



unesp 

**Governo do Estado de São Paulo
Universidade Estadual Paulista**

FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ

**UMA METODOLOGIA DE PROJETO
PARA ACIONAMENTO DE MOTORES
DE PASSO USANDO DISPOSITIVOS DIGITAIS**

JOÃO ZANGRANDI FILHO

PUBLICAÇÃO

1110000666



666

**CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO**

GUARATINGUETÁ – SP

666 -

BRASIL

2002

**FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA**



Data: 24/6/07
Valor: 400,00
C/D/T: D

Governo do Estado de São Paulo
Universidade Estadual Paulista



FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ

UMA METODOLOGIA DE PROJETO
PARA AÇIONAMENTO DE MOTORES
DE PASSO USANDO DISPOSITIVOS DIGITAIS

JOÃO ZANGRANDI FILHO

Zangrandi Filho, João
Z29m Uma metodologia de projeto para acionamento de motores
de passo usando dispositivos digitais / João Zangrandi Filho.-
Guaratinguetá : [s.n.], 2002
136 f.: il.
Bibliografia: f. 136

Tese (Livre-Docência) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002

1. Mecatrônica I. Título

CDU 531.124

***UMA METODOLOGIA DE PROJETO
PARA ACIONAMENTO DE MOTORES
DE PASSO USANDO DISPOSITIVOS DIGITAIS***

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci
Unesp-Feg

Prof. Dr. Galdenoro Botura Junior
Unesp-Feg

Prof. Dr. Márcio Tadeu de Almeida
Unifei-Itajubá

Prof. Dr. Paulo Seleghim
Eesc-São Carlos

Prof. Dr. José Célio Dias
Unifei-Itajubá

GUARATINGUETÁ – SP

BRASIL

DADOS CURRICULARES

JOÃO ZANGRANDI FILHO

NASCIMENTO: 04/03/1950
Guaratinguetá-SP

FILIAÇÃO: João Zangrandi Filho
Rosa Zago Zangrandi

1970/1975: Curso de graduação de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

1977/1984: Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica
Escola Federal de Engenharia de Itajubá

1986/1993: Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista -UNESP



À minha esposa Cristina.

Aos meus filhos Fernando e Livia.

À nora Olívia e neto João Vitor.

Aos meus pais João e Rosa.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
1.1	O motor de passo	03
1.2	Vantagens desvantagens do motor de passo	04
1.3	Aplicação dos motores de passo	05
1.4	Classificação dos motores de passo	08
1.5	Revisão bibliográfica	09
1.6	Objetivos e metodologia	11
2	MOTOR DE PASSO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL - RV	13
2.1	Funcionamento do motor RV	13
2.2	Motor de relutância variável de passo pequeno	21
2.3	Determinação do passo e do número de passos por revolução de um motor RV – Método dos cinco passos	25
3	MOTOR DE PASSO DE IMÃ PERMANENTE	27
3.1	Funcionamento do motor de imã permanente	27
3.2	Funcionamento do motor de imã permanente “clawpole”	32
3.3	Determinação do passo de motor “clawpole”	37
4	MOTOR DE PASSO - HÍBRIDO	38
4.1	Funcionamento de um motor híbrido	38
5	FORMAS DE ACIONAMENTO DOS MOTORES DE PASSO	44
5.1	Introdução	44
5.2	Acionamento unipolar	45
5.3	Acionamento bipolar	47

5.4	Enrolamento monofilar ou unifilar e enrolamento bifilar	50
5.5	Identificação dos motores de passo	53
5.6	Tamanho e potência dos motores de passo	54
5.7	Modos de operação dos motores de passo	55
6	ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE PASSO ATRAVÉS DO COMPUTADOR	59
6.1	Introdução	59
6.2	Anatomia da porta paralela	61
6.3	Porta DATA	63
6.4	Porta CONTROL	65
6.5	Porta STATUS	66
6.6	Uso do adaptador da impressora paralela	68
6.7	Acessando a porta paralela	68
6.8	Acionamento de motor de passo usando a porta paralela	71
6.8.1	Características gerais	71
7	CIRCUITO LÓGICO PARA ENERGIZAÇÃO DOS ENROLAMENTOS	75
8	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	92
8.1	Introdução	92
8.2	Componentes da unidade	94
9	CONCLUSÕES	97
	APÊNDICE A	100
	APÊNDICE B	127
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	- Rotor em equilíbrio estável- estator não energizado	13
FIGURA 2.2	- Rotor em equilíbrio estável – estator energizado	14
FIGURA 2.3	- Rotor em equilíbrio estável - torque externo aplicado	16
FIGURA 2.4	Seqüência de energização das bobinas- rotor com 4 polos –estator com 6 polos .	17
FIGURA 2.5	Seqüência de funcionamento de um motor RV com 6 polos no rotor e 8 polos no estator	18
FIGURA 2.6	Seqüência de funcionamento de um motor RV com 4 polos no rotor e 12 polos no estator- 4 bobinas energizadas ao mesmo tempo	19
FIGURA 2.7	Seqüência de funcionamento de um motor RV com 8 polos no rotor e 12 polos no estator- 4 bobinas energizadas ao mesmo tempo	20
FIGURA 2.8	Detalhes de um motor RV com rotor e estator dentados	22
FIGURA 2.9	Detalhes do pólo S - equilíbrio entre o rotor e o estator	23
FIGURA 2.10	Seqüência de energização das 4 fases	24
FIGURA 3.1	- Motor de imã permanente em duas posições de equilíbrio estável.	28
FIGURA 3.2	Quatro posições de equilíbrio estável - 270° de rotação	29
FIGURA 3.3	- Motor de imã permanente com rotor bipolar e estator com 8 polos.	30

FIGURA 3.4	- Motor com tetrapolar e passo de 45°	31
FIGURA 3.5	- Vista lateral e corte longitudinal de um motor clawpole	33
FIGURA 3.6	- Detalhes das bandejas, clawpoles e polos magnéticos	33
FIGURA 3.7	Rotor com 24 polos magnéticos longitudinais	35
FIGURA 3.8	Vista explodida de um motor “clawpole	36
FIGURA 4.1	- Corte longitudinal e vista transversal de um motor híbrido	39
FIGURA 4.2	- Rotor de um motor híbrido	40
FIGURA 4.3	- Motor híbrido com número ímpar de dentes – 25 dentes	41
FIGURA 4.4	- Motor híbrido com número par de dentes – 50 dentes	42
FIGURA 5.1	- Princípio do acionamento unipolar	45
FIGURA 5.2	- Circuito para acionamento unipolar	46
FIGURA 5.3	- Detalhes do acionamento bipolar	48
FIGURA 5.4	Circuito de acionamento bipolar usando duas fontes	49
FIGURA 5.5	Circuito de acionamento bipolar tipo “ponte”	49
FIGURA 5.6	Ligações de um motor com 4 bobinas – 8 terminais	52
FIGURA 5.7	Formas de enrolamento e acionamentos de motores	53
FIGURA 5.8	Operação de um motor no modo passo completo	56
FIGURA 5.9	Etapas do modo de operação – meio passo de um motor	
FIGURA 6.1	- Conectores DB25	62
FIGURA 6.2	Conector DB25 e terminais da porta DATA	64
FIGURA 6.3	Correntes máximas na porta DATA	65
FIGURA 6.4	Identificação da porta Control no conector DB25	66
FIGURA 6.5	Identificação da porta Status no conector DB25	67
FIGURA 6.6	Motor “clawpole” com seis terminais	72
FIGURA 7.1	- Exemplo de tabela verdade	76
FIGURA 7.2	- Montagem da tabela de energização das fases	78

FIGURA7.3	- Tabela verdade para circuito seqüencial do contador	79
FIGURA7.4	- Equações J e K dos FFs minimizados	79
FIGURA7.5	Tabela verdade das equações das fases	80
FIGURA7.6	Equações booleanas das fases e Mapa de Karnaugh	81
FIGURA7.7	Circuito lógico final para acionamento do motor de passo	81
FIGURA7.8	Montagem da tabela de energização das fases	82
FIGURA 7.9	Tabela verdade para circuito seqüencial do contador	83
FIGURA 7.10	- Equações J e K dos FFs minimizados	84
FIGURA 7.11	- Tabela verdade das equações das fases	85
FIGURA 7.12	- Equações booleanas das fases e Mapa de Karnaugh	85
FIGURA7.13	- Circuito lógico final para acionamento do motor	86
FIGURA7.14	Montagem da tabela de energização das fases	87
FIGURA7.15	Tabela verdade para circuito seqüencial do contador	88
FIGURA 7.16	Equações J e K dos FFs minimizados	89
FIGURA 7.17	Tabela verdade das equações das fases	90
FIGURA 7.18	Equações booleanas das fases e Mapa de Karnaugh	91
FIGURA 7.19	Circuito lógico final para acionamento do motor de passo	91
FIGURA 8.1	Circuito eletrônico e as portas DATA, STATUS E CONTROL	92
FIGURA 8.2	Montagem da interface ao computador e aos motores	93
FIGURA 8.3	Circuito impresso-lado dos componentes e nomenclatura	95
FIGURA 8.4	Detalhes do circuito eletrônico e ligações dos motores	96
FIGURA A.1	- Porta inversora	104
FIGURA A.2	Porta E	104
FIGURA A.3	Porta OU	105
FIGURA A.4	Tabela verdade para prova dos teorema 1 a 8	107

FIGURA A.5	Tabela verdade para prova dos teoremas 9, 10 e 11	107
FIGURA A.6	Portas Não E e Não OU	109
FIGURA A.7	- Mapas de Karnaugh para 1, 2, 3 e 4 variáveis	112
FIGURA A.8	- Mapa de Karnaugh para 5 variáveis	113
FIGURA A.9	- Mapas de Karnaugh usando funções e tabela verdade	114
FIGURAA.10	Funções de 3 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh	114
FIGURAA.11	Funções de 4 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh	115
FIGURAA.12	Funções de 4 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh	115
FIGURAA.13	Funções de 5 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh	116
FIGURAA.14	Exemplo de quadro adjacente	117
FIGURAA.15	Exemplos de diferentes casos de quadros adjacentes	118
FIGURAA.16	Exemplos de vários quadros adjacentes no mesmo diagrama	118
FIGURAA.17	Quadros adjacentes particulares	119
FIGURAA.18	Simplificação usando quadros adjacentes	119
FIGURAA.19	Quadros com quatro "1" adjacentes	120
FIGURAA.20	Quadros com quatro "1" adjacentes e em linha	120
FIGURAA.21	Quadros com quatro "1" adjacentes e simétricos	121
FIGURAA.22	Quadros com oito "1" adjacentes e simétricos	121
FIGURAA.23	Quadros com oito "1" adjacentes e alinhados	122
FIGURAA.24	Quadros com várias formas de minimização dos "1" adjacentes	122
FIGURAA.25	Flip-flops RS	125
FIGURAA.26	Flip-flops JK	126
FIGURAA.27	Flip-flops D e T	126

ZANGRANDI, J.F. “Uma metodologia de projeto para acionamento de motores de passo usando dispositivos digitais”. Guaratinguetá, 2002. 100p. Tese de Livre Docência – Faculdade de Engenharia , Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O motor de passo é uma máquina elétrica relativamente nova nas aplicações industriais. Uma pesquisa para se obter informações de funcionamento dessa máquina revelou que pouco existe na literatura especializada.

Dada a inexistência de literatura em língua portuguesa principalmente, e com vistas a reunir num só trabalho informações de funcionamento e acionamento, detalhes são mostrados em pormenores.

Este trabalho desenvolve um procedimento para o projeto de circuitos lógicos para a energização dos enrolamentos dos motores de passo de qualquer tipo. É uma contribuição para os trabalhos de “mecatrônica”, pois reúne os princípios de funcionamento e de acionamento.

Permite ainda que, usando a porta paralela de um computador, o acionamento de motores de passo fique bastante completo, que é parte daquilo que se necessita em mecatrônica.

PALAVRAS-CHAVES : Motor de passo, “Mecatrônica”, circuito lógico, porta paralela, acionamento.

ZANGRANDI, J.F. "A design methodology for the driving of stepping motors making use of digital devices". Guaratinguetá, 2002. 100 p. Tese de Livre Docência – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

ABSTRACT

The stepping motor is an electrical machine relatively new in industrial applications. A literature research for obtaining the operation principles of such machines, revealed that little is published in the specialized literature.

Do to the lack of technical literature, mainly in portuguese, and aiming at to build in one work operation principles and driving controls, details about are included.

This work presents a procedure for the design of logic circuit in order to energize any type of stepping motor windings. This work is a contribution to mechatronic because it brings together the working principles and driving controls of this kind of motor.

It also allows the possibility of using the PC parallel port in order to make the stepping motor drive easy; that is part that we need in mechatronic .

KEYWORDS: Stepping motor, mechatronic, logic circuit, parallel port.

1 INTRODUÇÃO

Uma das primeiras publicações sobre motor de passo ocorreu em 1927 num artigo escrito por W. McClelland na IEEE e intitulado *The application of electricity in warships*. Neste artigo era descrito um motor de relutância variável com três fases, o qual era usado para controlar o indicador de direção das armas de navios através de controle remoto. O acionamento das fases deste motor era feito por uma chave mecânica rotativa que fazia o contato para energizar as bobinas do estator. De acordo com outro artigo, agora do IEEE *Transaction on Automatic Control*, motores de passo foram utilizados na US Navy para os mesmos propósitos de controle de armas.

C.I. Walker obteve em 1919 uma patente inglesa pela invenção de uma estrutura de motor de passo destinada a fazer com que estes motores girassem com pequenos ângulos de passo. Tal invenção é usada até hoje nestes motores.

C.B. Chicken e J.H. Thain obtiveram uma patente americana em 1920 pela invenção de um motor de passo que poderia produzir um grande torque por unidade de volume do rotor.

Em 1957 a revista *Control Engineering* publicou artigo sobre as modernas aplicações do motor de passo sob o título *The power stepping motor - A new digital actuator*. Este artigo tratava de um sistema com três motores de passo de relutância variável que foram aplicados nos três eixos de uma máquina fresadora. Coincidindo com este artigo uma grande pesquisa para melhorar a performance dos motores de passo começou na nações industrializadas.

Por volta de 1960 outros tipos de motores de passo usando imã permanente apareceram. O mais simples é o tipo que hoje se refere como motor de imã permanente. O estator deste tipo de motor tem polos salientes enquanto o rotor é um imã permanente cilíndrico semelhante àquele de um motor síncrono normal. O segundo tipo é o motor híbrido onde um rotor cilíndrico com imã permanente é

polarizado axialmente e coberto com uma estrutura dentada de aço doce. Este motor foi inventado por K.M.Fiertag e J.T. Donahoo, ambos da General Electric Company e patenteado em 1952 nos Estados Unidos. Este motor foi inicialmente fabricado para ser usado como motor AC síncrono de baixa velocidade, isto é, 100 rpm a 60 Hz. Na época foi dado o nome de “Slow- Sync” a este tipo de motor.

Um outro tipo de motor síncrono também foi fabricado em 1952 pela Sigma Instruments com o nome de “Clyconome”. A partir de 1960 os fabricantes de computadores viram a possibilidade do uso de motores de passo e promoveram o desenvolvimento de um motor de alta performance e confiável. Em 1967 a Sankyo Denki Co. Ltd. iniciou a produção de motores híbridos sob o nome de “Step-Syn”. Por volta de 1970 a Superior Electric Company e a Sigma Instruments iniciaram a produção de motores híbridos com passo $1,8^\circ$ ou 200 passos por revolução. E, a partir de 1970 a indústria de computadores teve um rápido crescimento e estes motores foram usados nas HD's para a movimentação das cabeças de leitura/gravação. Paralelamente os fabricantes de impressoras e “plotters” passaram a usar sistemas de controle constituídos de circuitos integrados no acionamento de motores de passo.

Por estes motivos de 1970 em diante houve um rápido aumento do uso de motores de passo na indústria de computadores e isto levou a produção em massa desses motores. Então alguns tipos de motores de passo foram fabricados: motores de relutância variável com quatro fases e passo $1,8^\circ$, motores híbridos com passos de $2,0^\circ$, de $2,5^\circ$ e de $5,0^\circ$, motores de ímã permanente de $7,5^\circ$, de 45° e de 90° e motores de relutância variável com três e com quatro fases e com passo de $7,5^\circ$ ou 15° .

Assim como em outros campos o progresso tecnológico associado aos motores de passo tomou rumo com o avanço dos transistores e outros aparelhos semicondutores. No início o acionamento dos motores de passo era feito através de contatos mecânicos e relés eram utilizados. Todavia com o aparecimento das válvulas elas foram substituindo os relés para depois serem substituídas pelos

semicondutores. Embora estes oferecessem grande facilidade eles eram muito caros no passado para serem usados nos motores de passo até 1960. Por volta de 1965 com o aparecimento dos circuitos integrados o circuito lógico foi miniaturizado enquanto aumentava a confiabilidade e baixavam os preços. Sendo assim maiores aplicações dos motores de passo tornaram-se possíveis.

1.1 O motor de passo

O motor de passo é um dispositivo de acionamento que converte energia elétrica em energia mecânica como qualquer outro motor elétrico. Este tipo de motor pode ser visto como motor elétrico sem comutador.

São utilizados em aplicações que requerem baixos torques, velocidade constante, baixo consumo de energia e alta precisão.

Na área de “mecatrônica”, por exemplo, esses motores estão sendo cada dia mais empregados como em inúmeras aplicações de periféricos de computadores (mesas gráficas, unidades de disco, “plotters” e outros), CNC de pequena escala, braços mecânicos, etc.

A característica básica dos motores de passo com relação aos convencionais é que estes podem ser acionados de forma discreta, ou seja, estabelecendo um passo ou vários passos, dependendo dos sinais fornecidos pelos circuitos digitais de comando. O controle de acionamento dos motores de passo é normalmente em malha aberta, ou seja, sem qualquer realimentação de controle que requeira potenciômetros, codificadores, geradores tacométricos e assim por diante, evitando com isso os problemas encontrados em sistemas realimentados tal como a instabilidade.

Com a tecnologia atual os motores de passo vêm substituindo os servomotores em aplicações que requerem pequeno e médio torque.

O aspecto que influenciou na popularidade dos motores de passo foi a adaptação desses dispositivos à lógica digital. Conseqüentemente foi possível



estabelecer interfaces entre a CPU de dispositivos computacionais e o sistema movido. Isto é fundamental para as aplicações em robótica e automação. Em resumo um sistema de acionamento por motor de passo é caracterizado por unidades físicas que estabelecem o estágio de potência do sistema e por uma unidade de controle via software que comanda os movimentos do motor. O comando dos movimentos dos motores é constituído ao se estabelecer o sentido de rotação (horário / anti-horário), o número de passos e a velocidade de acionamento. A posição do sistema acionado também pode ser avaliada a partir da contagem do número de passos.

Um sistema alternativo de acionamento de motores de passo é também obtido através de circuitos lógicos discretos que comandam transistores de saída e as bobinas do motor.

Motores de passo podem ser vistos como motores elétricos sem comutadores. Normalmente todos os enrolamentos do motor são parte do estator, e o rotor é, ou um ímã permanente, ou um bloco cilíndrico dentado de material magnético de baixa retentividade, no caso de motor de relutância variável. Todas as comutações são feitas externamente pelo controlador do motor e, tipicamente, os motores e controladores são projetados de tal forma que o motor possa permanecer parado numa posição ou ser rotacionado em um sentido, ou noutro.

1.2 Vantagens e desvantagens do motor de passo

As vantagens na aplicação de automação, robótica e outros são:

- ângulo de rotação do motor é proporcional ao pulso aplicado;
- excelente reposta ao comando de início, parada e reversão do motor;
- ampla faixa de velocidade de rotação pode ser obtida, uma vez que a velocidade é proporcional a frequência de pulsos aplicados;

- posicionamento preciso;
- opera em velocidades muito baixas com rotação sincronizada com uma carga acoplada diretamente ao eixo;
- motor tem um torque máximo com eixo parado quando as bobinas são energizadas;

Como desvantagens dos motores de passo pode-se mencionar:

- Ressonâncias podem ocorrer se não forem adequadamente controladas;
- Não é fácil ser operado com velocidades extremamente altas;

1.3 Aplicação dos motores de passo

Os motores de passo são usados principalmente em máquinas que requerem movimentos pulsados. Grandes aplicações dos motores de passo no dia a dia são nas impressoras, nos computadores, nas máquinas de preenchimento de cheques, nas máquinas de caixa de banco, nas fotocopiadoras, scanners, etc.

Nos computadores mais antigos o motor de passo híbrido era usado para movimentar o cabeçote de leitura/gravação das HDs. Normalmente a polia do motor era acoplada à uma fita de aço bastante fina e flexível que se enrolava e desenrolava tracionando um mecanismo para movimentar o braço onde estão as cabeças magnéticas. Mecanismo semelhante era usado para movimentar a cabeça de leitura/gravação dos disquetes. Atualmente, no entanto, a movimentação do braço que contém as cabeças de leitura/gravação das HDs foi substituído por um mecanismo que usa um motor denominado “voice coil”. Chama-se “voice coil” porque é semelhante ao sistema usado para o acionamento dos cones de alto falantes. Entretanto nos “drivers” de disquetes o motor de passo híbrido foi substituído pelo motor “clawpole” e o mecanismo de fita de aço foi substituído por



um conjunto com rosca sem-fim , tornando muito mais compacto o “driver” de disquete.

Nas impressoras mais antigas usava-se um motor de passo para a movimentação do cabeçote de impressão, um motor para a movimentação da fita de tinta, um motor para o giro do cabeçote de caracteres e um motor para a alimentação do papel. Porém nas impressoras mais modernas, matricial ou jato de tinta, usa-se apenas dois motores de passo, sendo um para a alimentação do papel e outro para a movimentação do cabeçote de impressão. Nas impressoras matriciais grandes normalmente usa-se um motor híbrido para a alimentação do papel e um motor “clawpole” para a movimentação do cabeçote de impressão

Algumas máquinas que usam motores de passo são apresentadas a seguir:

a) Periféricos de computador

Função

Disquetes	Posicionamento da cabeça magnética
Impressora	Acionamento do cabeçote
Impressora	Alimentação do papel
Plotter	Posicionamento dos eixos x-y

b) Máquinas comerciais

Leitora de cartões	Posicionamento de cartões
Máquina copiadora	Alimentação do papel
Sistema bancário	Alimentação do papel
Máquinas de escrever	Posicionamento do cabeçote
Máquina copiadora	Posicionamento da lente

c) Controle de processos

Ajuste do carburador	Controle da marcha lenta
Linha de montagem	Posicionamento de peças
Semicondutores	Posicionamento do chip para colagem
Correios	Posicionamento e alimentação de cartas

d) Máquinas ferramentas

Fresadoras	Posicionamento x-y-z da mesa
Furadeiras	Posicionamento x-y da mesa
Retíficas	Avanço do rebolo

Algumas impressoras de uso comum que utilizam motores de passo:

Impressora – marca/modelo	Motor de alimentação do papel	Motor do cabeçote de impressão
Elebra / Mônica	Minebea Co. Ltd. Modelo – 17BB-H252-04 Tipo – clawpole	Minebea Co. Ltd. Modelo – 15PM-K014-02 Tipo - híbrido
Elebra / Emilia	Minebea Co. Ltd. Modelo - 23BB-H002-14 Tipo - clawpole	Minebea Co. Ltd. Modelo – 23LM-C004-04 Tipo - híbrido
IBM – Lex Mark	Minebea Co. LTD. Modelo – 42SPM24DJC Tipo - clawpole	Motor de corrente contínua
Grafix	ALKON Tecnologia Ltda. Tipo - clawpole	ALKON Tecnologia Ltda. Tipo - clawpole

Panasonic KX- P1624	Marca (sem informação) Modelo – PJJQ113ZA-P Tipo - clawpole	Kyushu Matsushita Elect. Modelo – PJJQ114ZA-K Tipo - híbrido
Epson Stylus Color 600	Shinano Kenshi Co. Ltd. Modelo – STP- 42D144 Tipo – híbrido	Epson Modelo EM-257 Tipo - híbrido
Epson Stylus Color IIs	Minebea Co. Ltd. Modelo-PM425-096-EPC6 Tipo - clawpole	Epson Modelo – EM-234 Tipo - clawpole
Elebra / Olivia	Minebea Co. Ltd. Modelo – 17BB-H252-04 Tipo - clawpole	Minebea Co. LTD. Modelo – 15PM-K014-02 Tipo - híbrido
Cânon / Elgin BJC-4550	MITSUMI Modelo- M42SP-4N-QH4 Tipo - clawpole	MITSUMI Modelo- M42SP-4N-QH4 Tipo - clawpole

1.4 Classificação de motores de passo

Os motores de passo existentes no mercado podem ser classificados em:

- Motor de passo de relutância variável;
- Motor de passo de imã permanente de pólo saliente e “claw pole”;
- Motor de passo híbrido;

Os mais utilizados são os de imã permanente e híbrido. No desenvolvimento de um projeto de acionamento o critério de escolha deve inicialmente ser baseado em um motor de menor custo, que é o de imã permanente. A escolha de classes alternativas será fundamentada no grau de sofisticação do projeto.



1.5 Revisão bibliográfica

Atualmente há fontes bibliográficas importantes no campo de motores elétricos. Dentre estas fontes pode-se incluir um livro Kenjo(1984), que praticamente descreve todos os tipos de motores elétricos e dá algumas informações sobre quem os produz. Também mostra suas aplicações no ramo de engenharia automotiva, na vida doméstica, na informática, nas indústrias, na “mecatrônica”, nos brinquedos e na área médica. Entretanto as discussões referentes ao funcionamento e acionamento elétrico é apresentada de forma sucinta.

Por outro lado, sobre motores elétricos, outro livro do mesmo autor (KENJO,1984), trata apenas dos motores elétricos de passo, onde é muito bem narrada a história deste tipo de motor desde a sua invenção até as formas atuais. Apresenta também o funcionamento e circuitos destes motores, mas de forma, também, bastante simplificada. São apresentadas mais fotografias do que cortes destes motores, os quais são necessários para mostrar detalhes internos. E, ainda mais, os circuitos de acionamento são apresentados prontos, não mostrando como foram obtidos. Alguns detalhes eletromagnéticos e estruturais também são tratados.

Mas outras fontes também existem que tratam do funcionamento dos motores de passo, assim do seu acionamento, mas de forma superficial, como o site <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/> . Outros sites sobre este assunto que oferecem algumas informações úteis e que podem ser facilmente acessados são: <http://www.anaheimautomation.com/intro.htm> <http://www.droids.engsoc.carleton.ca/text/stepping> . Porém, é de pouca ajuda para a determinação dos parâmetros de acionamento destes motores.

Catálogos de fabricantes, com o objetivo de fornecer informações sobre passo, corrente nominal, tensões, frequências de ressonância e características de torque, são muito bem apresentadas por Shinano, Minebea, Alkon, Epson, Sankyo, Sanyo, Tamagawa, Superior Electric, Berger-Lahr, Panasonic, Mitsumi,

Offanengo, e muitos outros. Entretanto, nem o funcionamento é explicado de forma clara e completa, nem o projeto de circuitos de acionamento deste tipo de motor é tratado.

A dinâmica dos motores de passo é analisada também por Kenjo(1984), que utiliza modelos para analisar o fenômeno oscilatório e o amortecimento eletromagnético nestes motores. Obtém deste modo equações diferenciais não lineares que em seguida são linearizadas usando adequação de parâmetros. Mostra também as equações expressas graficamente. Ainda dentro da análise dinâmica, as características de torque em função da frequência de excitação é analisada. Uma análise do amortecimento mecânico também é apresentada.

Outra publicação importante, que trata especificamente sobre o acionamento de motores de passo usando o computador, é apresentada por Anderson(1996) que descreve bem, mas não muito com muito detalhes, como usar a porta paralela para acionar motores de passo.

E, também, nada mais importante que o livro de Gadre(1991) que possui informações muito bem claras sobre a programação da porta paralela do computador.

Outros livros também fizeram parte deste estudo como aquele de Idoeta(1999) sobre álgebra booleana.

Com referência à parte eletrônica da pesquisa, dois bons livros foram utilizados(TOCCI,2000 e BOYLESTAD,2000), os quais tratam respectivamente de sistemas digitais, utilizando álgebra booleana, e de circuitos eletrônicos, como aqueles utilizados neste trabalho. Porém, especificamente sobre aplicações para motores de passo, o assunto não é tratado.

Livros, principalmente em língua portuguesa, que tratam de motores de passo não é fácil de se encontrar, mesmo aqueles específicos sobre máquinas elétricas, conforme pode ser verificado em Del Toro(1999). Entretanto, algumas informações sobre controle de motores em geral, pode ser obtida no livro de McIntyre(1991).

As revistas Saber Eletrônica, também constituíram boa fonte de informações para esta pesquisa desenvolvida, onde são encontrados artigos sobre quase todos os assuntos abordados neste trabalho, porém de forma simples e sucinta.

1.6 Objetivos e metodologia

Os objetivos deste trabalho são:

- a) explicar minuciosamente o funcionamento dos motores elétricos de passo;
- b) explicar minuciosamente as formas de acionamento dos circuitos elétricos destes motores;
- c) propor um roteiro para o acionamento dos motores de passo usando a porta paralela do computador;
- d) propor um roteiro para a obtenção de um circuito sequencial, usando álgebra booleana para o acionamento dos motores de passo;
- e) montar uma interface para o acionamento dos motores de passo utilizando o computador.

A metodologia adotada para a realização das diversas etapas deste trabalho foi:

- a) pesquisa bibliográfica abrangente com vistas a recolher informações disponíveis para um roteiro de projeto. Esta pesquisa foi realizada em diversas bibliotecas como da USP, UNICAMP, ITA, UNIFEI e UNESP, além de consulta a sites da Internet.
- b) Estudo aprofundado do funcionamento destes motores para descobrir detalhes críticos;

c) Extensivo trabalho de desmontagem e cortes de motores existentes no mercado com vistas a comparar as suas diversas construções mecânicas e eletromagnéticas;

d) Consultas a catálogos de fabricantes com vistas a estudar e comparar os diversos parâmetros entre eles;

e) Elaboração de um roteiro para o projeto, bem pormenorizado, a fim de obter o circuito de acionamento destes motores;

f) Projeto e construção do circuito eletrônico seguindo o que foi proposto para efeito de comprovação.



2 MOTOR DE PASSO DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL (RV)

2.1 Funcionamento do motor RV

Este tipo de motor de passo existe há muito tempo e é provavelmente o tipo mais fácil de se entender do ponto de vista estrutural. A Figura 2.1 mostra uma seção transversal deste tipo de motor com rotor de pólos salientes numa posição de equilíbrio estável. Entretanto a bobina que produz o campo magnético do estator não está energizada.

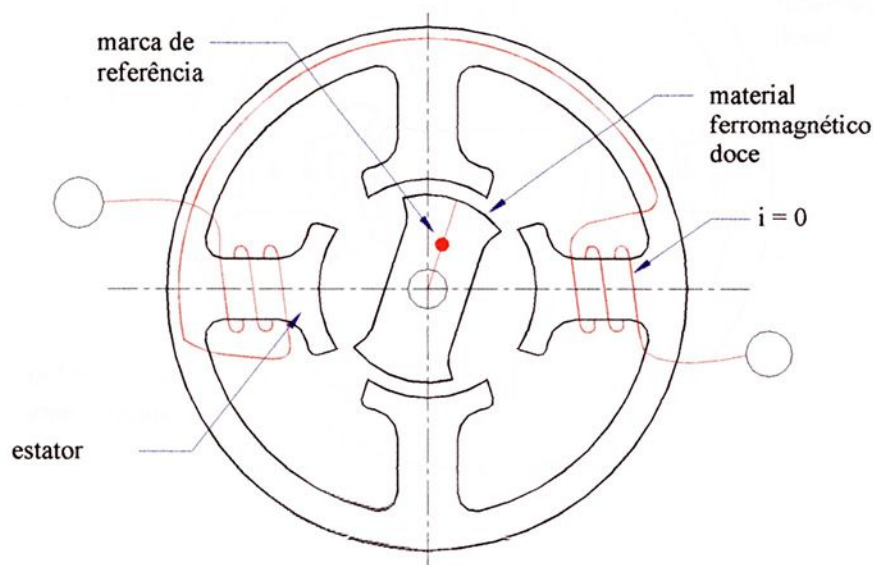


FIGURA 2.1 - Rotor em equilíbrio estável – estator não energizado.

Com a energização da bobina o rotor é atraído para a posição de equilíbrio mostrada na Figura 2.2. Observar que não há carga externa aplicada no eixo do rotor neste caso.

O motor de relutância variável consiste de um rotor dentado e de aço com baixa remanência ou baixo magnetismo residual. Quando os enrolamentos do estator são energizados com corrente contínua os pólos se magnetizam e a rotação do eixo ocorre porque os pólos salientes do rotor são atraídos em direção aos pólos energizados do estator.

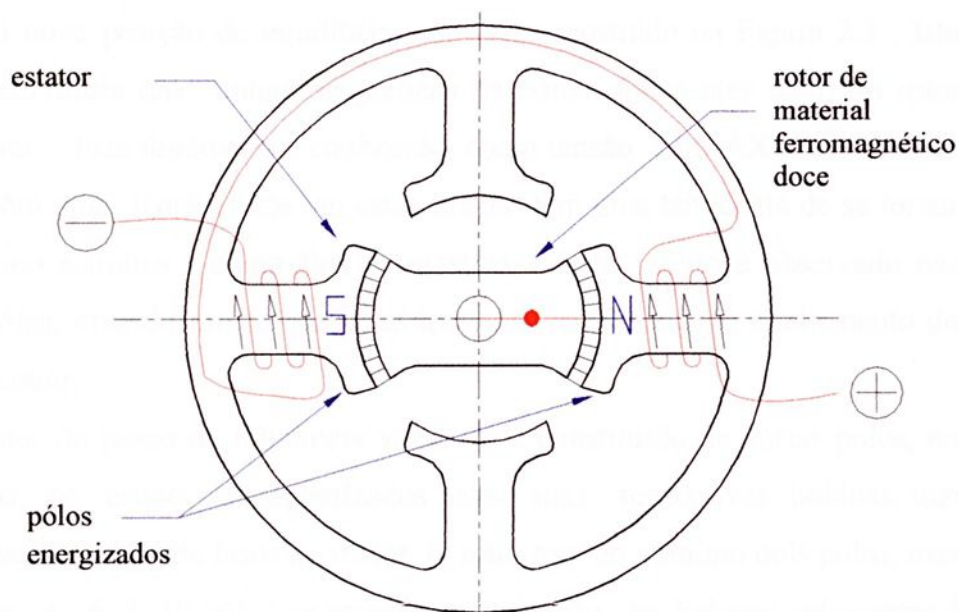


FIGURA 2.2 - Rotor em equilíbrio estável – estator energizado.

Com relação ao campo magnético do estator, este poderia ter qualquer polaridade. A atração que o campo magnético produzido pelo estator exerce sobre o material ferromagnético do rotor é devido a geração de um campo

magnético no rotor, oposto aquele do estator. Tal fenômeno pode ser facilmente explicado pelas leis da física.

Caso haja um torque externo aplicado ao rotor este não mais ficará alinhado com o eixo polar do estator. Este torque externo pode ser o torque de uma carga, ou o torque devido a um desequilíbrio de massa do rotor, ou ainda, por causa de um torque de atrito, mas todos eles vão gerar o desalinhamento do rotor, conforme mostrado na Figura 2.3.

Então quando os pólos do rotor e do estator estiverem alinhados, a relutância magnética do circuito é minimizada e neste estado há uma posição de equilíbrio. Caso o rotor se mova desta posição de equilíbrio, devido a algum torque externo ser aplicado ao eixo do rotor, um novo torque é aplicado ao eixo do rotor para restabelecer a nova posição de equilíbrio, conforme mostrado na Figura 2.3. Isto resultará na curvatura das linhas magnéticas na borda dos dentes tanto do rotor como do estator. Este fenômeno é conhecido como tensão de MAXWELL; linhas magnéticas têm uma tensão forte, ou estas linhas têm uma tendência de se tornar tão curtas como estreitas (como fios de elásticos). Este efeito é observado nas bordas dos pólos, criando um torque contrário para restabelecer o alinhamento do rotor com o estator.

O motor de passo de relutância variável é constituído de várias pólos, ou pares de pólos, no estator e magnetizados pelas suas respectivas bobinas, que podem ser denominadas de fases do motor. O rotor tem no mínimo dois pólos, mas pode ter ainda 4, 6, 8, 10 pólos ou mais. A energização das bobinas adjacentes é que vai definir a forma com que o rotor se movimentará. Quando o motor estiver em funcionamento ele terá sempre uma fase energizada, isto é, sempre existirá um par de pólos, ou mais, do estator gerando um campo magnético e fazendo com que o rotor esteja numa posição de equilíbrio estável. Para que o rotor gire um determinado ângulo em relação a esta posição, ele deverá passar para uma nova posição de equilíbrio estável tão logo uma fase adjacente seja energizada. O

ângulo que o rotor vai girar depende do número de pólos do rotor e do número de pólos do estator. Este assunto será tratado mais adiante em item específico.

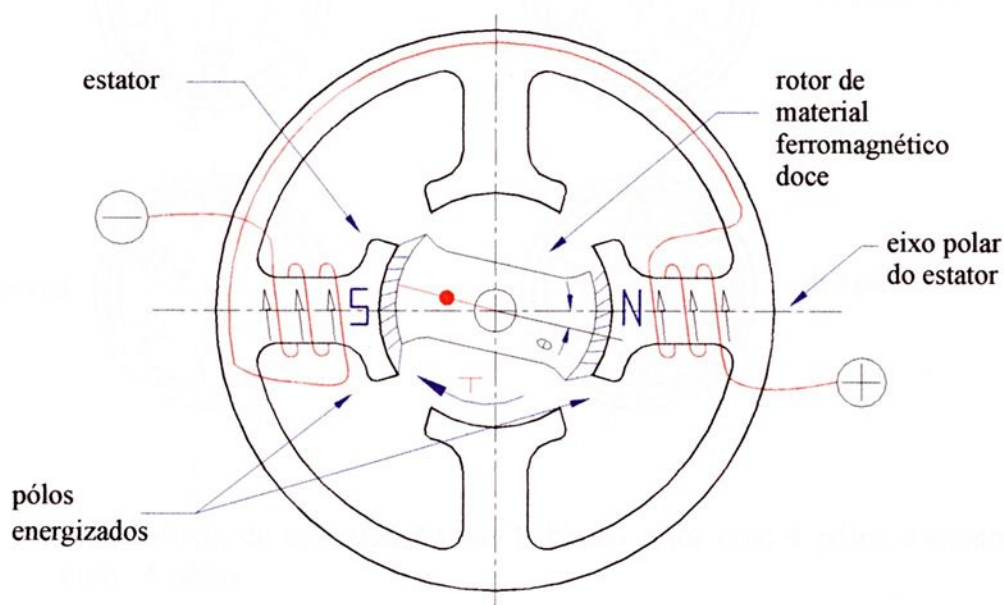


FIGURA 2.3 - Rotor em equilíbrio estável - torque externo aplicado.

Outra secção transversal de um motor RV é ilustrada na Figura 2.4 para facilitar o entendimento do princípio básico deste motor. Neste caso o motor possui três fases e tem 6 pólos no estator, logo cada fase tem os fios enrolados em dois polos do estator.

O entre ferro, cota radial entre o rotor e o estator, deve ser tão pequeno quanto possível afim de produzir alto torque em um pequeno volume do rotor e para obter alta precisão de posicionamento. É claro que o deslocamento da posição de equilíbrio é menor para um entre ferro menor, quando um torque externo é aplicado ao rotor, porque haverá maior concentração de linhas magnéticas. O entreferro em modernos motores é da ordem de 30 a 100 μm .

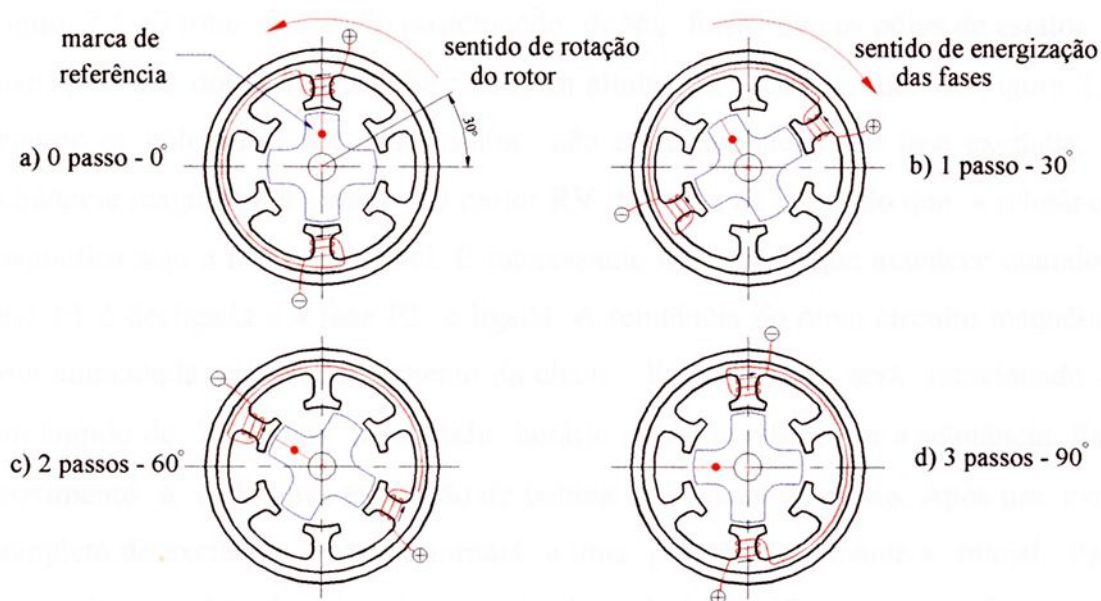


FIGURA 2.4 - Seqüência de energização das bobinas- rotor com 4 pólos e estator com 6 pólos

Quaisquer dois pólos que estejam a 180 graus um do outro, pertencem a mesma fase, isto é, as bobinas em cada pólo oposto são conectadas em serie. Na Figura 2.4 o rotor tem quatro pólos. O núcleo do estator e do rotor são normalmente feitos de aço silício laminado, mas rotores de aço silício maciço também são usados. Tanto o rotor como o estator têm material de alta permeabilidade magnética e são capazes de permitir que alto fluxo magnético passe através deles, mesmo com baixa força magnetomotriz aplicada.

Observa-se que os dois pólos do estator em uma fase podem ter a mesma polaridade magnética ou, então, polaridades opostas. Embora isto tenha significado em outros tipos de motores de passo, neste exemplo é indiferente e os dois pólos têm polaridades opostas. Logo na Figura 2.4 os pólos do estator formam pólos N e S quando eles são excitados.

A corrente em cada fase é controlada ligando-se ou desligando-se as bobinas através de suas respectivas chaves. Se a corrente for aplicada na bobina F1, ou em outras palavras, se F1 for excitada o fluxo magnético ocorrerá como mostrado na

Figura 2.5. O rotor será então posicionado de tal forma que os pólos do estator e quaisquer dos dois pólos do rotor estejam alinhados. Como visto na Figura 2.1, quando os pólos do rotor e do estator não estão alinhados na fase excitada, a relutância magnética é grande. O motor RV trabalha de tal modo que a relutância magnética seja a menor possível. É interessante observar o que acontece quando a fase F1 é desligada e a fase F2 é ligada. A relutância do novo circuito magnético será aumentada após o fechamento da chave. Então o rotor será rotacionado de um ângulo de 30° graus no sentido horário a fim de minimizar a relutância. Este movimento a cada nova excitação de bobina é chamado de **passo**. Após um ciclo completo de excitação o rotor retornará a uma posição semelhante a inicial. Para uma volta completa do rotor ele necessitará se deslocar 12 passos e as fases serão excitadas 12 vezes uma a uma.

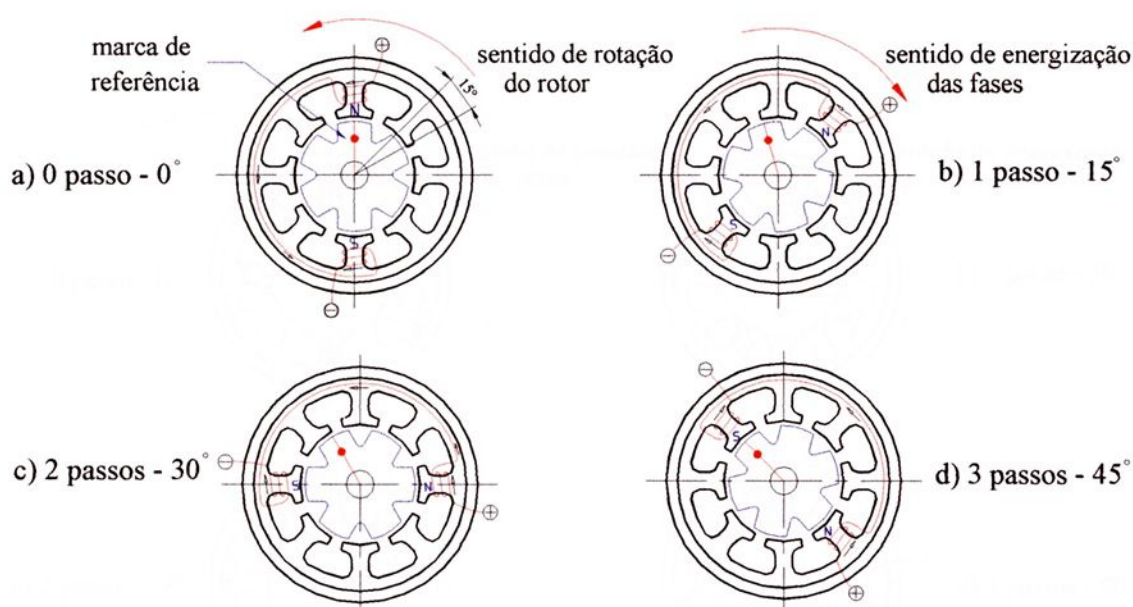


FIGURA 2.5 - Sequência de funcionamento de um motor RV com 6 polos no rotor e 8 polos no estator

Na Figura 2.5 é mostrado outro motor de relutância variável em várias posições do rotor para auxiliar na compreensão do funcionamento deste tipo de motor. Neste caso o estator tem 8 polos, o rotor tem 6 polos e o motor tem 4 fases.

Deve-se observar que, em ambos os casos acima referidos, as excitações das bobinas giram no sentido horário ao mesmo tempo que o rotor gira no sentido anti-horário. No motor da Figura 2.6 as bobinas ainda podem ser enroladas em série, energizando 4 pólos do estator ao mesmo tempo. Como este motor tem 12 pólos no estator ele terá 3 fases. Isto não altera o princípio de funcionamento do motor conforme mostrado na Figura 2.6, mas aumenta o torque gerado pelo rotor, pois os 4 pólos serão energizados ao mesmo tempo. Neste caso, a energização das bobinas e o rotor giram no mesmo sentido

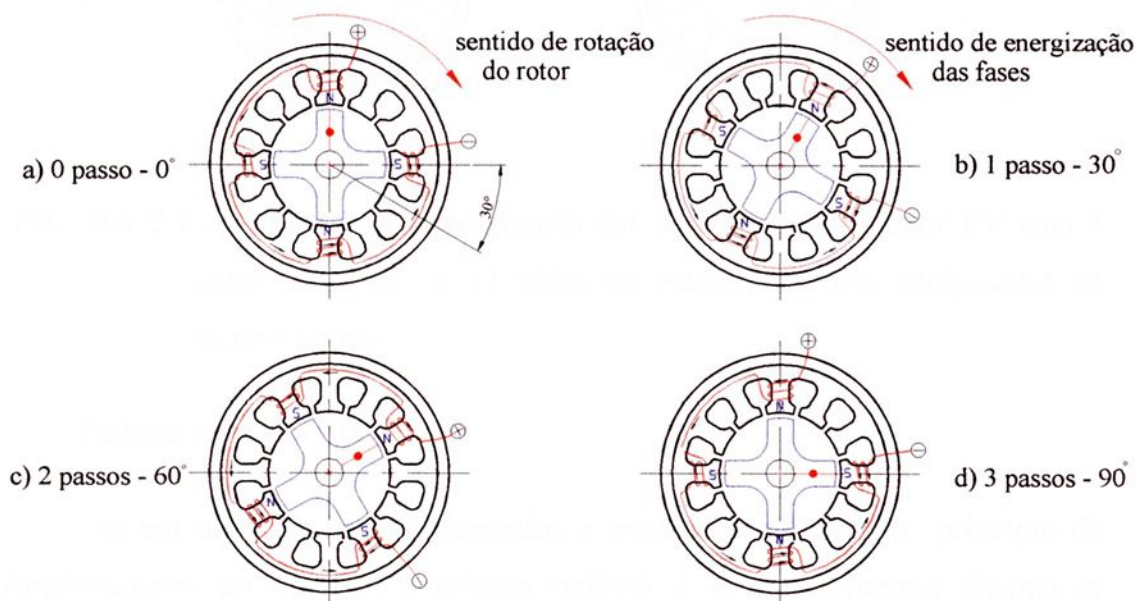


FIGURA 2.6 - Sequência de funcionamento de um motor RV com 4 polos no rotor e 12 polos no estator; 4 polos energizados ao mesmo tempo

A Figura 2.7 mostra um motor com 8 pólos no rotor e 12 pólos no estator, com energização de 4 pólos ao mesmo tempo. Neste caso a energização das bobinas segue no sentido horário ao mesmo tempo que o rotor gira no sentido anti-horário.

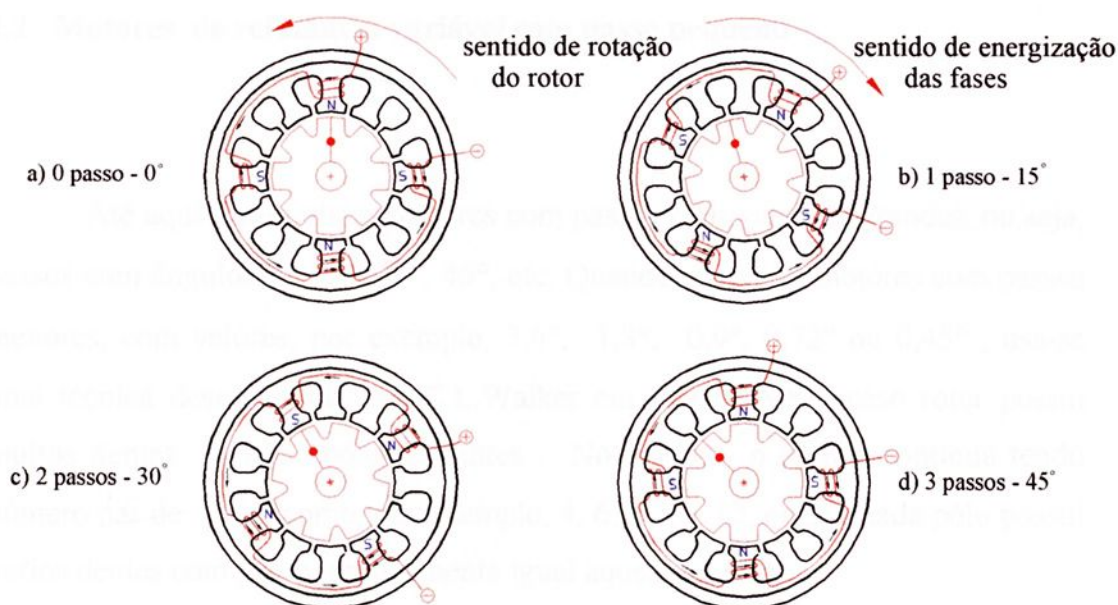


FIGURA 2.7 - Seqüência de energização das bobinas de um motor RV com 8 polos no rotor e 12 pólos no estator; 4 pólos energizados ao mesmo tempo.

Pode-se concluir que:

a) em todos os casos discutidos e mostrados até aqui, o princípio de funcionamento do motor de relutância variável é sempre o mesmo. Quanto ao sentido de rotação do rotor em relação ao sentido de excitação das fases, é muito importante observar a posição relativa entre os pólos do rotor e a posição do próximo pólo do estator a ser energizado.

b) um motor RV não pode ter o mesmo número de pólos no rotor e no estator, quer se energize dois ou quatro pólos ao mesmo tempo. Caso isto aconteça, o rotor e o estator já estarão alinhados em uma posição de equilíbrio quando a próxima bobina for energizada.

2.2 Motores de relutância variável com passo pequeno

Até aqui foram vistos motores com passos relativamente grandes, ou seja, passos com ângulos de 15° , 30° , 45° , etc. Quando se deseja motores com passos menores, com valores, por exemplo, $3,6^\circ$, $1,8^\circ$, $0,9^\circ$, $0,72^\circ$ ou $0,45^\circ$, usa-se uma técnica desenvolvida por C.L.Walker em 1919. Neste caso rotor possui muitos dentes e não pólos salientes. No entanto o estator continua tendo número par de pólos como, por exemplo, 4, 6, 8, 10, 12, etc., e cada pólo possui vários dentes com passo praticamente igual aquele do rotor.

O princípio de funcionamento deste motor de relutância variável é igual aquele estudado para os rotores com pólos salientes. Quando um par de pólos ou mais é energizado, os dentes do rotor alinham-se com os dentes dos pólos do estator de tal forma que uma posição de equilíbrio estável é alcançada. Numa próxima etapa, quando o pólo adjacente for energizado, uma nova posição de equilíbrio estável entre os dentes do rotor e dos pólos do estator é estabelecida. A Figura 2.8 será usada como base para explicar o funcionamento deste tipo de motor de relutância variável. Nesta figura são mostrados detalhes de um motor onde o rotor tem 50 dentes, o estator tem 8 pólos e cada pólo possui 5 dentes. Quando um par de pólos é energizado o campo magnético atrai os dentes do rotor para uma posição de equilíbrio estável, conforme mostrado no detalhe da Figura 2.8. Neste exemplo, o pólo à direita será energizado na próxima posição

de equilíbrio entre o rotor e o estator. Pode-se notar que da posição atual para a próxima posição, quando o rotor girará um passo no sentido horário, o ângulo para atingir a próxima posição de equilíbrio estável é de $1,8^\circ$. Analisando ainda este detalhe, observa-se que $1,8^\circ$ corresponde a $\frac{1}{4}$ do passo do dente até a nova posição de equilíbrio alcançada. O passo do dente neste caso é $7,2^\circ$.

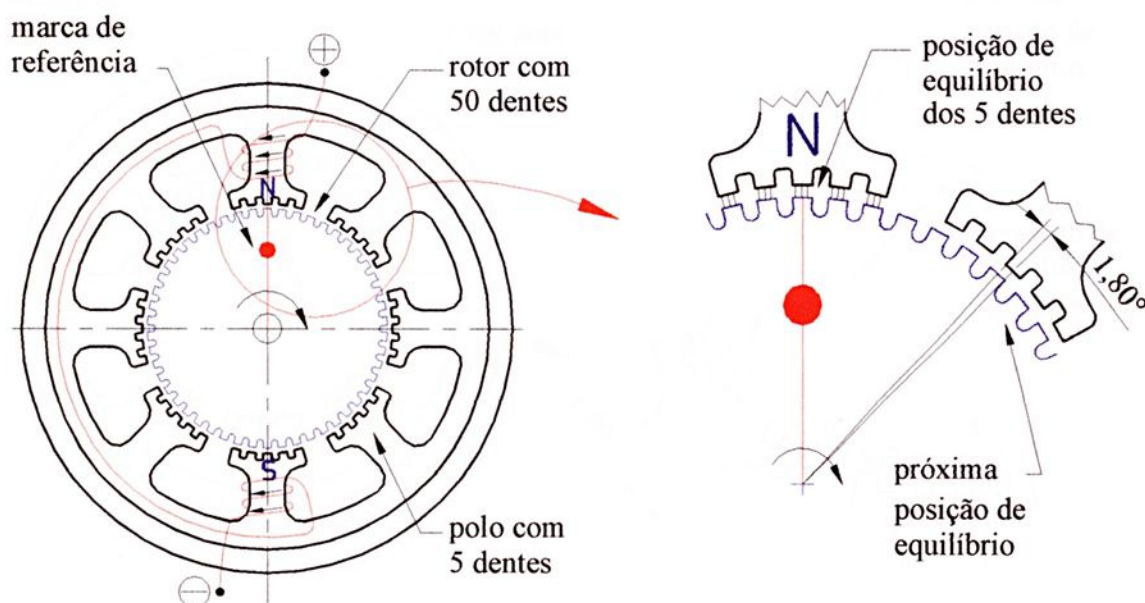


FIGURA 2.8 - Detalhes de um motor RV com rotor e estator dentados

Este motor precisará, para completar o ciclo de excitação das bobinas, ter os próximos três pares de pólos energizados. Portanto este motor tem 4 bobinas independentes e, conseqüentemente, 4 fases. As outras bobinas não foram colocadas no desenho da Figura 2.8 para que se pudesse observar melhor os detalhes do motor. Quando o ciclo de excitação das bobinas for completado o rotor terá girado quatro vezes $1,8^\circ$, ou seja, $7,2^\circ$. Logo para o rotor completar

uma volta será necessário que se energize, em sequência, 200 vezes as bobinas.

Observando ainda a Figura 2.8, conclui-se que o pólo S tem a mesma configuração de equilíbrio que o pólo N. A Figura 2.9 mostra este detalhe.

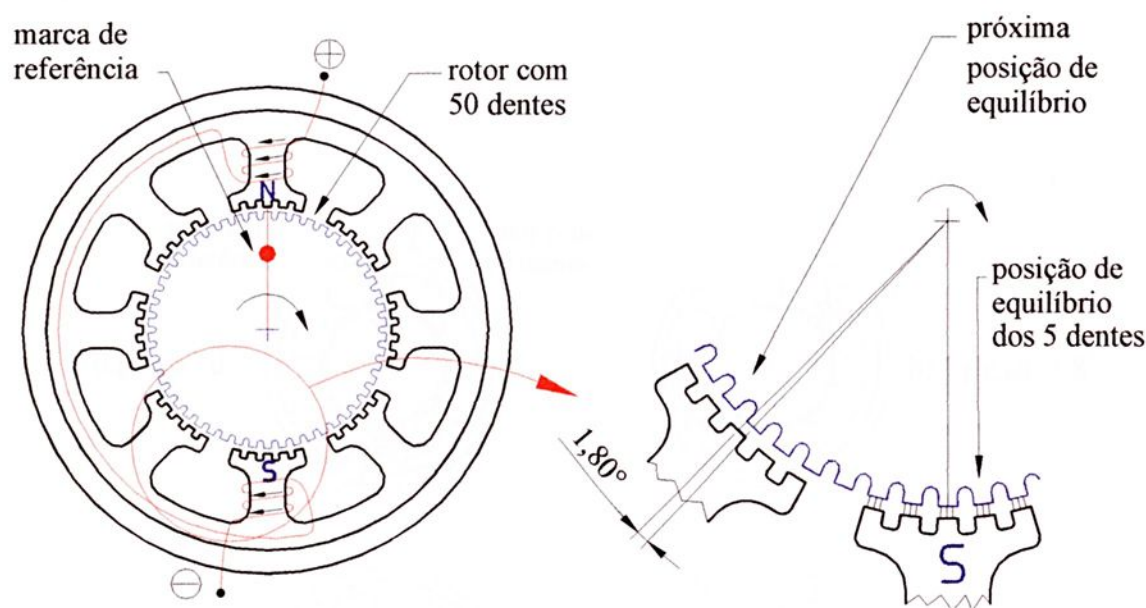


FIGURA 2.9 - Detalhes do pólo S - equilíbrio entre rotor e estator.

Outro ponto importante é em relação aos dois pólos opostos que estão a 90° do eixo dos pólos que estão energizados. Eles também têm os dentes numa posição, em relação aos dentes do rotor, que poderiam estar magnetizados. No entanto eles não estão magnetizados e não podem pois, caso isto ocorresse, seria

necessário magnetizar 4 pólos de cada vez. Isto não é possível, pois ao se energizar os outros 4 pólos adjacentes surgiria uma situação de equilíbrio indiferente no rotor, ou seja, o rotor poderia girar o próximo passo em qualquer sentido, ou então, simplesmente não se deslocar. Logo este motor somente pode ter os pólos energizados de dois em dois, como mostrado nas Figuras 2.8 e 2.9.

A Figura 2.10 apresenta uma seqüência completa onde todas as bobinas foram energizadas pelo menos uma vez completando o ciclo de energização das fases. Observar que as 4 bobinas podem ter um ponto em comum.

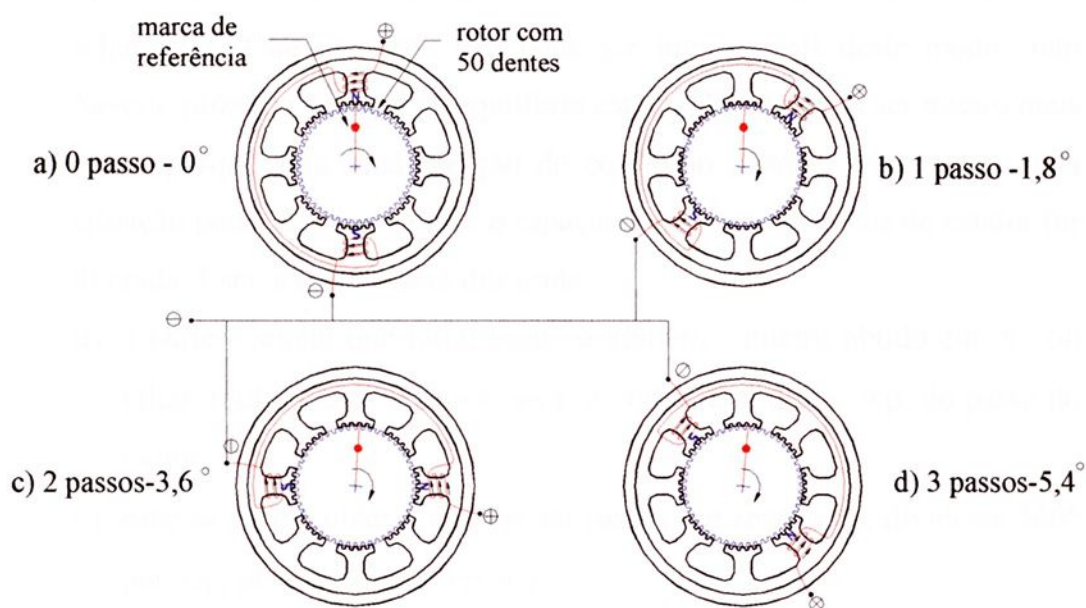


FIGURA 2.10 - Sequência de energização das 4 fases.

2.3 Determinação do passo ou do número de passos por revolução de um motor RV. Método dos 5 passos

Para se determinar o passo em graus, ou o número de passos por revolução, ou por volta, de um motor de relutância variável, procede-se na seguinte ordem:

- a) divide-se 360° pelos número de pólos salientes ou de dentes do rotor (z), obtendo-se αz .
- b) divide-se 360° pelo número de pólos (p) do estator, obtendo-se αp .
- c) divide-se αp por αz obtendo-se o número de dentes entre dois pólos adjacentes. Este número não pode ser inteiro, pois deste modo não haverá próxima posição de equilíbrio estável. E, não pode ser inteiro mais meio, porque será uma posição de equilíbrio instável. No entanto esta situação pode ser resolvida se o espaçamento entre os pólos do estator for alterada. Esta exceção será discutida
- d) a parte decimal que ultrapassar o número inteiro obtido em c, ou faltar, multiplicada por αz será o valor em graus αp do passo do motor.
- e) caso se deseje obter o número de passos por revolução, divide-se 360° por αp , obtendo -se $p/(\text{revol.})$.

Exemplo:

Motor com passos pequenos(mini passos) possui 50 dentes no rotor e 8 polos no estator. Determinar os seus parâmetros.

a) $\alpha z = 360^\circ / 50 = 7.2$

- b) $\alpha_p = 360/8 = 45^\circ$
- c) $z_p = 45^\circ/7.2 = 6.25$
- d) $p = \alpha_z * 0.25 = 1.8^\circ$
- e) $p/\text{revol.} = 360^\circ/1.8^\circ = 200$

Portanto este motor tem passo $p=1.8^\circ$ e 200 passos por revolução.

3 MOTOR DE PASSO DE IMÃ PERMANENTE

3.1 Funcionamento do motor de imã permanente

Os motores de passo de imã permanente sempre possuem um rotor com número par de pólos magnéticos. Em geral os rotores são internos, mas a configuração com rotor externo também existe. Os rotores podem ser de dois tipos:

- com pólos salientes
- com pólos lisos.

Os motores com pólos salientes mais simples são aqueles que possuem dois pólos, isto é, um pólo N e um pólo S defasados de 180° . A Figura 3.1 mostra um motor com dois pólos no rotor e com quatro pólos no estator.

O princípio de funcionamento deste tipo de motor baseia-se na lei da física relativa a atração e repulsão de campos magnéticos. Pólos de nome contrário se atraem e pólos de mesmo nome se repelem, gerando as forças de atração e de repulsão respectivamente. No caso do motor, onde estas forças estão deslocadas do centro do eixo do rotor, elas vão gerar um torque.

Na Figura 3.1 em (a) os pólos do estator, ao serem energizados, formam os pólos N e S que atraem, respectivamente, os pólos S e N do rotor. Esta é uma posição de equilíbrio estável do rotor. Em seguida os pólos do estator, que estão a 90° da posição anterior, foram energizados, conforme mostrado em (b). Nesta nova configuração do estator, os pólos N e S do rotor também foram atraídos para esta posição de equilíbrio estável. O rotor girou 90° no sentido horário. Logo o passo deste motor é também de 90° que é o maior passo possível que um motor pode realizar diretamente no eixo.

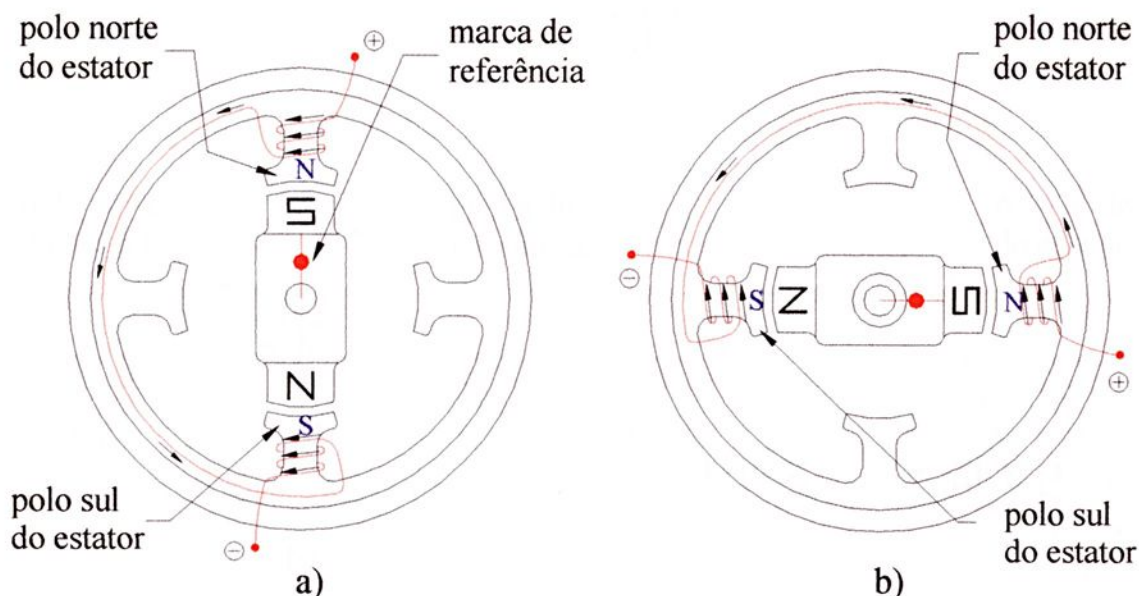


FIGURA 3.1 - Motor de ímã permanente em duas posições de equilíbrio estável

A Figura 3.2 mostra a seqüência de energização e a polaridades das duas bobinas que, neste caso, são também duas fases. No motor com ímã permanente é necessário observar a polaridade dos pólos do estator para que o motor possa girar mais 90° até alcançar outra posição de equilíbrio estável, contrário ao que acontece no motor de relutância variável onde apenas o campo magnético era necessário, sem haver preocupação com a sua polaridade. Esta é pois uma diferença fundamental entre os dois tipos de motores de passo.

Nas posições de equilíbrio da Figura 3.2 os dois enrolamentos das bobinas em (c) e em (d) são os mesmos, mas a corrente foi invertida. Esta operação é necessária para inverter a polaridade dos pólos do estator. No entanto existe a possibilidade de se ter dois enrolamentos com uma derivação central em lugar de um enrolamento apenas. Quando se tem apenas um enrolamento ele é chamado de bipolar e se o enrolamento tiver derivação central ele é chamado de unipolar. Este assunto será analisado em capítulo separado mais adiante.

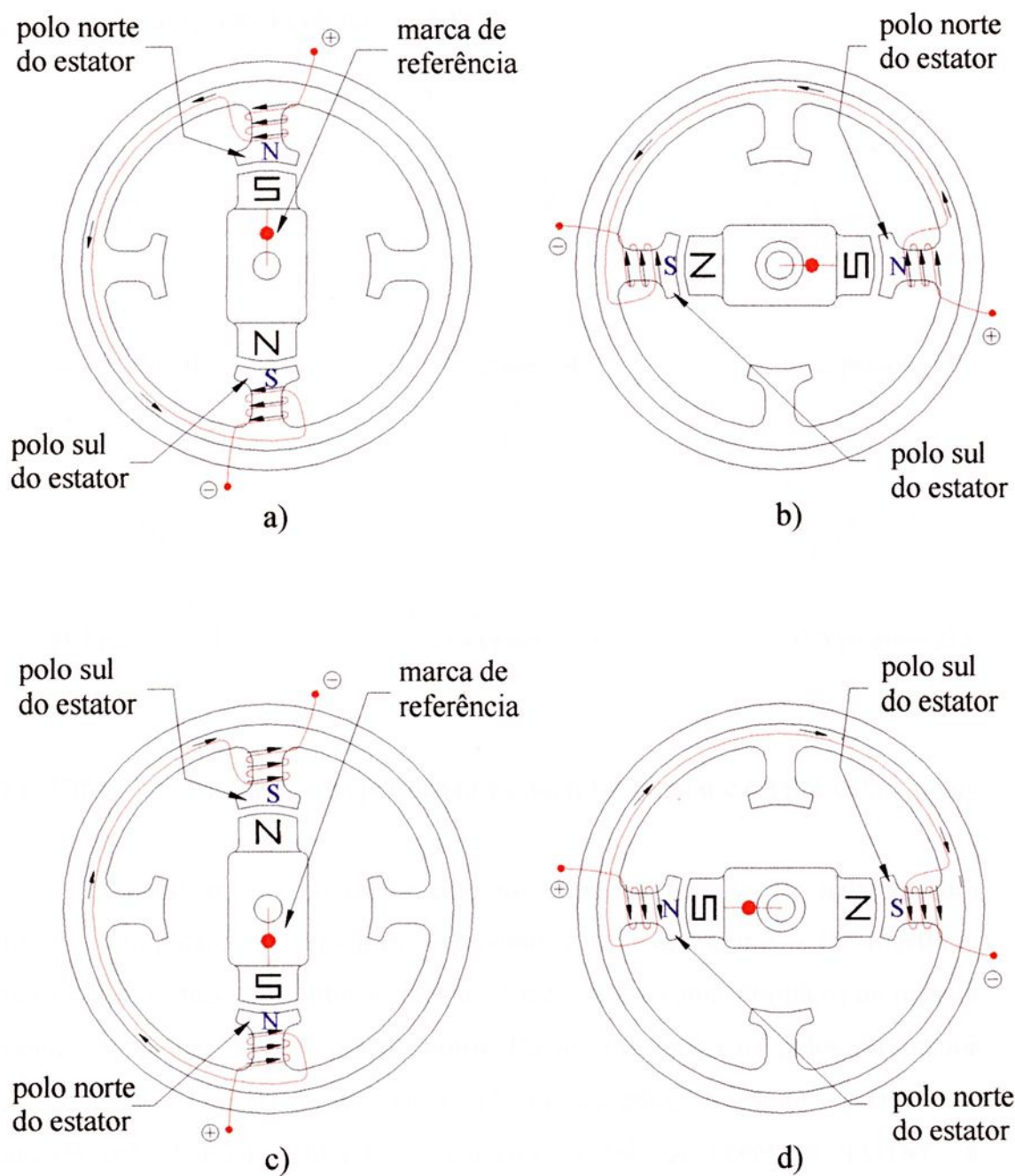


FIGURA 3.2 - Quatro posições de equilíbrio estável - 270° de rotação.

Na Figura 3.3 é mostrado um motor com rotor bipolar, com 8 polos no estator, com 4 bobinas ou 4 fases.

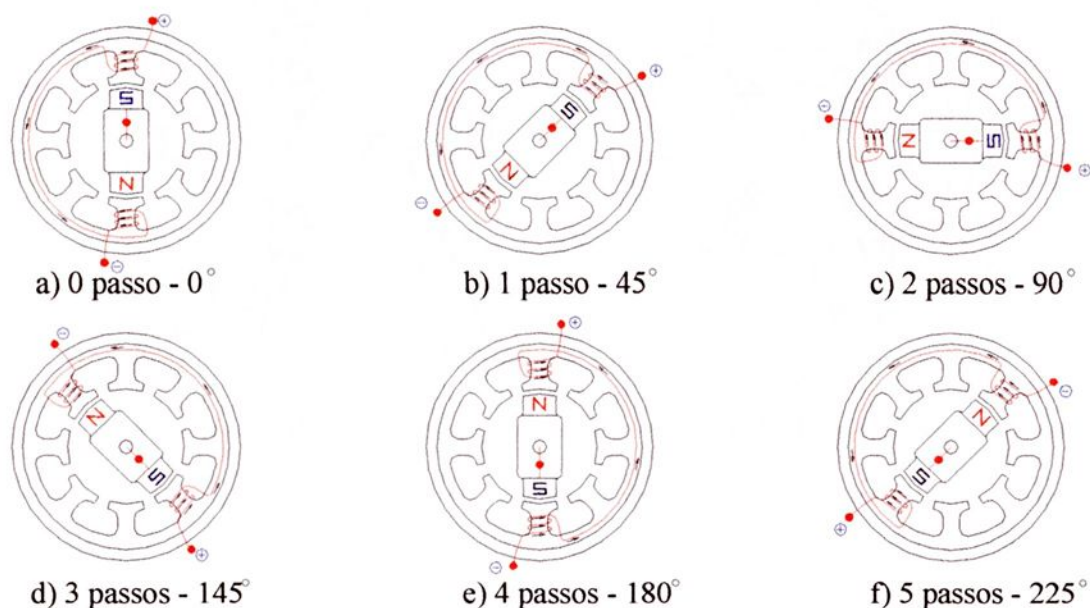


FIGURA 3.3 - Motor de imã permanente com rotor bipolar e estator com 8 polos

Analogamente ao motor com rotor bipolar pode-se ter motores com rotores tetrapolares, hexapolares, octopolares, etc. Na Figuras 3.4 é mostrado outro motor, mas com rotor tetrapolar. Neste caso o rotor tem pólos de mesmo nome colocados a 180° um do outro. Da mesma forma os pólos do estator também devem ser assim dispostos. Os enrolamentos do estator podem ter apenas uma bobina e inverter a corrente quando se necessita inverter a polaridade, ou então, ser feito com uma bobina com derivação central. O motor com rotor tetrapolar tem maior torque motor que aquele com rotor bipolar,

considerando que eles têm mesmas dimensões e mesmo passo, pois existe mais força atuando na periferia do rotor.

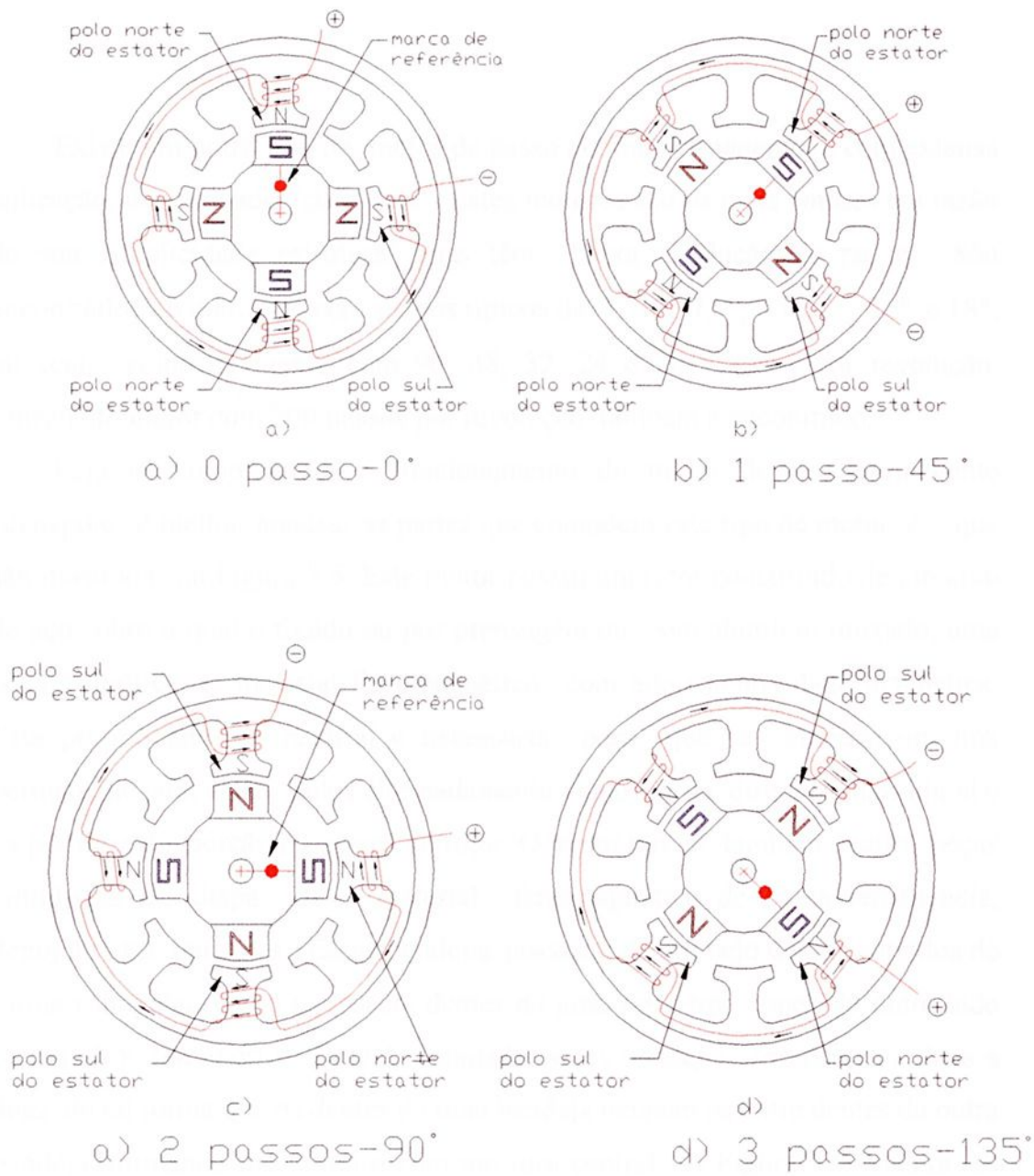


FIGURA 3.4 - Motor com rotor tetrapolar e passo de 45°

3.2 Funcionamento do motor de imã permanente “CLAWPOLE”

Existe um outro tipo de motor de passo de imã permanente e com extensa aplicação, denominado “claw pole”. Estes motores são os mais baratos em razão de sua simplicidade estrutural, mas têm baixa resolução de passo. São encontrados no mercado com passos típicos de $3,75^\circ$, $7,5^\circ$, $11,25^\circ$, 15° e 18° , ou seja, respectivamente com 96, 48, 32, 24 e 20 passos por revolução. Entretanto motor com 200 passos por revolução também é encontrado.

Para se compreender o funcionamento do motor de imã permanente “clawpole” é melhor analisar as partes que compõem este tipo de motor e que são mostradas na Figura 3.5. Este motor possui um rotor constituído de um eixo de aço sobre o qual é fixado ou por prensagem ou com alumínio injetado, uma peça cilíndrica de material ferromagnético com alta retentividade magnética. Esta propriedade do material é necessária para que se obtenha um imã permanente com vários pólos alternadamente dispostos na direção longitudinal e na periferia da porção cilíndrica do rotor. O motor possui também quatro peças cilíndricas de chapa de material ferromagnético de baixa remanência, denominadas bandejas. Essas bandejas possuem de um lado dentes cortados de forma triangular, como se fossem dentes de uma serra tipo copo. No outro lado os cilindros são abertos. Quando montadas estas bandejas se encaixam duas a duas, de tal forma que os dentes de uma bandeja ocupam os entre dentes da outra bandeja, formando um cilindro com um furo central. A Figura 3.6 mostra os detalhes dos “clawpoles”.

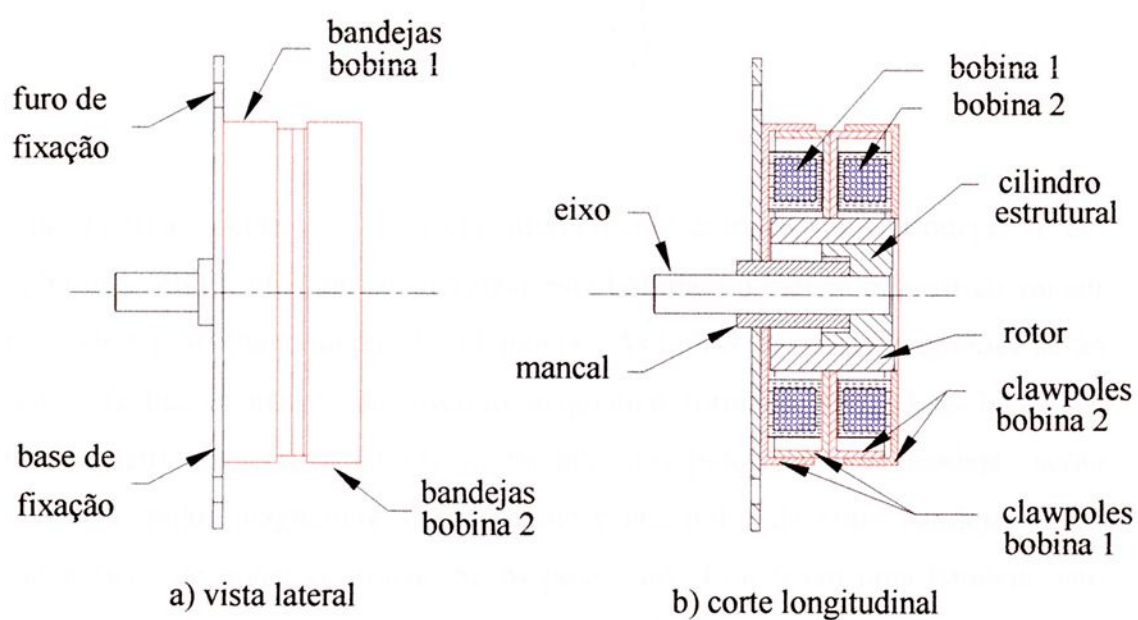


FIGURA 3.5 - Vista lateral e corte longitudinal de um motor "clawpole".

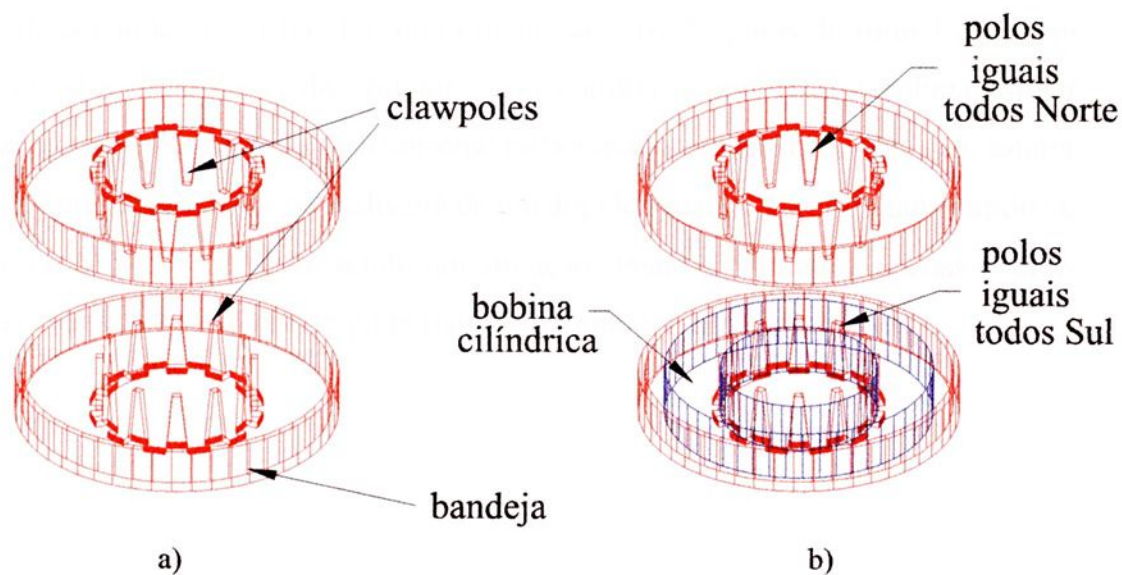


FIGURA 3.6 - Detalhes das bandejas, "clawpoles" e pólos magnéticos iguais.

Uma bobina cilíndrica é colocada internamente entre as duas bandejas e em volta dos dentes. Quando se energizar esta bobina um campo magnético vai ser formado na direção axial das duas bandejas. As linhas de campo magnético serão linhas fechadas através do circuito magnético formado pelas duas bandejas. Conseqüentemente nos dentes, ou melhor, nos pólos de uma bandeja serão formados pólos magnéticos de um nome e nos pólos da outra bandeja pólos magnéticos de nome contrário. Se os pólos são N ou S em uma bandeja, isto dependerá do sentido da corrente na bobina cilíndrica. No caso que está sendo estudado existem 12 polos em cada bandeja e, portanto, 24 polos para a bobina. Está sendo chamado a atenção para o número de pólos da bobina porque o número de pólos do rotor também neste caso será 24, como mostrado na Figura 3.7. Desta forma, caso o rotor seja colocado no furo cilíndrico existente quando as duas bandejas e a bobina forem montadas, os 24 polos do rotor ficarão em frente aos 24 polos do estator em equilíbrio estável, se a bobina estiver energizada. Em seguida, se a corrente na bobina for invertida os pólos do estator se inverterão e o rotor se deslocará de um ângulo igual a 15° para um sentido ou para o sentido contrário, sendo uma situação instável. Portanto, apenas com as duas bandejas o motor não pode funcionar como um motor de passo.

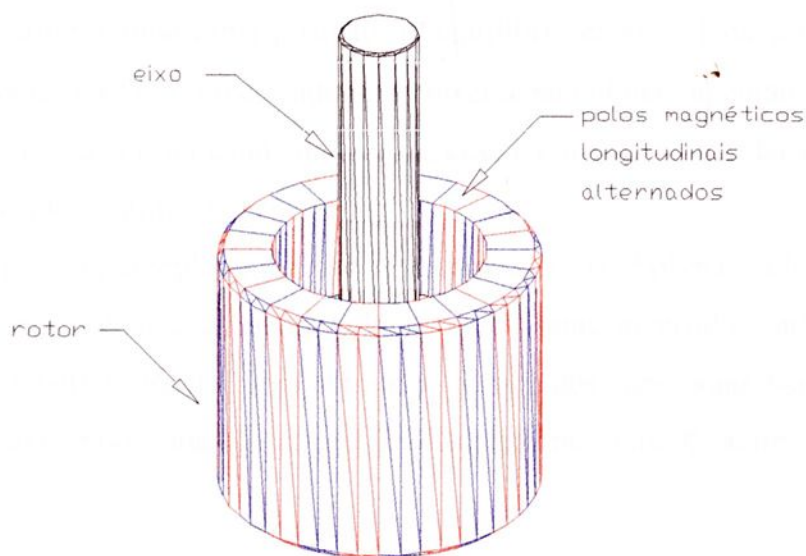


FIGURA 3.7 - Rotor com 24 polos magnéticos longitudinais

No entanto, se mais um conjunto igual a este, isto é, duas outras bandejas e outra bobina forem colocadas no mesmo eixo e justapostas e, ainda, defasadas 7.5° do outro conjunto, como mostrado na vista explodida da Figura 3.8, o motor funcionará como um motor de passo.

A explicação do funcionamento é dada na seguinte ordem:

- energizando a bobina 1 forma-se o campo magnético nos pólos das duas bandejas e o rotor é atraído para uma posição de equilíbrio estável.
- Desligando a bobina 1 e ligando a bobina 2 um novo campo magnético será formado nos pólos das outras 2 bandejas. Estas estarão defasadas de 7.5° em relação às 2 primeiras. Os pólos do rotor serão atraídos para esta nova posição estável girando um ângulo de 7.5° . Deve-se observar que apenas metade do comprimento axial do rotor participa na geração de torque quando uma bobina é energizada.
- Numa nova etapa a bobina 2 é desligada e a bobina 1 é novamente energizada mas, agora, com a corrente invertida. O rotor girará então mais

7.5° para atingir uma nova posição de equilíbrio estável. Esta inversão da corrente pode ser feita, invertendo-se a corrente na bobina, ou então passando uma corrente na outra metade da bobina, caso o enrolamento tenha sido feito com derivação central ou “center-tap”.

- d) Finalmente, para completar o ciclo de energização das bobinas, a bobina 1 é desligada e a bobina 2 é energizada com a corrente invertida para que um campo magnético oposto seja formado nos pólos das suas bandejas. A inversão do campo é análoga ao que foi discutido no item © acima referido

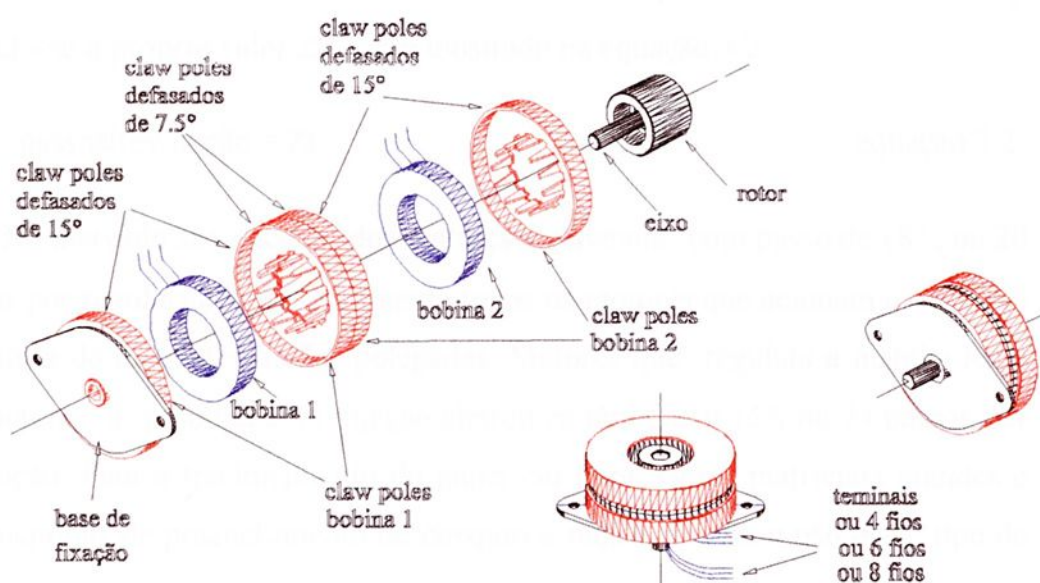


FIGURA 3.8 - Vista explodida de um motor clawpole

3.3 Passo de um motor tipo “clawpole”

Para se obter o passo de um motor “clawpole” é necessário conhecer o número de dentes de cada bandeja e multiplicá-lo por 4. Este será o número total de dentes Z_t . O ângulo do passo de um motor “clawpole” será dado pela equação 3.1 .

$$\alpha_p = \text{Passo} = 360^\circ / Z_t \quad \text{equação 3.1}$$

Para se obter o número de passos por revolução divide-se 360° por α_p obtendo-se o próprio valor Z_t , como mostrado na equação 3.2 .

$$\text{passos/revolução} = Z_t \quad \text{equação 3.2}$$

No mercado são encontrados motores “clawpole” com passo de 18° , ou 20 passos por revolução em praticamente todos os motores que acionam o cabeçote de leitura de disquetes de 3,5 polegadas. Motores que regulam a marcha lenta em motores à gasolina com injeção eletrônica têm passo 15° , ou 24 passos por revolução. Para o tracionamento do papel em impressoras matriciais grandes e em máquinas de preenchimento de cheques é muito comum o uso deste tipo de motor com passo de 7.5° , ou 48 passos por revolução. Algumas impressoras jato de tinta usam para a movimentação do cabeçote motores com passo de 3.75° , ou com 96 passos por revolução. Existe também motores com passo 11.25° , ou com 32 passos por revolução (OFFANENGO - PM32-2013-047D6). Mais raramente encontra-se motor com passo 1.8° , ou com 200 passos por revolução (Mitsumi – M68SP-4).

4 MOTOR DE PASSO – HÍBRIDO

4.1 Funcionamento do motor híbrido

O motor híbrido em relação ao motor de imã permanente e ao de relutância variável é o de custo mais elevado, porém este apresenta melhores características com relação a resolução de passo, torque e velocidade. Este motor combina as melhores características tanto do motor de relutância variável como o de imã permanente. Passos com ângulos de $3,6^\circ$ a $0,9^\circ$, ou seja, 100 a 400 passos por revolução são muito comuns. Também, passo de $0,45^\circ$ ou 800 passos por revolução, é encontrado

O rotor é dentado como o de relutância variável e contém um imã permanente com o eixo norte-sul disposto de forma concêntrica com o eixo do motor. Os dentes do rotor têm a função de estabelecer um caminho para guiar o fluxo magnético através do entreferro e fechá-lo através do núcleo do estator. Esta característica faz com que haja torque mesmo sem energização das bobinas. O torque com as bobinas energizadas e eixo parado melhora as características de torque do motor, quando comparado com os tipos de relutância variável e de imã permanente.

O motor híbrido possui um rotor semelhante aquele usado no motor de relutância variável de passo pequeno, isto é, o rotor é dentado. No entanto uma diferença fundamental existe entre os dois. No motor RV os dentes são longitudinalmente dispostos em toda a extensão do rotor. Entretanto, no motor híbrido os dentes são dispostos longitudinalmente até uma metade da extensão do rotor. Na outra metade eles são ainda longitudinalmente dispostos, mas defasados de meio passo de dente. Os dentes de uma metade ficam em frente as ranhuras da outra metade, e vice versa. O rotor contém um imã permanente com

o eixo norte-sul posicionado de forma concêntrica com o eixo do motor, conforme mostrado na Figura 4.1 .

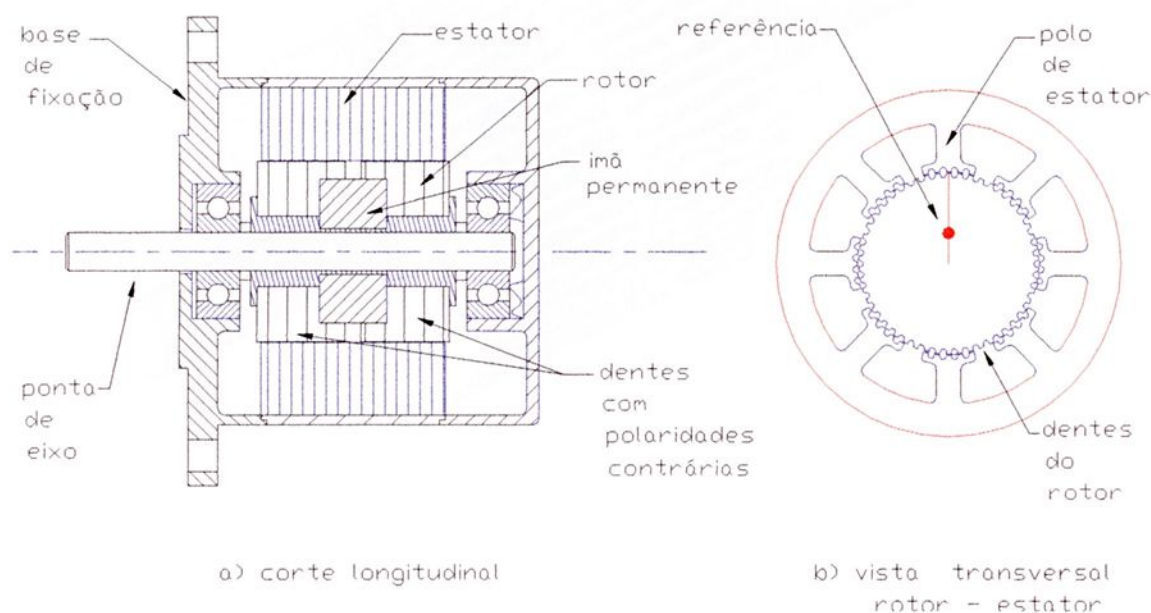


FIGURA 4.1 - Corte longitudinal e vista transversal de um motor híbrido

O funcionamento do motor híbrido é explicado através dos seguintes passos:

- energizando um enrolamento ou uma fase, o campo magnético formado nos pólos dentados do estator interagem com os dentes do rotor estabelecendo uma posição de equilíbrio estável do rotor. Nesta situação os dentes do estator ficam radialmente alinhados com os dentes do rotor.
- O pólo do estator onde for gerado um pólo norte atrairá os dentes do pólo sul do rotor, e vice versa. Nesta posição os dentes do rotor e do estator ficarão radialmente alinhados estabelecendo posições de equilíbrio estável.

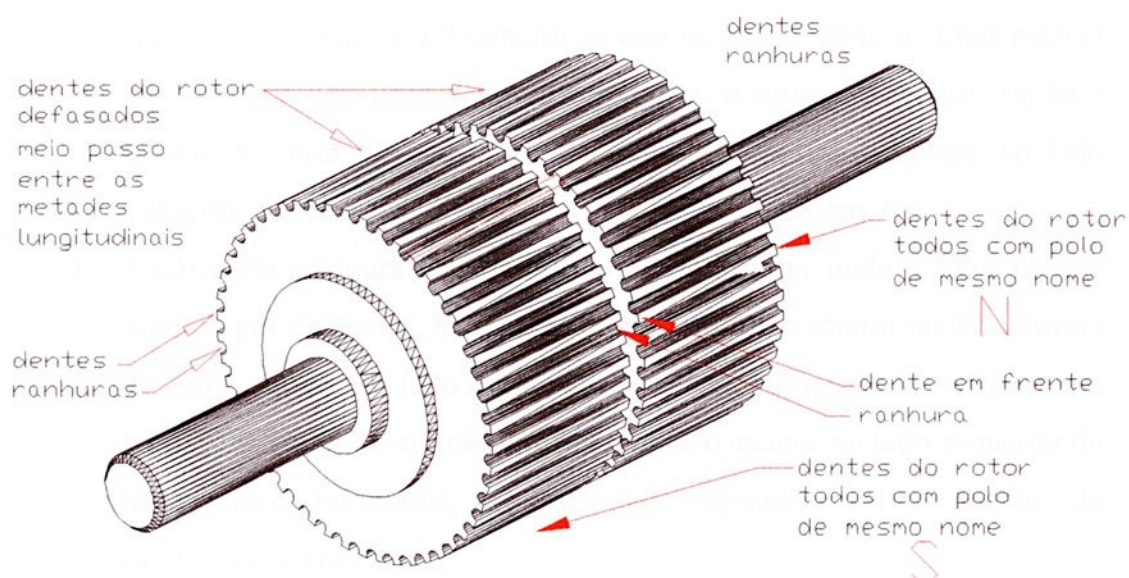


FIGURA 4.2 - Rotor de um motor híbrido

- c) Se o rotor tiver número ímpar de dentes, o estator é sempre energizado gerando apenas dois pólos opostos e de nomes contrários, conforme mostrado na Figura 4.3 em (b). Por outro lado, se o rotor tiver número par de dentes o estator é sempre energizado gerando quatro pólos, opostos dois a dois, isto é, norte oposto a norte e sul oposto a sul, conforme mostrado na Figura 4.4.
- d) Na Figura 4.3 o pólo norte do estator está na vertical e do lado de cima, visto em (b). O pólo sul do rotor está na metade longitudinal do rotor e a direita, que é melhor entendido quando se observa o corte axial visto em (a). Na Figura 4.4 os pólos norte do estator estão na vertical, visto

em (b). O pólo sul do rotor está na metade longitudinal do rotor e a direita; é melhor observar em (a).

- e) Analisando a Figura 4.3 conclui-se que no motor onde o rotor possui número ímpar de dentes, há atração entre o rotor e o estator no lado direito do rotor e do lado de cima. O mesmo acontece no lado esquerdo do rotor e do lado de baixo, ambos vistos em (b).
- f) Analisando a Figura 4.4 conclui-se que no motor onde o rotor possui número par de dentes, há atração entre o rotor e o estator no lado direito do rotor, tanto do lado de cima como do lado de baixo. Ao mesmo tempo também há atração entre o rotor e o estator no lado esquerdo do rotor, mas na horizontal, isto é, do lado esquerdo e do lado direito do estator, visto em (b).

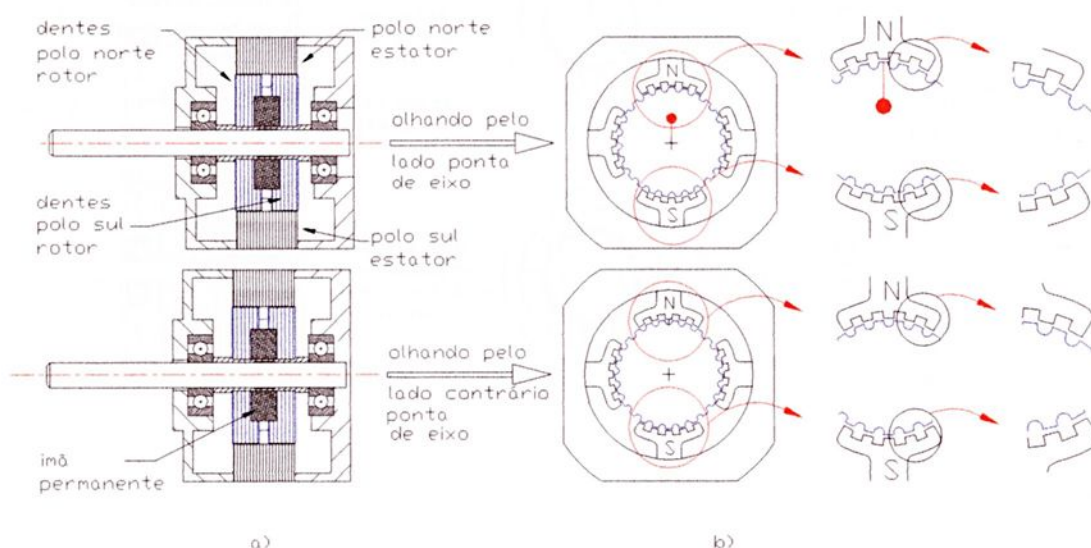


FIGURA 4.3 - Motor híbrido com número ímpar de dentes – 25 dentes

- g) De uma forma simplificada resulta: 1) em rotor com número ímpar de dentes, há equilíbrio estável na metade longitudinal do lado de cima e na outra metade longitudinal, do lado de baixo; 2) em rotor com número par de dentes, há equilíbrio estável em uma metade longitudinal do lado de cima e do lado de baixo, assim como na outra metade longitudinal, a esquerda e a direita.
- h) Esta explicação é válida para a fase que está energizada. Quando a próxima fase for energizada situação semelhante ocorrerá.

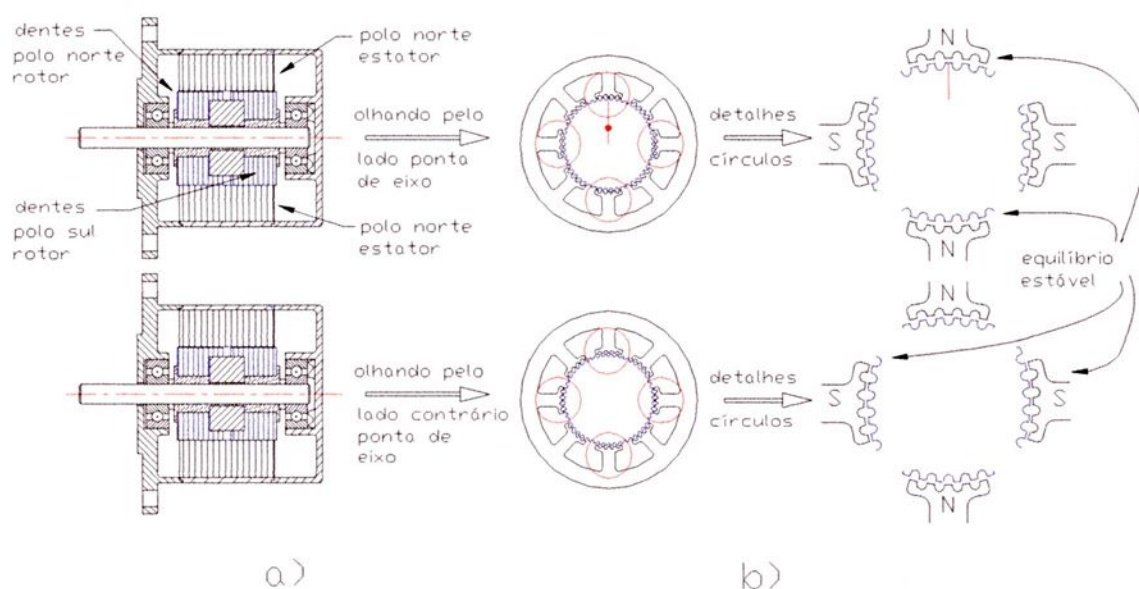


FIGURA 4.4 - Motor híbrido com número par de dentes – 50 dentes.

Para se calcular o passo ou número de passos por revolução de um motor híbrido, procede-se de forma análoga ao que foi feito para o motor de relutância variável. É necessário contar o número de dentes do rotor e o número de polos do

estator . Em seguida utilizando-se da seqüência constituída dos cinco passos esses parâmetros são calculados.

Comparando o motor híbrido com o motor “clawpole”, visualmente nota-se que o híbrido possui uma construção mecânica muito mais robusta. Normalmente, também, utilizam mancais de rolamento, em lugar de bucha autolubrificante.

Por outro lado, existe no mercado motores de relutância variável muito parecidos com determinados motores híbridos. Uma regra boa para se saber qual é tipo de motor em questão é: basta girar , com os dedos, o eixo dos dois motores. Aquele onde o eixo gira praticamente livre, trata-se do motor de relutância variável. Caso o eixo gire com pequenos solavancos trata-se, então, do motor híbrido.



5 FORMAS DE ACIONAMENTO DOS MOTORES DE PASSO

5.1 Introdução

Normalmente o pólo de um estator necessita ter a habilidade de ser norte ou sul alternadamente. A mudança da polaridade é conseguida pela mudança da direção da corrente. Em um acionamento unipolar, cada pólo do estator tem dois enrolamentos, cada um dos quais cria um dos dois pólos magnéticos. Um acionamento bipolar tem apenas um enrolamento e cada pólo é criado pela inversão da corrente que o alimenta. O acionamento bipolar enquanto tem o custo mais alto, resulta num aumento de 60% no torque em baixa velocidade porque todo o cobre no estator está sendo utilizado. Unipolar produz um torque mais alto em velocidades maiores.

Os fatores que influenciam no acionamento dos motores de passo são os seguintes:

- variação da corrente e da direção do fluxo nos enrolamentos;
- controle do valor da corrente nos enrolamentos de forma a possibilitar que os tempos de subida e queda da corrente sejam tão curtos quanto possíveis para estabelecer um bom desempenho do motor;
- para que os motores de passo funcionem requer-se uma mudança da direção do campo magnético em cada fase. Esta mudança é feita mudando a direção da corrente que pode ser implementada através dos acionamentos unipolar e bipolar.

5.2 Acionamento unipolar

O princípio de acionamento unipolar é derivado do fato que a corrente percorre uma bobina somente em uma direção. Normalmente enrolamentos com derivação central (“center-tap”) são utilizados para implementar este tipo de acionamento. O chaveamento deste sistema é bastante simples e barato. Uma desvantagem deste acionamento, contudo, é a sua capacidade limitada de energizar todo o enrolamento de uma só vez. Como resultado o número de ampere/espiras é reduzido de aproximadamente 40% quando comparado com outra tecnologia. Acionamento unipolar é útil para aplicações em frequências relativamente baixas.

A direção do fluxo é invertida fazendo-se com que a corrente passe primeiramente em uma metade do enrolamento e depois na outra metade, como mostrado na Figura 5.1.

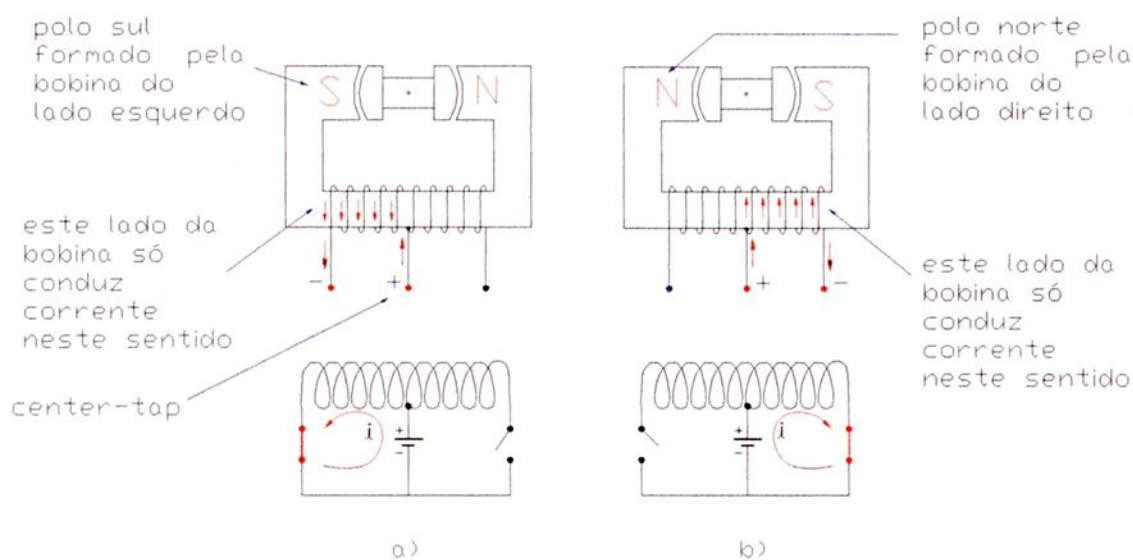


FIGURA 5.1 - Princípio do acionamento unipolar

Para produzir o pólo sul na figura 4(a) energiza-se apenas metade do enrolamento e para produzir o pólo norte (b) energiza-se a outra metade. No entanto poderia ser energizada toda a bobina em (a) e toda a bobina em (b) para produzir as mesmas polaridades, mas com maior intensidade. O problema é que para se acionar desta forma, não seria tão simples como usar apenas duas chaves em cada enrolamento. Motor com acionamento unipolar e derivação central (“center-tap”) tem três terminais por enrolamento, assim um motor com dois enrolamentos terá seis terminais de saída. Cada metade do enrolamento com derivação central é chamada de fase do motor. Portanto um motor com seis terminais terá quatro fases. É muito comum também em lugar dos seis terminais unir os dois terminais do “center-tap” num ponto comum. Desta forma um motor com 6 terminais passa a ter cinco terminais, como o motor “clawpole” Sanyo modelo CP-035 e o motor híbrido Minebea Type 16PM-M014-P1. A Figura 5.2 ilustra um acionamento unipolar implementado com transistores para um motor com quatro fases e enrolamento com “center-tap”.

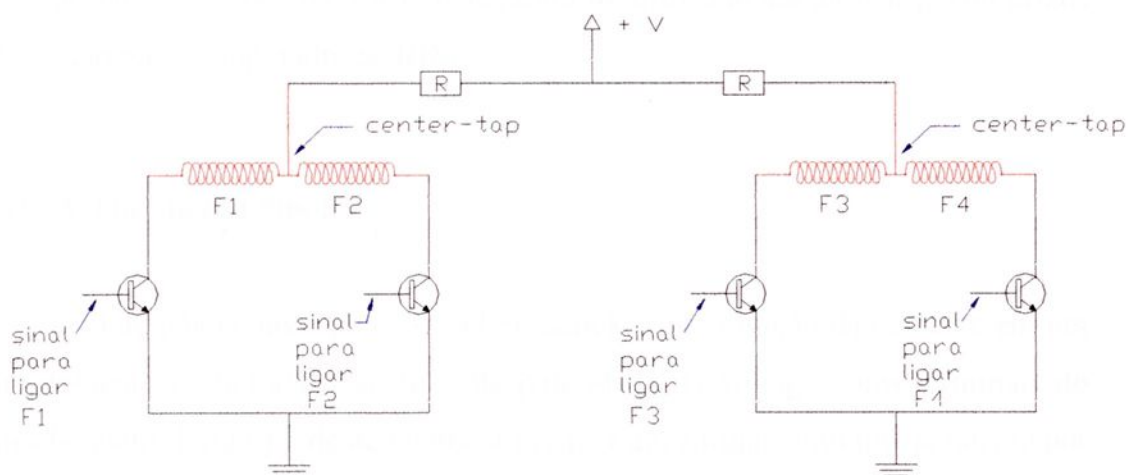


FIGURA 5.2 - Circuito para acionamento unipolar

Como exemplo de acionamento unipolar pode-se citar todos os motores “clawpoles” com seis terminais de saída. Neste motor três terminais pertencem a uma bobina cilíndrica com derivação central que está alojada entre duas bandejas. Os outros três terminais pertencem a outra bobina que está alojada entre as outras duas bandejas.

Outro exemplo é no acionamento de motores híbridos, tais como: motor Minebea, LM-C004-04, usado nas impressoras matriciais Emília IV, Elebra EI6031 e Mônica; motor Kyushu, PJJQ114ZA-K, usado na impressora matricial Panasonic KX-PIG24; motor Sankyo, MSJE200M81, usado no cabeçote de leitura do disquete do computador Proceda; motor Tamagawa, TS3218N814, usado para o acionamento do cabeçote de leitura da HD do computador Itautec PC-286, etc.

Um motor de relutância variável é mais um exemplo de um motor com acionamento unipolar. Neste caso existe um terminal comum onde são conectadas 4 bobinas nas quais a corrente circula em uma direção apenas (motor Sanyo – Type 103-730). Este motor foi utilizado nas antigas perfuratrizes de cartão para computadores IBM.

5.3 Acionamento bipolar

O acionamento bipolar se refere aquele cuja direção da corrente em um enrolamento é alterada pela troca da polaridade da voltagem nos terminais do enrolamento. Esse tipo de acionamento requer um enrolamento independente por fase. Por este motivo um motor de duas fases é composto de dois enrolamentos e conseqüentemente quatro terminais.

Na Figura 5.3 é mostrado o esquema de acionamento bipolar.

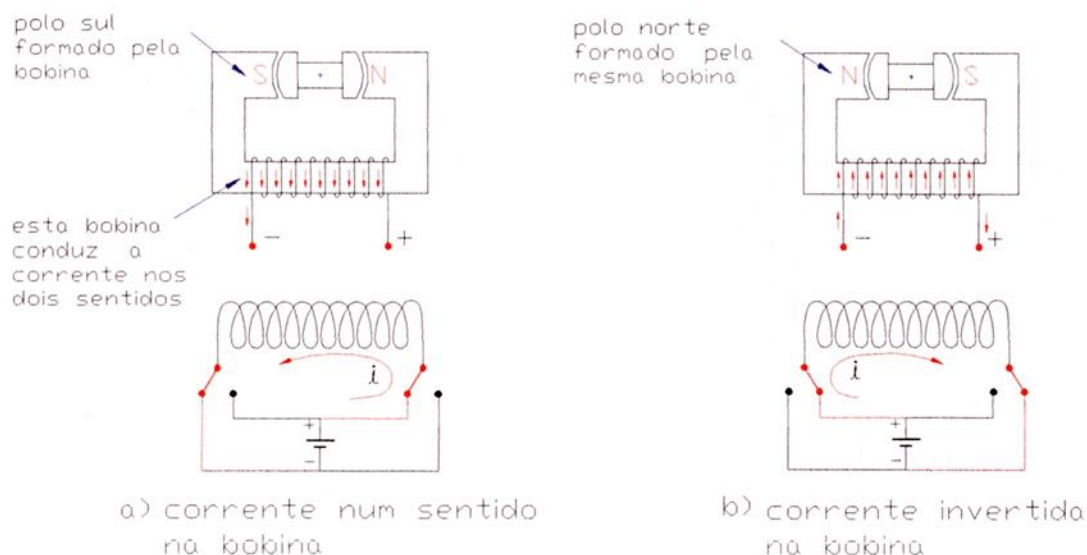
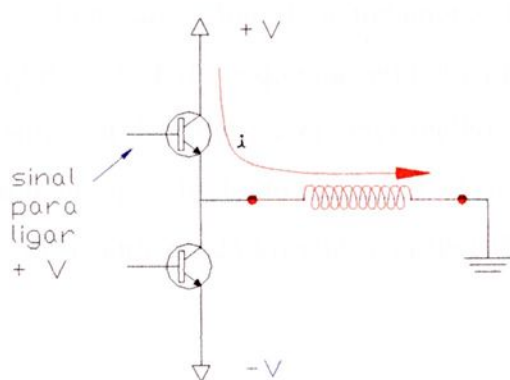


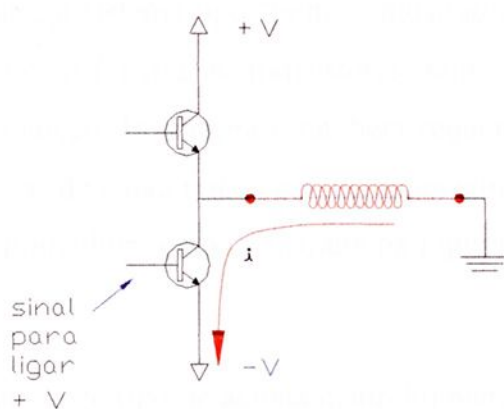
Figura 5.3 - Detalhes do acionamento bipolar

FIGURA 5.3 - Detalhes do acionamento bipolar

Um circuito de concepção simples aplicado ao acionamento bipolar é ilustrado na Figura 5.4 . Este circuito requer duas fontes de corrente contínua que são utilizadas em conjunto com um par de transistores para chaveamento. A necessidade de se usar estas duas fontes com terra comum é uma desvantagem desse sistema.

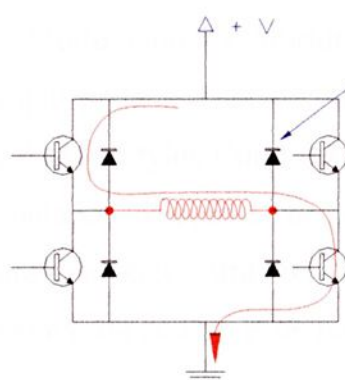


a) corrente num
sentido na bobina

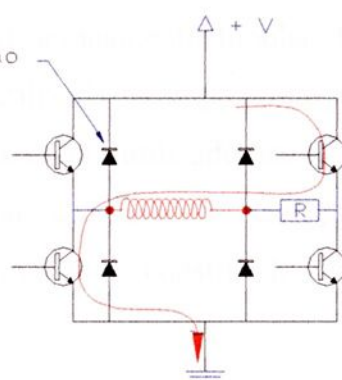


a) corrente invertida
na bobina

FIGURA 5.4 - Circuito de acionamento bipolar usando duas fontes.



a) circuito tipo ponte
com diodo de proteção



a) circuito tipo ponte com diodo
de proteção e resistência

FIGURA 5.5 - Circuito de acionamento tipo "ponte".

O modo padrão de acionamento bipolar é o sistema tipo “ponte”, mostrado Figura 5.5. Este esquema, embora utilize um par extra de transistores, tem a vantagem de estabelecer uma melhor distribuição de energia e também requer somente uma fonte de tensão DC. Em sistemas de baixa potência o acionamento bipolar pode ainda utilizar uma resistência limitadora, como mostrado na Figura 5.5.

Os motores “clawpole” utilizam bastante este tipo de acionamento bipolar, principalmente aqueles com frequência de chaveamento alta. Praticamente todos os motores de tamanho “20” utilizados nos “drivers” de 3 ½ polegadas, utilizam o acionamento bipolar. Nos motores de tamanho “15” também é muito utilizado. O motor de acionamento do cabeçote da impressora jato de tinta Elgin-Canon e o motor Magneti Marelli da marcha lenta de motores com injeção eletrônica também utilizam este tipo de acionamento.

Muito motores híbridos também utilizam o acionamento bipolar. Como exemplo pode-se citar o motor Epson EM-257 utilizado na impressora jato de tinta Epson Stylus Color 600. O mesmo acionamento era utilizado nas HDs do computador Proceda, onde um motor híbrido acionava as cabeças de leitura/gravação através de um engenhoso mecanismo constituído de uma finíssima fita de aço e de um braço.

5.4 Enrolamento monofilar ou unifilar e enrolamento bifilar

Monofilar e bifilar são dois tipos de enrolamentos usados nos motores de passo.

Motor de passo com enrolamento unifilar terá no mínimo quatro terminais. O termo enrolamento unifilar se refere a configuração de enrolamento de um motor

de passo onde cada pólo do estator tem apenas um enrolamento. Esta configuração pode ser acionada apenas pelo acionamento bipolar.

O termo enrolamento bifilar se refere a configuração de enrolamento de um motor de passo onde cada pólo do estator tem um par de enrolamentos e o motor terá 6 ou 8 terminais, dependendo das ligações. Esta configuração de enrolamento pode ser energizada por um acionamento unipolar ou bipolar.

Motores com enrolamento bifilar significa que possuem dois enrolamentos idênticos em cada pólo do estator. Este tipo de enrolamento simplifica a operação, pois ao transferir a corrente de uma bobina para a outra bobina, enrolada em sentido contrário, trocará a magnetização do pólo. A mesma operação em aplicação unifilar requer que a corrente seja invertida na mesma bobina. A configuração mais comum para enrolamento bifilar em motores de passo é aquela com oito terminais porque ela oferece a flexibilidade de conexão em série ou em paralelo. Existe, no entanto, muitos motores com 6 terminais disponíveis para aplicações com conexão em série.

Exemplos de motores com enrolamento unifilar são todos os motores “clawpole” e híbridos que possuem 4 terminais de saída. Motores de relutância variável com apenas uma voltagem também têm enrolamento unifilar.

Por outro lado, motores “clawpole” e híbrido que têm seis ou oito terminais de saída são motores com enrolamento bifilar.

Na Figura 5.6 é mostrado em (b) os enrolamentos de um motor com oito terminais de saída. Se esses terminais forem ligados em série pode-se ter um motor com 4 terminais. Neste caso o motor possui enrolamento bifilar, pois existe dois enrolamentos sobrepostos. O motor também terá enrolamento bifilar caso, nesta ligação em série, haja um terminal comum, pois ainda se enrolamentos sobrepostos no polos do motor.

Por outro lado, ainda na Figura 5.6, se os enrolamentos forem ligados em paralelo, como em (c), ainda existirão dois enrolamentos num mesmo pólo, embora o motor tenha apenas 4 terminais de saída.

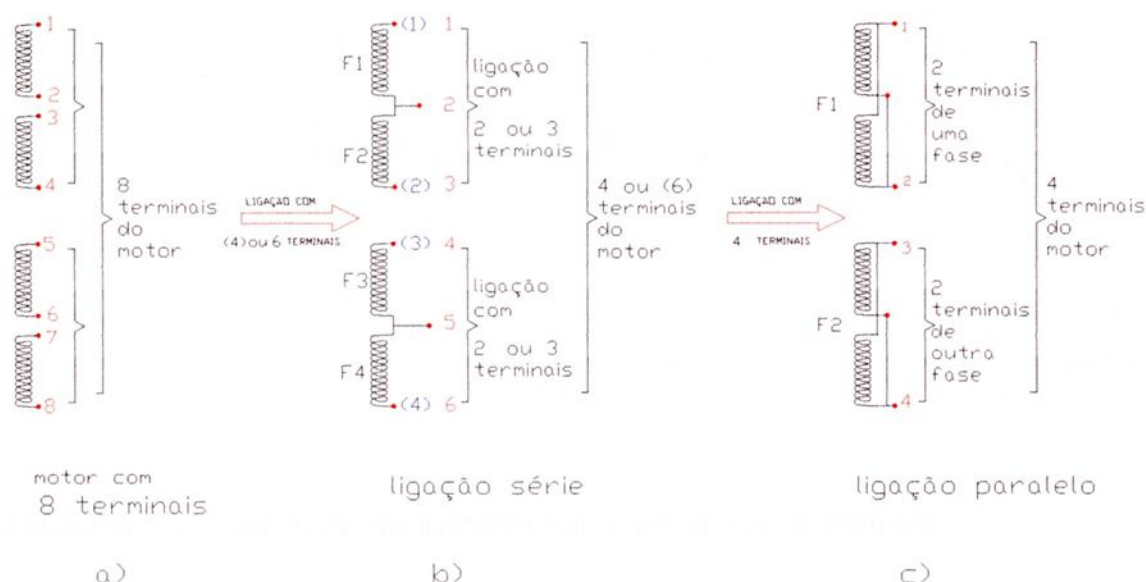


Figura 5.6 - Ligações de um motor com quatro bobinas – oito terminais

Na Figura 5.7, é mostrada uma situação onde os termos unifilar, unipolar, bifilar e bipolar, são colocados juntos com a finalidade de diferencia-los. Em (a) é mostrado um enrolamento unifilar, pois só ele existe em um par de polos. O acionamento neste caso será unipolar porque a corrente somente pode circular num sentido, formando sempre pólo com o mesmo nome. Em (b) é mostrado também um enrolamento unifilar mas, neste caso, é permitido que a corrente circular nos dois sentidos formando, portanto, em cada lado do enrolamento, ora pólo de um nome, ora de nome contrário. Finalmente em (c) tem-se dois enrolamentos, logo ele é chamado de bifilar. No entanto, agora um enrolamento forma num pólo campo magnético de um nome e o outro enrolamento forma no mesmo pólo um campo magnético de nome contrário.

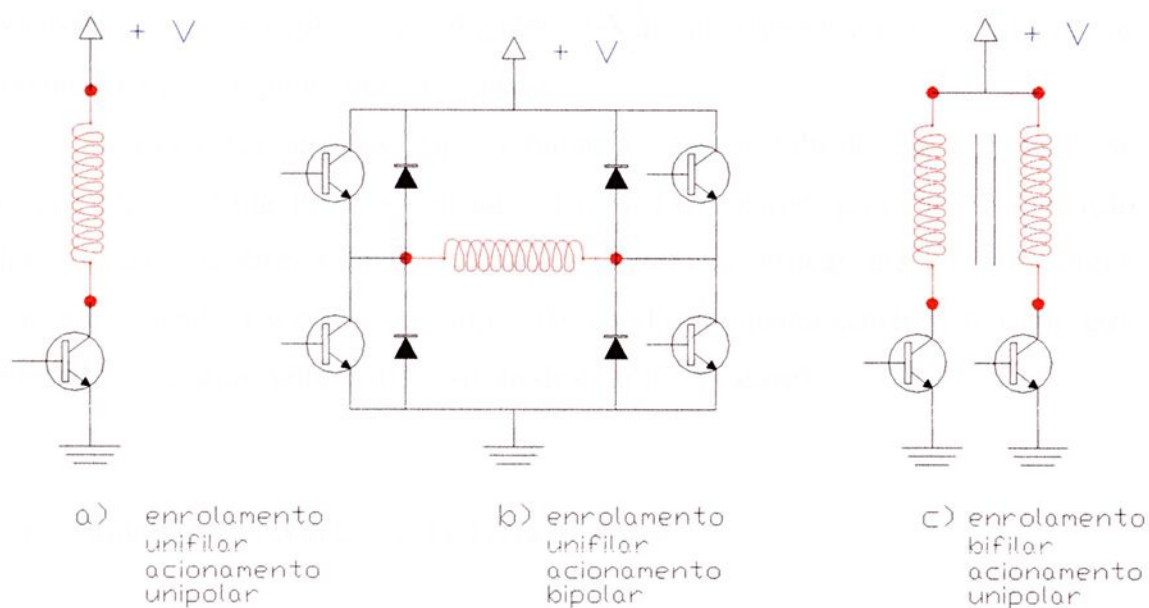


FIGURA 5.7 - Formas de enrolamento e de acionamento de motores

5.5 Identificação dos motores

Se não existir selo de identificação no motor pode-se distinguir um motor de relutância variável de um motor híbrido, ou um “clawpole”. Motores com imã permanente tendem a se movimentar em pulsos quando se gira estes motores com os dedos, enquanto que os de relutância variável tendem a girar livremente, embora possam pulsar um pouco devido ao magnetismo residual.

Os motores de passo existem numa ampla faixa de passo angular. Os motores com maiores ângulos são aqueles com 90° de passo angular enquanto os de menores passos angulares são aqueles motores de $1,8^\circ$, $0,9^\circ$, $0,72^\circ$ e $0,45^\circ$. Com

controladores apropriados estes ângulos podem ser divididos por 2, isto é, os motores passam a girar com meio passo.

Para motores de passo tipo relutância variável, híbrido, ou “clawpole”, se apenas um enrolamento é energizado, o rotor (sem carga) gira até uma posição definida de equilíbrio estável. Permanecerá naquela posição até que um torque externo aplicado exceda este torque de equilíbrio quando, então, o rotor gira podendo encontrar uma outra posição de equilíbrio estável.

5.6 Tamanho e potência dos motores de passo

Além de serem classificados pelos ângulos dos seus passos, os motores de passo também são classificados de acordo com o tamanho da sua carcaça que corresponde ao diâmetro do corpo do motor. Por exemplo, um motor com tamanho 11 tem um diâmetro do corpo de aproximadamente 1,1 polegada. Do mesmo modo um motor 23 tem o diâmetro do corpo de aproximadamente 2,3 polegadas. Analogamente o tamanho do motor pode ser especificado usando o sistema métrico, como acontece nos motores de imã permanente de tamanho 8,10,15,20,30,35,40 e 42 onde estes números equivalem, em milímetro, ao diâmetro externo aproximado do corpo do motor.

No entanto o comprimento longitudinal do corpo do motor varia muito dentro de cada tamanho acima referido. Sendo assim, como regra geral pode-se afirmar que o torque fornecido pelo motor irá aumentar com o aumento do seu comprimento axial. Os níveis de potência de motores de passo acionados por CIs variam aproximadamente de 1 a 10 W para motores pequenos e de 10 a 20 W para motores maiores. Os níveis de dissipação máxima dos motores ou limites térmicos raramente são especificados pelas fabricantes.



5.7 Modos de operação dos motores de passo

Existem três modos de operação dos motores de passo: passo completo, meio-passo e micropasso.

a) Passo completo

Na operação por passo completo o motor avança em passos normais, ou seja, para um motor com quatro passos por revolução o motor avança em passos de 90° ou, para um motor com 200 passos por revolução o motor avança em passos de $1,8^\circ$. Existem ainda duas maneiras de um motor funcionar com passo completo :

1º caso) Um deles é energizando apenas uma fase por vez. Este modo deveria ser usado apenas quando a performance do torque e da velocidade não são importantes, isto é, onde o motor é operado numa velocidade fixa e as condições de carga são bem definidas. Problemas com ressonância podem atrapalhar a operação em algumas velocidades. Este modo exige o mínimo de potência da fonte do driver em relação aos outros modos.

2º caso) Outro modo de operação com passo completo é aquele onde o motor é operado sempre com duas fases energizadas por vez. Este modo provê boa performance de torque e velocidade com um mínimo de problemas de ressonância. Excitação com duas fases provê 30 a 40% mais torque do que com excitação de uma fase, mas requer o dobro da potência da fonte.

É importante observar que, quando o motor trabalha operando com apenas uma fase energizada por vez, a posição de equilíbrio estável é sempre em frente aos polos. Por outro lado, quando a operação é com duas fases ligadas por vez a posição de equilíbrio é entre os dois polos energizados adjacentes. A Figura 5.8 mostra um motor de imã permanente avançando um passo completo de 90° , onde em (a) existe

uma posição de equilíbrio estável nos dois casos e em (b) houve um avanço para a nova posição de equilíbrio estável, isto é, um passo, ou 90° , depois.

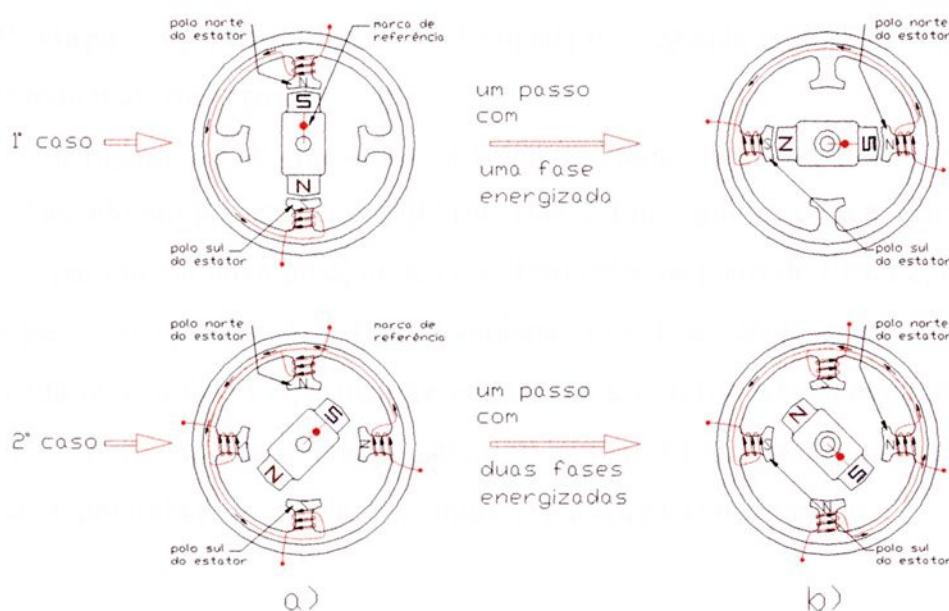


FIGURA 5.8 - Operação de um motor no modo passo completo.

Para um motor com passo fracionário o modo de operação é semelhante ao mostrado para o motor com passo de 90° .

b) Meio passo

O modo de operação com meio passo consiste em alternar a operação com excitação de uma ou duas fases resultando em passo com metade do passo normal. Este modo de excitação dobra a resolução. Enquanto o torque de saída varia em passos alternados isto não é o problema quando se deseja que o passo seja metade do normal. Este modo é bom pelo fato de que praticamente não tem problemas de ressonância durante a sua operação.

A operação com meio passo pode ser dividida em três etapas:

1ª etapa – uma fase F1 é energizada.

2ª etapa – a fase F1 continua energizada e a segunda fase F2 é ligada, avançando meio passo.

3ª etapa – a primeira fase F1 é desligada e a segunda fase F2 continua ligada, avançando mais meio passo

Na Figura 5.9 é mostrada a primeira etapa onde uma fase é energizada, estabelecendo uma posição de equilíbrio estável. Em seguida, com a fase F2 ligada o rotor para numa nova posição de equilíbrio entre os polos de F1 e F2, avançando meio passo, neste caso 45° . Para completar o ciclo de energização a fase F1 é desligada mas a fase F2 permanece energizada e o rotor avança mais meio passo, ou 45° . Continuando a operação, com F2 ligada, F1 será novamente energizada, mas com polaridade invertida, e o motor avançará mais meio passo.

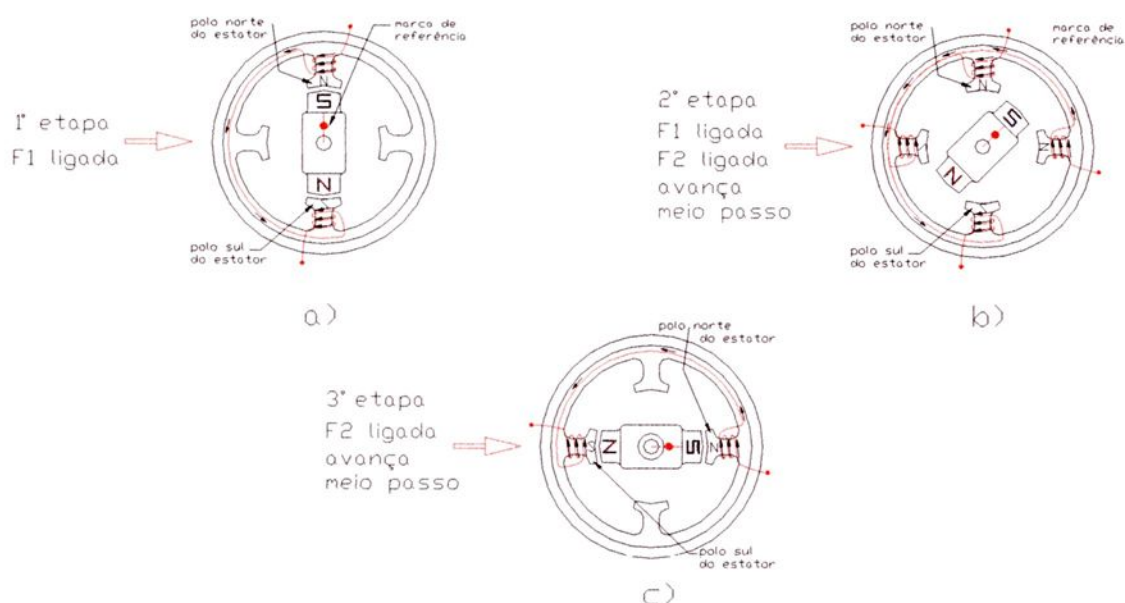


FIGURA 5.9 - Etapas do modo de operação – meio passo de um motor.

Para os outros motores aplica-se operação semelhante para que o rotor avance de meio em meio passo, quer o passo seja 90° ou 0.9° .

c) Micropasso

No modo micropasso o ângulo do passo normal do motor pode ser dividido em ângulos menores. Por exemplo, um motor com ângulo de passo de $1,8^\circ$ tem 200 passos por revolução. Se o motor é acionado no modo micropasso como, por exemplo, dividido por 10, então cada micropasso moveria o motor com $0,18^\circ$ e o motor teria 2000 passos por revolução. Tipicamente usa-se dividir o passo normal de 10 a 256 (51200 passos por revolução para um motor com passo $1,8^\circ$). Os micropassos são produzidos quando se proporciona as correntes em dois enrolamentos de acordo com a função seno e coseno. Este modo é somente usado quando movimento muito suave e maiores resoluções são requeridas.

6 ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE PASSO ATRAVÉS DO COMPUTADOR

6.1 Introdução

A transmissão de dados do computador pessoal para as impressoras matriciais, no início, por volta de 1981, era feito através da porta serial, a qual transmitia apenas um bit por vez. Como alternativa, a IBM introduziu a porta paralela, que tinha a capacidade de transferir oito bits por vez. Na época que a porta paralela apareceu os processadores dos PCs eram todos de 8 bits. Desta forma parece lógico definir um caminho de dados para a impressora com capacidade de transferir 8 bits de dados simultaneamente.

Até por volta de 1989 a porta paralela praticamente era utilizada apenas pelas impressoras matriciais. Embora as CPUs aumentassem a sua performance rapidamente, a porta paralela ficou estagnada, até 1992, quando alguns comitês foram criados para desenvolver portas paralelas mais avançadas. Isto permitiu então que uma ampla faixa de aparelhos periféricos tirassem proveito da porta paralela. Surgiram no mercado com a evolução da tecnologia scanners, CD-ROM, tapes, etc, e a necessidade de conectar o computador a esses aparelhos aumentou. A porta paralela então se tornou o meio para conectar esses aparelhos.

Da época do desenvolvimento da porta paralela até o início da década de noventa os fabricantes e usuários de periféricos enfrentaram os seguintes problemas:

- Embora a performance do PC tenha aumentado muito, não houve nenhuma mudança na performance da porta paralela e sua arquitetura. A razão máxima de transferência de dados alcançada com esta arquitetura era de cerca de 150 Kbytes por segundo;

- não existia nenhum padrão para a interface elétrica. Isto causava muitos problemas quando se tentava garantir a operação através de varias plataformas;
- a falta de padrões de projetos forçou a distância para os cabos externos de conexão serem no máximo de 1,8 metros;

Em 1991, houve uma reunião dos fabricantes de impressoras para iniciar discussões para desenvolver um novo padrão para o controle inteligente de impressoras em rede. Estes fabricantes (Lexmark, IBM, Texas Instruments e outros), formaram a NPA (Network Printing Alliance).

A NPA definiu um conjunto de parâmetros que quando implementado nas impressoras e servidores, permitiriam um controle completo nas aplicações com impressoras. Então foi submetida através da NPA uma proposta a IEEE para a criação de um comitê para desenvolver uma porta paralela bidirecional de alta velocidade para PC.

Assim o comitê denominado IEEE1284 decidiu adotar um modo de transferência de dados bidirecionais maior que 1 Mbps o que resultou em 1994 o padrão "Standar Signaling Method for a Bidirecional Parallel Peripheral Interface for Personal Computers", sendo que com esse padrão nasceu o EEP (Enhanced Parallel Port).

As denominações adotadas no mercado para os tipos de porta paralela são das mais variadas:

- adaptador de impressora;
- porta Centronics;
- adaptadores Centronics;
- ou simplesmente porta paralela;



6.2 Anatomia da porta paralela

A porta paralela deve fornecer oito sinais para transferir um byte de dados em paralelo.

O computador deve ser capaz de informar à impressora que um byte de dados está disponível nas linhas de dados, através de um sinal denominado “Strobe” e também deve obter um sinal de aviso da impressora. O aviso é através de um sinal denominado “Acknowledge” ou “Ack”.

Os dados “Strobe” e “Ack” são sinais que proporcionam a transferência de dados entre o computador e a impressora de um modo bem simples. Estes sinais, porém, não são suficientes para a troca de informações entre o computador e a impressora.

As impressoras são aparelhos eletromecânicos cuja função é receber dados de impressão, imprimir estes dados e comunicar ao usuário informações como alimentação de papel, instalação de cartucho, dentre outras.

Quando a memória interna da impressora está cheia, em razão de não poder imprimir tão rápido quanto recebe os dados, uma informação deve ser enviada ao computador através de um sinal denominado “Busy” indicando que não pode receber mais dados ou que está ocupada. A impressora também precisa informar ao computador as ocorrências de erro, sendo chamado de “Error” pelo projetista este tipo de sinal enviado.

O computador pode também utilizar mais sinais para controlar a impressora, tal como para “resetar” a impressora no início de uma nova impressão tal que qualquer dado residual no “buffer” da impressora seja apagado.

A porta paralela pode ser vista como três portas independentes, caracterizada por uma porta de saída para transferir dados para a impressora, outra porta de saída para levar os sinais de “Strobe” e de “reset”, e uma porta de entrada para ler os sinais “Acknowledge”, “Busy” e “Error” vindos da impressora.



Na realidade a porta paralela é ormalmente projetada com dezessete sinais. Estes sinais são distribuídos por três portas internas com segue:

- uma porta de saída com oito sinais de dados chamada de porta “DATA”;
- uma porta de entrada com cinco sinais, chamada de porta “STATUS”;
- outra porta de saída com quatro sinais, chamada de porta “CONTROL”;

O acesso à porta paralela do PC é feito por um conector chamado de conector DB -25 fêmea. Este conector fica normalmente na parte traseira do gabinete do computador. Entretanto para conectar a porta paralela a um periférico é necessário um conector DB-25 macho que se encaixa neste conector DB-25 fêmea.

Na Figura 6.1 estes conectores e numeração dos seus terminais são mostrados. A numeração vai de 1 a 13 numa linha e de 14 a 25 na outra linha.

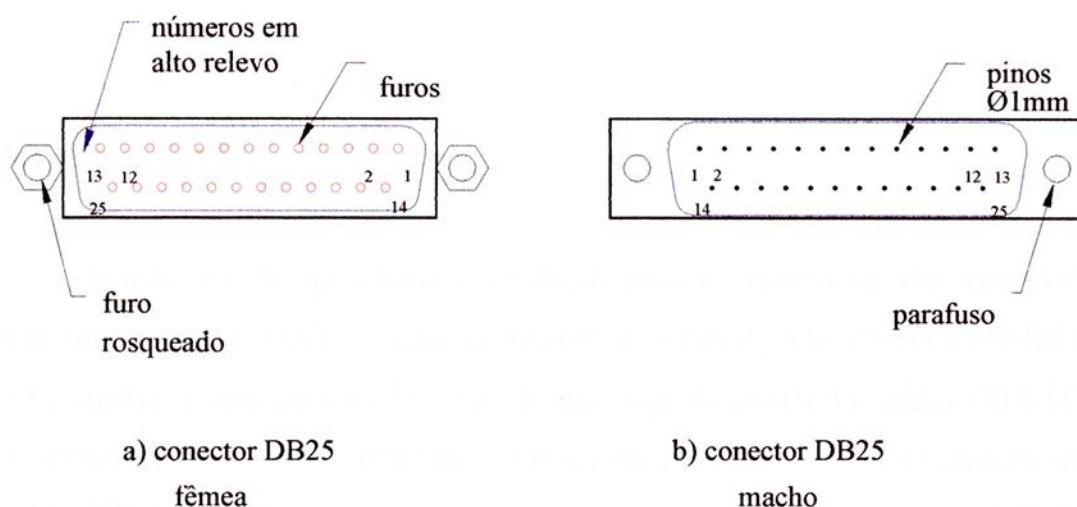


FIGURA 6.1 - Conectores DB25

A numeração dos terminais é mostrada em alto relevo em todos os conectores machos e fêmeas.

Na tabela 6.1 é mostrado o nome de cada terminal do adaptador da impressora paralela e sua função.

Sinais do adaptador de porta paralela CENTRONICS				
DB 25	CENTRONICS	REGISTRO	E/S	NOME
1	1	control	saída	Strobe
2-9	2-9	data	saída	Data
10	10	status	entrada	Ack.
11	11	status	entrada	Busy
12	12	status	entrada	PE
13	13	status	entrada	Select
14	14	control	saída	Autofeed
15	15	status	entrada	Error
16	16	control	saída	INIT
17	17	control	saída	Select-in
18-25	18-25	massa	massa	massa

TABELA 6.1 - Terminais da porta paralela e suas funções

6.3 Porta DATA

Quando a CPU quer transmitir dados para a impressora, ela “escreve” oito bits na porta “DATA”, sendo estes bits de saída aqueles de D0 a D7 (D0 é o bit menos significativo e D7 é o bit mais significativo). As saídas D0 à D7 da porta “DATA” estão disponíveis nos terminais de 2 a 9 do conector de saída DB-25. A Figura 6.2 mostra os seus terminais no conector DB-25 (fêmea).

Todas as saídas da porta “DATA” são lógicas verdadeiras, isto é, atribuindo lógica 1 a um bit causa a correspondente saída alta (1) a este bit.



Os terminais da porta “DATA” podem estar no nível lógico 1 se a voltagem estiver de 2,4 a 4,9 V DC; caso contrário, se o nível lógico for 0, a voltagem máxima nos terminais será de 0,5 V DC no máximo.

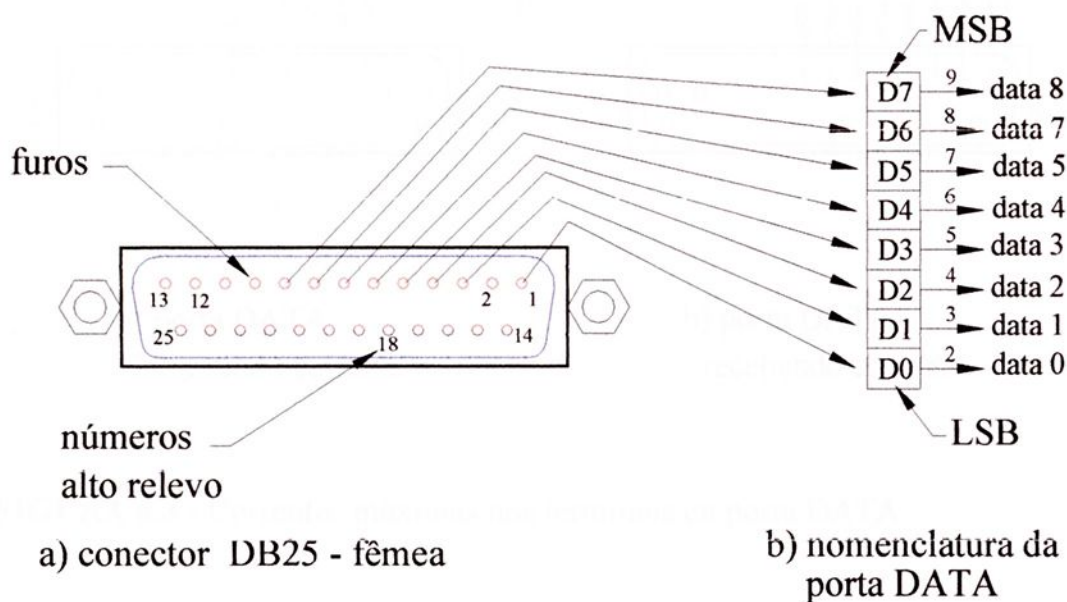


FIGURA 6.2 - Conector DB25 e terminais da porta DATA

Se a saída da porta “DATA” estiver no nível lógico 1, a máxima corrente que pode ser drenada é de 2,6 mA e, caso contrário, se estiver no nível lógico 0, a máxima corrente que a porta pode absorver é de 24 mA. A Figura 6.3 mostra estas duas situações.

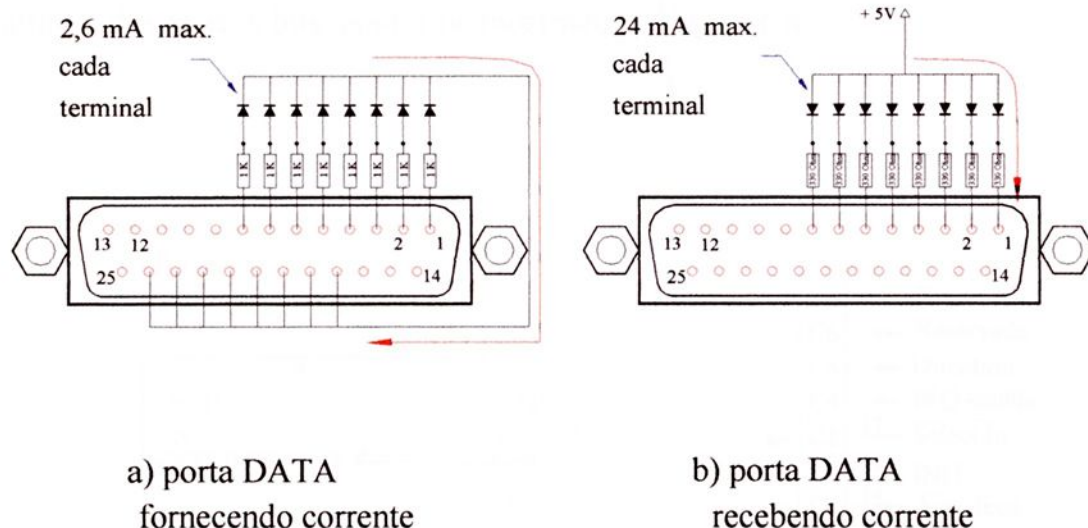


FIGURA 6.3 - Correntes máximas nos terminais da porta DATA

6.4 Porta CONTROL

A porta “CONTROL” do adaptador fornece os sinais de controle necessários para a impressora.

Como mostrado na Tabela 6.1 a porta CONTROL tem quatro saídas e além disso também dispõe de outro sinal que não está disponível no conector DB-25, chamado IRQ(Interrupt ReQuest line), que o programa pode usar com o auxílio do sinal Ack da porta “Status” .

Na porta “CONTROL” as saídas Select In, Auto Feed e Strobe tem lógica invertida, isto é, escrevendo lógica 1 para um bit causa uma correspondente saída lógica 0 no terminal DB-25. Isto acrescenta alguma complexidade no uso da porta paralela, mas pode ser resolvido invertendo o sinal antes da saída.

A porta "CONTROL" pode então ser identificada no conector DB-25 através dos seus 8 bits conforme mostrado na Figura 6.4.

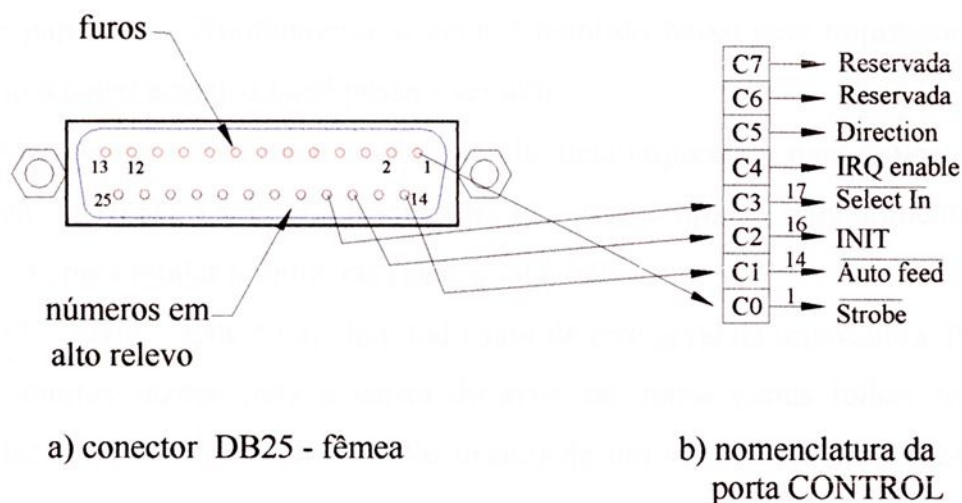


FIGURA 6.4 - Identificação da porta Control no conector DB25

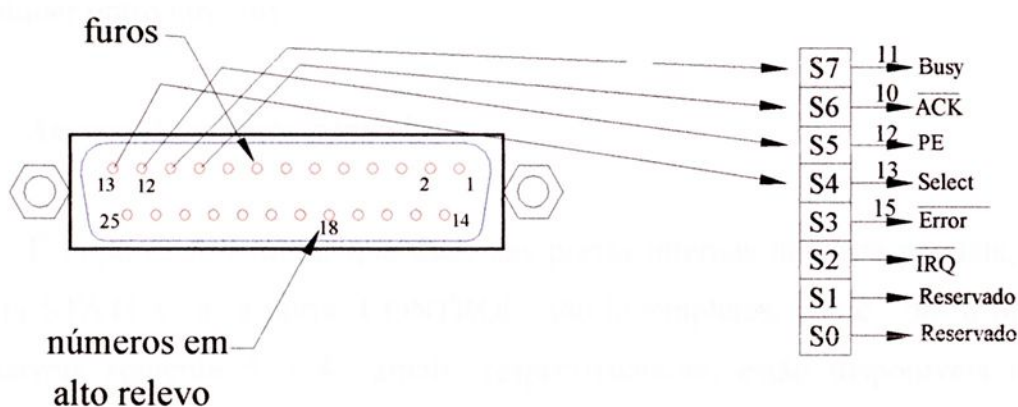
6.5 Porta STATUS

A porta "STATUS" fornece ao adaptador da impressora a facilidade de ler o estado, a situação da impressora através de vários sinais. A porta "STATUS" está localizada num endereço no sistema do PC próximo a porta "DATA". Os sinais da porta "STATUS" são rotulados como S7 para um bit mais significativo até S0, embora S0 não exista, sendo disponíveis os sinais até S3.

Os sinais da porta "STATUS" tem as seguintes funções:

- S7 - Busy - Este sinal da impressora indica que a impressora esta ocupada e não pode receber mais dados;

- S6 – Ack – Este é um sinal que a impressora gera em resposta ao sinal Strobe do adaptador como uma confirmação. Normalmente o sinal é alto e após a impressora ser notificada, ela responde fazendo este sinal baixo e depois passando à alto novamente;
- S5 – PE – Este é um sinal que a impressora gera para indicar que não existe papel nela. Normalmente o sinal é mantido baixo pela impressora, e quando a papel acaba, o sinal passa a ser alto;
- S4 – Select – Este sinal é colocado alto pela impressora para indicar que ela está abilitada. Quando a impressora não esta abilitada(para alimentar o papel, ou para mudar a fonte, etc) este sinal é baixo;
- S3 – Error – Este é um sinal indicador de erro geral na impressora. Pode haver muitas razões para a causa do erro, tal como varias folhas sendo puxadas juntas ou erro interno. No evento de um erro o sinal colocado é baixo.



a) conector DB25 - fêmea

b) nomenclatura da porta STATUS

FIGURA 6.5 - Identificação da porta Status no conector DB25

A porta "Status" pode então ser identificada no conector DB-25 através dos seus 8 bits conforme mostrado na figura 6.5.

6.6 Uso do adaptador de impressora paralela

Com uma porta paralela padrão(SPP) pode-se ter acesso a uma porta de entrada de 5-bits, uma porta de saída de 4-bits e outra porta de saída de 8-bits. Todos os 17 sinais são acessíveis com um programa e podem ser utilizados para transferir sinais TTL para dentro e para fora do PC. Os sinais da porta paralela estão disponíveis no painel traseiro dos PC's através de um conector fêmea DB-25. Para conectar um PC a uma impressora, um cabo com um conector DB-25 macho é disponível no mercado.

Pode-se utilizar também este cabo para conectar a porta paralela a qualquer outro circuito.

6.7 Acessando a porta paralela

É importante lembrar que duas das portas internas da porta paralela, a porta STATUS e a porta CONTROL são incompletas, isto é, de 8 bits possíveis somente 5 e 4 sinais, respectivamente, estão disponíveis no conector de saída. Também muitos destes bits têm sinal invertido entre o bit e o pino do conector. A porta DATA está livre de tal problema e pode ser usada livremente.

Para transferir dados para uma porta de saída deve-se usar a seguinte função macro:

- Outportb(endereço da porta, dados)



O primeiro argumento da função macro é o endereço da porta de destino, e o segundo argumento é o dado a ser transmitido. O primeiro argumento pode ser uma constante ou uma variável do tipo "int " e o segundo argumento é uma constante (byte)ou uma variável do tipo "char " .

Por outro lado, ler dados de uma porta de entrada, usa-se a função macro:

- Variável = inport(endereço da porta)

Cada porta paralela consiste de 3 endereços de porta: porta DATA, STATUS e CONTROL. Estas portas estão numa ordem seqüencial, isto é, se o endereço da porta DATA é 0x378 , então o endereço da porta STATUS será 0x379 e o endereço da porta CONTROL será 0x37a. Deve-se observar a seqüência "8 ", "9 " e "a " que é uma seqüência correspondente ao código hexadecimal, assim como a seqüência "c", "d " e "e " .

Tipicamente tem-se :

Porta paralela	Porta DATA	Porta STATUS	Porta CONTROL
LPT1	0x03bc	0x03bd	0x03be
LPT2	0x0378	0x0379	0x037a
LPT3	0x0278	0x0279	0x027a

TABELA 6.2 - Endereços de portas paralela

Observa – se que os PCs tem os endereços para LPT1 ou 0x0378 ou 0x03bc para a porta DATA. Uma alternativa para saber o endereço para a porta paralela é usar o Microsoft Diagnostics (MSD.EXE) e descobrir as atribuições da LPT.



Por outro lado, o dado acima referido atribuído à porta DATA é um número decimal correspondente ao número binário de 8 bits. Sendo assim para se obter na saída da porta DATA um BYTE desejado, deve-se escrever um número decimal no argumento de “outport”, como ilustrado nos exemplos que se segue.

Byte desejado nos terminais DATA	Número decimal na porta DATA
11111111	255
10000000	128
01000000	64
00100000	32
00010000	16
00001000	8
00000100	4
00000010	2
00000001	1
00000000	0

TABELA 6.3 - Equivalência entre números na saída da porta DATA

Deve - se observar ainda que o deslocamento do dígito “1” do bit mais significativo (MSB) uma casa em direção ao menos significativo (LSB) divide por 2 o número decimal correspondente. Esta técnica foi usada no programa em linguagem C deste trabalho, para o acionamento das fases do motor de passo.



6.8 Acionamento de motor de passo usando a porta paralela.

6.8.1 Características gerais

Para o acionamento de um motor de passo é necessário aplicar pulsos de tensão aos seus terminais em uma determinada sequência. A sequência de pulsos é aplicada ao motor de forma a estabelecer um ângulo de giro ao eixo.

A frequência de operação é um parâmetro que é função da velocidade de chaveamento. Existe uma limitação com relação à frequência, pois dependendo do tipo e tamanho do motor este não irá operar devidamente acima de uma determinada frequência. O problema mencionado ocorre devido a inércia do rotor, que faz com que o mesmo não responda no caso da frequência de chaveamento ser muito elevada.

Os pulsos aplicados ao motor no projeto desenvolvido foram por meio da porta “DATA”, a qual é um componente da porta paralela.

Um motor de passo, conforme visto no capítulo 4 pode ter 4, 6 ou 8 terminais, neste trabalho o sistema de acionamento foi aplicado para o acionamento de um motor do tipo “claw pole” de 6 terminais. Ressalta-se que este sistema também se aplica a motores de 4 e 8 terminais, bem como ao acionamento de motores híbridos e de relutância variável.

Na figura 6.6 é mostrado um esquema do motor “claw pole” de seis terminais utilizado no projeto.



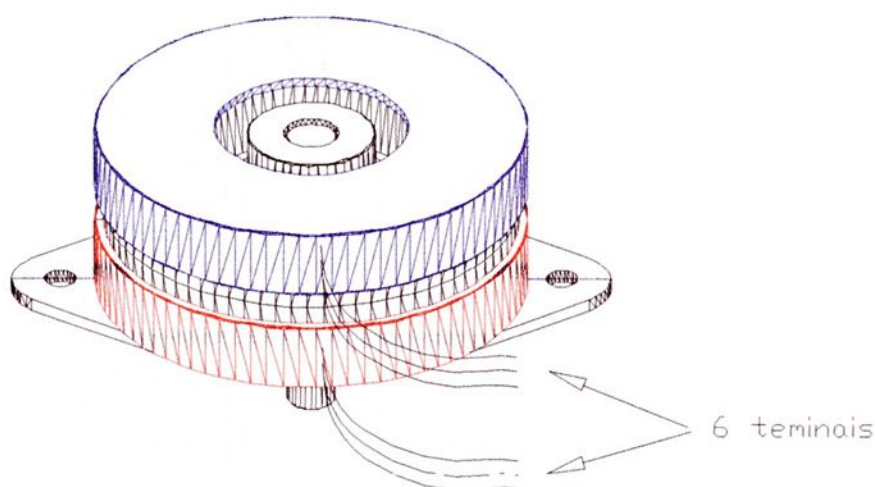


FIGURA 6.6 - Motor “claw pole” com 6 terminais

Para o acionamento deste motor o terminal comum de cada enrolamento será ligado ao pólo positivo de uma fonte 12 V DC e alternadamente as fases F1, F3, F2 e F4 serão chaveadas à terra.

Portanto um sinal alto da porta paralela DATA (D0 a D7) fará com que um terminal da bobina seja chaveado à terra. É necessário portanto que se tenha o diagrama da Tabela 2 para acionar o motor com 6 terminais e 4 fases.

sequência de energização			FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
decimal	binária		F1	F3	F2	F4
	A	B				
R	0	0	1			
1	0	1		1		
2	1	0			1	
3	1	1				1

TABELA 6.4 - Diagrama da seqüência de fases do motor - Acionamento por onda completa

Observando o diagrama da Tabela 6.5 conclui-se que a porta “DATA” precisa fornecer nos terminais de 2 a 9 do conector DB-25 fêmea a seqüência apresentada num ciclo de passos. Quaisquer quatro, dos oitos terminais de 2 a 9, podem ser utilizados para implementar esta seqüência.

Neste trabalho serão utilizados os terminais 9 (o mais significativo), 8, 7 e 6 para o acionamento do motor. Os demais terminais podem ser utilizados para o acionamento de um outro motor.

Como na porta “DATA” as informações são apresentadas sempre de 8 em 8 bits, então os 4 bytes (8 bits cada) deverão ter a seqüência mostrada na Tabela 6.5 para o funcionamento do motor utilizado no trabalho.



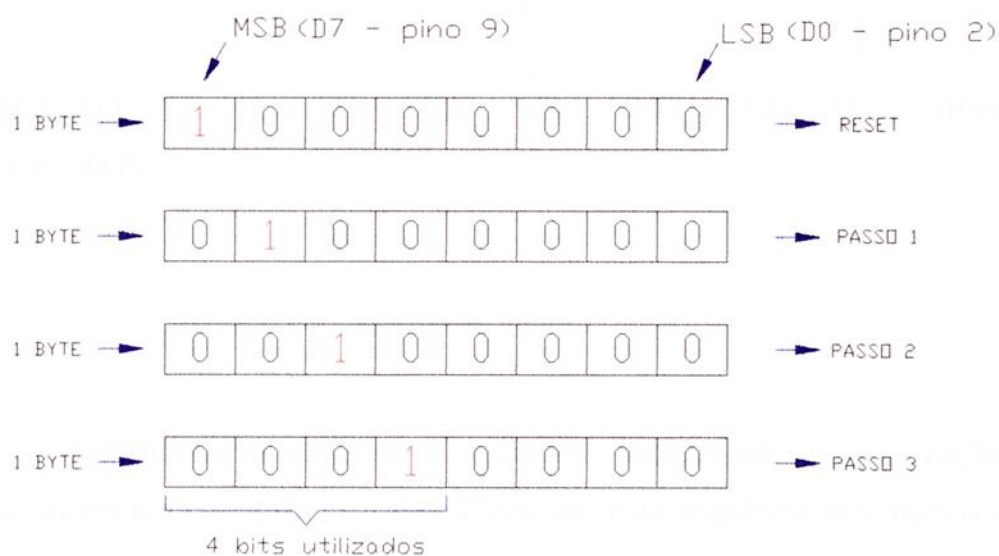


TABELA 6.5 Sinais TTL apresentados nos terminais 2 a 9 do conector
DB25 fêmea

Na Tabela 6.5 o primeiro BYTE significa que no pino 9 do conector DB25 fêmea existe um sinal **alto** - TTL (5V) . Todos os outros pinos terão sinal **baixo**. O sinal 1 será processado pelo circuito eletrônico que chaveará o transistor de potência (TIP 122) fazendo com que a fase F1 do motor seja ligada à terra e portanto energizando a mesma. Analogamente o segundo, o terceiro e o quarto BYTES energizarão as fases F3, F2 e F4, respectivamente como mostrado na Tabela 6.5.

Mais detalhes do circuito são mostrados no capítulo 8.



7 CIRCUITO LÓGICO PARA A ENERGIZAÇÃO DOS ENROLAMENTOS

O funcionamento de um motor de passo consiste basicamente na energização das fases do motor numa seqüência pré-determinada. Esta seqüência nos motores pode ser de duas formas, uma para o motor girar num sentido e outra para girar em sentido contrário. No entanto, além desta seqüência, as ligações, de acordo com o número de terminais, também devem ser analisadas principalmente para motores com oito terminais os quais podem ser ligados como motores de duas fases ou e quatro fases. De qualquer forma a seqüência de energização das bobinas é de fundamental importância para o correto funcionamento do motor.

Como todo circuito seqüencial consiste basicamente de um contador, que também é um circuito seqüencial, e de um circuito combinacional para tomada de decisões, neste caso, também será usado um contador para gerenciar a seqüência de ligação das fases. Será montada uma tabela verdade de um circuito no qual as entradas são os bits do código do contador, BCD 8421, Código Gray ou outro código qualquer. As saídas serão os respectivos bits do código das fases. A tabela de energização das fases será feita de acordo com o número de fases e a forma de operação do motor, isto é, quer a operação seja por passo completo com uma fase ligada ou com duas fases ligadas, ou ainda, se a operação for feita com meio passo. A Figura 7.1 ilustra o modo de funcionamento deste método. Na primeira coluna é colocada a seqüência de energização usando o sistema decimal. A segunda e terceira colunas mostram esta seqüência usando o código binário 8421, que também poderia ser qualquer outro código. As outras colunas se referem às fases do motor e a forma como se deseja energizá-las usando notação booleana. O

número “1” significa que o enrolamento da fase está energizado. Os quadros em branco não serão preenchidos com “0” da notação binária, isto é, o zero significa que aquela fase não está energizada naquela situação.

sequência de energização			FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
decimal	binária		F1	F2	F3	F4
	A	B				
R	0	0	1			
1	0	1		1		
2	1	0			1	
3	1	1				1

FIGURA 7.1 - Exemplo de Tabela verdade

Para a obtenção do circuito de acionamento de um motor de passo procede-se na seguinte ordem:

- determina-se o número de fases do motor analisando o tipo de motor e o número de terminais.
- monta-se a tabela de energização das fases de acordo com o modo de operação exigido ao mesmo tempo que determina-se o número de estados de energização.
- determina-se o número de flip-flop's de acordo com o número de estados de energização. O número de estados que os flip-flop's podem assumir é igual a 2^n , onde n é o número de flip-flops.
- escreve-se a tabela verdade para o circuito seqüencial do contador.

e) escreve-se as equações J e K de cada FF e minimiza-se estas equações usando o Mapa de Karnaugh.

f) monta-se a tabela verdade com a sequência de energização e com a tabela de energização das fases.

g) escreve-se a equação booleana de cada fase para a decodificação e minimiza-se estas equações usando os Mapas de Karnaugh.

h) desenha-se o circuito do contador e decodificador que será o circuito lógico de acionamento do motor.

Para o melhor entendimento deste procedimento alguns exemplos serão desenvolvidos.

Exemplo 1.

Obter o circuito para o acionamento de um motor de passo tipo “clawpole” que possui seis terminais de saída. O modo de operação do motor deve ser “um fase ligada por vez”.

Solução

a) Como o motor em estudo é um motor “clawpole” com seis terminais tem-se então quatro fases, F1, F2, F3 e F4. A bobina 1 do motor tem os terminais F1 e F2, e o terminal comum. A bobina 2 possui os terminais F3 e F4, e o terminal comum. É necessário, portanto, energizar as fases na seguinte ordem: F1, F3, F2 e F4 para o correto funcionamento do motor.

b) O motor possui quatro fases e deve operar no modo passo completo com apenas uma bobina energizada por vez. A tabela de energização das fases é mostrada na Figura 7.2, assim como o número de estados de energização.



c) Como observado na Figura 7.2 são necessários quatro estados para completar o ciclo de energização das fases do motor. Com dois FF's obtém-se quatro estados. Portanto serão utilizados dois FF's. O código binário a ser utilizado é o código Gray, onde somente um bit varia de um estado para o próximo. Este código além de ser adequado à velocidades altas de operação exige menos componentes para a sua montagem.

d) A tabela verdade para o circuito seqüencial do contador é mostrada na Figura 7.3.

		FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
		F1	F3	F2	F4
estado 1 →		1			
estado 2 →			1		
estado 3 →				1	
estado 4 →					1

→ 4 estados de energização necessitam de dois flip-flop's A e B

FIGURA 7.2 - Montagem da tabela de energização das fases e seus estados.

A	B	J_A	K_A	J_B	K_B
0	0	0	$\emptyset$	1	$\emptyset$
0	1	1	$\emptyset$	$\emptyset$	0
1	1	$\emptyset$	0	$\emptyset$	1
1	0	$\emptyset$	1	0	$\emptyset$

FIGURA 7.3 - Tabela verdade para o circuito seqüencial do contador

e) Na Figura 7.4 são colocadas as equações J e K de cada FF, ao mesmo tempo que são transferidas para o Mapa de Karnaugh para serem simplificadas. As equações simplificadas são as equações para implementar o circuito lógico.

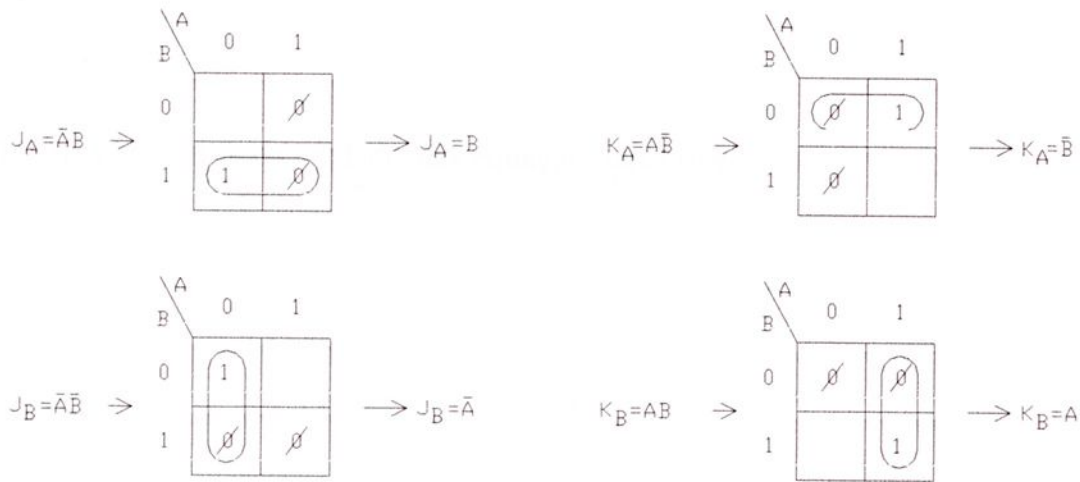


FIGURA 7.4 - Equações J e K dos FF's minimizadas.

f) Agrupando-se a tabela da seqüência de energização das fases, ou os estados do contador, e a tabela de energização das fases obtém-se a tabela verdade onde o código Gray será codificado no código de energização das fases, isto é, cada fase será expressa em função de A e B . A Figura 7.5 mostra a tabela verdade.

g) Na Figura PP estão mostradas as equações das fases. No entanto, não é possível minimizá-las conforme pode-se observar pela Mapa de Karnaugh.

seqüência de energização			FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
decimal	binária		F1	F3	F2	F4
	A	B				
R	0	0	1			
1	0	1		1		
2	1	0			1	
3	1	1				1

FIGURA 7.5 - Tabela verdade das equações das fases

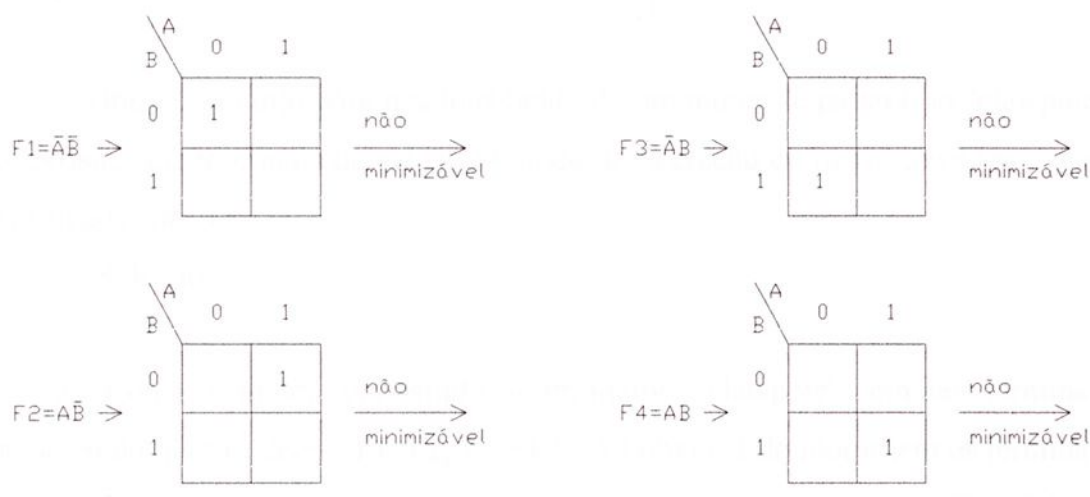


FIGURA 7.6 - Equações booleanas das fases do motor e Mapa de Karnaugh

h) O circuito lógico do contador e das fases é apresentado na Figura 7.7.

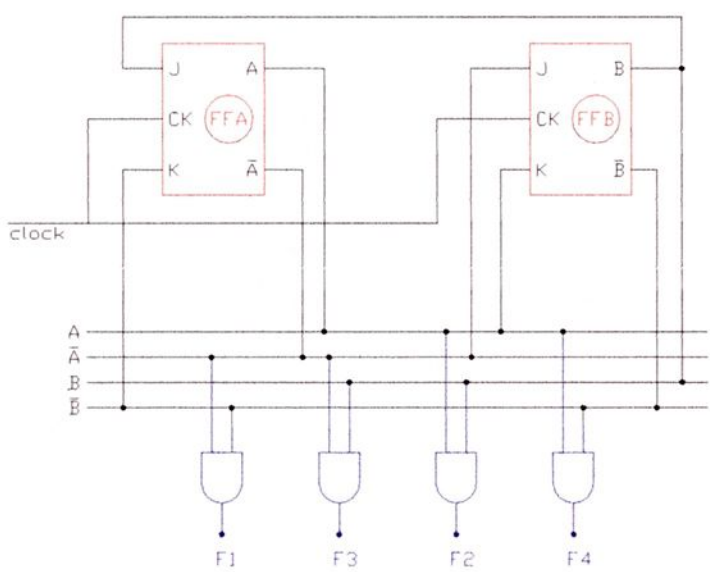


FIGURA 7.7 - Circuito lógico final para o acionamento do motor.

Exemplo 2.

Obter o circuito para o acionamento de um motor de passo tipo “clawpole” que possui seis terminais de saída. O modo de operação do motor deve ser “duas fases ligadas por vez”.

Solução

a) Como o motor em estudo é um motor “clawpole” com seis terminais tem-se então quatro fases, F1, F2, F3 e F4. A bobina 1 do motor tem os terminais F1 e F2 e o terminal comum. A bobina 2 possui os terminais F3 e F4 e o terminal comum. É necessário, portanto, energizar as fases na seguinte ordem: F1 e F3, F3 e F2, F2 e F4, e, F4 e F1 para o correto funcionamento do motor.

b) O motor possui quatro fases e deve operar no modo passo completo com apenas uma bobina energizada por vez. A tabela de energização das fases é mostrada na Figura 7.8, assim como o número de estados de energização.

		FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
		F1	F3	F2	F4
estado 1 →	→	1	1		
estado 2 →	→		1	1	
estado 3 →	→			1	1
estado 4 →	→	1			1

→ 4 estados de energização necessitam de dois flip-flop's A e B

FIGURA 7.8 - Montagem da tabela de energização das fases e seus estados

c) Como observado na Figura 7.8 são necessários quatro estado para completar o ciclo de energização das fases do motor. Com dois FF's obtém quatro estado . Portanto serão utilizados dois FF's. O código binário a ser utilizado é o código Gray, onde somente um bit varia de um estado para o próximo . Este código além de ser adequado a velocidades altas de operação exige menos componentes para a sua montagem.

d) A tabela verdade para o circuito seqüencial do contador é mostrada na Figura 7.9.

A	B	J_A	K_A	J_B	K_B
0	0	0	$\emptyset$	1	$\emptyset$
0	1	1	$\emptyset$	$\emptyset$	0
1	1	$\emptyset$	0	$\emptyset$	1
1	0	$\emptyset$	1	0	$\emptyset$

FIGURA 7.9 - Tabela verdade para o circuito seqüencial do contador.

e) Na Figura 7.10 são colocadas as equações J e K de cada FF, ao mesmo tempo que são transferidas para o Mapa de Karnaugh para serem simplificadas. As equações simplificadas são as equações para implementar o circuito lógico.

f) Agrupando-se a tabela da seqüência de energização das fases, ou os estados do contador, e a tabela de energização das fases, obtém-se a tabela verdade onde o código Gray será codificado no código de energização das fases, isto é, cada fase será expressa em função de A e B. A Figura 7.11 mostra a tabela verdade.

g) Na Figura 7.12 estão mostradas as equações das fases. No entanto, não é possível minimizá-las conforme pode-se observar pela Mapa de Karnaugh.

h) O circuito lógico do contador e das fases é apresentado na Figura 7.13.

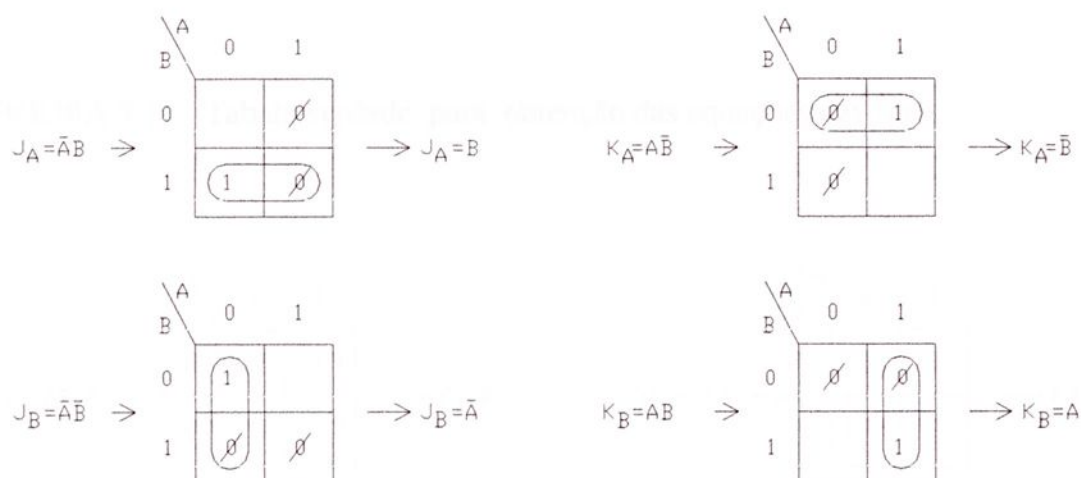


FIGURA 7.10 - Equações J e K dos FFs minimizadas.

FIGURA 7.12 - Equações das fases do contador e Mapa de Karnaugh

sequência de energização			FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
decimal	binária		F1	F3	F2	F4
	A	B				
R	0	0	1	1		
1	0	1		1	1	
2	1	0			1	1
3	1	1	1			1

FIGURA 7.11 - Tabela verdade para obtenção das equações das fases

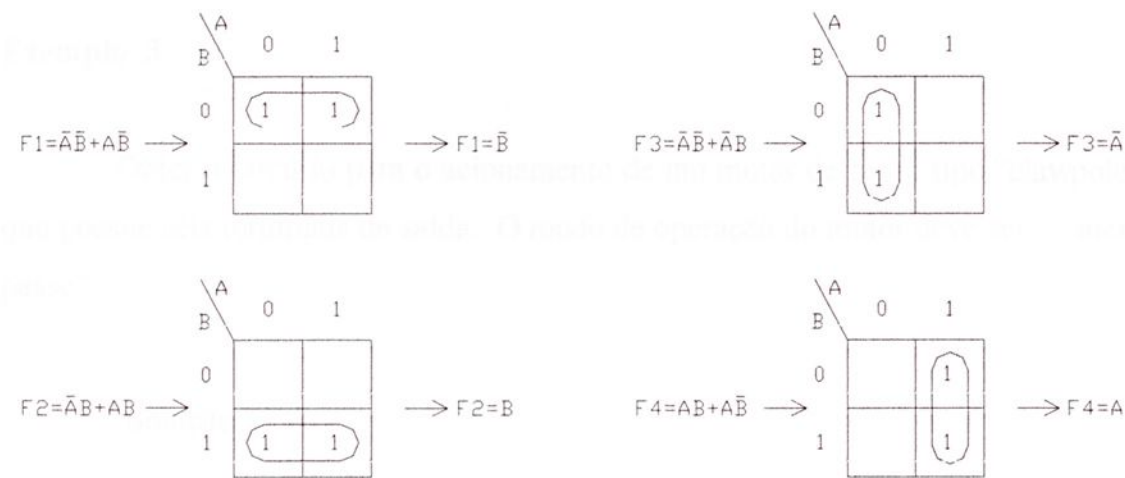


FIGURA 7.12 - Equações booleanas das fases do motor e Mapa de Karnaugh

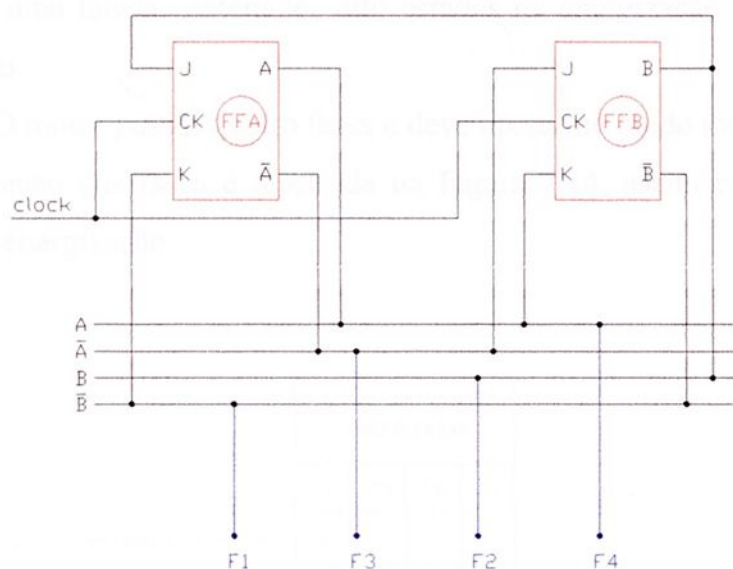


FIGURA 7.13 - Circuito lógico final para o acionamento do motor

Exemplo 3.

Obter o circuito para o acionamento de um motor de passo tipo “clawpole” que possui seis terminais de saída. O modo de operação do motor deve ser “meio passo”.

Solução

a) Como o motor em estudo é um motor “clawpole” com seis terminais, tem-se então quatro fases, F1, F2, F3 e F4. A bobina 1 do motor tem os terminais F1 e F2 e o terminal comum. A bobina 2 possui os terminais F3 e F4 e o terminal comum. É necessário, portanto, energizar as fases na seguinte ordem: F1, F1 e F3, F3, F3 e F2, F2, F2 e F4, F4, F4 e F1 para o correto funcionamento do motor. Sabendo-se que o modo de operação é meio passo, com o

auxílio de uma tabela obtém-se oito estados de energização durante o ciclo de energização.

b) O motor possui quatro fases e deve operar no modo meio passo. A tabela de energização das fases é mostrada na Figura 7.14, assim como o número de estados de energização.

		FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
		F1	F3	F2	F4
estado 1	→	1			
estado 2	→	1	1		
estado 3	→		1		
estado 4	→		1	1	
estado 5	>			1	
estado 6	→			1	1
estado 7	→				1
estado 8	→	1			1

8 estados de energização necessitam de três flip-flop's A, B e C

FIGURA 7.14 -Montagem da tabela de energização das fases e seus estados

c) Como observado na Figura 7.14 são necessários oito estados para completar o ciclo de energização das fases do motor. Com três FFs obtém-se oito estados. Portanto serão utilizados três FFs. O código binário a ser utilizado é o código Gray, onde somente um bit varia de um estado para o próximo. Este código além de ser adequado a velocidades altas de operação exige menos componentes para a sua montagem.

d) A tabela verdade para o circuito seqüencial do contador é mostrada na Figura 7.15.

A	B	C	J _A	K _A	J _B	K _B	J _C	K _C
0	0	0	0	∅	0	∅	1	∅
0	0	1	0	∅	1	∅	∅	0
0	1	1	0	∅	∅	0	∅	1
0	1	0	1	∅	∅	0	0	∅
1	1	0	∅	0	∅	0	1	∅
1	1	1	∅	0	∅	1	∅	0
1	0	1	∅	0	0	∅	∅	1
1	0	0	∅	1	0	∅	0	∅

FIGURA 7.15 - Tabela verdade para o circuito seqüencial do contador.

e) Na Figura 7.16 são colocadas as equações J e K de cada FF, ao mesmo tempo que são transferidas para o Mapa de Karnaugh para serem simplificadas. As equações simplificadas são as equações para implementar o circuito lógico.

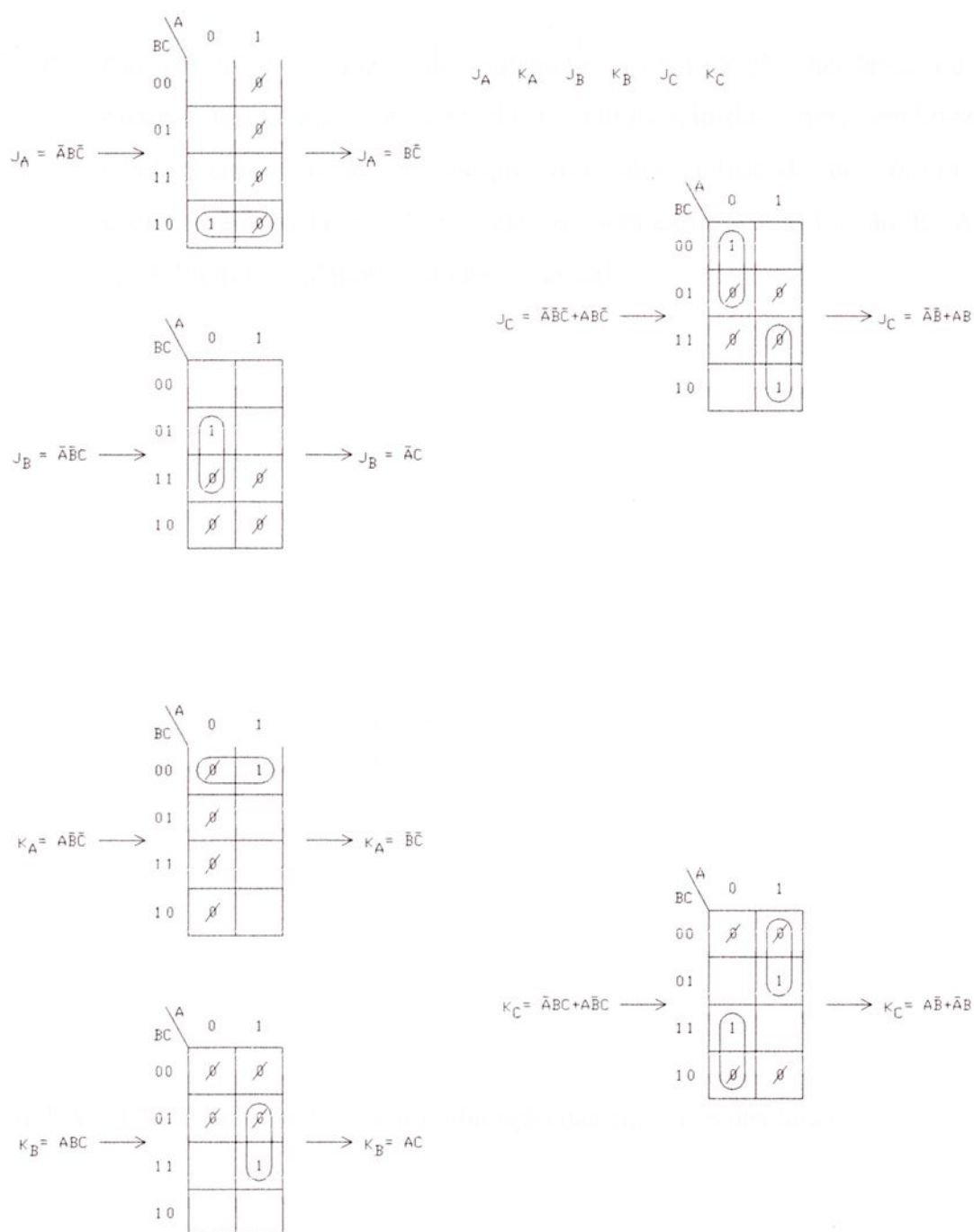


FIGURA 7.16 - Equações J e K dos FFs, minimizadas.

f) Agrupando-se a tabela da seqüência de energização das fases, ou os estados do contador, e a tabela de energização das fases, obtém-se a tabela verdade onde o código Gray será codificado no código de energização das fases, isto é, cada fase será expressa em função de A e B . A Figura 7.17 mostra a tabela verdade.

seqüência de energização				FASES DO MOTOR ENERGIZADAS			
decimal	binário			F1	F3	F2	F4
	A	B	C				
R	0	0	0	1			
1	0	0	1	1	1		
2	0	1	1		1		
3	0	1	0		1	1	
4	1	1	0			1	
5	1	1	1			1	1
6	1	0	1				1
7	1	0	0	1			1

FIGURA 7.17 - Tabela verdade para obtenção das equações das fases

g) Na Figura 7.18 estão mostradas as equações das fases. No entanto, não é possível minimiza-las conforme pode-se observar pela Mapa de Karnaugh.

h) O circuito lógico do contador e das fases é apresentado na Figura 7.19.

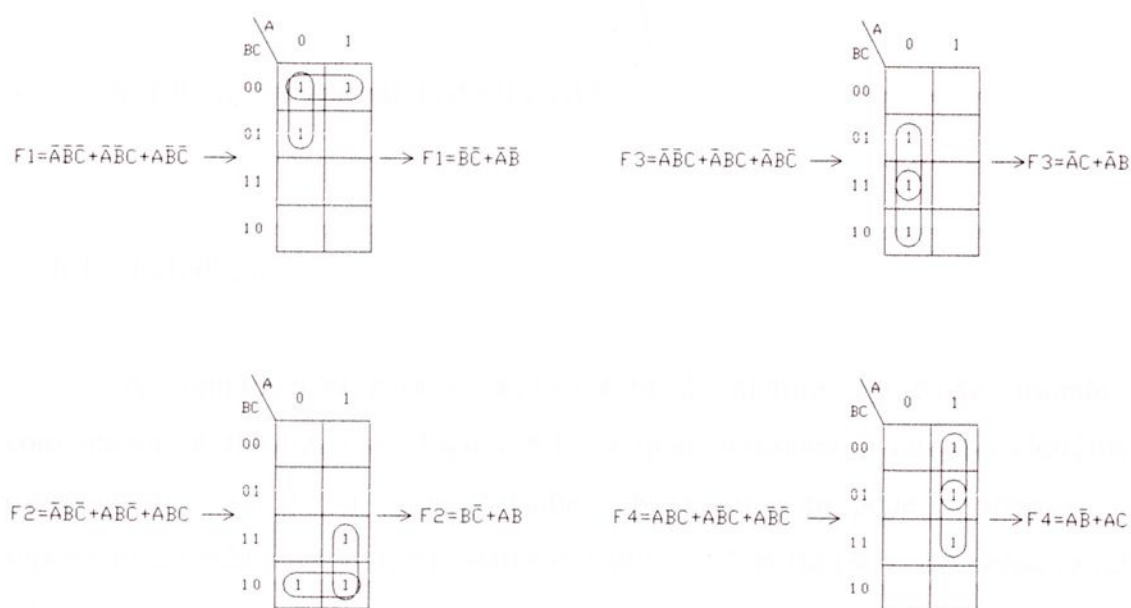


FIGURA 7.18 - Equações booleanas das fases do motor e Mapa de Karnaugh

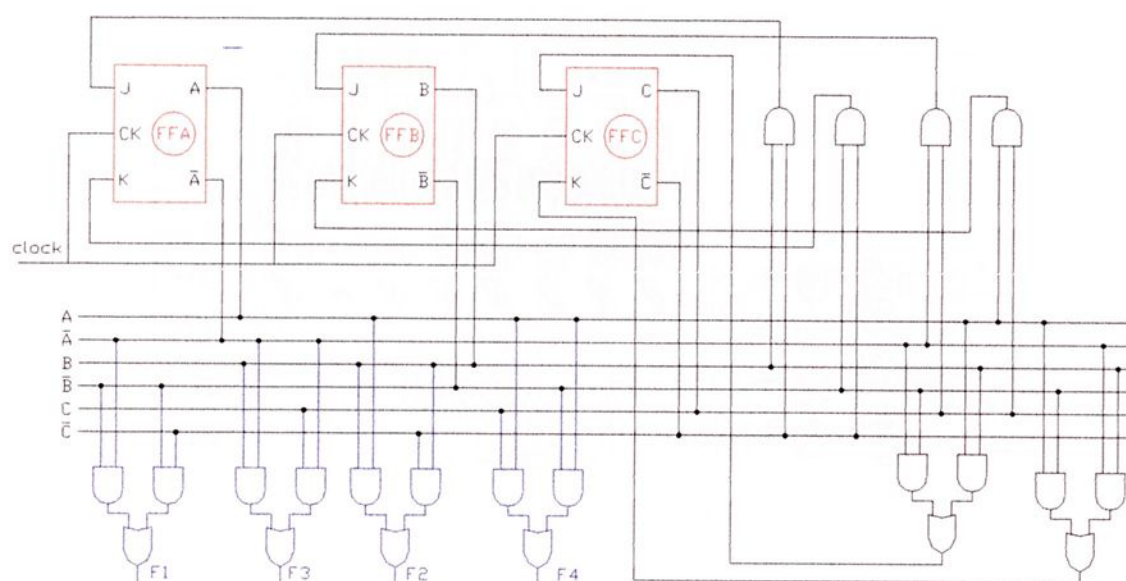


FIGURA 7.19 - Circuito lógico final para o acionamento do motor

8 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

8.1 Introdução

A comprovação para o acionamento de motores de passo, usando o computador, é mostrada na Figura 8.1 a qual apresenta o circuito eletrônico especialmente criado para este trabalho. Neste circuito pode-se observar a separação das três portas : Data, Status e Control. A porta Data apresenta os oito bits, enquanto a porta Status apresenta cinco e a porta Control quatro bits.

Na porta Data podem ser ligados simultaneamente dois motores, enquanto na porta Control apenas um. A porta Status permanece como uma porta para leitura, podendo ser utilizada para atuar sobre o funcionamento dos motores através de sensores e comandados pelo programa.

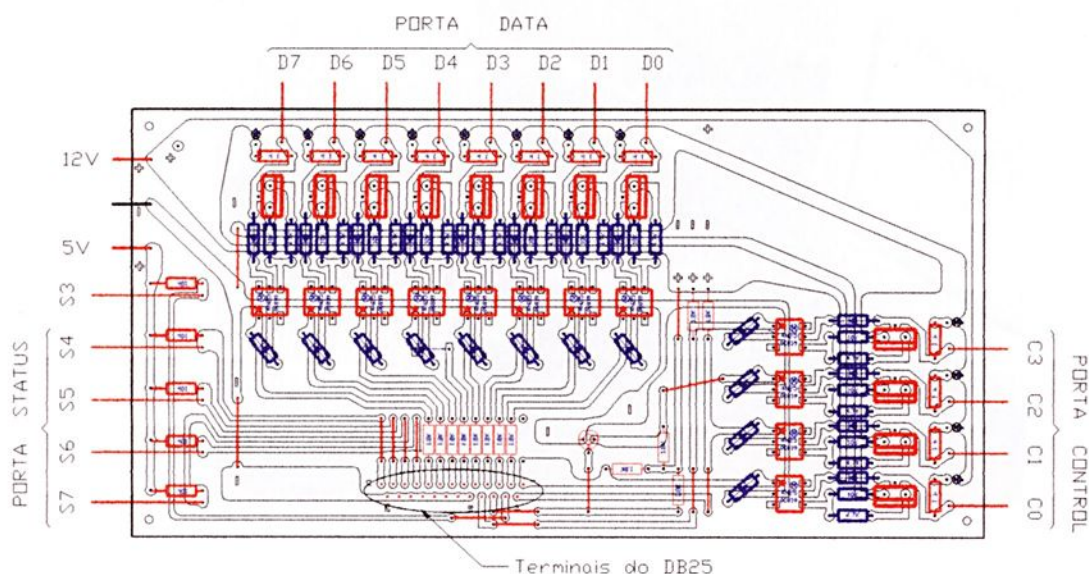


FIGURA 8.1 - Circuito eletrônico e as portas DATA,STATUS e CONTROL

O circuito foi montado de forma a mostrar separadamente todos os seus componentes agrupados. Sendo assim, pode-se observar que o conector DB25 e o acoplador óptico estão completamente separados do circuito de potência que aciona os motores. Entretanto eles estão acoplados opticamente pelos respectivos sinais digitais.

Deve-se observar ainda que existe um LED em cada bit da porta Data e da porta Control. Este dispositivo permite que durante a programação o modo que o motor deverá ser acionado, seja testado previamente utilizando o programa. Isto é feito fazendo o programa rodar como se normalmente o motor estivesse sendo acionado. Cada sinal que deveria acionar uma fase do motor acenderá o LED, permitindo que seja testado o funcionamento do programa. Fica claro que a frequência de teste deverá ser tal que o olho possa acompanhar as mudanças.



FIGURA 8.2 Montagem da interface ao computador e aos motores de passo

O circuito apresentado possui proteção contra as tensões geradas pelo desligamento das bobinas. Esta proteção é para evitar que os transistores de potência sejam danificados por esses picos de tensão.

A porta Data trabalha com todos os bits em lógica positiva, isto é, se o programa informar que um bit “1” foi comandado, a saída responderá com um bit “1” também. Entretanto, a porta Control possui três bits com lógica inversa e um com lógica positiva. Tomou-se cuidado, portanto, durante o projeto do circuito para que a porta Control se comporte com todos os bits com lógica positiva, semelhante à porta Data, logicamente, com a finalidade de facilitar a programação.

8.2 Componentes da unidade

O circuito de acionamento dos motores de passo consiste dos seguintes elementos:

- Cabo padrão DB-25 (macho) nas 2 extremidades, facilmente encontrado no comércio. Uma extremidade do cabo é conectada ao conector DB-25 (fêmea) do computador e a outra ao conector DB25 (fêmea) do circuito de interface;
- unidade de interface caracterizada por um conector DB25 (fêmea) para a entrada dos sinais das portas, resistores de proteção, diodos de proteção, acopladores ópticos, transistores de potência, LEDs indicadores dos sinais D0 a D7 e C0 a C3. Os LEDs indicadores quando acessos indicam que os transistores estão saturados e, se apagados, indicam que os transistores estão cortados. Logo um sinal no estado 1 da porta faz com que o transistor de potência seja chaveado para terra e um sinal no estado 0 da

porta faz com que o transistor seja cortado. Os elementos desta unidade foram devidamente montados em uma placa de circuito impresso;

- fonte de alimentação DC regulada de 5V e 12V.
- Motores de passo tipo “híbrido” com 6 terminais neste caso; podem ser utilizados também motores tipo “clawpole”,

A unidade de chaveamento e potência usualmente denominada “driver” consiste de um transistor Darlington TIP122 cuja função, é comutar e amplificar os sinais advindos da porta paralela.

A interface de conexão do motor com a unidade física de acionamento é simples e consiste de um conector para fixação dos terminais do motor.

Os demais componentes como diodos, resistores são elementos complementares ao desenvolvimento do circuito.

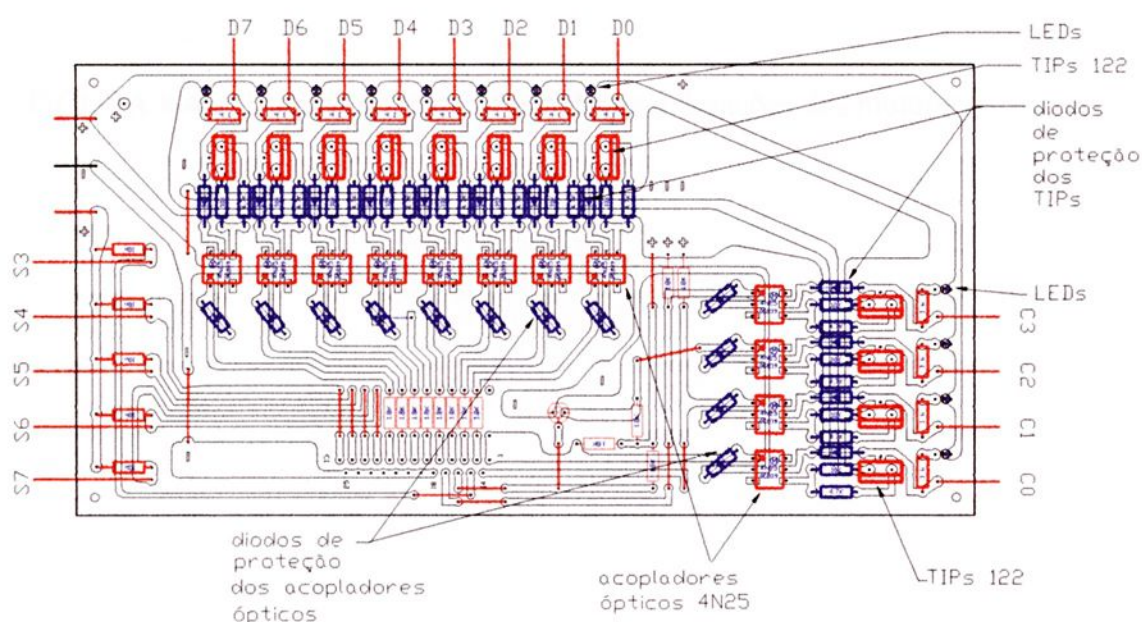


FIGURA 8.4 Circuito impresso-lado dos componentes e nomenclatura

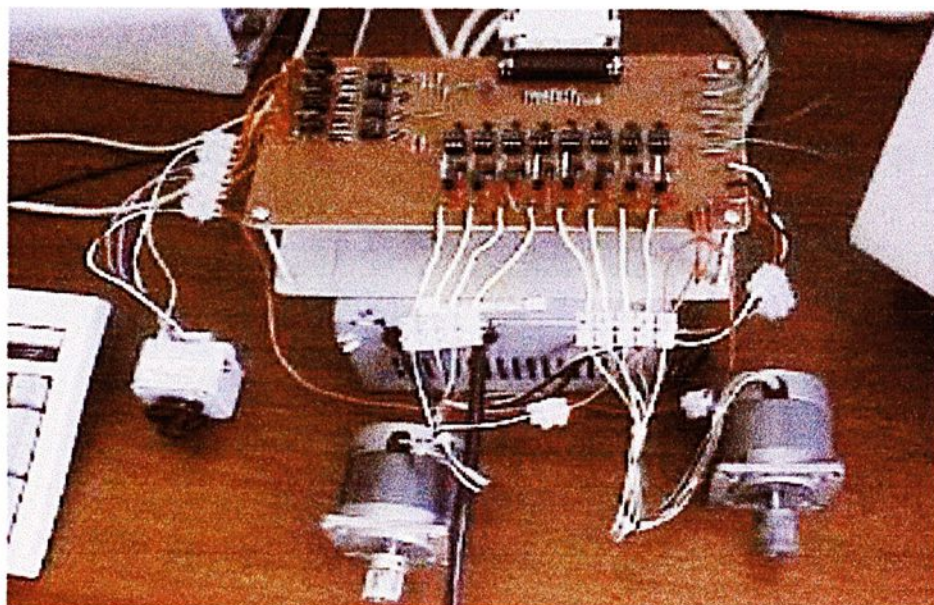


FIGURA 8.4 - Detalhe do circuito eletrônico e ligações dos motores.

9 CONCLUSÕES

Ampla pesquisa bibliográfica permitiu :

- a) fazer um breve histórico dos motores de passo;
- b) concluir que o motor de relutância variável foi o primeiro motor a aparecer e que o motor híbrido foi o último;
- c) concluir que o motor clawpole é comercialmente o mais barato e o mais usado;
- d) concluir que em termos de projeto de circuitos para acionamento dos motores de passo não se conheceu trabalhos em língua portuguesa que descrevesse os detalhes de obtenção destes circuitos;
- e) concluir que os circuitos de acionamento dos motores de passo normalmente são apresentados prontos, em livros e revistas, sem mostrar nenhuma metodologia para obtê-los;

O funcionamento dos três tipos de motores de passo foi descrito minuciosamente nos capítulos 2, 3 e 4, assim como a forma de acioná-los foi explicada no capítulo 5. O apêndice inclui revisão e detalhes sobre álgebra booleana. O capítulo 6 mostra todos os detalhes da porta paralela de um computador assim como explica em detalhes como acionar um motor de passo utilizando o computador. O capítulo 7 apresenta detalhes de como obter um circuito digital, utilizando álgebra booleana, para o acionamento de um motor de passo e de várias formas.

A contribuição deste trabalho é para auxiliar o engenheiro que de alguma forma, seja para o projeto de máquinas elétricas, seja simplesmente para entender o funcionamento, possa ter um referência, principalmente em língua portuguesa, e com os detalhes que foram apresentados, para o aprendizado desta máquina elétrica especial: o motor de passo. Outra contribuição importante é para os cursos de

graduação onde se deseja detalhes mecânicos internos e detalhes dos circuitos para que o aluno possa entender o funcionamento da máquina.

Contribui ainda este trabalho para os engenheiros, estudantes e pesquisadores que necessitam usar o computador para acionar os motores de passo, ou como complemento de pesquisas, ou como aplicações diretas em projetos na área de robótica.

Finalmente a contribuição mais importante é permitir que um motor de passo seja acionado da forma que se deseja, pois sabendo-se projetar o seu acionamento, utilizando álgebra booleana e o computador, fica ilimitada a aplicação deste motores.

Assim, o proposto como objetivo foi alcançado.

Durante a realização deste trabalho, deparou-se com diversos aspectos que merecem estudos mais aprofundados, mas não foram aqui tratados por serem complementares ao objetivo, tais como, a análise dinâmica do motor e os seus transitórios entre as posições de equilíbrio. Este é um assunto que poderá ser desenvolvido em trabalhos de teses de mestrado ou doutorado, pois é um tema que necessita ser analisado tanto pelo lado eletromagnético como pelo lado mecânico. Tal trabalho também requer, além do tratamento teórico, comprovações experimentais.

Deve-se lembrar também que no acionamento preciso do motor de passo, quando se inverte a rotação e quando o motor é acionado por trens de pulsos, pode ocorrer pequenos erros, caso tal análise não seja levada em consideração. Entretanto, apesar deste detalhe não ter sido considerado neste trabalho, com as informações aqui fornecidas este assunto pode ser resolvido.

APÊNDICE A

CIRCUITOS LÓGICOS

A.1 Introdução

Em meados do século passado, por volta de 1854, George Boole desenvolveu um sistema matemático de análise lógica na sua obra “Theory of Thought”. Esse sistema é conhecido como Álgebra de Boole.

No início da era eletrônica, todos os problemas eram resolvidos por sistemas analógicos, também conhecidos por sistemas lineares.

Com o avanço da tecnologia, esses mesmos problemas começaram a ser solucionados através da eletrônica digital. Esse ramo da eletrônica empregado nas máquinas, tais como: computadores, sistemas de controle, comutação digital, codificadores, decodificadores, etc. apenas um pequeno grupo de circuitos lógicos básicos conhecidos como portas OU, E, NÃO e Flip-Flops.

Através da utilização conveniente desses circuitos podemos implementar todas as expressões geradas pela álgebra de Boole, que constituem uma poderosa ferramenta para os projetos das máquinas digitais.

As funções lógicas têm apenas dois estados:

- Estados zero - 0
- Estado um - 1

O estado zero pode representar várias situações, por exemplo: porta aberta, ausência de tensão, chave desligada, etc. O estado um representará então: porta fechada, presença de tensão, chave ligada, etc. Nestes exemplos observa-se que a

situação representada por zero tem uma situação representada por um de forma contrária.

Este método de análise usando apenas dois estados durante muito tempo foi considerado apenas como uma curiosidade. Entretanto adquiriu considerável difusão depois do aparecimento das calculadoras numéricas. Estas primeiras máquinas tinham os dois estados representados mediante a ajuda de relés. Mais tarde as válvulas eletrônicas e depois os transistores substituíram os relés, mas o modo de funcionamento permaneceu inalterado. Uma válvula ou um transistor está aberto ou saturado que equivale ao estado aberto ou fechado dos relés.

A álgebra booleana é, em princípio, um sistema matemático simplificado, empregado para se manipular funções binárias. Através dela pode-se exprimir as várias funções lógicas, tanto simples como complexas, de um modo conveniente. Tem-se assim um método prático de entender e projetar circuitos lógicos digitais. Esta álgebra é a linguagem especial dos circuitos lógicos digitais. É um recurso matemático para se expressar, analisar e projetar circuitos lógicos. De muitas formas, é similar à álgebra convencional, sendo, porém, mais simples e exibindo algumas diferenças fundamentais.

Ao se expressar matematicamente as funções lógicas, tem-se um meio conveniente de análise e expressão de operações em circuitos digitais. Em projetos, também, a álgebra booleana é de grande ajuda, pois sua aplicação resulta sempre em circuitos que são os mais simples, mais baratos e mais eficientes.

Uma expressão booleana é uma equação que define a saída de um circuito lógico, nos termos de suas entradas. Existem dois tipos de circuitos lógicos básicos que são os de decisão e os de memória. Ambos aceitam entradas binárias e têm saídas binárias. O estado da saída é função do estado das entradas e das características próprias do circuito lógico. Circuitos lógicos de decisão fazem exatamente o que seu nome propõe: tomam decisões. O elemento básico de decisão é a porta. Uma porta tem duas ou mais entradas binárias e uma única saída binária. Símbolos específicos são utilizados para representar tipos específicos de portas.

666 -

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Existem vários tipos de portas, cada um deles realizando uma determinada operação de decisão. A porta durante a operação, verifica suas entradas binárias e, baseada em seus estados e em sua função de decisão, gera uma saída correspondente.

Muitas funções lógicas simples podem ser realizadas com uma só porta, mas várias portas são necessárias para realizara circuitos e decisão mais complexos; a esses circuitos mais complexos damos o nome de circuitos combinacionais. Um circuito combinacional é formado por duas ou mais portas, e possui uma ou mais portas, e uma ou mais saídas; continuam tendo a natureza de decisão, mas de natureza mais sofisticada.

Outro tipo de elemento lógico é o circuito de memória. O elemento básico de memória é o elemento de armazenamento biestável, chamado de flip-flop. Uma grande parte dos circuitos de memória são interconectados com circuitos combinacionais, para formar um elemento de memória mais sofisticado, denominado circuito seqüencial. A saída do circuito seqüencial é função da entrada binária, do dado binário armazenado no circuito e das características específicas do circuito. As aplicações típicas dos circuitos seqüenciais são os contadores, registradores de deslocamentos, seqüenciadores, etc.

Os três elementos lógicos básicos de decisão são as portas Não(NOT), E(AND) e OU (OR). Todos os outros elementos e circuitos lógicos não passam de variações desses três elementos básicos. Cada um desses elementos recebe uma ou mais entradas binárias e gera uma única saída binária.

De forma a distinguir uma entrada binária de outra e de forma a identificar as entradas e as saídas binárias, é dado um nome a cada sinal. Na sua representação mais simples, o nome é dado por uma letra, uma palavra, número ou suas combinações, tais como, A, B, Y, AY, A1, etc. Esse nome ou designação indica um sinal lógico específico, que pode assumir um dos dois estados binários "1" ou "0".

A.2 Tabela Verdade

Uma das ferramentas mais úteis para se analisar, projetar ou trabalhar com circuitos lógicos digitais é a tabela verdade. Ela não passa de uma lista, onde são relacionados todas as combinações possíveis de entrada e saída de um circuito lógico dado, utilizando os algarismos “0” e “1” binários. A tabela verdade define completamente a operação do circuito. O número total de combinações possíveis de entrada, em portas com duas ou mais entradas, pode ser determinado por 2 elevado a n , onde n é o número de entradas da porta.

A tabela verdade é empregada para definir a operação de circuitos lógicos desde o simples inversor, até circuitos combinacionais complexos.

Existem duas maneiras de se utilizar tabelas verdade no trabalho com circuitos lógicos. Uma delas é a de desenvolver uma tabela verdade a partir de um circuito lógico dado, geralmente utilizada em análise de circuitos; a outra consiste em se desenvolver uma equação ou circuito lógico, a partir de uma tabela verdade, útil como ferramenta de projetos.

A tabela verdade portanto é constituída de tantas colunas de entrada quanto forem as variáveis de entrada e de colunas de saída constituídas por qualquer combinação das entradas.

A.3 O inversor

Como somente existem os valores 0 e 1 em álgebra de Boole, o inverso de uma variável é o outro valor da variável. Se o valor da variável é 1, o seu inverso é 0 e se é 0 o seu inverso é 1. Esta operação se representa colocando uma barra sobre a variável a inverter. Assim de acordo com a definição, a inversão de

A é $\bar{A}$. O circuito lógico que realizará esta operação se representa pelo operador mostrado na figura A.1

Na figura A.1 também é mostrada a representação da Tabela Verdade que possui uma variável de entrada e uma saída, e duas situações possíveis de entrada.

A.4 Operador E ou multiplicação lógica

Esta operação se efetua sobre duas ou mais variáveis. A multiplicação lógica de duas ou mais variáveis booleanas é outra variável booleana que toma o valor 1, se e somente se as duas variáveis forem 1. No restante dos casos o seu valor é 0. A multiplicação lógica de duas variáveis booleanas dá lugar a 4 combinações. Esta operação se chama multiplicação lógica por analogia com a multiplicação clássica. Na figura A.2 está a representação do operador E, a tabela verdade e a equação que expressa a saída S em função das entradas A e B. A função E é representada pelo ponto colocado entre as duas variáveis, sendo semelhante ao produto de variáveis algébricas.

A função foi descrita para duas variáveis apenas. Todavia esse conceito pode se estender para qualquer número de entradas. Tem-se nesse caso uma função E para n entradas, e somente uma saída. A saída permanecerá no estado 1 se e somente se as n entradas forem iguais a 1, e permanecerá no estado 0 nos demais casos. O número de situações possíveis de combinações da variáveis de entrada é igual a 2 elevado a n. A função E também é conhecida com função AND, nome derivado do inglês.

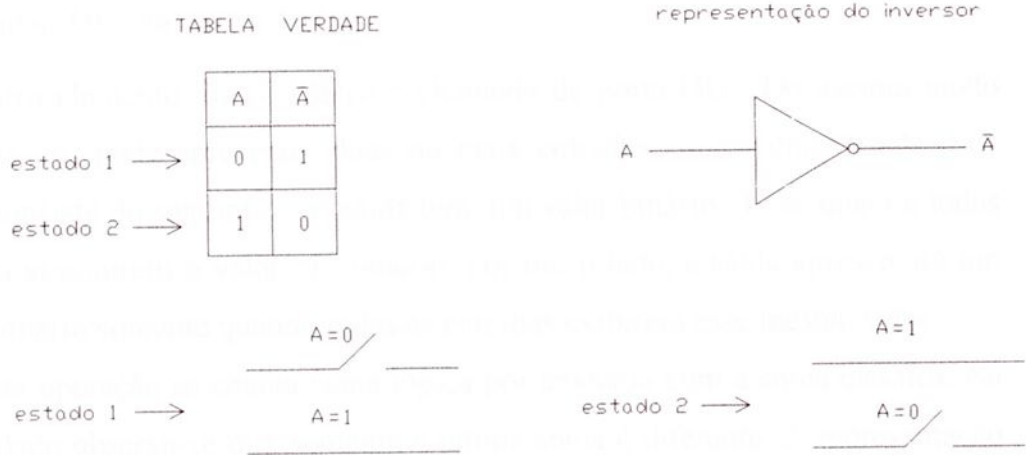


FIGURA A.1 Porta inversora

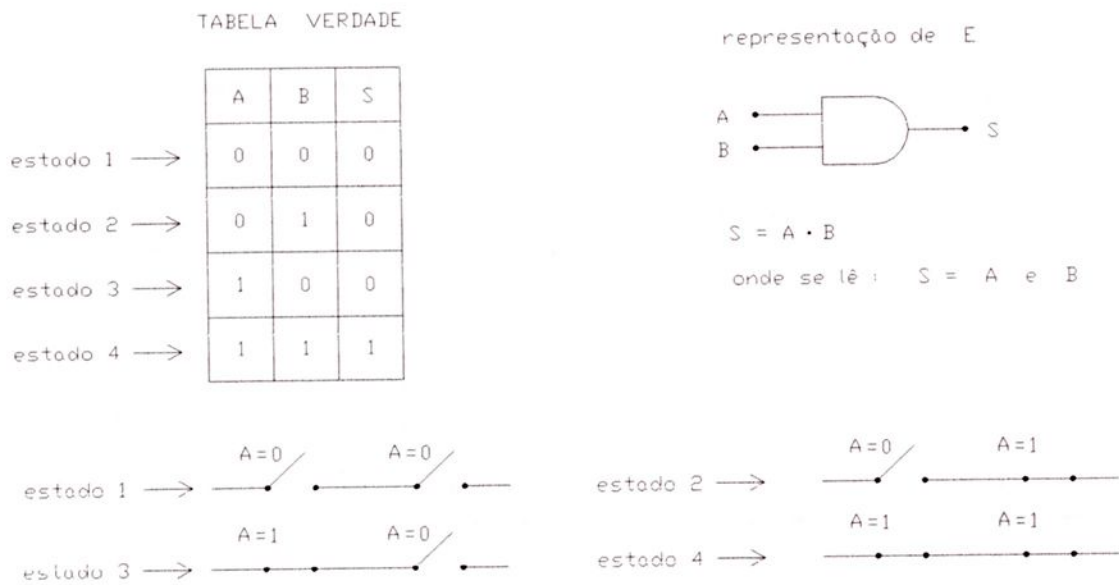


FIGURA A.2 Porta E

A.5 Operador OU ou soma lógica

Outro elemento lógico básico é chamado de porta OU. Do mesmo modo que a porta E, pode apresentar duas ou mais entradas e uma única saída. Sua operação consiste do seguinte: a saída terá um valor binário “1” se uma ou todas as entradas assumirem o valor “1” binário. Por outro lado, a saída apresentará um valor “0” binário somente quando todas as entradas exibirem esse mesmo valor.

Esta operação se chama soma lógica por analogia com a soma clássica. Na tabela verdade observa-se que somente a última soma é diferente. A representação do circuito lógico, a tabela verdade e a equação que expressa a saída S em função das entradas A e B estão colocados na figura 6.3. Aqui também a equação está representada para apenas duas variáveis, mas o conceito é válido para qualquer número de variáveis de entrada.

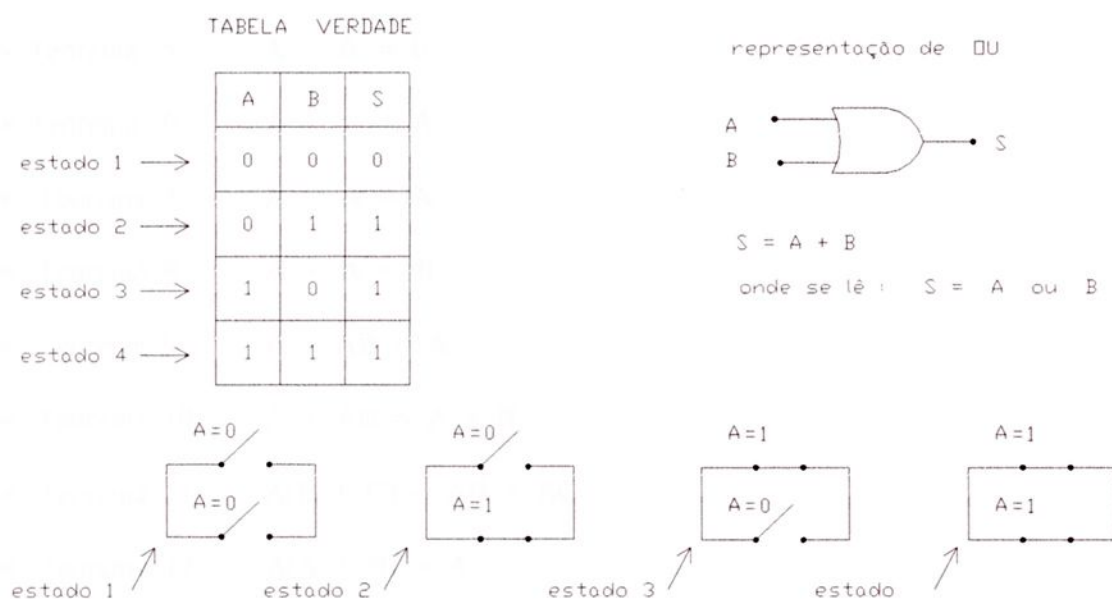


FIGURA A.3 PORTA OU

A.6 Teoremas fundamentais da álgebra de Boole

Pode-se demonstrar os teoremas fundamentais da álgebra de Boole mediante o uso da tabela verdade. Para a demonstração será montada na coluna da esquerda todas as possíveis combinações das variáveis. Na coluna central será expressa a operação em estudo em função das variáveis. E na coluna da direita será obtida uma expressão equivalente simplificada. As Tabelas Verdade estão mostradas na figura 6.4 e 6.5.

- Teorema 1 $A + 0 = A$
- Teorema 2 $A + 1 = 1$
- Teorema 3 $A + A = A$
- Teorema 4 $A + \bar{A} = 1$
- Teorema 5 $A \cdot 0 = 0$
- Teorema 6 $A \cdot 1 = A$
- Teorema 7 $A \cdot A = A$
- Teorema 8 $A \cdot \bar{A} = 0$
- Teorema 9 $A + AB = A$
- Teorema 10 $A + \bar{A}B = A + B$
- Teorema 11 $A(B + C) = AB + AC$
- Teorema 12 $A(A + B) = A$
- Teorema 13 $(A + B)(A + \bar{B}) = A$
- Teorema 14 $\bar{\bar{A}} = A$

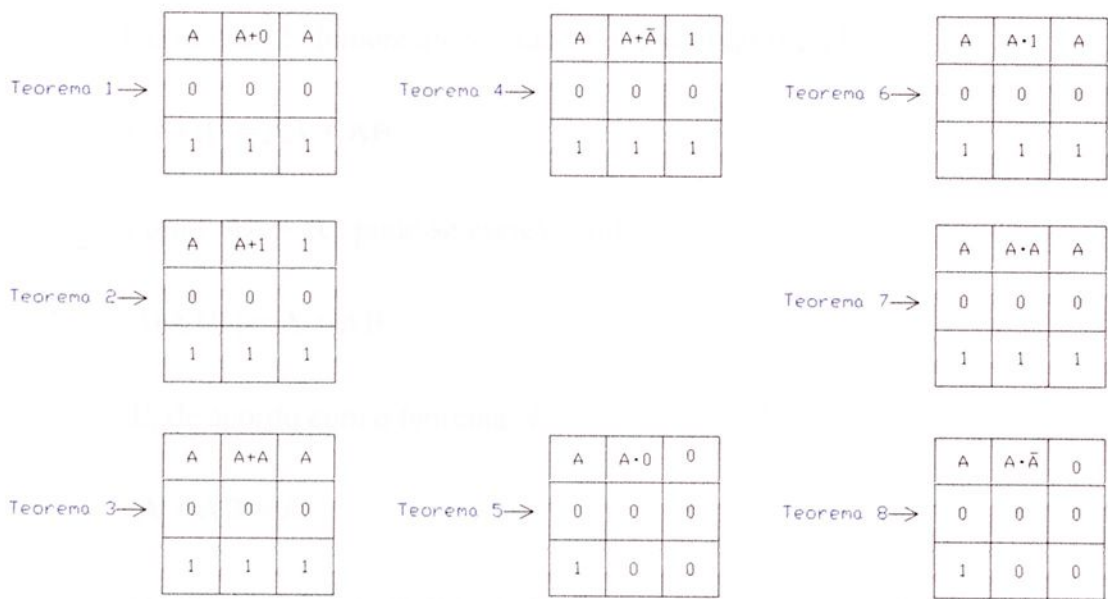


FIGURA A.4 Tabelas Verdade para prova dos teoremas 1 a 8.

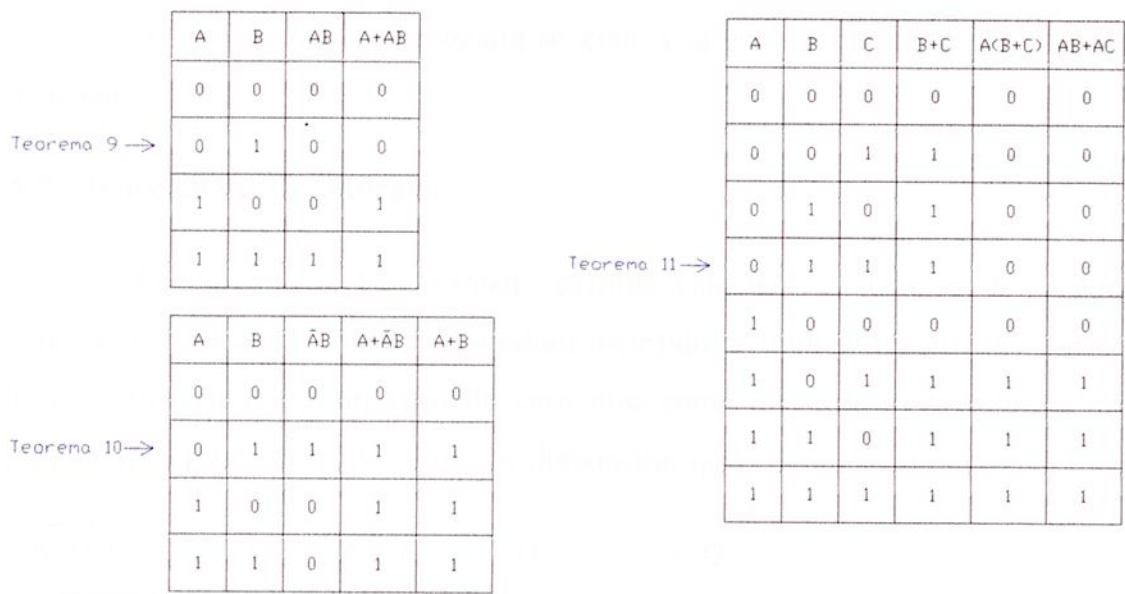


FIGURA A.5 Tabelas Verdade para prova dos teoremas 9, 10 e 11.

O teorema 12 demonstra-se usando os teoremas 9 e 11:

$$A(A+B) = AA + AB$$

Como $AA = A$, pode-se escrever que:

$$A(A+B) = A + AB$$

E, de acordo com o teorema 9:

$$A + AB = A$$

O teorema 13 demonstra-se usando os teorema precedentes:

$$(A+B)(A+\overline{B}) = AA + A\overline{B} + AB + B\overline{B}, \text{ ou}$$

$$(A+B)(A+\overline{B}) = A$$

O teorema 14 demonstra-se com a aplicação direta da definição de inversão.

A.7 Teorema de De Morgan

O teorema de De Morgan permite calcular a inversa de qualquer expressão booleana. Primeiro o produto invertido se transforma em uma soma de termos invertidos. Num segundo caso uma soma invertida se transforma num produto de termos invertidos. Pode-se demonstrar que:

$$\overline{A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot \dots \cdot Q} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \overline{D} + \dots + \overline{Q}$$

$$\overline{A+B+C+D+\dots+Q} = \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \cdot \overline{D} \cdot \dots \cdot \overline{Q}$$

A.8 Função Não E (NAND)

Como o próprio nome Não E diz essa função é uma composição da função E com a função Não, ou seja, tem-se a função E invertida. Na figura c.6 é mostrado a tabela verdade desta função e a representação do bloco lógico que executa esta função que é a porta Não E ou NAND.

A.9 Função Não OU (NOR)

Analogamente à função Não E , a função Não OU é a composição da função OU com a função Não, ou seja, a função Não OU é o inverso da função OU. Na figura c.6 é mostrado a tabela verdade desta função e a representação do bloco lógico que executa esta função , chamado porta Não OU ou NOR.

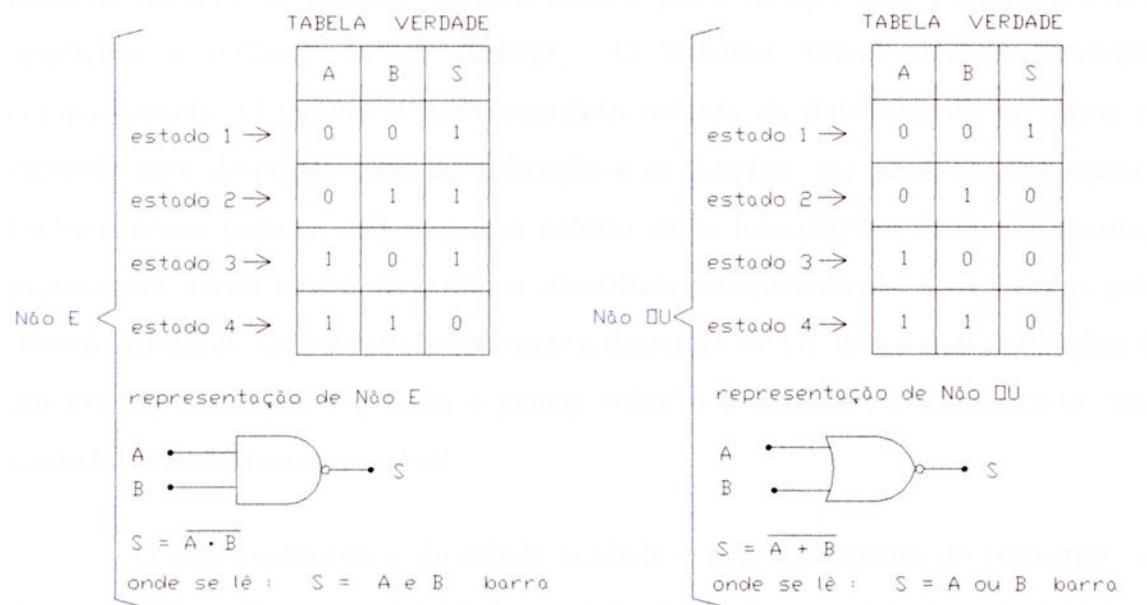


FIGURA A.6 Portas Não E (NAND) e Não OU (NOR).

A.10 Circuitos lógicos combinacionais

Para o projeto de um circuito lógico combinacional utiliza-se um procedimento que vai desde a definição básica do problema até o circuito completo. Os passos para o desenvolvimento desse processo são:

1. Definição do problema
2. Desenvolvimento da tabela verdade
3. Anotação das equações lógicas
4. Minimização das equações lógicas
5. Seleção do circuito e implementação do projeto

A definição do problema significa que se deve identificar inteiramente todas as funções do circuito. Deverá saber a partir da aplicação específica quais operações o circuito deverá realizar. O trabalho inicial será descrever-las completamente. O melhor e mais completo método da definição do problema é escrever uma descrição total da aplicação e as funções que se deseja conseguir. Embora possa parecer desnecessário colocar estas informações na forma escrita, procedendo assim estará forçando a identificar completamente e explicar o que deverá acontecer. O processo de escrever a descrição do circuito e suas aplicações é um exercício valioso. Ele força a pensar sobre o problema e a identifica-lo tão cuidadosamente quanto possível.

O desenvolvimento da tabela verdade é o procedimento de converter a descrição do problema em uma tabela verdade. A tabela é uma carta que identifica completamente todas as combinações de entrada possíveis, e os estados lógicos correspondentes da saída. A tabela verdade define totalmente a operação do circuito.

O primeiro passo no desenvolvimento da tabela verdade é determinar o número de entradas para o circuito lógico. O número de entradas determinará o número máximo de estados de entrada que podem ocorrer com esse número de variáveis. O total de estados de entrada possíveis é igual a 2 elevado a n , onde n é o número de entradas. Por exemplo, se definir quatro entradas para o circuito, há um número total possível de $2^{*4}=16$ diferentes estados que podem acontecer.

O desenvolvimento das equações lógicas booleanas a partir da tabela verdade é o próximo passo neste processo. Isto colocará a função lógica numa forma em que ela possa ser manipulada com álgebra booleana, o que permitirá usar técnicas para minimizar o circuito. Para escrever a equação lógica usando a tabela verdade, observa-se as colunas de saída e escreve o produto dos termos das entradas para cada saída onde ocorre um estado binário 1. O resultado será uma equação lógica soma de produtos. Esse processo levará uma única equação booleana para cada saída. Nesse ponto é possível implementar a equação booleana diretamente com circuitos lógicos.

A minimização das equações lógicas pode ser realizada a partir dos teoremas e regras da álgebra booleana. Normalmente uma redução significativa da equação é conseguida. Esse passo na minimização é muito importante para o projeto do circuito. O uso da álgebra booleana é muitas vezes demorado e trabalhoso para a redução das equações. Por esta razão a álgebra booleana tem suas limitações. Outras formas existem para fazer a máxima quantidade de minimização possível, além de fazê-lo rápida e convenientemente. Uma técnica conhecida é a utilização do Mapa de Karnaugh.

O passo final para o projeto do circuito lógico combinacional é a sua implementação usando as portas lógicas.



A.11 Mapa de Karnaugh

O mapa de Karnaugh é uma malha que tem um número de quadros vazios igual ao número de combinações das variáveis da função que se propõe simplificar. Assim um diagrama de Karnaugh de um variável dará origem a somente um caso e este caso poderá tomar o valor 0 ou 1. Um diagrama de Karnaugh de duas variáveis dará lugar a quatro casos correspondentes a quatro combinações da variáveis A e B, um diagrama de três variáveis A, B e C originará 8 casos, um diagrama de quatro variáveis originará 16 casos, um diagrama de cinco variáveis A, B, C, D e E originará 64 casos.

Os dois últimos casos são representados em geral respectivamente por dois e quatro diagramas de 16 casos. No caso de duas variáveis, a ordem de sucessão das diferentes combinações é 00, 01, 11 e 10. Nesta sucessão uma só uma variável muda de estado quando se desloca de um quadro para outro. Esta ordem deverá ser respeitada sempre. A Figura A.7 mostra Mapas de Karnaugh para 1, 2, 3, e 4 variáveis. Na Figura 6.8 é mostrado o caso para 5 variáveis.

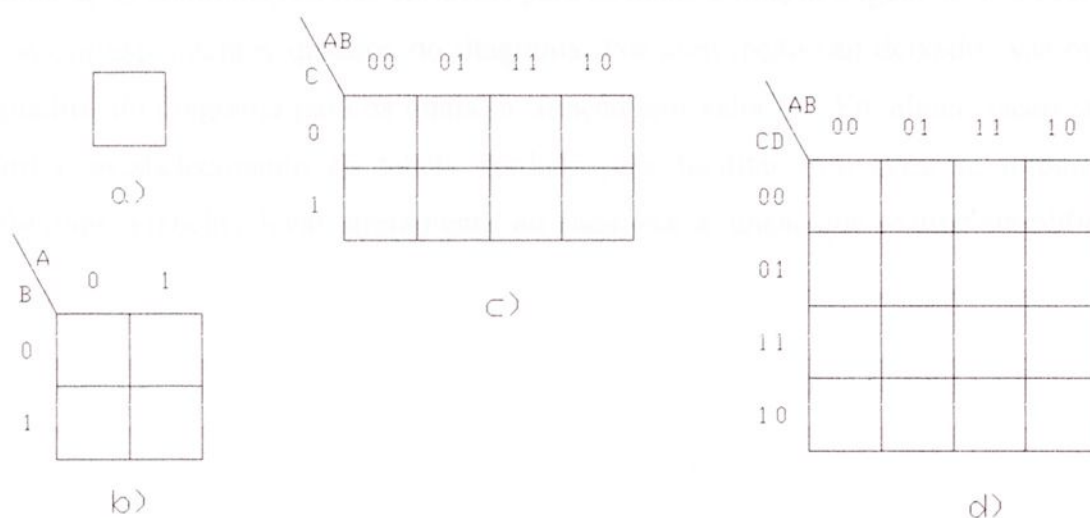


FIGURA A.7—Mapas de Karnaugh para 1, 2, 3 e 4 variáveis.

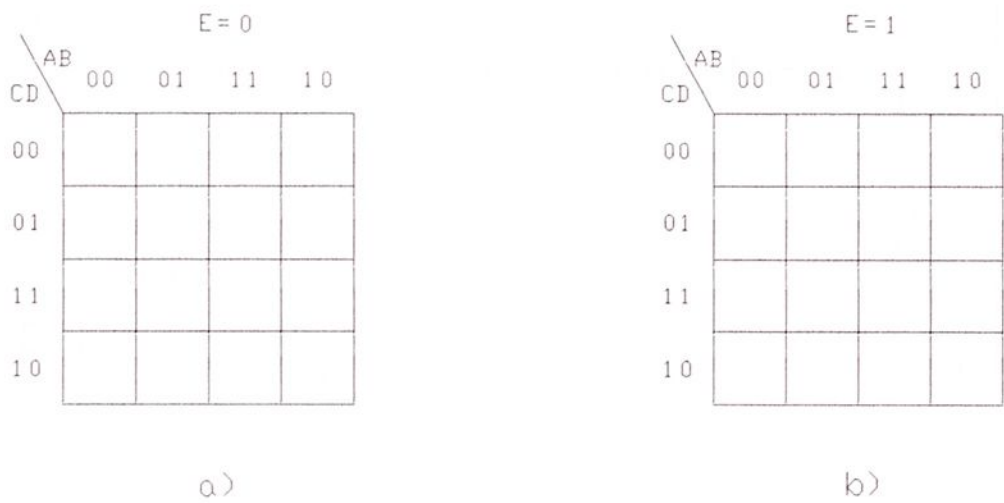


FIGURA A.8 – Mapa de Karnaugh para 5 variáveis.

Para se introduzir uma função booleana em um diagrama de Karnaugh , toma-se as combinações das variáveis para as quais a função é igual a 1 e escreve nos correspondentes quadros do diagrama. Por convenção são deixados vazios os quadros do diagrama para os quais a função tem valor 0. Em alguns casos seria útil o estabelecimento da tabela verdade para facilitar. Em geral se tratará de eliminar a tabela e levar diretamente ao diagrama a função que se quer simplificar.

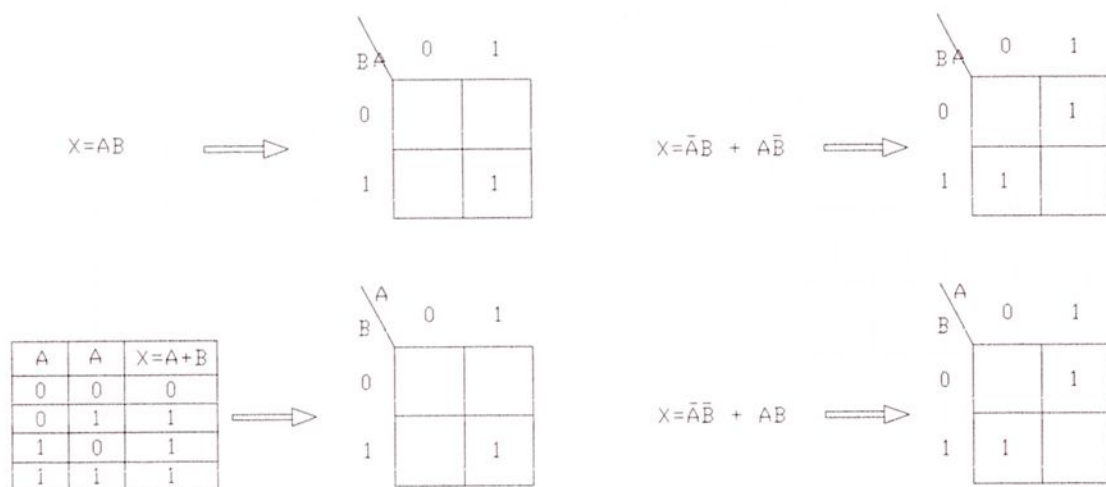


FIGURA A.9 - Mapas de Karnaugh usando funções e tabela verdade.

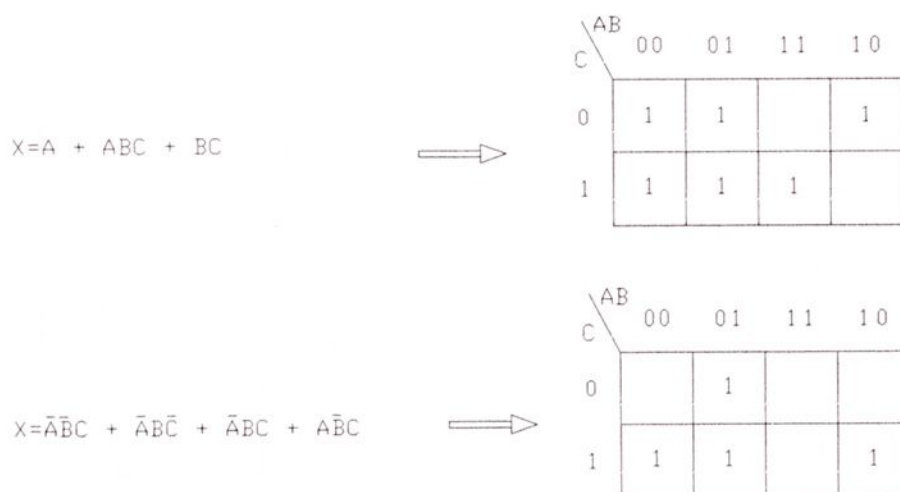


FIGURA A.10 - Funções de 3 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh.

Alguns exemplos do Mapa de Karnaugh são apresentados usando-se funções e tabelas verdade, como mostrado na Figura A.9.

AB \ CD	00	01	11	10
00		1	1	
01	1	1	1	
11	1	1		
10				

$$X = \bar{A}\bar{B}\bar{C}D + B\bar{C} + \bar{A}D$$

AB \ CD	00	01	11	10
00			1	
01			1	
11	1	1	1	1
10			1	

$$X = AB + CD$$

FIGURA A.11 - Funções de 4 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh.

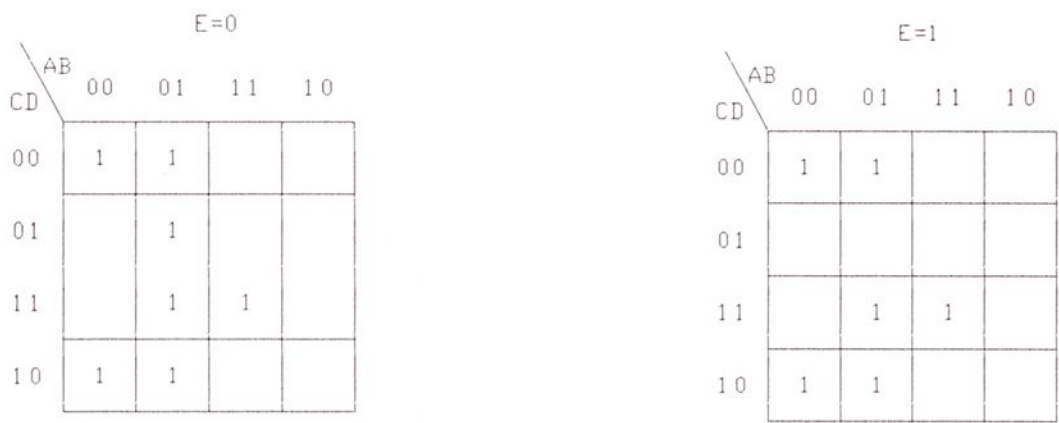
AB \ CD	00	01	11	10
00	1			1
01				
11				
10	1			1

$$X = \bar{B}\bar{D}$$

AB \ CD	00	01	11	10
00				
01		1	1	
11		1	1	
10				

$$X = BD$$

FIGURA A.12 - Funções de 4 variáveis associadas aos Mapas de Karnaugh.



$$X=ABCDE + \bar{A}\bar{D} + \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}\bar{E} + BCD + \bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}E$$

FIGURA A.13 - Função de 5 variáveis associada ao Mapa de Karnaugh.

A.12 Simplificações de funções com o Mapa de Karnaugh

Uma vez introduzida a função booleana em um diagrama de Karnaugh pode-se simplificá-la agrupando todos os “1” que estão em quadros adjacentes. Por quadros adjacentes entende-se aqueles quadros no diagrama cujas variáveis somente diferem em um estado. A Figura A.14 é um exemplo de quadrinhos adjacentes. A função representada é $X=ABCD + \bar{A}BCD$

AB \ CD	00	01	11	10
00				
01				
11		1	1	
10				

$$X = ABCD + \bar{A}BCD$$

FIGURA A.14 - Exemplo de quadros adjacentes

Esta expressão pode ser simplificada porque a variável A ao passar, na horizontal, do primeiro quadro que contém 1 para o segundo quadro com 1 ela muda de estado, isto é, passa de 0 para 1. Na vertical C e D não mudam de estado. A expressão simplificada torna-se então $X = BCD$. Para melhor compreender o que significa ou como é processada a simplificação, nas Figuras A.15 e A.16 são mostrados outros diagramas onde há variação de estado somente na horizontal, somente na vertical e nas duas situações ao mesmo tempo.

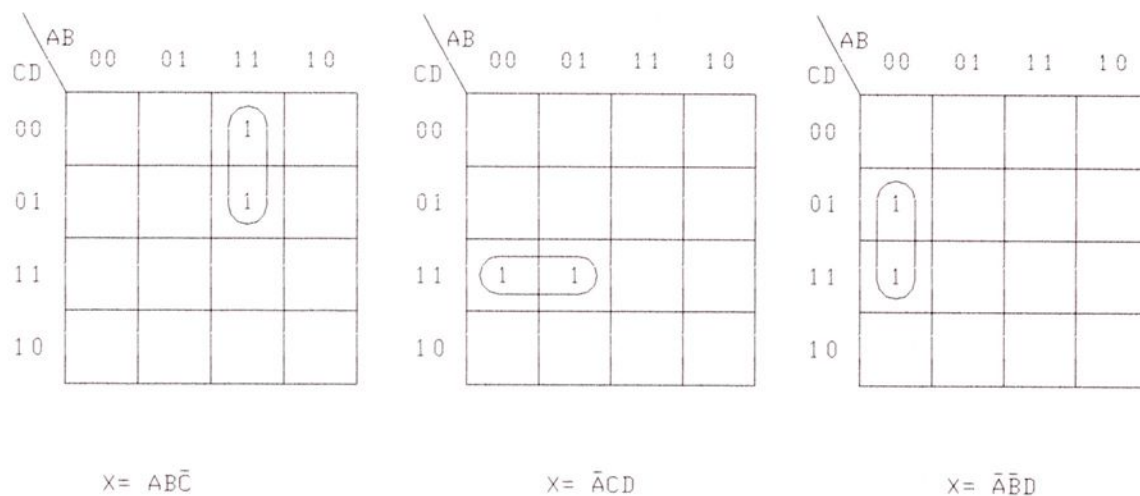


FIGURA A.15- Exemplos de diferentes casos de quadros adjacentes.

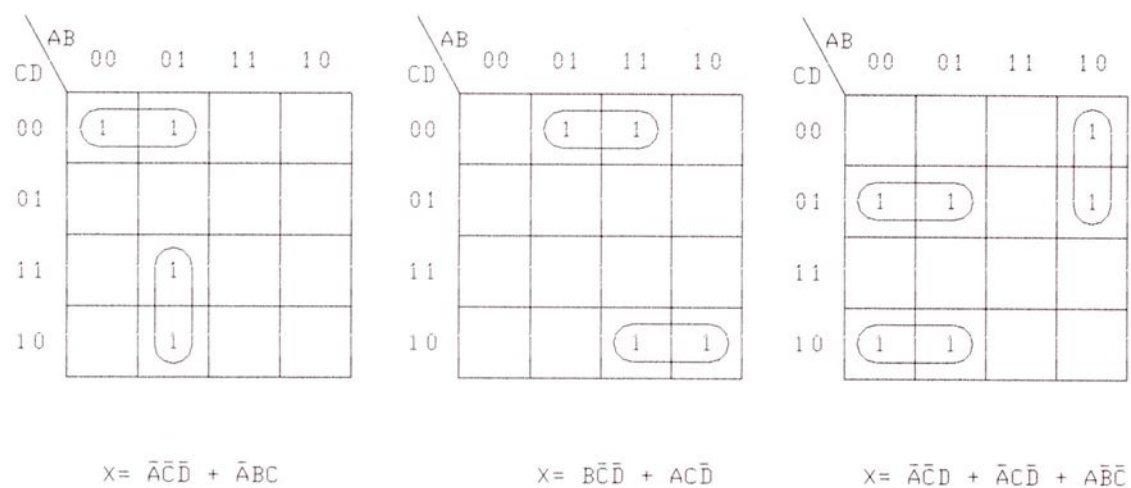


FIGURA A.16 Exemplos de várias quadros adjacentes no mesmo diagrama.

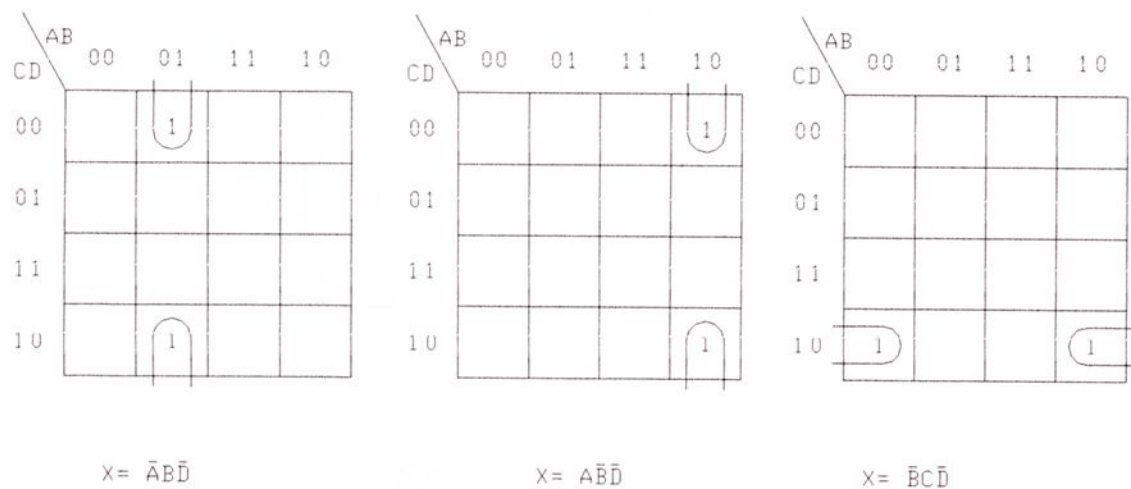


FIGURA A.17 - Quadros adjacentes particulares.

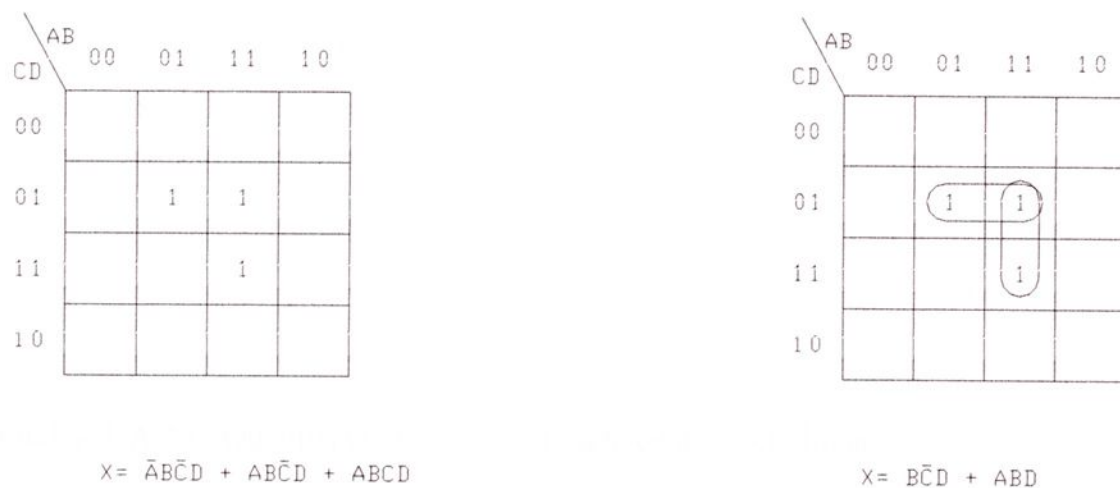


FIGURA A.18 - Simplificação usando quadrinhos superpostos.

AB \ CD	00	01	11	10
00			1	
01		1	1	1
11			1	
10				

$$X = ABC\bar{C} + ABD + B\bar{C}D + A\bar{C}D$$

AB \ CD	00	01	11	10
00				
01		1	1	
11		1	1	
10				

$$X = BD$$

FIGURA A.19 - Quadros com quatro "1" adjacentes.

AB \ CD	00	01	11	10
00		1		
01		1		
11		1		
10		1		

$$X = \bar{A}B$$

AB \ CD	00	01	11	10
00				
01				
11	1	1	1	1
10				

$$X = CD$$

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	1		
01	1	1		
11				
10				

$$X = \bar{A}\bar{C}$$

FIGURA A.20 - Quadros com quatro "1" adjacentes e em linha.

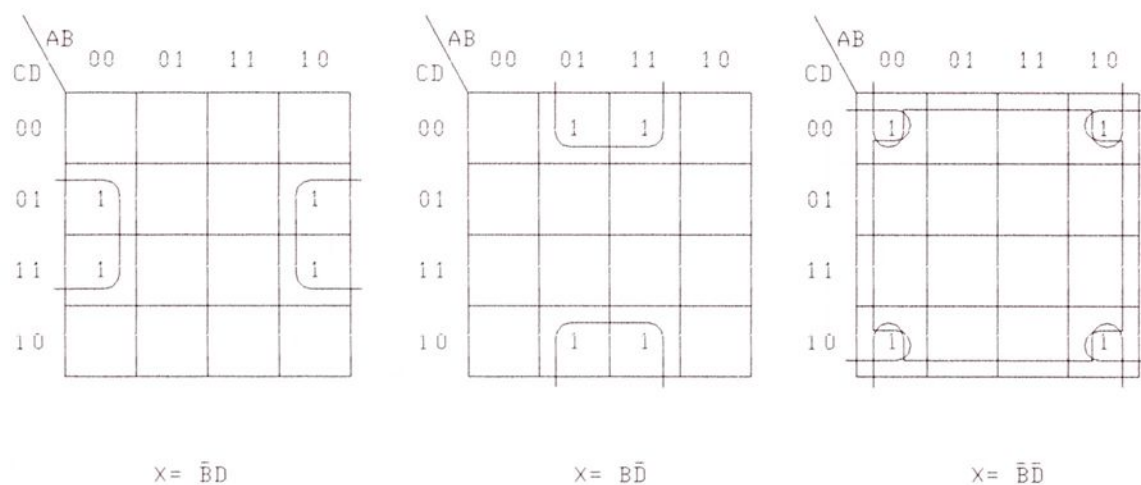


FIGURA A.21 - Quadros com quatro “1” adjacentes e simétricos.

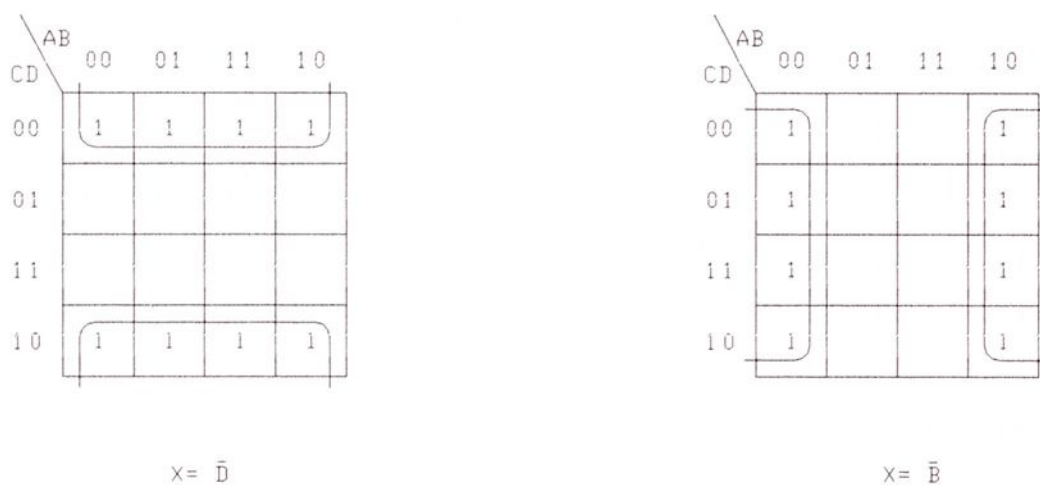


FIGURA A.22 - Quadros com oito “1” adjacentes e simétricos.

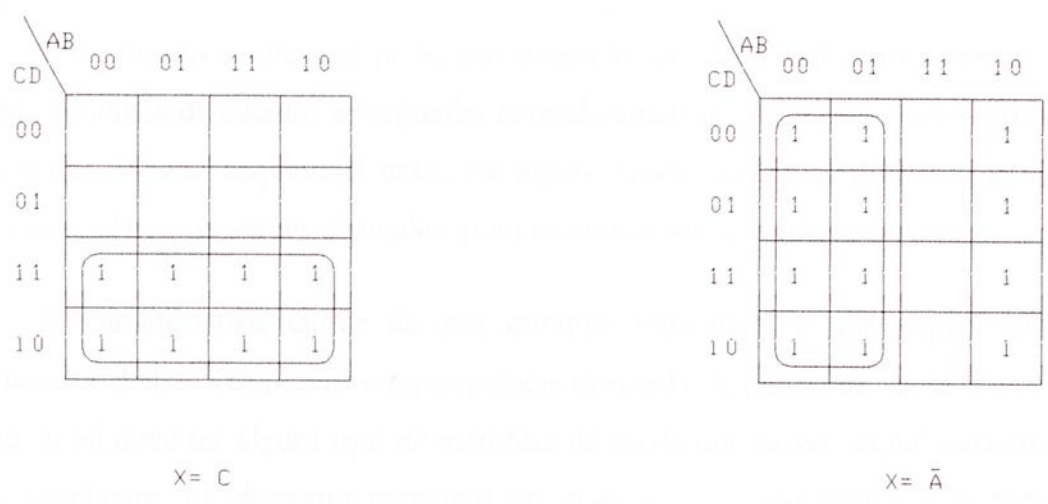


FIGURA A.23 - Quadros com oito “1” adjacentes e alinhados.

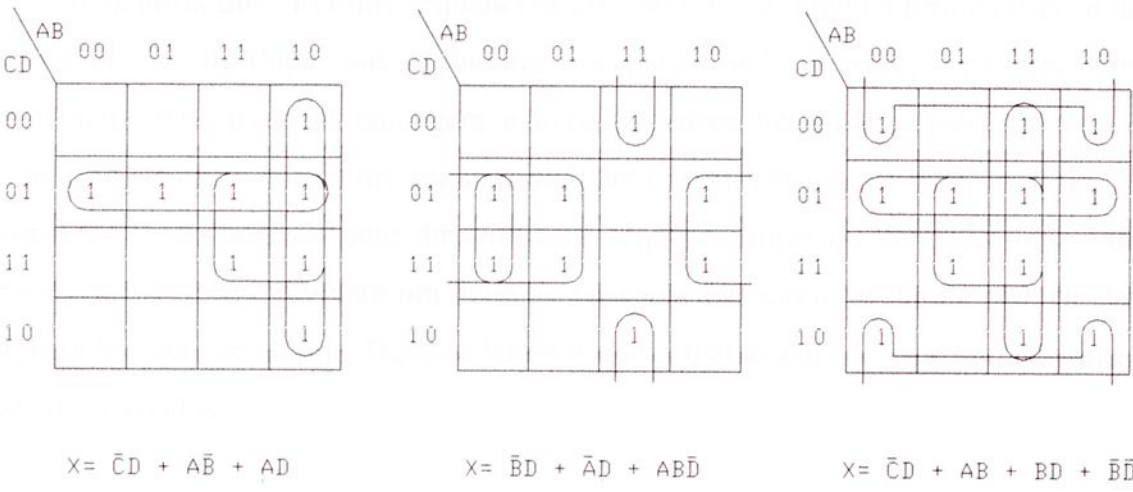


FIGURA A.24 - Quadros com várias formas de minimização dos “1” adjacentes

A.13 Circuito sequencial

Um circuito sequencial pode, por exemplo, ser projetado para detectar uma certa sequência de eventos e responder gerando sinais de saída para outros circuitos. O circuito lógico sequencial deve, em alguns casos, ser capaz de tomar decisões lógicas, é claro, e serem efetuadas por circuitos lógicos combinacionais.

A característica chave de um circuito sequencial é sua capacidade de armazenar dados. Para gerar uma sequência desejada de pulsos de saída, o circuito sequencial deve ter algum tipo de memória de modo que possa seguir estritamente sua sequência. O elemento principal de qualquer circuito lógico é o flip-flop simbolizado por FF. Os flip-flops são interligados aos circuitos combinacionais para desempenhar a função requerida. Um circuito sequencial responde a várias entradas a ele aplicadas. Em contrapartida ele gera pulsos de saída específicos dependendo da sua função.

A maioria dos circuitos sequenciais em uso hoje é alguma forma especial de contador. Os flip-flops nos contadores irão para “set” ou “reset” conforme uma sequência específica de contagem e gerarão pulsos de saída requeridos para a operação. Quando circuitos sequenciais como estes são usados para controle, os contadores são normalmente denominados sequenciadores ou controladores. Este procedimento proporcionará um meio de conceber tais circuitos para a maioria das aplicações que se deseja. Deve-se lembrar que é apenas uma das muitas diferentes técnicas usadas.

A. 14 Flip-Flop

O Flip-Flop é um dispositivo que possui dois estados estáveis. Para o flip-flop assumir um desses estados é necessário que haja uma combinação das variáveis de um

pulso de controle denominado “clock”. Após esse pulso o flip-flop permanecerá nesse estado até a chegada de um novo pulso de controle, então, de acordo com as variáveis de entrada, permanecerá ou mudará de estado.

O flip-flop basicamente pode ser representado por um bloco onde existe duas saídas Q e $\bar{Q}$, entradas para as variáveis e uma entrada de controle, conforme mostrado na figura 6.19.

Os dois estados estáveis que o flip-flop pode assumir são:

$$1) \quad Q = 0 \quad \text{e} \quad \text{portanto} \quad \bar{Q} = 1$$

$$2) \quad Q = 1 \quad \text{e} \quad \text{portanto} \quad \bar{Q} = 0$$

Existem seis tipos de flip-flops e todos eles podem ser construídos usando-se apenas portas NAND e NOT. Estes flip-flops são:

- flip-flop RS básico
- flip-flop RS comandado por pulso de clock
- flip-flop JK
- flip-flop JK mestre escravo
- flip-flop T
- flip-flop D

Na figura A.19 Q_a significa o estado atual da saída Q ; Q_f significa o estado final da saída Q quando é aplicado um pulso na entrada do flip-flop, isto é, a saída Q pode mudar de sinal ou pode permanecer como está, ou seja, Q_a .

Existe flip-flop que muda de estado quando o sinal de controle passa de 0 para 1, isto é, na subida do pulso. Entretanto existe também flip-flop que muda de estado quando acontece o contrário, ou seja, na descida do pulso.

A diferença entre o flip-flop RS e aquele comandado por um pulso de “clock” é no primeiro basta aplicar o controle R ou o controle S que haverá mudança na saída Q , de acordo com a tabela verdade. Por outro lado, no segundo tipo precisará de mais um

sinal, o de "clock", para que a saída mude. Neste caso a mudança ocorrerá na subida do pulso.

Na figura A.20 é mostrado o esquema e a tabela verdade dos flip-flops JK. Observar que na tabela verdade não mais aparece a situação de instabilidade e, também, R e S passam a ser denominados de J e K respectivamente. Por outro lado, a diferença entre os dois flip-flops JK é que no JK mestre-escravo a mudança na saída Q ocorre apenas quando o pulso passa de 1 para 0, ou seja, na descida do pulso.

O flip-flop T é um flip-flop JK com a particularidade de possuir as entradas J e K curto circuitadas, logo quando J assumir o valor 1, K também assumirá o valor 1, e quando J assumir o valor 0, K também assumirá o valor 0. Desta forma não existe as situações, $J=0$ e $K=1$, nem, $J=1$ e $K=0$.

Finalmente, o flip-flop D é um flip-flop JK onde as entradas J e K são invertidas. Portanto, não existe as situações $J=0$ e $K=0$, nem, $J=1$ e $K=1$.

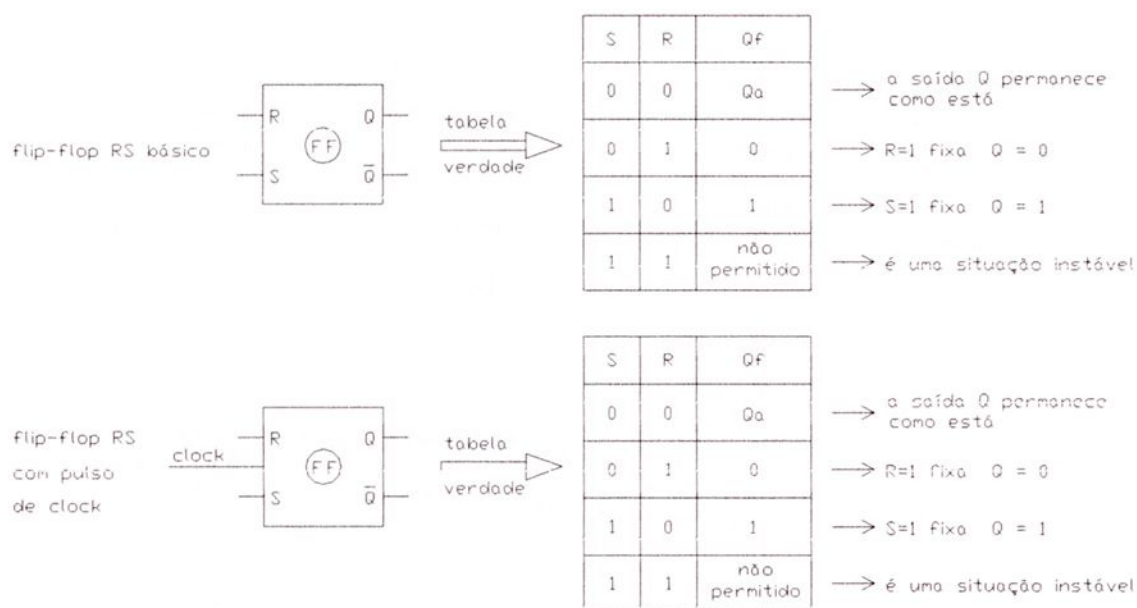


FIGURA A.25 - Flip-flops RS

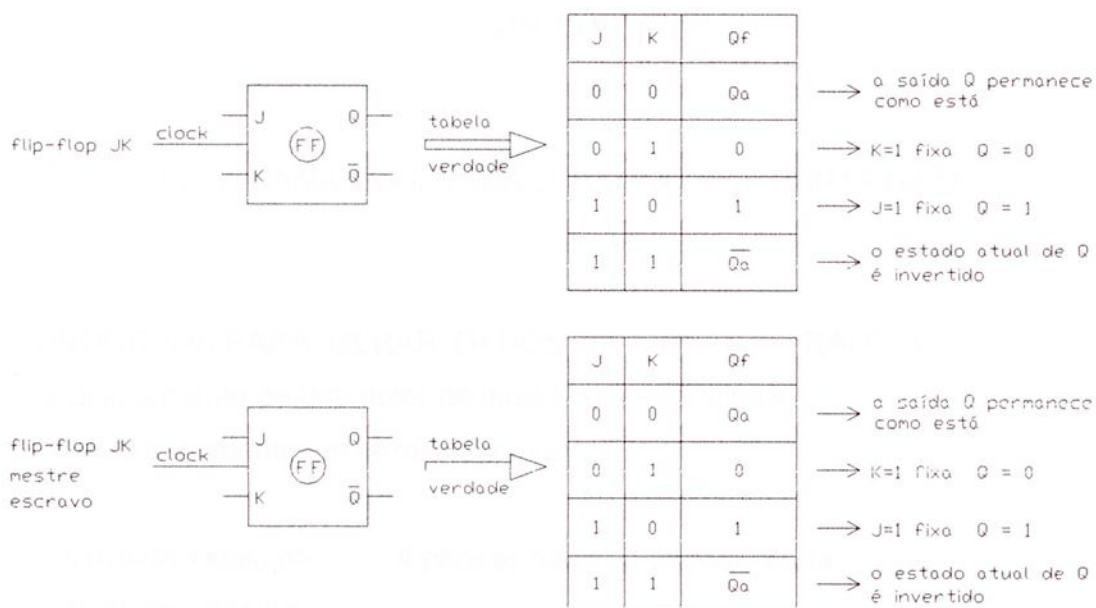


FIGURA A.26 - Flip-flops JK

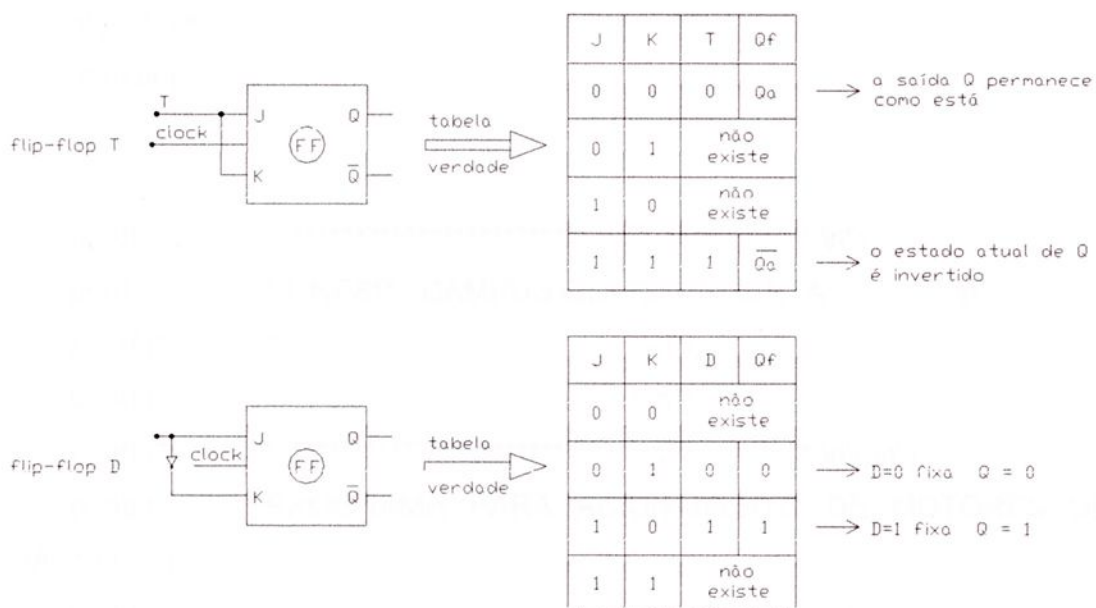


FIGURA A.27 - Flip-flops tipo T e D

APÊNDICE B

PROGRAMA EM LINGUAGEM C PARA A PORTA DATA

```
// PROGRAMA PARA GERAR DADOS NA PORTA PARALELA
// acionamento de um motor de passo com 4 terminais
// ligando somente um terminal por vez

#include <stdio.h>      // para as funções entrada/saída
#include <dos.h>
#include <conio.h>      // para usar getch
#define LPT1 0x378     // para definir LPT1 - saída da porta

float i,m;
int j,r,z,p,s;
int main()

{
    printf ("***** \n");
    printf ("* UNESP - CAMPUS GUARATINGUETA * \n");
    printf ("* * \n");
    printf ("* * \n");
    printf ("***** \n\n\n");
    printf ("PROGRAMA PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE
PASSO \n");
    printf ("-----\n\n\n");
    printf ("Digite o número de passos = " );

    scanf("%d",&p);    // p é o número de passos a serem executados
```

```

r=(p/4);          // r determina os ciclos múltiplos de 4
z=p%4;           // z determina o resto da divisão por 4

printf ("\n          Para sentido horário digite 7 \n" );
printf ("\n          Para sentido anti-horário digite 8 \n");
printf ("\n          Sentido escolhido = ");
scanf("%d",&s);    // s escolhe o sentido de rotação

printf ("\n\n          Digite a velocidade de rotação do motor = ");
scanf("%d",&m);    // m escolhe a velocidade de rotação

switch(s) {

case 7:           // sentido de rotação

outportb(LPT1,128); // para zerar o circuito
printf("\n\n          Pressione ENTER para iniciar a operação ");
getch();

switch (z) {      // para z= 0 ou 1 ou 2 ou 3

case 0:
    for ( j=1; j <= r; j=j+1){

        outportb(LPT1,64);
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);

        outportb(LPT1,32);

```



```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,128);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
break;
```

case 1:

```
for ( j=1; j <= r; j=j+1){
```

```
outportb(LPT1,64);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,128);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,64);
```

```
break;
```

case 2:

```
for ( j=1; j <= r; j=j+1){
```

```
outportb(LPT1,64);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,128);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,64);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);
```

```
break;
```

case 3:

```
for ( j=1; j <= r; j=j+1){
```

```
outportb(LPT1,64);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,128);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,64);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);  
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);
```

```
break;
```

```
}
```

```
break;
```

```
// SENTIDO ANTIHORÁRIO
```

```
case 8: // sentido de rotação
```

```
outportb(LPT1,16); // para zerar o circuito
```



```
switch (z) {  
  
case 0:  
    for ( j=1; j <= r; j=j+1){  
  
        outportb(LPT1,32);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.0001);  
  
        outportb(LPT1,64);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.0001);  
  
        outportb(LPT1,128);  
        for(i=0;i<=100;i=i+0.0001);  
  
        outportb(LPT1,16);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.0001);}  
    break;  
  
case 1:  
    for ( j=1; j <= r; j=j+1){  
  
        outportb(LPT1,32);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
        outportb(LPT1,64);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,128);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,16);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);
```

```
break;
```

case 2:

```
for ( j=1; j <= r; j=j+1){
```

```
outportb(LPT1,32);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,64);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,128);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,16);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,32);
```

```
for(i=0;i<=m;i=i+0.001);
```

```
outportb(LPT1,64);
```

```
break;
```

case 3:

```
    for ( j=1; j <= r; j=j+1){  
  
        outportb(LPT1,32);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,64);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,128);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,16);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);}  
  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,32);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
        outportb(LPT1,64);  
        for(i=0;i<=m;i=i+0.001);  
  
        outportb(LPT1,128);  
        break;  
  
    }  
    break;  
}
```


return(0);

SKRIPSI (2014) PANGKALAN PERIKANAN

40000000. The project is a result of a research conducted by the author at the University of Indonesia.

HOWE, S. A. (1990). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

DEL TORO, V. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V.; CAPUANO, J. L. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V. (1999). Stepping up the fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

CHONG, D. V. (1999). The development of a fishery for *Clupeoides* in the coastal waters of the United States.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P.H. **The parallel port manual.** *Baltimore, USA: Morgan State University, 1996. 124p.*
- BOYLESTAD, R.L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** *Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 649p.*
- DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas.** *Rio de Janeiro: Editora LTC, 1999. 550p.*
- GADRE, D.V. **Programming the parallel port.** *Lawrence: USA: R&D Books, 1991. 308p.*
- IDOETA, I.V.; CAPUANO, F.F. **Elementos de eletrônica digital.** *São Paulo: Ed. Érica, 1998. 504p.*
- KENJO, T. **Stepping motors an their microprocessor control.** *New York: Oxford University Press, 1984. 244p.*
- KENJO, T. **Electric motors and their control.** *New York: Oxford University Press, 1991. 176p.*
- McINTYRE, R.L. **Industrial motor control fundamentals.** *New York: Editora McGrawHill, 1991. 356p.*
- TOCCI, R. C.; WIDMER, N.S. **Sistemas digitais-princípios e aplicações.** *Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 588p.*

