

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/AUTOMAÇÃO

EVERTON CESAR RUPPEL
WANDER LUIS DA SILVA VIANA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO DE *ENCODERS*
INCREMENTAIS ÓPTICOS POR TRANSDUTORES DE EFEITO HALL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

EVERTON CESAR RUPPEL
WANDER LUIS DA SILVA VIANA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA SUBSTITUIÇÃO DE *ENCODERS*
INCREMENTAIS ÓPTICOS POR TRANSDUTORES DE EFEITO HALL**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Marcio Aparecido Batista,
Me. Eng.

CURITIBA

2013

EVERTON CESAR RUPPEL
WANDER LUIS DA SILVA VIANA

Análise de viabilidade técnica da substituição de *encoders* incrementais ópticos por transdutores de efeito Hall

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 03 de outubro de 2013.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica – Ênfase Automação

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Me.
Profa. Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Marcio Aparecido Batista, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Marcio Aparecido Batista, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rubem Petry Carbente, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jaime Favretto, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

RUPPEL, Everton C.; VIANA, Wander L. S. **Análise de viabilidade técnica da substituição de *encoders* incrementais ópticos por transdutores de efeito Hall.** 2013. 104 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Existem dispositivos extremamente precisos e com alta resolução para medir velocidade e posicionamento de máquinas elétricas rotativas. Sem dúvida os *encoders* são os instrumentos mais usados para essa finalidade e atendem a quase todas as aplicações devido à inúmeras variações de forma, resolução e tipos construtivos que ele são encontrados, porém ainda existem problemas secundários que afetam o desempenho, custo e performance do processo, impondo limitações e gastos extras. Visando minimizar tais prejuízos, neste trabalho foi avaliada a substituição dos *encoders* por um sistema com a mesma finalidade cujo principal componente é um transdutor de efeito Hall. Com o objetivo de analisar o comportamento destas tecnologias, foi desenvolvido um sistema composto por um motor de corrente contínua no qual estavam acoplados um *encoder* incremental e um transdutor de efeito Hall que faziam a leitura da mesma informação e ao mesmo tempo. O *encoder* e o transdutor Hall enviam sinais a uma placa de aquisição de dados, que por sua vez processa esses dados e envia as informações à um software instalado em um computador. Este software apresenta a forma de onda dos sinais do transdutor Hall e do *encoder* além de exportar os dados obtidos para uma planilha em Excel®. Através do estudo dos dados contidos nestas planilhas, foram feitas as análises propostas em relação ao *encoder* e ficou constatada a viabilidade de usar o transdutor Hall como dispositivo de retroalimentação de sistemas de controle de posição e velocidade de motores elétricos, porém existem limitações que devem ser consideradas pois restringem as aplicações.

Palavras-chave: *Encoder* incremental. Transdutor de efeito Hall. Viabilidade técnica. Placa de aquisição de dados.

ABSTRACT

RUPPEL, Everton C.; VIANA, Wander L. S. ***Analysis of technical viability of replace the optical incremental encoders by Hall effect transducers.*** 2013. 104 f. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

There are Devices extremely accurate and with high resolution for measuring speed and position of rotating electrical machines. Undoubtedly the encoders are the most commonly used instruments for this purpose, but there are still minor problems that affect the performance of the process, imposing limitations and extra expenses. To minimize these losses, this project will propose to replace the encoders by a system with same purpose, where the main component is Hall effect transducer. With the purpose of analyzing the behavior of these technologies, was developed a system basically consisting on a DC motor, where will be engaged an incremental encoder and an Hall effect transducer. The encoder and Hall transducer send signals to a Data Acquisition Board, which will process the data and send the information to the software installed on a computer. This software displays the waveform of the Hall transducer signals and encoder as well as export data to a spreadsheet in Excel ®. Through the study of the data contained in these spreadsheets, the proposed analysis was made in relation to encoder was verified and the feasibility of using the Hall transducer as a feedback device for position and speed control systems of electric motors, but there are limitations that shall be considered as restricted applications.

Keywords: Incremental encoder. Hall effect transducer. Technical feasibility. Data acquisition board.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema retroalimentado para controle de motor.....	11
Figura 2 – Desenho esquemático de um <i>Resolver</i>	14
Figura 3 – O efeito Hall.	16
Figura 4 – Contaminação no disco de um <i>encoder</i>	17
Figura 5 – Corrente elétrica distribuída uniformemente no material condutor.	19
Figura 6 – Cargas elétricas desviadas para a lateral do material condutor.	20
Figure 7 – Movimento de uma carga na presença de um campo magnético.	21
Figura 8 – O efeito Hall e a força de Lorentz.....	21
Figura 9 – Vista detalhada de um <i>encoder</i>	23
Figura 10 – Representação de <i>encoders</i> incrementais.	24
Figura 11 – Representação de um <i>encoder</i> transmissivo.....	25
Figura 12 – Representação de um <i>encoder</i> reflexivo.	26
Figura 13 – Disco codificado do <i>encoder</i> incremental.....	27
Figura 14 – Forma de onda de saída senoidal dos foto-sensores.....	28
Figura 15 – Sinais de saída dos canais A e B do <i>encoder</i> incremental.	29
Figura 16 – Contagem de pulsos por decodificação.	29
Figura 17 – <i>Encoder</i> incremental modelo MR328.	31
Figura 18 – Partes de um motor de corrente contínua.	32
Figura 19 – Armadura do motor CC.	33
Figura 20 – Armadura do motor CC.	34
Figura 21 – Arquitetura dos Sistemas de aquisição de dados.....	36
Figura 22 – Tipos de encapsulamento do transdutor Hall.	40
Figura 23– Formas de onda do encapsulamento A3423.....	40
Figura 24– Diagrama de blocos do CI A3423.....	41
Figura 25 – Diagrama de blocos do CI A1301KUA-T.	43
Figura 26– Gráfico da sensibilidade do sensor.	44
Figura 27 – Gráfico da influência da temperatura.	45
Figura 28 – <i>Encoder</i> incremental série E40.	46
Figura 29 – Formas de onda do <i>encoder</i> da série E40.	47
Figura 30 – Motor Doga 319 com sensor Hall.....	47
Figura 31 – Partes do Motor Doga 319.	48

Figura 32 – Sinais dos canais A e B do sensor Hall.	49
Figura 33 – Diagramas elétrico e de conexões.	49
Figura 34– Placa de aquisição de dados NI USB-6008®	51
Figura 35 – Diagrama de pinos da DAQ USB-6008.	52
Figura 36– Circuito de entrada analógica DAQ USB-6008.	53
Figura 37 – Configuração de conexão da AI DAQ USB-6008®.	53
Figura 38 – Dispositivos de aquisição e LabviewSignalExpress.	54
Figura 39: Diagrama de blocos – Teste com transdutor Hall analógico.....	55
Figura 40: Gerador elétrico didático.	56
Figura 41: Sinal do transdutor Hall analógico.....	57
Figura 42: Sinal fictício – motor de 4 pólos.	59
Figura 43: Distância entre o rotor e o ímã permanente.	59
Figura 44: Sentido da corrente nas bobinas.....	60
Figura 45: Posição dos ímãs permanentes e do transdutor Hall.	61
Figura 46: Sinais digitais do <i>encoder</i> (1) e do transdutor Hall (2).....	62
Figura 47: Diagrama de blocos	63
Figura 48: Leiate físico do experimento.	64
Figura 49: Fluxograma para parametrização da DAQ.....	65
Figura 50: Licença temporária do <i>software</i> LabVIEW Signal Express®.....	65
Figura 51: Seleção dos parâmetros de leitura.....	66
Figura 52: Definição das variáveis relacionadas ao tempo.	67
Figura 53: Exportando dados para o Microsoft Office Excel®.....	67
Figura 54: Forma de onda dos sinais dos transdutores.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de materiais utilizados no experimento 1	55
Tabela 2 – Lista de materiais utilizados no experimento 2	63
Tabela 3 – Exemplo de planilha de dados do transdutor Hall.....	70
Tabela 4 – Exemplo de planilha de dados do <i>encoder</i>	70
Tabela 5 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 4 volts	77
Tabela 6 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 4 volts.....	78
Tabela 7 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 8 volts	79
Tabela 8 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 8 volts.....	81
Tabela 9 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 12 volts.....	82
Tabela 10 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 12 volts.....	83
Tabela 11 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 16 volts.....	85
Tabela 12 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 16 volts.....	86
Tabela 13– Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 20 volts.....	87
Tabela 14 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 20 volts.....	88
Tabela 15 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 24 volts.....	90
Tabela 16 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 24 volts.....	91

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 4 volts.	76
Gráfico 2 – Deslocamento angular do redutor para alimentação de 4 volts.	77
Gráfico 3 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 8 volts.	79
Gráfico 4– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 8 volts.	80
Gráfico 5 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 12 volts.	81
Gráfico 6 – Deslocamento angular do redutor para alimentação de 12 volts.	83
Gráfico 7 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 16 volts.	84
Gráfico 8– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 16 volts.	85
Gráfico 9 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 20 volts.	87
Gráfico 10– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 20 volts.	88
Gráfico 11 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 24 volts.	89
Gráfico 12– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 24 volts.	90

LISTA DE SIGLAS

A – Ampère
A/D – Analógico/Digital
AI – Entrada Analógica
AO – Saída Analógica
b – Número de caminhos paralelos através da armadura
 \vec{B} – Campo magnético
CAN – *Controller Area Network*
CC – Corrente Contínua
CLP – Controlador Lógico Programável
CNC – Comando numérico Computadorizado
CPR – Ciclos Por Revolução
DAQ – Placa de Aquisição de Dados
DC – *Direct Current*
EMI – Interferência eletromagnética
E/S – Entrada/Saída
 φ – Fluxo por polo
f – Frequência do sinal
 \vec{F} – Força magnética
GND – Terra
Hz – Hertz
I – Corrente elétrica
 I_a – Corrente na armadura
I/O – Entrada/Saída
IHM – Interface Homem-Máquina
MCU – Microcontrolador
mm – Milímetro
m/s – metros por segundo
n – Velocidade do motor
NC – Comando Numérico
p – Número de pólos

ρ_n – Densidade volumétrica de carga
PWM – Modulação por largura de pulso
 q – Carga elétrica
 R_a – Resistência da armadura
RC – Resistor Capacitor
RF – Radiofrequência
RFI – Interferência de Radiofrequência
RPM – Rotações Por Minuto
 s – Segundos
S/s – Amostras por Segundo
 t – Espessura da placa
T – Tesla
TTL – Lógica de Transistor-Transistor
USB – Barramento Serial Universal.
 \vec{v} – Velocidade da carga
 V – Tensão
 V_a – Tensão na armadura
 V_{CC} – Tensão Contínua
 V_H – Tensão de Hall
 w – Velocidade de rotação
Z – Número total de condutores na armadura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3. OBJETIVO	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4. JUSTIFICATIVA.....	12
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	19
2.1. O EFEITO HALL	19
2.1.1 Princípios Físicos do Efeito Hall	19
2.1.2 Sensor de Efeito Hall.....	22
2.2. <i>Encoder</i> Incremental.....	23
2.2.1 <i>Encoders</i> Transmissivos e Reflexivos	24
2.2.2 Funcionamento do <i>Encoder</i> Transmissivo.....	24
2.2.3 Funcionamento do <i>Encoder</i> Reflexivo.....	25
2.2.4 Características Principais.....	26
2.2.4.1 Resolução do <i>encoder</i> rotativo	26
2.2.4.2 Sinais de Saída	27
2.2.4.2 Velocidade.....	29
2.2.5 O Estado da Arte dos <i>Encoders</i> Incrementais.....	30
2.3 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA.....	31
2.3.1Princípio de Funcionamento.....	31
2.3.2 Velocidade do Motor CC.....	34
2.4 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	35

2.4.1 Definição de sistema de aquisição de dados	35
2.4.2 Arquitetura dos Sistemas de Aquisição	35
2.4.3 Características das placas de aquisição de dados.....	36
2.4.4 <i>Softwares</i> de aquisição	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	39
3.1.1 Transdutor de efeito Hall digital	39
3.1.2 Transdutor de efeito Hall analógico	42
3.1.3 <i>Encoder</i> Incremental Rotativo	45
3.1.4 Motor CC com redução e transdutor Hall.	47
3.1.5 Placa de aquisição de dados.....	50
3.1.6 <i>Software</i> de aquisição de dados	53
3.2 EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS.....	54
3.2.1 Experimento 1 - Teste com transdutor Hall analógico	54
3.2.1.1 Limitação na utilização do transdutor Hall analógico.....	59
3.2.2 Experimento 2 – Implementação do Sistema com transdutor Hall Digital	61
4. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	69
4.1 APRESENTAÇÕES DE DADOS	69
4.2 APRESENTAÇÕES DOS RESULTADOS.....	74
4.2.1 Análise para alimentação do motor em 4 V_{CC}	76
4.2.2 Análise para alimentação do motor em 8 V_{CC}	78
4.2.3 Análise para alimentação do motor em 12 V_{CC}	81
4.2.4 Análise para alimentação do motor em 16 V_{CC}	84
4.2.5 Análise para alimentação do motor em 20 V_{CC}	86
4.2.6 Análise para alimentação do motor em 24 V_{CC}	89
5. CONCLUSÃO.....	92
REFERÊNCIAS.....	94

ANEXO A – Catálogo do motor Doga 319 com sensor Hall.	100
--	-----

1. INTRODUÇÃO

1.1. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Ambientes de lazer e trabalho estão repletos de motores elétricos que auxiliam nas inúmeras atividades do cotidiano. Tais equipamentos estão presentes em, por exemplo: eletrodomésticos, exaustores, geradores, furadeiras, serras elétricas, motores em carros híbridos ou em processos fabris entre tantas outras aplicações. No campo dos acionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias, sejam transformados em energia mecânica através de motores elétricos (MATIAS, 2008). Sendo assim, vem à tona a necessidade de monitorar e controlar velocidade e posicionamento destas máquinas dentro do processo produtivo de forma a torná-lo mais eficiente.

Para realizar este monitoramento é necessário a utilização de um instrumento que forneça um sinal elétrico para posterior controle do sistema. A Figura 1 apresenta, em diagrama de blocos, um sistema de leitura deste sinal. Independente do tipo de energia primária: hidráulica, pneumática ou elétrica, os transdutores de posição fornecem sinais de realimentação (*feedback*), tornando-se peças fundamentais de um processo a ser controlado. A decisão do tipo de transdutor de posição e velocidade a ser utilizado baseia-se em diversos fatores como ambiente, redundância, confiabilidade, segurança, etc (POWERTRANSMISSION, 2010).

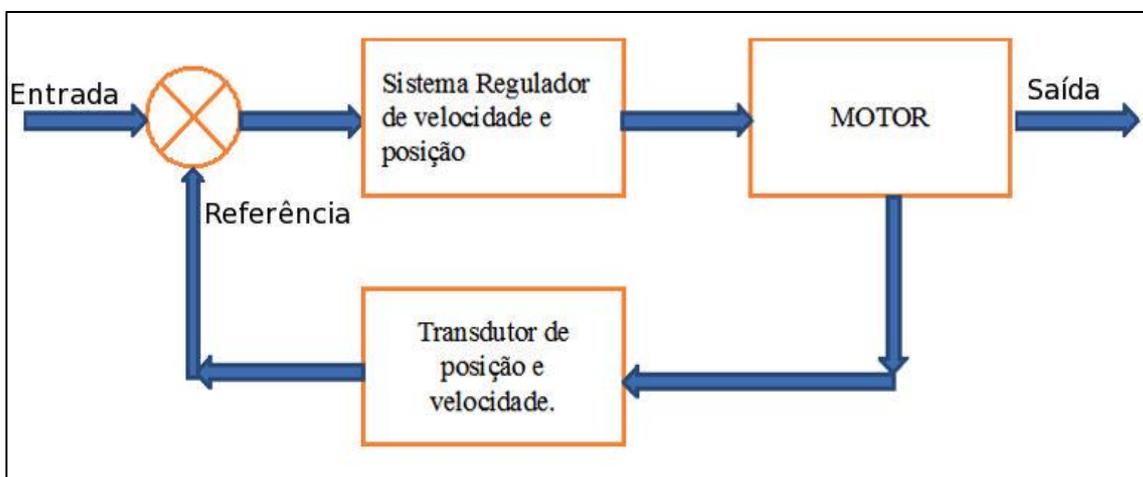


Figura 1 – Sistema retroalimentado para controle de motor.
Fonte: Adaptado de Favretto (2010).

1.2. PROBLEMAS E PREMISSAS

Apesar dos transdutores de velocidade e posicionamento atenderem as necessidades da indústria de automação, existem alguns problemas que acabam sendo grandes limitantes do processo ou gerando uma alta perda com manutenção, como por exemplo, a necessidade de um circuito eletrônico específico de condicionamento de sinal para os *resolvers*, e a questão de desalinhamento e contaminação do disco óptico para os *encoders*. Em relação ao *encoder*, levantou-se o seguinte questionamento: Seria viável tecnicamente substituí-los por transdutores de efeito Hall?

1.3. OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar a análise da viabilidade técnica da substituição *encoders* incrementais por transdutores de efeito Hall.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar os transdutores digitais de posição e velocidade mais utilizados na indústria;
- Pesquisar as características dos transdutores de efeito Hall e dos *encoders*;
- Realizar pré-testes do transdutor para compreender seu funcionamento;
- Utilizar um sistema composto por *hardware* e *software* para realizar a leitura e coletar sinais elétricos do *encoder* incremental e transdutor de efeito Hall;
- Elaborar um sistema de comparação entre transdutores ópticos digitais de velocidade e posicionamento com os de efeito Hall, utilizando um motor;
- Analisar o desempenho do modelo proposto em relação ao *encoder* Incremental.

1.4. JUSTIFICATIVA

Para se ter uma compreensão do que foi alcançado com este trabalho, é necessário um conhecimento mínimo sobre motores elétricos e transdutores de velocidade e posição. Estas informações são apresentadas a seguir.

Segundo Del Toro (1994, p. 294), um motor de corrente contínua é um gerador de corrente contínua com fluxo de potência invertido. Para Oliveira (2011), as máquinas de corrente contínua são divididas quanto a sua excitação: Imã permanente, excitação independente, excitação série, excitação paralela e excitação composta.

Neste trabalho realizou-se a análise com base em um pequeno motor de corrente contínua com ímãs permanentes, devido às vantagens que este possui em relação aos motores, de mesmo porte, com excitação independente, série, paralela e composta (OHIO ELECTRIC MOTOR, 2011):

- Maior eficiência devido à ausência de perdas incorridas para desenvolver ou manter o campo magnético do motor;
- Maior torque e densidade de potência;
- Características de velocidade linear de torque;
- Melhor desempenho dinâmico devido a uma maior densidade de fluxo magnético no entreferro;
- Construção simplificada e de baixa manutenção;
- Tamanho reduzido.

Para casos em que há a necessidade da utilização de sistemas de velocidade variáveis em motores de corrente contínua, a aplicação de conversores estáticos faz-se necessária. Estes aliam grandes faixas de variação de velocidade, robustez e precisão à economia de energia, o que garante um ótimo desempenho e flexibilidade nas mais variadas situações (INNOWATT, 2011). Juntamente com os conversores estáticos empregam-se os transdutores, os quais têm a finalidade de realimentar o conversor com a variável de posição e possibilitar o cálculo de velocidade atual.

Um transdutor amplamente utilizado para medição de velocidade é o tacogerador. Este foi projetado para ser aplicado no servocontrole de acionamento de máquinas têxteis, aceleradores, freio de elevadores, e outras aplicações que requerem velocidade contínua e controlada. O tacogerador fornece um sinal de tensão contínua correspondente ao valor real da velocidade da máquina elétrica a qual ele está acoplado. Ele possui ímãs permanentes no estator, com a finalidade de

produzir um campo magnético. No rotor bobinado é gerada uma tensão contínua de amplitude proporcional à rotação e de polaridade que depende do sentido de giro (WEG, 2008).

Um dispositivo utilizado como transdutor de posição e velocidade é os *resolver*. Estes são transformadores de alta frequência, normalmente trabalham na faixa de 5 a 10 kHz, onde o primário está situado no rotor, existindo dois secundários defasados de 90° . As amplitudes e fases das tensões induzidas nos secundários são funções da posição do rotor. Um circuito condicionador processa as tensões induzidas nos secundários fornecendo uma tensão proporcional à posição do estator conforme apresentado na Figura 2 (Corrêa, 2011).

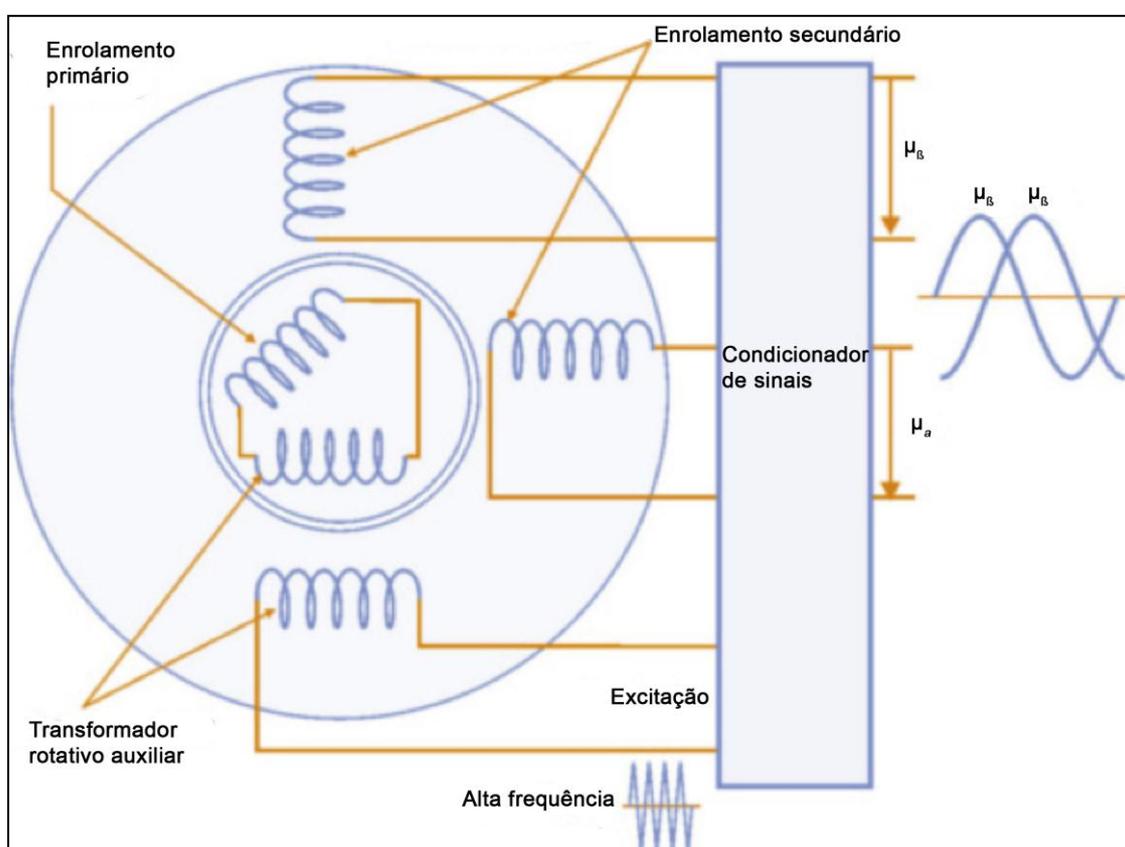


Figura 2 – Desenho esquemático de um Resolver.
Fonte: Corrêa (2011).

Conectado ao eixo de um motor, do qual se deseja monitorar posição e velocidade, o *resolver* disponibiliza um sinal de frequência, que devidamente tratado, fornece os dados obtidos no eixo a um sistema regulador de velocidade e posição.

Assim como o tacogerador, o *resolver* não foi utilizado para esta análise tendo em vista a necessidade da utilização de um dispositivo para converter o sinal elétrico

oriundo destes, sinal analógico, para um sinal digital. Além disso, o tacogerador é empregado apenas quando há a necessidade da medição da velocidade da máquina, ou seja, este não oferece o posicionamento.

Os *encoders* também fazem parte da gama de transdutores de velocidade e posição. Estes são dispositivos eletro-mecânicos que são designados para traduzir movimentos mecânicos como posição e mudança de direção em sinais digitais (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007). Um *encoder* óptico rotativo é um dispositivo optoeletrônico utilizado para converter a posição angular de um eixo em um código digital. O disco codificador óptico é feito de vidro com áreas transparentes e opacas. Uma fonte de luz em conjunto com detectores fotossensíveis faz a leitura do padrão óptico que resulta da posição do disco. Este código é enviado a um processador incorporado para processar os sinais do codificador para uma saída digital. Existem dois tipos de *encoders* ópticos: incrementais e absolutos (POWERTRANSMISSION, 2010).

Os *encoders* incrementais fornecem a posição relativa, em que o sinal de realimentação é sempre referenciado a um início ou posição de repouso. A posição atual é apenas um incremento da última posição detectada. Com relação aos absolutos, estes geram um código único para cada posição. Além disso, apresentam a particularidade de serem capazes de fornecer informações sobre a posição após o seu religamento (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007). O *encoder* absoluto não foi utilizado devido ao seu alto custo de aquisição, o que inviabilizou seu estudo neste trabalho.

Sendo assim, a análise de desempenho foi realizada com um *encoder* incremental juntamente com o transdutor baseado no efeito Hall pR posterior comparação entre eles.

Em 1879, durante experiências feitas para se medir diretamente o sinal dos portadores de carga em um condutor Edwin H. Hall percebeu um fenômeno peculiar. Na época já se sabia que quando um fio percorrido por corrente elétrica era exposto a um campo magnético as cargas presentes neste condutor eram submetidos a uma força que fazia com que seu movimento fosse alterado. No entanto, o que Edwin Hall descreveu foi o surgimento de regiões com carga negativa e outras com carga positiva no condutor, criando um campo elétrico perpendicular ao campo gerado pela corrente principal, como apresentado na Figura 3. Em sua homenagem este efeito ficou conhecido como Efeito Hall (SÓ FÍSICA, 2013).

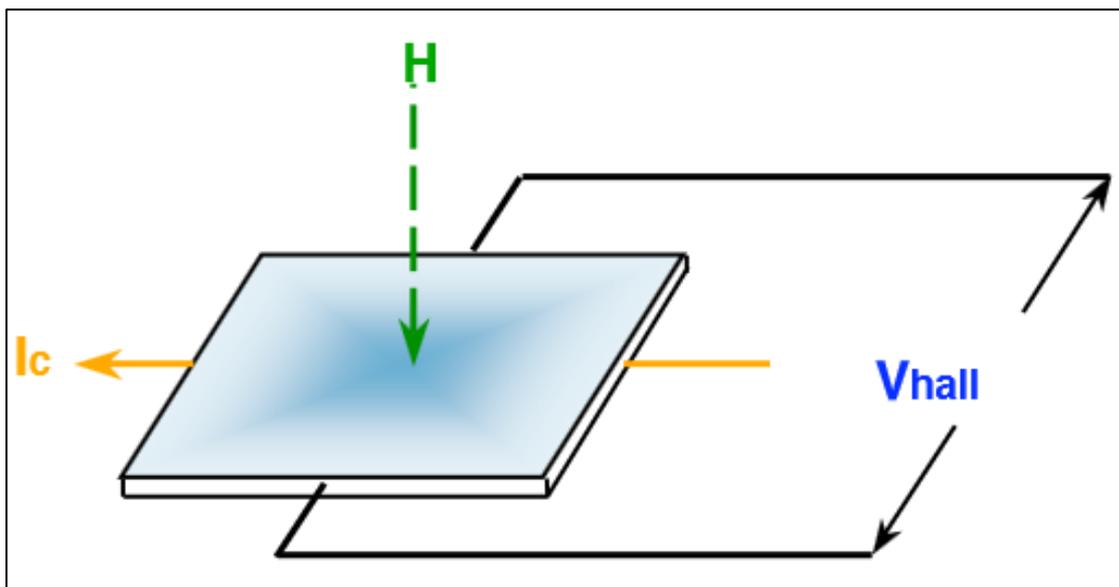


Figura 3 – O efeito Hall.
Fonte: Honeywell (2008).

O sensor de efeito Hall é um transdutor que varia a sua tensão de saída em resposta às variações de campo magnético ou de corrente elétrica (INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, 2007).

Segundo Braga (2008), os sensores Hall podem ser usados em uma grande quantidade de aplicações como o sensoriamento de velocidade rotacional, detecção de posição linear e rotacional, chave de fim-de-curso sem contatos, medida de fluxo, comutação sem escovas entre outras aplicações.

O que justificou a proposta deste trabalho são as desvantagens dos transdutores convencionais. Por exemplo, o *encoder* que foi utilizado nesta análise poderia apresentar algumas desvantagens:

- Alto custo. Quanto maior a precisão necessária, maior é o custo (EMERSON, 2011);
- Discos podem danificar com impactos, vibrações e, conforme a Figura 4, contaminações (ROCHA, 2009);
- Necessitam de dispositivos flexíveis de acoplamento para reduzir a vibração. (INOWATT, 2011).

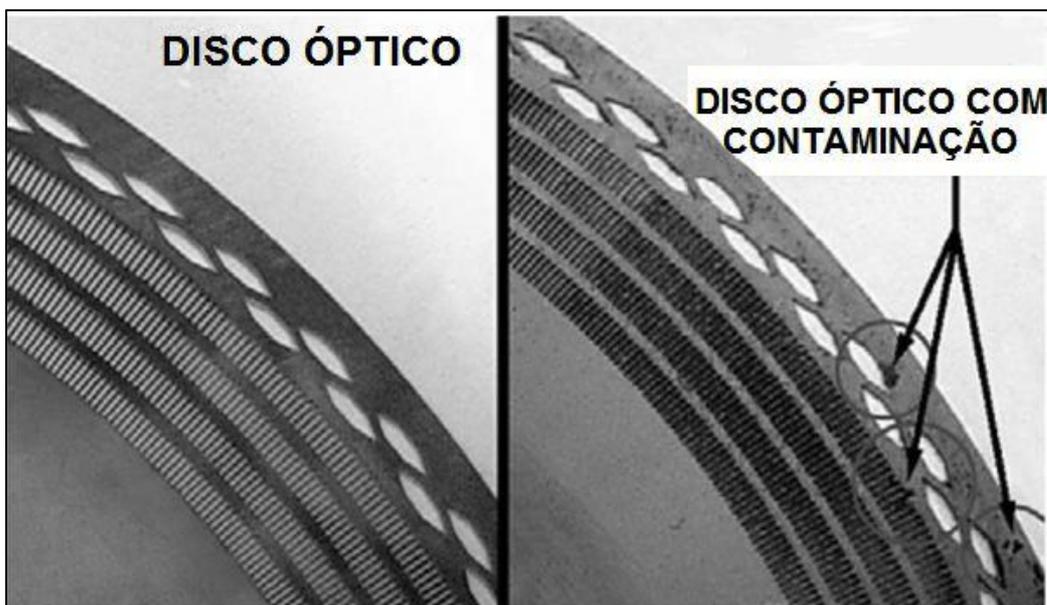


Figura 4 – Contaminação no disco de um *encoder*.

Fonte: Adaptado de Rocha (2009).

Portanto, propôs-se a realização de uma análise visando suprimir estes dois últimos problemas citados.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Etapa I: Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre *encoders* e transdutores Hall, apresentando os tipos mais comuns no mercado, as vantagens, desvantagens e limitações de aplicação, além de mostrar o funcionamento e as características técnicas destes transdutores.

Etapa II: Depois de definido qual o transdutor de efeito Hall e *encoder óptico* a serem aplicados, foi necessário definir qual o *hardware* deve ser aplicado para realizar a leitura dos dados destes dispositivos e transmiti-los para um *software* responsável pela armazenagem e visualização das informações coletadas. A leitura destes dados foi realizada por uma placa de aquisição de dados da empresa National Instruments.

Etapa III: Através do *software* LabVIEW Signal Express[®] também da empresa National Instruments, possibilitou exibir e coletar os dados oriundos do sensor de efeito Hall e do *encoder* incremental, o quais foram acoplados ao mesmo motor, para garantir a leitura da mesma posição e velocidade.

Etapa IV: Com base nos dados armazenados com o *software*, analisou-se a diferença de medição do transdutor de efeito Hall, utilizando como equipamento

padrão o *encoder* incremental.

Etapa V: Após o desenvolvimento das etapas anteriores, são apresentados os resultados com o objetivo de analisar a viabilidade técnica da substituição do *encoder* incremental pelo transdutor de efeito Hall.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido ao longo de cinco capítulos principais. O segundo capítulo aborda a contextualização do tema e o estado da arte dos *encoders* incrementais. Este capítulo apresenta o embasamento teórico de todos os equipamentos aplicados para a realização desta análise.

No capítulo 3 são apresentadas as características e dados técnicos dos equipamentos utilizados neste trabalho e são apresentados os testes realizados. O capítulo 4 expõe os dados levantados com o experimento bem como o tratamento feito nas informações coletadas neste ensaio.

Por fim, no capítulo 5 as considerações finais do trabalho são apresentadas e as discussões do projeto. Este capítulo apresenta o ganho que se obteve colocando esse projeto em prática e sugestões para trabalhos futuros nesta linha de aprendizado.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os referências teóricos dos principais itens e assuntos que compuseram este trabalho. Cada seção exibe o detalhamento dos principais componentes, além de uma seção específica para apresentar a tecnologia que está sendo utilizada na atualidade para o caso do *encoder* incremental.

2.1. O EFEITO HALL

2.1.1 Princípios Físicos do Efeito Hall

Este efeito é baseado no princípio de interação entre campos magnéticos e cargas elétricas. Ao passar uma corrente por um material condutor, ela distribui-se uniformemente ao longo deste e não haverá diferença de potencial entre as laterais do material (PATSKO, 2006). Ou seja, os elétrons da corrente elétrica “*i*” percorrem um caminho retilíneo e os potenciais serão iguais em ambas as bordas deste condutor, gerando um diferença de potencial nula como é mostrado na figura 5.

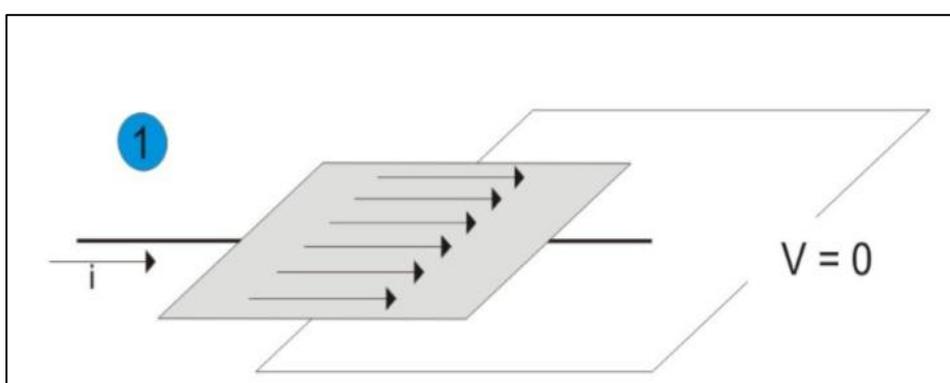


Figura 5 – Corrente elétrica distribuída uniformemente no material condutor.
Fonte: Patsko (2006).

No entanto, quando um ímã se aproxima deste material condutor, o campo magnético perturbará a distribuição da corrente ao longo do material. Haverá um acúmulo de cargas em um lado do condutor, o que aparece uma diferença de potencial entre as laterais como é mostrado na figura 6. Caso inverta-se o sentido do campo magnético, a tensão presente no material também será invertida (PATSKO, 2006).

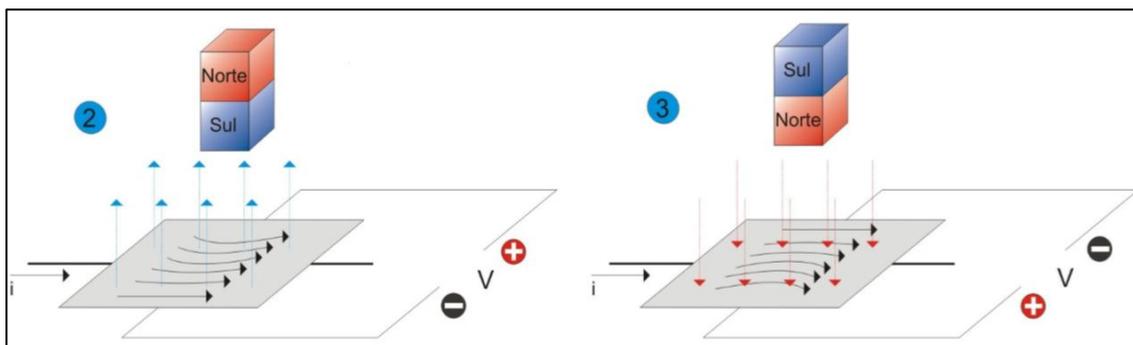


Figura 6 – Cargas elétricas desviadas para a lateral do material condutor.
 Fonte: Patsko (2006).

Segundo Ferla (2009), o efeito Hall pode ser observado em qualquer material condutor de eletricidade, porém nos materiais semicondutores esse efeito é mais intenso. Como este trabalho visa favorecer-se do efeito Hall em semicondutores, a explanação deste fenômeno será com ênfase neste material.

Para compreender melhor o que ocorre com um material semicondutor ao ser exposto a um campo magnético e percorrido por uma corrente, é necessário relembrar a força de Lorentz.

O físico Hendrik Anton Lorentz nasceu na Holanda e viveu entre 1853 e 1928 (SALA DE FÍSICA, 2013), ele descobriu que quando um condutor percorrido por uma corrente elétrica é exposto a um campo magnético, observa-se a existência de uma força que é dada pela seguinte equação (HALLIDAY, 2004):

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Onde:

\vec{F} : Força magnética [N];

q : Carga elétrica [C];

\vec{v} : Velocidade da carga [m/s];

\vec{B} : Campo magnético [T].

Essa força desloca o fluxo de cargas conforme é mostrado na figura 7.

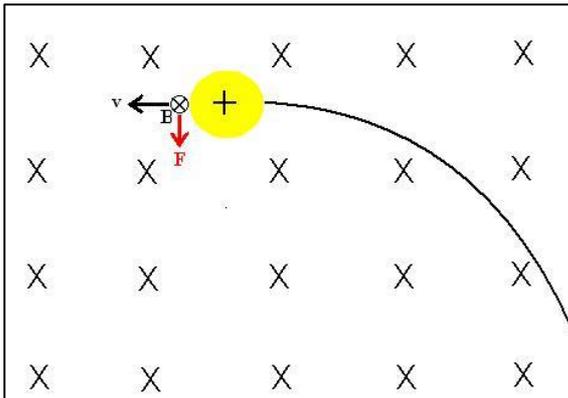


Figure 7 – Movimento de uma carga na presença de um campo magnético.
Fonte: Kítor (2010).

A força de Lorentz é a principal explicação física para o efeito Hall, quando uma carga se move na direção \vec{v} mostrada na figura 7 perpendicular ao campo magnético aplicado \vec{B} , ela sofre uma força \vec{F} (força de Lorentz) que é perpendicular ao fluxo das cargas e ao campo magnético simultaneamente. Em resposta a essa força as cargas se deslocam para uma das laterais do condutor, ali se concentrando, deixando essa região com potencial diferente ao potencial do lado oposto deste condutor (MILANO, 2009).

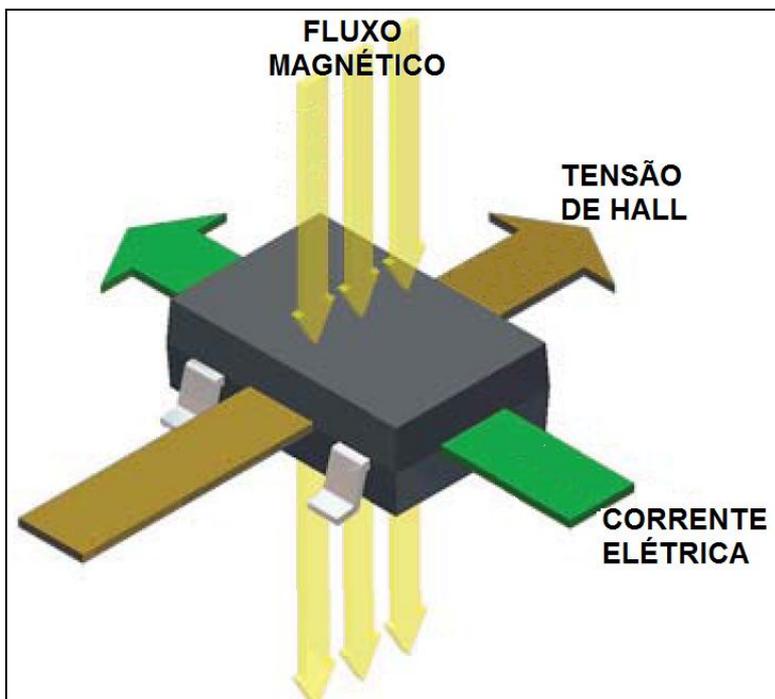


Figura 8 – O efeito Hall e a força de Lorentz.
Fonte: Adaptado de *Micropower Switches and Latches* (2010)

Essa diferença de potencial é conhecida com tensão de Hall, mostrada na figura 8, e é dada pela equação a seguir (Milano, 2009):

$$V_H = \frac{IB}{\rho nqt} \quad (2)$$

Onde:

V_H : Tensão de Hall entre as laterais da placa condutora [V];

I: Corrente através da placa [A];

q: carga elétrica [C];

ρn : Densidade volumétrica de carga [C/m³];

t: Espessura da placa [m].

2.1.2 Sensor de Efeito Hall

Os sensores Hall são lineares, sensíveis, rápidos e podem ser construídos com dimensões reduzidas. As aplicações mais comuns para esses sensores são a detecção de movimento de partes mecânicas, tacômetros, controle de motores, entre outros. Também são encontrados em magnetômetros, instrumentos que medem a intensidade de um campo magnético, o da Terra por exemplo, (BRAGA, 2008).

Existem duas categorias de transdutores de efeito Hall, analógicos e digitais. Aqueles que apresentam saída digital subdividem-se em quatro tipos: unipolar, bipolar, omnipolar e *latch*.

O transdutor de efeito Hall unipolar tem sua saída digital alterada para nível alto na presença de um campo magnético positivo (pólo sul), este permanecerá neste estado até a retirada deste campo quando passará para nível baixo em sua saída (*Unipolar Hall-Effect Sensor IC Basics*, 2010).

O transdutor Hall bipolar reage a qualquer tipo de campo magnético. Este mudará seu estado de saída para alto na presença de um campo magnético positivo e mudará o estado em sua saída quando ocorrer a inversão deste campo (*Bipolar Switch Hall-Effect ICs*, 2010).

Já *latch* de efeito Hall é similar ao bipolar. O *latch* mudará sua saída digital para nível alto na presença de um campo magnético positivo e permanecerá neste

estado mesmo que este seja removido. Quando um campo com polaridade negativa (pólo norte) incidir sobre ele, o transdutor mudará o estado de sua saída digital para baixo. Transdutores de efeito Hall omnipolar mudam sua saída digital para nível alto na presença de um campo magnético sul ou norte, porém sua saída digital passa para nível baixo quando o campo magnético é afastado. (*Micropower Switches and Latches*, 2010).

2.2. ENCODER INCREMENTAL

Como mencionado no item 1.4, *encoders* são dispositivos eletro-mecânicos que são utilizados para traduzir movimentos mecânicos, como mudança de direção e posição, em sinais elétricos. O *encoder* incremental fornece a posição relativa, onde o sinal de realimentação é sempre referenciado a posição de início da contagem dos sinais elétricos provenientes deste (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007). Estes sinais, pulsos, são acumulados em contagem para fornecer a posição. A Figura 9 apresenta em vista detalhada, todos os componentes de um *encoder* óptico de característica incremental.

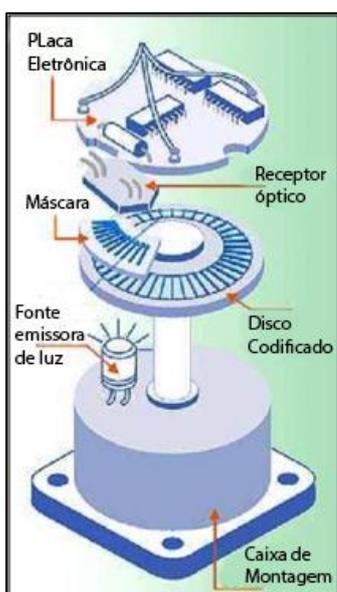


Figura 9 – Vista detalhada de um *encoder*.
Fonte: Matias (2002).

Atualmente estes transdutores são baseados no princípio de Moiré, onde a luz proveniente de uma fonte luminosa fixa passa por um vidro conectado ao eixo de um rotor antes de ser detectado por um foto-sensor. Neste disco há grades ao longo do seu perímetro igualmente espaçadas como representado na figura 6. Como este

disco permanece em movimento, surgem feixes periódicos de luz que por sua vez são detectados pelo foto-sensor (EMERSON, 2011).

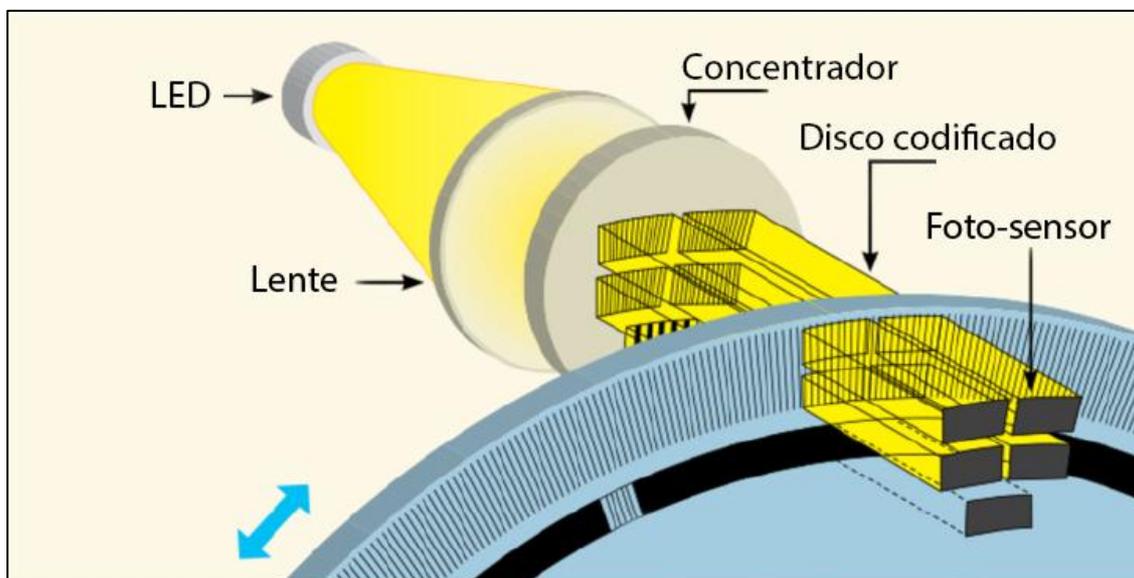


Figura 10 – Representação de *encoders* incrementais.
Fonte: Emerson (2011).

2.2.1 *Encoders* Transmissivos e Reflexivos

Encoders incrementais utilizam luz para perceber a velocidade, ângulo e direção de rotação do eixo rotativo. Eles são separados pela diferença em sua tecnologia de sensoriamento (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007):

- Transmissivos: A luz proveniente de uma fonte luminosa incide em um disco codificado em movimento, sendo detectada por um sensor (fotodetector), no lado oposto ao disco codificado;

- Reflexivos: A luz proveniente de uma fonte de luminosa incide em um disco codificado em movimento e reflete, sendo esta reflexão detectada por um fotodetector no mesmo lado do disco codificado.

2.2.2 Funcionamento do *Encoder* Transmissivo

Como mostrado na figura 11, o *encoder* do tipo transmissivo é composto por um emissor, detectores e disco ou fita codificada. O emissor e detectores estão localizados em lado oposto ao disco ou fita codificada (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

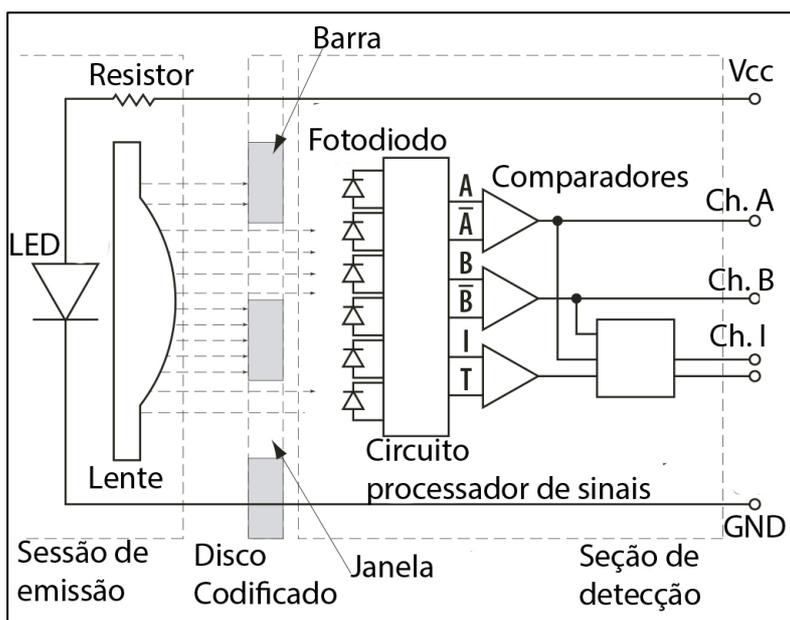


Figura 11 – Representação de um *encoder* transmissivo.
Fonte: AvagoTechnologies (2007).

Quando a luz da fonte luminosa é projetada em direção ao disco codificado em movimento, as barras atuam como um portão que permite ou não a luz penetrar nas ranhuras do disco. Com este arranjo criam-se sombras que incidem nos fotodiodos localizados no detector. Desta maneira os fotodiodos geram um sinal de saída (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

2.2.3 Funcionamento do *Encoder* Reflexivo

O princípio de funcionamento deste transdutor assemelha-se ao mostrado no item 0, porém no *encoder* reflexivo o emissor e receptor estão localizados no mesmo lado do disco ou fita codificada, esta configuração é apresentada na figura 12 (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

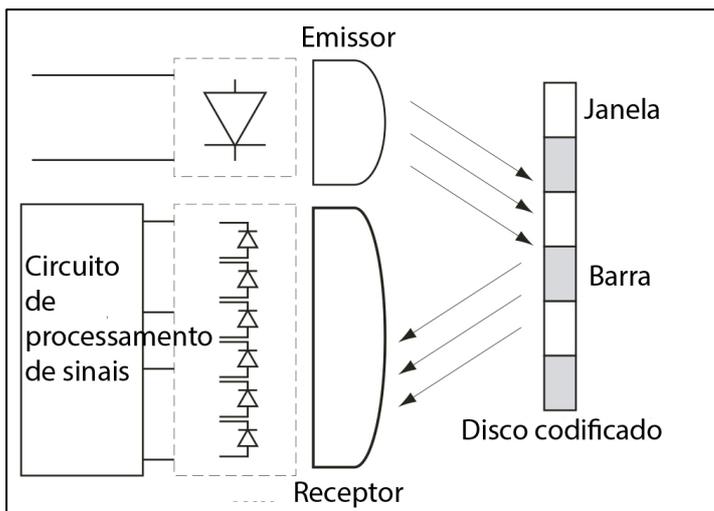


Figura 12 – Representação de um *encoder* reflexivo.
Fonte: Avago Technologies (2007).

Quando a luz da fonte luminosa é projetada em direção o disco codificado em movimento, as barras refletem ou não a luz nos espaços do disco codificado. Desta maneira, criam-se sombras que incidem nos fotodiodos localizados no detector ou receptor. Assim como no *encoder* do tipo transmissivo, os fotodiodos geram um sinal de saída (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

2.2.4 Características Principais

2.2.4.1 Resolução do *encoder* rotativo

A resolução do *encoder* estabelece qual a menor unidade de medida que o mesmo pode fornecer em seu sinal de saída. Para *encoders* rotativos, a unidade de medida mais empregada é o CPR (Ciclos Por Revolução). O valor em CPR das saídas do dispositivo pode ser quadruplicado quando o sinal, da borda de descida e de subida, das formas de onda são decodificados, sendo estes sinais provenientes de dois canais do *encoder* que foram representados por canal A e canal B. Por exemplo, se este transdutor possui 500 CPR ele poderá fornecer 2000 pulsos após a decodificação dos sinais dos canais A e B por uma interface ou *software* (AVAGOTECHNOLOGIES, 2007).

A figura 13 apresenta uma simplificação do disco codificado, evidenciando a janela ou ranhura do disco e a distância do raio óptico, sendo esta a distância do centro do disco até a metade da janela ou trilha de dados.

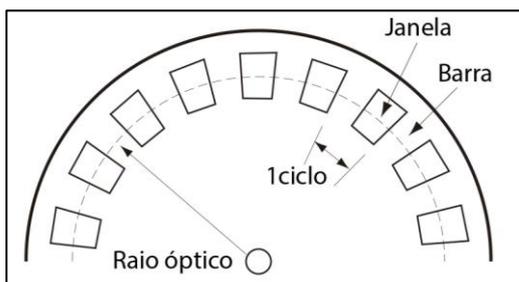


Figura 13 – Disco codificado do *encoder* incremental.
Fonte: AvagoTechnologies (2007).

2.2.4.2 Sinais de Saída

Devido a movimentação do disco, o foto-sensor detecta flutuações da luz proveniente da fonte luminosa. Estas oscilações aproximam-se de uma forma de onda senoidal. Os sinais senoidais e cossenoidais são criados por combinações de dados detectados pelo foto-sensor. De acordo com a figura 14 há um conjunto de quatro foto-sensores para gerar dados incrementais de natureza senoidal, ao todo são 4 sinais com deslocamento de fase de 90 graus em relação ao anterior (0° , 90° , 180° e 270°). Conforme a Figura a forma de onda cossenoidal I_1 é criada por $I_{0^\circ} - I_{180^\circ}$ e a forma de onda representada por I_2 é criada pela relação $I_{90^\circ} - I_{270^\circ}$ (EMERSON, 2011).

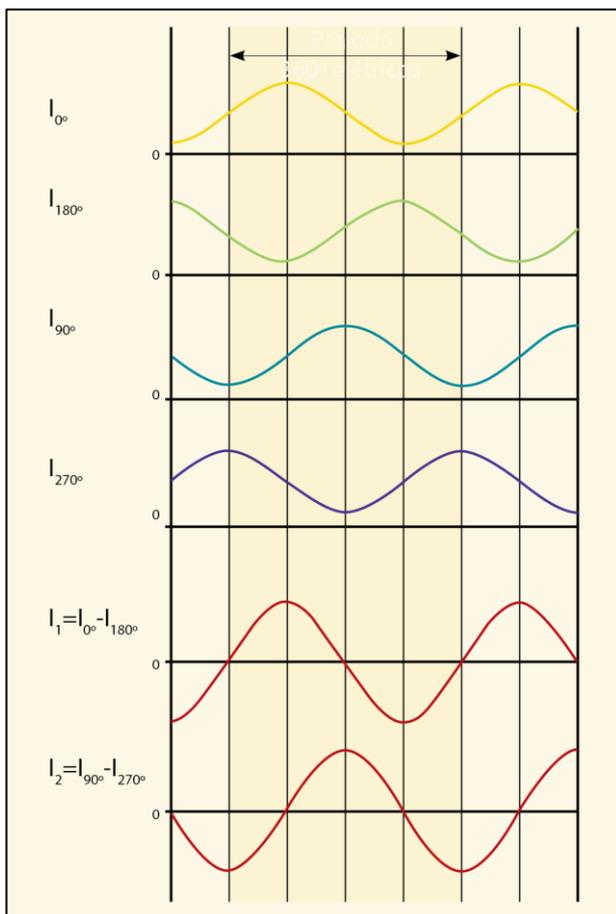


Figura 14 – Forma de onda de saída senoidal dos foto-sensores.
Fonte: Emerson (2011).

Estes sinais (I_1 e I_2) são convertidos para sinais digitais e disponibilizados como saída para os canais A e B (EMERSON, 2011).

Os sinais de natureza digital são comumente utilizados devido a sua transmissão direta ao controlador de um motor, por exemplo. Um *encoder* com apenas um canal fornece apenas os valores de posição e cálculo da velocidade, ou seja, não diferenciam o sentido de rotação do disco codificado. O mesmo transdutor quando utiliza dois canais fornece estes três dados (AVAGOTECHNOLOGIES, 2007).

Estes transdutores utilizam, normalmente, dois canais que fornecem sinais de saída defasados em 90 graus elétricos conforme pode ser visto na Figura 14. Este defasamento fornece sinais de direção e rotação. Em uma direção o canal A está adiantado do canal B. Na direção contrária o sinal do canal B está a frente do canal A (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

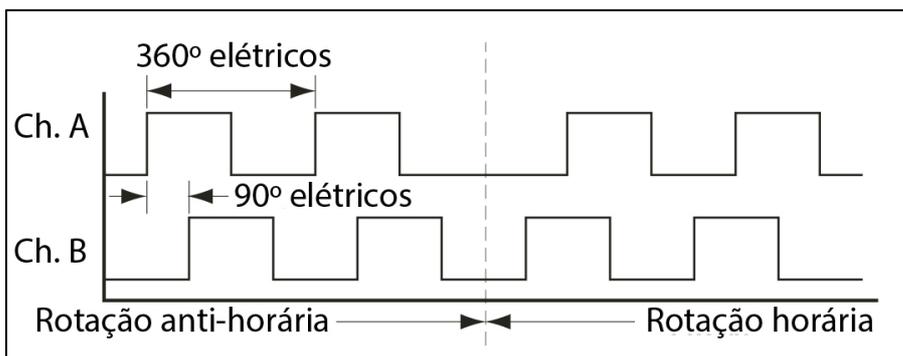


Figura 15 – Sinais de saída dos canais A e B do *encoder* incremental.
Fonte: Avago Technologies (2007).

O *encoder* incremental é normalmente decodificado para fornecer as informações de contagem de pulsos 4 vezes maior que o CPR, porém há a necessidade de um decodificador para realizar esta contagem. Esta decodificação, pode ser facilmente implementada por um microcontrolador ou até mesmo ser aceita diretamente pelo controlador de um motor que realize a análise dos sinais (bordas de descida e subida) dos 2 canais. De acordo com a figura 16 pode-se visualizar as bordas de descida e subida que devem ser consideradas pelo controlador para realizar uma contagem de pulsos 4 vezes maior (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

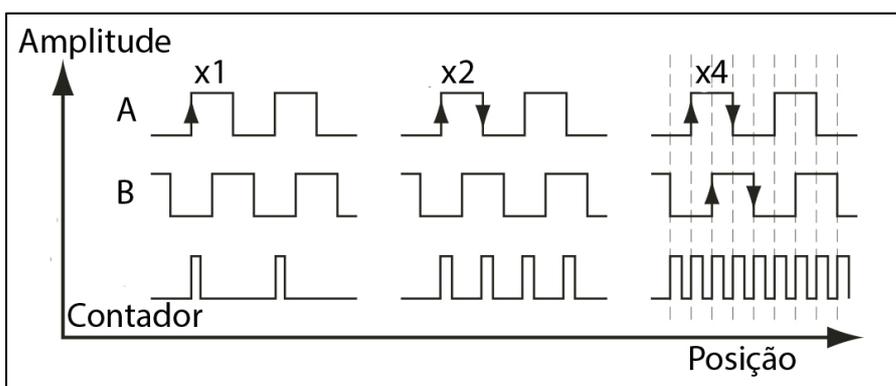


Figura 16 – Contagem de pulsos por decodificação.
Fonte: Avago Technologies (2007).

2.2.4.2 Velocidade

Deve-se analisar a máxima velocidade do dispositivo que deseja-se leitura de posição, direção e também velocidade. A velocidade de um motor é medida em rotações por minuto (RPM). A quantidade de rotações por minuto define a máxima e a típica velocidade em que o motor será utilizado com e sem carga conectada ao

eixo. Esta faixa de operação determinará a frequência do *encoder* que é necessária. Uma taxa elevada de CPR possuirá uma alta frequência que deverá ser compatível a velocidade em rotações por minuto do motor, além do *encoder* também possuir uma resposta rápida das variáveis lidas para determinadas aplicações que necessitam desta (AVAGO TECHNOLOGIES, 2007).

2.2.5 O Estado da Arte dos *Encoders* Incrementais

Matias (2008) afirma que o *encoder* é um dos equipamentos mais usados em Automação Industrial, pois com ele consegue-se converter movimentos angulares e lineares em informações úteis à nossa máquina ou processo.

Esses transdutores são aplicados em vários segmentos da indústria, como em eixos de Máquinas Ferramentas NC (comando numérico) e CNC (comando numérico computadorizado), em eixos de Robôs, controle de velocidade e posicionamento de motores elétricos, posicionamento de antenas parabólicas, telescópios e radares, mesas rotativas (MATIAS, 2008).

Segundo Matias (2008), a comunicação do *encoder* com CLP (controlador lógico programável), CNC, MCU (microcontrolador), etc., segue a tendência de ser realizada pela rede *Fieldbus* como *Interbus*, *Profibus*, *Device Net*, CAN (rede de área controlável) a fim de reduzir a quantidade de cabos dispostos pela planta.

No entanto, já existe uma tecnologia muito mais avançada neste quesito, aplicável para *encoders* instalados remotamente do dispositivo de controle chamado de “*Encoder* Incremental com Fibra Óptica”.

Dentre a vasta gama de *encoders* disponíveis no mercado, sejam estes de natureza óptica ou magnética, um destes transdutores de posição que merece destaque é o *encoder* com característica de transmissão através de fibra óptica. Tal *encoder* foi desenvolvido e fabricado pela empresa MICRONOR, sendo esta a única que detém o direito de utilização desta tecnologia.

Um dos mais modernos modelos de *encoders* que são atualmente comercializados por esta empresa, com a característica de transmissão de informações por fibra óptica, é o modelo MR328. Este possui as seguintes características (MICRONOR, 2013):

- *Encoder* do tipo óptico;
- Não há necessidade de fonte de alimentação remota (alimentação provém

do controlador) e isolação externa;

- Imune a EMI e RFI e interferência pela malha de terra;
- Temperatura de operação padrão de -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$ ou de até -60°C a $+150^{\circ}\text{C}$;
- Disponibiliza os sinais de saída para longas distâncias (até 2,5 km dependendo do controlador) sem interferências no sinal comum em condutores elétricos;
- Necessita de um controlador compatível com sua tecnologia de transmissão de dados.

O *encoder* incremental MR328 é desenvolvido especificamente para aplicações que requerem imunidade eletromagnética e rádio frequência, ideal para aplicações de controle de posição e velocidade na área médica, por exemplo. Caso a necessidade da aplicação deste transdutor não necessite de imunidade a estas anomalias, pode-se optar pelo *encoder* modelo MR322 que possui as mesmas características do modelo MR328 que está representado na Figura 17 (MICRONOR, 2013).



Figura 17 – Encoder incremental modelo MR328.
Fonte: Micronor (2013).

2.3 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

2.3.1 Princípio de Funcionamento

Os principais componentes de um motor de corrente contínua (também chamado de motor CC), são descritos a seguir (BARBOSA, 2001):

- Estator: no estator está localizado o elemento responsável pela produção de campo magnético, podendo ser de imã permanente para pequenos motores e eletroímãs conforme mostrado na figura 18;

- Rotor: responsável pela produção de torque através da circulação de corrente por seus enrolamentos, chamados de enrolamentos de armadura;
- Comutador: Dispositivo mecânico no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura. Sua função é, em conjunto com as escovas, realizar a comutação, atuando como um “inversor mecânico”, ou seja, inverter o sinal de corrente internamente à armadura.

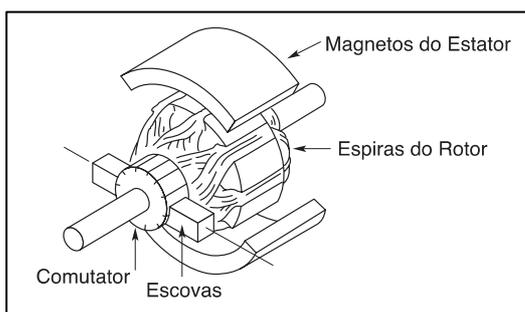


Figura 18 – Partes de um motor de corrente contínua.
Fonte: Parker (2003).

O motor CC com escova baseia-se no conceito de que é criada uma força quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica quando inserido em um campo magnético. A força que age sobre este condutor é o produto vetorial da corrente elétrica e densidade do fluxo magnético (PARKER 2003):

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \quad (3)$$

Onde:

\vec{F} : Força [N];

\vec{I} : Corrente elétrica [A];

\vec{B} : Densidade de fluxo magnético [T].

A força disponível pode ser aumentada utilizando mais condutores, ou enrolando-se um fio numa forma de bobina. Esta é a base do motor CC. Para utilizar esta força para produzir torque contínuo quando este é requerido por uma aplicação prática, faz-se necessária a utilização da maior força possível. Para tal um grande número de condutores deve ser colocado no campo magnético. Esta configuração produz um cilindro de fios, com as espiras colocadas em paralelo ao eixo do cilindro.

Um eixo mecânico passando pelo eixo do cilindro age como pivô formando assim a armadura do motor conforme ilustrado na figura 19 (PARKER, 2003).

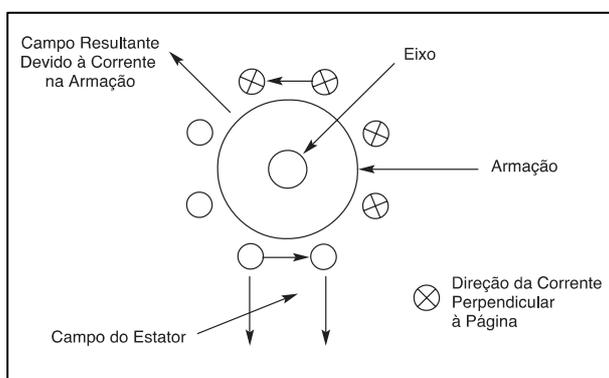


Figura 19 – Armadura do motor CC.

Fonte: Parker (2003).

A utilização do comutador em máquinas CC tem por objetivo realizar a inversão do sentido da corrente elétrica na armadura (duas vezes a cada volta do rotor) de tal modo a garantir que o torque tenha sempre o mesmo sentido (BARBOSA, 2001). Com a rotação da armadura, o campo magnético, produzido pela tensão de armadura, é também rotacionado. A armadura ficará parada quando seu campo magnético estiver alinhado com o campo gerado no estator caso não haja comutador para mudar constantemente a direção da corrente em cada bobina da armadura (PARKER, 2003).

A figura 20 mostra o sentido das forças que agem sobre uma espira. Sem o mecanismo da comutação, a espira da armadura estacionaria na posição vertical (X-Y) ou posição de equilíbrio. Quando a espira passa por uma posição de equilíbrio, o comutador muda a corrente, mudando também o sentido do torque e evitando que a espira volte para a posição de equilíbrio (WEG, 2006).

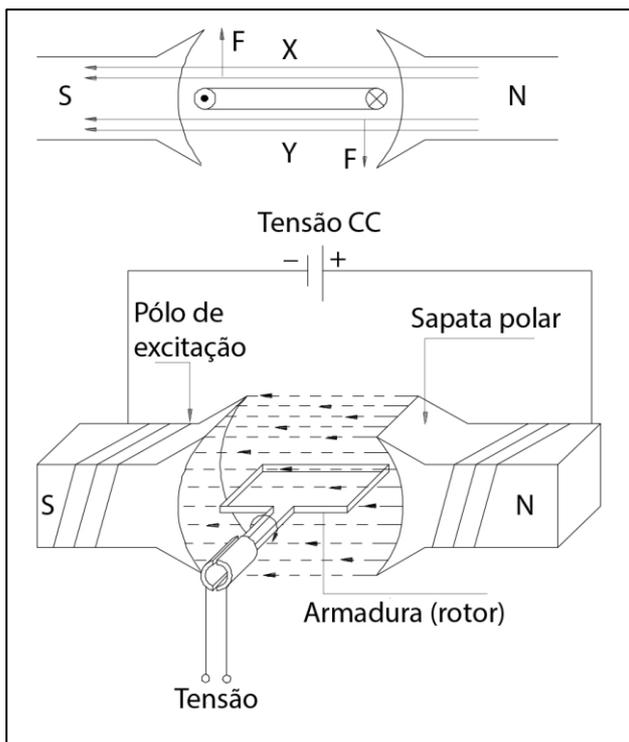


Figura 20 – Armadura do motor CC.
Fonte: WEG (2006).

2.3.2 Velocidade do Motor CC

A velocidade é dada pelo número de rotações do eixo com relação ao tempo, sendo expressa em RPM. Uma redução no campo magnético do motor implica em um acréscimo na sua velocidade e um aumento no campo provoca uma diminuição na velocidade do motor. Através da equação 4 observa-se que a velocidade do motor varia com a excitação do campo. Costuma-se empregar uma forma conveniente de controlar a velocidade variando o fluxo do campo através do ajuste da resistência no circuito do enrolamento de campo (VILLAR, 2006).

$$n = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{k \cdot \phi} \quad (4)$$

Onde:

n: Velocidade do motor [RPM];

V_a : tensão na armadura [V];

R_a : Resistência da armadura [Ohm];

I_a : Corrente na armadura [A];

ϕ : Fluxo por polo [$T \cdot m^2$];

Sendo k uma constante da equação (4) obtida de:

$$k = \frac{p.Z}{60.b.10^8} \quad (5)$$

Onde:

p: Número de pólos;

Z: Número total de condutores na armadura;

b: Número de caminhos paralelos através da armadura, dependendo do tipo de enrolamento da armadura.

Os motores de corrente contínua, em função do seu princípio de funcionamento, permitem variar a velocidade de zero até seu valor nominal aliando com a possibilidade de ter-se conjugado constante. Esta característica é importante porque desta forma torna-se possível realizar o acionamento em várias aplicações que exigem ampla faixa de variação de velocidade com excelente precisão (WEG, 1997).

2.4 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

2.4.1 Definição de sistema de aquisição de dados

Para Ramires (2003), os sistemas de aquisição são definidos como medição de grandezas físicas. Estas grandezas físicas em sua maioria são de naturezas analógicas. Tais grandezas apresentam energia que necessitam ser captadas e convertidas para que possam ser tratadas pelos circuitos eletrônicos, para isso faz-se necessária a utilização de alguns elementos. Estes elementos são sensores e transdutores que captam as grandezas analógicas transformam-nas em quantidades elétricas como tensão, corrente ou impedância.

2.4.2 Arquitetura dos Sistemas de Aquisição

Os sistemas típicos de aquisição de dados são compostos pelos seguintes componentes (RAMIRES, 2003):

- Sensores e transdutores;
- Condicionador de sinais;
- Placa de aquisição de dados;
- Processador;
- *Software* de tratamento de informações.

Um sistema de aquisição de dados é responsável por captar os sinais através dos sensores e transmiti-los através de um condicionador de sinais para que as especificações da placa de aquisição de dados (corrente, tensão e impedância) sejam atendidas e que esta placa possa converter as grandezas físicas de natureza analógica para sinais digitais sendo analisadas pelo processador do sistema que por sua vez pode converter estes sinais para analógicos e utilizados como parâmetros de correção do sistema utilizando-se de atuadores para esta tarefa (RAMIRES, 2003). A figura 21 exibe em um diagrama de blocos a arquitetura simplificada de um sistema de aquisição de dados.

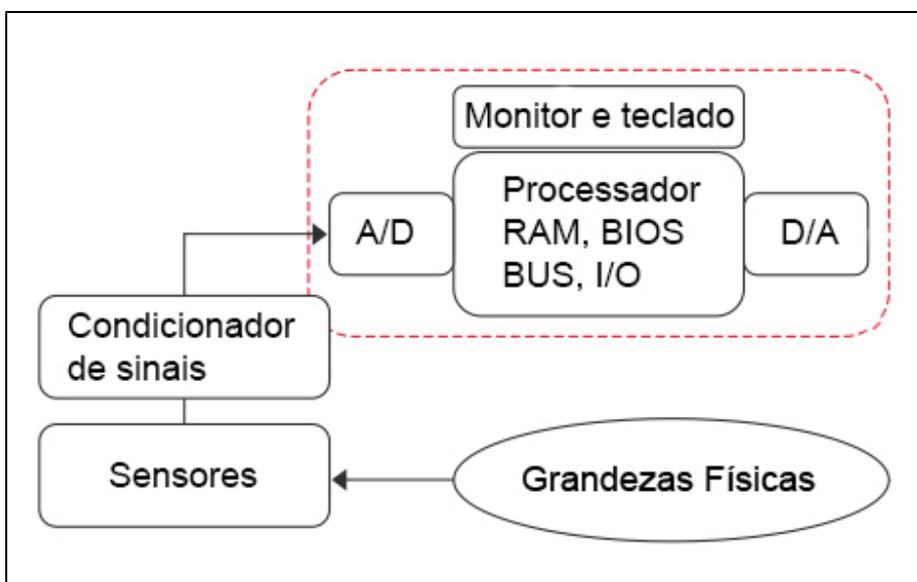


Figura 21 – Arquitetura dos Sistemas de aquisição de dados.
 Fonte: Ramires (2003).

2.4.3 Características das placas de aquisição de dados

As placas de aquisição são compostas dos seguintes componentes (RAMIRES, 2003):

- Entradas Analógicas: As especificações das entradas analógicas fornecem as informações referente a precisão do sistema. De acordo com as especificações são encontrados dados sobre número de canais, taxa de amostragem, resolução e escala de amostragem;

- Número de Canais: São especificadas pelas entradas *single-ended* e diferenciais. Entradas *single-ended* são referenciadas ao ponto de terra comum, essas entradas são amplamente utilizadas em sinais de entradas de alto nível (acima de 1 volt) e que tenham distância pequena, menos de 3 metros, entre os sensores, transdutores e a placa de aquisição. As entradas diferenciais são utilizadas para sinais de baixo nível, menores que 1 volt (V) e quando se espera que os erros causados por ruídos sejam reduzidos, pois nessas entradas cada uma possui seu próprio terra;

- Taxa de Amostragem: Este parâmetro determina a frequência em que as conversões serão realizadas, quanto maior a taxa de amostragem mais original será a representação do sinal;

- Escala: Este parâmetro determina os níveis de tensão máximos e mínimos que o conversor pode quantizar;

- Conversor Analógico/Digital (A/D): Estes convertem os sinais analógicos adquiridos pelos sensores e transdutores para digitais. A precisão dessa conversão é dependente de duas variáveis, resolução e linearidade do conversor. A característica mais importante nos conversores A/D é sua taxa de amostragem, ou seja, seu processamento, os elementos que especificam o processamento de um conversor são tempo de conversão, tempo de aquisição e tempo de transferência;

- Tempo de conversão: Tempo de conversão do sinal analógico para o sinal digital;

- Tempo de aquisição: Tempo em que o sinal leva para ser adquirido;

- Tempo de Transferência: Tempo em que o sinal leva para ir da interface para o centro de processamento. Segundo o Teorema de Nyquist, “a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente”;

- Saídas Analógicas: Estas são necessárias para prover estímulos para o sistema, a qualidade do sinal analógico produzido depende das especificações do tempo de ajuste, *slew rate* e resolução de saída;

- Tempo de ajuste: Tempo que a saída leva para alcançar um modo estável;
- *Slew Rate*: Taxa máxima de mudança que o conversor D/A (Digital/Analógico) pode produzir para o sinal de saída;
- Resolução de Saída: Número de bits no código digital que geram o sinal analógico;
- *Triggers*: Existem *triggers* digitais e analógicos ambos servem para parar ou começar a aquisição, baseados em um evento externo;
- Entradas e Saídas Digitais: Estas interfaces são utilizadas em sistemas baseados em PC (computador pessoal) para controlar processos, gerar padrões e comunicar com periféricos. Há possibilidade de utilizar módulos de acionamento quando o controle do periférico necessita de tensão e corrente alta, devido ao fato destas saídas trabalharem em torno de 0 a 5 volts de corrente contínua (V_{CC}) e alguns miliamperes (mA), são utilizados módulos opto acoplados para gerar o sinal de potência necessário para controlar o dispositivo;
- Contadores e Temporizadores: São utilizados para contagem de eventos digitais, temporização digital de pulsos e geração de ondas quadradas e pulsos. Para se obter essas aplicações três sinais de contadores e temporizadores são utilizados, gatilho (*gate*), fonte e Saída;
- *Gate*: Entrada digital utilizada para habilitar ou desabilitar a função do contador;
- Fonte: Entrada digital que causa o incremento do contador a cada pulso, gerando a base de tempo para operações de temporização e contagem;
- Saída: Gera ondas quadradas ou pulsos na linha de saída. As especificações mais importantes para contagem e temporização são a resolução e o *clock*;
- Resolução: Número de bits que o contador utiliza;
- *Clock*: Determina a velocidade que pode-se ativar a fonte de entrada digital.

2.4.4 Softwares de aquisição

Os *softwares* de aquisição de dados são específicos para cada aplicação, os mesmos tratam os sinais digitalizados e de acordo com a aplicação armazenam ou geram sinais na saída para controle de dispositivos (RAMIRES, 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Com base nos princípios de funcionamento do transdutor de efeito Hall, do *encoder* incremental, do motor de corrente contínua e da descrição de um sistema de aquisição de dados, faz-se necessária a escolha e utilização mais adequada de cada equipamento para que possam ser integrados e analisadas as informações provenientes do transdutor Hall e *encoder* incremental óptico, os quais foram conectados ao mesmo motor visando que os sinais de saída destes, coletados por uma placa de aquisição de dados, sejam gerados pelo movimento angular da mesma fonte, no caso o motor de corrente contínua. Sendo assim os equipamentos utilizados foram escolhidos com base em suas características principais, para viabilizar a integração do sistema e análise técnica. Estas características são apresentadas a seguir.

3.1.1 Transdutor de efeito Hall digital

O transdutor de efeito Hall digital utilizado neste trabalho é fabricado pela empresa norte americana Allegro MicroSystems. Seu encapsulamento pode ser encontrado sob o código A3423.

Este possui em sua estrutura 2 sensores de efeito Hall com capacidade de fornecer, além dos sinais de saída (filtrados) de cada sensor através das saídas A e B, outras duas saídas que são caracterizadas por prover sinais de velocidade e direção de movimento do campo magnético aplicado aos sensores (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2013), caracterizando-o como transdutor de posição e velocidade.

A figura 22 apresenta os dois tipos de encapsulamentos (SOIC sufixo L e SIP sufixo K) que são fabricados pela empresa norte americana.

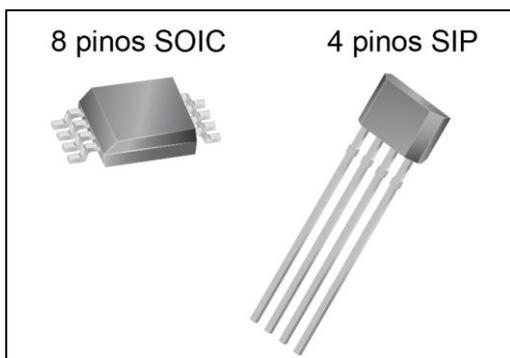


Figura 22 – Tipos de encapsulamento do transdutor Hall.
Fonte: Allegro Microsystems (2013).

De acordo com a fabricante, este circuito integrado (CI) possui um regulador de tensão que o permite receber alimentação de uma faixa de 3,8 a 24 V_{CC} e corrente de entrada com valores entre 3,4 a 14 mA. Como este CI fornece sinais de saída de natureza digital, ou seja, um forma de onda quadrada, o tempo de mudança de sinal baixo para sinal alto ($5 V_{CC}$), também chamado de borda de subida é de 200 ns (nanosegundos) e para borda de descida (mudança do sinal alto para baixo) de 300 ns (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2013).

A figura 23 demonstra as formas de onda dos canais A, B, Velocidade e Direção do circuito integrado A3423, assim como o formato da onda detectada por cada sensor de efeito Hall que apresenta um perfil senoidal.

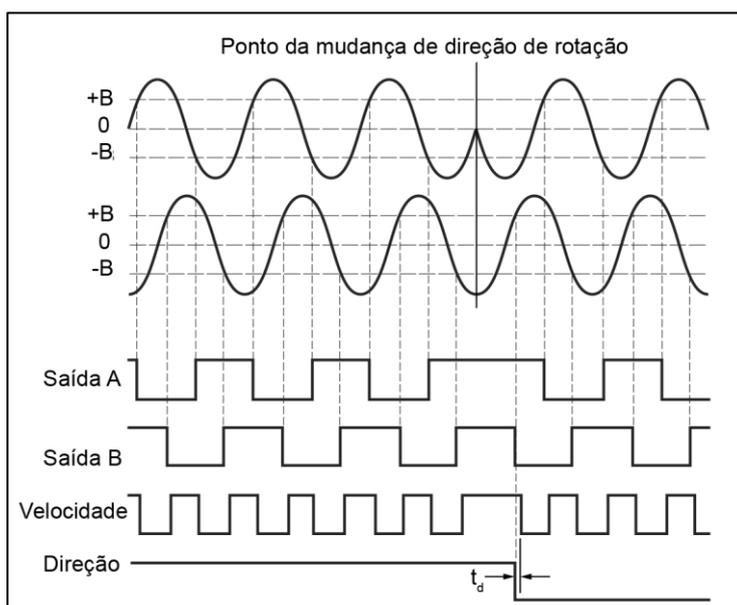


Figura 23– Formas de onda do encapsulamento A3423.
Fonte: Allegro Microsystems (2013).

O circuito integrado do modelo A3423 é responsável por realizar um filtro na forma de onda senoidal do sensor Hall de modo a deixá-lo em um modelo digital e disponibiliza-os nas saídas A e B do CI.

Quando estes sensores são estimulados por um ímã em movimento com campo magnético externo norte e sul, + B e -B respectivamente, produzem a forma de onda descrita na figura 23. Este formato de onda deve-se a proximidade do ímã em relação a direção perpendicular do sensor, ou seja, o pico ou vale da forma de onda é ocasionado quando o pólo norte ou sul do ímã fica perpendicular ao sensor de efeito Hall e o formato desta altera-se a medida que afasta-se ou aproxima-se o pólo magnético oposto do ímã.

A figura 24 apresenta um diagrama de blocos desse circuito que é responsável por tornar os sensores, no interior do encapsulamento, em transdutores. Neste diagrama os sensores são representados por E1 e E2.

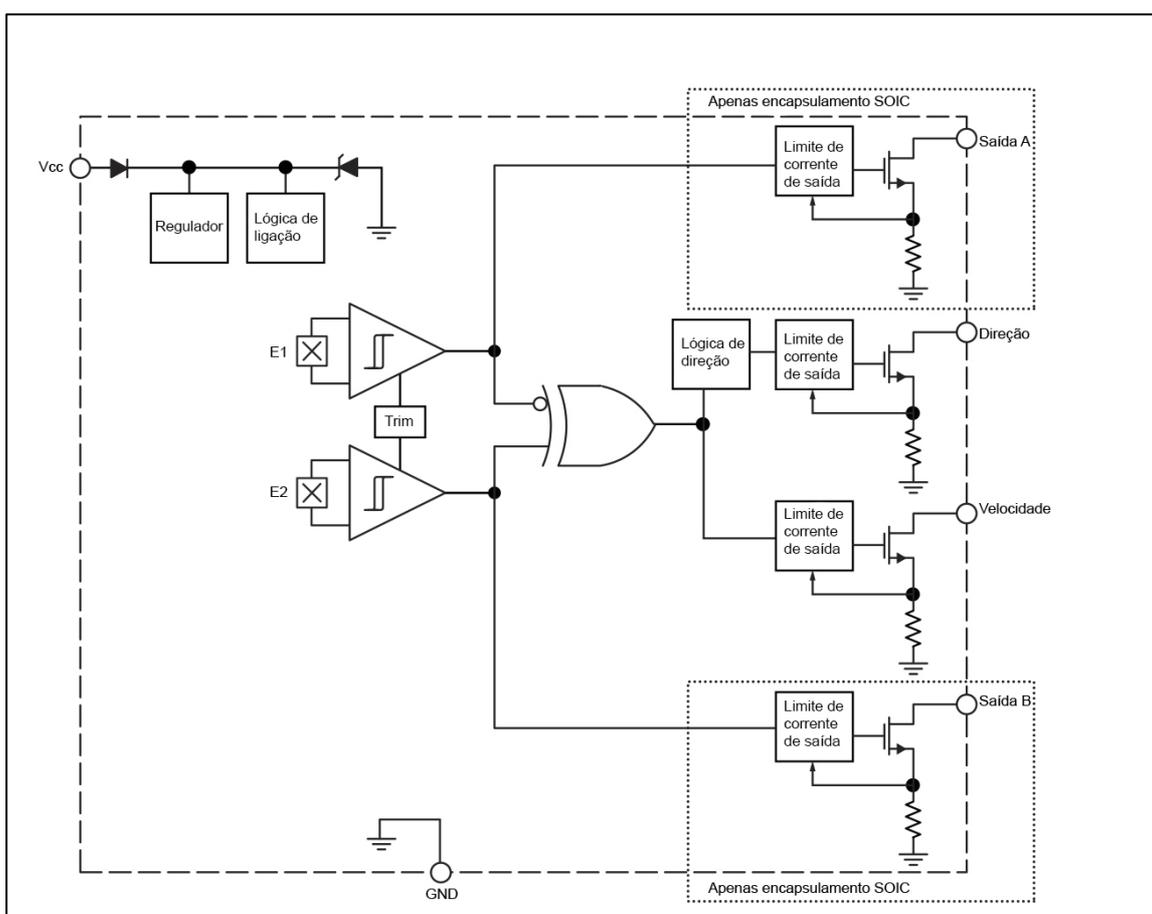


Figura 24– Diagrama de blocos do CI A3423
Fonte: Allegro MicroSystems (2013).

Como ambos os sensores (E1 e E2) apresentam um modelo de onda

senoidal, os *schmitt triggers* filtram esta para um formato digital ou quadrado. A saída de cada o filtro é interligada em seus respectivos pinos de saída do CI. Porém ambos os filtros são, também, interligados em uma porta lógica ou-exclusiva, entretanto a entrada A desta porta recebe uma lógica de inversão de sinais, ou seja, quando o *schmitt trigger* transmite um sinal alto (1 em lógica binária) à porta lógica, o sinal recebido por esta será um nível baixo (0 para lógica binária). Esta inversão é realizada para assegurar a correta quantidade de pulsos para a saída de velocidade, porque há a possibilidade de E1 e E2 estarem ambos em nível alto ou baixo simultaneamente e para disponibilizar um sinal de saída com o sentido de direção de movimento do imã que estimula os sensores.

3.1.2 Transdutor de efeito Hall analógico

Como elucidado no primeiro capítulo deste trabalho, existem vários tipos de transdutores de efeito Hall, porém agora será explicado o transdutor de efeito Hall analógico: *Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors*, da série A1301.

Este é fabricado o pela Allegro MicroSystems sendo encontrado sob o código A1301KUA-T. Ele fornece um sinal de saída linearmente proporcional ao sinal de entrada, ou seja, a tensão de saída fornecida por esse componente é diretamente proporcional ao valor em Gauss da indução campo magnético aplicado à ele (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2006).

O transdutor de efeito Hall A1301KUA-T opera com alimentação de 4,5 a 6 Volts, e quando não há campo magnético significativo aplicado à ele, sua tensão de saída é igual a metade da tensão de alimentação, ou seja, o ponto de quiescência é 50% do tensão de entrada. Este dispositivo é equipado com um amplificador linear, como pode ser visto na figura 25 o que ajuda a evitar os problemas com nível de tensão baixo do sinal de saída. O A1301KUA-T também é munido de um circuito interno composto pelos elementos offset e *trim*, mostrados na figura 25, que regula o ganho interno e auxilia a manter a precisão do sinal *output* (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2006).

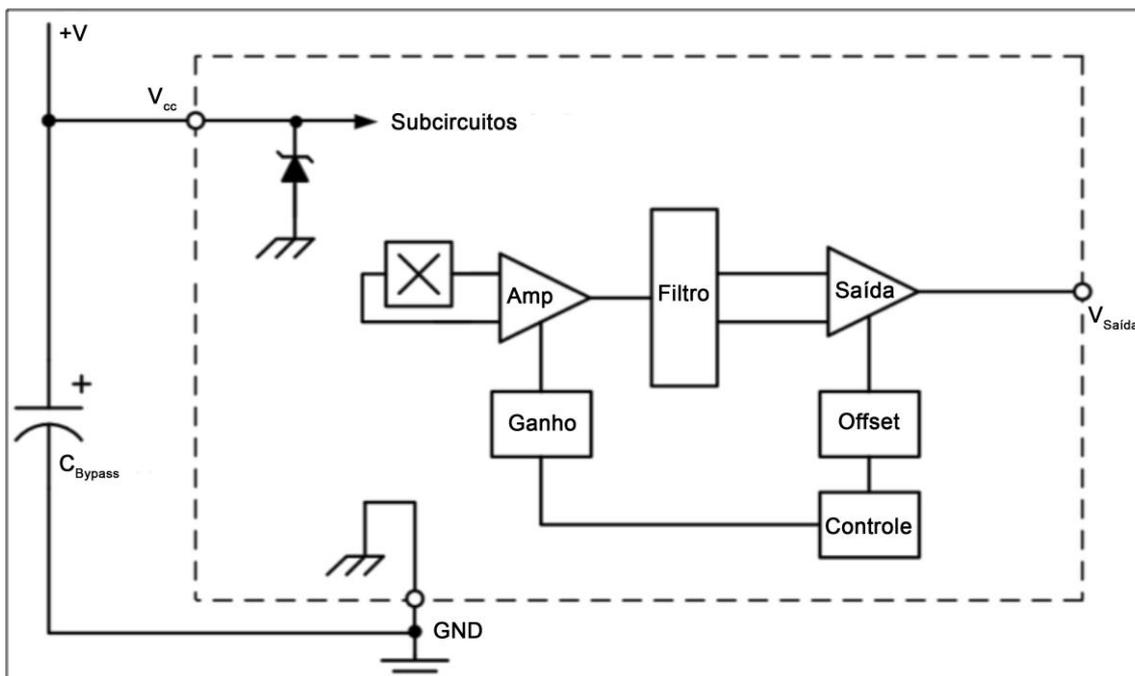


Figura 25 – Diagrama de blocos do CI A1301KUA-T.
 Fonte: Allegro MicroSystems (2006).

A linearidade do sinal de saída deste dispositivo é mostrada na figura 26. Interpretando o gráfico, percebe-se que ao alimentar o sensor com 5 volts, a tensão de resposta terá uma variação de 2,5 milivolts por 1 Gauss. Por exemplo, nesta condição de alimentação, se uma indução magnética de 10 Gauss positivos for exposta a este sensor sua resposta será de 2,525 Volts, ou seja, 2,5 V que é o valor da tensão na saída quando não há indução de campo magnético, mais 0,025 Volts correspondente aos 10 Gauss lidos pelo sensor. Se este fosse um campo magnético negativo, o valor de saída seria de 2,475 Volts.

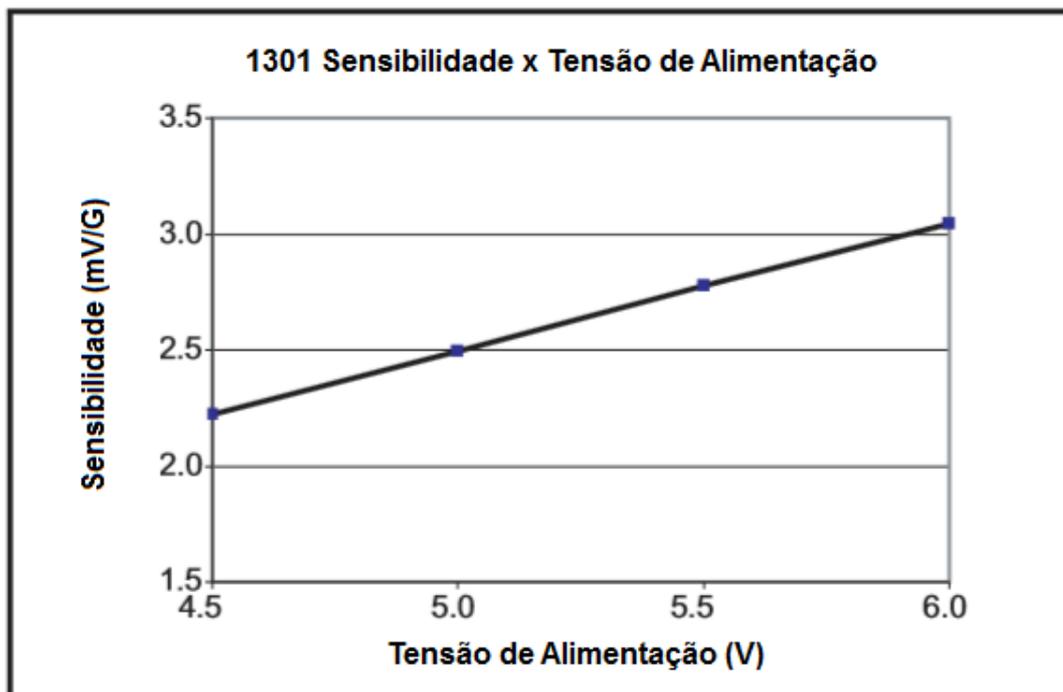


Figura 26– Gráfico da sensibilidade do sensor.
Fonte: Allegro MicroSystems (2006).

Este modelo também mostrou-se viável para a aplicação neste projeto devido a ampla faixa de temperatura em que ele opera, a qual vai de -40°C a 125°C com baixa variação de sinal. O gráfico na Figura 27 mostra que a variação de sensibilidade do sinal de saída causada pela temperatura, dentro da faixa de operação especificado, é no máximo de $0,25 \cdot 10^{-3}$ Volts por Gauss (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2006). Considerar o gráfico do encapsulamento tipo UA na leitura do gráfico.

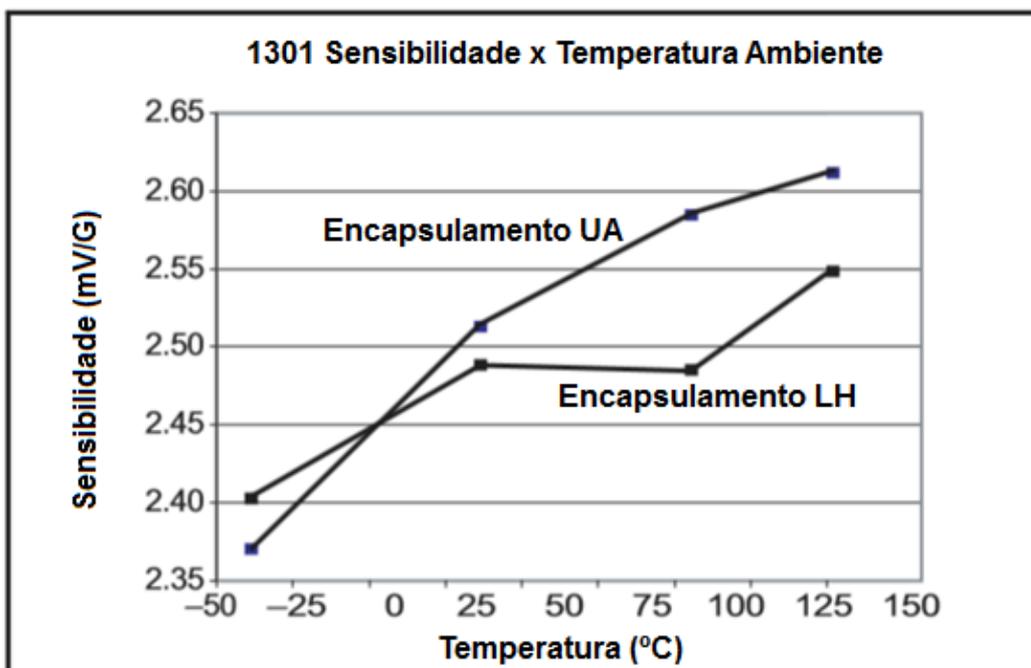


Figura 27 – Gráfico da influência da temperatura.
Fonte: Allegro MicroSystems (2006).

O transdutor A1301KUA- pode ser encontrado em dois tipos de encapsulamento: tipo UA e tipo LH. O tipo LH é para montagem na superfície de uma placa de circuito impresso, já o tipo UA permite maior flexibilidade na aplicação, pois seus terminais têm mais de 14 mm de comprimento para serem fixados em orifícios. Estes dois tipos de encapsulamentos são fabricados totalmente livres de chumbo (Pb) (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2006).

3.1.3 Encoder Incremental Rotativo

Dentre a vasta gama de *encoders* incrementais rotativos presentes no mercado, optou-se por um que apresenta características semelhantes ao sensor de efeito Hall selecionado, ou seja, com no mínimo dois canais. O transdutor de posição selecionado, é fabricado pela empresa Autonics. O modelo selecionado faz parte da série E40, exibido na figura 28, comercializado pela empresa de origem coreana.



Figura 28 – *Encoder incremental série E40.*
Fonte: Autonics (2013).

Este transdutor apresenta as seguintes características (AUTONICS, 2013):

- Alimentação de 12 a 24 V_{CC} ;
- Nível alto de saída com 10 V_{CC} ;
- Corrente máxima de alimentação de 80 mA;
- Corrente máxima de saída de 30 mA;
- Tempo de borda de subida e de descida de 1 microsegundo (μs);
- Canais A, B e Z (detecção de passagem por um referencial);
- 1024 pulsos ou ciclos por revolução;
- Velocidade máxima de operação de 5000 RPM;
- Diâmetro do eixo sólido de 6 milímetros (mm).

O *encoder* incremental que possui estas características está sob o código, definido pelo fabricante, de E40S6-1024-3-1-24. A forma de onda de saída de cada canal também é de formato digital, como descrito no item 2.2.4.2. O canal Z deste transdutor possui a característica de ser o “zero” ou ponto de referencia inicial. Logo, quando monitora-se este juntamente com os canais A e/ou B é assegurada o inicio da contagem a partir deste ponto. A Figura 29 demonstra as formas de onda destes 3 canais e a diferença entre as fases dos canais A e B (AUTONICS, 2013).

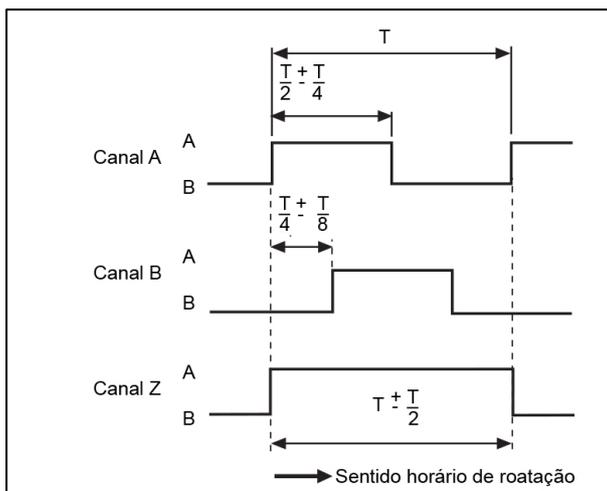


Figura 29 – Formas de onda do *encoder* da série E40.
Fonte: Autonics (2013).

3.1.4 Motor CC com redução e transdutor Hall.

O motor de corrente contínua que foi utilizado para realizar o estudo de viabilidade técnica da substituição do *encoder* incremental por um transdutor de efeito Hall é fabricado pela empresa espanhola Doga Motores e encontrado pelo nome de Motor Doga 319 com sensor Hall.



Figura 30 – Motor Doga 319 com sensor Hall
Fonte: Doga (2013).

Esta máquina é constituída por um rotor bobinado com doze pares de pólos magnéticos. O estator é de imãs permanentes, conforme mostrado na figura 31. Um

acoplamento mecânico composto pelo eixo do rotor com uma rosca sem fim e uma engrenagem formam um sistema redutor com relação de redução de 81:1, ou seja, a cada 81 voltas do rotor o eixo de saída do redutor faz uma volta completa.



Figura 31 – Partes do Motor Doga 319.
Fonte: Autoria Própria.

Acoplado a este motor há um transdutor de efeito Hall digital que faz a leitura de um ímã circular de 12 pares de pólos que está acoplado ao eixo do rotor, como o fator de redução é 81:1, o transdutor fornece 972 pulsos por revolução do eixo do redutor. O transdutor gera em sua saída dois sinais defasados entre si, como mostrado na figura 30, para possibilitar a leitura de informação da direção de rotação.

O sentido de rotação pode ser obtido através da seguinte interpretação dos sinais mostrado na Figura 30: Lê-se o estado do elemento A do transdutor e durante o período em que este canal estiver em nível lógico alto faz-se a leitura do canal B. Dentro deste período o canal B apresentará uma mudança de nível lógico, se a alteração for de nível lógico 0 para 1 o motor está girando no sentido anti-horário, se for de 1 para 0, o sentido de giro é horário.

O funcionamento mais detalhado deste sensor é explicado no item 2.1.

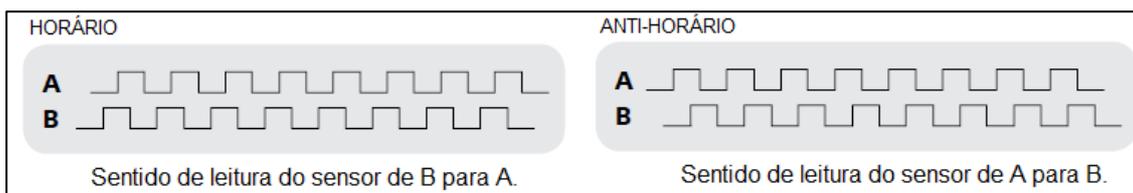


Figura 32 – Sinais dos canais A e B do sensor Hall.
Fonte: Adaptado de Doga (2013).

A seguir são apresentados os dados técnicos, que podem ser encontrados no catálogo original deste motor nos anexos deste documento.

- Motor:

- Relação de transmissão: 81:1;
- Número de pólos magnéticos (n): 12.

- Transdutor Hall:

- Pulsos/Revolução (eixo do redutor): 972;
- Pulsos/Revolução (eixo do rotor): 12;
- Tensão de alimentação: 5 Volts.

Na figura 33 são mostrados os diagramas elétricos e de conexões do motor Doga 319.

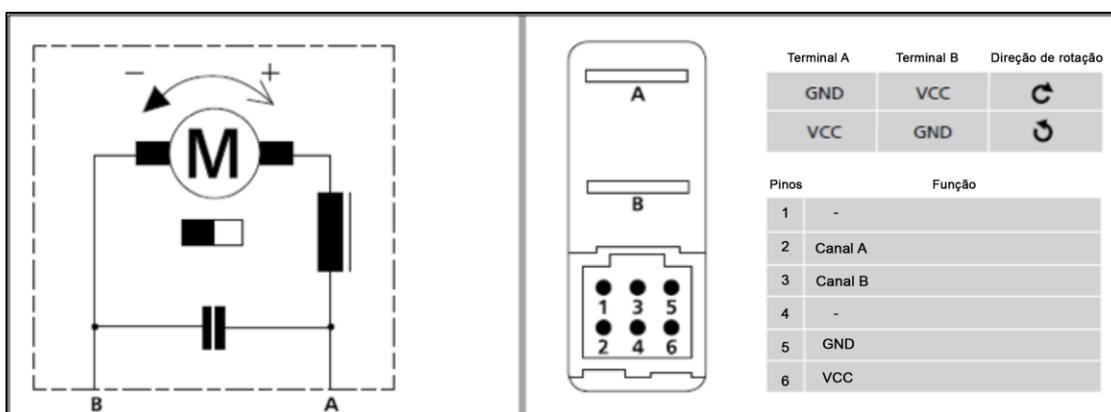


Figura 33 – Diagramas elétrico e de conexões.
Fonte: Adaptado de Doga (2013).

A velocidade de rotação deste motor pode ser medida de duas maneiras:

- Medindo o intervalo de tempo entre duas rampas de subida ou descida e inverter esse sinal obtendo a frequência;
- Medindo diretamente a frequência do sinal.

Assim é possível obter a velocidade em RPM. aplicando a seguinte equação:

$$W = \frac{60.f}{81.n} \quad (6)$$

Onde:

w: Velocidade de rotação [RPM];

f: Frequência do sinal [Hz];

n: número de pares de polos.

3.1.5 Placa de aquisição de dados

Para poder coletar e armazenar os valores e formas de onda do transdutor Hall e *encoder* em um *software* específico para aquisição de dados, há a necessidade de um dispositivo entre computador e transdutores. Este equipamento é conhecido como placa de aquisição de dados (DAQ), o modelo escolhido para a realização deste trabalho é desenvolvido pela empresa norte americana National Instruments sob o nome NI USB-6008[®]. Ela oferece funções básicas de aquisição de dados para aplicações voltadas a medições de experimentos em laboratórios acadêmicos. Este modelo de placa apresenta as características a seguir (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012):

- Conexão e alimentação com computador através de porta USB (*universal serial bus*);
- Compatível com sistemas operacionais Windows[®], Linux[®] e Mac OS[®];
- Medição de tensões;
- Entradas analógicas:
 - 8 canais *single-ended*;
 - 4 canais diferenciais;
 - Resolução de 12 bits;
 - Taxa de amostragem máxima de 10 mil amostras por segundo (kS/s);
 - Faixa máxima de tensão de -10 V a +10 V.
- Saídas Analógicas:
 - 2 canais;
 - Resolução de 12 bits;
 - Faixa máxima de tensão de 0 a +5 V;

- Taxa de atualização de 150 amostras por segundo (S/s);
- *Drivers* de corrente de 10 mA.
- Entradas e saídas (E/S) digitais:
 - 12 canais bidirecionais;
 - Nível lógico TTL (lógica de transistor-transistor);
 - Faixa máxima de entrada e saída de 0 a 5 V_{CC};
 - *Drivers* de corrente de 102 mA.
- Contadores / temporizadores:
 - 1 contador;
 - Frequência máxima da fonte de 5 megahertz (MHz);
 - Faixa máxima de tensão de 0 a +5 V_{CC};
 - Nível lógico TTL;
 - Resolução de 32 bits.

A figura 34 apresenta a DAQ modelo 6008 com conexão USB.



Figura 34– Placa de aquisição de dados NI USB-6008®.
 Fonte: National Instruments (2012).

O acesso aos canais analógicos, digitais, contador e terra (GND) dá-se pelas duas abas laterais do equipamento, o diagrama de pinos é descrito na figura 35. As entradas analógicas são representadas por AI n, as entradas analógicas diferenciais por AI n +/-, saídas analógicas por AO n. Já as entradas e saídas digitais são representadas por P0 n (porta 0 de 0 a 7 canais) e P1 n (porta 1 de 0 a 3 canais). Há um pino (PFI 0) nesta DAQ que pode ser ajustado como gatilho (*trigger*) ou contador além de pinos com tensões de +2,5 V_{CC} e +5 V_{CC} (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

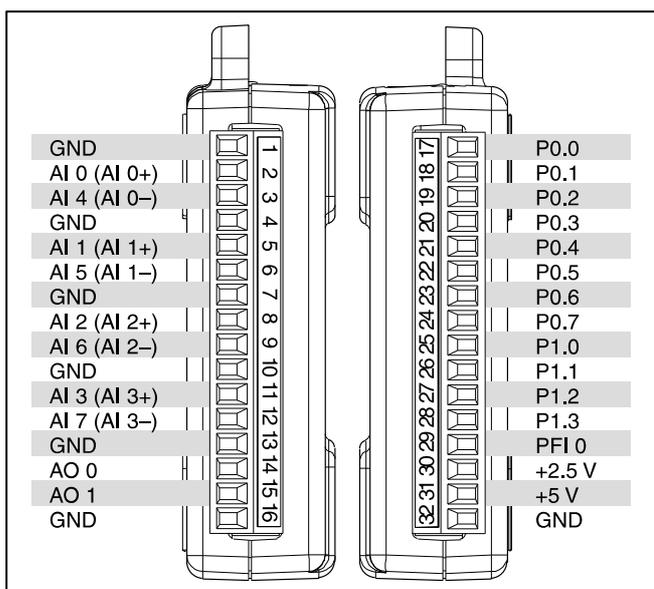


Figura 35 – Diagrama de pinos da DAQ USB-6008.
 Fonte: National Instruments (2012).

Esta placa de aquisição de dados tem 8 canais de entradas analógicas que podem ser usadas como quatro entradas analógicas diferenciais ou 8 *single-ended*. O diagrama de blocos da Figura 36 demonstra o circuito de entradas analógicas, ele é composto por (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012):

- 1 Multiplexador que codifica as 8 AIs para o amplificador de ganho programável (PGA);
- 1 PGA que tem ganhos de 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 ou 20. O valor do ganho é automaticamente calculado com base na tensão de entrada do circuito cujos dados serão adquiridos;
- 1 Conversor A/D responsável por converter uma tensão analógica em um código digital;
- 1 AI FIFO (*analogic input first-in-first-out*) que realiza ambas as conversões A/D únicas ou múltiplas de um número de amostras. Um *buffer* de fila (FIFO) mantém os dados durante as aquisições para garantir que nenhum dado seja perdido.

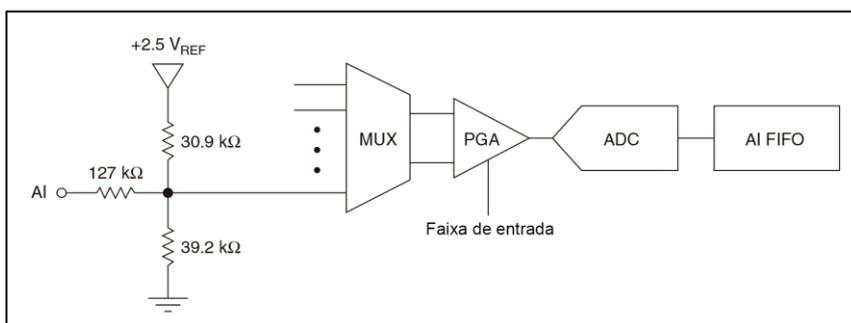


Figura 36– Circuito de entrada analógica DAQ USB-6008.
Fonte: National Instruments (2012).

Para realizar as medições ou coleta das informações utilizando os canais de entrada analógica presentes nesta DAQ, recomenda-se seguir a configuração representada na Figura 37 para sinais referenciados entre terra e fonte do sinal e sinais em flutuação. O terra ou comum da fonte do sinal deve ser conectado à placa de aquisição no pino GND e terminal positivo da fonte em uma das 8 AI presentes (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

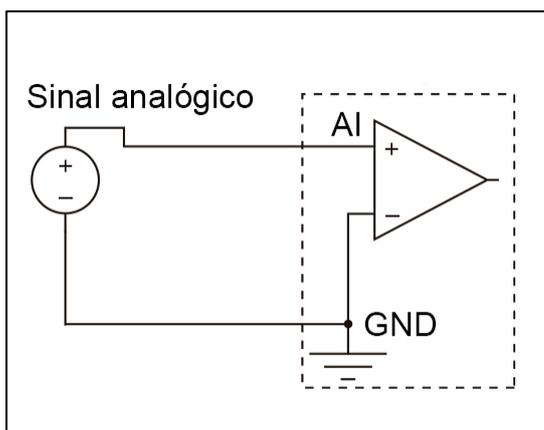


Figura 37 – Configuração de conexão da AI DAQ USB-6008®.
Fonte: National Instruments (2012).

3.1.6 Software de aquisição de dados

O *software* utilizado para exibir e salvar as configurações da DAQ assim como armazenar os valores provenientes do transdutor Hall e *encoder* incremental foi desenvolvido também pela empresa norte americana National Instruments. Dentre os diversos aplicativos elaborados por esta empresa, escolheu-se o LabView Signal Express®. Trata-se de uma ramificação de um *software* comumente utilizado para programação e desenvolvimento de instrumentação virtual, chamado LabView®, um

ambiente de desenvolvimento altamente produtivo que os engenheiros e cientistas usam para programação gráfica e integração de *hardware* para criar e implantar sistemas de medição e controle. LabView SignalExpress[®] otimiza a instrumentação virtual de forma interativa, é dedicado para apresentar, adquirir, analisar, comparar, importar e exportar sinais sem a necessidade de aplicações voltadas a programação. Ele é compatível com os instrumentos virtuais (VI) criados em LabView[®]. Este *software* é compatível apenas com sistemas operacionais Windows[®] (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012). A Figura 38 apresenta uma tela de leitura de dados e alguns dispositivos que podem ser utilizados como DAQs.



Figura 38 – Dispositivos de aquisição e LabviewSignalExpress.
Fonte: NI SignalExpress (2013).

3.2 EXPERIMENTOS DESENVOLVIDOS

Para realizar a análise proposta neste trabalho, alguns experimentos foram necessários, como por exemplo, efetuar os testes dos sensores Hall, adquirir dados com a DAQ entre outras atividades essenciais para o sucesso do projeto. Este capítulo apresenta os testes, dificuldades, experimentos e os métodos utilizados para realizá-los.

3.2.1 Experimento 1 - Teste com transdutor Hall analógico

Para atender a finalidade proposta neste trabalho, inicialmente considerou-se a utilização de um transdutor de efeito Hall analógico, cujo funcionamento foi explicado no item 3.1.2 deste documento, para realizar a leitura do campo magnético

do rotor do motor de corrente contínua e assim fornecer um sinal de saída que seria uma forma de onda até então desconhecida. Na figura 39 é mostrado o diagrama de blocos da experiência 1 e na tabela 1 são apresentados os materiais utilizados.

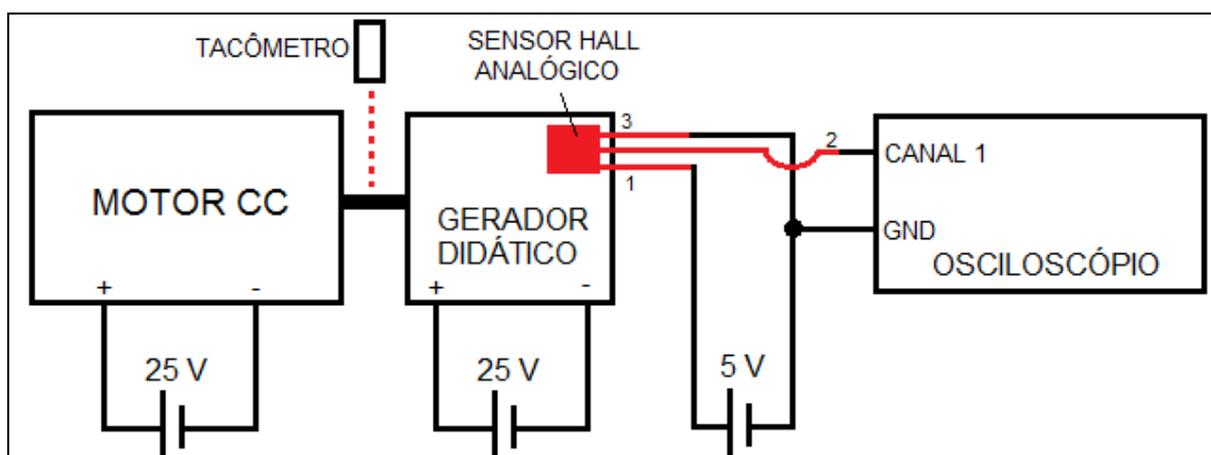


Figura 39: Diagrama de blocos – Teste com transdutor Hall analógico.
FONTE: Autoria própria.

Tabela 1 – Lista de materiais utilizados no experimento 1

Item	Material	Quantidade
1	Motor CC	1
2	Gerado Didático	1
3	Osciloscópio	1
4	Fonte de alimentação	3
5	Transdutor Hall Analógico (A1301)	1
6	Tacômetro	1

Fonte: Autoria própria.

Por motivos que serão esclarecidos na próxima seção, não foi possível prosseguir com o uso dos transdutores Hall analógicos, no entanto, conclusões valiosas foram obtidas a partir deste teste, as quais também serão relatadas ao final.

Desta forma, para possibilitar a configuração de um *software* que interpretaria dos dados fornecidos pelo sensor, seria necessário conhecer a forma de onda produzida na saída do elemento Hall. Logo, realizou-se um teste com este para obter dados que estão apresentados ao longo deste capítulo.

Para realização desta experiência foi utilizado um gerador elétrico didático, o qual possui bobinas eletromagnéticas que rotacionam com o auxílio de um motor CC conforme pode ser visto na figura 40. O sensor foi afixado na estrutura do

equipamento de forma que este ficaria com sua face totalmente voltada para a extremidade da bobina eletromagnética e o mais próximo possível deste campo magnético. Então, energizaram-se essas bobinas e o motor CC dando movimento de rotação ao sistema.

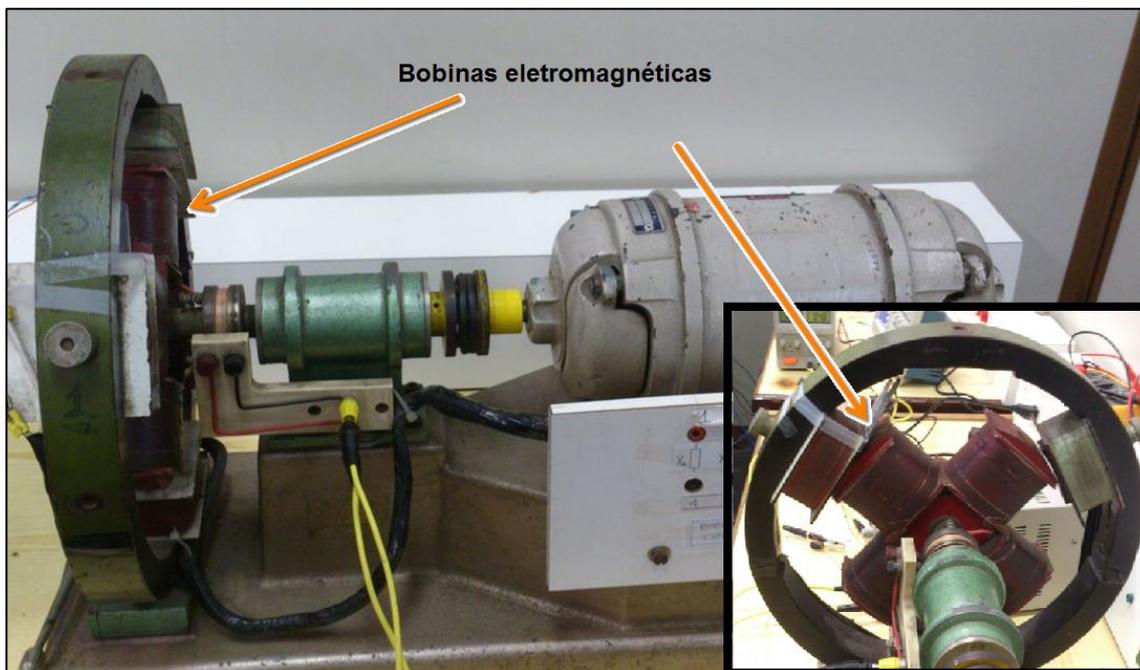


Figura 40: Gerador elétrico didático.
Fonte: Autoria Própria

Conforme foi apresentado anteriormente, o elemento Hall analógico fornece um sinal variável de tensão na saída de acordo com o campo magnético aplicado a ele. Assim, para uma densidade de campo nula o transdutor fornece 2,5 volts, uma vez que sua alimentação é de 5V, e incrementa-se ou decrementa-se este valor de acordo com a polaridade e intensidade do campo magnético ao qual está exposto.

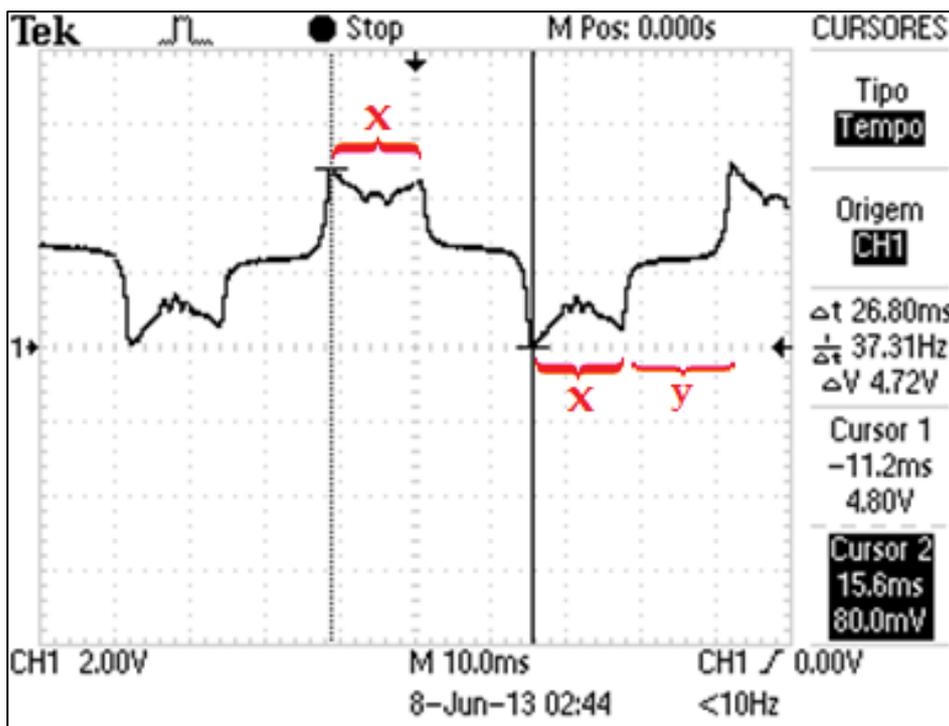


Figura 41: Sinal do transdutor Hall analógico.
Fonte: Autoria própria.

Na figura 41 é exibida a forma de onda do sinal, a frequência e os parâmetros do osciloscópio. No mesmo tempo em que foi coletado esse sinal mediu-se a rotação do equipamento utilizando um tacômetro para confrontar as informações. Nos instantes da captura da forma de onda mostrada na figura 41, o tacômetro media uma velocidade de rotação de 561,4 RPM.

A frequência do sinal fornecido pelo elemento Hall era de 37,3 Hz, porém esse sinal foi gerado pela leitura de 4 bobinas eletromagnéticas em rotação e defasadas de 90°. Então, para obter a velocidade de rotação do equipamento através do sinal do transdutor é conveniente dividir a frequência obtida por 4, assim obtém-se a frequência para uma bobina.

Portanto o dispositivo estava a 9,325 revoluções por segundo, multiplicando-se esse valor por 60 para obter a velocidade em RPM, tem-se 559,5 RPM.

$$\frac{37,3 \text{ Hz}}{4} * 60\text{s} = 559,5 \text{ RPM} \quad (7)$$

Considerando a leitura do tacômetro como base para o experimento, o erro absoluto, ou seja, a diferença entre os valores do tacômetro e elemento Hall, obteve-

se 1,9 RPM.

Analisando o sinal do osciloscópio, é possível perceber a existência de uma parte do sinal que não segue um padrão, como pode ser visto no intervalo x na figura 41 e como não é possível mensurá-lo adequadamente, ele é excluído da análise. Este sinal é proveniente da leitura do transdutor quando o ele está entre duas bobinas, onde não existe um campo magnético com características bem definidas. Facilmente percebe-se que em um equipamento onde o rotor é constituído de várias bobinas, o tempo de existências deste sinal pode ser bastante reduzido.

O intervalo do sinal mostrado pela letra y na figura 41 segue um padrão bem definido sendo oriundo do campo magnético gerado por cada bobina. Se esse sinal for fracionado, cada parte terá um valor de tensão específico. As quantidades de partições desta onda ficam limitadas à taxa de aquisição do equipamento utilizado para este fim, quanto maior a taxa de aquisição de dados, maior será a resolução do sinal obtido. Ao ser devidamente tratado, estas informações podem ser utilizadas para medir a velocidade e posição angular do motor elétrico.

Uma análise da figura 42 facilita o entendimento de como é realizado o monitoramento de posição e velocidade utilizando um sensor analógico. A forma de onda desta figura é fictícia, com finalidade apenas de auxiliar no entendimento da proposta quando usado este tipo de sensor. Este sinal hipotético seria gerado pelo sensor através da leitura do rotor bobinado de um motor de 4 pólos, onde o sensor que está fixo na estrutura da máquina adquire o sinal de campo magnético do rotor, o qual está em movimento circular. A velocidade é facilmente obtida através da frequência do sinal, já para obter a informação de posição do motor é necessário um tratamento maior dos dados do sensor.

Analisando, primeiramente, o intervalo de 0° a 90° , verifica-se que podem existir infinitos valores de tensão com o decorrer do tempo. Se esses valores forem associados a uma posição do motor, é possível saber em que posição angular está o eixo do motor. Este intervalo de valores de 0 a 5 volts se repetirá quatro vezes dentro de uma volta, mas com tratamentos pelo *software* da placa que aquisição desse sinal é possível conhecer a posição angular correta do motor. A precisão dessa informação está associada à tecnologia da DAQ que é utilizada. Após quatro repetições deste conjunto de valores tem-se uma volta completa.

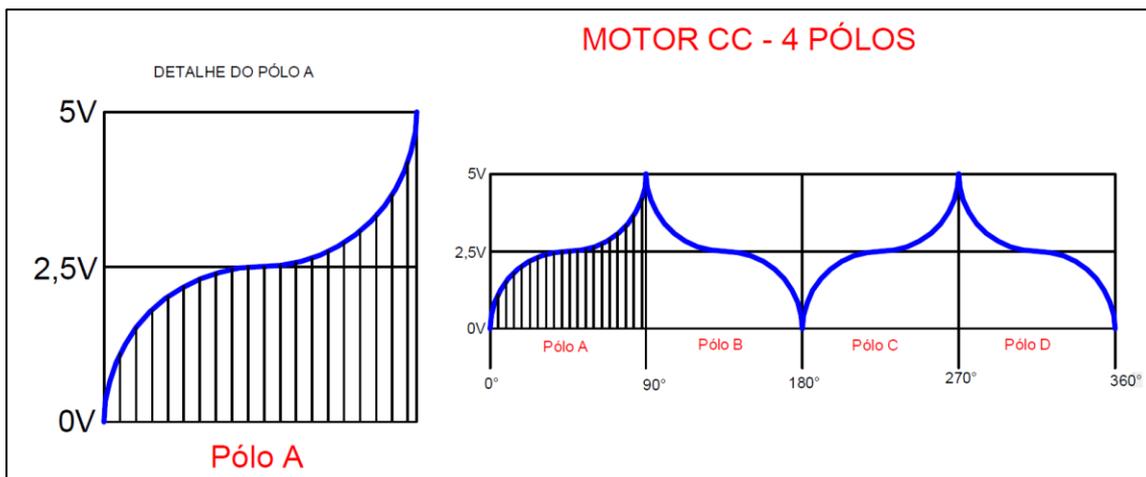


Figura 42: Sinal fictício – motor de 4 pólos.
Fonte: Autoria própria.

3.2.1.1 Limitação na utilização do transdutor Hall analógico

Conforme mencionado anteriormente, não foi possível utilizar o transdutor Hall analógico neste trabalho. Existe uma limitação física na montagem dentro do motor Doga 319 que foi utilizado. Para obter-se uma leitura confiável do campo magnético do rotor, é necessário instalar o encapsulamento o mais distante possível da região entre os ímãs permanentes. No entanto, conforme mostrado na figura 43, o único acesso possível pra instalação do transdutor dentro do motor é entre os ímãs permanentes, qualquer outra localização fica limitada porque o encapsulamento estaria entre o ímã e o estator, porém esta distância é menor que a espessura deste.

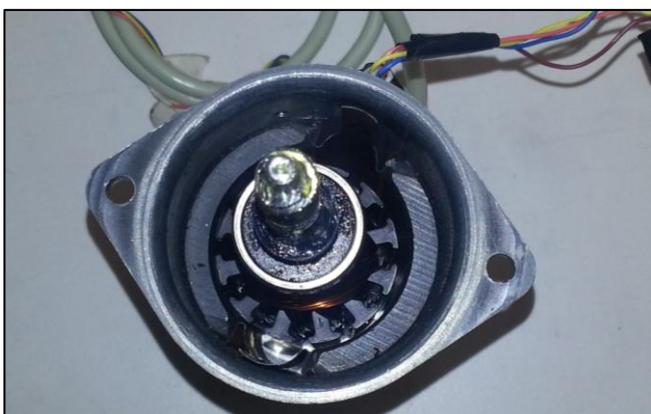


Figura 43: Distância entre o rotor e o ímã permanente.
Fonte: Autoria própria.

O motivo pelo qual o transdutor não deve ficar na região entre os ímãs, é explicado com auxílio da figura 43. O motor representado na figura têm dois polos,

mas o fenômeno que é explicado na sequência ocorre independente da quantidade de polos.

As escovas estão responsáveis por energizar as bobinas do rotor através dos contatos com o comutador, onde estão ligadas tais bobinas, e o sentido da corrente que passa pelas bobinas é determinado pela polaridade da tensão aplicada às escovas. Pela figura 44 nota-se que para a metade de uma volta quando o lado **a** se encontra voltado para o pólo norte e o lado **b** se encontra sob o pólo sul, a corrente deve estar em um sentido tal para que o campo magnético da bobina sofra repulsão pelo campo do ímã permanente. Para a outra metade de revolução, quando o lado **a** encontra-se sob o pólo sul e o lado **b** se encontra sob o pólo norte, a corrente deve fluir na direção contrária através da bobina para que o campo magnético dessa bobina seja invertido e continue a sofrer repulsão, mas agora pelo outro ímã permanente. Esta inversão decorrente ocorre em cada bobina quando ela passa exatamente pelo espaço situado entre os dois ímãs (UTFPR-PB, 2013).

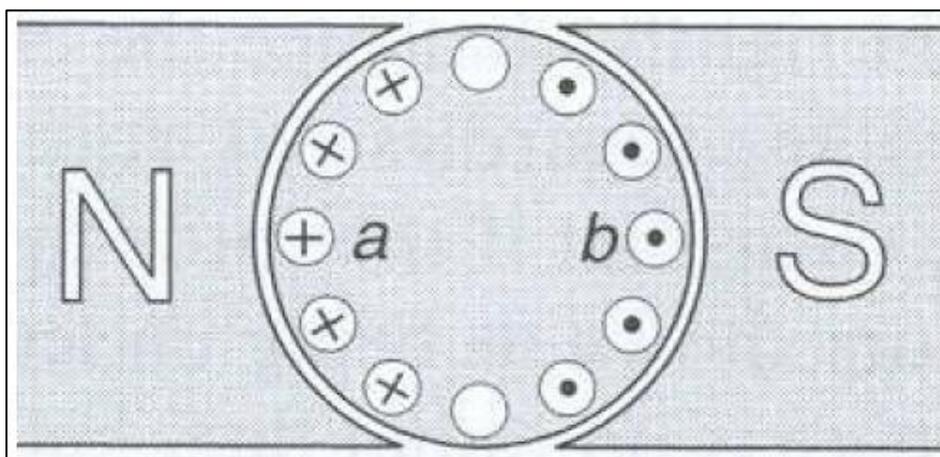


Figura 44: Sentido da corrente nas bobinas.
 Fonte: UTFPR-PB, Notas de aula (2013).

Dessa forma o único local possível para instalar o elemento Hall dentro do motor está exatamente onde ocorre a troca do sentido de fluxo da corrente. Durante os testes, como mostrado na Figura 45, instalou-se um sensor nesta posição para conhecer seu sinal de saída, mas apenas um sinal com frequência muito alta foi possível observar no osciloscópio, a qual foi descartada pelo seu valor de tensão da ordem de milivolts.

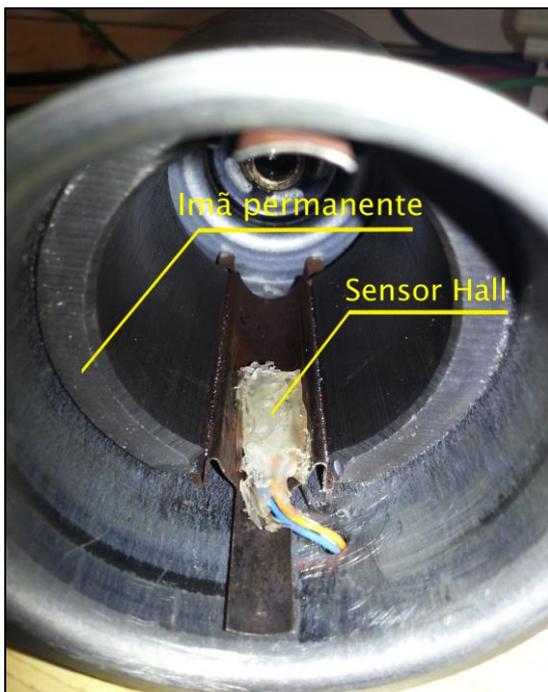


Figura 45: Posição dos ímãs permanentes e do transdutor Hall.
Fonte: Autoria própria.

Após constatada essa limitação, a equipe decidiu aplicar outro tipo de transdutor para fazer a monitoração desejada, o transdutor de efeito Hall digital que já vem acoplado ao corpo do motor Doga.

3.2.2 Experimento 2 – Implementação do Sistema com transdutor Hall Digital

O motor Doga 319 é fabricado com um transdutor de efeito Hall digital conforme descrito anteriormente. Este, realiza a leitura de um ímã circular de doze pólos, sua saída fornece um sinal digital de 12 pulsos por revolução no eixo do motor, ou seja, antes do mecanismo de redução e 972 pulsos por revolução quando o sistema de redução completa uma revolução.

Para obter uma conclusão sobre a viabilidade técnica de substituição de *encoder* incremental por transdutor de efeito Hall, necessitou-se obter e armazenar os dados de ambos os transdutores. Para atingir tal objetivo, utilizou-se um equipamento capaz de ler esses sinais e disponibilizá-los para serem armazenados em um dispositivo de memória. Além disso, as leituras dos dois dispositivos devem ser realizadas ao mesmo tempo para garantir a confiabilidade da comparação dos dados.

Para realizar essa atividade, utilizou-se uma placa de aquisição de dados da

National Instruments, a qual já foi apresentada neste documento. O modelo da DAQ (placa de aquisição de dados) disponível para esta experiência é o NI USB-6008. Esta é capaz de adquirir tanto de sinais analógicos quanto digitais.

Como o transdutor de efeito Hall e o *encoder* fornecem sinais digitais, conforme mostrado pela leitura do osciloscópio na figura 46, o modo mais prático de trabalhar com esses dados seria obtê-los através da entrada digital da placa de aquisição, no entanto a DAQ utilizada nesta experiência não é nova e suas entradas digitais não estavam funcionais. Devido a isso os dados foram obtidos através da entrada analógica da placa.

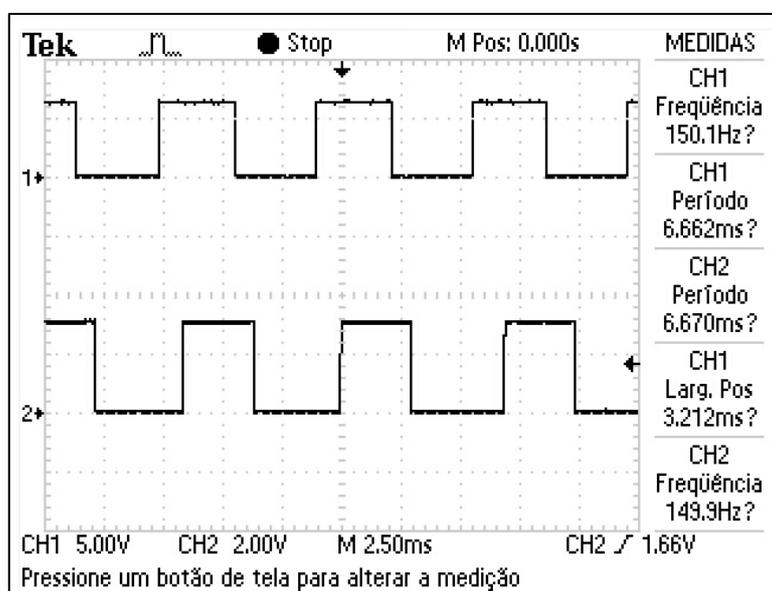


Figura 46: Sinais digitais do *encoder* (1) e do transdutor Hall (2).
Fonte: Autoria própria.

A configuração do leiaute físico do experimento é mostrado na figura 48. A figura 47 apresenta o diagrama de blocos deste experimento onde é possível observar que cada equipamento tem a seguinte alimentação elétrica:

- *Encoder*: 12 a 24 Volts;
- Motor CC: 0 a 24 Volts (variação de velocidade);
- Transdutor de efeito Hall: 4,5 a 6 Volts.

No experimento foram utilizadas três fontes independentes, porém as fontes de ambos os transdutores tiveram seus GNDs conectados em comum com o GND da DAQ, isso foi realizado para que a leitura feita pela placa tivesse a mesma referência. O motor foi isolado eletricamente do circuito afim de não deixar os sinais

dos transdutores e potência elétrica, para alimentação do motor, com a mesma referência, evitando assim, propagação de ruído nos sinais. Todos os materiais utilizados no experimento 2 são apresentados na tabela 2.

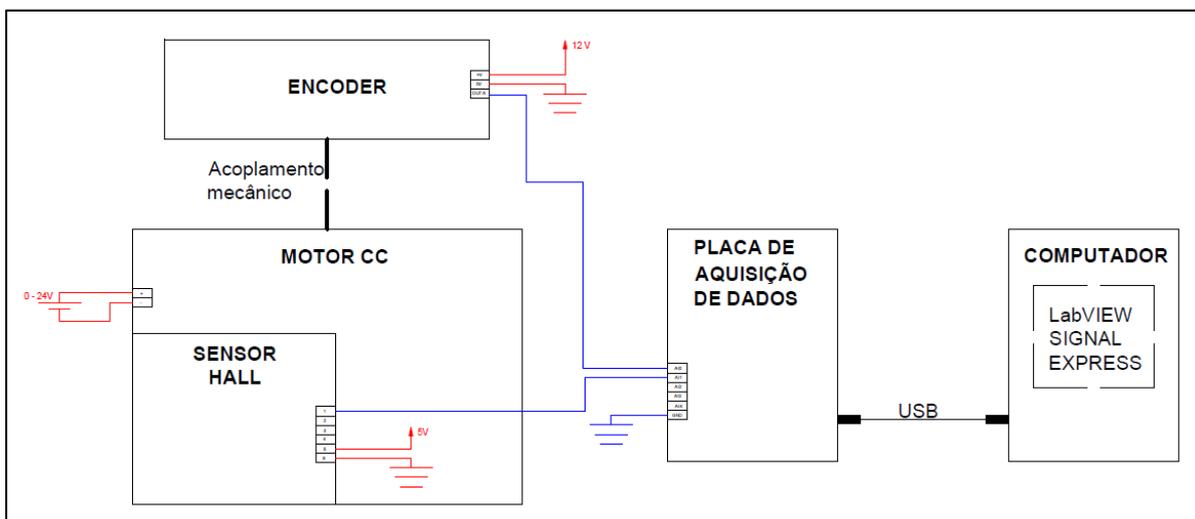


Figura 47: Diagrama de blocos

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Lista de materiais utilizados no experimento 2

Item	Material	Quantidade
1	Motor CC Doga 319 com transdutor Hall	1
2	Encoder Incremental	1
3	Placa de aquisição de dados (DAQ)	1
4	Fonte de alimentação	3
5	Software LabVIEW SignalExpress	1

Fonte: Autoria própria.

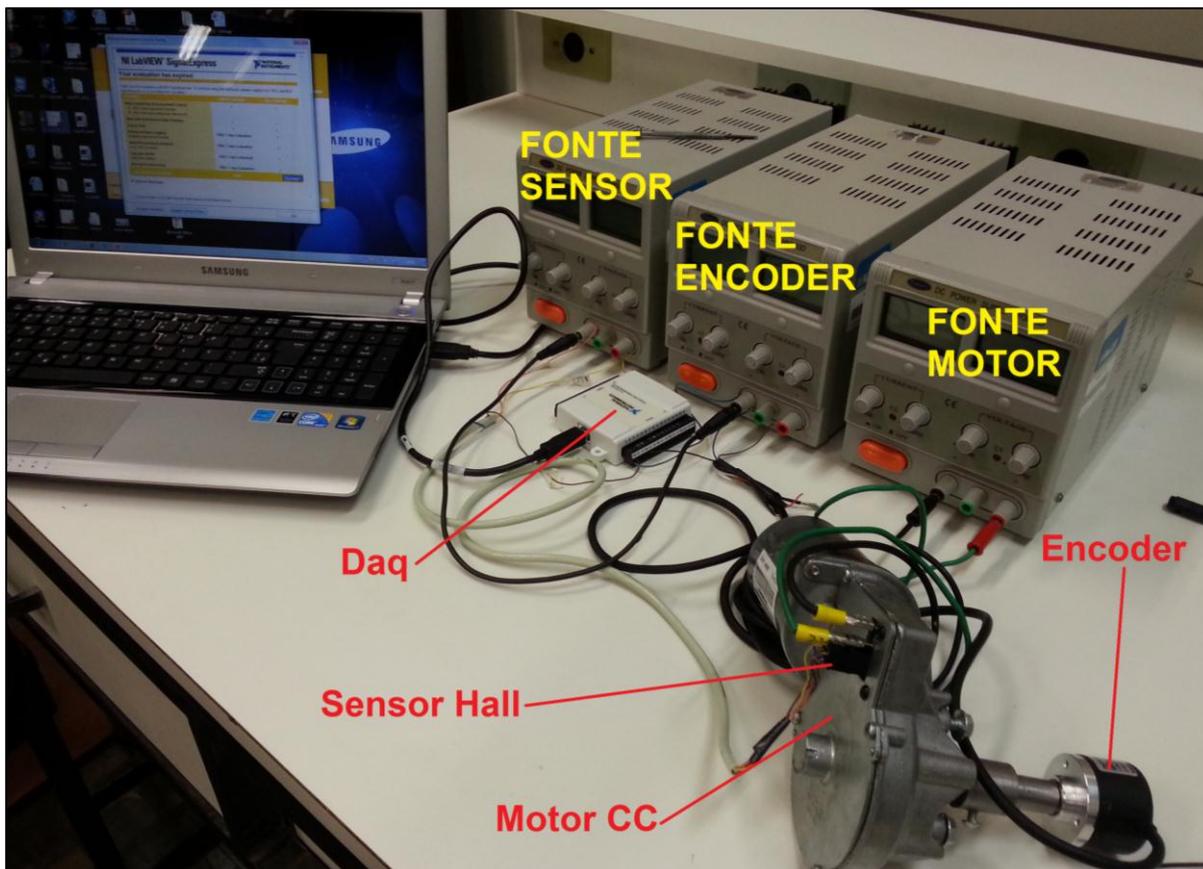


Figura 48: Leiaute físico do experimento.
Fonte: Autoria própria.

No computador, utilizou-se o *software* LabVIEW Signal Express[®] da National Instruments que faz a leitura e gerenciamento dos dados, e que possibilita exportá-los para uma planilha de dados. Na tela deste *software* é possível ver graficamente os sinais lidos.

A Figura 49 mostra o fluxograma do processo de aquisição pelo LabVIEW Signal Express[®], ou seja, trás o passo-a-passo da configuração do *software* para parametrizar a placa de aquisição de dados.

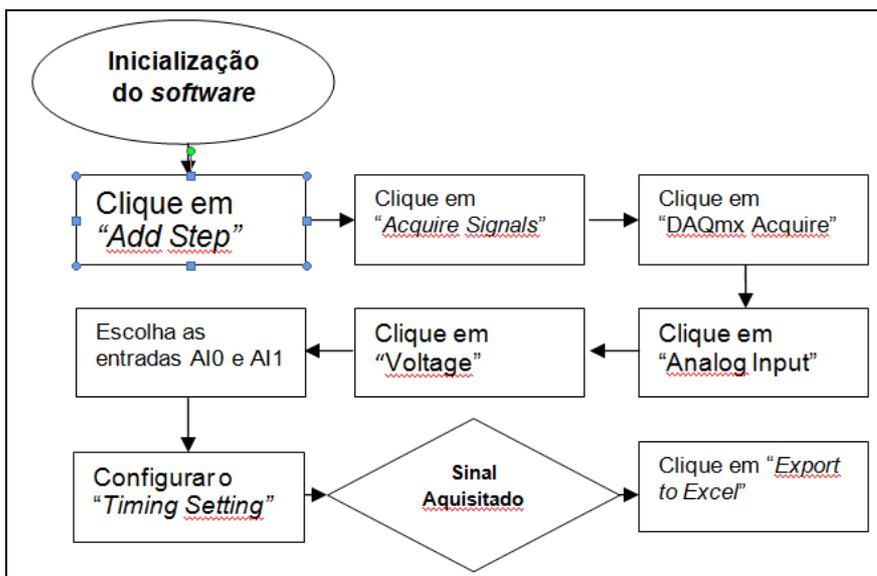


Figura 49: Fluxograma para parametrização da DAQ.
Fonte: Autoria Própria.

A National Instruments oferece uma licença temporária para teste do *software* LabVIEW Signal Express® e esta liberação é feita com algumas restrições, porém as funcionalidades liberadas para testes atenderam perfeitamente o propósito deste trabalho. Como pode ser visto na figura 50, a equipe usufruiu dessa licença temporária para desenvolver seus testes.

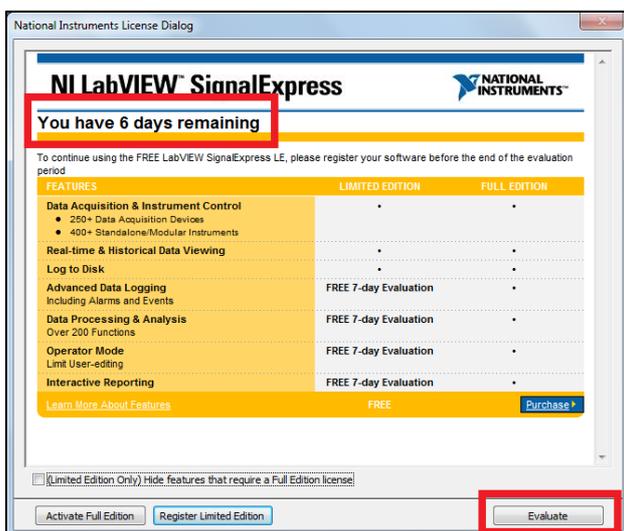


Figura 50: Licença temporária do *software* LabVIEW Signal Express®.
Fonte: Autoria própria.

A interface do LabVIEW Signal Express® com o usuário é agradável e de fácil utilização. Com a configuração de poucos parâmetros é possível ler e visualizar quase em tempo real a forma de onda na saída do sensor Hall e do *encoder*. Após a

instalação deste programa no computador, bastou conectar a DAQ na porta USB e rapidamente o dispositivo é reconhecido pelo programa.

Depois de todo o circuito devidamente montado com a placa de aquisição conectada ao computador, deve-se selecionar o tipo de entrada e o tipo de variável que deseja-se realizar a leitura, ou seja, a coleta dos valores de tensão através da entrada analógica.

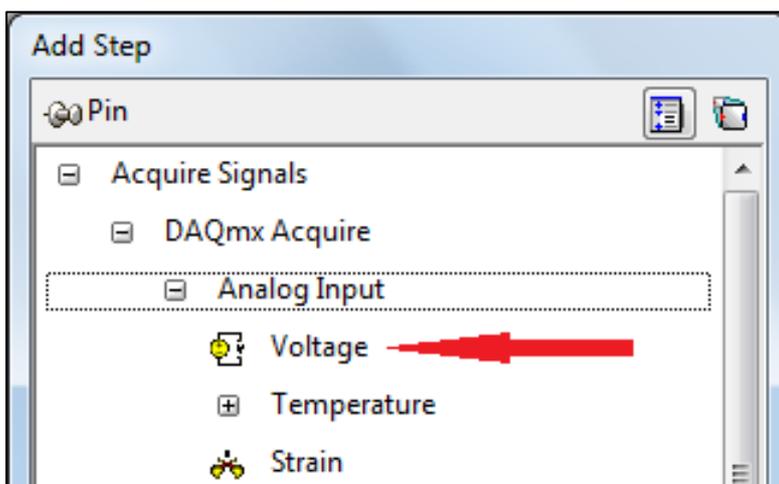


Figura 51: Seleção dos parâmetros de leitura.
Fonte: Autoria própria.

O próximo passo solicitado pelo programa é a indicação de qual porta analógica a DAQ deve coletar para que o *software* apresente estas. A NI USB-6008 têm oito canais de entradas analógicas nomeadas de AI0 até AI7, assim foram escolhidas as duas primeiras portas de entrada, AI0 e AI1. Para finalizar a parametrização da placa, foram preenchidos outros três parâmetros de definição de tempo, o *timing settings*: modo de aquisição, quantidades de amostras a serem lidas e armazenadas e a taxa de aquisição dos dados.

Existem três módulos de aquisição: *1 sample (on demand)* onde é adquirido apenas uma amostra quando o usuário solicita; *N samples* onde o número de amostra é previamente estabelecido e o *continuous samples* onde a DAQ lê continuamente os dados. Este último foi o selecionado neste experimento.

No campo *samples to read* é preenchido o número de amostras que devem ser lidas caso o usuário deseje limitar a quantidade de aquisições. Vale ressaltar que as amostras coletadas neste experimento são leituras analógicas do sinal, apesar da forma de onda obtida ser um trem de pulsos, pois a origem do sinal é digital. Assim,

várias amostras terão o valor de tensão quase os mesmos porque enquanto o sinal digital se mantém em um nível alto ou baixo a DAQ realiza a leitura do sinal algumas vezes.

O último parâmetro do *timing settings* é a taxa de amostragem esta é a definição de quantos dados a DAQ coletará por período de tempo. A taxa de amostragem é dada em Hz (Hertz) e o valor utilizado foi de 5 kHz, ou seja, a cada segundo a DAQ faz a aquisição de 5000 amostras.

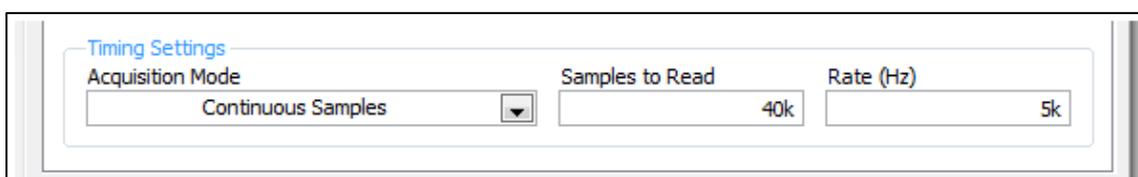


Figura 52: Definição das variáveis relacionadas ao tempo.
Fonte: Autoria própria.

A proposta do *software* de ser uma interface de fácil programação é confirmada mais uma vez quando se trata de armazenamento. Os dados obtidos pela placa de aquisição podem ser facilmente exportados para arquivos de texto ou para planilhas de dados. Clicando no ícone mostrado na figura 50 o LabVIEW Signal Express® exporta os dados para uma planilha com duas colunas, uma com o tempo da amostra e outra com seu valor de tensão. Se houver mais de uma entrada sendo utilizada, esses dados também são exportados e ficam disponíveis em outras abas da planilha.

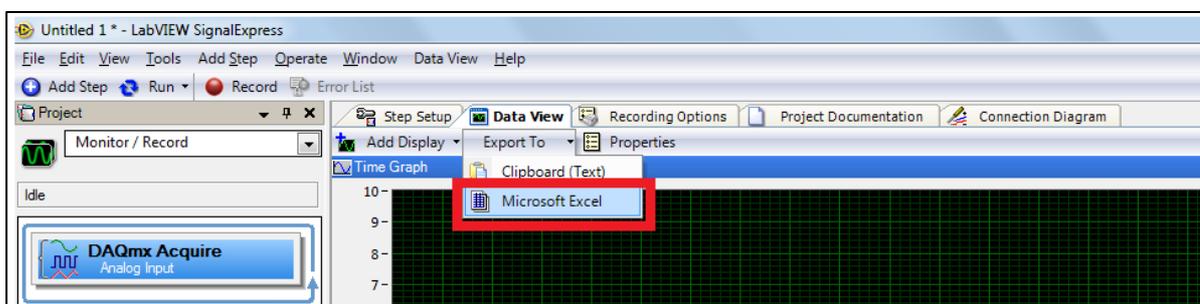


Figura 53: Exportando dados para o Microsoft Office Excel®.
Fonte: Autoria própria.

A figura 54 apresenta as formas dos sinais do elemento Hall e do *encoder*, que apesar de serem coletados através da entrada analógica da DAQ, são sinais de natureza digital.

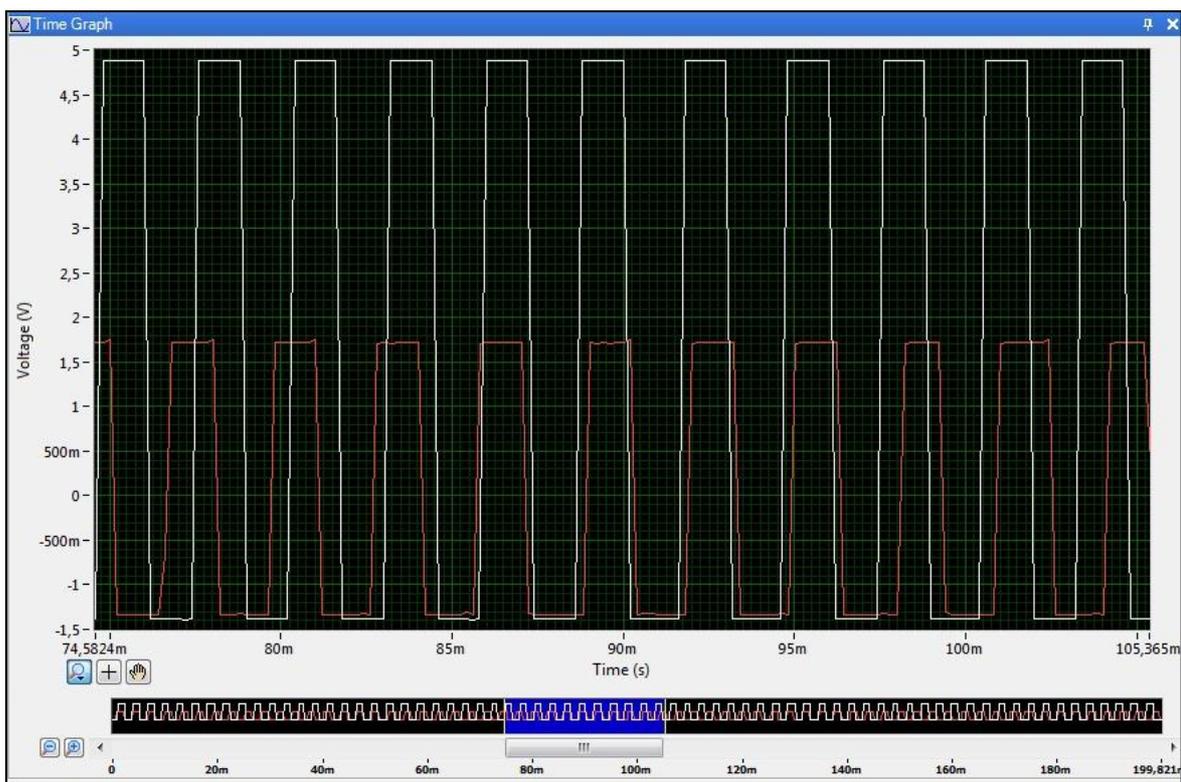


Figura 54: Forma de onda dos sinais dos transdutores.

Fonte: Autoria própria.

4. ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

Para realizar uma análise técnica da substituição de um *encoder* incremental óptico de posição e velocidade por um transdutor de efeito Hall, embarcado no motor de corrente contínua, optou-se por coletar as informações dos sinais de saída do *encoder* e do transdutor Hall, realizando-se então uma comparação entre as características de resolução e exatidão do sensor magnético em relação ao *encoder*.

O planejamento para estudá-los tomou como base a velocidade de rotação do motor de corrente contínua, o qual foi energizado com diferentes valores de tensão CC, para obter-se níveis de velocidade distintos com o objetivo de analisá-los em diferentes faixas de operação. Os níveis de tensão utilizados foram de 4, 8, 12, 16, 20 e 24 V_{cc} . Os dados obtidos destes níveis de tensão foram armazenados em diferentes planilhas de dados. As análises destas planilhas são apresentadas a seguir:

4.1 APRESENTAÇÕES DE DADOS

O *software* Labview Signal Express[®] permitiu que os dados coletados por ele fossem armazenados em um arquivo. Utilizou-se o programa Microsoft Office Excel[®] para visualizar estes dados que são separados por tempo de cada aquisição, contendo duas colunas uma para este tempo, em segundos, e outra para os valores de tensão oriundos do dispositivo Hall e do *encoder*. Estes por sua vez são armazenados em diferentes abas da planilha, ou seja, uma aba contendo duas colunas para o transdutor de efeito Hall e outra para o *encoder* óptico. Nas tabelas 3 e 4 estão representados exemplos de uma planilha gerada pelo programa Labview Signal Express[®].

Tabela 3 – Exemplo de planilha de dados do transdutor Hall

Dados do transdutor Hall	
Data	1/7/2013
Hora	11:23:33
Y_Unit_Label	Tensão (V)
X_Dimension	Tempo (s)
Fim do Cabeçalho	
X_Value	01/07/2013 - Tensão - ev1_ai0
0	0,065777
0,0002	0,075987
0,0004	0,075987
0,0006	0,075987
0,0008	0,065777
0,001	0,075987
0,0012	0,075987
0,0014	0,075987
0,0016	0,075987
0,0018	3,30239
0,002	3,3126

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Exemplo de planilha de dados do *encoder*

Dados do <i>encoder</i>	
Data	1/7/2013
Hora	11:23:33
Y_Unit_Label	Tensão (V)
X_Dimension	Tempo (s)
Fim do Cabeçalho	
X_Value	01/07/2013 - Tensão - ev1_ai0
0	0,023772
0,0002	0,023772
0,0004	0,023772
0,0006	0,023772
0,0008	0,023772
0,001	0,023772
0,0012	9,960074
0,0014	9,960074
0,0016	9,960074
0,0018	9,960074
0,002	9,970297

Fonte: Autoria própria.

Através destas tabelas, observam-se as informações de cabeçalho da planilha, contendo data, hora e unidades de medição. Nas linhas seguintes estão os valores de tempo e o respectivo valor coletado de tensão naquele instante. A

frequência de coleta de amostras admitida pelo conjunto *software*-placa de aquisição de dados é da ordem de 5 kHz, logo o intervalo de tempo de leitura dos valores de tensão é de 200 μ s (microsegundos).

Como ambos os sinais adquiridos pela DAQ e conseqüentemente pelo *software* são de natureza digital, optou-se por transformar os valores de tensão em níveis lógicos 0 e 1 para facilitar a análise de velocidade e posição do *encoder* incremental e transdutor Hall. Quando o valor de tensão coletado for maior que 2,5 volts considera-se um nível lógico alto (1) caso contrário o nível lógico do sinal é baixo (0). Assim é possível com maior facilidade observar a mudança de nível de baixo para alto, chamado de borda de subida e de alto para baixo, denominado borda de descida.

Com base na tabela 03, a quantidade de leituras de tensão com valores menores que 2,5 volts (nível lógico baixo) foi de 9 e, como as aquisições ocorrem a cada 200 μ s pode-se estimar que a duração deste sinal foi de 1,8 ms (milisegundos). A velocidade em RPM pode ser determinada utilizando uma relação de resolução do dispositivo Hall pelo tempo de duração de um mesmo sinal, alto ou baixo, conforme apresentado na equação 8:

$$V = \frac{360.0,5}{\frac{972}{6.t}} \quad (8)$$

Onde:

-V: Velocidade [RPM];

- t: tempo [s].

Para calcular a velocidade no eixo da redução através do *encoder* utiliza-se a equação 9:

$$V = \frac{360.0,5}{\frac{1024}{6.t}} \quad (9)$$

Onde:

-V: Velocidade [RPM];

- t: tempo [s].

Comparando ambas as equações é possível notar que a única diferença entre

elas é a resolução do dispositivo utilizado. Para *encoder* utiliza-se a resolução de 360 graus por 1024 pulsos, já o transdutor de efeito Hall utiliza uma relação de 360 graus para 972 pulsos que conseqüentemente apresenta uma resolução inferior ao transdutor óptico. Entretanto, como é possível, através das planilhas, realizar a análise das bordas de subida e descida, a resolução de ambos é dobrada, o que justifica a multiplicação por 0,5 nas equações. A constante presente no denominador de ambas as equações, numeral 6, é utilizada para a conversão de graus por segundo para rotações por minuto (RPM).

Para efetuar o cálculo do deslocamento angular do eixo do motor, utiliza-se a resolução de cada dispositivo, transdutor Hall e *encoder* incremental, multiplicando-as pelo fator 0,5 para dobrar sua resolução, enfatizando que o deslocamento pode ser analisado pelas bordas de subida e descida de cada um.

Com base nestas informações e aplicando-as para todas as planilhas de dados, que possuem diferentes faixas de velocidades devido à utilização de diferentes níveis de tensão aplicadas ao motor CC, é possível elaborar tabelas de dados que relacionam o tempo que cada sinal (baixo ou alto) de cada dispositivo (transdutor Hall e *encoder*) permanece, a velocidade de rotação do eixo do motor e o deslocamento angular detectado por estes. Devido à alta frequência de aquisição, necessária para identificar com maior precisão as transições dos sinais e conseqüentemente diminuir erros, as planilhas são compostas por milhares de linhas de informações, o que inviabiliza sua apresentação neste documento. Entretanto, os quadros 1 e 2 exibem uma parte de uma planilha com os valores de tempo decorrido em segundos, tensão adquirida em volts, tempo do estado do sinal lógico em segundos, deslocamento angular em graus, velocidade desenvolvida em RPM e a quantidade de níveis lógicos acumulados.

Dados tratados do <i>encoder</i> incremental					
Tempo [s]	Tensão [V]	Mudanças de nível	Tempo para mudança de nível lógico [s]	Deslocamento angular [°]	Velocidade (RPM)
0,0008	0,0238	1	0,0006	0,1758	48,8281
0,001	0,0238	1			
0,0012	0,0238	1			
0,0014	9,9805	2	0,0004	0,3516	73,2422
0,0016	9,9907	2			
0,0018	0,0238	3	0,0006	0,5273	48,8281
0,002	0,0238	3			
0,0022	0,0238	3			
0,0024	9,9805	4	0,0004	0,7031	73,2422
0,0026	9,9907	4			
0,0028	0,0238	5	0,0004	0,8789	73,2422
0,003	0,0238	5			
0,0032	9,9805	6	0,0004	1,0547	73,2422
0,0034	9,9805	6			
0,0036	0,0340	7	0,0006	1,2305	48,8281
0,0038	0,0238	7			
0,004	0,0238	7			
0,0042	9,9805	8	0,0004	1,4063	73,2422
0,0044	9,9805	8			
0,0046	0,0136	9	0,0004	1,5820	73,2422
0,0048	0,0238	9			
0,005	9,9805	10	0,0006	1,7578	48,8281
0,0052	10,1032	10			
0,0054	9,9907	10			
0,0056	0,0238	11	0,0004	1,9336	73,2422
0,0058	0,0238	11			
0,006	9,9907	12	0,0004	2,1094	73,2422
0,0062	9,9907	12			
0,0064	0,0238	13	0,0004	2,2852	73,2422
0,0066	0,0238	13			
0,0068	9,9805	14	0,0004	2,4609	73,2422
0,007	9,9907	14			

Quadro 1 – Dados tratados do *encoder* incremental.

Fonte: Autoria própria.

Dados tratados do transdutor de efeito Hall					
Tempo [s]	Tensão [V]	Mudanças de nível	Tempo para mudança de nível lógico [s]	Deslocamento angular	Velocidade (RPM)
0,0008	0,0760	1	0,0006	0,1852	51,4403
0,001	0,0760	1			
0,0012	0,0760	1			
0,0014	3,3126	2	0,0004	0,3704	77,1605
0,0016	3,3126	2			
0,0018	0,0760	3	0,0006	0,5556	51,4403
0,002	0,0760	3			
0,0022	0,0760	3			
0,0024	3,3126	4	0,0004	0,7407	77,1605
0,0026	3,3126	4			
0,0028	0,0760	5	0,0006	0,9259	51,4403
0,003	0,0760	5			
0,0032	0,0760	5			
0,0034	3,3126	6	0,0004	1,1111	77,1605
0,0036	3,3126	6			
0,0038	0,0760	7	0,0006	1,2963	51,4403
0,004	0,0760	7			
0,0042	1,0562	7			
0,0044	3,3126	8	0,0004	1,4815	77,1605
0,0046	3,3126	8			
0,0048	0,0760	9	0,0004	1,6667	77,1605
0,005	0,0760	9			
0,0052	3,0880	10	0,0006	1,8519	51,4403
0,0054	3,3126	10			
0,0056	3,3126	10			
0,0058	0,0760	11	0,0004	2,0370	77,1605
0,006	0,0760	11			
0,0062	3,3228	12	0,0006	2,2222	51,4403
0,0064	3,3126	12			
0,0066	3,3126	12			
0,0068	0,0760	13	0,0004	2,4074	77,1605
0,007	0,0760	13			

Quadro 2 – Dados tratados do transdutor de efeito Hall.

Fonte: Autoria própria.

4.2 APRESENTAÇÕES DOS RESULTADOS

Devido à quantidade de dados que as planilhas contêm, optou-se por seccioná-las, sendo cada uma destas partes, uma revolução completa do redutor, ou seja, os dados foram separados a cada 360 graus de deslocamento axial da

redução. Este seccionamento ocorreu conforme descrito na sequência:

- Os dados tratados apresentados nos quadros 1 e 2 que antes estavam separados por abas nos arquivos, foram postos na mesma planilha alinhados pela coluna tempo, uma vez que a frequência de coleta de informações pelo Labview Signal Express® é o mesmo para ambos os instrumentos;

- Como o objetivo deste trabalho é a realização de uma análise de viabilidade técnica da substituição do *encoder* incremental óptico por um transdutor de efeito Hall, adotou-se que a cada 360 graus de deslocamento detectados pelo transdutor óptico haveria uma separação das planilhas em abas para realizar uma análise de resultados do elemento Hall a cada volta desenvolvida pelo eixo da redução;

- A quantidade de seções que cada arquivo possibilitou devido ao número de amostras obtidas, foram de 8 voltas de 360 graus. A quantidade de amostras para uma revolução do eixo do redutor varia conforme a tensão de alimentação do motor. Logo quando o motor é energizado com 4 volts a quantidade de aquisições é maior quando compara-se aos demais valores de tensão utilizados, uma vez que o tempo para um giro completo do eixo é maior. Para padronizar as análises de todas as faixas de velocidade adotou-se o máximo de amostras possíveis para a menor velocidade utilizada para todas as tensões de alimentação.

Adotando-se este seccionamento para as 5 planilhas de dados é possível apresentar as comparações de posição e velocidade entre dispositivo de efeito Hall e *encoder*, que serão apresentados a seguir.

4.2.1 Análise para alimentação do motor em 4 V_{CC}

Realizando o tratamento dos dados conforme exibido nos quadros 1 e 2 na planilha de dados quando o motor é energizado com 4 V_{CC}, pode-se construir o Gráfico 1, que relaciona o número de voltas do redutor do motor pela velocidade desenvolvida por ele. Este gráfico destaca a oscilação de velocidade que ambos os equipamentos, *encoder* e dispositivo Hall apresentaram ao longo das 8 voltas da redução.

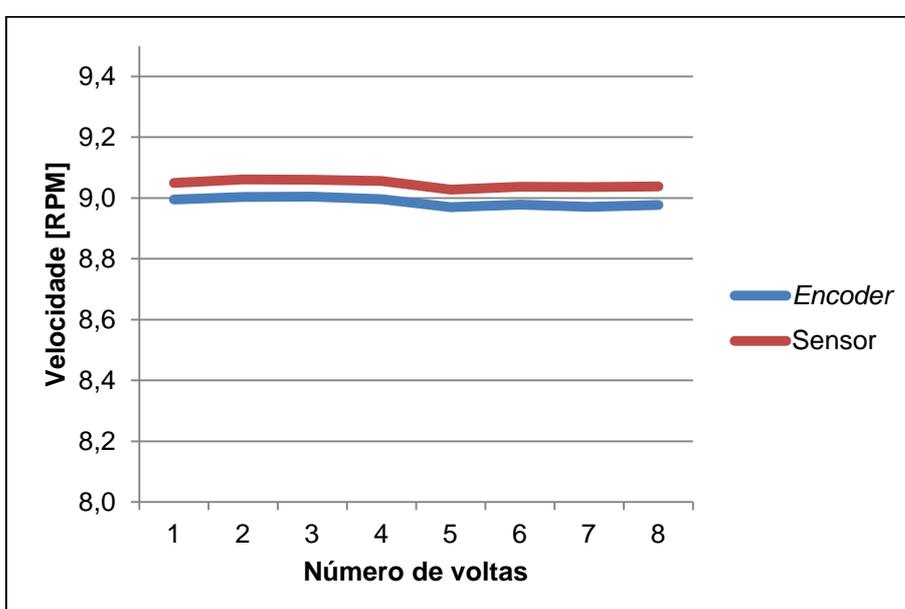


Gráfico 1 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 4 volts.
Fonte: Autoria própria.

É apresentada na Tabela 5 a diferença de velocidade medida dos dois equipamentos. Esta variação consiste na diferença entre elemento Hall e *encoder*. De acordo com a tabela, a variação ao longo das 8 voltas da velocidade não ultrapassou 0,065 RPM.

Tabela 5 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 4 volts

Velocidade média do motor [RPM]		
Encoder	Sensor	Variação
8,995	9,050	-0,055
9,003	9,062	-0,058
9,005	9,061	-0,056
8,996	9,056	-0,060
8,969	9,027	-0,058
8,978	9,037	-0,059
8,971	9,036	-0,065
8,977	9,038	-0,061

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao deslocamento angular a diferença de leitura de posição ao longo de 8 voltas entre *encoder* e dispositivo Hall é apresentado no Gráfico 2. Pode-se perceber que há uma oscilação no valor medido pelo elemento Hall. O transdutor óptico apresentou um comportamento constante, uma vez que cada volta completada pelo redutor apenas era considerada quando o *encoder* incremental detectava uma revolução completa, ou seja a cada 360 graus.

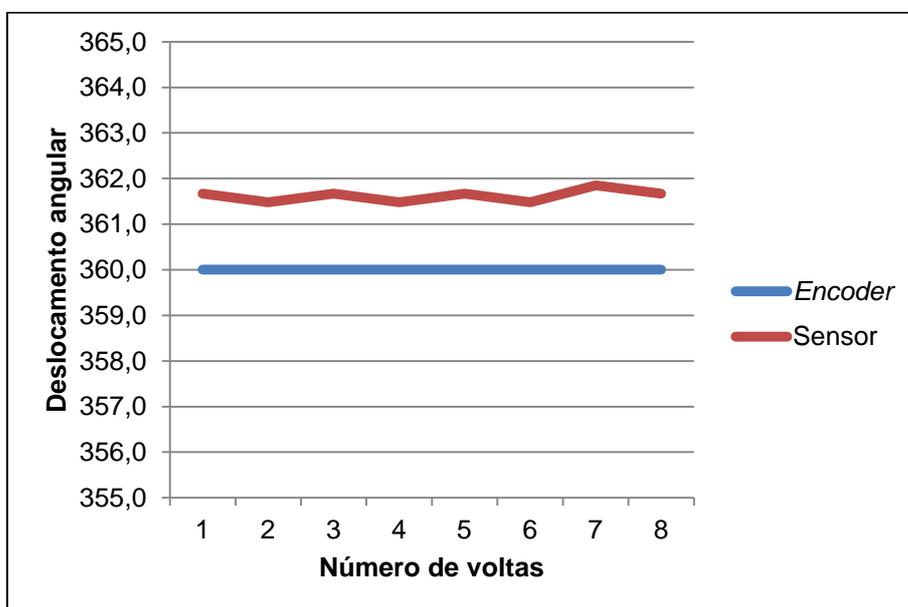


Gráfico 2 – Deslocamento angular do redutor para alimentação de 4 volts.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 exibe a variação de posição que o dispositivo de efeito Hall apresentou. A partir dela, pode-se concluir que houve uma diferença de até -1,852 graus, ou seja, quando o *encoder* detectou uma revolução completa o transdutor Hall acusava um deslocamento angular de 361,852 graus.

Tabela 6 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 4 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	<i>Encoder</i>	Sensor	Variação
1	360,000	361,667	-1,667
2	360,000	361,481	-1,481
3	360,000	361,667	-1,667
4	360,000	361,481	-1,481
5	360,000	361,667	-1,667
6	360,000	361,481	-1,481
7	360,000	361,852	-1,852
8	360,000	361,667	-1,667

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Análise para alimentação do motor em 8 V_{CC}

A análise seguinte apresenta as variações de posição e velocidade coletadas pelo transdutor de efeito Hall quando a velocidade do motor aumenta pelo fato da alimentação dele ser de 8 V_{CC} . Através dos dados coletados pôde-se elaborar o Gráfico 3, que relaciona o número de revoluções da redução do motor pela velocidade desenvolvida por ele. Este gráfico destaca a oscilação de velocidade que ambos os equipamentos, *encoder* e dispositivo de efeito Hall apresentaram.

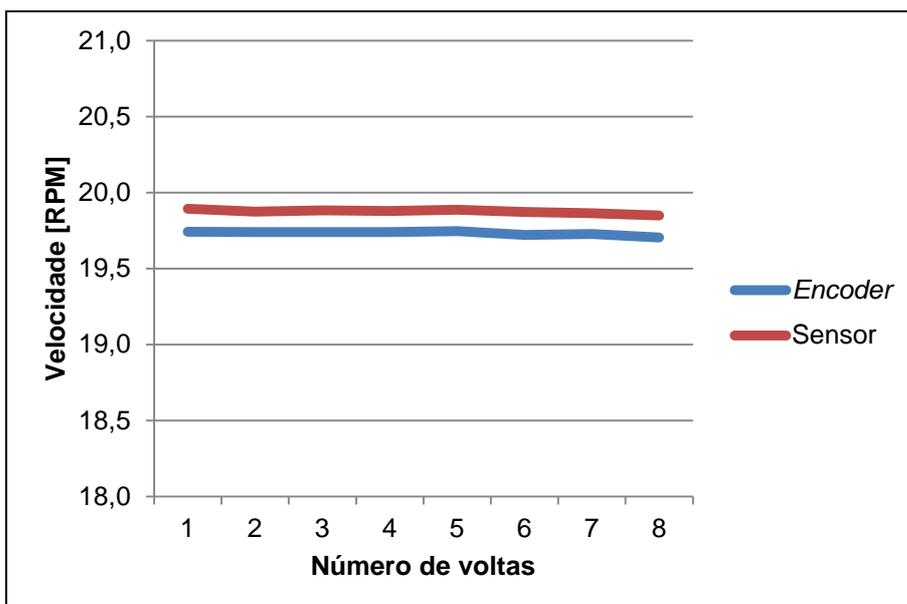


Gráfico 3 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 8 volts.
Fonte: Autoria própria.

É apresentada na Tabela 7 a diferença de velocidade medida dos dois equipamentos. Esta variação consiste na diferença entre transdutor de efeito Hall e *encoder*. De acordo com a tabela, a variação ao longo das 8 voltas da velocidade chegou ao máximo de 0,153 RPM, esta diferença entre equipamentos aumentou quando comparado ao obtido na Tabela 5. De posse destes dados é possível descrever que a medição de velocidade, ao longo destas 8 voltas, obtida pelo dispositivo de efeito Hall embarcado no motor é superior a velocidade encontrada quando o *encoder* incremental é utilizado.

Tabela 7 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 8 volts

Velocidade Média [RPM]		
<i>Encoder</i>	Sensor	Varição
19,742	19,893	-0,151
19,740	19,875	-0,135
19,741	19,883	-0,142
19,741	19,879	-0,137
19,747	19,887	-0,140
19,721	19,874	-0,153
19,727	19,865	-0,138
19,704	19,849	-0,144

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao deslocamento angular a diferença de leitura de posição ao longo das 8 voltas entre *encoder* e dispositivo Hall é apresentado no Gráfico 4. Pode-se perceber que a diferença aumentou, quando comparado ao valor medido pelo sensor no Gráfico 2.

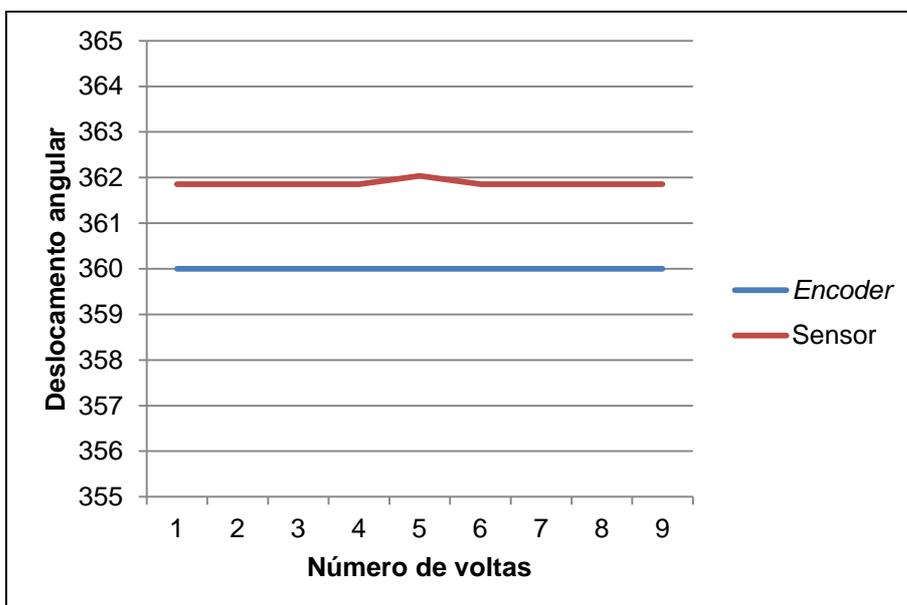


Gráfico 4– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 8 volts.

Fonte: Autoria própria.

É apresentada na Tabela 8, a diferença de posição que o transdutor de efeito Hall obteve em relação ao *encoder*. A partir dela, pode-se concluir que houve uma diferença de até -2,037 graus, ou seja, quando o *encoder* incremental detectou uma revolução completa o dispositivo de efeito Hall acusava um deslocamento angular de mais de 362 graus.

Tabela 8 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 8 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	Encoder	Sensor	Varição
1	360	361,852	-1,852
2	360	361,852	-1,852
3	360	361,852	-1,852
4	360	361,852	-1,852
5	360	362,037	-2,037
6	360	361,852	-1,852
7	360	361,852	-1,852
8	360	361,852	-1,852

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Análise para alimentação do motor em 12 V_{CC}

A análise seguinte apresenta as variações de posição e velocidade coletadas pelo transdutor de efeito Hall quando é fornecido ao motor uma tensão 8 V_{CC}. Através dos dados coletados pode-se gerar o Gráfico 5, que relaciona o número de revoluções do redutor do motor pela velocidade desenvolvida por ele. Este gráfico destaca a diferença de velocidade que o transdutor Hall descreveu quando comparado a *encoder* incremental.

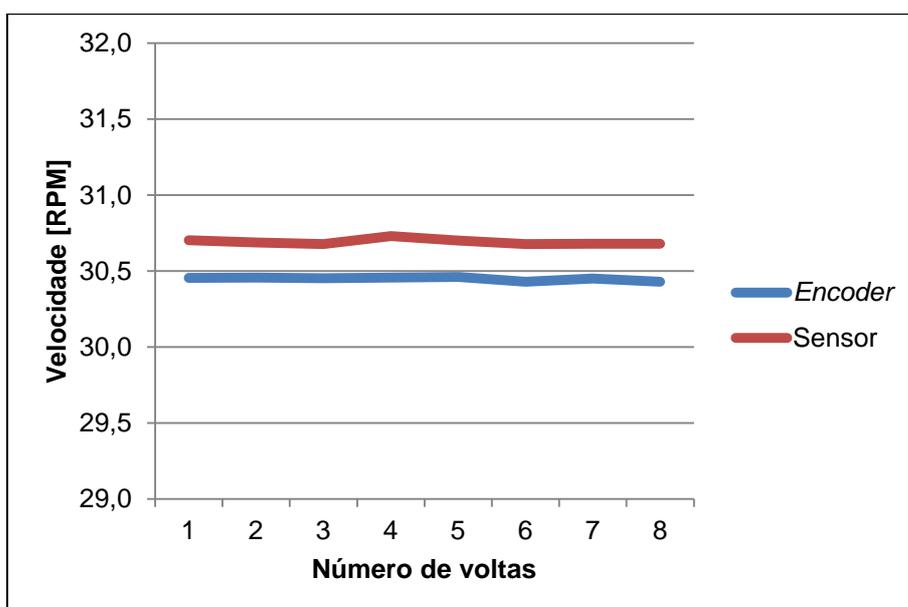


Gráfico 5 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 12 volts.

Fonte: Autoria própria.

É apresentada na Tabela 9 a diferença de velocidade medida dos dois equipamentos. Esta variação consiste na diferença entre transdutor de efeito Hall e *encoder*. De acordo com a tabela, a variação ao longo das 8 voltas da velocidade obteve uma máximo de 0,273 RPM. Quando comparado com as análises anteriores com níveis de tensão diferentes, esta diferença aumentou.

Tabela 9 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 12 volts

Velocidade Média [RPM]		
<i>Encoder</i>	Sensor	Varição
30,456	30,702	-0,247
30,457	30,688	-0,231
30,453	30,677	-0,224
30,457	30,730	-0,273
30,462	30,700	-0,238
30,429	30,678	-0,249
30,450	30,679	-0,229
30,429	30,679	-0,249

Fonte: Autoria própria.

Analisando o deslocamento angular, a diferença de leitura de posição, ao longo das 8 voltas do redutor do motor, entre *encoder* e transdutor Hall é apresentado no Gráfico 6. Pode-se perceber que a diferença diminuiu, quando comparado ao valor medido pelo sensor nos Gráficos 4. O transdutor óptico apresentou novamente um comportamento constante, uma vez que cada volta completada pelo redutor apenas era considerada quando o *encoder* incremental detectava uma revolução completa da redução do motor CC, ou seja, a cada 360 graus.

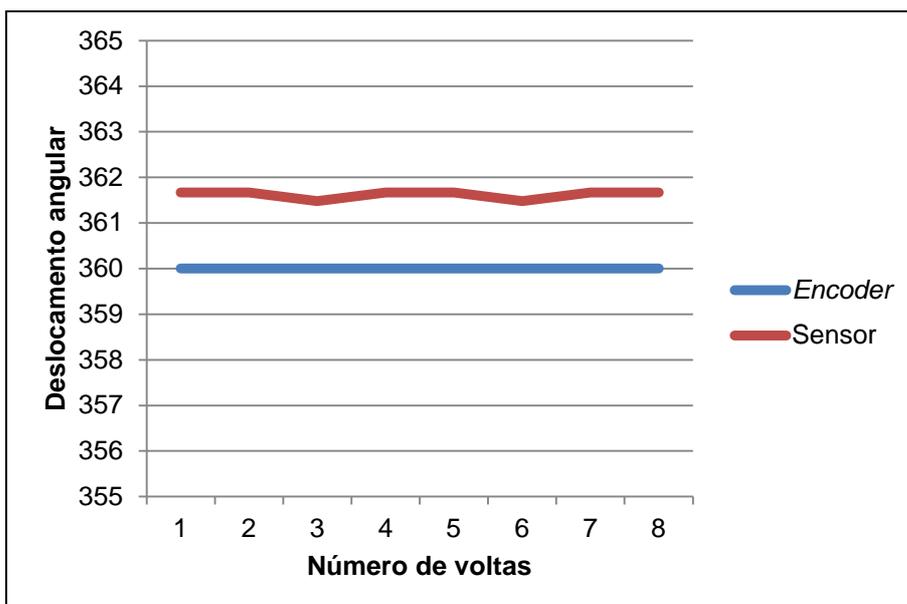


Gráfico 6 – Deslocamento angular do redutor para alimentação de 12 volts.
 Fonte: Autoria própria.

A tabela 10 exhibe a diferença de posição que o transdutor de efeito Hall obteve em relação ao *encoder* incremental. A partir dela, pode-se concluir que houve uma diferença de -1,667 graus, ou seja, quando o *encoder* incremental detectou uma revolução completa o transdutor com efeito Hall acusava um deslocamento angular de mais de 361,6 graus.

Tabela 10 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 12 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	<i>Encoder</i>	Sensor	Variação
1	360	361,667	-1,667
2	360	361,667	-1,667
3	360	361,481	-1,481
4	360	361,667	-1,667
5	360	361,667	-1,667
6	360	361,481	-1,481
7	360	361,667	-1,667
8	360	361,667	-1,667

Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Análise para alimentação do motor em 16 V_{CC}

Esta análise apresenta as variações de posição e velocidade coletadas pelo transdutor de efeito Hall quando o motor de corrente contínua é alimentado com 16 volts. De posse dos dados tratados conforme exibido nos Quadros 1 e 2 pode-se gerar o Gráfico 7, que relaciona o número de revoluções da redução do motor pela velocidade desenvolvida por ele. Este gráfico destaca a diferença de velocidade que o dispositivo com efeito Hall descreveu quando comparado a *encoder* incremental.

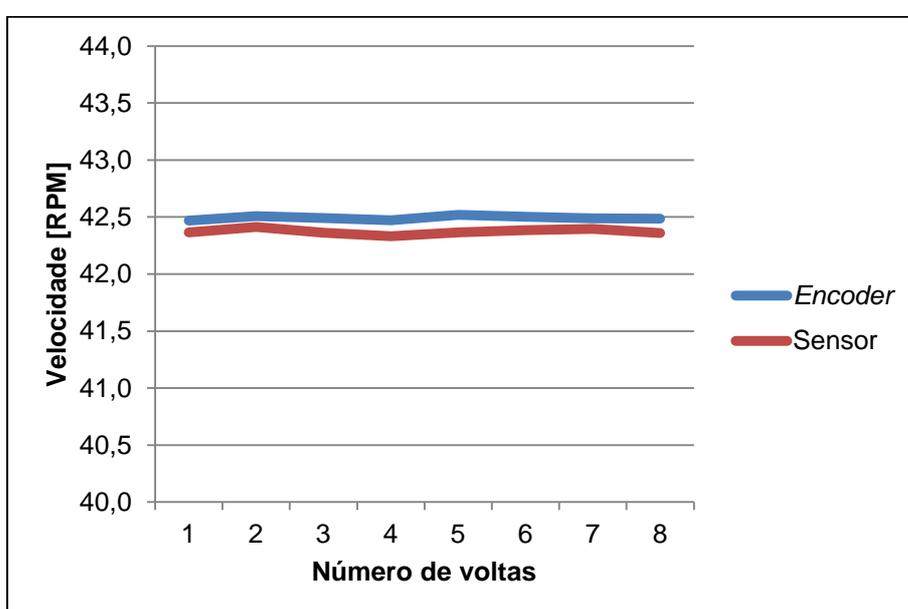


Gráfico 7 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 16 volts.
Fonte: Autoria própria.

São mostradas na Tabela 11 as velocidades em RPM para cada volta, medido por ambos os equipamentos. Há uma variação entre eles que pode ser calculada pelo valor medido do *encoder* menos o valor que o transdutor de efeito Hall identifica. De acordo com a tabela, a variação ao longo das 8 voltas da velocidade obteve uma máximo de 0,152 RPM. Quando comparado com as análises anteriores com níveis de tensão diferentes, esta diferença é maior que a analisada quando o motor foi alimentado com 4 volts. Entretanto, está abaixo das outras tensões analisadas até aqui.

Tabela 11 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 16 volts

Velocidade Média [RPM]		
Encoder	Sensor	Variação
42,470	42,364	0,105
42,508	42,412	0,096
42,492	42,362	0,130
42,473	42,333	0,140
42,518	42,366	0,152
42,502	42,384	0,118
42,489	42,397	0,092
42,486	42,360	0,126

Fonte: Autoria própria.

É exibido no Gráfico 8, a variação do deslocamento angular ao longo das 8 voltas analisadas. A diferença de leitura de posição, entre *encoder* e dispositivo com efeito Hall oscilou entre medições de posição acima, abaixo e igual aos 360 graus indicados pelo *encoder* incremental.

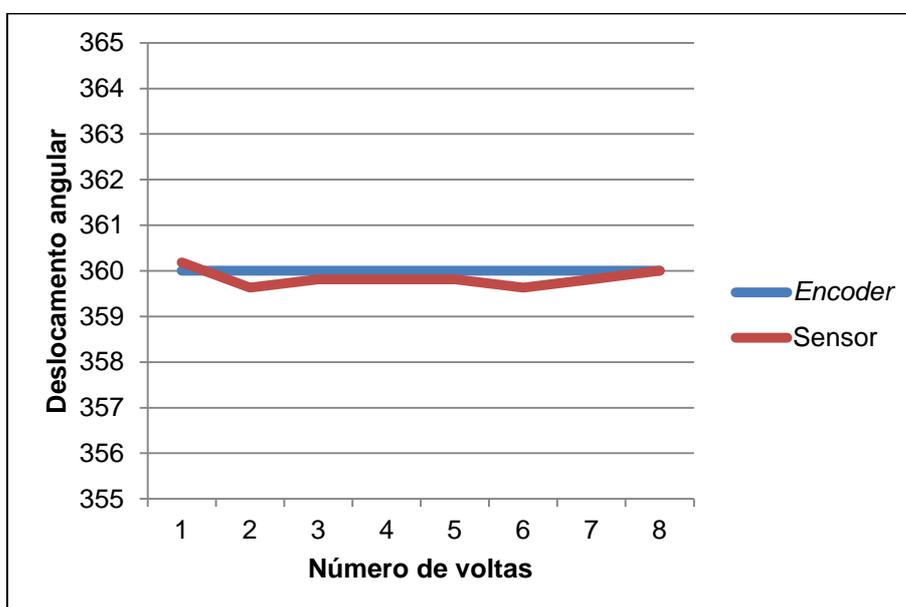


Gráfico 8– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 16 volts.

Fonte: Autoria própria.

A tabela 12 exibe a diferença de posição que o transdutor de efeito Hall obteve em relação ao *encoder* incremental. A partir dela, pode-se concluir que houve uma oscilação entre -0,185 a +0,370 graus, passando por 0 graus de variação na oitava revolução do redutor.

Tabela 12 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 16 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	<i>Encoder</i>	Sensor	Variação
1	360	360,185	-0,185
2	360	359,630	0,370
3	360	359,815	0,185
4	360	359,815	0,185
5	360	359,815	0,185
6	360	359,630	0,370
7	360	359,815	0,185
8	360	360,000	0,000

Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Análise para alimentação do motor em 20 V_{CC}

Com os dados de velocidade tratados para uma tensão de alimentação de 20 volts no motor CC, torna-se possível traçar o Gráfico 9, que os relaciona a cada volta desenvolvida pelo redutor. Compreendendo este gráfico é possível concluir que o transdutor de efeito Hall determinava velocidades inferiores às averiguadas pelo *encoder* incremental.

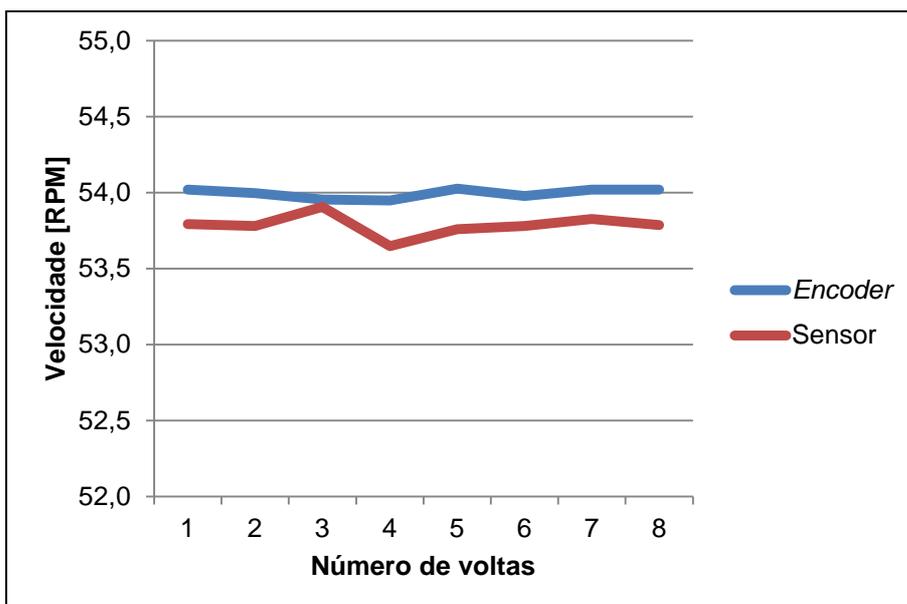


Gráfico 9 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 20 volts.
Fonte: Autoria própria.

São apresentadas na Tabela 13 as velocidades em RPM para cada volta, medido por ambos os equipamentos. Há uma variação entre eles que pode ser calculada pelo valor medido do *encoder* menos o valor que o transdutor Hall identifica. De acordo com a tabela, a variação da velocidade ao longo das 8 voltas do redutor foi de no máximo 0,301 RPM abaixo do observado pelo transdutor óptico.

Tabela 13– Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 20 volts

Velocidade média [RPM]		
<i>Encoder</i>	<i>Sensor</i>	Variação
54,020	53,793	0,227
53,996	53,781	0,215
53,954	53,907	0,048
53,948	53,648	0,301
54,026	53,760	0,266
53,978	53,781	0,197
54,020	53,827	0,192
54,020	53,788	0,232

Fonte: Autoria própria.

Para realizar o estudo dos resultados para o deslocamento angular quando o motor CC é energizado com 20 volts, emprega-se o Gráfico 10, o qual expõe que a variação de leitura do dispositivo Hall em relação à posição angular, pelo número de voltas do redutor está acima do identificado pelo *encoder*.

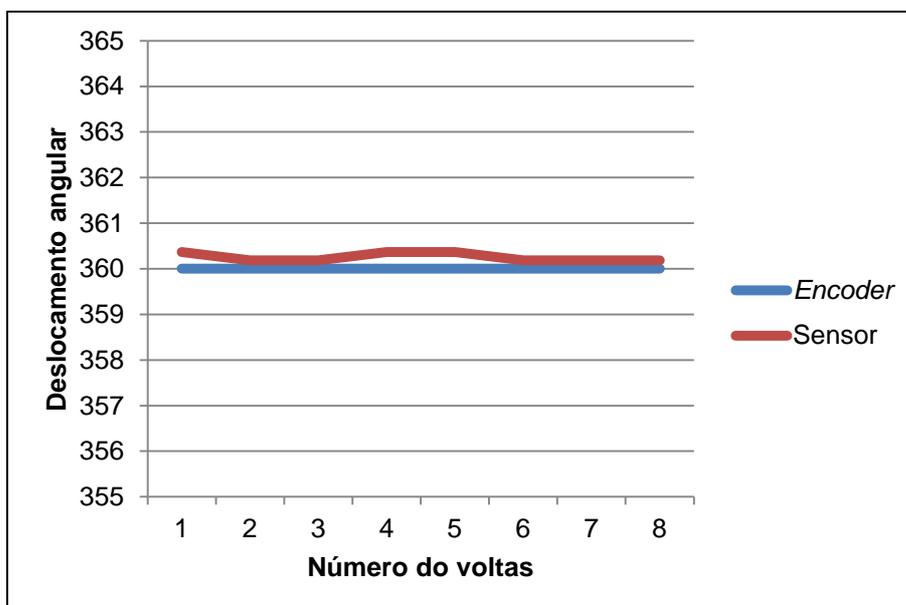


Gráfico 10– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 20 volts.

Fonte: Autoria própria.

A tabela 14 demonstra a diferença de posição que o dispositivo de efeito Hall obteve em relação ao *encoder* incremental. A partir dela, pode-se concluir que houve uma variação de no máximo -0,37 graus para uma volta do redutor do motor CC.

Tabela 14 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 20 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	<i>Encoder</i>	Sensor	Erro
1	360	360,370	-0,370
2	360	360,185	-0,185
3	360	360,185	-0,185
4	360	360,370	-0,370
5	360	360,370	-0,370
6	360	360,185	-0,185
7	360	360,185	-0,185
8	360	360,185	-0,185

Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Análise para alimentação do motor em 24 V_{CC}

Com os dados de velocidade tratados para uma tensão de alimentação de 24 volts no motor CC, torna-se possível elaborar o Gráfico 11, que os relaciona a cada volta desenvolvida pelo redutor. Compreendendo este gráfico é possível concluir que o transdutor de efeito Hall determinava velocidades superiores às averiguadas pelo *encoder* incremental, porém sem apresentar grandes oscilações ao longo das 8 voltas estudadas.

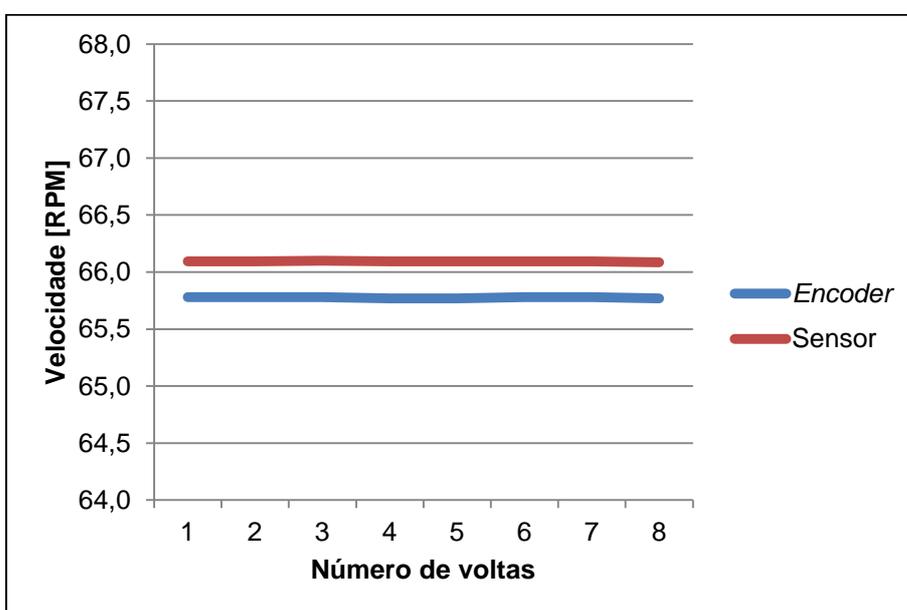


Gráfico 11 – Velocidade angular do redutor para alimentação de 24 volts.
Fonte: Autoria própria.

São apresentadas na Tabela 15 as velocidades em RPM para cada volta, medido por ambos os equipamentos. Há uma variação entre eles que pode ser calculada pelo valor medido do *encoder* menos o valor que o dispositivo com efeito Hall identifica. De acordo com a tabela, a variação ao longo das 8 voltas da velocidade é da ordem de -0,3 RPM acima do observado pelo transdutor óptico.

Tabela 15 – Comparação de velocidade média do redutor para alimentação de 24 volts

Velocidade média [RPM]		
Encoder	Sensor	Variação
65,780	66,094	-0,314
65,780	66,094	-0,314
65,780	66,100	-0,320
65,768	66,094	-0,326
65,768	66,094	-0,326
65,780	66,094	-0,314
65,780	66,094	-0,314
65,768	66,087	-0,319

Fonte: Autoria própria.

Para realizar o estudo dos resultados para o deslocamento angular quando o motor CC é energizado com 24 volts, emprega-se o Gráfico 12, o qual expõe que a variação de leitura do transdutor de efeito Hall em relação à posição angular, pelo número de voltas do redutor está abaixo ou igual ao identificado pelo *encoder* incremental.

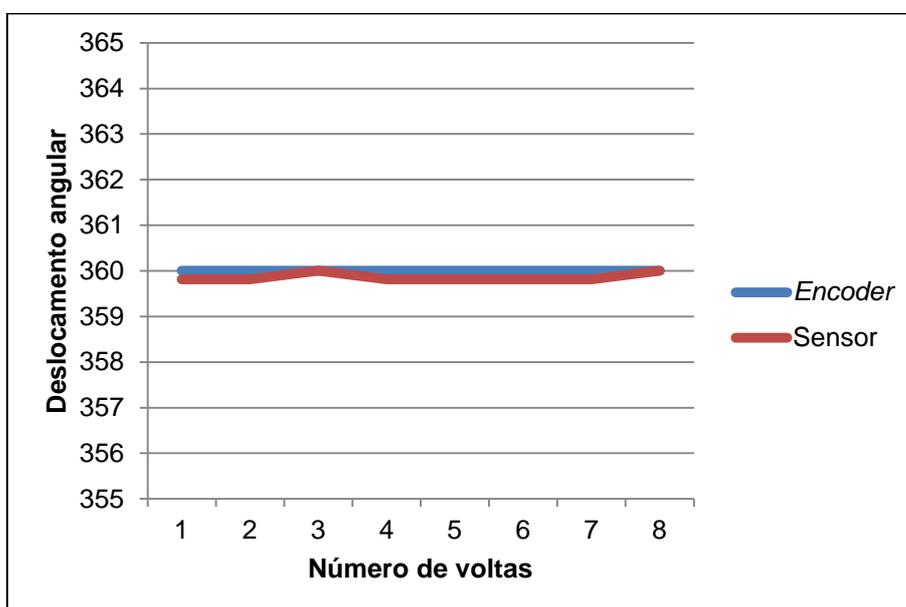


Gráfico 12– Deslocamento angular do redutor para alimentação de 24 volts.

Fonte: Autoria própria.

A tabela 16 mostra a diferença de posição que o dispositivo de efeito Hall obteve em relação ao *encoder* incremental. A partir dela, pode-se concluir que houve uma diferença de posição entre sensor e *encoder*, inferior a constatada quando se estudou o deslocamento angular do redutor para alimentação de 4 volts no motor

CC. De acordo com esta tabela a variação entre os dispositivos permaneceu entre 0 e 0,185 graus.

Tabela 16 – Comparação de deslocamento angular do redutor para alimentação de 24 volts

Deslocamento em graus			
Número de voltas	Encoder	Sensor	Varição
1	360	359,815	0,185
2	360	359,815	0,185
3	360	360,000	0,000
4	360	359,815	0,185
5	360	359,815	0,185
6	360	359,815	0,185
7	360	359,815	0,185
8	360	360,000	0,000

Fonte: Autoria própria.

5. CONCLUSÃO

A utilização da tecnologia dos *encoders* no mercado está bem consolidada, uma vez que os mais atuais possuem elevada precisão na detecção do posicionamento angular, atendendo as necessidades industriais. Entretanto, para algumas aplicações os transdutores de efeito Hall possuem características que os colocam em vantagem em relação aos *encoders* incrementais ópticos como tamanho reduzido, sendo uma solução para espaços limitados, e imunidade à contaminação por sujidades como poeiras e graxas.

Porém, com a realização da análise proposta neste trabalho foi possível perceber uma limitação técnica do dispositivo com efeito Hall digital embarcado no motor Doga 319 como baixa resolução e alta variação do sinal de saída; isto fica claro quando os resultados apresentados no capítulo 4 são analisados, assim, percebe-se que a aplicação destes dispositivos não é recomendável para medição de posição e velocidades em processos que exijam alta precisão.

Para aplicações em ambientes que seriam agressivos à um *encoder* e que não exigem grande precisão como os processos de mineração e em veículos voltados para agronomia (plantadeiras e colheitadeiras), a aplicação dos transdutores de efeito Hall como solução de monitoramento de velocidade e posição devem ser consideradas.

Pelos valores obtidos no experimento e que constam nas tabelas da seção 4, é possível verificar que para processos que tem como requisito de precisão de posição valores menores que 2 graus, o uso do transdutor de efeito Hall analisado neste projeto é inviável.

Segundo o fabricante do Motor, o sinal de saída do dispositivo Hall, gerado pela leitura do ímã circular acoplado ao eixo do rotor, é de 972 pulsos por revolução do eixo da redução desta máquina, assim este sinal teria uma resolução de $360^\circ/972$ pulsos, ou seja, $0,37^\circ/\text{pulso}$. Porém, quando comparado com o *encoder* incremental, que apresenta uma resolução de $0,35^\circ/\text{pulso}$, verifica-se que a resposta do Hall apresenta uma diferença elevada, que nestes experimentos chegou a dois graus. Quando a grandeza avaliada é velocidade, o dispositivo Hall também apresenta uma divergência em relação ao *encoder*, a qual chegou a valores acima de 0,3 RPM.

Todos os resultados obtidos neste trabalho foram tomados do transdutor de efeito Hall comparado a um *encoder* incremental de 1024 pulsos por revolução e os

diferentes valores lidos por ambos foram tomados da mesma aplicação e ao mesmo tempo, assim foi possível concluir que o dispositivo com efeito Hall analisado neste trabalho pode ser aplicado como um elemento de retroalimentação de um sistema desde que suas limitações sejam aceitas por tal processo.

Durante a realização deste projeto encontraram-se algumas dificuldades que foram limitantes ao aproveitamento da análise como:

- Limitação com a placa de aquisição de dados disponível para este estudo, a qual não apresentava funcionalidade das entradas digitais e possuía apenas um contador digital;
- Espaço físico interno limitado do motor, o que impossibilitou a utilização do transdutor de efeito Hall analógico no interior desta máquina;
- Tratamento dos dados aquisitados devido a grande quantidade de informações geradas pelos instrumentos conectados às entradas analógicas da DAQ.

Apesar dos problemas encontrados foi possível aplicar os conhecimentos assimilados em diversas disciplinas durante o curso como, por exemplo, máquinas elétricas, instrumentação industrial, eletrônica digital entre outras. Além disso, outro ganho obtido com a realização deste projeto foi no âmbito pessoal, onde foi possível aprimorar as técnicas de tomada de decisão, resolução de problemas e gerenciamento de conflitos.

Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros visando a continuação deste projeto destacam-se:

- Utilização do transdutor analógico, fazendo leitura do campo magnético diretamente do estator;
- Aplicação do sensor Hall digital com ímã circular com mais pares de pólos;
- Realização de análise com transdutores de posição e velocidade como *resolvers*.

REFERÊNCIAS

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Bipolar Switch Hall-Effect ICs**. 2010. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Bipolar-Switch-Hall-Effect-ICs.aspx>>. Acesso em: 02 mar. 2013.

_____. **Continuous-time ratiometric linear Hall effect sensors**. 2005. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/Products/Magnetic-Linear-And-Angular-Position-Sensor-ICs/Linear-Position-Sensor-ICs/A1301-2.aspx>>. Acesso em: 03 abr. 2013.

_____. **Micropower Switches and Latches**, 2010. Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/en/Products/Magnetic-Digital-Position-Sensor-ICs/Micropower-Switches-Latches.aspx>>. Acesso em: 02 mar. 2013.

_____. **Unipolar Hall-Effect Sensor IC Basics**. 2010, Disponível em: <<http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Unipolar-Hall-Effect-Sensor-IC-Basics.aspx>> Acesso em: 02 mar. 2013.

_____. **A3423: Dual Channel Hall Effect Direction Detection Sensor IC**. 2013. Disponível em: <http://www.allegromicro.com/Products/Magnetic-Digital_Position-Sensor-ICs/Dual-Element-Switches/A3423.aspx>. Acesso em: 11 mar. 2013.

AUTONICS. **E40 Series**. 2013. Disponível em: <http://www.autonics.com/products/products_detail.php?catecode=01/06/01&db_uid=57>. Acesso em: 20 jun. 2013.

AVAGO TECHNOLOGIES. **Motion control encoders in electrical motor systems**. 2007. Disponível em: <<http://www.efo.ru/components/avago/catalog/design%20guide/AV00-0128EN.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

BARBOSA, Gustavo Vinícius Duarte. Notas de aula: **Motores elétricos de corrente contínua e universal**. 2001. Disponível em:

<http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disciplina%20de%20M%E1quinas%20El%E9tricas/Disciplina%20de%20M%C3%A1quinas%20El%C3%A9tricas/motor_cc.pdf>.

Acesso em: 28 mar. 2013.

BRAGA, Newton C. Sensores Hall de proximidade. **Saber Eletrônica**, Tatuapé, n. 416, p. 1, fev. 2008. Disponível em:

<<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/237>>. Acesso em: 3 mar. 2013.

CORRÊA, Marco A. Servoacionamentos e Servomotores. **Revista Mecatrônica Atual**, Tatuapé, n. 781, p. 1, mar. 2011, Disponível em:

<<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/781>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas Elétricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

DOGA. **319 With Sensor Hall**. Barcelona: 2013. 2 p.

EMERSON. **An engineering guide to position and speed feedback devices for variable speed drives and servos**. 2011. Disponível em:

<http://www.eurotechsa.com.ar/data/download/newsletter_docs/002/position_guide_lowres.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2013.

FAVRETTO, JAIME. Notas de aula do curso de engenharia elétrica. **Servomotores**. 2010. Disponível em:

<<http://pessoal.utfpr.edu.br/favretto/arquivos/Servoacionamentos.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2013.

FERLA, Paulo Andrei Baggio et al. **Sistema de leitura de tensão elétrica, corrente elétrica e fase**. 2009. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAejToAJ/medicao-efeito-Hall>>. Acesso em: 14 fev. 2013.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Fundamentos de física**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

INNOWATT. **Encoder incremental e absoluto EIA-1**. 2011. Disponível em: <<http://www.innowatt.ind.br/pdf/Folder%20ENCODER.pdf>>. Acesso em: 21 de mar. 2013.

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO. Departamento de física. **Calibração de um transdutor de Efeito Hall**. 2007. Disponível em: <https://www.dfi.isep.ipp.pt/uploads/Guioes%20Labs/2xxx%20-%20Electricidade%20e%20Electromagnetismo/2042_CalibracaoSensorEfeitoHall.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2013.

KÍTOR, Glauber L. **Força de Lorentz**. 2010. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/forca-de-lorentz/>>. Acesso em: 29 mar. 2013.

MATIAS, Juliano. Motores Elétricos. **Revista Mecatrônica Atual**, Tatuapé, n. 305, p. 1, dez. 2008. Disponível em:

<<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/305>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

MICRONOR. **Fiberoptic Rotary encoders**. 2013. Disponível em: <<http://www.micronor.com/products.php?category=Fiber%20Optic%20Rotary%20Encoders&offset=0>>. Acesso em: 5 abr. 2013.

MILANO, Shaun. **Hall effect principles**. 2009. Disponível em: <www.allegromicro.com/~media/Files/Technical-Documents/AN296065-Allegro-Hall-Effect-Sensor-ICs.ashx>. Acesso em: 19 fev. 2013.

NATIONAL INSTRUMENTS. **User Guide and specifications: NI USB-6008/6009**. 2012. Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2013.

_____. **NI Signal Express**. 2013. Disponível em: <www.ni.com/labview/signalexpress>. Acesso em: 17 jul. 2013

OLIVEIRA Luiz C. Notas de aula do curso de engenharia eletrônica: **Motores elétricos**. 2011. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/oliveira/arquivos/MaquinasEletricas.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2013.

OHIO ELECTRIC MOTOR. **Permanent magnet DC motors**. 2011. Disponível em: <<http://www.ohioelectricmotors.com/permanent-magnet-dc-motors-649>>. Acesso em: 22 mar. 2013.

PARKER. **Tecnologia eletromecânica**. Jacareí: Parker. 2003.

PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial: Aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. 2006. Disponível em: <http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2013.

POWERTRANSMISSION. **Sensingthemotion**. 2010. Disponível em: <<http://www.powertransmission.com/issues/0810/sensors.pdf>>. Acesso em 12 mar. 2013.

RAMIRES, Leandro Santiago; MURASUGI, Márcio Tetsuya. **Biblioteca de aquisição de dados**. 2003. Disponível em: <http://www2.dem.inpe.br/val/homepage/cursos/leandro_marcio_TGI_UBC_03.pdf> Acesso em: 27 mai. 2013

ROCHA, Joaquin E. Notas de aula do curso de engenharia de controle e automação. **Encoders e resolvers**. 2009. Disponível em: <http://pessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/arquivos/Acionamento_07_Encoder_e Resolver.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2013.

SALA DE FÍSICA. **Hendrik Antoon Lorentz**. 2013. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/saladefisica9/biografias/lorentz.html>>. Acesso em 15 mar. 2013.

SÓ FÍSICA. **Efeito Hall**. 2013. Disponível em: <<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/CampoMagnetico/efeitohall.php>>. Acesso em: 19 jan. 2013.

UTFPR-PB. Notas de Aula. **Motores de corrente contínua**. 2013. Disponível em: <http://www.pb.utfpr.edu.br/claroline/claroline/document/goto/index.php?url=%2FAPOSTILAS_E_FORMULARIOS%2FMOTORES_DE_CORRENTE_CONTINUA-1.pdf&cidReq=ME32M_001&b667fdb45d485c99dd74a16ea2e0aa0d=01dc0131f5dcba797fb1ff39bddf8611>. Acesso em 30 jan. 2013.

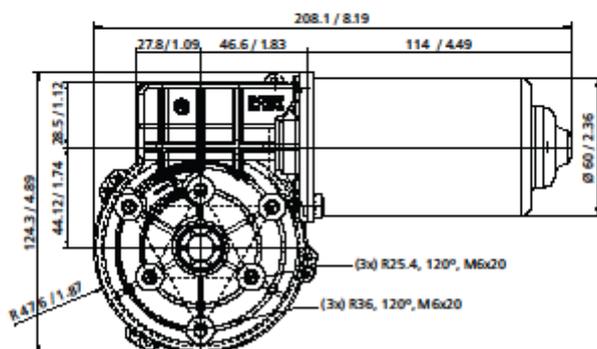
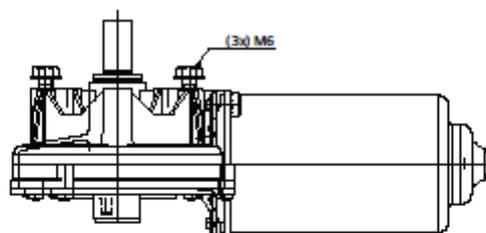
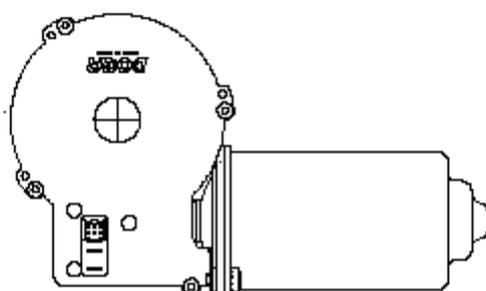
VILLAR, Gileno José de Vasconcelos. Notas de aula do curso de eletrotécnica. **Geradores e motores CC (máquinas de corrente contínua)**. 2006, Disponível em: <<http://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/maquinas-de-cc>>. Acesso em: 27 mar. 2013.

WEG S. A. **DT – 2 Inversor de frequência**. Blumenau: Weg, 1997.

_____. **DT – 3 Características e especificações de motores de corrente contínua e conversores CA/CC**. Blumenau: Weg, 2006.

_____. **Tacogeradores**. Blumenau: Weg, 2008.

ANEXO A – Catálogo do motor Doga 319 com sensor Hall.

319WITH SENSOR HALL
CON SENSOR HALL**DOGA**

mm / in

TECHNICAL SPECIFICATIONS
DATOS TÉCNICOS

MOTOR

TRANSMISSION RATIO	81:1
RELACION DE REDUCCION	78:2
	67:4

n (magnet pole pairs) n (pares de polos del imán)	12
--	----

SENSOR HALL

	RATIO	PULSES/REV
PULSES/REV (output shaft)	81:1	972
PULSOS/REV (eje de salida)	78:2	468
	68:4	201

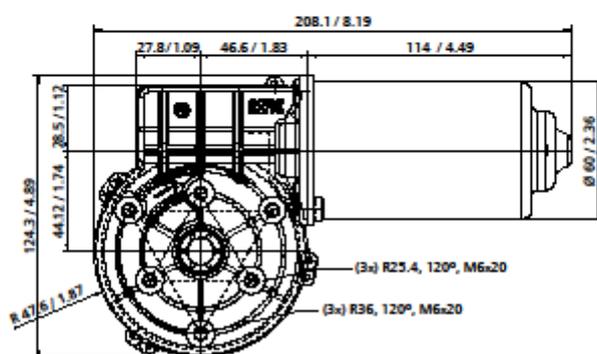
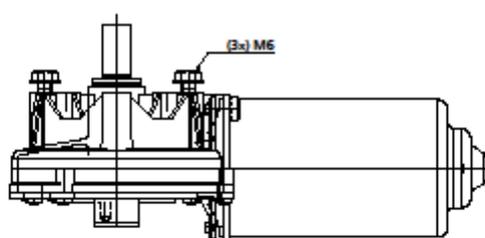
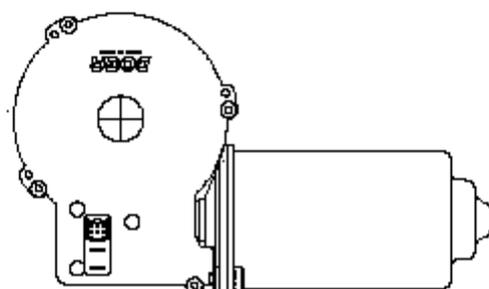
PULSES/REV (armature) PULSOS/REV (inducido)	12
--	----

SUPPLY VOLTAGE TENSION DE ALIMENTACION	5 V 12 V 24 V
---	---------------------

OUTPUT SIGNALS CANALES DE SALIDA	2
-------------------------------------	---

OUTPUT CONFIGURATION CONFIGURACION DE SALIDA	open collector colector abierto
---	------------------------------------

OUTPUT CURRENT INTENSIDAD DE SALIDA	max. 20 mA
--	------------

319**WITH SENSOR HALL
CON SENSOR HALL****DOGA**

mm / in

**TECHNICAL SPECIFICATIONS
DATOS TÉCNICOS****MOTOR**

TRANSMISSION RATIO	81:1
RELACIÓN DE REDUCCIÓN	78:2
	67:4

n (magnet pole pairs)	12
n (pares de polos del imán)	

SENSOR HALL

	n:m	pulsos/rev
PULSES/REV (output shaft)	81:1	972
PULSOS/REV (eje de salida)	78:2	468
	68:4	201

PULSES/REV (armature)	12
PULSOS/REV (inducido)	

SUPPLY VOLTAGE	5 V
TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN	12 V
	24 V

OUTPUT SIGNALS	2
CANALES DE SALIDA	

OUTPUT CONFIGURATION	open collector
CONFIGURACIÓN DE SALIDA	colector abierto

OUTPUT CURRENT	max. 20 mA
INTENSIDAD DE SALIDA	