

MÓDULO DIDÁTICO FLEXÍVEL DE BAIXO CUSTO PARA SENSORIAMENTO DE VELOCIDADE

MILENA, F. PINTO¹, MATUSALÉM, M. LANES¹, OLGA, M. TOLEDO¹

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus III
Rua José Peres 558, Leopoldina - MG, Brasil

milena.pinto@member.isa.org, mmlanes@lepoldina.cefetmg.br,
olgatoledo@lepoldina.cefetmg.br

Abstract— The automation and control of rotating machines represents an important research area that need of parameters measurement such as speed and others. The practical experimentation of different process types is important for the automation and control engineering undergraduates profile. On other hand, due to the fast technological change, teach some related practical in these areas is very difficult. The systems and technologies change so fast that to adapt practical activities to undergraduate courses is a challenge. For this purpose, systems that have modularity and flexibility are required, such as didactical modules. This work proposes a didactical module to angular speed indirect measurement using optic principles. The proposed system has advantage of flexibility to use and modification and low cost. As a result, there was obtained a measurer with parameters performance compatible with the market and material cost about three times smaller.

Keywords—Indirect Measurement, Tachometers, Optic Sensor, Signal Processing, Engineering Learning.

Resumo — A medição de velocidade em máquinas rotativas representa um elemento de importância para diversas áreas, o que permite o controle e análise dos mais variados processos. A experimentação laboratorial tanto da finalidade específica, medição de velocidade, quanto do desenvolvimento dos processos de medição é de grande importância para o perfil de formação profissional do egresso dos cursos de engenharia voltados à área de controle e automação. Em outro aspecto, o desenvolvimento de atividades práticas relacionadas às disciplinas de graduação em laboratório tem dificuldade de acompanhar a rápida evolução tecnológica de sistemas e equipamentos. Neste trabalho é proposto um módulo didático de medidor ótico de velocidade sem contato mecânico, possuindo como vantagens a flexibilidade de utilização e modificação para absorção de novas técnicas e o seu baixo custo. Como resultado, obteve-se um medidor com parâmetros de desempenho compatíveis com os de mercado e com valor de custo aproximadamente três vezes menor.

Palavras-chave—Medição indireta, Tacômetros, Sensor Ótico, Processamento de Sinais, Ensino em engenharia.

1 Introdução

A dificuldade de absorção da rápida evolução tecnológica de sistemas e equipamentos é um problema no ensino em engenharia, em especial nas áreas de grande desenvolvimento tecnológico (SILVA, 2011). Como exemplo pode-se citar as portas de comunicação dos computadores que anteriormente eram portas paralelas ou seriais, enquanto hoje muitos computadores dispõem apenas de portas do tipo USB. Isto significa que equipamentos comercializados como kits didáticos podem se tornar obsoletos rapidamente tornando-os descartáveis.

Os cursos de engenharia figuram entre os que possuem o maior índice de evasão (CHRISPIM, 2003). Estes devem, portanto, estimular o desenvolvimento do aluno de forma a motivá-lo. Formar profissionais que atuam na área de engenharia é uma tarefa difícil, pois requer que os alunos tenham tanto experiência em ferramentas laboratoriais quanto industriais, buscando além de tudo a interação entre os aspectos teóricos e práticos. (BRAGA, 2008)

A utilização de módulos didáticos em disciplinas práticas apresenta benefícios em relação ao uso exclusivo da simulação computacional. Como vantagem pode-se citar a melhor compreensão dos fenômenos físicos e o desenvolvimento das habilidades do estudante em operar equipamentos elétricos

(CORDEIRO, 2009). Dentro deste contexto, o uso de tecnologias que permitem a interação do aluno com estes sistemas estão sendo cada vez mais empregadas. O desenvolvimento de kits didáticos permitem agregar características necessárias a um ambiente de aprendizagem dinâmico, bem como a atualização dos mesmos conforme decorre o desenvolvimento tecnológico.

Conforme Cordeiro (2009), as ferramentas educacionais, que possuem a vantagem adicional de não serem sistemas proprietários, possibilitam ao aluno o conhecimento do real funcionamento dos circuitos eletrônicos que envolvem o projeto. Além do mais, outra característica associada à construção deste tipo de equipamento é a flexibilidade de atualização e modificação do *firmware* e *hardware*, seja devido à evolução tecnológica ou a inserção de novas competências aos alunos representadas por novos desafios laboratoriais.

Existem diferentes tipos de sensoriamento de velocidade de máquinas rotativas que são utilizadas nas aplicações industriais em função da necessidade dos sistemas de controle atuais. Para manter a qualidade dos produtos deve-se sempre buscar meios de obter a precisão e a acurácia das medidas. (KIKUCHI, 1996)

Elementos de medição ópticos possuem características interessantes quando comparados a outros medidores, como *tacho-geradores* e *encoders* mecânicos

cos. Entre estas vantagens destacam-se o aumento da escala de operação, sua boa resolução e precisão. (ERNST, 2002)

Neste trabalho é apresentado um módulo didático para medição de velocidade angular utilizando conjunto fotodetector e refletor. O objetivo deste desenvolvimento é a obtenção de um equipamento de baixo custo e com precisão e sensibilidade compatível com os dispositivos ofertados comercialmente. Como característica adicional pretende-se um sistema que permita a flexibilidade para inserção de novas tecnologias a serem utilizadas no desenvolvimento de competências relacionadas ao ensino em engenharia. Como consequência, este módulo didático será utilizado para a elaboração de pesquisas futuras no campo de automação e controle.

2 Metodologia

2.1 – Desenvolvimento do Protótipo

Para a seleção do método de medição deve levar em consideração uma série de características como: (i) precisão, (ii) a localização dos pontos de medição, (iii) condições ambientais extremas ou não e (iv) suportarem contato físico devido ao acréscimo de carga inserido no sistema. Tais medidas são difíceis de serem realizadas e necessitam de instrumentos específicos (PROULX, 2011).

As aplicações industriais exigem equipamentos cada vez mais robustos, pequenos e de menor custo (NAKANO, 2005). *Encoders* ópticos são sensores muito utilizados para medições de velocidade e posição, porém acabam por possuir dificuldades de miniaturização e tem sua precisão fortemente dependente do posicionamento preciso de seus componentes (MIYAJIMA, 1996).

Foi feito um estudo dos diferentes métodos de medição a fim de determinar a melhor relação custo benefício. As características mais relevantes estão apresentadas na Tabela I.

Tabela I: Características dos métodos de medição

| Medidor | Desvantagem | Vantagem | Exatidão / Range |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Taco gerador | Desgaste dos Elementos Moveis | Fornece a Direção do Movimento. | $\pm 0,05\%$ / Médio |
| <i>Encoder</i> | Sensibilidade ao Alinhamento | Fornece Posição. | $\pm 0,05\%$ / Pequeno |
| Ótico | Não percebe posição ou direção. | Não necessita de contato. | 0,05% / Maior |
| Estroboscópio | Dificuldade de leitura. | Não necessita de contato. | Depende do Usuário / Médio |

O mecanismo de funcionamento do detector selecionado consiste de um emissor e fotodetector que

reconhece o sinal gerado por uma fita reflexiva, Figura 1.

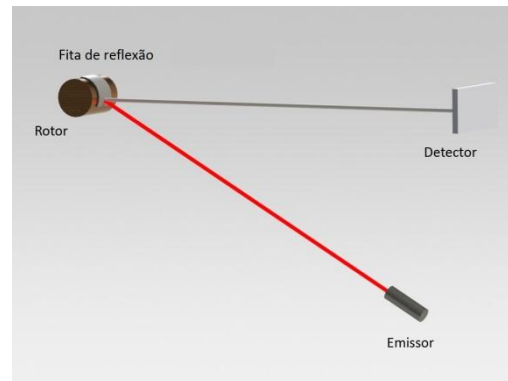


Figura 1: Esquema de Funcionamento do Fotodetector.

Após o condicionamento do sinal, submeteu-se o mesmo ao processamento do microcontrolador, responsável pelo cálculo da velocidade de rotação. Em seguida, foi desenvolvido um mecanismo de comunicação em tempo real com o computador. Um diagrama esquemático de funcionamento simplificado do sistema pode ser visto na Figura 2.

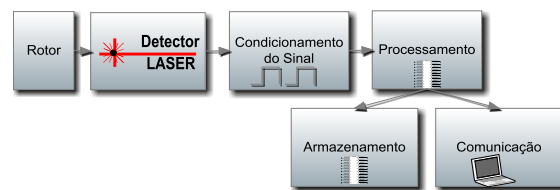


Figura 2: Esquema de Fluxo dos Dados.

O circuito de condicionamento do sinal consiste de um amplificador operacional *rail-to-rail*, com resposta em frequência compatível com a velocidade de medição do protótipo. A entrada de referência do amplificador foi projetada para eliminar a interferência da luminosidade ambiente.

Na etapa de processamento, o microcontrolador é responsável pela contagem do número de reflexões geradas em um intervalo de tempo definido. Este procedimento permite a obtenção da média da velocidade no intervalo de medição, ajudando a minimizar possíveis erros causados por influências externas.

2.2 – Análise do Modelo de Medição

Utilizando a metodologia proposta por Tsuji (2005) podemos quantificar a velocidade medida pelo instrumento como apresentado em (1), sendo n_p o número de pulsos medidos, T o tempo de amostragem e R o número de reflexões por rotação.

$$\omega_{rpm} = \frac{n_p}{T \cdot R} \cdot 60 \quad (1)$$

Reorganizando (1) em função da derivada da velocidade angular obtém-se a função de transferência para o medidor, aproximada para um sistema de primeira ordem:

$$\frac{\Omega_{rpm}}{N_p} = \frac{60 \cdot k}{T \cdot R} \cdot \frac{1}{s + k} \cdot 60 \quad (2)$$

onde k é o ajuste da constante de tempo para um sistema de primeira ordem.

A função de transferência para o medidor apresenta-se como um sistema de primeira ordem. O diagrama de blocos pode ser visualizado na Figura 3 e a resposta ao degrau na Figura 4.

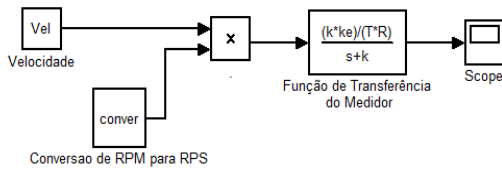


Figura 3: Diagrama de Blocos Representativo do Medidor de Velocidade.

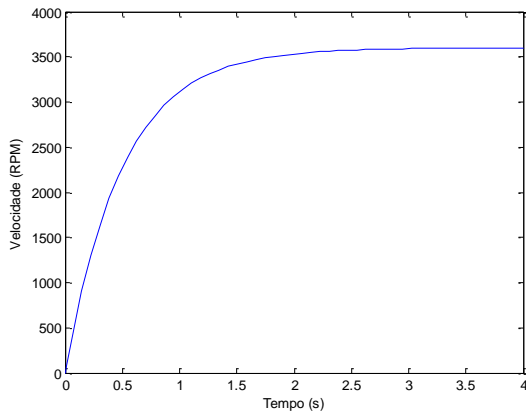


Figura 4: Resposta ao Degrau de 3600 RPM para o Medidor de Velocidade

A técnica de medição utilizada tende a relacionar o tempo de resposta do medidor e a velocidade mínima medida pelo mesmo. Para uma boa exatidão selecionou-se um intervalo de amostragem de 3,5s, o que limita a capacidade de detecção mínima do circuito a 15 RPM.

A velocidade máxima de leitura é limitada apenas pelo tempo necessário para que o microcontrolador seja capaz de contar os pulsos gerados pela fita reflexiva, e desta forma, é possível realizar a detecção de velocidades próximas a 100.000 RPM.

Podemos adicionar então as não linearidades observadas através de experimentação obtendo-se o diagrama de blocos da Figura 5 que possui a resposta ao degrau da Figura 6.

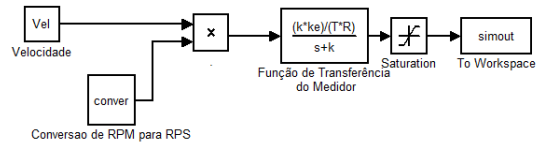


Figura 5: Diagrama de Blocos Representativo do Medidor de Velocidade com Não Linearidades.

A metodologia de validação e avaliação do circuito consistiu em utilizar um motor CC acoplado com um medidor comercial e com o protótipo desenvolvido.

Realizaram-se medidas simultâneas nos dois aparelhos permitindo então a verificação dos parâmetros de desempenho estático dos mesmos.

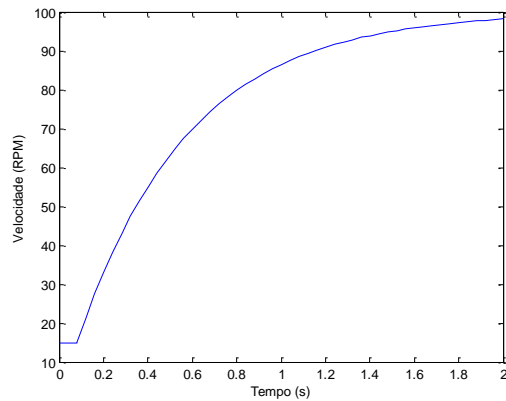


Figura 6: Resposta ao Degrau de 100 RPM para o Medidor de Velocidade com Saturação

Considerou-se, durante todas as medições feitas, o tempo necessário para que os medidores atingissem o regime permanente, garantindo a precisão da medida.

Foi desenvolvido o circuito para a confecção do protótipo apresentado na Figura 7.

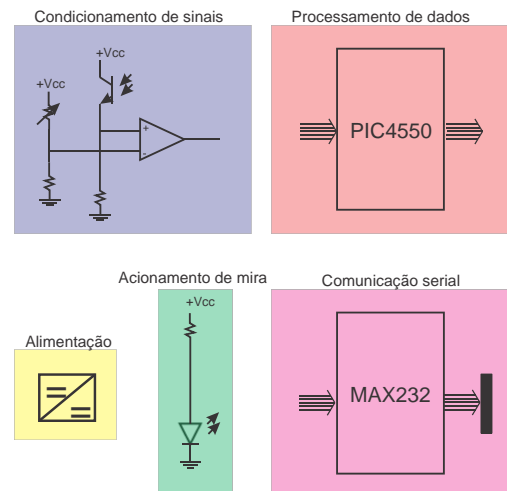


Figura 7: Representação esquemática do circuito do protótipo.

Os blocos funcionais, alimentação, condicionamento de sinal, acionamento de mira, processamento de dados e comunicação serial representam os sistemas já descritos anteriormente.

2.3 – Análise de Custos

Para a análise econômica do projeto realizou-se o levantamento dos custos de fabricação do protótipo, e na seleção de componentes eletrônicos observou-se como critério a facilidade de acesso aos mesmos. Desta forma foi possível garantir a fácil reprodutibilidade do protótipo.

Foram levantados ainda os custos de aquisição de equipamentos comerciais com objetivo de realizar análises comparativas.

2.4 – Aplicabilidade do Protótipo nas Competências Didáticas

Conforme Andrade (2011) existe uma forte tendência para o ensino baseado em competências e habilidades desejadas como perfil para o egresso.

Dentre as competências fundamentais que podem ser trabalhadas podemos citar: “dominar princípios e leis fundamentais da física” e “capacidade de produzir experimentos análise e relatórios”. (SESU, 2009)

Considerando as disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação (CEFET-MG, 2006) o medidor pode ser aplicado:

- Nas medições de velocidade angular nas disciplinas de: física experimental, laboratório conversão de energia;
- Na análise de circuitos eletrônicos nas disciplinas de: laboratório de sistemas digitais e laboratório de microprocessadores;
- Em práticas de instrumentação na disciplina de metrologia e sensores;
- Em processos de automação nas disciplinas de: laboratório de controle automático, laboratório informática aplicada e laboratório de instrumentação e controle.

3 Resultados

3.1 – Desenvolvimento do Protótipo

Construiu-se um protótipo de testes com objetivo de avaliar os diversos aspectos práticos do projeto, tais como o consumo de energia e os tipos de fontes luminosas disponíveis. O protótipo pode ser visto na Figura 8.



Figura 8: Protótipo desenvolvido para testes.

Foram avaliados três tipos de baterias possíveis para utilização no circuito que são CR2032, 6F22 e baterias de celulares. As baterias CR2032 possuem o menor tamanho dentre as selecionadas, porém as mesmas não apresentaram boa durabilidade em função do consumo de energia do protótipo. No caso das baterias 6F22, o problema consistiu na perda de potência em função da necessidade da conversão de sua tensão de fornecimento (9V) para a tensão de trabalho do microcontrolador (5V).

Desta forma, selecionou-se a bateria de celular, pois apresentou a maior durabilidade dentre todas, e também, tamanho viável para a aplicação. Outro fator de seleção consistiu na possibilidade da bateria ser recarregada, aumentando então a flexibilidade do projeto. Para uma tensão de 3.7V fornecida pela bateria de celular verificou-se um consumo de 15 mA durante as medições, o que permitiu estimar para a bateria utilizada, uma durabilidade de aproximadamente 36 horas de medição. A bateria em conjunto com o protótipo pode ser verificada Figura 9.



Figura 9: Protótipo e Bateria de Alimentação.

3.2 – Análise do Modelo de Medição

Para a captura dos dados, desenvolveu-se através do *software Matlab®*, um *script* responsável por capturar os dados da medição provenientes do microcontrolador.

Para validação do protótipo gerou-se um gráfico de comparação entre um medidor de referência que utiliza um encoder como elemento sensor e o protótipo de testes. No gráfico da Figura 10, é vista a vari-

ação da velocidade com o tempo medida pelos dois sensores.

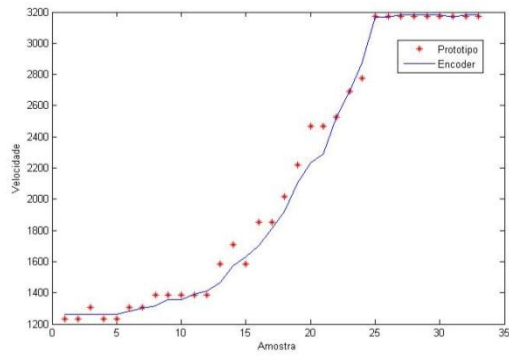


Figura 10: Gráfico comparativo entre o medidor de referência e o protótipo

Uma análise comparativa entre os principais parâmetros de avaliação e desempenho dos elementos sensores, protótipo e um equipamento comercial, pode ser vista na Tabela II.

Tabela II: Análise Comparativa dos Parâmetros de Desempenho

| Parâmetro | Protótipo | DT-2234C |
|---------------------------|-------------|--------------|
| Range (RPM) | 15 a 99.999 | 2.5 a 99.999 |
| Resolução (RPM) | 1 | 1 |
| Exatidão | 1.20% | 0.05% |
| Tempo de Amostragem (s) | 3 | 0.8 |
| Distância de Medição (cm) | 2 a 5 | 5 a 20 |
| Consumo (mA) | 15 | 35 |
| Custo | ±R\$ 36 | ±R\$ 99 |

Para cálculo da exatidão do circuito fez-se várias medidas tanto com o protótipo quanto com o medidor comercial de referência. Nas medições realizadas pelo medidor de referência adicionou-se o valor máximo admissível para erro de medição. Assim garantiu-se que o valor de erro calculado fosse sempre menor ou igual a exatidão apresentada.

3.3 – Análise de Custos

O cálculo de custo dos materiais envolvidos para a construção do protótipo é verificado na Tabela III. Nesta tabela observam-se os valores individuais dos componentes utilizados.

Tabela III: Custo dos Materiais para Construção do Protótipo

| Material | QTD | R\$ | Total |
|---------------------------|-----|----------|----------|
| Resistências | 4 | R\$ 0,02 | R\$ 0,08 |
| Capacitores Eletrolíticos | 4 | R\$0,59 | R\$ 2,36 |
| Capacitores Cerâmicos | 1 | R\$0,27 | R\$ 0,27 |
| Diodos | 1 | R\$ 0,15 | R\$ 0,15 |
| Fenolite 10 x 20 cm | 1 | R\$ 4,70 | R\$ 4,70 |
| Conectores / Barra de | 3 | R\$ 1,00 | R\$ 3,00 |

| | | | |
|--------------------------|---|----------|------------------|
| Pinos | | | |
| Microcontrolador | 1 | R\$5,99 | R\$ 5,99 |
| Adaptador Serial | 1 | R\$ 1,96 | R\$1,96 |
| Botões | 5 | R\$ 0,27 | R\$1,35 |
| Cabos | - | R\$ 1,00 | R\$1,00 |
| Foto Transistor | 1 | R\$0,60 | R\$0,60 |
| Led Infravermelho | 1 | R\$0,48 | R\$0,48 |
| Amplificador Operacional | 1 | R\$0,59 | R\$0,59 |
| Bateria | 1 | R\$8,00 | R\$8,00 |
| Suporte / Caixa Plástica | 1 | R\$2,00 | R\$2,00 |
| Solda / Outros | 1 | R\$3,00 | R\$3,00 |
| Total | | | R\$ 35,53 |

Realizou-se ainda o levantamento do valor de mercado para os principais tipos de medidores comerciais disponíveis, conforme se verifica na Tabela IV.

Tabela IV: Faixa de Valores para Medidores Comerciais

| Medidor | Faixa de Preço |
|---------------|--------------------|
| Taco gerador | R\$ 320 a R\$ 1200 |
| Encoder | R\$600 a R\$ 1900 |
| Ótico | R\$ 60 a R\$ 500 |
| Estroboscópio | R\$ 800 a R\$ 1500 |

Avaliando-se puramente o valor econômico dos medidores comerciais e do protótipo verifica-se que o custo de materiais para a fabricação do protótipo representa uma alternativa viável.

4 Conclusão

A partir dos dados de teste obtidos pelo protótipo experimental, observou-se que os resultados das medições foram próximos às medições de referência, e desta forma, pode-se validar o circuito desenvolvido para as etapas decorrentes do projeto.

Através da análise comparativa entre os parâmetros de desempenho da Tabela III, percebe-se que todos os parâmetros apresentaram-se próximos com os padrões de mercado. Avaliando o valor dos materiais utilizados, verificou-se que o projeto apresenta excelente relação custo/benefício apresentando viabilidade econômica favorável.

Constatou-se que o desenvolvimento resultou em um módulo didático que permite a percepção de competências relacionadas ao ensino de engenharia sendo, por isso, capaz de melhorar a aprendizagem do aluno. Ressalta-se ainda sua versatilidade em permitir a fácil modificação e atualização dos componentes do sistema em função da evolução tecnológica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por meio da Bolsa de Iniciação Científica na modalidade de inovação tecnológica (PIBITI) do programa institucional do CEFET-MG, ao CEFET-MG e à FAPEMIG pelo suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento e apresentação deste projeto.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, A. C., DINIZ, L. G., CAMPOS, J. C. (2011). Uma Metodologia de Ensino para Disciplinas de Laboratório Didático. REVISTA DE DOCÊNCIA DO ENSINO SUPERIOR.
- BRAGA, A. R., PASSOS, L. F. D., JUNIOR, C. G. BRAGA, C. M. P. (2008). Projeto e Implementação de um Módulo Didático para Abordagem Integrada de Instrumentação, Controle e Automação. CBA.
- CORDEIRO, A., FOITO, D., GUERREIRO M. (2009). Power Electronics Didactic Modules for Direct Current Machine Control. IEEE: POWERENG.
- CHRISPIM, E. M., WERNECK, R. F. (2003). Contexto e prática em Engenharia de Produção: Estudo de caso de uma organização como fonte de conhecimento. XXIII ENEGEP, Brasil.
- ERNST, A. (2002). Digital Linear and Angular Metrology Position Feedback for Machine Manufacture and the Electronics Industry, 4rd Edition, Verlag Moderne Industrie Publishers.
- KIKUCHI, Y.; NAKAMURA, E; WAKIWAKA H. and YAMADII, H. (1996). Consideration for a High Resolution of Magnetic Rotary Encoder. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 32.
- CEFET-MG (2006). Manual do Aluno de Engenharia de Controle e Automação. Acessado em 02/04/2012, Disponível no sítio http://www.leopoldina.cefetmg.br/engenharia/manual_ceca.pdf
- MIYAJIMA, H.; YAMAMOTO, E.; ITO, M.; HASHIMOTO, S.; KOMAZAKI, I.; SHINOHARA, S. and YANAGISAWA, K. (1996). Optical micro encoder using surface-emitting laser, Micro Electro Mechanical Systems.
- NAKANO, K.; TAKAHASHI, T. and KAWAHITO, S. (2005). A CMOS Rotary Encoder Using Magnetic Sensor Arrays, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 5, OCTOBER.
- PROULX, T. (2011). Rotary Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration. Proceedings of the 29th IMAC, Springer.
- SESU (2009). Referenciais Nacionais Dos Cursos De Engenharia. Acessado em 02/04/2012 , Disponível em

http://www.udesc.br/arquivos/id_submenu/75/referenciais.pdf

Acesso em 2012.

- SILVA, T. M. P., RANGEL, J. J. A. (2011). Discrete Event Simulation as Didactic Support to the Teaching of Telecommunications Systems: Applications in Digital Telephony. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference.
- TSUJI, T., MIZUOCHI, M., NISHI, H., OHNISHI, K. (2005). A Velocity Measurement Method for Acceleration Control. Industrial Electronics Society.