



Dinesh Atul Rodrigues Trivedi

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DE PROTÓTIPO DE BOMBA DE INFUSÃO DE INSULINA

São José dos Campos, SP

Dinesh Atul Rodrigues Trivedi

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DE PROTÓTIPO DE BOMBA DE INFUSÃO DE INSULINA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Ciência e Tecnologia – UNIFESP,
como parte das atividades para obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Ciência da Computação.

Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP

Instituto de Ciência e Tecnologia

Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Galvão Martins

São José dos Campos, SP

Julho de 2014

Dinesh Atul Rodrigues Trivedi

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA EMBARCADO PARA CONTROLE DE PROTÓTIPO DE BOMBA DE INFUSÃO DE INSULINA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Ciência e Tecnologia – UNIFESP,
como parte das atividades para obtenção do tí-
tulo de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado em 01 de Julho de 2013:

Prof. Dr. Luiz Eduardo Galvão Martins
Orientador

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

Professor
Convidado 3

São José dos Campos, SP
Julho de 2014

Este trabalho é dedicado ...

Agradecimentos

Escreva aqui os agradecimentos ...

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

Estima-se que o Diabetes Melito (DM) já afeta 246 milhões de pessoas em todo mundo. A estimativa é que aumente para 380 milhões até 2025, sendo que no Brasil esse número chegue à aproximadamente 7 milhões. Seu tratamento adequado, na maioria das vezes, é o uso contínuo da bomba de infusão de insulina, entretanto é inacessível a grande parte da população, devido ao seu alto custo, aproximadamente R\$ 14.000,00. Sendo assim, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema embarcado crítico de controle de protótipo de bomba de infusão de insulina, baseado no microcontrolador da família PIC, PIC18F452. Inicialmente houve estudos do problema citado, junto com o aprendizado do microcontrolador escolhido, utilizando um kit de desenvolvimento com seus exemplos e motores de passos.

Palavras-chaves: PIC, Microcontrolador, Sistema embarcado, Sistema crítico, Motor de passo.

Abstract

TRADUZIR DEPOIS QUE COMPLETAR O RESUMO

Key-words: PIC, Microcontroler, Embedded System, Critical System, Step Motor.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Imagens de uma bomba de infusão de insulina	23
Figura 2 –	Exemplo de Sistemas embarcados	28
Figura 3 –	Sistemas embarcos críticos	29
Figura 4 –	Forças normais e tangenciais	33
Figura 5 –	Visão paralela e perpendicular das <i>stacks</i> e rotor	34
Figura 6 –	Interconexão das bobinas	35
Figura 7 –	Relação das interconexões das bobinas	35
Figura 8 –	<i>Stator single stack</i>	36
Figura 9 –	Motor híbrido	36

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

μA	Microampère
ADC	<i>Analogic Digital Conversor</i>
A/D	<i>Analogic Digital</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCP	<i>Capture / Compare / PWM</i>
DM	Diabetes Melito
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
I/O	Entrada/Saída
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
kHzs	<i>Kilohertz</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LVD	<i>Low Voltage Detect</i>
mA	Miliampère
MCLR	<i>Master Clear or Reset</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MIPS	Milhões de Instruções por Segundo
MSSP	<i>Master Synchronous Serial Port</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PSP	<i>Parallel Slave Port</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
TTL	<i>Transistor-transistor Logic</i>
V	Volts

Lista de símbolos

μ	micro
-------	-------

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Motivação	25
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	25
1.3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
2	SISTEMAS EMBARCADOS	27
2.1	SISTEMAS EMBARCADOS DE TEMPO	28
2.2	SISTEMAS EMBARCADOS CRÍTICO	29
2.3	MICROCONTROLADOR	30
2.3.1	PIC	30
2.3.2	SENSORES	30
2.3.3	SENSORES BIOLÓGICOS	31
2.3.4	ATUADORES	31
2.3.5	MOTOR DE PASSO	32
2.3.6	MOTOR DE PASSO RELUTÂNCIA VARIÁVEL – <i>MULTI STACK</i>	32
2.3.6.1	<i>DESIGN</i> DO MOTOR	34
2.3.7	MOTOR DE PASSO RELUTÂNCIA VARIÁVEL – <i>SINGLE STACK</i>	35
2.3.8	MOTOR DE PASSO HÍBRIDO	36
2.3.9	COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE MOTORES	37
3	Revisão Bibliográfica	39
3.1	Introdução	39
4	Resultados	41
5	Conclusão	43
	Referências	45
	Apêndices	47
	APÊNDICE A Título de Apêndice	49
	APÊNDICE B Título do Apêndice	51

Anexos	53
ANEXO A Título do Anexo	55

1 Introdução

A Diabetes Melito é uma doença que surge quando o organismo deixa de produzir insulina ou quando a essa passa a não atuar com a mesma eficácia. Atualmente existe duas classificações para ela: Diabetes Melito tipo 1 e 2. A primeira se caracteriza por ser autoimune que lesa, de forma irreversível, as células do pâncreas, produtoras de insulina e conhecidas como células beta, e seu diagnóstico se dá durante a infância do portador. Enquanto a segunda é consequência da resistência do próprio organismo contra as ações da insulina, o principal fator para se desenvolver essa resistência é a obesidade(PORTALDIABETES, 2008). Bomba de infusão de insulina é um pequeno aparelho eletrônico, do tamanho de um celular ou pager, que está ligado ao corpo do portador da doença por um finíssimo cateter com uma agulha flexível na ponta. Essa agulha é inserida no braço, coxa ou abdômen e deve ser trocada em um período de 2 ou 3 dias. Essa bomba não mede o índice glicêmico ou a quantidade de insulina a ser utilizada, essa medição é feita através do glicosímetro. A Figura 1¹ representa um aparelho comercial.



Figura 1 – Imagens de uma bomba de infusão de insulina

Seu funcionamento é bem simples, libera-se uma quantidade de insulina, programada pelo médico, durante o dia todo, simulando o funcionamento do pâncreas de uma pessoa saudável, entretanto existem cuidados a serem tomados: calcular a quantidade de carboidratos ingeridos a cada refeição e programar o aparelho para injetar uma quantidade de insulina com maior velocidade no organismo. Quanto a quem pode usar, a pessoa deve cumprir alguns pré-requisitos que são:

- Conseguir medir o índice glicêmico no mínimo 4 vezes por dia;
- Durante a fase de adaptação e ajuste da dosagem a serem utilizadas pela bomba, fazer a medição glicêmica de 6 a 8 vezes por dia;
- Seguir as recomendações médicas além de manter contato e um constante *feedback* com os responsáveis pela bomba e, além de tudo, seguir a dieta recomendada, respeitando quantidades ingeridas;

¹ <http://www.diabetes.org.br/sala-de-noticias/2316-bombas-de-infusao-de-insulina>

- Ter condição financeira para custear o equipamento e o contato com os responsáveis por ele;
- Estar disposto ao uso da bomba durante o dia todo, 24 horas junto ao corpo;
- Aprender sobre contagem de carboidratos para saber seu consumo durante as refeições;
- Praticar exercícios.

Cumprindo os pré-requisitos citados temos as vantagens de seu uso que são:

- Maior flexibilidade no horário das refeições;
- Se usada corretamente o risco de hipoglicemia é reduzido, e a longo prazo as complicações devido ao diabetes também;
- Melhora o controle glicêmico;
- Melhora no controle do fenômeno do amanhecer, responsável pelo aumento do índice glicêmico durante a manhã, entre as 4 e 8 horas da manhã, causador da hipoglicemia se o diabético não calculou a dose de insulina antes de dormir, ou não se levantou durante a noite para gerenciá-la.

Mas mesmo com todas as vantagens dada devido ao uso do equipamento caso o diabético seja obeso, ingira grandes quantidades de alimento ou açúcar, ou seja, carboidratos, não praticar atividades físicas, não fazer a medição do índice glicêmico na quantidade de vezes recomendada, ou até mesmo determinar por si só a quantidade de insulina a ser utilizada, não existe vantagem no seu uso. É importante ter em mente que mesmo com toda facilidade e tecnologia existente o acompanhamento médico não deve ser deixado de lado. As principais indicações médicas para o uso do equipamento são:

- Fenômeno do amanhecer;
- Hipoglicemia;
- Diminuir a variação do índice glicêmico;
- Hiperglicemia;
- Recorrente cetose, que é o acúmulo de cetócidos, pois o fígado quebra a gordura e proteína devido à falta de insulina, pois o corpo não consegue utilizar a glicose como energia;
- Flexibilidade, especialmente para crianças pequenas;

- Gestação, viagens e atividade físicas;
- Fobia de injeção;
- Desejo do diabético ([DIABETES, 2013](#); [PORTALDIABETES, 2009](#)).

1.1 Motivação

Segundo a Sociedade Brasileira de Diabetes ([Sociedade Brasileira de Diabetes, 2014](#)), diversos estudos realizados mostram que o tratamento feito através da Infusão de insulina tem diversas melhorias quando comparado com outros tratamentos existentes. Entretanto não é o mais utilizado devido ao seu alto custo, devido a importação. Logo, esse projeto vem com foco social: facilitar o acesso da população brasileira de baixa renda ao equipamento, melhorando sua qualidade de vida dos portadores da doença que se encaixem nesse perfil.

1.2 OBJETIVOS

Esse projeto tem como objetivo principal desenvolver um protótipo de uma Bomba de Infusão de insulina utilizando o microcontrolador da família PIC, PIC18F452.

1.2.1 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Em segundo plano este trabalho foca em:

- Aprendizado sobre as características e funcionalidades disponíveis do microcontrolador escolhido;
- Aprendizado das tecnologias utilizadas como: compilador, simulador e bibliotecas disponíveis;
- Desenvolvimento das funcionalidades básicas de uma bomba de infusão de insulina;
- Aprendizado sobre a escolha e uso de um motor de passo;
- Aprendizado sobre a forma de uso de um Display de LCD para comunicação com o usuário.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

@TODO: REVISAR QUANDO TERMINAR

Como todo trabalho de pesquisa, foi iniciado com o levantamento bibliográfico sobre o tema escolhido para que então seja feito uma leitura e análise desses materiais a fim de entender

melhor sobre as dificuldades e possíveis formas de desenvolvimento. A elaboração da fundamentação teórica consiste nos assuntos: Microcontroladores – a base de nossa arquitetura e recursos de desenvolvimento –, PIC – plataforma escolhida para o desenvolvimento –, Motor de passo – responsável pela dinâmica da bomba –, e, por último, display de LCD – responsável por mostrar dados e estados da bomba em funcionamento. Entendendo todos os conceitos citados o próximo passo deve ser a especificação do projeto de hardware do sistema embarcado, ou seja, qual placa usar, quais periféricos serão necessários, qual motor será utilizada, qual API do PIC utilizar. A simulação e desenvolvimento do hardware serão feitos na ferramenta Proteus, pois possui integração com PIC. Tendo todo o hardware definido é necessário levantar os requisitos de software. Para entender o que deve ser desenvolvido e ter uma orientação do próprio desenvolvimento. Com os requisitos em mãos será possível definir a arquitetura do sistema. Para enfim dar início a implementação e testes do software. Quando ele tiver uma base concreta daremos início a integração com o hardware e validação de seu funcionamento. E por fim levantaremos os indicadores para que seja feita a comparação de desenvolvimento entre as plataformas citadas e poder concluir a pesquisa.

2 SISTEMAS EMBARCADOS

Sistema embarcado em geral é uma combinação de *hardware* e *software* para executar uma tarefa específica diferente dos computadores do dia-a-dia que possuem inúmeros propósitos: verifica e-mail, escrever monografias, entre outros. Sistemas embarcados podem possuir ou não um sistema operacional, seja um RTOS, possui requisitos de tempo de execução, ou um Linux e, portanto, pode ser desenvolvido em um *hardware* com microcontrolador ou microprocessador ([WIKIBOOK, 2012](#)).

Segundo ([CUNHA, 2013](#)) a inteligência embarcada é uma tendência futura, cada vez mais inteligência será adicionada aos equipamentos do dia-a-dia, considera que um microondas atual tem mais capacidade computacional do que tinha o projeto Apolo, que levou o homem a lua. Esta crescente utilização se dá basicamente pelo preço e consumo reduzido dos microcontroladores, além da grande flexibilidade ao atender os mais diversos problemas visto o vasto número de arquiteturas disponíveis: ARM, MIPS, Coldfire/68k, PowerPC, x86, PIC, 8051, Atmel AVR, Renesas H8, SH, V850, FR-V, M32R, Z80, Z8 e outras. Um contraste que atrai diversos desenvolvedores quando comparado com o número limitado de arquiteturas disponíveis para microprocessadores do mercado de computadores pessoais ([GERMANO, 2011](#)).

A comunicação dos microcontroladores com o meio externo, segundo ([GERMANO, 2011](#)), se dá pelos periféricos e o mais comuns são:

- Entrada de dados através de teclas (geralmente através de teclados feitos com varredura matricial);
- Leds;
- Display's de LCD (sendo os mais comuns os alfanuméricos por exemplo o HD44780);
- Interface serial – (Por exemplo RS 232, I2C);
- Universal Serial Bus – (USB);
- TCP/IP.

Como dito anteriormente, esses sistemas estão cada vez mais no dia-a-dia das pessoas e, claro, facilitando a vida delas, mas muitas vezes não são percebidos. E cada vez mais estão mais acessíveis podendo automatizar funções até mesmo dentro das próprias casas. A Figura 2¹ mostra alguns sistemas embarcados e onde são utilizados:

¹ <http://bytesdontbite.com/2012/06/26/embedded-systems-no-bdb/>



Figura 2 – Exemplo de Sistemas embarcados

2.1 SISTEMAS EMBARCADOS DE TEMPO

O conceito Tempo Real é complexo para ser explicado, mas sua ideia básica é que se espera que o computador responda algo para o ambiente externo em tempo. Normalmente pessoas assumem que tempo real significa “muito rápido”, entretanto não é verdade, tempo real simplesmente significa “rápido o suficiente” no contexto de operação do sistema. Um exemplo é a ação do motor, pode-se dizer que é “rápida”, pois o sistema deve tomar decisões como - fluxo de combustível, tempo da faísca - toda vez que o motor completa um ciclo.

Sistemas de tempo real são baseados em previsibilidade e, segundo (FARINES; FRAGA; OLIVEIRA, 2000), essa previsibilidade de um sistema de tempo real é obtida quando independente de falhas, sobrecargas e variações de hardware, e assim é possível que seu comportamento seja antecipado antes de sua execução. Isso tem a finalidade de poder prever o funcionamento de um sistema de tempo real e garantir as suas restrições temporais, e para isso é necessário definir hipóteses em relação a carga e falhas em relação ao ambiente externo deste sistema (FARINES; FRAGA; OLIVEIRA, 2000). Segundo (MALL, 2009) os sistemas de tempo real são classificados em dois tipos:

- *Soft Real Time Systems*: Sistemas não críticos de tempo real, onde a ocorrência de uma falha temporal é da mesma ordem de grandeza que os resultados em que o funcionamento está correto, exemplos: Máquina de lavar e portão eletrônico de uma casa;
- *Hard Real Time Systems*: Sistemas Críticos de Tempo Real, onde a ocorrência de uma falha temporal complicam, e muito, os resultados quando comparado com seu funcionamento correto, exemplos: sistema de controle de um avião e um sistema de controle de semáforos.

2.2 SISTEMAS EMBARCADOS CRÍTICO

Sistema Crítico é um sistema no qual a confiança é fundamental, ou melhor, a questão mais importante em seu desenvolvimento. Isso porque sistemas críticos, em caso de falha, podem causar consequências gravíssimas para os humanos, economia e outras áreas. Pode-se dizer que seus indicadores são: Disponibilidade, confiabilidade, segurança e proteção. E para que essa confiança seja alcançada deve-se evitar erros durante seu desenvolvimento e realizar diversos testes para que seja possível detectar e corrigir os erros que passarem de forma que seja possível limitar os danos causados por falhar operacionais (SOMMERVILLE, 2004; FELDMANN et al., 2007; JORDAN, 2006).

Segundo (KOPETZ, 2011) as classificações dos sistemas embarcados críticos podem ser:

- *Fail Safe*: Classificação para sistemas onde o estado seguro pode ser atingido em caso de falha, como por exemplo, esgotar a bateria de uma bomba de insulina;
- *Fail Operational*: Classificação para sistemas que em caso de falhas ainda são capazes de fornecer algum tipo de serviço, mesmo que mínimo. Um exemplo é um sistema de controle de voo que, mesmo em caso de falha, é capaz de fornecer serviços e ser seguro.

Abaixo a Figura 3, mostra exemplos de sistemas embarcados críticos.



Figura 3 – Sistemas embarcos críticos

2.3 MICROCONTROLADOR

Microcontroladores são chips inteligentes que utilizam a arquitetura Harvard, RISC. É constituído basicamente por pinos de entradas e saídas e memória. Suas saídas podem ser controladas através de programação e em função do processamento de suas entradas. Sua programação pode ser feita em diversas linguagens como: C, C++, entre outras ([RADIOAMADORES, 2009](#)).

Segundo ([GANSSE, 1999](#)), o microcontrolador é a parte mais importante de um sistema embarcado e sua principal diferença quando comparada com um microprocessador é o fato de ser um sistema computacional completo que integra todos as principais partes da arquitetura de Von Neumann em um único componente, as partes citadas são:

- CPU: *Central Processor Unit*;
- Memória RAM: *Random Access Memory*;
- Portas I/O: Portas de entrada e saída.

Além de ser composto por temporizadores, memória ROM (*Read Only Memory*), conversor AD, analógico – digital, e DA, digital – analógico. Comparados com microprocessadores, os microcontroladores possuem consumo e clock, processamento, reduzidos, isso devido ao fato que o primeiro é destinado a tarefas que necessita uma alta capacidade de processamento como, por exemplo, os microprocessadores dos nossos desktop do dia-a-dia. Por padrão, os microprocessadores são utilizados em situações que os requisitos são abrangentes, com entradas e saída variadas como: sensores, atuadores e periféricos de comunicação ([LEE; SESHIA, 2011](#)).

2.3.1 PIC

PIC é um circuito integrado produzido pela *Microchip Technology Inc.* Seu nome significa: *Programmable Interface Controller*, Controlador de Interface Programável. Externamente possui uma aparência de um circuito integrado mais comuns - TTL ou CMOS -, mas na verdade contém todos os componentes de um sistema microprocessado como: CPU, *Central Processor Unit*, sua finalidade é interpretar as instruções de programa; Memória PROM, *Programmable Read Only Memory*, na qual memorizará as instruções do programa; Memória RAM, *Random Access Memory*, utilizada pra memorizar as variáveis do programa; Linhas de I/O, entrada e saída, para controlar dispositivos internos e receber informações do meio externo; entre outros ([RADIOAMADORES, 2009](#); [WIKIPEDIA, 2012b](#)).

2.3.2 SENSORES

A definição de sensor pode ser a de um transdutor capaz de alterar sua característica física interna em resposta à um fenômeno físico externo. Além disso, existem sensores consi-

derados de operação indireta que são os quais alteram suas propriedades como capacitância, resistência, ou, até mesmo, sua indutância, sob ação de algum gradeza ou evento externo (RO-SÁRIO, 2006).

Segundo (NOMADSUSP, 2012), os sensores são largamente utilizados na medicina, indústria, robótica, além de outras aplicações. Considerando que o sinal é sempre uma forma de energia, os sensores podem ser classificados em função da energia que é capaz de detectar, como:

- Sensores de luz: células solares, fotodíodos, fototransistores, tubos fotoelétricos, e outros;
- Sensores de som: microfones e hidrofone;
- Sensores de temperatura: termômetros e termopares;
- Sensores de resistência elétricas: ohmímetro.
- Outros;

2.3.3 SENSORES BIOLÓGICOS

Segundo (NOMADSUSP, 2012), os sensores citados anteriormente são corretamente chamados de sensores artificiais. Isto devido ao fato de existir sensores naturais ou biológicos, já que todos os organismos vivos possuem sensores capazes de agir da mesma forma que os sensores artificiais. Esses sensores biológicos são células especializadas, sensíveis a:

- Luz, movimento, temperatura, vibração, pressão, campos elétricos, som, e outros aspectos físicos do ambiente;
- Grande variedade de moléculas ambientais, incluindo toxinas e nutrientes;
- Aspectos metabólicos, tais como os níveis de glicose e oxigênio;
- Até mesmo as diferenças entre proteínas do ambiente externo e do próprio organismo.

Esses sensores artificiais que imitam sensores biológicos, utilizando componentes biológicos, são chamados biossensores.

2.3.4 ATUADORES

Segundo (CHIRONIS; SCLATER, 1991), dispositivos considerados atuadores são aqueles que transformam uma forma de energia em outra, causando mudanças no ambiente em que estão atuando, ou seja, de acordo com sinais, ou impulsos, recebidos realizam ações capazes

de alterar as grandezas físicas do ambiente em questão. Eles são capazes de converter energias como: energia elétrica, hidráulica e pneumática em energia mecânica. Segue exemplos de alguns tipos de atuadores:

- Atuadores eletromagnéticos: São os motores elétricos como motores de passos, servos;
- Atuadores hidráulicos: Utilizam um fluido submetido a uma pressão para movimentar um braço, são utilizados em robô que operam grandes cargas;
- Atuadores pneumáticos: Utilizam um gás submetido a uma pressão para movimentar o braço, possuem menor custo que os hidráulicos, sendo utilizados em robôs de menor porte;

2.3.5 MOTOR DE PASSO

Motor de passo é um dispositivo eletromecânico. Sua principal propriedade é sua habilidade de transformar pulsos elétricos em movimentos, esses movimentos são precisamente incrementados na posição do rotor e são denominados ‘passos’. Esse tipo de motor é caracterizado como máquina duplamente saliente, o que significa que possui dentes, compostos por matérias magnéticos nas duas partes que o compõe: A parte imóvel chamada estator e a móvel rotor ([SANTOS, 2008](#); [ACARNLEY, 2002](#)).

Seu uso é interessante em situações em que precisão nos movimentos é necessária. Isso porque com ele é possível controlar: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo. Suas vantagens não são seu torque nem a capacidade de gerar movimentos de alta velocidade, mas sim a precisão em seus movimentos. Devido a essas características esse tipo de motor é amplamente utilizado em: câmeras de vídeo, robôs, brinquedos, scanners, impressoras, entre outros ([SANTOS, 2008](#)).

De forma simples o funcionamento de um motor de passo consiste no uso de materiais magnéticos, ou solenoides, como dito anteriormente, alinhados dois a dois, representando os polos norte e sul, que quando energizados atraem o rotor fazendo-o se alinhar as partes energizadas do estator, causando assim um pequeno movimento: o passo. Sua velocidade e sentido estão diretamente relacionados à forma com que os solenoides são acionados, o primeiro com a frequência e o segundo a ordem de acionamento ([SANTOS, 2008](#); [ACARNLEY, 2002](#); [WIKIPEDIA, 2012a](#)).

2.3.6 MOTOR DE PASSO RELUTÂNCIA VARIÁVEL – *MULTI STACK*

A fonte do fluxo magnético desse tipo de motor são as bobinas colocadas nos dentes do estator. O acionamento das bobinas é feito em sequência para incentivar o movimento, alinhamento, dos conjuntos de dentes sucessivos do estator e do rotor dando ao motor a característica de passos. Ao longo de seu eixo ele é dividido em seções isoladas magneticamente chamadas

stacks, daí o nome *multi stack*, e cada uma pode ser excitada por uma bobina separadamente chamada *phase*. Cada *stack* possui um estator, preso em sua posição pela caixa, suporte, do motor junto com as bobinas e o elemento móvel, rotor.

O rotor é uma unidade única e maciça que será utilizado para a movimentação da carga. O material do rotor é um metal elétrico laminado o que permite que o campo magnético possa mudar rapidamente sem grandes perdas. O estator de cada rotor possui um determinado número de polos e uma parte da *phase*, bobina, é enrolada em torno de cada polo para produzir o campo magnético. Os polos adjacentes são enrolados no sentido oposto assim os campos magnéticos adjacentes possuem sentidos opostos. Com isso o circuito magnético completo é considerado um polo do estator, o dente do rotor, o vão de ar entre os dentes de ambos e, por fim, um polo adjacente do estator. E esse circuito é repetido a cada par de polos do estator. As forças normais produzidas pelos polos do estator e os dentes do rotor são iguais e se anulam assim sobra apenas a força tangencial o que causa o movimento, isso pode ser visto conforme a Figura 4.



Figura 4 – Forças normais e tangenciais

A posição do rotor com relação ao estator é ajustada toda vez que as bobinas são excitadas. O ajuste ocorre, pois os dentes de ambos são alinhados o que tende a diminuir a relutância do circuito magnético, daí surgiu o nome do motor. Considerando a Figura 5 é possível perceber que para girar no sentido horário a ordem de acionamento deve ser A, B, C, A, B, C, A... e no sentido anti-horário A, C, B, A, C, B, A...



Figura 5 – Visão paralela e perpendicular das *stacks* e rotor

Segundo (ACARNLEY, 2002), existe uma pequena relação entre o comprimento do passo. Considere N o número de dentes do estator e p o número de dentes do rotor logo:

$$step\ length = 360 / (N * p) \quad (2.1)$$

2.3.6.1 DESIGN DO MOTOR

Cada polo do estator produz um campo magnético quando excitado com uma corrente DC. A performance do motor depende da força do campo magnético gerado pelas bobinas quando excitadas, logo o campo magnético está diretamente ligado ao torque do motor. A força do campo magnético está relacionada à intensidade da corrente que passa pelas bobinas, portanto em teoria aumentar a corrente para aumentar o torque seria o suficiente, entretanto existe um limitante que é o aumento da temperatura nas bobinas.

No exemplo da Figura 5 cada *stack* tem 4 polos. Uma vez que todas as quatro bobinas devem ser excitadas concorrentemente uma prática comum é interconectar as bobinas para formar apenas uma *phase*. A forma com que as bobinas são interconectadas influencia na temperatura que será dissipada pela bobina uma vez que isso está diretamente ligada à intensidade da corrente. A potência não varia conforme a interconexão.

Existem 3 formas de interconexão conforme a Figura 6. Na verdade a potência não varia conforme a interconexão, mas sim qual *driver* de controle será utilizado: baixa voltagem e alta corrente com uma conexão paralela ou alta voltagem e baixa corrente com uma conexão em série. A diferença entre as 3 interconexões pode ser vista na Figura 7 (ACARNLEY, 2002).



Figura 6 – Interconexão das bobinas

Connection	Rated current	Resistance	Rated voltage	Power
Series	I	$4r$	$4rI$	$4rI^2$
Series/parallel	$2I$	r	$2rI$	$4rI^2$
Parallel	$4I$	$r/4$	rI	$4rI^2$

Figura 7 – Relação das interconexões das bobinas

2.3.7 MOTOR DE PASSO RELUTÂNCIA VARIÁVEL – *SINGLE STACK*

Como o nome já diz esse motor é construído com apenas uma stack, ou melhor, uma unidade. Entretanto quanto ao funcionamento e princípios básicos é idêntico ao *multi stack*. Cada dente do estator ainda possui uma bobina separada que produz um campo magnético quando excitada por uma corrente DC.

Uma mudança é que as bobinas do lado oposto são conectadas para formar uma fase. Na Figura 8 existe 3 phases que é o número mínimo para poder rotacionar para os dois lados. A bobina no dente oposto no estator está no sentido oposto para que sejam gerados campos magnéticos em sentidos opostos. E por fim a relação de comprimento do passo se mantém conforme o motor *multi stack* (ACARNLEY, 2002).



Figura 8 – Stator single stack

2.3.8 MOTOR DE PASSO HÍBRIDO

A diferença principal desse com os tipos anteriores é que o circuito magnético é excitado por uma combinação de bobinas e ímã permanente. Seu funcionamento e princípios básicos são idênticos ao *multi* e *single stack*. As bobinas ainda permanecem nos dentes do estator já o ímã compõe o eixo do rotor conforme Figura 9.

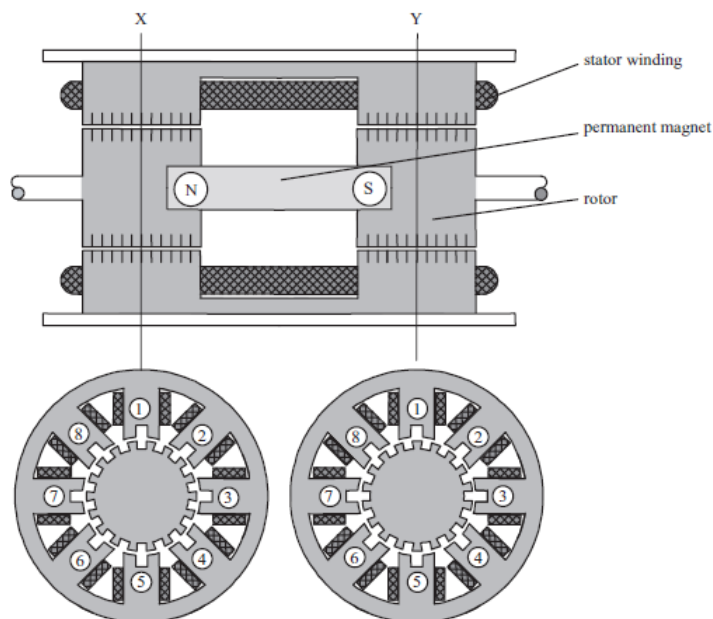


Figura 9 – Motor híbrido

Existem duas bobinas, *phases*, situadas em 4 dos 8 polos do estator, conforme Figura

9. A bobina A está nos polos 1, 3, 5, 7 e a B nos polos 2, 4, 6, 8. Polos adjacentes ainda são envolvidos pelas bobinas em sentidos opostos, portanto se a bobina A é alimentada com corrente positiva o campo magnético é direcionado para fora nas bobinas 3 e 7, mas para dentro nos polos 1 e 5 e o mesmo acontece na bobina B.

Quando se aplica corrente nas bobinas a mesma ideia de alinhamento dos dentes do rotor e stator acontece. Considerando a Figura 9 e o exemplo da excitação positiva na bobina A, citada anteriormente, o estator e o rotor são alinhados sob os polos 3 e 7 na seção X e polos 1 e 4 na seção Y.

Para uma rotação continua o motor necessita de uma excitação sequencial das bobinas. Se retirar a excitação de A e colocar em B o alinhamento dos dentes vai acontecer com 4 e 8 na seção X e 2 e 6 na seção Y. Isso faz com que o motor gire no sentido horário, a sequência deve ser A+, B+, A-, B-,... Para o sentido anti-horário A+, B-, A-, B+.

Segundo (ACARNLEY, 2002), a relação de comprimento do passo é similar ao de relutância variável. Existe uma relação com o número de dentes do rotor p , e com um ciclo completo de excitação. Como um esse ciclo em um motor híbrido consiste em 4 estados e produz 4 passos de movimento no rotor, logo conclui-se que:

$$step\ length = 360 / (4 * p) = 90 / p \quad (2.2)$$

2.3.9 COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE MOTORES

Não é possível dizer categoricamente que um motor é melhor do que o outro em todas as situações. Os híbridos têm menor comprimento de passo, normalmente 1,8 graus, o que pode ser uma grande vantagem quando alta precisão é necessária. Eles também possuem maior torque devido ao uso do ímã permanente no rotor. E, além disso, quando nenhuma bobina esta excitada o motor híbrido ainda possui um "torque de retenção" que mantém a posição do rotor. E isso pode ser uma característica na aplicação onde a posição do rotor deve ser preservada durante uma falha de energia, mas é bom lembrar que esse torque é menor do que o torque com 1 ou mais bobinas excitadas.

Já o de relutância variável tem duas vantagens quando se trata de movimentar carga em distâncias consideráveis. A primeira é que tipicamente o comprimento de seu passo é de 15 graus, maior que o do híbrido, portanto ele precisa de menos passos para mover a mesma distância. Com a redução do número de excitações das bobinas o consumo também é reduzido, em caso de uso de baterias é uma característica muito interessante. A segunda é que por não possuir ímã permanente possui uma menor inércia para início de movimento, também diminuindo o consumo inicial (ACARNLEY, 2002).

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução

4 Resultados

5 Conclusão

Referências

- ACARNLEY, P. P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. [S.l.]: Iet, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 32, 34, 35 e 37.
- CHIRONIS, N. P.; SCLATER, N. *Mechanisms & mechanical devices sourcebook*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1991. Citado na página 31.
- CUNHA, A. *O que são sistemas embarcados?* 2013. Acessado em 20/05/2014. Disponível em: <<http://www.techtraining.eng.br/files/uploads/2013/04/19/artigo-sist-emb.pdf>>. Citado na página 27.
- DIABETES. *Bomba de infusão de insulina*. 2013. Acessado em 08/03/2013. Disponível em: <<http://www.diabetes.org.br/sala-de-noticias/2316-bombas-de-infusao-de-insulina>>. Citado na página 25.
- FARINES, J.-M.; FRAGA, J. d. S.; OLIVEIRA, R. d. Sistemas de tempo real. *Escola de Computação*, v. 2000, p. 201, 2000. Citado na página 28.
- FELDMANN, R. L. et al. A survey of software engineering techniques in medical device development. In: IEEE. *High Confidence Medical Devices, Software, and Systems and Medical Device Plug-and-Play Interoperability, 2007. HCMDSS-MDPnP. Joint Workshop on*. [S.l.], 2007. p. 46–54. Citado na página 29.
- GANSSE, J. *The art of designing embedded systems*. [S.l.]: Newnes, 1999. Citado na página 30.
- GERMANO, A. *Você sabe o que são sistemas embarcado?* 2011. Acessado em 20/05/2014. Disponível em: <<http://www.gruponetcampos.com.br/2011/05/voce-sabe-o-que-sao-sistemas-embarcados/>>. Citado na página 27.
- JORDAN, P. Standard iec 62304-medical device software-software lifecycle processes. In: IET. *Software for Medical Devices, 2006. The Institution of Engineering and Technology Seminar on*. [S.l.], 2006. p. 41–47. Citado na página 29.
- KOPETZ, H. *Real-time systems: design principles for distributed embedded applications*. [S.l.]: Springer, 2011. Citado na página 29.
- LEE, E. A.; SESHIA, S. A. *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. [S.l.]: Lee & Seshia, 2011. Citado na página 30.
- MALL, R. *Real-Time Systems: Theory and Practice*. [S.l.]: Pearson Education India, 2009. Citado na página 28.
- NOMADSUSP. *Sensores*. 2012. Acessado em 02/04/2014. Disponível em: <<http://www.nomads.usp.br/pesquisas/design/dos/Capacitacao/arquivos/sensores.pdf>>. Citado na página 31.
- PORTALDIABETES. *Iniciando insulinoterapia no diabetes mellitus tipo 2*. 2008. Acessado em 04/03/2013. Disponível em: <<http://www.portaldiabetes.com.br/conteudocompleto.asp?idconteudo=3267>>. Citado na página 23.

PORTALDIABETES. *Bombas de Infusão de Insulina*. 2009. Acessado em 10/03/2013. Disponível em: <<http://www.portaldiabetes.com.br/conteudocompleto.asp?idconteudo=3267>>. Citado na página 25.

RADIOAMADORES. *Microcontroladores*. 2009. Acessado em 02/12/2012. Disponível em: <http://www.radioamadores.net/files/microcontroladores_pic.pdf>. Citado na página 30.

ROSÁRIO, J. M. *Princípios de mecatrônica*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2006. Citado na página 31.

SANTOS, V. P. de A. *Motor de passo*. 2008. Citado na página 32.

Sociedade Brasileira de Diabetes. *Tudo sobre diabetes*. 2014. Acessado em 20/05/2014. Disponível em: <<http://www.diabetes.org.br>>. Citado na página 25.

SOMMERVILLE, I. *Software Engineering. International computer science series*. [S.l.]: Addison Wesley, 2004. Citado na página 29.

WIKIBOOK. *Embedded Systems Introduction*. 2012. Acessado em 02/12/2012. Disponível em: <http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded_Systems/Embedded_Systems_Introductio>. Citado na página 27.

WIKIPEDIA. *Motor de passo*. 2012. Acessado em 04/12/2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_passo>. Citado na página 32.

WIKIPEDIA. *Pic*. 2012. Acessado em 01/12/2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador_PIC>. Citado na página 30.

Apêndices

APÊNDICE A – Título de Apêndice

APÊNDICE B – Título do Apêndice

Anexos

ANEXO A – Título do Anexo