



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



MARCELO DE FRAGA CARVALHO

SENSOR ANGULAR BASEADO EM EFEITO HALL

Canoas, Dezembro de 2011



MARCELO DE FRAGA CARVALHO

SENSOR ANGULAR BASEADO EM EFEITO HALL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Instrumentação

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. Dalton Luiz Vidor – CREA-RS: 07.9005-D

Canoas

2011



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Marcelo de Fraga Carvalho

Matrícula: 032007380-7

Título: Sensor Angular Baseado em Efeito Hall

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

MSc. Eng. Eletr. Dalton Luiz Vidor

CREA-RS: 07.9005-D

Banca Avaliadora:

MSc. Eng. Eletr. Miriam Noemi Cáceres

CREA-RS: 06.7231-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Márcio Gil Faccin

CREA-RS: 12-2301-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor
Marcelo de Fraga Carvalho

Orientador
Dalton Luiz Vidor

Avaliador
Miriam Noemi Cáceres

Avaliador
Márcio Gil Faccin

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico a meu pai e minha mãe (em memória).



AGRADECIMENTOS

A meu pai Antônio Carlos que além de representar a si próprio, supre a ausência de minha mãe Janice desde a minha infância e sempre me deu forças para começar, continuar e concluir este sonho.

As minhas irmãs, Geovanna e Vanessa que também sempre estiveram do meu lado.

As minhas avós, Vicentina e Stela que sempre foram como mães para mim.

Aos ex-colegas de trabalho e engenheiros Leoci Galle, Fernando Boschin e João Paulo Brusque que além de me passarem muitos ensinamentos, me deram a primeira oportunidade de aplicar na prática, os conhecimentos adquiridos nesta graduação.



EPÍGRAFE

Grandes conquistas dependem de grandes esforços



RESUMO

CARVALHO, Marcelo de Fraga. **Sensor Angular Baseado em Efeito Hall**. XX f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2011.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um Sensor Angular Baseado em Efeito Hall e um sistema de aquisição de dados para leitura e análise do comportamento do sensor. A primeira parte do trabalho trata de mostrar um referencial teórico de assuntos pertinentes ao desenvolvimento do trabalho como um todo, tais como teoria sobre o efeito hall, princípios de funcionamento de sensores angulares utilizados no mercado e descrição do microcontrolador MSP430. Depois do referencial teórico, o trabalho mostra os materiais e métodos envolvidos em cada etapa do projeto do sensor e do sistema de aquisição, tais como, definição dos componentes, simulação do comportamento do ímã através do método dos elementos finitos, teste de conceito com dispositivo desenvolvido manualmente, projeto de circuitos eletrônicos para condicionamento, microcontrolador e conversor USB-Serial, desenvolvimento de *firmware* em linguagem C utilizando a ferramenta de desenvolvimento IAR Embedded Workbench for MSP430, desenvolvimento de interface gráfica utilizando a linguagem de programação gráfica LabView caracterização do sensor angular e projeto mecânico do sensor utilizando o software de modelagem 3D SolidWorks 2010. Por fim o trabalho mostra o resultado das simulações e testes realizados ao longo das etapas do projeto e também a caracterização do sensor angular e do sistema de aquisição quanto à linearidade, repetibilidade, histerese e erro.

Palavras chave: Sensor. Efeito Hall. Angular.



ABSTRACT

CARVALHO, Marcelo de Fraga. **Angular Sensor Based on Hall Effect**. XX p. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2011.

This work aims to show the development of an Angular Sensor Based on Hall effect and a data acquisition system for reading and analyzing of the sensor. The first part of the work is to show a theoretical matters relevant to the development of work as a whole, such as the Hall effect theory, principles of operation of the angle sensors used in the market and description of the MSP430 microcontroller. After the theoretical, the work shows the materials and methods involved in each step of the design of the sensor and acquisition system, such as components defining, simulating the behavior of the magnet through the finite element method, with proof of concept device developed manually, design of electronic circuits for conditioning, microcontroller and USB-Serial converter, firmware development in C language using the IAR Embedded Workbench for MSP430 development tool, development of graphical user interface using the LabView graphical programming language, characterization of the angular sensor and mechanical design of the sensor using SolidWorks 2010 3D modeling software. Finally, the work shows the results of simulations and tests throughout the stages of the project and also the characterization of the angular sensor and acquisition system as the linearity, repeatability, hysteresis and error.

Keywords: Sensor. Anemometer. Hall Effect. Angular.



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 – Principais elementos de um potenciômetro rotativo.....	16
Figura 2-2 - Disposição dos elementos de um Encoder Incremental	17
Figura 2-3 - Principais elementos de um Encoder Absoluto.....	18
Figura 2-4 - Esquema de um RVDT.....	19
Figura 2-5 - Efeito Hall em um semicondutor (sem campo magnético aplicado).....	19
Figura 2-6 - Efeito Hall em um semicondutor.....	20
Figura 2-7 - Diagrama básico de um sensor de efeito Hall	21
Figura 2-8 – Curva típica de saída de um sensor Hall.....	21
Figura 2-9 - Densidade de Fluxo Magnético	22
Figura 2-10 – Curva típica de Magnetização e desmagnetização de um ímã permanente	23
Figura 2-11 - Diagrama de blocos do MSP430F235	25
Figura 3-1 - Diagrama das etapas do projeto.....	26
Figura 3-2 - Ímã Permanente Toroidal	27
Figura 3-3 - Análise de elementos finitos do Ímã do sensor	28
Figura 3-4 - Peça para dispositivo de teste	29
Figura 3-5 - Dispositivo para teste do sensor	29
Figura 3-6 - Dispositivo com referência metrológica.....	30
Figura 3-7 - Diagrama de blocos - FT232R	31
Figura 3-8 - Distribuição da alimentação de 5VDC	31
Figura 3-9 - Diagrama de blocos do MSP430F235	32
Figura 3-10 - Fluxograma Firmware MSP430	33
Figura 3-11 - PCI com MSP430	33
Figura 3-12 - Painel frontal da interface em LabView	34
Figura 3-13 - Circuito subtrator e filtro	35
Figura 3-14 - Modelo 3D do sensor	36
Figura 3-15 - Vista Explodida do sensor	37
Figura 4-1 Geometria e materiais no software Femm 4.2	38
Figura 4-2 Linhas de fluxo e densidade de fluxo magnético do ímã permanente	39
Figura 4-3 - Distribuição da densidade de fluxo magnético no centro do ímã.....	40
Figura 4-4 - Teste de conceito do sensor angular	41
Figura 4-5 - Gráfico Sinal de saída X ângulo	42
Figura 4-6 - Resposta do sensor de -20° a 110°	43
Figura 4-7 Resposta do sensor de 0° a 90°	44
Figura 4-8 - Histerese do sistema	46
Figura 4-9 - Distribuição do Erro do sistema	47
Figura 6-1 – Esquema eletrônico da placa de interface microcontrolador - PC.....	52
Figura 6-2 - Esquema eletrônico da placa MSP430	52



LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tipos e características de ímãs permanentes	24
Tabela 4-1 - Valores de ângulo obtidos através da interface gráfica.....	44



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC: Alternate Current.

A/D: Analog / Digital.

LSB: Least Significant Bit.

MSB: Most Significant Bit.

PC: Personal Computer.

PCI: Placa de Circuito Impresso.

PTH: Pin Through Hole.

SMD: Surface Mounted Device

UART: Universal Assynchronous Receiver / Transmitter.

USB: Universal Serial Bus.



LISTA DE SÍMBOLOS

A – [Ampéres]

Hz – [Hertz]

V – [Volts]

G – [Gauss]

T – [Tesla]

° - [Graus]

Ω – [ohm]



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. Sensores de Posição Angular	16
2.2. Efeito Hall	19
2.3. Características dos Imãs Permanentes	22
2.4. Microcontrolador MSP430F235 – Texas Instruments.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. Definição dos componentes do sensor	27
3.2. Comprovação do Comportamento do Imã pelo Método dos Elementos Finitos:	28
3.3. Projeto e Montagem do Dispositivo de Testes	28
3.4. Caracterização do Sensor	30
3.5. Definição da Comunicação Sensor – PC	30
3.6. Fonte de Alimentação	31
3.7. Definição do Microcontrolador, Projeto e Montagem do Circuito.....	32
3.8. Desenvolvimento da Interface Gráfica no PC.	34
3.9. Circuito Condicionador e Filtro	35
3.10. Linearização da Curva do Sensor	36
3.11. Projeto de Modelo de Produto do Sensor Angular.....	36
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
4.1. Comportamento do Imã Pelo Método dos Elementos Finitos	38
4.2. Teste de Conceito do Sensor Angular Utilizando o Dispositivo de Testes	41
4.3. Caracterização do Sensor:.....	42
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
6. REFERÊNCIAS	49
GLOSSÁRIO	51
APÊNDICE A – ESQUEMAS ELETRÔNICOS.....	52
APÊNDICE B – FIRMWARE MSP 430	53
APÊNDICE C – SOFTWARE INTERFACE	60
APÊNDICE D – AFERIÇÃO DO TRANSFERIDOR.....	63
ANEXO A – TRECHO DE DATASHEET DO SENSOR HALL UTILIZADO	66
ANEXO B – DESENHO TÉCNICO DO IMÃ UTILIZADO.....	67



1. INTRODUÇÃO

Diversas aplicações nas áreas, industrial, automotiva, entre outras, utilizam máquinas e dispositivos que realizam movimentos angulares os quais muitas vezes devem ser monitorados para realimentar um sistema de controle ou apenas para informar a posição instantânea do dispositivo. Diversos sensores com diferentes princípios de funcionamento são aplicados para este fim, sendo os principais: sensores óticos, resistivos, indutivos e capacitivos.

Com a evolução da eletrônica e da obtenção de ímãs permanentes, sensores baseados em efeito Hall estão sendo cada vez mais aplicados em sensores de posição lineares e angulares. O efeito Hall ocorre quando um material semicondutor é submetido a uma corrente elétrica e ao mesmo tempo permeado por um campo magnético, sendo que o produto vetorial destas duas grandezas gera uma diferença de potencial no material chamada tensão hall. Este é o princípio fundamental para o desenvolvimento do Sensor Angular que é o objetivo principal desse trabalho.

Este trabalho tem dois objetivos macros, são eles, o desenvolvimento do sensor angular baseado em efeito hall e um sistema de aquisição de dados para este sensor.

O projeto do sensor pode ser dividido em etapas, tais como, a caracterização do comportamento do ímã através do método dos elementos finitos, a construção de um dispositivo de testes e por fim a caracterização do sensor através de experimentos práticos.

Já o sistema de aquisição de dados se dividirá basicamente em cinco etapas: projeto e montagem de um circuito condicionador de sinais, projeto e montagem de circuito com microcontrolador MSP430, projeto e montagem de um circuito conversor USB – Serial, projeto de firmware, e software de interface gráfica rodando no PC.

Uma sucinta revisão teórica sobre tecnologias utilizadas na obtenção de sensores angulares bem como uma breve descrição de como ocorre o efeito hall em um material semicondutor e apresentação do microcontrolador MSP430F235 da Texas Instruments será apresentada no capítulo 2 deste trabalho.



Os materiais e métodos utilizados em cada etapa do projeto são vistos no capítulo 3, sendo os principais tópicos, a comprovação do comportamento das linhas de fluxo magnético de um ímã toroidal através do método dos elementos finitos, o projeto e montagem de dispositivos para testes e levantamento das características do sistema, o projeto e montagem de circuitos eletrônicos que compõe o trabalho, projeto de firmware em linguagem C e projeto da interface gráfica.

No capítulo 4, são apresentados os resultados dos testes e análises realizadas em diversas etapas do projeto tais como os resultados da análise de elementos finitos e levantamento da repetibilidade, erro e histerese do sensor.

Finalizando o trabalho, no capítulo 5 são feitas as considerações finais, os problemas encontrados e as sugestões para trabalhos futuros fazendo uso dos conhecimentos adquiridos durante esse projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Sensores de Posição Angular

São diversos os tipos de sensores utilizados em aplicações que realizam movimentos angulares ou rotativos. A seguir, serão mostrados os principais tipos de sensores angulares, bem como a forma construtiva e funcional de cada um.

1.1.1. Potenciômetros

Um potenciômetro é composto de uma pista de material resistivo (filme carbono, fio de níquel, cerâmica com metal [cermet] etc.) por onde um eixo faz deslizar uma terminação. Este contato com a pista varia o valor da resistência entre os terminais extremos e o terminal central. Potenciômetros rotativos variam a resistência em seus terminais de acordo com o movimento do seu eixo. A Figura 2-1 mostra os principais elementos de um potenciômetro rotativo [1]:

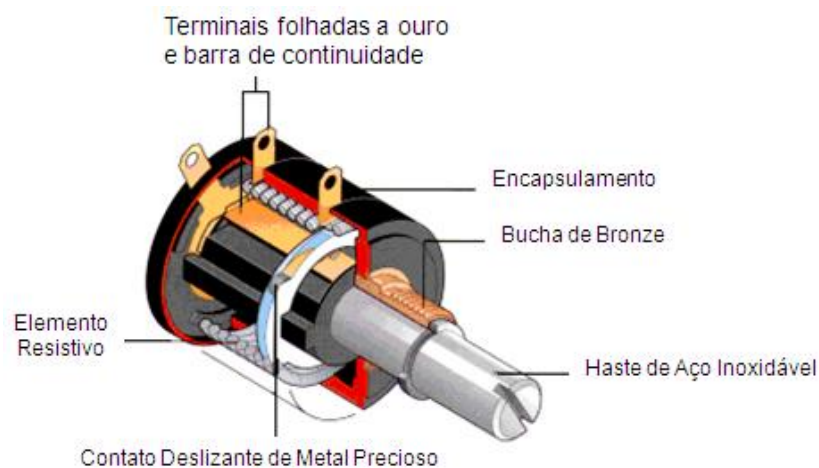


Figura 2-1 – Principais elementos de um potenciômetro rotativo
[chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs6.pdf]

O condicionamento de um potenciômetro normalmente é feito utilizando-o como divisor de tensão ligado ao pino de entrada de um amplificador operacional configurado como seguidor de tensão ou com um determinado ganho.

Os potenciômetros que geralmente apresentam baixo custo, são amplamente aplicados na indústria, na área automotiva e em equipamentos eletrônicos de consumo.

1.1.2. Encoder Incremental e Absoluto

Os encoders são transdutores dotados de emissores e receptores de infravermelho e discos perfurados ou codificados que possibilitam que este dispositivo seja capaz de converter movimentos angulares em sinais elétricos que devem ser transformados em códigos binários os quais normalmente são lidos por um sistema microprocessado e convertidos em distância, velocidade, etc [1].

Os Encoders são classificados como:

Incremental: Podem ser de uma ou duas filas de furos. Os de uma fila permitem detectar apenas velocidade e deslocamento já os de duas filas, onde os furos de uma das filas estão deslocados em 90° dos furos da outra, provocando uma defasagem nos sinais gerados pelos elementos óticos, possibilita detectar também a direção do movimento. O nome “incremental” é dado pela forma como a posição é obtida com este transdutor, ou seja, cada pulso gerado ao girar o disco perfurado corresponde ao menor deslocamento que pode ser medido e incrementando estes pulsos obtêm-se a respectiva posição. A Figura 2-2 mostra a disposição dos principais elementos de um Encoder Incremental [1]:

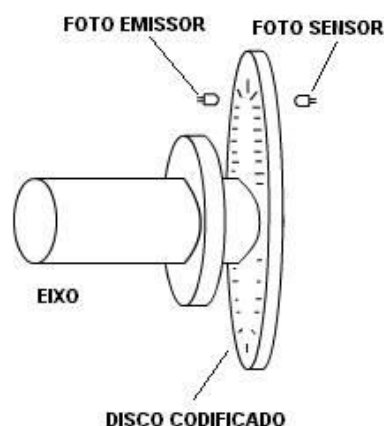


Figura 2-2 - Disposição dos elementos de um Encoder Incremental

[robertobairros.sites.uol.com.br]

Absoluto: Este tipo de Encoder possui vários sensores óticos, os quais, combinados entre si geram um código binário para cada posição do disco. Este código de valores está disponível imediatamente após o dispositivo ser ligado, daí que surge o nome “absoluto” pois cada posição é conhecida em uma volta completa do disco. A Figura 2-3 mostra um esboço de como é internamente um Encoder Absoluto [1]:

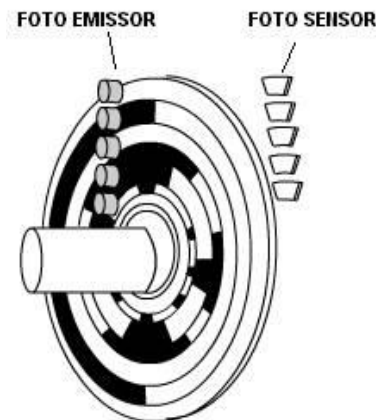


Figura 2-3 - Principais elementos de um Encoder Absoluto.

[robertobairros.sites.uol.com.br]

1.1.3. Transformador Diferencial Variável Rotativo – *Rotary Variable Differential Transformer (RVDT)*

Um Transformador Diferencial Variável Rotativo (RVDT) é um transdutor eletromecânico que fornece uma tensão de saída variável (AC) proporcional ao deslocamento angular de seu eixo. Quando são alimentados com uma fonte AC fixa, o sinal de saída é linear dentro de um intervalo especificado de deslocamento angular [1].

Este transdutor é composto de um enrolamento no rotor onde é aplicada a tensão de excitação e um estator composto de 3 enrolamentos que geram o sinal de saída.

Ao girar o rotor, o seu enrolamento induz tensão nos enrolamentos do estator, linearmente proporcional ao deslocamento do eixo (que é conectado ao rotor). A Figura 2-4 mostra um esquema ilustrando o princípio de funcionamento deste transdutor:

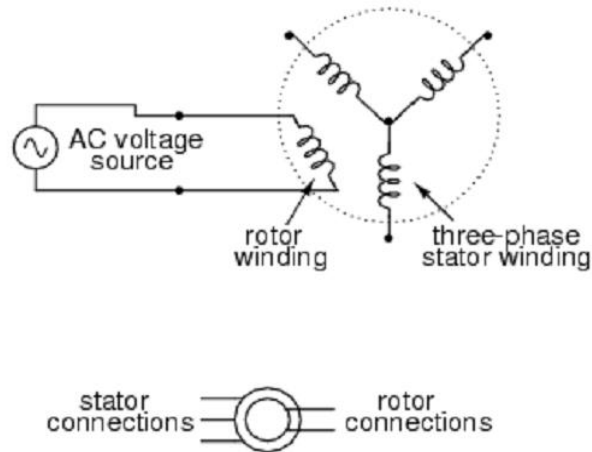


Figura 2-4 - Esquema de um RVDT

[www.joinville.ifsc.edu.br]

2.2. Efeito Hall

1.2.1. Teoria

Quando um condutor ou semicondutor está conduzindo corrente elétrica e é imerso em um campo magnético, uma tensão é gerada perpendicular à corrente e ao campo magnético. Este princípio é conhecido como Efeito Hall.

A Figura 2-5 mostra uma fina chapa de material semicondutor pela qual está passando corrente elétrica (I). As conexões de tensão de saída estão perpendiculares a direção da corrente. Quando não há aplicação de um campo magnético, a corrente se distribui uniformemente no material, desta forma, não gerando tensão na saída ($V=0$) [7].

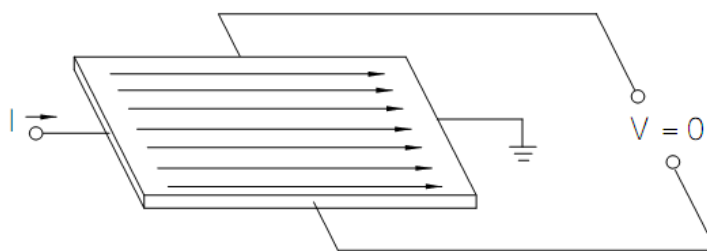


Figura 2-5 - Efeito Hall em um semicondutor (sem campo magnético aplicado)

[Honeywell – Hall Book]

Na presença de um campo magnético (B) perpendicular sobre o material semicondutor, como mostra a Figura 2-6, uma força de Lorentz atua sobre a corrente (I). Esta força causa uma variação na distribuição da corrente, desta forma gerando uma diferença de potencial (tensão) na saída. Esta tensão é chamada de Tensão Hall (V_H).

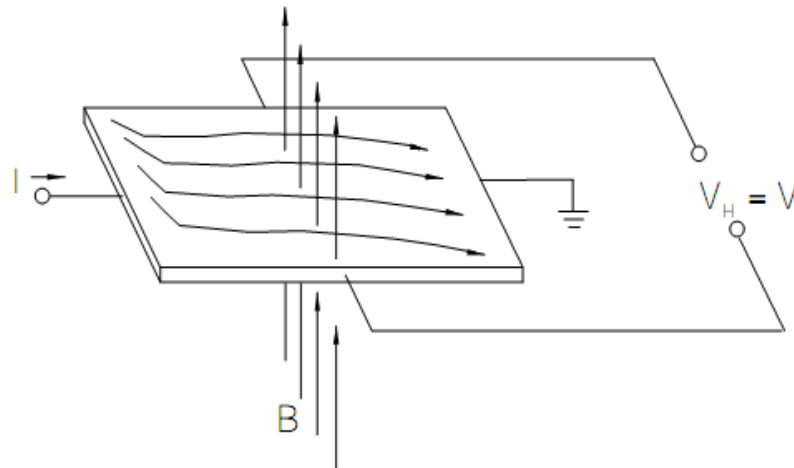


Figura 2-6 - Efeito Hall em um semicondutor

[Honneywell – Hall Book]

A interação do campo magnético com a corrente é modelada através da Equação 2-1:

Equação 2-1 – Interação do Campo Magnético e Corrente

$$V_H = I \times B$$

Esta equação mostra que a Tensão Hall (V_H) é proporcional ao produto vetorial da corrente (I) com o campo magnético (B). Esta tensão é da ordem de $7\mu\text{V/Wb/Gauss}$ para o Silício, portanto é necessário amplificação deste sinal para aplicações práticas.

1.2.2. Sensores de Efeito Hall Analógicos

O elemento Hall é a parte básica do sensor de campo magnético. Além deste elemento, um sensor de efeito hall necessita de condicionamento de sinal, o qual é composto de um estágio amplificador diferencial e um estágio de compensação de temperatura. Como pode ser visto na Equação 2-1, a tensão Hall é o produto vetorial da corrente com o campo magnético. Como o sensor é feito para detectar a variação de campo magnético, a corrente é mantida constante com o uso de um regulador. A Figura 2-7 mostra o diagrama básico de um sensor de efeito Hall:

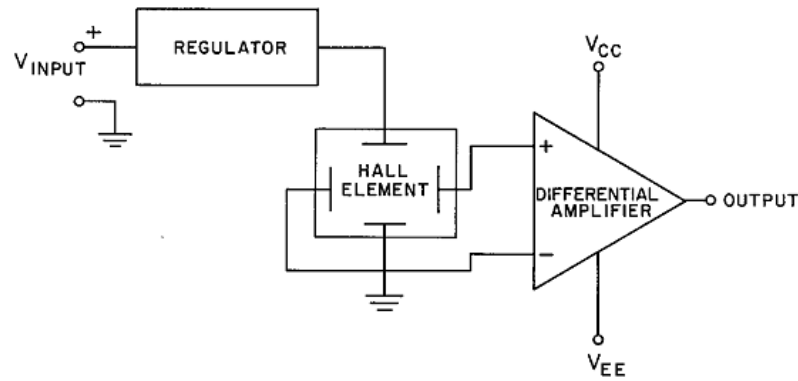


Figura 2-7 - Diagrama básico de um sensor de efeito Hall
[Honeywell – Hall Book]

Os sensores analógicos fornecem uma tensão de saída proporcional ao campo magnético ao qual ele é exposto. O campo magnético sentido pode ser positivo ou negativo, dependendo da direção em que ele é aplicado ao sensor. Para evitar o uso de fonte simétrica para alimentação do sensor, uma tensão DC fixa (*offset* ou *bias*) é introduzida no amplificador diferencial, resultando em um valor de tensão (*Null voltage*) na saída do sensor quando este não estiver exposto a um campo magnético. A Figura 2-8 mostra a curva típica de saída de um sensor Hall [7]:

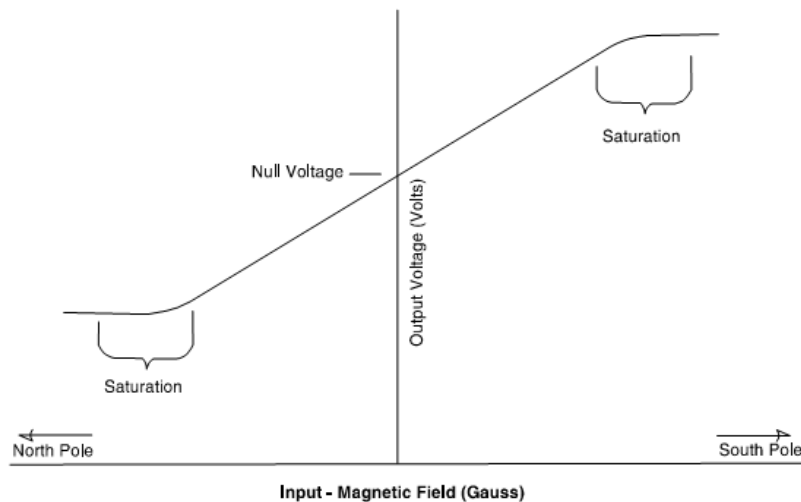


Figura 2-8 – Curva típica de saída de um sensor Hall
[Honeywell – Hall Book]

2.3. Características dos Imãs Permanentes

Densidade do Fluxo Magnético:

Representado pela letra B , possui unidade expressa em webers por metro quadrado Wb/m^2 segundo o Sistema Internacional de Unidades (SI). Consiste no número de linhas de fluxo por unidade de área que permeiam o campo magnético, como mostra a Figura 2-9.

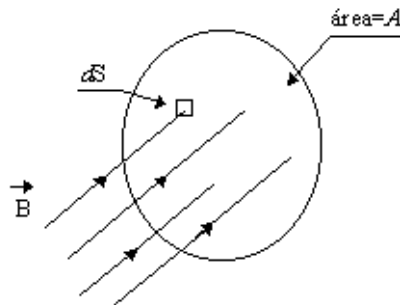


Figura 2-9 - Densidade de Fluxo Magnético

[http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap_08/grandmag.htm]

A densidade de campo magnético possui uma relação vetorial com a intensidade magnética e é calculado através da Equação 2-2, sendo a sua direção em qualquer ponto do campo magnético a direção do campo naquele ponto.

Equação 2-2 - Densidade de Campo Magnético

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

Intensidade de Campo Magnético:

Consiste em uma grandeza vetorial que indica a capacidade de um campo magnético de exercer força sobre cargas elétricas em movimento. É representada pela letra H , no SI sua unidade é Ampère/metro (A/m) e é calculado através da Equação 2-3:

Equação 2-3 - Intensidade de Campo Magnético

$$H = \frac{B}{\mu}$$

Permeabilidade Magnética:

Consiste na capacidade de um material de adquirir magnetização quando submetido a campos magnéticos. É representada por μ e sua unidade é Henry por metro (H/m). É possível calcular esta grandeza, isolando μ na Equação 2-3.

Remanência e Coercitividade:

Remanência consiste na quantidade de magnetização retida por um material após ser submetido a um determinado campo magnético. É representada por B_r .

Coercitividade é a quantidade de campo magnético reverso necessário para desmagnetizar um material desde sua saturação. É representada por H_c .

A figura 2-10 mostra uma típica curva de histerese de magnetização e desmagnetização de um ímã permanente:

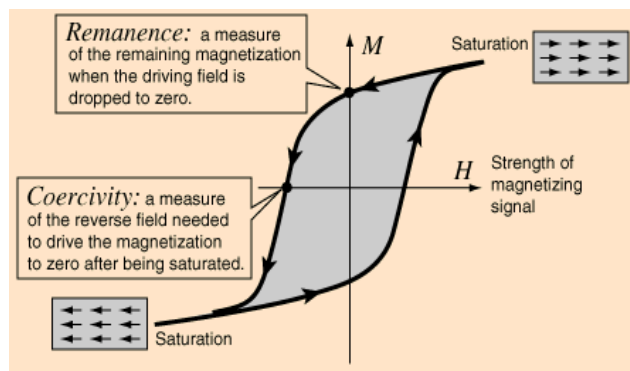


Figura 2-10 – Curva típica de Magnetização e desmagnetização de um ímã permanente

[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

Existem diversos tipos de ímãs permanentes, na tabela abaixo seguem os tipos e suas características:

Tabela 2-1 – Tipos e características de ímãs permanentes

NdFeB (Neodímio Ferro Boro)	SmCo (Samário Cobalto)
<ul style="list-style-type: none">- Alta intensidade de campo magnético.- Alto fator de remanência e coercividade- Custo relativamente baixo- Mecanicamente mais resistente que a liga SmCo- Pode ser usado até 200 graus Célsius- Não recomendado para uso em atmosfera de hidrogênio líquido- O tipo colado pode ser cortado por máquina, mas não suporta choques mecânicos.	<ul style="list-style-type: none">- Alta intensidade de campo magnético- Ideal para aplicações de alto desempenho.- Alta resistência à desmagnetização- Excelente estabilidade térmica- Alta resistência à corrosão- Ímã de custo elevado- Pode ser usado até 300 graus Célsius- Quebradiço (produz lascas facilmente)
AlNiCo (Alumínio Níquel Cobalto)	Ferrites
<ul style="list-style-type: none">- Mais barato que os ímãs de ligas de terras raras- Temperatura de funcionamento tão alta como 550 graus Célsius- Coeficiente de temperatura bastante baixo- Baixa coercividade quando comparado a outros grupos de ímãs- Altos níveis de campos de indução magnética	<ul style="list-style-type: none">- Frágeis- Pobre estabilidade térmica- Mais barato dentre todos os grupos- Pode ser usado até 300 graus Célsius- Necessita moagem para atingir tolerância à compressão.- Alta resistência à corrosão

www.rare-earth-magnets.com/t-permanent-magnets.aspx

2.4. Microcontrolador MSP430F235 – Texas Instruments

A MSP430 da Texas Instruments é uma família de microcontroladores de ultra baixo consumo, a qual é composta por diversos dispositivos que possuem diferentes conjuntos de periféricos direcionados para várias aplicações. Os dispositivos apresentam um poderoso núcleo de 16-bit RISC, registradores de 16-bit, e geradores de constantes que contribuem para máxima eficiência no código. Possui um oscilador calibrado digitalmente controlado (DCO) que permite ao microcontrolador despertar do modo de baixo consumo em menos de 1 μ S.

O microcontrolador utilizado neste trabalho é o MSP430F235, o qual possui as funcionalidades mostradas no diagrama de blocos da Figura 2-11:

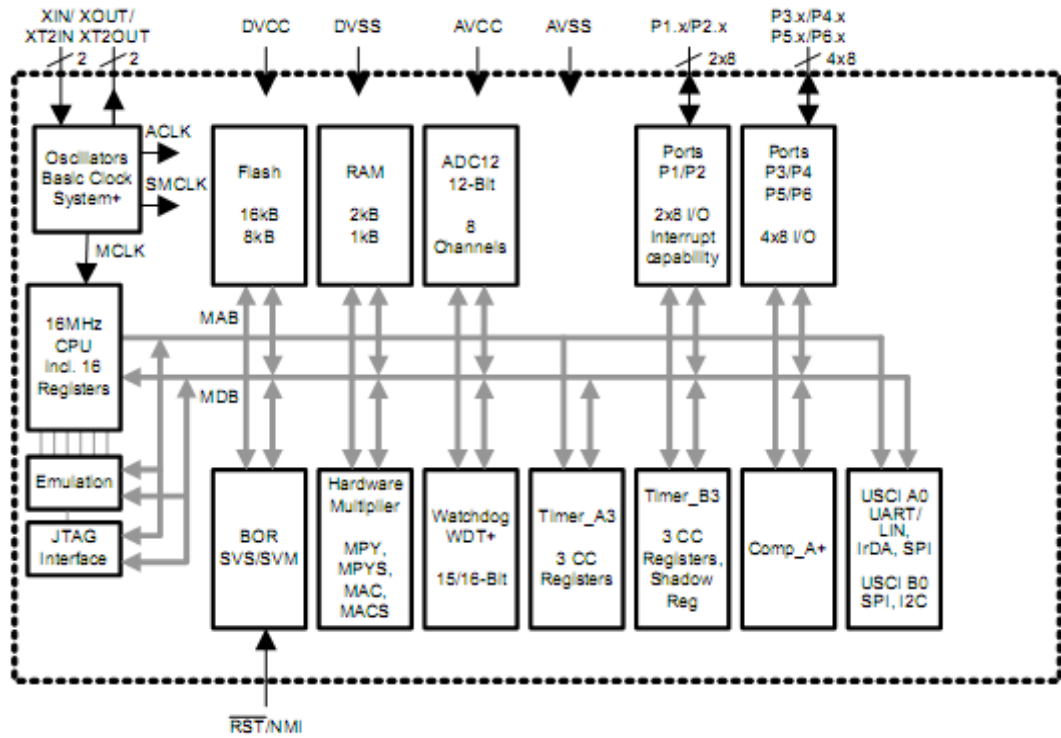


Figura 2-11 - Diagrama de blocos do MSP430F235
[Datasheet MSP430xF23x]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão mostrados os materiais e métodos utilizados no projeto do sensor angular e demais elementos do sistema. Desde a definição dos componentes do sensor até o projeto 3D de uma idéia de produto para este sensor. Para dar um panorama geral das fases do projeto, foi elaborado o diagrama da Figura 3-1:

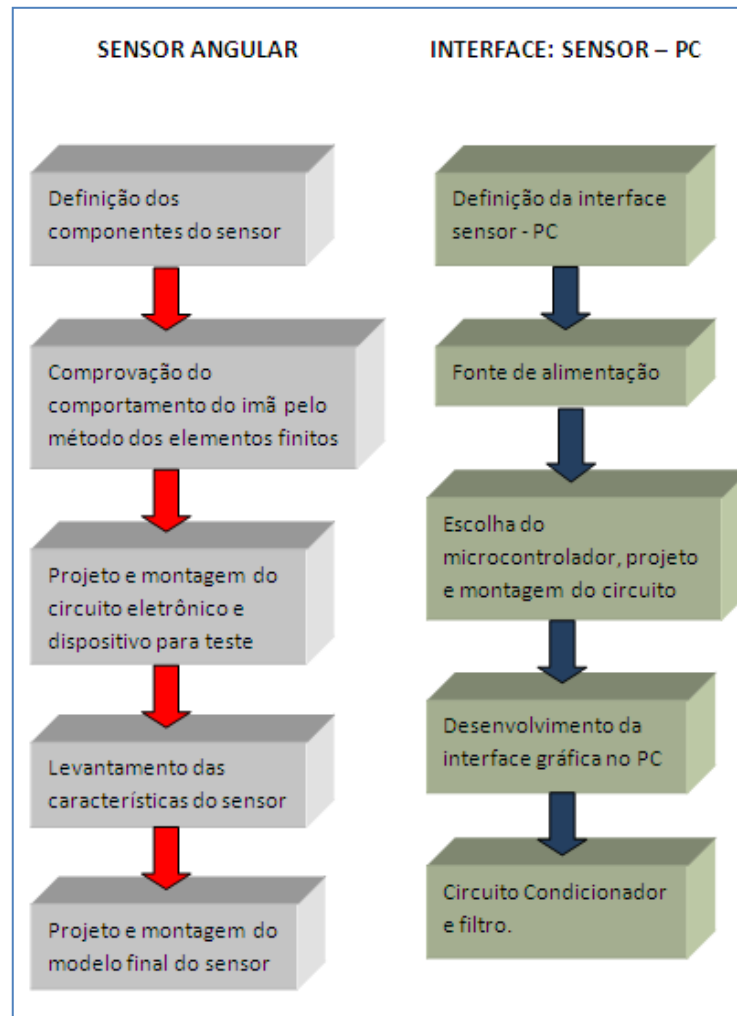


Figura 3-1 - Diagrama das etapas do projeto

3.1. Definição dos componentes do sensor

Os principais elementos que compõe o sensor de posição angular são o ímã permanente toroidal e o sensor hall analógico linear.

3.1.1. Definição do Sensor de Efeito Hall:

Foi escolhido um sensor hall de baixo custo e que atendesse tecnicamente as especificações necessárias para o desenvolvimento do sensor, as quais são:

- Tensão de alimentação: 5VDC (alimentar pela porta USB);
- Encapsulamento PTH (para facilitar prototipagem);
- Saída linear com a variação da densidade de fluxo magnético;
- Custo máximo US\$ 1,00;

O item que atendeu as especificações foi o A1302 da Allegro MicroSystems o qual apresenta as seguintes características [9]:

- Tensão de alimentação: 4,5 a 6VDC;
- Encapsulamento: 3pin SIP;
- Sensibilidade: 1,3mV/G;
- Linearidade: $\pm 2,5\%$;
- Preço (www.digikey.com em 30/08/2011): US\$ 0,546;

3.1.2. Definição do Ímã Permanente:

Como se trata de um sensor angular, a geometria mais conveniente do ímã é a toroidal, tendo seus pólos magnetizados diametralmente como mostra a Figura 3-2:

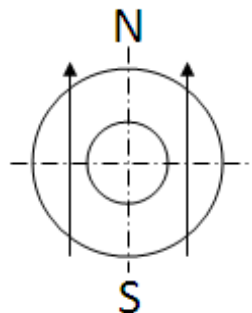


Figura 3-2 - Ímã Permanente Toroidal

Além da geometria, conhecendo a sensibilidade do sensor de efeito hall, foi determinada a intensidade de campo magnético gerado pelo ímã em seu centro geométrico (onde o sensor é posicionado), a qual deve ser suficiente para que ao girar o ímã em seu próprio eixo, o sensor varie o sinal de saída linearmente com o ângulo de deslocamento do ímã.

3.2. Comprovação do Comportamento do Ímã pelo Método dos Elementos Finitos:

Foi realizada uma simulação com o software femm 4.2 (finite element magnetics method 4.2) com o intuito de analisar o comportamento das linhas de fluxo do ímã mostrado no item 3.1.2.

A Figura 3-3 mostra a geometria do ímã e os materiais envolvidos na simulação e a malha gerada pelo femm 4.2 para aplicar os cálculos e então possibilitar a análise do comportamento magnético do ímã. O resultado da análise será mostrado no capítulo 4.

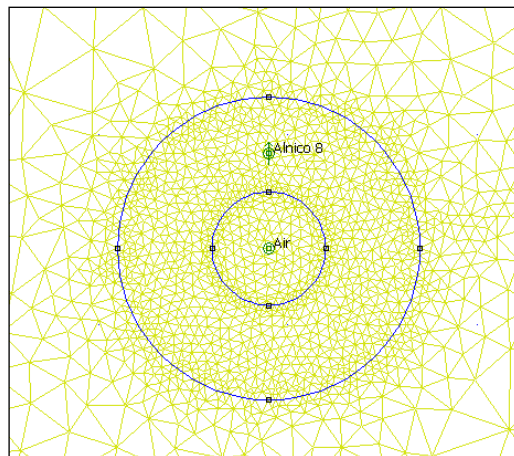


Figura 3-3 - Análise de elementos finitos do Ímã do sensor

3.3. Projeto e Montagem do Dispositivo de Testes

Foi projetada uma peça utilizando o software SolidWorks que possibilitasse a montagem de um ímã em um dispositivo para testes de linearidade e faixa de trabalho do sensor. Esta peça foi fabricada em nylon pela GUC Usinagens em Guaíba/RS, com um custo de R\$ 20,00. A Figura 3-4 mostra a peça projetada.

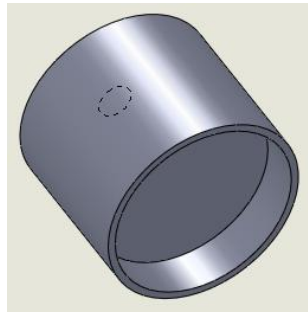


Figura 3-4 - Peça para dispositivo de teste

As demais partes do dispositivo foram montadas conforme mostra a Figura 3-5:

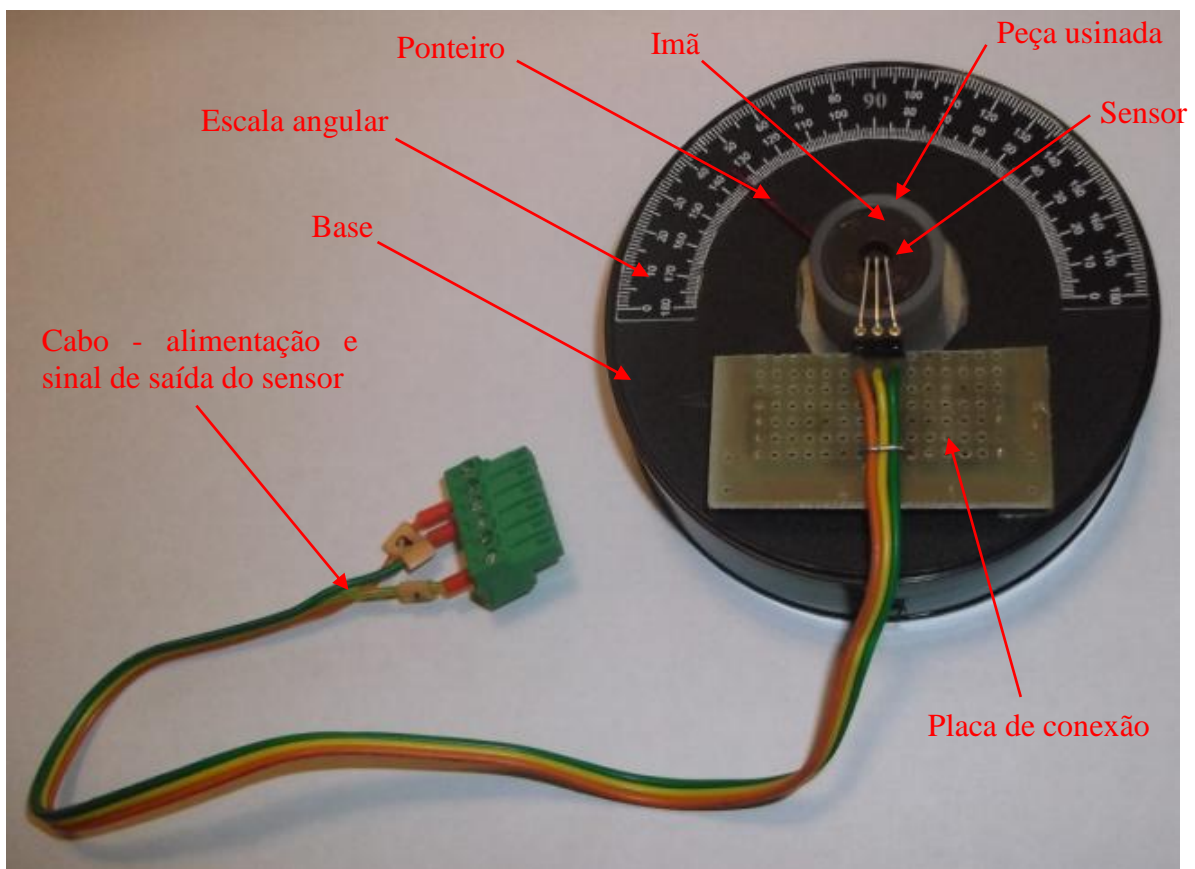


Figura 3-5 - Dispositivo para teste do sensor

Este dispositivo foi utilizado exclusivamente para teste de conceito do sensor angular, porém para levantar de fato as características do sensor, foi criado outro dispositivo, utilizando um transferidor de desenho com erro conhecido.

3.4. Caracterização do Sensor

Para caracterização do sensor, foi construído, um novo dispositivo com uma referência metrológica, ou seja, um transferidor de desenhos com erro de $0,1^\circ$ aferido por um projetor de ângulos (fotos do processo de aferição no Apêndice-D). Na Figura 3-6 - Dispositivo com referência metrológica pode ser visto o novo dispositivo:

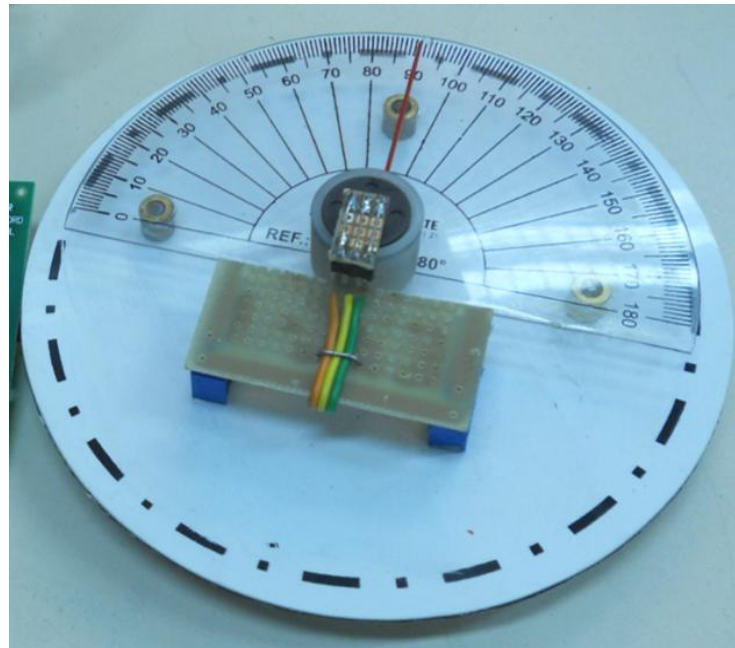


Figura 3-6 - Dispositivo com referência metrológica

A construção do novo dispositivo possibilitou o levantamento das características do sensor: Linearidade, Repetibilidade, Histerese e Erro.

Para isso, o sensor foi conectado na placa de aquisição e o seu sinal de saída foi lido com um multímetro digital da marca Minipa, modelo ET-1110 DMM.

Os resultados das leituras foram inseridos em uma planilha eletrônica (Microsoft Excel) e então traçado um gráfico de dispersão que será visto mais adiante no capítulo 4.

3.5. Definição da Comunicação Sensor – PC

Os dados de ângulo lidos pelo sensor são digitalizados pelo conversor A/D interno do microcontrolador e enviados pela UART do mesmo. Os dados transmitidos por este periférico são lidos pelo PC através de um conversor Serial – USB. Este conversor é composto basicamente pelo chip FT232R da FTDI. A comunicação é unidirecional, ou seja, o PC

apenas recebe dados. A taxa de transmissão (baud rate) é de 9600bps, 8 bits de dados, 1 stop bit e sem paridade. A Figura 3-7 mostra o diagrama de blocos do chip conversor Serial – USB [8]:

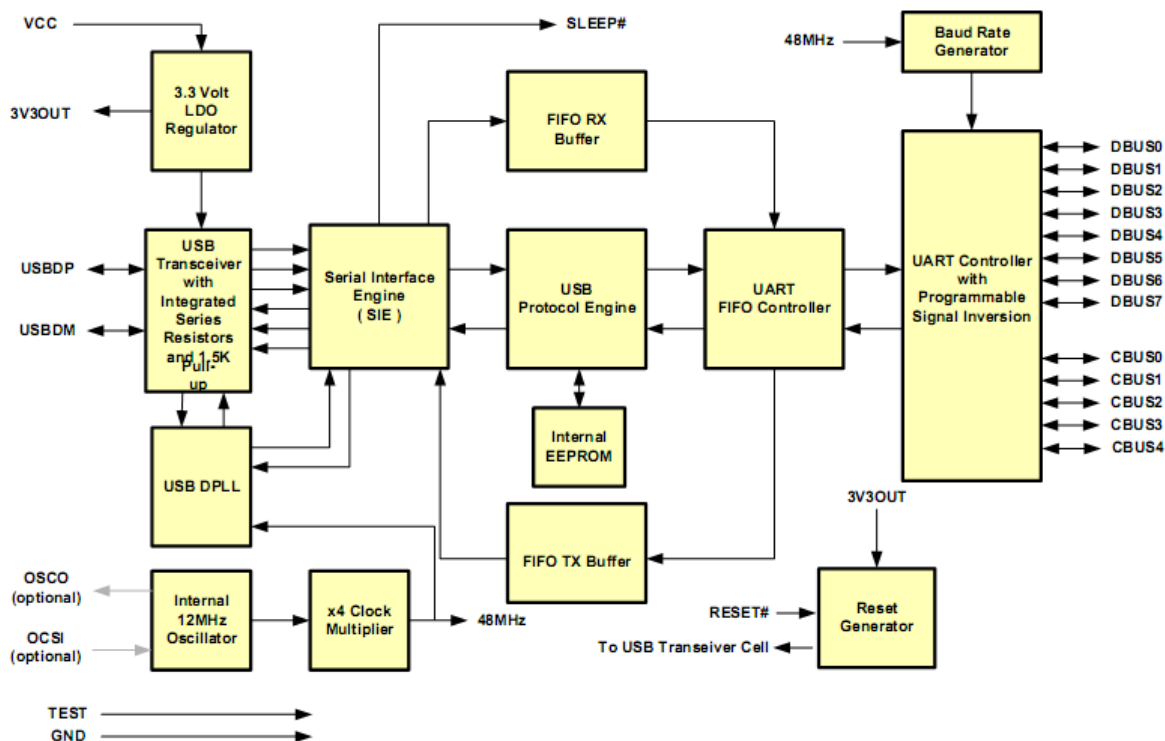


Figura 3-7 - Diagrama de blocos - FT232R

3.6. Fonte de Alimentação

O fato de que os circuitos eletrônicos envolvidos no projeto necessitam alimentação de 5V_{DC} e como a interface Sensor - PC descrita no item 3.5 utiliza a porta USB do PC, possibilitou o uso da própria porta como fonte de alimentação para todos os circuitos, inclusive o sensor angular. O diagrama da Figura 3-8 mostra como se dá a distribuição da alimentação entre os circuitos:

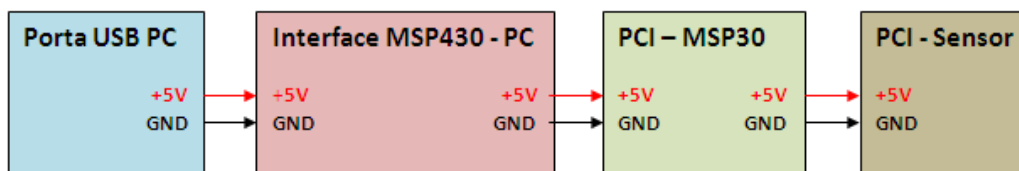


Figura 3-8 - Distribuição da alimentação de 5VDC

3.7. Definição do Microcontrolador, Projeto e Montagem do Circuito.

O microcontrolador escolhido foi o MSP430F235 da Texas Instruments. Na definição do uso deste microcontrolador, foram levados em conta os seguintes dados necessários para o projeto [3] [6]:

- Conversor A/D interno de 12bits;
- UART;
- Baixo consumo (será alimentado pela porta USB);
- Disponibilidade de ferramentas de programação e emulação;
- PCIs disponíveis para montagem do circuito;

O diagrama de blocos deste microcontrolador é novamente mostrado na figura 3-9. Os periféricos utilizados foram destacados para dar uma idéia do nível de utilização do microcontrolador para esta aplicação.

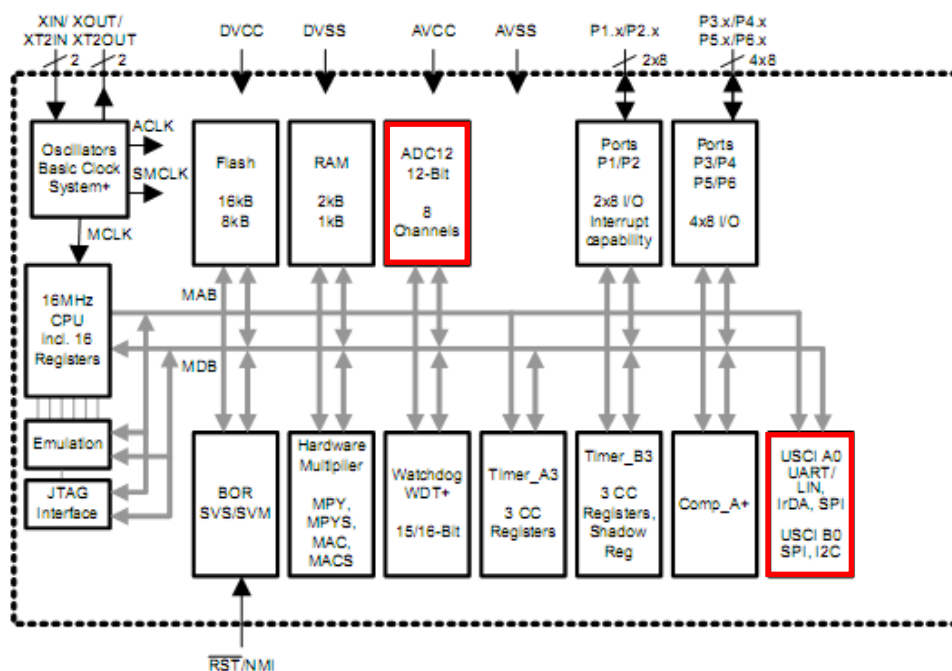


Figura 3-9 - Diagrama de blocos do MSP430F235

O diagrama esquemático (ver Apêndice A) do circuito foi definido de acordo com as necessidades do projeto, tendo como características principais um regulador de tensão de $3V_{DC}$ para alimentar o microcontrolador a partir da porta USB e um circuito condicionador para o sinal de saída do sensor hall.

O firmware do MSP430 foi desenvolvido em linguagem C utilizando a ferramenta de desenvolvimento IAR Embedded Workbench for MSP430 e seu funcionamento pode ser entendido através do fluxograma da Figura 3-10:

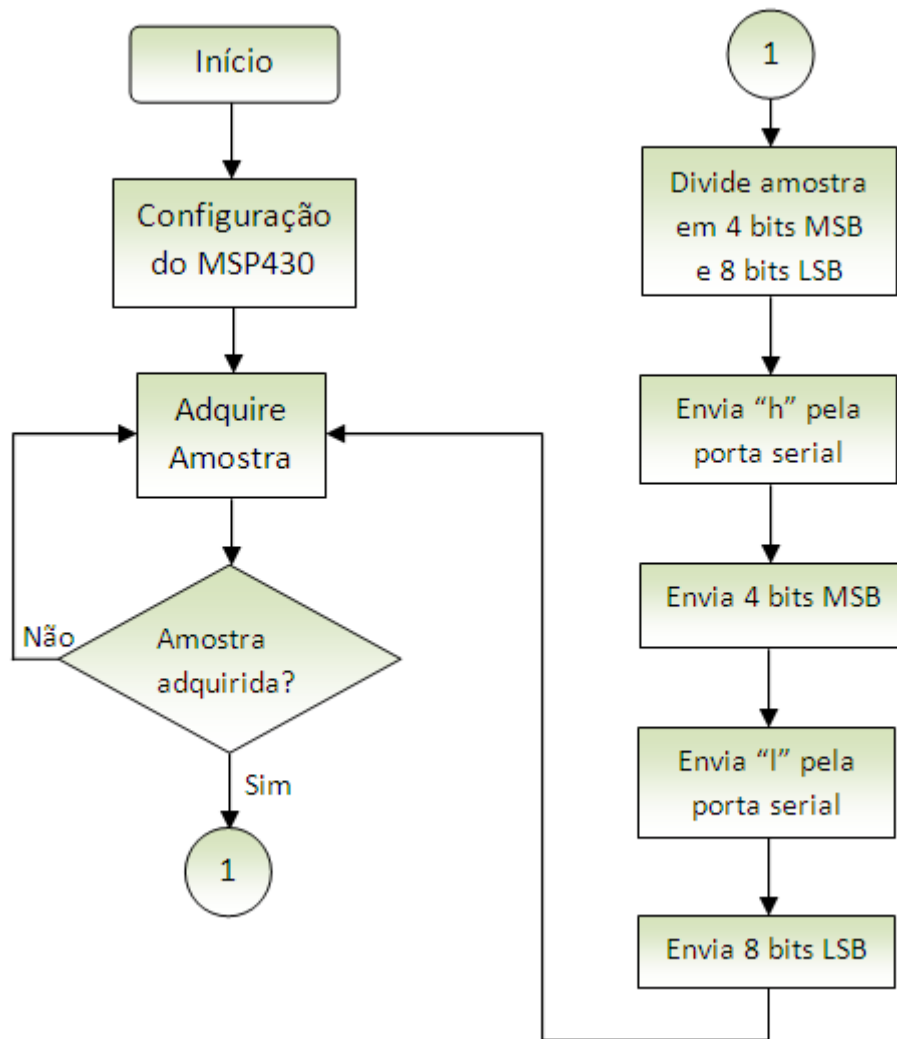


Figura 3-10 - Fluxograma Firmware MSP430

A PCI utilizada foi cedida gentilmente pela empresa Elster medição de energia Ltda. Tem como característica ser dupla face e utilizar componentes SMD, como mostra a Figura 3-11:

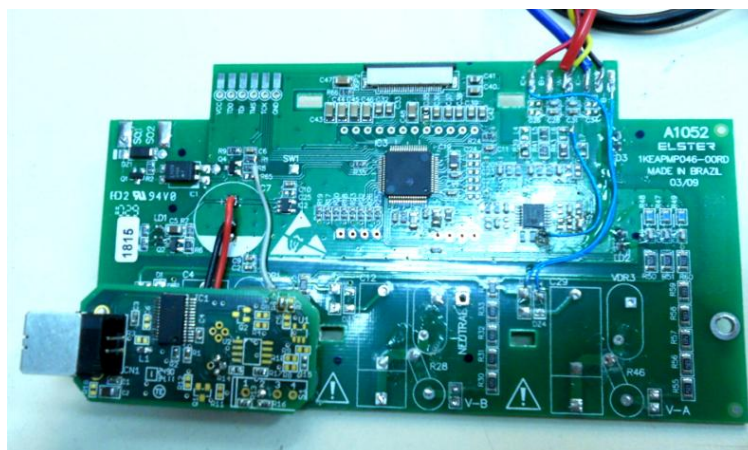


Figura 3-11 - PCI com MSP430

3.8. Desenvolvimento da Interface Gráfica no PC.

Para desenvolvimento da interface, foi utilizada a linguagem de programação LabView, a qual trata-se de uma linguagem gráfica para rápido e avançado desenvolvimento de aplicações para PC e sistemas embarcados.

A linguagem LabView, a exemplo das linguagens orientadas a objeto (C++, Java, etc), possui dois ambientes de desenvolvimento. São eles o painel frontal e o diagrama de blocos. Ao inserir um item no painel frontal, por exemplo, um gráfico XY, este item automaticamente fica disponível no diagrama de blocos para que seja utilizado na lógica do programa [4].

O funcionamento do software da interface, basicamente resume-se às seguintes etapas:

- Receber pela USB dois pacotes com 8 bits de dados cada e dois bytes indicadores de MSB e LSB;
- Reconhecer os 4 bits mais e os 8 bits menos significativos referentes a amostra do A/D de 12bits;
- Fazer a média de dez amostras;
- Linearizar a curva do sensor hall através de quatro faixas de ganho distintas;
- Transformar níveis de A/D em valor de ângulo do sensor hall;
- Mostrar ângulo no indicador e gráfico na tela;

O diagrama de blocos é apresentado em detalhes no Apêndice C deste trabalho.

O painel frontal da aplicação deste trabalho ficou como mostra a Figura 3-12:

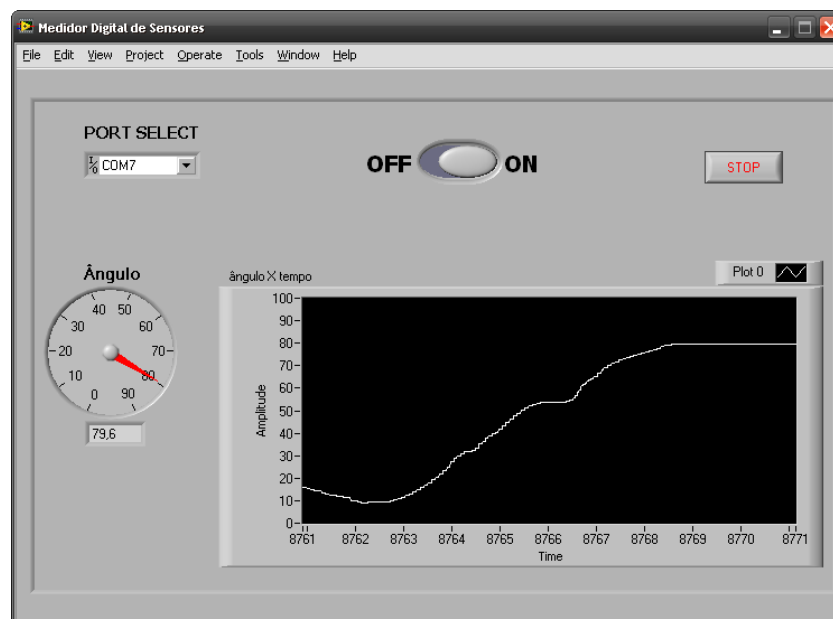


Figura 3-12 - Painel frontal da interface em LabView

3.9. Circuito Condicionador e Filtro

Para adequar o sinal do sensor à entrada do conversor A/D do microcontrolador MSP430, que foi configurada para trabalhar de 0 a 2,5V, foi projetado e montado um circuito subtrator, utilizando o amplificador operacional LMV721 como mostra a Figura 3-13:

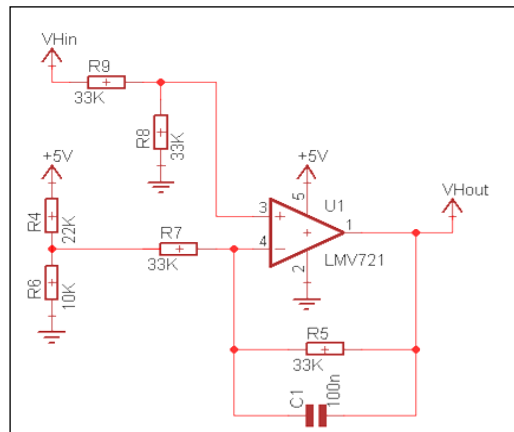


Figura 3-13 - Circuito subtrator e filtro

Como as tensões de saída do sensor montado no dispositivo, considerando a faixa de 0 a 90° foram de 1,62 a 3,38V, foi projetado um circuito que subtrai 1,56V do sinal do sensor, transformando assim sua faixa de trabalho para 0,06 a 1,82V. O cálculo do divisor resistivo para gerar 1,56V é mostrado na

Equação 3-1 [2]:

Equação 3-1 – Divisor resistivo do circuito subtrator

$$V_o = \frac{V_{in} * R_6}{R_4 + R_6} = \frac{5V * 10k\Omega}{22k\Omega + 10k\Omega} = 1,56V$$

Além de subtrator, este circuito ainda funciona como filtro ativo passa baixas de primeira ordem, para que ruídos de frequências indesejadas sejam atenuados. Como os dispositivos que realizam movimentos angulares em geral não apresentam movimentos oscilatórios de alta frequência, o filtro foi dimensionado para uma frequência de corte de 48Hz, como mostra a Equação 3-2:

Equação 3-2 – Frequência de corte do filtro passa-baixas

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R_2 * C} = \frac{1}{2 * \pi * 33k\Omega * 100nf} = 48,23Hz$$



3.10. Linearização da Curva do Sensor

Este tópico foi criado, independentemente do item 3.8 (desenvolvimento da interface gráfica), com o intuito de dar ênfase a uma importante etapa do projeto, que se mostrou necessária, após o resultado do teste de linearidade do sensor, que será visto no item 4.2.

Como o propósito inicial do projeto, era que o sensor tivesse uma faixa de trabalho de pelo menos 90° e como a resposta do sensor hall em conjunto com o ímã permanente disponível não foi linear em toda esta faixa, no software da interface gráfica foi implementada uma linearização do sinal, através da divisão da faixa de 90° em quatro partes, sendo elas: 0° a 15°, 15° a 30°, 30° a 70° e 70° a 90°.

Para implementar essa linearização, foram lidos os valores de A/D para cada posição de interesse do sensor. Além disso, para cada troca de faixa, foi estabelecido um grau de histerese, com o intuito de não provocar trocas indesejadas de faixa na região de transição. Por exemplo: faixa 1 para 2 em 15°. Faixa 2 para 1 em 14°.

3.11. Projeto de Modelo de Produto do Sensor Angular

Utilizando o software SolidWorks, foi projetado um modelo do sensor, o qual deve servir como conceito de um possível produto. Além disso, o projeto foi pensado com a utilização de peças plásticas por questão de custo e por não interferir no campo magnético do sensor. Foi utilizado um rolamento de esferas para mínima resistência ao movimento.

A Figura 3-14 mostra o modelo 3D do sensor e a Figura 3-15 sua vista explodida para visualização de todos os seus componentes:

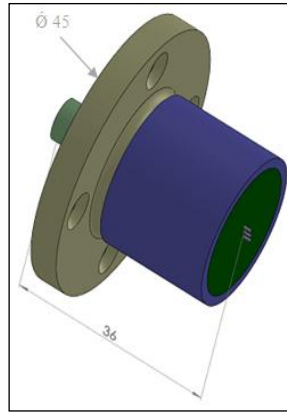


Figura 3-14 - Modelo 3D do sensor

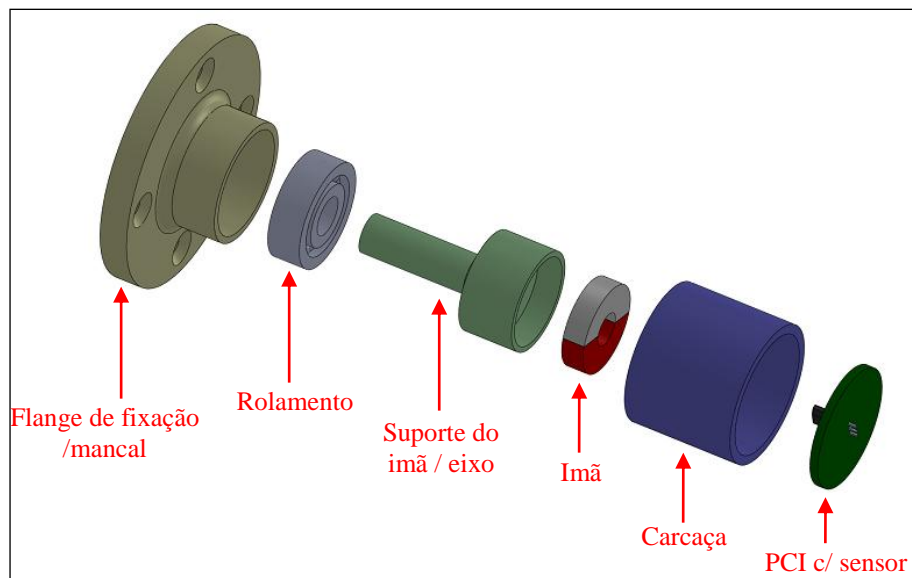


Figura 3-15 - Vista Explodida do sensor

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Algumas das etapas descritas no capítulo 3 demandaram simulações e testes práticos, os quais são descritos neste capítulo, sendo abordada a metodologia aplicada bem como os resultados obtidos em cada procedimento.

4.1. Comportamento do Imã Pelo Método dos Elementos Finitos

Utilizando o software femm 4.2 (*Finite Element Magnetic Method*), foi desenhada a geometria do imã respeitando suas dimensões reais. Foram definidos os materiais envolvidos na simulação, neste caso o ar e o material “Ima TCC2” que foi criado a partir dos dados de datasheet do imã utilizado. Além disto, foram definidas as condições de fronteira que é determinada pelo retângulo externo visto na Figura 4-1:

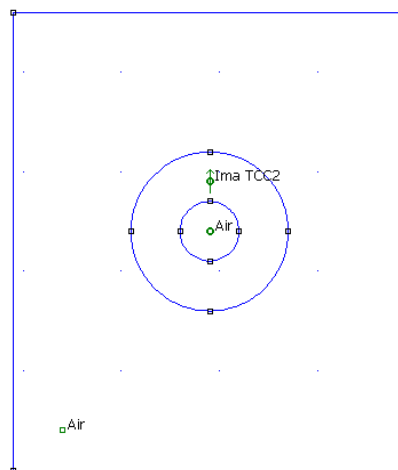


Figura 4-1 Geometria e materiais no software Femm 4.2

Definida a geometria, os materiais, as condições de fronteira e o tipo de problema que neste caso é magnético planar, foi utilizada a função solve do Femm 4.2, que gera a malha de elementos finitos para aplicar os cálculos desejados (neste caso, densidade de campo magnético no centro do imã) e visualizar o comportamento das linhas de fluxo do campo magnético. A malha gerada é mostrada na Figura 3-3 no capítulo anterior.

Com a malha gerada sem erros, foi utilizada a função view results do Femm 4.2 e então selecionado para mostrar as linhas de fluxo e a densidade de fluxo magnético resultantes dos cálculos realizados pelo software. As linhas de fluxo são representadas pelas curvas em cor preta na Figura 4-2. Nesta mesma figura, a densidade de fluxo é representada em escala de cores, a qual possui uma legenda de valores em Tesla vista no lado direito da figura:

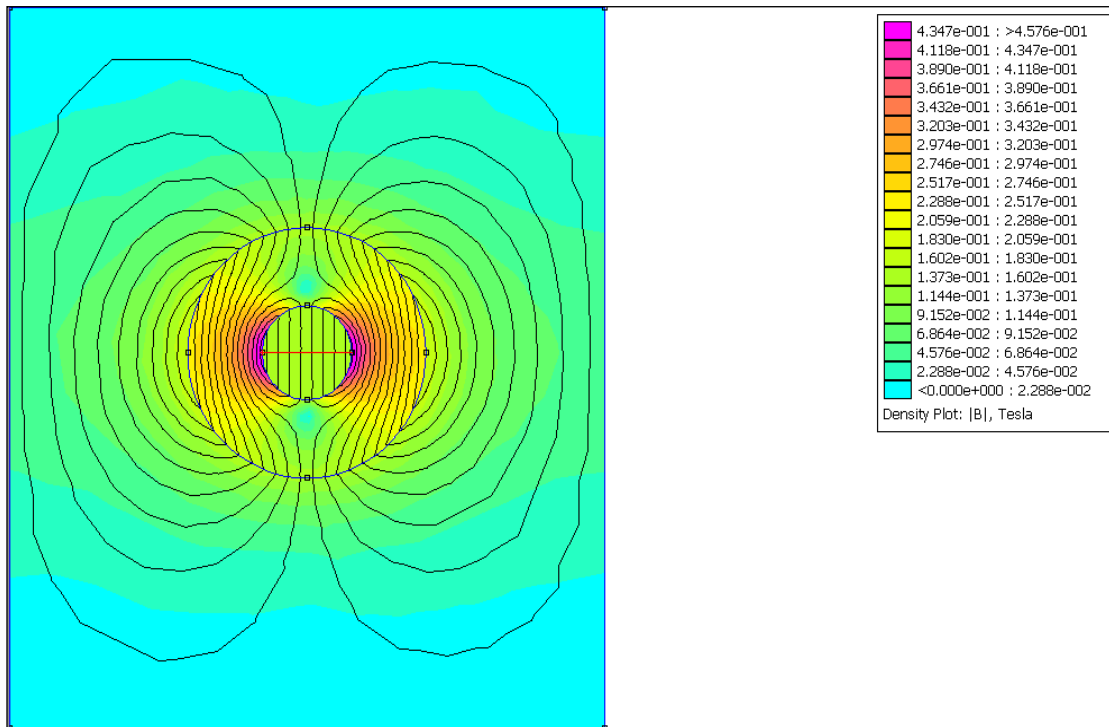


Figura 4-2 Linhas de fluxo e densidade de fluxo magnético do imã permanente

O Femm 4.2 ainda oferece o recurso de traçar gráficos de uma determinada grandeza em uma área ou contorno de interesse. Neste caso, foi traçada uma linha (vermelha) no centro do imã, como pode ser visto na Figura 4-2, e traçado um gráfico de densidade de fluxo magnético sob todo o comprimento da linha, como mostra a Figura 4-3. De posse deste gráfico, é possível observar que na região central do imã, a densidade de fluxo é da ordem de 0,16T que corresponde a 1600G.

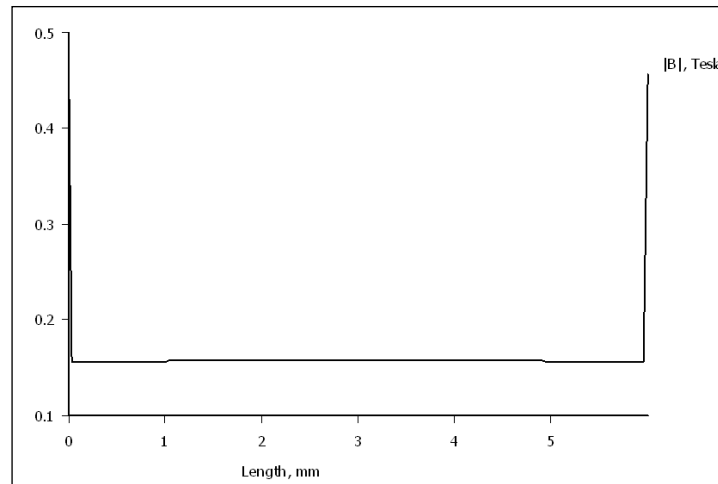


Figura 4-3 - Distribuição da densidade de fluxo magnético no centro do ímã

Sabendo que a sensibilidade do sensor hall é de 1,3mV/G e que a máxima densidade de fluxo no centro do ímã é 1600G, foi possível calcular a variação do sinal de saída do sensor para as condições extremas que são: Linhas de fluxo perpendiculares, com o pólo norte do ímã na direção frontal do elemento sensor e o outro extremo, com o pólo sul nesta orientação. Para ambos os casos a variação é a mesma, porém com polaridade inversa. A Equação 4-1 mostra o cálculo da variação:

Equação 4-1 – Variação máxima do sinal de saída do sensor

$$V = B_{m\acute{a}x} * Sens = 1600 * 1,3 * 10^{-3} = 2,08V$$

Onde:

V: Variação do sinal de saída do sensor [V];

$B_{m\acute{a}x}$: Densidade de campo máxima [G];

Sens: Sensibilidade do sensor hall [mV/G];

Com o cálculo da variação, chegou-se a conclusão de que o ímã está bem dimensionado para a aplicação, pois, a faixa do sinal de saída do sensor é de 0,2 a 4,7V, tendo seu offset em 2,5V. Acrescentando a variação ao offset (pólo norte sobre o sensor) e subtraindo a mesma (pólo sul sobre o sensor) obteve-se a seguinte faixa para 360° de giro do sensor: 0,42 a 4,58V. Porém na etapa seguinte do projeto é visto que há limitações quanto à linearidade do sensor angular, o que levou a faixa de trabalho do sensor a ser de apenas 90°.

4.2. Teste de Conceito do Sensor Angular Utilizando o Dispositivo de Testes

Utilizando o dispositivo de testes, foi possível levantar a curva Sinal de saída X ângulo do sensor angular.

Uma primeira curva foi coletada, para verificar a faixa de resposta linear do sensor angular. Foram coletados com o uso de um multímetro digital, os valores de tensão do sinal de saída do sensor angular, para cada 5° graus de deslocamento do ponteiro do dispositivo. A figura 4-4 mostra os equipamentos envolvidos neste teste:



Figura 4-4 - Teste de conceito do sensor angular

No gráfico da figura 4-4, é possível observar que o sensor reproduz um comportamento bem próximo a linear de 30 a 70°, ou seja, faixa linear menor que 90°. Para obter 90° de faixa de trabalho, a curva foi linearizada no software da interface gráfica. Este procedimento foi descrito no item 3.10.

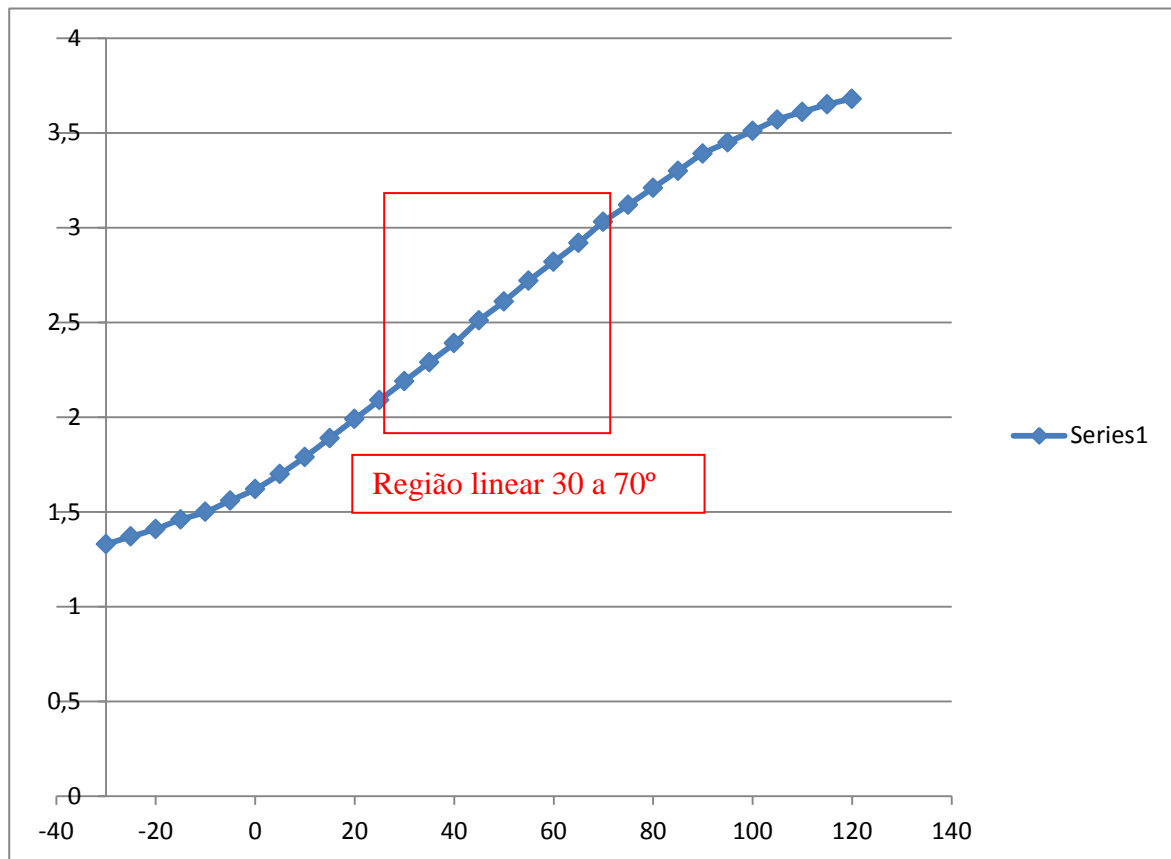


Figura 4-5 - Gráfico Sinal de saída X ângulo

4.3. Caracterização do Sensor:

Utilizando o dispositivo com referência metrológica, foram levantadas as principais características do sensor: Linearidade, Repetibilidade, Histerese e Erro. A primeira característica foi determinada medindo o sinal de saída do sensor com um multímetro digital, pois se trata de uma característica que depende somente das propriedades intrínsecas do sensor hall em conjunto com o ímã permanente. Já as demais, foram levantadas a partir da interface gráfica, levando em conta todo o sistema de aquisição do sinal.

4.3.1. Linearidade

Primeiramente, foi levantada a resposta do sensor na faixa de -20° a 110° com o intuito de verificar a faixa linear do mesmo. No gráfico da Figura 4-6 - Resposta do sensor de -20° a 110° Figura 4-6, é vista a curva do sensor real sobre uma curva linear média [5]:

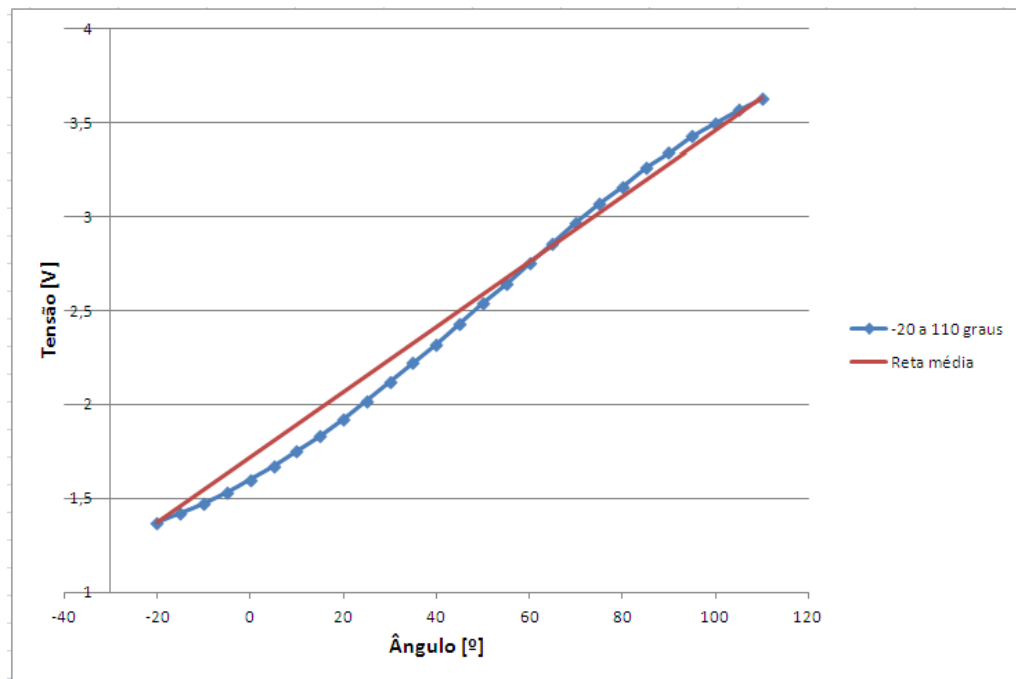


Figura 4-6 - Resposta do sensor de -20° a 110°

Através da Equação 4-2 foi calculada a não linearidade do sensor sobre um fundo de escala de 130°:

Equação 4-2 – Cálculo da não linearidade do sensor para fundo de escala = 130°

$$\text{Não Linearidade [\%]} = \pm 100 \cdot \text{Difmax} / \text{FSs}$$

Onde:

Difmax = Diferença máxima em V, entre curva real e reta média.

FSs = Fundo de escala do sensor em V.

Neste caso:

Difmax = 0,149V no ângulo de 15°

FSs = 2,262V

Portanto:

Não Linearidade = 6,59%

Como o objetivo inicial é que o sensor tenha faixa de trabalho = 90°, considerou-se apenas esta faixa, como pode ser visto na figura 4-7:

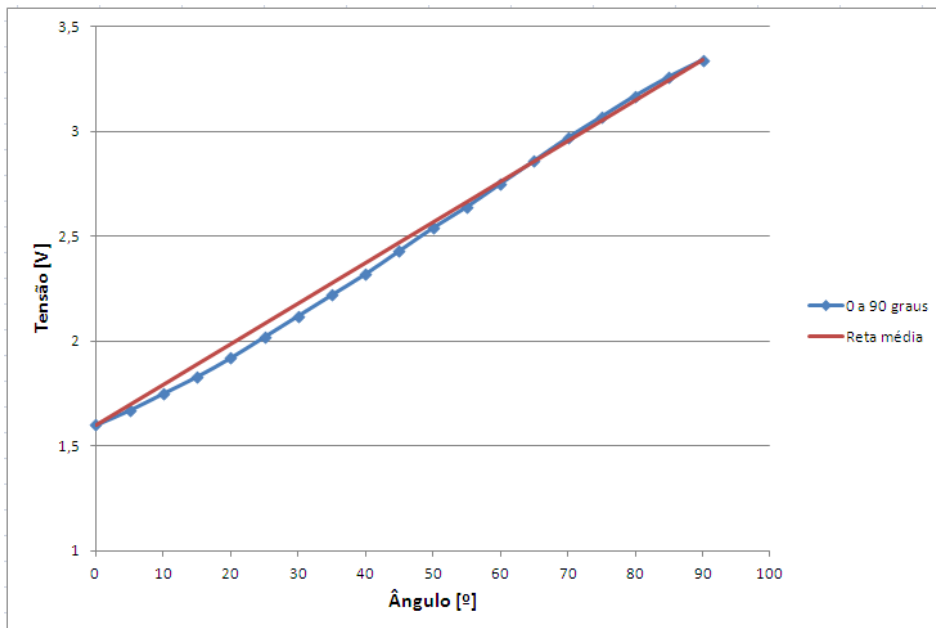


Figura 4-7 Resposta do sensor de 0° a 90°

Novamente aplicando a Equação 4-2, obteve-se a não linearidade do sensor para a faixa de 90°:

Neste caso:

$$\begin{aligned} \text{Difmax} &= 0,067\text{V no } \hat{\text{a}}\text{ngulo de } 20^\circ \\ \text{FSs} &= 1,74\text{V} \end{aligned}$$

Portanto:

$$\text{N}\hat{\text{a}}\text{o Linearidade} = 3,83\%$$

4.3.2. Repetibilidade

Para o levantamento da repetibilidade, foram coletadas cinco curvas de valores exibidos pela interface gráfrica para toda a faixa do sensor, sendo estes valores obtidos a cada 5° de deslocamento do ponteiro do dispositivo e ent\c3o foi calculada uma m\c3dia das cinco curvas. A Tabela 4-1 mostra os valores coletados [5]:

Tabela 4-1 - Valores de \c3ngulo obtidos atrav\c3s da interface gráfrica

Padr\c3o	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 4	Curva 5	m\c3dia
0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
5	4,9	5	4,9	5,1	5	4,98
10	9,8	9,8	9,8	9,9	9,8	9,82
15	15	15	15	15	15	15
20	20	20	20	20	20	20
25	24,8	24,8	24,9	24,9	24,9	24,86
30	29,9	29,9	30,1	30	30,1	30



35	35	35	35	35	34,9	34,98
40	40	39,9	39,9	39,9	39,9	39,92
45	44,9	44,9	44,9	44,9	45	44,92
50	49,9	50	50	50	50	49,98
55	55	55	55,1	55	55	55,02
60	60	60	60,1	60,1	60	60,04
65	65,1	65,1	65	65	64,9	65,02
70	70	70	70	69,9	69,9	69,96
75	75,1	75,1	75	74,9	74,9	75
80	80,1	80,1	80,1	80	80	80,06
85	85,1	85,1	85	85	85	85,04
90	89,8	89,8	89,8	89,8	89,8	89,8

Através da Equação 4-3 foi calculada a repetibilidade do sistema:

Equação 4-3 – Cálculo da repetibilidade do sistema

$$\text{Repetibilidade \%} = \pm 100. \Delta y_{\max} / FS_s \%$$

Onde:

Δy_{\max} = Diferença máxima em $^{\circ}$, entre curvas reais e curva média.

FS_s = Fundo de escala do sensor em $^{\circ}$.

Neste caso:

$$\Delta y_{\max} = 0,12^{\circ}$$

$$FS_s = 90^{\circ}$$

Portanto:

$$\text{Repetibilidade} = 0,13\%$$

4.3.3. Histerese

Para obtenção da histerese do sistema, foram coletadas mais cinco curvas, porém iniciando o deslocamento em 90° e terminando em 0° , com o mesmo deslocamento de 5° . Foi calculada a média ponto a ponto para estas cinco curvas assim como para as curvas da Tabela 4-1 e então traçado um gráfico de dispersão para as curvas médias, como mostra a Figura 4-8:

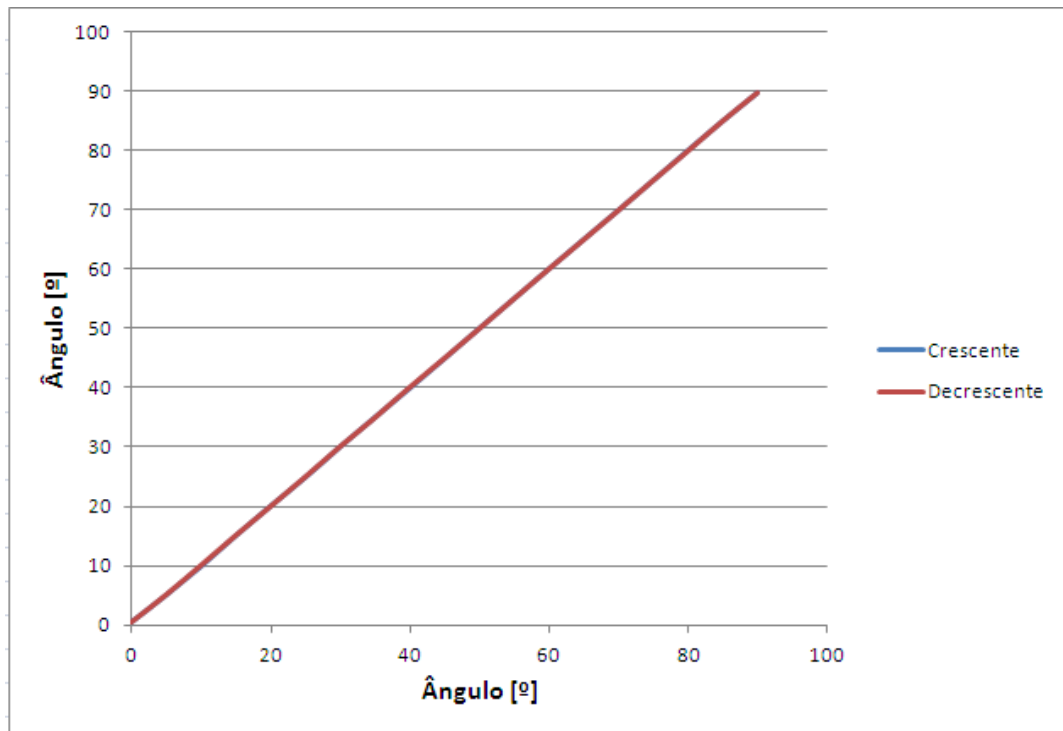


Figura 4-8 - Histerese do sistema

Com o gráfico da Figura 4-8, é possível constatar que as curvas “Crescente” e “Decrescente” estão sobrepostas, ou seja, a histerese é praticamente nula.

4.3.4. Erro

Utilizando as curvas levantadas para a obtenção da repetibilidade e a média ponto a ponto das mesmas, foi calculado o erro para cada deslocamento do ponteiro do dispositivo. O erro foi calculado da seguinte forma [5]:

Equação 4-4 – Cálculo do Erro ponto a ponto em relação ao fundo de escala

$$\frac{\text{média} - \text{Padrão}}{90} * 100$$

Com os valores de erro de cada ponto calculados, foi traçado um gráfico de distribuição do erro ao longo da faixa de trabalho do sistema, como mostra a Figura 4-9:

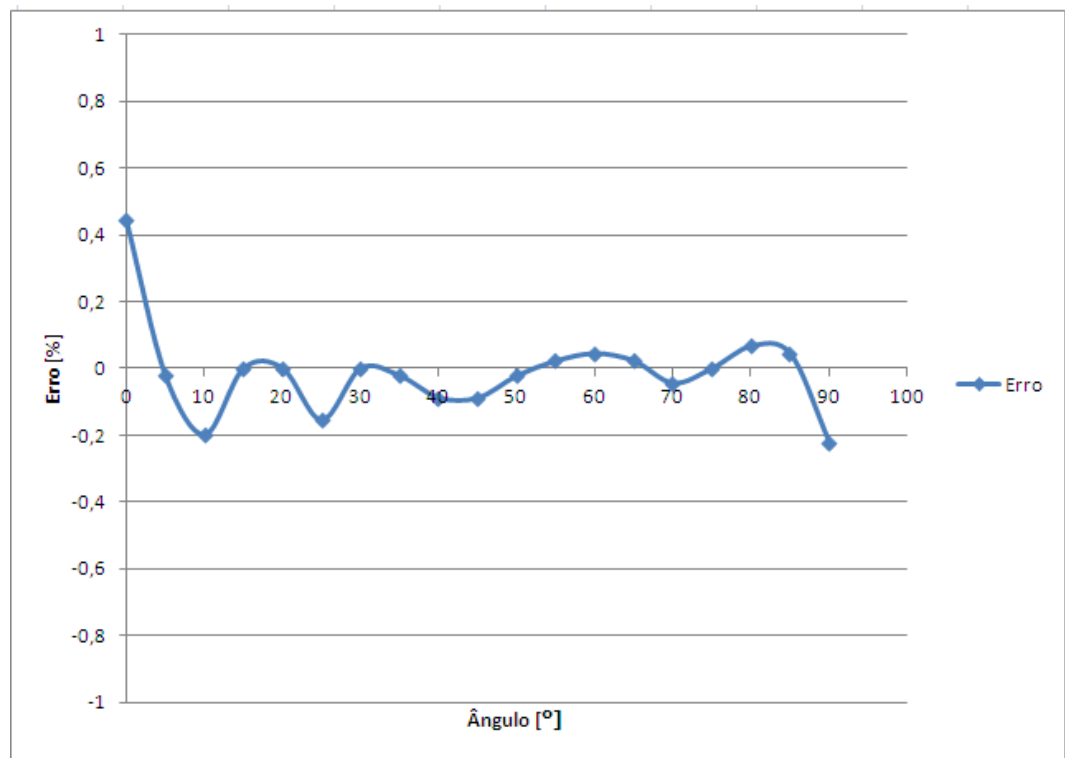


Figura 4-9 - Distribuição do Erro do sistema

Como pode ser visto, o erro permanece menor do que 0,2% em praticamente toda a faixa, excedendo este limite, apenas nos extremos inferior e superior, onde os erros são respectivamente: 0,44% e -0,22%.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal proposta deste trabalho, o desenvolvimento de um novo tipo de sensor angular baseado em efeito hall, foi atingida de forma satisfatória. Com algumas melhorias e testes mais específicos e rigorosos é possível transformar este conceito desenvolvido em uma alternativa de transdutor angular para as mais diversas aplicações existentes no mercado.

Além da proposta principal, o sensor, foi bem sucedida a implementação de um sistema de aquisição dos dados do sensor, a qual proporcionou visualizar de forma clara, os valores de ângulo gerados pelo sensor.

Como esperado, alguns problemas técnicos foram encontrados durante o desenvolvimento do projeto, principalmente devido a características intrínsecas dos materiais utilizados e influência do meio externo, tais como: A não linearidade do conjunto sensor e o acoplamento de ruído no sinal analógico do sensor. Estes problemas foram resolvidos respectivamente, através de tratamento por software e implementação de filtro analógico.

Por se tratar de um protótipo, diversas melhorias podem ser citadas, tais como:

- Testar outro tipo de imã para obter uma faixa linear maior do sensor de forma eliminar a linearização por software.
- Executar a montagem de uma proposta de produto deste sensor, como o exemplo do item 3.11 para possibilitar a aplicação do mesmo.
- Realizar melhorias no circuito condicionador para aproveitar melhor a faixa de trabalho do conversor A/D.
- Implementar um data logger no software da interface.

Este trabalho pode ser amplamente utilizado para trabalhos futuros. Além das melhorias a serem feitas, o sensor pode ser utilizado em aplicações onde movimentos angulares devem ser monitorados, tais como: Anemômetro angular e braços robóticos.



6. REFERÊNCIAS

- [1] chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs6.pdf
- [2] SEDRA, Adel S. Microeletrônica - 5a. Ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [3] PEREIRA, Fábio – Microcontroladores MSP430: Teoria e Prática - 1a. Ed. – São Paulo: Érica, 2005
- [4] REGAZZI, Rogério Dias; PEREIRA, Paulo Sérgio e SILVA JR, Manoel Feliciano – Soluções Práticas de Instrumentação e Automação – Utilizando a Programação Gráfica LabView – Rio de Janeiro: (s.n) , 2005
- [5] BRUSAMARELLO, Valner João; BALBINOT, Alexandre – Instrumentação e Fundamentos de Medidas – Vol.1 – São Paulo: LTC, 2006.
- [6] Texas Instruments, MSP430x2xx family - User's guide, 2011.
- [7] Honeywell, Hall Effect Sensing Application - Manual, 2004.
- [8] FTDI Chip, FT232R – Datasheet, 2010.
- [9] Allegro MicroSystems, A1301 and A1302 – Datasheet, 2005.



OBRAS CONSULTADAS

DEITEL, Harvey; DEITEL, Paul – Como programar em C – 6^a. Ed. – São Paulo: Prentice Hall, 2011.

PERTENCE, Antonio Júnior – Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos – 3^a. Ed. – São Paulo: McGraw-Hill, 1988.



GLOSSÁRIO

Datasheet – Documento fornecido pelo fabricante que contém as especificações técnicas de um determinado item.

Interface – Software para visualização e/ou manipulação de informações.

Nylon – Polímero.

Data logger – Armazenador de dados.

APÊNDICE A – ESQUEMAS ELETRÔNICOS

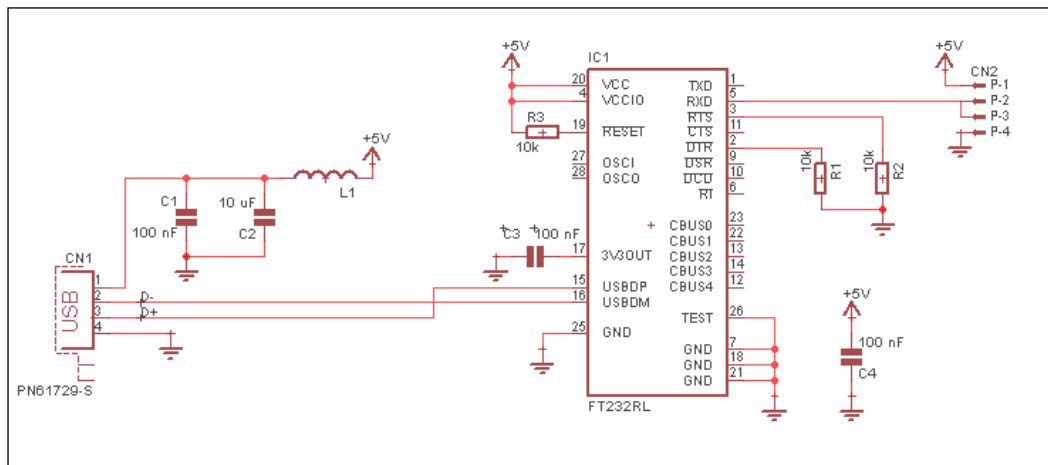


Figura 6-1 – Esquema eletrônico da placa de interface microcontrolador - PC

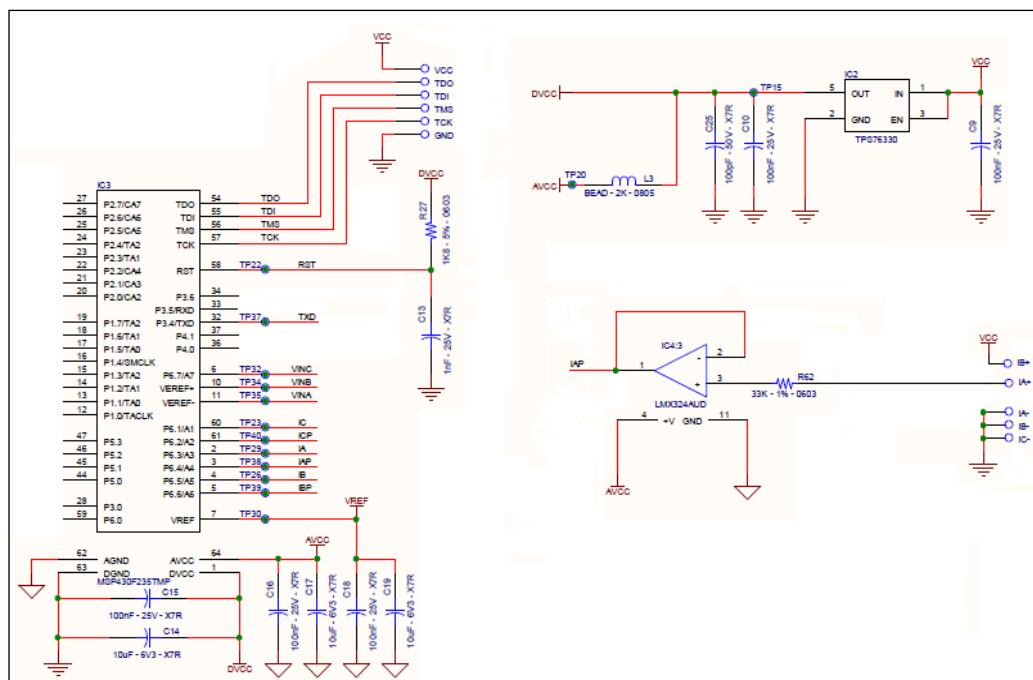


Figura 6-2 - Esquema eletrônico da placa MSP430



APÊNDICE B – FIRMWARE MSP 430

Rotina principal:

```
#include "tccproject.h"
#include "msp430x23x.h"

uint16 hall_result = 0;    //variável que recebe a amostra atual de 12 bits
uint8  hall_result_high = 0;    //variável que recebe 8 bits LSB
uint8  hall_result_low = 0;    //variável que recebe 4 bits MSB
char   high_or_low = '0';    //Indicador de MSB ou LSB

void envia_dado(void);
int main (void);
__interrupt void UsciAB0TX(void);

/*****
// Main loop
*****/
int main( void )
{
    // Para o watchdog para evitar reset por time out
    WDTCTL = WDTPW + WDTHOLD;
    msp430_config();    //configura o microcontrolador

    for(;;)
    {

        hall_result = leitura_hall();    //chama função para aquisição de uma amostra de um canal do AD
        hall_result_high = (hall_result >> 8); //
        high_or_low = 'h';    //identificador dos 4bits MSB
        envia_dado();
        hall_result_low = hall_result;
        //hall_result_low &= 0x3F;    //mascara 6bits LSB 00*****
        high_or_low = 'l';    //identificador dos 6bits LSB
    }
}
```



```
envia_dado();
}
}
void envia_dado(void)
{
    __enable_interrupt();

    UCA0TXBUF = high_or_low;    //transmite identificador 'h' ou 'l'
    IE2 |= UCA0TXIE;          // enable TXinterrupt
    __delay_cycles(100000);

    if (high_or_low == 'l')
    {
        UCA0TXBUF = hall_result_low;    // transmite 8bits LSB do AD
        //UCA0TXBUF = 0x38;
    }
    else
    {
        UCA0TXBUF = hall_result_high;    // transmite 4bits MSB do AD
        //UCA0TXBUF = 0x39;
    }
    IE2 |= UCA0TXIE;          // enable TXinterrupt
    __delay_cycles(100000);
    return;
}

#pragma vector=USCIAB0TX_VECTOR
__interrupt void UsciAB0TX(void)
{
    IE2 &= ~UCA0TXIE;        // disable TXinterrupt
}

```

Rotina de leitura do A/D:

```
#include "msp430x23x.h"
#include "tccproject.h"

/***** configuração fixa do ADC12CTL1 *****/

CSTARTADD = canal 4 - Endereço para conversão;
SHS = ADC12SC - Início da conversão por software, ao setar ADC12SC;
```



SHP = 1 - SAMPCON é fornecido pelo temporizador de amostragem (SHT1x);

ISSH = 0 - Não inverte o sinal para sample hold;

ADC12DIV = 4 - O clock do ADC12 é MCLK/4 (12MHz/4);

ADC12SSEL = MCLK - Seleciona MCLK para clock base para o ADC12;

CONSEQ = 0 - Canal simples e Conversão simples;

ADC12BUSY - bit que indica que AD está ocupado ou não;

*****/

```
const uint16 ad_canal4 = (CSTARTADD_4 + SHP + ADC12DIV1 + ADC12DIV0 +
ADC12SSEL_2);
```

```
unsigned int leitura_hall (void){
```

```
    //Aquisição do sinal do sensor hall
```

```
    ADC12CTL0 &= ~ENC;          // desabilita ADC10
```

```
    ADC12CTL1 = ad_canal4;     //
```

```
    ADC12CTL0 |= ENC + ADC12SC; // Inicia amostragem e conversão
```

```
    while (ADC12CTL1 & ADC12BUSY); // aguarda fim da conversão
```

```
    return ADC12MEM4;
```

```
}
```

Configuração do microcontrolador:

```
<!--
```

```
*****_-->*/
```

```
#include "msp430x23x.h"
```

```
#include "tccproject.h"
```

```
/*
```

```
*****
```

```
*          Vetores de interrupção
```

```
*****
```

```
*****/
```

```
__interrupt void Timer_B1(void);
```

```
__interrupt void Adc10(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_a(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_b(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_d(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_e(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_f(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_g(void);
```

```
__interrupt void Interrupt_h(void);
```



```

/*****
*****/

// Configuração I/O, ADC, clock, timer, variáveis, Interrupt flags, UART
*****/
*****/

void msp430_config(void)
{
    //Ajusta clock do MSP para DCO @ 1Mhz
    BCSCCTL1 = XT2OFF + RSEL2 + RSEL1 + RSEL0;
    DCOCTL = DCO0 + DCO1;
    BCSCCTL2 = DIVS_1;

    // Set Vref[P2.4] = 2.5V
    *****/
    // ADC12CTL0:
    // SREF_1 (select reference): VR+ = VREF+ and VR- = AVSS
    // ADC12SHT_4 (ADC12 sample-and-hold time): 64 x ADC12CLKs
    // REFOUT (reference output): reference output on
    // REF2_5V (reference generator voltage): 2,5V
    // REFON (reference generator): On
    // ADC10ON: ADC10 on
    *****/

    ADC12CTL0 = SHT0_4 + ADC12ON + REFON + REF2_5V; //SHT = 64 ADC12CLK cycles,
    MSC = 0, REF2_5V, REFON = 1, ADC12ON = 1

    ADC12MCTL4 = INCH_4 + SREF0; //ADchannel = 4, VR+ = VREF+, VR- = AVss
    ADC12MCTL10 = INCH_10 + SREF0; //Seleciona sensor de temperatura interno
    ADC12MCTL11 = INCH_11; //seleciona leitura de AVcc, então VR+ = AVcc
    TBCTL = 0; // Desliga timers

    *****/

    // set I/O port - PDIR: in=0 / out=1 ; PSEL: io=0 / especial func = 1
    *****/

    //P1.7 P1.6 P1.5 P1.4 P1.3 P1.2 P1.1 P1.0
    P1DIR = 0xF9; // Out Out Out Out Out In In Out
    P1OUT = 0x0;
    P1SEL = 0x00;

    P2DIR = 0xFE; // In Out Out Out Out Out Out In
    P2OUT = 0x00; //

```




```
P2SEL = 0x00; //

// P3.7 P3.6 P3.5 P3.4 P3.3 P3.2 P3.1 P3.0
P3DIR = 0x9F; // Out in in Out Out Out Out Out
P3OUT = 0x41; // 0 0 - 0 0 0 0 0
P3SEL = 0x30; //

// P4.7 P4.6 P4.5 P4.4 P4.3 P4.2 P4.1 P4.0
P4DIR = 0xFF; // Out Out Out Out Out Out Out Out
P4OUT = 0x00; //
P4SEL = 0x00; //

// P5.7 P5.6 P5.5 P5.4 P5.3 P5.2 P5.1 P5.0
P5DIR = 0xFF; // Out Out Out Out Out Out Out Out
P5OUT = 0x0; //
P5SEL = 0x00; //

// P6.7 P6.6 P6.5 P6.4 P6.3 P6.2 P6.1 P6.0
P6DIR = 0x01; //
P6OUT = 0x01; //
P6SEL = 0xFE; //

//*****
// Configuração da UART
//*****
//Parity disabled, LSB first, 8-bit data, One stop bit, Asynchronous mode
UCA0CTL0 = 0;
UCA0CTL1 |= UCSWRST; // Set SW Reset
UCA0CTL1 = UCSSEL_2 + UCSWRST; // Use SMCLK, keep SW reset
UCA0MCTL = 0; //Modulation Control
UCA0BR0 = 0X71; //9600 at 12MHz/2 (lo)
UCA0BR1 = 2; //9600 at 12MHz/2 (hi)
UCA0IRTCTL = 0; //does not enable the irda decoder
UCA0CTL1 &= ~UCSWRST; //state m/c start

__delay_cycles(1800000);

// Clock @ 12Mhz
BCSCTL1 = 0x8E;
DCOCTL = 0x8D;
BCSCTL2 = DIVS_1;
```



```
}

/*****
* Vetores de interrupção(offset 0xFFE0)
*****/

// 0xFFE4 Port 1
#pragma vector = PORT1_VECTOR
__interrupt void Interrupt_a(void)
{
}

// 0xFFE6 Port 2
#pragma vector = PORT2_VECTOR
__interrupt void Interrupt_b(void)
{
}

// 0xFFEA ADC10
#pragma vector = ADC12_VECTOR
__interrupt void Adc10(void)
{
}

// 0xFFEE USCI A0/B0 Receive
#pragma vector = USCIAB0RX_VECTOR
__interrupt void Interrupt_d(void)
{
}

// 0xFFFF0 Timer A CC1-2, TA
#pragma vector = TIMERA1_VECTOR
__interrupt void Interrupt_e(void)
{
}

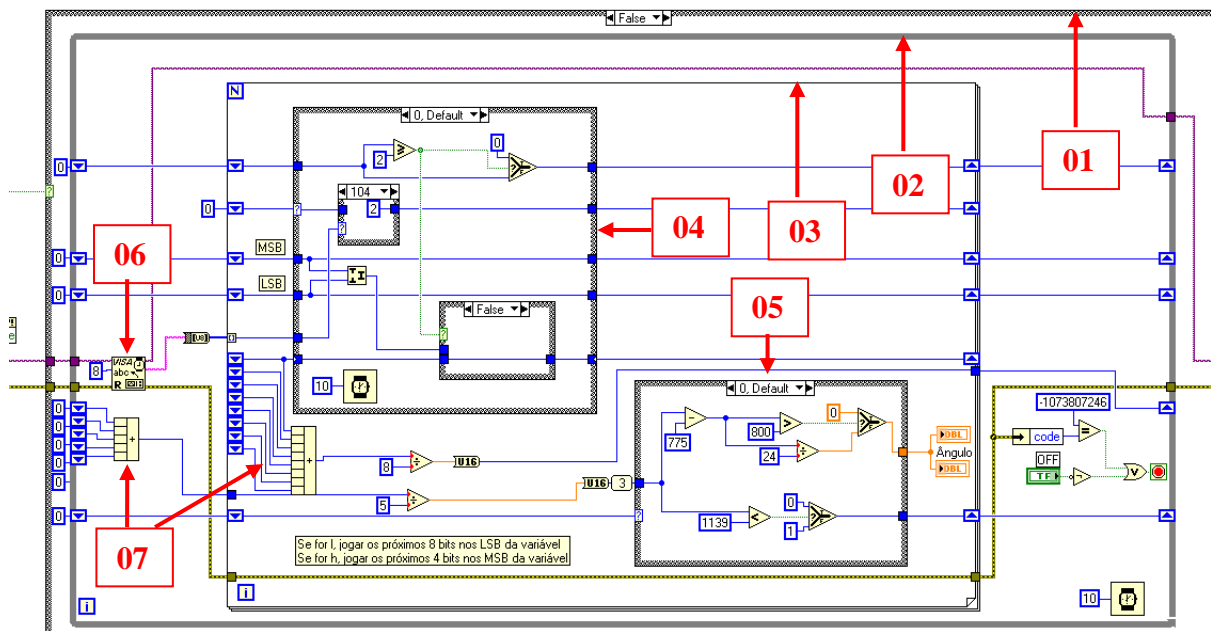
// 0xFFFF4 Watchdog Timer
#pragma vector = WDT_VECTOR
__interrupt void Interrupt_g(void)
{
}
```



```
#pragma vector = TIMERB1_VECTOR
__interrupt void Timer_B1(void)
{
}

// 0xFFFC Non-maskable (NMI)
#pragma vector = NMI_VECTOR
__interrupt void Interrupt_h(void)
{
}
```


- Loop Principal:



- Descrição dos itens numerados:

01 – Loop Case. Se a porta COM foi selecionada corretamente pelo usuário e chave estiver em ON, executa o programa, senão, exibe uma mensagem para selecionar porta correta.

02 - Loop while. Executa enquanto não houver erro no programa e chave na posição ON.

03 – Loop For. Executa de acordo com o número de bytes recebidos pela porta serial

04 – Loop Case. Executa máquina de estados para detecção dos 4 bits mais significativos e 8 bits menos significativos e remonta a amostra de 12 bits.

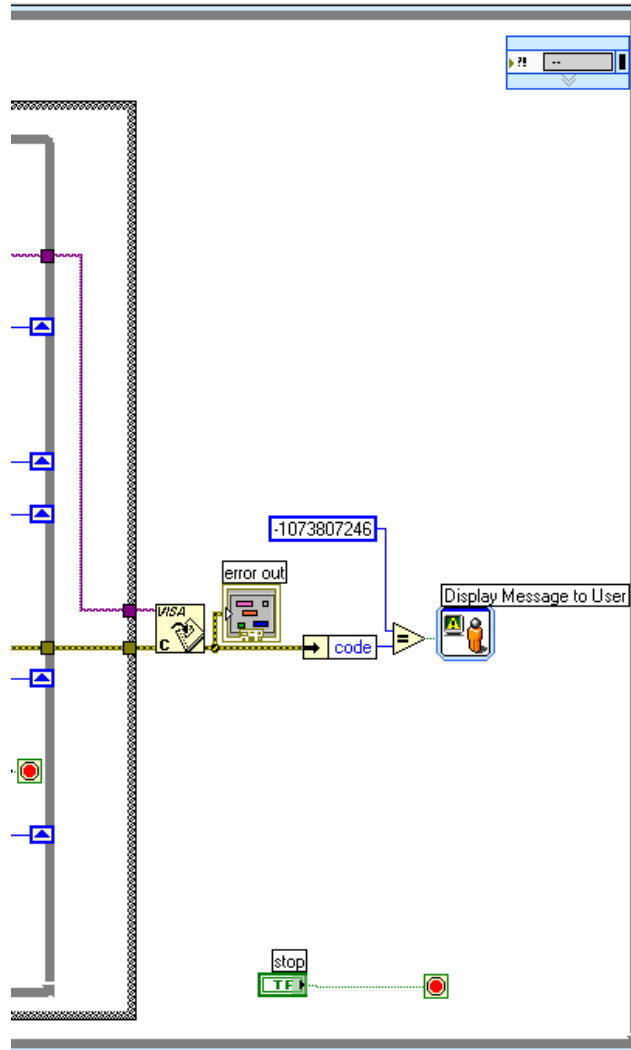
05 – Máquina de estados de linearização do sinal de ângulo.

06 – Função de leitura da serial.

07 – Cálculo da média de 10 amostras de 12 bits a serem enviadas para máquina de estados de linearização.



- Fechamento da porta serial e mensagem de erro, se houver:





APÊNDICE D – AFERIÇÃO DO TRANSFERIDOR

As figuras a seguir mostram o procedimento de aferição das escalas de 1, 5 e 10° do transferidor utilizado como referência metrológica, bem como o equipamento utilizado neste procedimento, neste caso, um projetor de perfil digital (Mitutoyo PJ-3000).







ANEXO A – TRECHO DE DATASHEET DO SENSOR HALL UTILIZADO



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs

Features and Benefits

- Low-noise output
- Fast power-on time
- Ratiometric rail-to-rail output
- 4.5 to 6.0 V operation
- Solid-state reliability
- Factory-programmed at end-of-line for optimum performance
- Robust ESD performance

Packages: 3 pin SOT23W (suffix LH), and 3 pin SIP (suffix UA)



Not to scale

Description

The A1301 and A1302 are continuous-time, ratiometric, linear Hall-effect sensor ICs. They are optimized to accurately provide a voltage output that is proportional to an applied magnetic field. These devices have a quiescent output voltage that is 50% of the supply voltage. Two output sensitivity options are provided: 2.5 mV/G typical for the A1301, and 1.3 mV/G typical for the A1302.

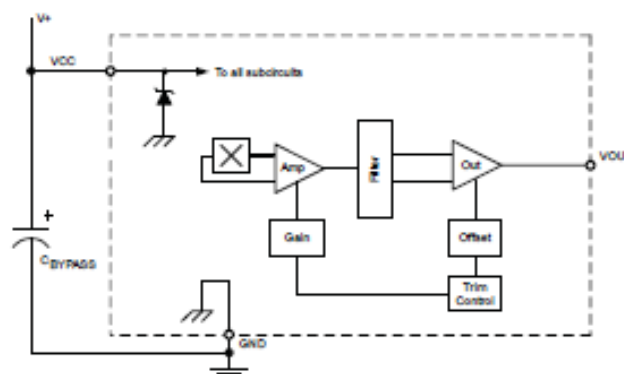
The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall circuit, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall circuit and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog signals.

High precision in output levels is obtained by internal gain and offset trim adjustments made at end-of-line during the manufacturing process.

These features make the A1301 and A1302 ideal for use in position sensing systems, for both linear target motion and rotational target motion. They are well-suited for industrial applications over extended temperature ranges, from -40°C to 125°C .

Two device package types are available: LH, a 3-pin SOT23W type for surface mount, and UA, a 3-pin ultramini SIP for through-hole mount. They are lead (Pb) free (suffix, -J) with 100% matte tin plated leadframes.

Functional Block Diagram





ANEXO B – DESENHO TÉCNICO DO IMÃ UTILIZADO

