

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DE SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

**Fábio Kenji Oshiro
Sergio Mitsuo Kague**

Giga de testes para sensores de relutância magnética

Santo André – São Paulo
2012

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DE SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

Fábio Kenji Oshiro

Sergio Mitsuo Kague

Giga de testes para sensores de relutância magnética

*Monografia apresentada ao Curso de
Tecnologia em Eletrônica Automotiva da
FATEC Santo André, como requisito parcial
para conclusão do curso em Tecnologia em
Eletrônica Automotiva.*

Orientador: Profº Carlos Alberto Morioka

Santo André – São Paulo

2012

Faculdade de Tecnologia de Santo André

LISTA DE PRESENÇA
SANTO ANDRÉ, 28 DE JUNHO DE 2012.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA “Giga de Teste: Sensor de Relutância Magnética – Sensor Indutivo” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. CARLOS ALBERTO MORIOKA



MEMBROS:

PROF. MARCO AURÉLIO FROES



ENG. ALBERTO FERREIRA MACIEL



SR. RICARDO MATUBARO DE SANTI



ALUNO: FABIO KENJI OSHIRO



ALUNO: SERGIO MITSUO KAGUE



Dedicamos este trabalho às nossas famílias e aos nossos amigos que sempre estiveram próximos durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, responsável pelo equilíbrio do universo, agradecimento especial às nossas famílias que diretamente contribuíram para a realização deste trabalho, aos colegas, aos professores e os colaboradores que sempre estiveram prontos a nos ajudar.

A todos, nosso muito obrigado.

“O êxito na vida não se mede pelo que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou pelo caminho.”

Abraham Lincoln

RESUMO

Desde a invenção dos motores de combustão interna por centelha apresentado pelo senhor Otto, em 1876, constantes evoluções tecnológicas ocorreram até chegarmos ao atual modelo de gerenciamento eletrônico de motores.

O gerenciamento eletrônico de motores é um dos responsáveis por informar, controlar e retirar do projeto mecânico do motor de combustão interna o melhor desempenho possível em termos de torque e potência, com o menor consumo de combustível em qualquer regime de utilização, com baixos índices de emissão de gases poluentes.

Para atingir um rendimento ótimo, o gerenciamento eletrônico de motores é dotado de sinais de entrada que informam as condições reais em determinado momento, e com estas informações tomar decisões em seus mapas de memórias para emitir sinais de comando que ofereçam a quantidade exata de combustível, adicionada a quantidade exata de ar que foi admitida pelo motor e assim atingir o máximo rendimento.

Vários são os sensores que enviam sinais de entrada para a unidade eletrônica de gerenciamento do motor, porém um dos mais importantes é o sensor de relutância magnética variável, que é responsável por informar qual a rotação do motor e a posição da árvore de manivelas em todos os regimes de funcionamento.

Neste trabalho detalharemos o projeto de um equipamento de teste para o sensor de relutância magnética variável, que detecta defeitos de: fabricação, construção errônea e materiais fora de especificação técnica.

Palavras chaves: sensor de relutância magnética variável, gerenciamento eletrônico de motor.

ABSTRACT

Since the invention of internal combustion spark made by Mr. Otto in 1876, constant technological developments occurred until we reached the current model of electronic engine management.

The electronic engine management is one of those responsible for reporting, control and removes the mechanical design of the internal combustion engine the best possible performance in terms of torque and power with minimum fuel consumption for use in any system, with low greenhouse gas emissions.

To achieve optimum efficiency, Electronic engine management is provided with input signals that tell the real conditions at any given time, and with this information to make decisions on their maps of memories for sending control signals to provide the exact amount of fuel, added the right amount of air that was admitted by the engine and thus achieve maximum efficiency.

There are several sensors that send input signals to the electronic unit engine management, but one of the most important is the variable reluctance sensor, which is responsible for knowing which engine speed and position of the crankshaft in all operating regimes.

This paper will detail the design of test equipment for the variable reluctance sensor, which detects defects: manufacturing, construction and materials out of erroneous technical specification.

Key words: variable reluctance sensor, electronic engine management.

LISTA DE FIGURAS¹

Fig. 1. Linhas de campos magnéticos (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad).....	13
Fig. 2. Comportamento das linhas de campo em diferentes materiais (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad).....	14
Fig. 3. Atração magnética de imãs (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad).....	14
Fig. 4A. Linhas de campo sobre uma área A (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad).....	15
Fig. 4B. Comparativo de Densidade de Fluxo Magnético no ponto a e ponto b (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad).....	15
Fig. 5. Imagem do comportamento das linhas de campo (WWW.Howstuffwork.com.br, 2012).....	17
Fig. 6. Sensor de relutância magnética MTE THOMSON	18
Fig. 7. Sensor em corte e polia dentada (IEEE Translaction on Industry Applications).....	18
Fig. 8. Sinal gerado pelo sensor (IEEE Translaction on Industry Applications)	20
Fig. 9. Sensor Indutivo Bosch.....	20
Fig. 11. Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna, BRAGA 2007.....	23
	24
Fig. 12. Fonte de alimentação 5V do microcontrolador e do LM1815, desenhado no Proteus.....	24
Fig. 13. Circuito Eletrônico LM 1815, retirado de seu datasheet.....	25
	25
Fig. 14. Ligações dos terminais do CI LM1815, desenhado no Proteus.....	25
Fig. 16. Sinal analógico (Channel 1) e sinal digital (Channel 2), enquadrado pelo LM 1815, obtido no osciloscópio da FATEC Santo André.....	27
Fig. 17. Foto tirada do Motor WEG na FATEC Santo André.....	27
Fig.18. Inversor de frequência CFW-08.....	28

¹ Todas as fotos do presente trabalho são de autoria de Fábio Oshiro e Sergio Mitsuo Kague e os equipamentos fotografados pertencem à Fatec Santo André, salvo menção em contrário

Fig.19. Esquema do inversor de frequência CFW-08 e do motor trifásico WEG elaborado no Proteus.....	29
Fig. 20. Terminais de ligação do PIC18F452.....	29
Fig. 21. Curva de aceleração e desaceleração do inversor elaborado no Excel33	
Fig. 22. Sinal Padrão do Sensor, obtido no laboratório da Fatec Santo André.	35
Fig. 23. Sinais obtidos no laboratório da Fatec Santo André.....	36
Fig. 24. Sinal Inválido, obtido no Laboratório da Fatec Santo André.....	37
Fig. 25. Sinais obtidos no laboratório da Fatec Santo André.....	37

Todas as fotos do presente trabalho são de autoria de Fábio Oshiro e Sergio Mitsuo Kague e os equipamentos fotografados pertencem à Fatec Santo André, salvo menção em contrário

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Permeabilidade Relativa (Material Didático, Profº Edson Kitani).....	16
Tabela 2. Permeabilidade Relativa de materiais (Material Didático, Profº Edson Kitani).....	17
Tabela 3. Entradas e saídas do LM1815 retirado de seu datasheet.....	26
Tabela 4. Características do Motor WEG	27
Tabela 5. Características do Inversor de frequência CFW 08	28
Tabela 6. Relação de equivalência entre Tensão, PWM, e Rotação.....	33

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1: Rotina do esquema geral de teste.....	31
Fluxograma 2: Rotina de teste do sensor de relutância magnética.....	32
Fluxograma 3: Rotina de identificação da rotação e de sinal da bobina.....	34

LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

- CI – Circuito Integrado
CONN – Conector
CPU – Unidade Central de Processamento
ECU – Unidade de Comando Eletrônico
IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado
LED – Diodo Emissor de Luz
MPLAB – Software para gravação do PIC
MTE – Metalúrgica Termo Elétrica
PIC – Interface de Controle Programável
PICC – Software para compilação
PID – Proporcional Integral Derivativo
Proteus – Software para circuitos eletrônicos
PWM – Largura de Pulso Modulado
RPM – Rotação Por Minuto
VAC – Tensão alternada
VDC – Tensão contínua

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Objetivos.....	10
1.2. Motivação.....	10
1.3. Desenvolvimento do Trabalho.....	11
2. SENSOR DE RELUTÂNCIA MAGNÉTICA.....	13
2.1. Conceitos Fundamentais de Magnetismo.....	13
2.2. Densidade de Fluxo Magnético B	14
2.3. Permeabilidade Magnética μ	15
2.3.1. Permeabilidade Magnética no vácuo μ_0	15
2.3.2. Permeabilidade Magnética Relativa μ_R	16
2.4. Relutância Magnética \mathfrak{R}	17
2.5. Princípio de Funcionamento do Sensor de Relutância Magnética	18
2.6. Construção do Sensor de Relutância Magnética.....	20
2.7. Sinal Gerado pelo Sensor de Relutância Magnética Variável.....	21
3. PROJETO PARA O EQUIPAMENTO DE TESTE DO SENSOR DE RELUTÂNCIA MAGNÉTICA.....	24
3.1. Circuito de Fonte de Tensão Fixa.....	24
3.2. Condicionamento do Sinal.....	24
3.3. Controle do Motor Elétrico.....	27
3.4. O Circuito Eletrônico.....	29
3.5. Programação.....	30
3.6. Fluxograma da Rotina de Teste do Sensor de Relutância Magnética.....	31
3.7. Software de Identificação de Rotação e Identificação do Sinal do Sensor.....	32
4. TESTES.....	35
4.1. Relação de Componentes:.....	38
5. CONCLUSÃO.....	40
6. PROPOSTAS FUTURAS.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a partir dos anos 80, os primeiros sensores de relutância magnética variável ou sensores indutivos, começaram a ser utilizados nos sistemas automotivos, mais precisamente nos sistemas de ignição. O sistema de ignição convencional por bobina SZ (*Bosch, 2005 p.652*), que utiliza um interruptor mecânico ou platinado, foi substituído pelo sistema de ignição transistorizada com sensor indutivo TZ-i (*Bosch, 2005 p.655*), que utiliza o sinal gerado pelo sensor indutivo para controlar o sistema de ignição.

Esta substituição conferiu ao sistema de ignição mais robustez técnica, maior confiabilidade e menos manutenção nas regulagens do motor de combustão interna por centelha. Isto pode ser explicado pois, o sensor indutivo é um dispositivo robusto, não necessita de alimentação elétrica para o seu funcionamento e não há desgaste físico durante sua operação.

Atualmente o sensor de relutância magnética variável ou sensor indutivo de velocidade rotativa (*Bosch, 2005 p119*) é aplicado para identificação da velocidade do eixo de manivelas, do eixo de cames, das rodas e do volante do motor.

1.1. Objetivos

Este trabalho irá desenvolver-se nas seguintes etapas:

- Estudar o funcionamento do sensor de relutância magnética.
- Construir o projeto de um equipamento de testes do sensor de relutância magnética variável.
- Analisar os sinais gerados pelo sensor de relutância magnética variável em várias rotações do motor de combustão interna.
- Detectar componentes defeituosos ou fora de especificações.

1.2. Motivação

No mercado não encontramos equipamentos específicos para teste do sensor de relutância magnética variável.

O sinal gerado por este sensor é essencial para o bom funcionamento do motor de combustão interna, visto que sem este sinal elétrico o sistema de gerenciamento do motor não identifica de forma adequada a rotação ou movimento do motor, impedindo o seu funcionamento correto.

Para gerar sinais elétricos, o sensor de relutância magnética necessita interagir com polias dentadas de material ferroso, deste modo o nosso desafio foi construir um equipamento que simulasse as condições dinâmicas entre o sensor de relutância magnética e a polia do motor com rotações variadas e assim gerar sinais elétricos para posterior análise dos sinais gerados nestas condições.

O equipamento de teste foi requisitado pela MTE-THOMSON, empresa fabricante e distribuidora de autopeças, que não tem grandes dificuldades em testar a resistência ôhmica da bobina que constitui o sensor, e que gerem sinais elétricos corretos, porém encontra dificuldades em testar estes sensores quando estes produzem sinais adversos aos esperados, sinais que não são compreendidos pelo sistema de gerenciamento eletrônico do motor de combustão interna impedindo o seu funcionamento.

1.3. Desenvolvimento do Trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica mostrando o princípio teórico de funcionamento do sensor de relutância magnética variável.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para construção do projeto do equipamento de teste do sensor de relutância magnética, que envolve como componentes principais um motor elétrico trifásico, controlado por um inverter de frequência para variar a rotação em seu eixo motriz. Neste eixo é fixada a polia dentada ferrosa ou roda fônica dentada, que irá interagir com o sensor e gerar sinais elétricos em varias rotações. O tratamento deste sinal elétrico antes do microcontrolador recebê-lo e assim monitorar a eficiência do sensor de relutância magnética em gerar os sinais de velocidade essenciais para o bom funcionamento do gerenciamento eletrônico do motor de combustão interna.

O capítulo 4 apresenta os ensaios realizados, as metodologias adotadas e o algoritmo desenvolvido para verificar a eficiência do sensor de relutância magnética.

O capítulo 5 apresenta a conclusão obtida.

O capítulo 6 apresenta as proposições para novos estudos e futuros desafios.

2. SENSOR DE RELUTÂNCIA MAGNÉTICA

2.1. Conceitos Fundamentais de Magnetismo

Na região do espaço em torno de um imã permanente existe um campo magnético (Robert L. Boylestad, 2004), que pode ser representado por linhas de campo magnético Φ , semelhantes as linhas de campo elétrico.

Propriedades:

- As linhas de campo Φ dirigem-se do polo norte para o sul, retornando ao polo norte através do imã representado pela (Fig. 1).
- As linhas de campo são simétricas em materiais homogêneos.
- A intensidade de campo em uma dada região é proporcional ao número de linhas de campo.
- A intensidade de campo em $a = 2b$, ou seja, a intensidade de linhas de campo Φ no ponto a é o dobro em relação ao ponto b.

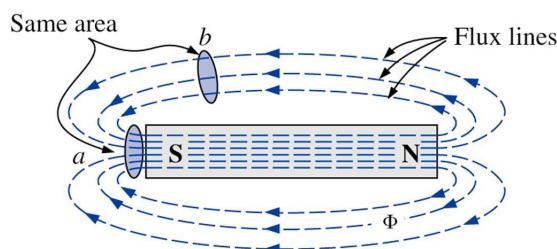


Fig. 1. Linhas de campos magnéticos (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad)

Materiais ferromagnéticos expostos ao campo favorecem a trajetória das linhas de campo, porém materiais como o vidro não interferem a trajetória das linhas de campo, na Fig. 2 é possível demonstrar este fenômeno.

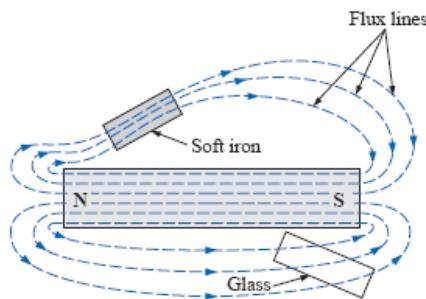


Fig. 2. Comportamento das linhas de campo em diferentes materiais (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad)

Ao aproximarmos dois imãs, o fenômeno da atração é explicado pelo fato das linhas de campo procuram ocupar a menor área, reduzindo o comprimento das linhas de campo e a intensidade de campo em uma dada região é proporcional ao número de linhas de campo. Na Fig. 3 podemos observar este fenômeno.

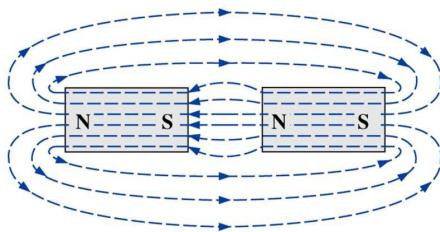


Fig. 3. Atração magnética de imãs (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad)

2.2. Densidade de Fluxo Magnético B

É uma grandeza que indica a quantidade de linhas de campo por unidade de área (Robert L. Boylestad, 2004), e na Fig. 4a e 4b podemos representá-la.

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

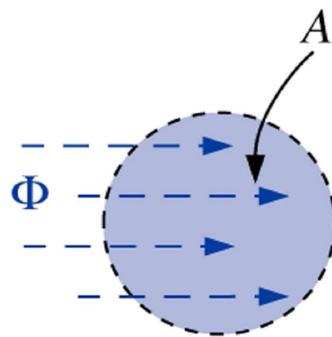
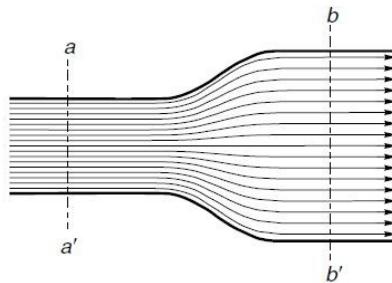


Fig. 4A. Linhas de campo sobre uma área A (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad)



$$B(a) > B(b)$$

Fig. 4B. Comparativo de Densidade de Fluxo Magnético no ponto a e ponto b (Introdução à Análise de Circuitos, Boylestad)

2.3. Permeabilidade Magnética μ .

É uma grandeza que indica o quanto um determinado material pode influenciar na distribuição das linhas campo que passam pelo referido material (Robert L. Boylestad, 2004).

2.3.1. Permeabilidade Magnética no vácuo μ_0

No vácuo as linhas de campo tem mais dificuldade de descrever a sua trajetória, ou seja caminhar do polo norte para o polo sul através do vácuo (Robert L. Boylestad, 2004).

A permeabilidade magnética no vácuo é uma constante dada por:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Wb}{Am}$$

2.3.2. Permeabilidade Magnética Relativa μ_R

É uma relação entre a permeabilidade do material em relação ao vácuo (Robert L. Boylestad, 2004), o fator resultante desta relação determina a característica do material em relação as propriedades magnéticas, conforme a tabela 1.

$$\mu_R = \frac{\mu_m}{\mu_0}$$

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
≈ 1	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

Tabela 1. Permeabilidade Relativa (Material Didático, Profº Edson Kitani)

Material ferromagnético aumenta a intensidade do campo magnético na qual foi colocado, como exemplo podemos citar o ferro, o aço e o níquel.

Material paramagnético quase não interfere no campo magnético na qual foi colocado, como exemplo podemos citar o alumínio, o vidro e o cromo.

Material diamagnético diminui o campo magnético no qual foi colocado, como exemplo podemos citar o chumbo, cobre e ouro.

Para a construção de imãs artificiais, os materiais com maior Permeabilidade Relativa criarião imãs mais poderosos. A tabela 2 informa a permeabilidade relativa de alguns materiais.

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^9
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

Tabela 2. Permeabilidade Relativa de materiais (Material Didático, Profº Edson Kitani)

2.4. Relutância Magnética \mathfrak{R}

A relutância magnética \mathfrak{R} é a resistência que se opõe à passagem do fluxo magnético e corresponde à resistência no circuito elétrico (Robert L. Boylestad, 2004).

A relutância magnética \mathfrak{R} é inversamente proporcional à seção transversal do seu trajeto. É a dificuldade imposta ao circuito magnético à passagem do fluxo magnético pelo material ou meio que circunda a região descrita pelas linhas de campo magnéticas.

Em termos magnéticos é a dificuldade do campo em estabelecer um caminho magnético. Na Fig.5 notamos a dificuldade que as linhas de campo encontram em orientar-se pelo corpo de vidro.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

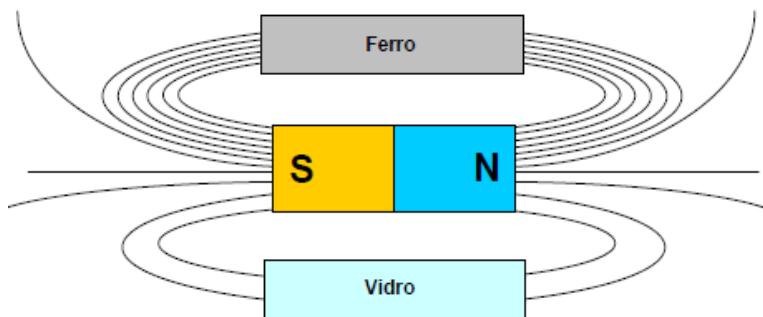


Fig. 5. Imagem do comportamento das linhas de campo (WWW.Howstuffwork.com.br, 2012)

2.5. Princípio de Funcionamento do Sensor de Relutância Magnética



Fig. 6. Sensor de relutância magnética MTE THOMSON

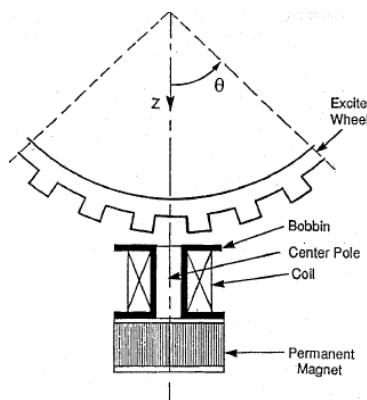


Fig. 7. Sensor em corte e polia dentada (IEEE Translaction on Industry Applications)

O sensor estudado de relutância magnética depende de um corpo magnético permanente (imã) como uma fonte de fluxo magnético e a modulação deste fluxo magnético pelo movimento da polia dentada.

Esta polia dentada possui dentes e ranhuras e que ao girar, o polo central do imã pode assumir várias posições em relação a polia e que podem ser caracterizados pela posição angular da polia dentada.

Uma bobina é construída sobre o imã de magnetismo permanente, centralizado em um núcleo de polo central. A bobina fica sob a área do espectro magnético do imã (Fig.7), porém quando as linhas de campo aproximam-se do ressalto (dente) do material ferroso da polia dentada, estas linhas de campo tendem a alinhar-se neste material, pois a relutância magnética \mathfrak{R} neste meio é muito menor

que o entreferro de ar que existe entre o vale (falta de dente) e o polo central do imã, tornando a relutância magnética \mathfrak{R} muito alta, esta variação de relutância magnética \mathfrak{R} , impõem as linhas de campo comportamentos não uniformes, ou seja as trajetórias das linhas de campo são irregulares o que é o suficiente para produzir na bobina uma tensão induzida, o modelo matemático (Bruno Lequesne e Thadeus Schroeder, 1996) que explica o fenômeno é este:

$$V_{pp} = N L \omega (B_{max} - B_{min})$$

Onde:

V_{pp} = Valor máximo da tensão induzida na bobina

N = Número de espiras da bobina

L = Comprimento do núcleo retangular

ω = velocidade angular da polia

B_{max} = Densidade Máxima de fluxo magnético sobre a bobina

B_{min} = Densidade Mínima de fluxo magnético sobre a bobina

O sinal gerado pelo sensor de relutância magnética é representado pela Fig. 8, onde a concentração de densidade de fluxo magnético que está no polo central do imã irá encontrar no centro do dente, a menor relutância magnética para orientar as linhas de campo magnético, pois o entreferro será menor, gerando P_{max} , ou seja, permeabilidade máxima que cria uma área magnética que envolve toda a bobina, pois estará na menor distância entre o polo central e a polia, porém quando o polo central do imã encontrará maior relutância magnética quando estiver no centro da falha de dente (ranhura) pois o entreferro torna-se maior e será gerado P_{min} ou seja permeabilidade mínima que cria uma área magnética que não envolve totalmente a bobina. A posição relativa de dentes e ranhuras da polia dentada em relação ao polo central do imã em função do período gera um sinal elétrico.

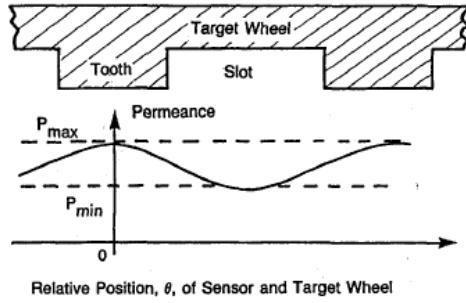


Fig. 8. Sinal gerado pelo sensor (IEEE Translaction on Industry Applications)

É possível demonstrar (Profº Laganá, 2012) que o fluxo magnético será dado por:

$$\Phi = A_1 \operatorname{sen} \omega t$$

Dada a Lei de Faraday onde o instante t igual a zero corresponde ao instante que a linha central do núcleo coincide com a linha de subida do dente.

A tensão de saída V_0 (Profº Laganá, 2012) entre os terminais da bobina será dada por:

$$V_0 = A_2 \frac{d\Phi}{dt} = A_2 \omega \operatorname{cos} \omega t$$

2.6. Construção do Sensor de Relutância Magnética

Os sensores de relutância magnética são equipamentos muito robustos mecanicamente, podemos verificar as características de construção na Fig.9

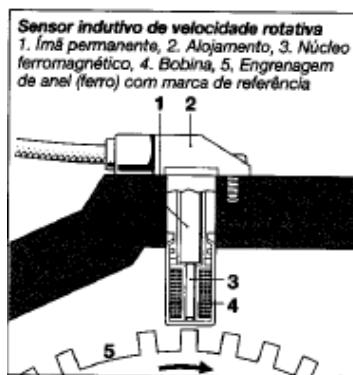


Fig. 9. Sensor Indutivo Bosch

O sensor é constituído de um alojamento (2) dentro do qual há um imã permanente (1) e uma bobina (4). O fluxo magnético criado pelo imã sofre, devido à passagem dos dentes da roda dentada (5), oscilações derivadas da variação do entreferro.

Estas oscilações induzem uma força eletromotriz na bobina (4), em cujas extremidades se manifesta uma tensão alternada. O valor de pico da tensão na saída do sensor depende, entre outros fatores, da distância entre o sensor e o dente (entreferro).

Na polia ou roda dentada (5) existem sessenta dentes, dois dos quais são removidos para criar uma referência. Os passos da roda correspondem então, a um ângulo de 6° (360° divididos por 60 dentes).

Os sinais gerados são transportados pelo cabo blindado para que interferências externas não distorçam o sinal que será interpretado pela unidade gerenciamento do motor.

O nosso projeto visa detectar construções equivocadas do imã permanente, da bobina, materiais fora de especificação técnica, o que causaria problemas, pois nesta montagem o sensor gera sinal 180° defasados.

A tensão V_0 gerada pela bobina do sensor de relutância magnética é diretamente proporcional a rotação do motor, a densidade do campo magnético e da distância do entreferro entre sensor e polia dentada, pode-se atingir algumas dezenas de volts.

2.7. Sinal Gerado pelo Sensor de Relutância Magnética Variável

Para o sensor de relutância magnética gerar sinais elétricos necessita estar posicionado próximo a uma polia dentada, com a qual tenha condições de perceber uma velocidade rotativa. Este sinal elétrico padrão pode ser conferido pela Fig. 10.

O sinal padrão que estamos apresentando, com evidência para o momento que o sensor identifica as duas falhas consecutivas, foi obtido através do estudo de

10 sensores que nos foram fornecidos pela empresa MTE THOMSON, pela medição do sensor instalado no *mock-up* GM da Fatec Santo André e pelo sensor instalado no veículo Polo – VW da Fatec Santo André (sinais cedidos pelo Profº Fróes).



Fig.10. Sinal Padrão do sensor MTE THOMSON obtido no Laboratório da Fatec Santo André

O sinal padrão gerado pelo sensor de rotação irá ser condicionado pela ECU de gerenciamento do motor, onde poderá informar a rotação e a posição angular da árvore de manivelas (Fig.11), possibilitando a ECU executar estratégias de funcionamento nos diversos regimes impostos pelo uso do veículo.

O sinal gerado pelo sensor de rotação é muito importante para informar o software de controle qual a rotação, qual regime de funcionamento o motor está atuando, e pela marcação da polia dentada é possível calcular o posicionamento da árvore de manivelas e assim determinar o sincronismo da ordem dos cilindros do motor e colocá-los em fase com o sistema de ignição e injeção, para desta maneira obter o máximo de rendimento do motor a baixas taxas de emissões e baixo nível de consumo de combustível.

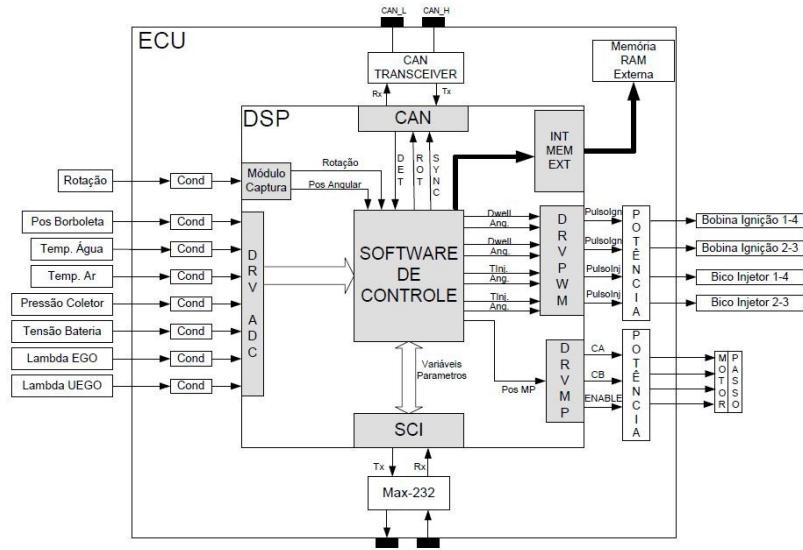


Fig. 11. Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna, BRAGA 2007

3. PROJETO PARA O EQUIPAMENTO DE TESTE DO SENSOR DE RELUTÂNCIA MAGNÉTICA

3.1. Circuito de Fonte de Tensão Fixa

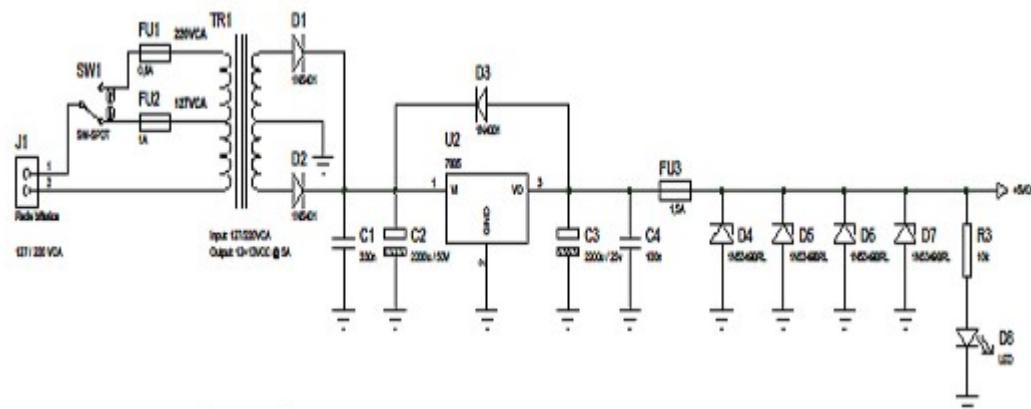


Fig. 12. Fonte de alimentação 5V do microcontrolador e do LM1815, desenhado no Proteus

Este circuito representa a fonte de alimentação de saída fixa em 5VDC, para alimentação do microcontrolador PIC18F452. O transformador de entrada pode receber alimentação de 127/220 VAC.

3.2. Condicionamento do Sinal

O sinal proveniente do sensor de rotação pode atingir altos níveis de tensão, que podem danificar o microcontrolador no momento em que a roda fônica se encontra em alta rotação. Além disto, este sinal é analógico, portanto irreconhecível pelo microcontrolador que só entende sinais digitais. Estes inconvenientes podem ser solucionados através de um circuito eletrônico de condicionamento de sinal mostrado logo abaixo:

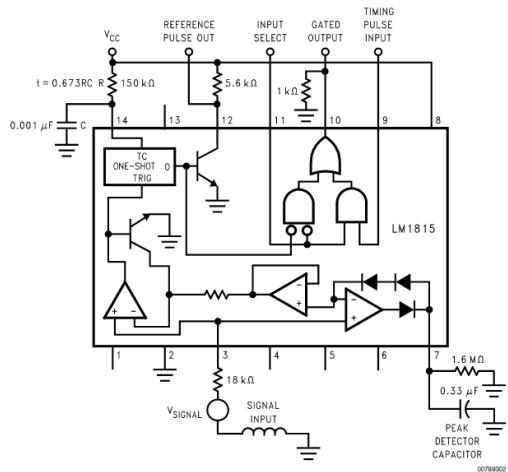


Fig. 13. Circuito Eletrônico LM 1815, retirado de seu datasheet

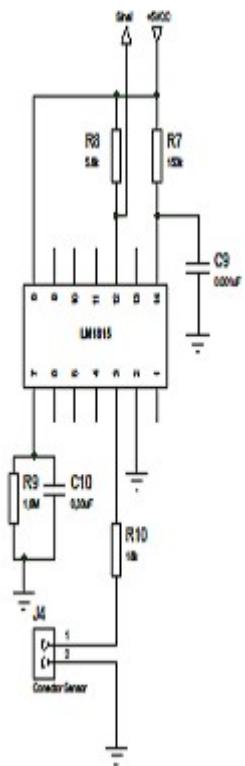


Fig. 14. Ligações dos terminais do CI LM1815, desenhado no Proteus

Electrical Characteristics ($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 10\text{V}$, unless otherwise specified, see *Figure 1*)

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Operating Supply Voltage		2.5	10	12	V
Supply Current	Pin 3 = -0.1V, Pin 9 = 2V, Pin 11 = 0.8V		3.6	6	mA
Reference Pulse Width	$f_{IN} = 1\text{Hz}$ to 2kHz , $R = 150\text{k}\Omega$, $C = 0.001\mu\text{F}$	70	100	130	μs
Logic Input Bias Current	$V_{IN} = 2\text{V}$, (Pin 9 and Pin 11)			5	μA
Signal Input Bias Current	$V_{IN} = 0\text{V}$ dc, (Pin 3)		-200		nA
Logic Threshold	(Pin 9 and Pin 11)	0.8	1.1	2.0	V
V_{OUT} High	$R_L = 1\text{k}\Omega$, (Pin 10)	7.5	8.6		V
V_{OUT} Low	$I_{SINK} = 0.1\text{mA}$, (Pin 10)		0.3	0.4	V
Output Leakage Pin 12	$V_{12} = 11\text{V}$		0.01	10	μA
Saturation Voltage P12	$I_{12} = 2\text{mA}$		0.2	0.4	V
Input Zero Crossing Threshold	All Modes, $V_{SIGNAL} = 1\text{V}$ pk-pk	-25	0	25	mV (Note 4)
Minimum Input Arming Threshold	Mode 1, Pin 5 = Open	30	45	60	mV (Note 4)
	Mode 2, Pin 5 = V_{CC}	200	300	450	mV (Note 4)
	Mode 3, Pin 5 = Gnd	-25	0	25	mV (Note 4)
Adaptive Input Arming Threshold	Mode 1, Pin 5 = Open $V_{SIGNAL} \geq 230\text{mV}$ pk-pk (Note 3)	40	80	90	% (Note 4)
	Mode 2, Pin 5 = V_{CC} $V_{SIGNAL} \geq 1.0\text{V}$ pk-pk (Note 3)		80		% (Note 4)
	Mode 3, Pin 5 = Gnd $V_{SIGNAL} \geq 150\text{mV}$ pk-pk (Note 3)		80		% (Note 4)

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. They are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The table of "Electrical Characteristics" specifies conditions of device operation.

Note 2: For operation at elevated temperatures, the device must be derated based on a 150°C maximum junction temperature and a thermal resistance of $80^\circ\text{C}/\text{W}$ (DIP), $120^\circ\text{C}/\text{W}$ (SO-14) junction to ambient.

Note 3: Tested per Figure 1, V_{SIGNAL} is a Sine Wave; F_{SIGNAL} is 1000Hz.

Note 4: The Min/Typ Max limits are relative to the positive voltage peak seen at V_{IN} Pin 3.

Tabela 3. Entradas e saídas do LM1815 retirado de seu datasheet

O LM1815 é um enquadrador de sinais, que além de solucionar os problemas citados anteriormente, ainda elimina ruídos e realiza a conversão de sinal analógico para digital limitado entre 0 e 5V contínuo.

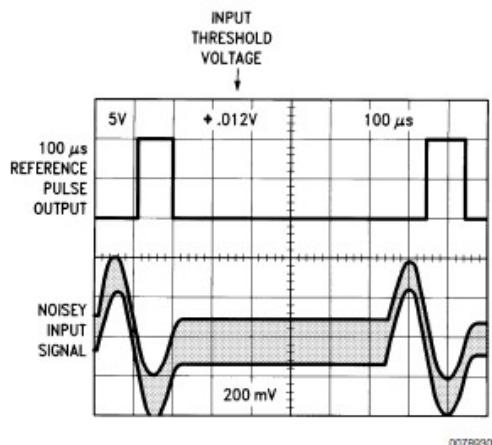


Fig.15. Sinal Condicionado pelo LM1815, retirado de seu datasheet

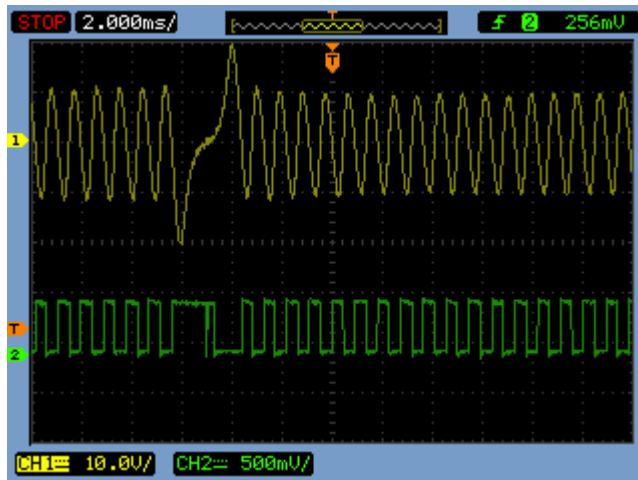


Fig. 16. Sinal analógico (Channel 1) e sinal digital (Channel 2), enquadrado pelo LM 1815, obtido no osciloscópio da FATEC Santo André

3.3. Controle do Motor Elétrico

Utilizou-se o motor WEG para gerar a rotação da roda dentada 60-2, e assim, gerar uma referência de velocidade para que se possam comparar os valores de velocidades lidos pelo sensor de rotação em teste com os valores esperados para determinada rotação (definida em software).



Fig. 17. Foto tirada do Motor WEG na FATEC Santo André

Motor de indução WEG	Valor	Unidade
Tensão	220/380	VAC
Corrente	1,02/0591	A
Rotação	3380	RPM
Potência	0,18/0,25	KW/HP
Frequência	60	Hz

Tabela 4. Características do Motor WEG

Para que se possa girar o motor, foi necessário utilizar um inversor de frequência CFW-08, que auxilia na conversão de tensão da rede alternada senoidal elétrica em tensões de amplitudes e frequências variáveis, bem como protege o equipamento de problemas elétricos variados tais como desbalanceamento entre fases, sobrecarga, queda de tensão, etc.

A estratégia de controle do inversor adotada foi a partir do envio de uma tensão PWM emitida pelo microcontrolador, que varia entre 0 e 5VDC.



Fig.18. Inversor de frequência CFW-08

Inversor de Frequência CFW-08	Valor	Unidade
Tensão	220/240	VAC
Corrente	1-3,5	A
Frequência	50-60	Hz
Tensão de saída	220/240	VAC
Corrente de saída	3-1,5	A
Frequência de saída	0-300	Hz

Tabela 5. Características do Inversor de frequência CFW 08

O sinal PWM é enviado para o pino de entrada do inversor, e ambos os pinos de terras devem ser comuns. O não aterramento dos componentes em um terra comum poderá ocasionar ruídos diversos.

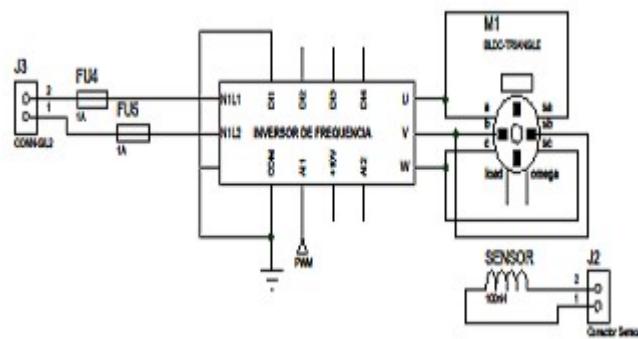


Fig.19. Esquema do inverter de frequência CFW-08 e do motor trifásico WEG elaborado no Proteus

Também foram adicionados disjuntores de 1A nas entradas de alimentação para aumentar a segurança do dispositivo e evitar problemas relacionados à rede elétrica e outros problemas adicionais.

3.4. O Circuito Eletrônico

Adotou-se o microcontrolador PIC18F452 para confecção do projeto. A escolha foi incentivada pela velocidade de processamento compatível com a necessidade exigida, temperatura de operação conforme ISO16750, eficácia em realizar nossos objetivos e também pela disponibilidade do material de imediato.

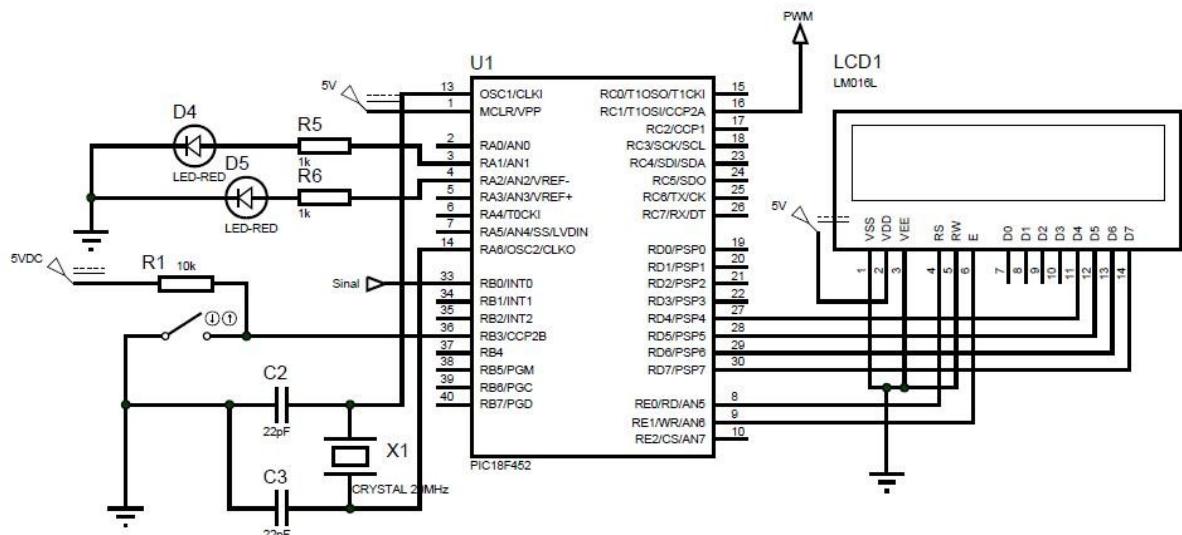


Fig. 20. Terminais de ligação do PIC18F452

Na figura acima, temos os terminais de entrada e saída do microcontrolador utilizado, dentre eles os que são utilizados no projeto são:

- RB0 – Recebimento do sinal de onda quadrada proveniente do condicionador de sinal
- RB3 – Liga/Desliga do dispositivo
- CCP2 – Envio de sinal PWM para o inverter de frequência que determina a velocidade do motor

Entre outros pinos necessários para a alimentação do circuito, oscilador, LED's e display.

3.5. Programação

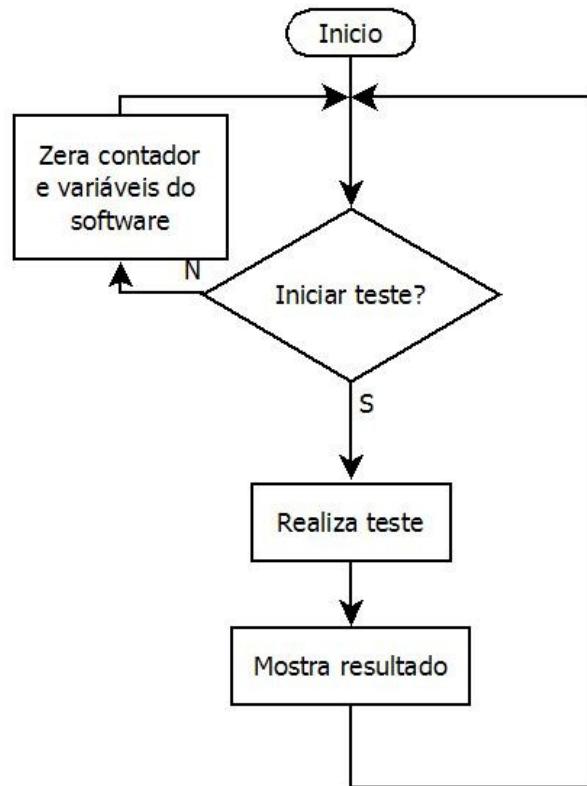
Para programar o microcontrolador PIC, utilizou-se o compilador PICC versão 3.203 disponível na faculdade. O PICC é um software da CCS que converte a linguagem humana em linguagem de máquina para que o microcontrolador possa entender.

Para gravar o arquivo compilado hexadecimal utilizou-se o MPLAB IDE v8.70 disponível na faculdade. O MPLAB é um software da Microchip que permite apagar e gravar dados e comandos nos microcontroladores.

A partir do código hexadecimal gerado pelo PICC, foi gravado o software (explicado posteriormente) na memória flash do microcontrolador, através de um Gravador de PIC, no caso, o PICKIT2. Na figura acima, o MPLAB grava na memória de programa (Program Memory), e a partir daí, estas instruções são enviadas para a CPU, o processador que é responsável pelo controle do software como um todo.

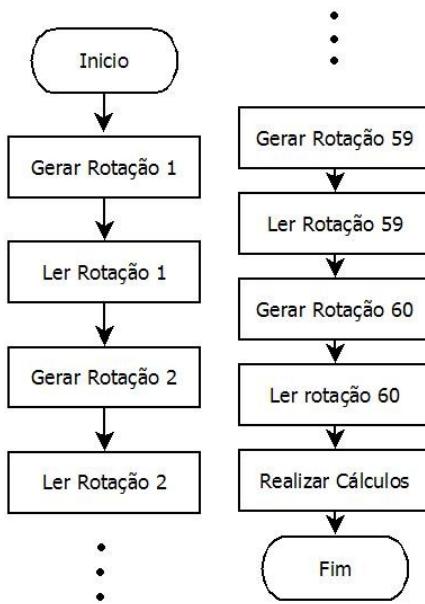
Para desenhar o circuito eletrônico utilizamos o Proteus versão 7.7 Portable.

3.6. Fluxograma da Rotina de Teste do Sensor de Relutância Magnética



Fluxograma 1: Rotina do esquema geral de teste

A partir do momento em que o dispositivo é ligado, é zerado os valores de variáveis tais como contadores e flags que indicam o resultado do teste, número de dentes, tempo entre dentes, entre outros. Quando o usuário pressiona o botão de teste, o programa entra em modo de operação de teste, mostrado no fluxograma a seguir:



Fluxograma 2: Rotina de teste do sensor de relutância magnética.

O teste consiste em controlar o inversor de frequência enviando pulsos PWM para que o sensor leia a rotação esperada para cada pulso enviado, comparando-os e identificando se o sensor envia os sinais esperados para cada rotação pré-determinada.

3.7. Software de Identificação de Rotação e Identificação do Sinal do Sensor

Primeiramente, é ajustada uma base de tempo para todo o software, definida em 1ms (técnica esta que é conhecida como tick-counter). A cada 1ms é dada uma interrupção, momento na qual ocorrem todos os eventos, como por exemplo, o controle da rotação atual da roda dentada, leitura da rotação atual da roda dentada, armazenagem e processamento dos dados obtidos, etc.

Definiu-se que a rotação do motor seria acrescida de 100 em 100 RPM até 3000 RPM, e decrescida de 100 em 100 RPM até o 0 novamente, com intervalos de 100ms cada degrau. Este processo é análogo ao controle PID, porém realizado de forma computacional. Este método amortece o giro e tenta evitar problemas de sobrecarga de corrente e sobreaquecimento do motor.

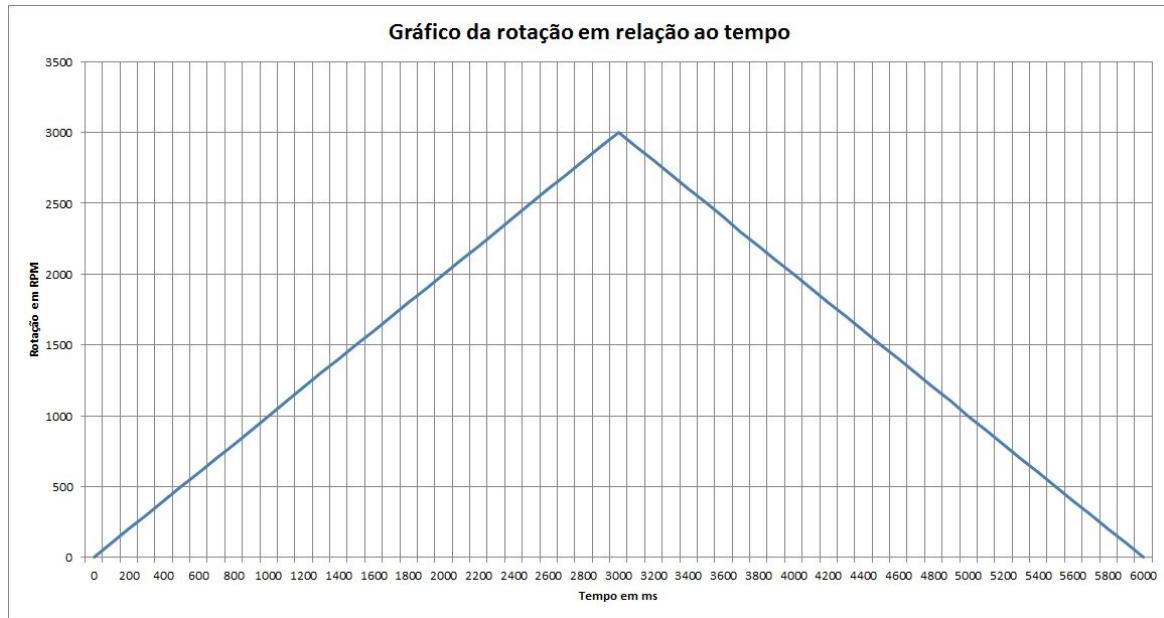


Fig. 21. Curva de aceleração e desaceleração do inversor elaborado no Excel

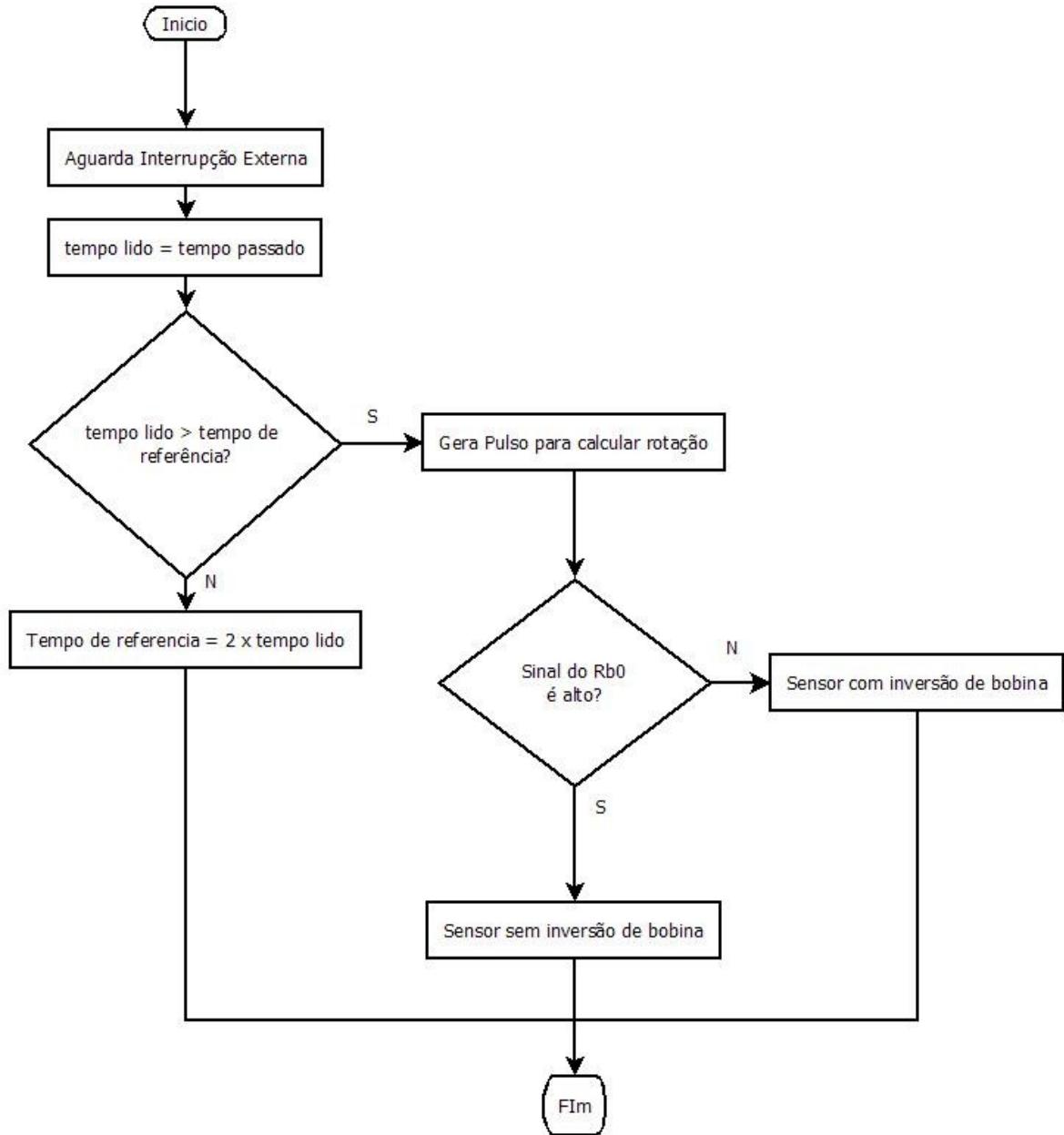
O controle da rotação é feita através do sinal PWM enviado pelo pino CCP2, sendo que a relação entre a frequência PWM, tensão de saída e rotação do motor são de ordem lineares. A seguir, uma tabela com a relação entre estas três grandezas:

Tensão (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
PWM (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rotação (RPM)	0	265	530	852	1174	1500	1825	2212	2600	2980	3360

Tabela 6. Relação de equivalência entre Tensão, PWM, e Rotação

A rotação é calculada através da falha (60-2), o sensor de rotação monitora este sinal e o envia para o microcontrolador.

No microcontrolador, este sinal é monitorado constantemente pela entrada digital TMR0(RB0), e é utilizada a lógica de detecção da falha da roda fônica a seguir para determinar a velocidade de rotação:



Fluxograma 3: Rotina de identificação da rotação e de sinal da bobina

Determinada a rotação, seu valor é comparado com o valor esperado para aquele determinado momento, e de acordo com o total andamento do processo podemos definir se o sensor está com inversão de bobina ou não.

Há também um display de interface com o usuário, que indica o modo de operação do dispositivo, o resultado de aprovação ou reprovação no final do teste e mensagem para a realização de um novo teste, caso necessário.

4. TESTES

O equipamento de teste do sensor de relutância magnética deve ser capaz de movimentar a polia dentada ou roda fônica, através do controle do motor trifásico.

O sensor será posicionado próximo ao raio externo da polia dentada, em uma distância calibrada de 1mm.

A rotação da polia irá acontecer de forma progressiva de 100 em 100 rpm até atingir 3000 rpm, e decair de 100 em 100 rpm até a sua parada. O Intervalo do teste será de 6000ms. Este método evita problemas de sobrecarga na partida e aquecimento indesejáveis no motor elétrico.

O sinal padrão gerado pelo sensor ficou definido após análise de 10 sensores que nos foram fornecidos pela empresa MTE THOMSON, pela medição do sensor instalado no mock-up GM da Fatec Santo André e pelo sensor instalado no veículo Polo – VW da Fatec Santo André (sinais elétricos cedidos pelo Profº Fróes), com ênfase para o sinal no momento que identifica as duas falhas consecutivas da polia dentada ou roda fônica (Fig. 19).



Fig. 22. Sinal Padrão do Sensor, obtido no laboratório da Fatec Santo André

Este sinal padrão precisa ser condicionado antes de chegar ao microcontrolador PIC18F452, este condicionamento é executado pelo CI LM1815.

Podemos verificar o sinal padrão do sensor no canal 3, sendo condicionado pelo CI LM1815 e gerando o sinal digital no canal 2, conforme a Fig.23.

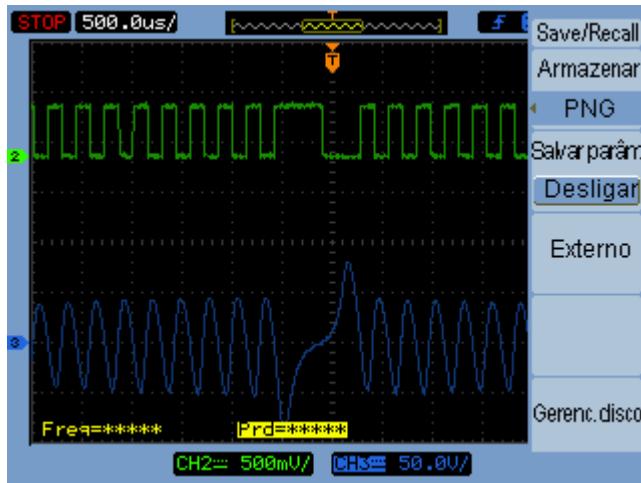


Fig. 23. Sinais obtidos no laboratório da Fatec Santo André

O programa deve reconhecer o número de sinais elétricos correspondente ao número de dentes e falhas da polia do motor, em função da rotação do motor.

No caso de uma polia do motor com 58 dentes e 2 falhas, serão gerados 58 sinais semelhante no nível de tensão e período, e um sinal padrão da identificação das 2 falhas. Cada dente e falha correspondem a 6° , portanto 60 dentes e falhas totalizam 360° . Duas falhas consecutivas correspondem a 12° , região que é gerada o sinal característico que é utilizado como sincronizador do motor.

Caso o sensor não gere este sinal característico, significa que existe defeito na (o):

- a) bobina do sensor.
- b) núcleo do imã permanente.
- c) o cabo blindado com conector elétrico.
- d) conector elétrico.
- d) distância entre sensor e polia fora da especificada pelo fabricante.

Porém o nosso equipamento de teste de sensor de relutância detecta outro defeito que por medições comuns é impossível detecta-lo.

Caso na construção do sensor, o núcleo do imã permanente, ou a bobina seja instalada de forma invertida o sinal gerado por este sensor será também invertido, ou seja, um sinal indevido e inválido para o sistema de gerenciamento do motor, que podemos conferir na Fig. 24.



Fig. 24. Sinal Inválido, obtido no Laboratório da Fatec Santo André

O nosso equipamento receberá este sinal do sensor defeituoso, condicionado pelo CI LM 1815 e identificará que o sinal recebido não é o padrão, indicando que o sensor é defeituoso. No canal 1 o sinal gerado pelo sensor defeituoso, no canal 2 o sinal condicionado pelo CI LM 1815 podem ser conferidos na Fig.25.



Fig. 25. Sinais obtidos no laboratório da Fatec Santo André

Portanto, no caso de defeitos estruturais, ou seja, de montagem de componentes vitais do sensor de relutância para geração de sinais elétricos que causem a inversão deste sinal, serão interpretados pelo equipamento e por ele apontados como sensor defeituoso.

A dificuldade de identificação de sensores de relutância magnética com este defeito é compreensível, pois estruturalmente o sensor está perfeito, porém o sinal

gerado por ele não será reconhecido pelo sistema eletrônico de gerenciamento do motor de combustão.

Fatores que geram sinais indevidos ou fora de padrão nos sensores:

- a) imã permanente instalado erroneamente no sensor.
- b) bobina instalada erroneamente no sensor.
- c) conexão do cabo blindado ou conector instalado erroneamente no sensor.

4.1. Relação de Componentes:

2x Diodo 1N5401
2x Diodo 1N4001
4x Diodo 1N5349BRL
1x Regulador tensão 7805
1x Transistor 2P3S
1x Fuse 0,6A
1x Fuse 1,5A
3x Fuse 1,0A
1x SW-Interruptor
1x Interruptor
1x CI LM1815
1x Crystal 20MHz
1x Display 16L
1x PIC18F4550
2x LED Red
1x LED Green
2x Capacitor 2200uF/25V
1x Capacitor 330nF
3x Capacitor 100nF
1x Capacitor 0.001uF
1x Capacitor 0.33uF
1x Capacitor 1nF

2x Capacitor 22pF

2x Resistor 1K

2x Resistor 10K

1x Resistor 5.6K

1x Resistor 150K

1x Resistor 1,6M

1x Resistor 18K

4x CONN-SIL2

1x Inversor de Frequênciа WEG-CFW 08

1x Motor Trifásico Tensão: 220/380V, Potência: 3/4HP

5. CONCLUSÃO

Os nossos testes foram executados dentro dos limites de padrões técnicos e de segurança como:

- Única polia dentada ou roda fônica cedida pela Fatec Santo André.
- Rotação máxima de 3000 RPM.
- Distância do entreferro entre sensor e polia fixado em 1 mm.

O projeto do nosso equipamento de teste de sensor de relutância magnética mostrou-se eficaz, pois consegue detectar os sensores regulares e irregulares, conforme nossa proposta de trabalho.

6. PROPOSTAS FUTURAS

Para futuros estudos, as análises devem acontecer com outras polias que sejam utilizadas pelas montadoras dos veículos, pois acreditamos que possam ter propriedades específicas.

Sabemos que as rotações dos motores de combustão interna por centelha ultrapassam o limite de 3000 RPM, com novos equipamentos desenvolver condições de aumentar esta rotação.

Cada montadora fixa uma distância do entreferro entre sensor e polia, estes devem ser estudados individualmente.

Outra sugestão seria o desenvolvimento de filtros entre o circuito do microcontrolador e o inversor de frequências, pois a falta destes filtros expõe o circuito a ruídos eletromagnéticos que interferem no resultado do teste, pois interagem com o circuito eletrônico do equipamento de teste do sensor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boylasted, Robert – Introdução à Análise de Circuitos – Editora Pearson – 10^a edição – 2004
- Bosch - Manual de Tecnologia Automotiva – 25^o Edição
- Catálogo MTE THOMSON de Injeção Eletrônica
- Gerenciamento Eletrônico de Motores Flex – Treinamento e Padrões da Rede Fiat
- Kitani, Profº Edson – Material Didático da Disciplina de Unidades de Gerenciamento Automotivo – 2011
- Kitani, Profº Edson – Material Didático da Disciplina de Carga e Partida – 2011
- Laganá, A. A. M. – Apostila de Sensores – 2011
- Magnetic Velocity Sensor – Paper IEEE, September/October 1996
- Sistema de Injeção Eletrônica – Magneti Marelli
- Sistema de Injeção Eletrônica de Combustível – Curso Técnico de Automobilística – Senai SP