



## DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO DE ACELERADOR ELETRÔNICO PARA O ESTUDO E APLICAÇÃO DE PROJETOS DE CONTROLE

**Patrícia R. de Araújo** – patricia.araujo@ufersa.edu.br

**Tania L. Laura** – tania.luna@ufersa.edu.br

**Ismael N. de Oliveira** – ismaelnoronha@gmail.com

**Dorgival A. da Silva Jr.** – dorgival.silva@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Caraúbas

RN 233, KM 01, Sítio Nova Esperança II

59780-000 – Caraúbas – Rio Grande do Norte

**Resumo:** Neste trabalho desenvolveu-se um acelerador eletrônico para fins educacionais com os seguintes objetivos: fomentar e difundir o desenvolvimento científico e tecnológico automotivo no Semiárido Potiguar; fazer uso dessa tecnologia como ferramenta de ensino e pesquisa nos cursos de bacharelado em Ciência e Tecnologia, Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da UFERSA; aprofundar os conhecimentos nas várias áreas estudadas pelos alunos durante sua formação e desenvolver habilidades de programação, projeto de desenho mecânico e de hardware para sistemas automotivos. Para o desenvolvimento do protótipo proposto foi realizado o projeto de desenho mecânico da estrutura e layout do circuito eletrônico para suas confecções. Também foi realizado o ensaio de identificação dos parâmetros da planta do protótipo. No Matlab foi elaborada uma interface gráfica com exemplos de compensadores clássicos, e uma conexão com o SISOTOOL que permite a criação do projeto de novos compensadores. Por fim, foi elaborado um algoritmo modelo para implementação de diferentes controladores no microcontrolador TM4C123GH6PMI. Os resultados demonstram a viabilidade deste protótipo como base de teste para diferentes algoritmos de controle de sistemas dinâmicos, estimulando assim maior aprendizado nas disciplinas de controle.

**Palavras-chave:** Acelerador Eletrônico, Controle, IHM.

### 1 INTRODUÇÃO

A eletrônica embarcada se faz cada vez mais presente e em constante crescimento no setor automotivo, tais como: no gerenciamento do motor, em sistemas de freios, em sistemas de conforto e conveniência entre outros (BERGER, 2001).

Dentre essas tecnologias, é possível citar o acelerador, que anteriormente funcionava com sistema mecânico: um cabo de aço era ligado do pedal do acelerador à borboleta do corpo de injeção. Ao pisar no acelerador, o cabo acionava a borboleta, que por sua vez abria a passagem de combustível possibilitando a aceleração do veículo, por meio do aumento de

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





rotação do motor devido a maior quantidade de combustível injetada nos cilindros (BOSCH, 2005; PAVKOVIC *et al.*, 2006).

Como alternativa mais eficiente e confortável ao cabo de acelerador, a indústria automobilística desenvolveu o acelerador eletrônico, sem cabo, conhecido em inglês como *drive-by-wire* (BERGER, 2001; PAVKOVIC *et al.*, 2006).

A motivação inicial deste trabalho ocorreu a partir da cooperação entre os projetos desenvolvidos em eletrônica automotiva pelos grupos CaROS e CARAUBAJA dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da UFERSA, respectivamente.

Assim, neste artigo será apresentado um protótipo de acelerador eletrônico como ferramenta didática para o ensino de técnicas de controle em eletrônica automotiva, a fim de promover o melhor entendimento do conteúdo teórico estudado com a abordagem prática.

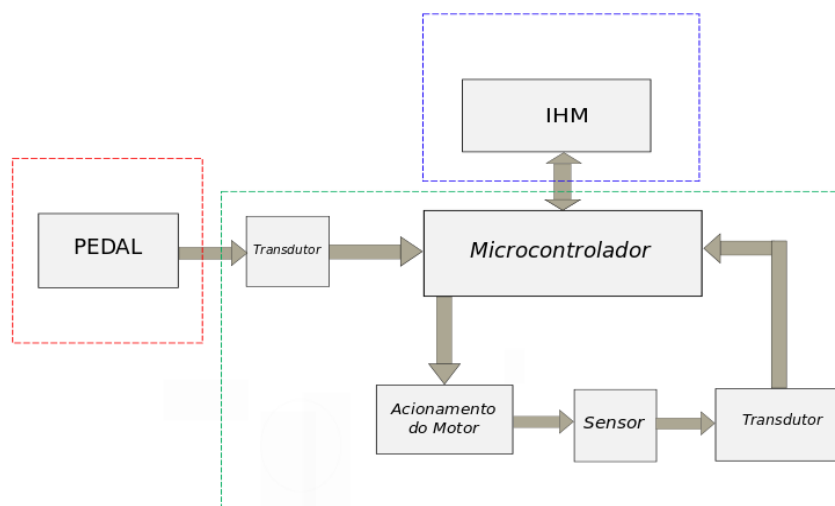
## 2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DIDÁTICO

### 2.1 O protótipo do acelerador eletrônico

O acelerador eletrônico utiliza um sensor acoplado ao pedal de acelerador que envia a informação sobre a posição do pedal para a central eletrônica. Ao receber a informação, a central aciona um motor elétrico que abre ou fecha a válvula borboleta de acordo com a posição do pedal (BOSCH, 2005; PAVKOVIC *et al.*, 2006).

Na Figura 1 é apresentado o diagrama de blocos do protótipo didático do acelerador eletrônico desenvolvido no laboratório. O módulo didático é composto por três partes principais: estrutura física do pedal de acelerador eletrônico, sistema elétrico e Interface Homem Máquina (IHM).

Figura 1 – Diagrama de blocos do módulo didático.



#### *Estrutura mecânica do protótipo*

A parte física do módulo didático é composto de pedal mecânico com sensor de posição angular (potenciômetro) acoplado nas engrenagens, que realiza a conversão para o sinal

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção

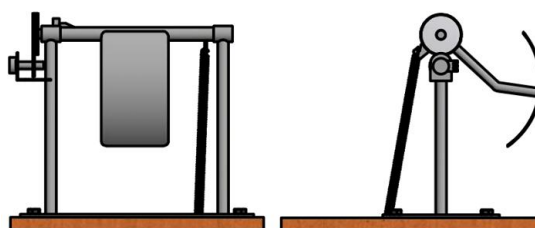




elétrico referente à aceleração desejada (*setpoint*) do sistema de controle.

A estrutura mecânica do pedal foi fabricada em material de aço carbono SAE 1020, composto de base, duas engrenagens, mola e mancal de deslizamento. A engrenagem de diâmetro igual a 50 mm possui 96 dentes e a engrenagem de diâmetro de 14,3 mm tem 27 dentes, assim têm-se que relação de transmissão das engrenagens é de 96:27 que equivale a 3,56. A Figura 2 mostra o desenho em CAD desta estrutura.

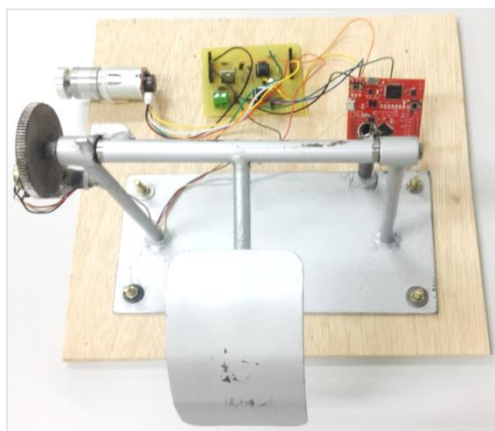
Figura 2 – Desenho em CAD da estrutura feito em Autodesk® Inventor® 2015.



### *Sistema elétrico*

O sistema elétrico é composto por um microcontrolador TM4C123GH6PMI ARM® Cortex™ - M4 da *Texas Instruments* que gerencia as variáveis de entrada e saída do sistema. As variáveis de entrada são os sinais de tensão referente à aceleração desejada (*setpoint*) do pedal mecânico e circuito de realimentação: formado pelo sensor encoder acoplado ao eixo do motor, circuito conversor de frequência em tensão (CI LM331) e circuito filtro passa baixa (CI TL074). A variável de saída é dada em RPM (rotação por minuto), que é gerada a partir de um circuito de potência *Simple-H* (transistor TIP41C) que amplifica o sinal de tensão que recebe do controlador em um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*). O protótipo didático do acelerador eletrônico é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Protótipo do acelerador eletrônico desenvolvido no laboratório da UFERSA.



Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção



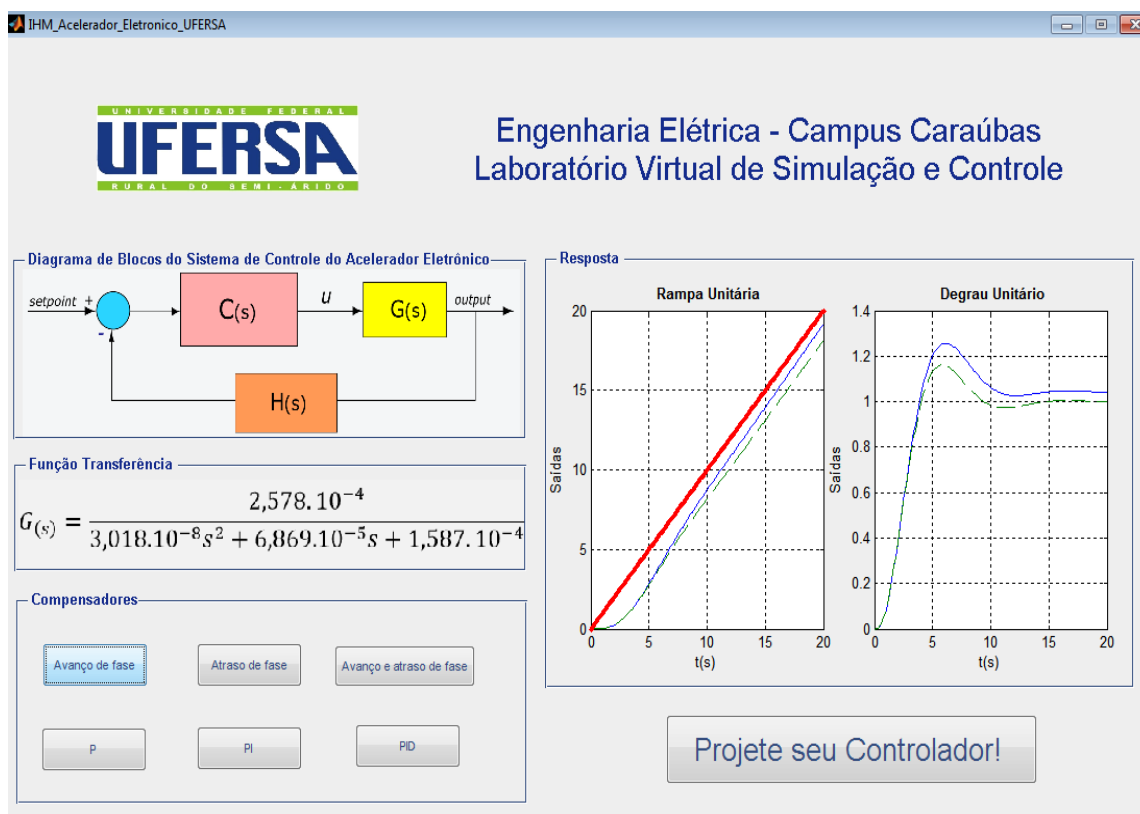


### *A Interface Homem Máquina (IHM)*

O algoritmo e a tela gráfica de controle foram desenvolvidos no *software* MATLAB®. Na interface gráfica podem ser visualizadas as repostas do sistema em regime transitório e em regime permanente compensada e não compensada. Pode-se também visualizar respostas aplicando diferentes compensadores clássicos, tais como: P, PI e PID, além de possibilitar ao aluno a construção de seu próprio controlador através do ambiente gráfico SISOTOOL disponível no *software* MATLAB®.

Neste módulo é possível realizar o controle da planta a partir da IHM direto no microcontrolador por meio de comunicação serial via conexão USB. E também pode ser desenvolvido um *firmware* no compilador CCS para ser gravado no microcontrolador utilizando comunicação USB. A Figura 4 mostra a tela gráfica de interação com o usuário.

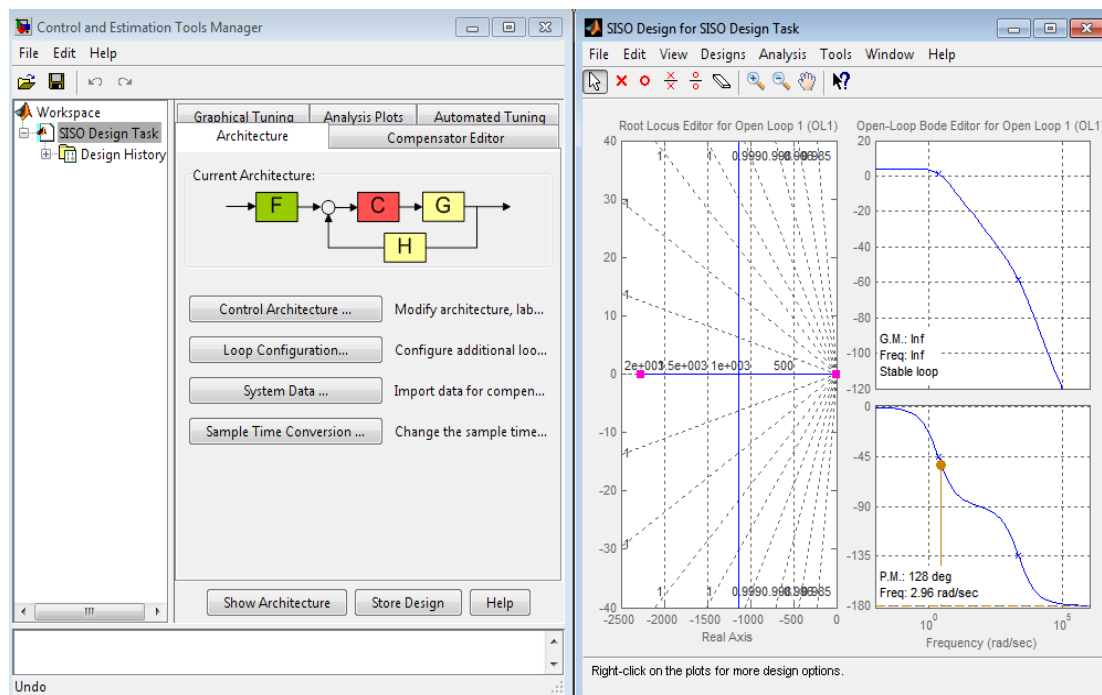
Figura 4 – Tela gráfica de interação com o usuário, utilizando a toolbox GUI do Matlab®.



Na Figura 5 pode ser observada a tela de interface gráfica SISOTOOL do *software* MATLAB® para projeto de controladores de sistema SISO aplicando o método do lugar das raízes.



Figura 5 – Tela gráfica do SISOTOOL do Matlab®.

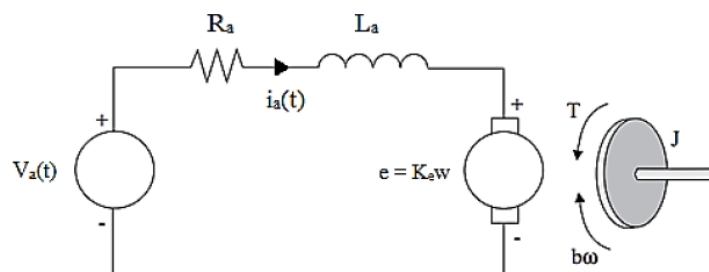


### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DIDÁTICO

#### 3.1 Modelagem da planta (Motor DC)

O motor DC é um atuador comum e muito utilizado em diferentes processos ou sistemas de controle. Para o desenvolvimento preciso de projetos de controle é necessário realizar a identificação dos seus parâmetros mecânicos e elétricos para a elaboração de seu modelo matemático (OGATA, 2003; NISE, 2009; MATAS, 2012). O circuito elétrico da armadura e o diagrama de corpo livre do rotor são mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Circuito elétrico de armadura e diagrama de corpo livre do rotor.



A função de transferência do motor DC está descrito na equação (1), onde a velocidade angular de rotação  $w(s)$  é a variável de saída e a tensão de alimentação do motor  $V(s)$  é a variável de entrada.





$$G_{(s)}_{motor} = \frac{w(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Js + b)(Ls + R) + k_t k_e} \quad (1)$$

Os parâmetros físicos do motor DC foram obtidos experimentalmente, e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros físicos do motor DC.

<i>Parâmetro</i>	<i>Simbologia</i>	<i>Valor</i>
Resistência elétrica	R	35,0439 $\Omega$
Indutância elétrica	L	0,0154 H
Constante força eletromotriz	$K_e$	0,01259 Nm/A
Constante torque motor	$K_t$	0,01259 Nm/A
Momento inércia rotor	J	$1,96 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
Fricção viscosa motor	B	$6 \cdot 10^{-9} \text{ Nms}$

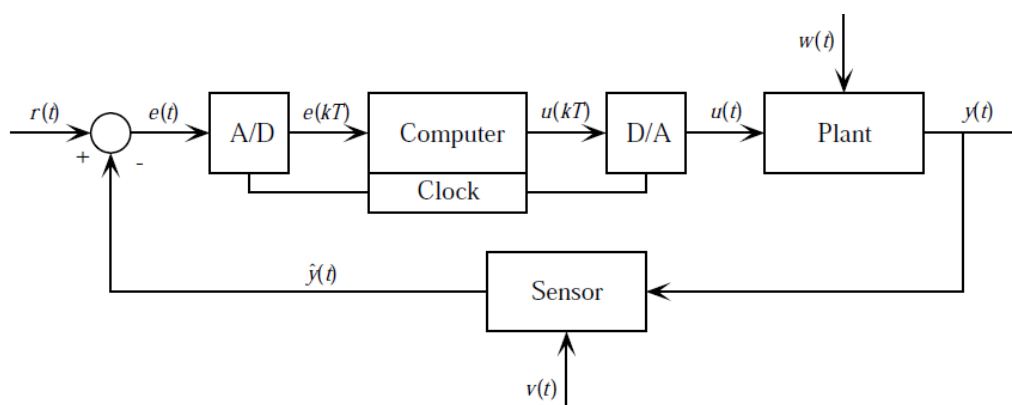
Assim, substituindo os valores dos parâmetros físicos da Tabela 1 na Equação (1), obtém-se a função de transferência da planta (motor) para controle de velocidade, que é dada por:

$$G_{(s)}_{motor} = \frac{12,59 \cdot 10^{-3}}{3,018 \cdot 10^{-8} s^2 + 6,869 \cdot 10^{-5} s + 1,587 \cdot 10^{-4}} \quad (2)$$

### 3.2 Diagrama de blocos do controlador digital

Para que a tensão ou corrente em um motor seja mantida na referência desejada caso aconteça algum transitório na tensão de entrada ou mudança na carga, deve-se utilizar de um circuito de controle em malha fechada (OGATA, 2003; STARR, 2006; NISE, 2009). O diagrama de blocos do controlador digital é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de blocos do controlador digital.



Em aplicações de controle, o atraso no tempo de processamento deve ser inserido na função de transferência para melhorar a estabilização do sistema e, assim atingir um desempenho adequado. Na Equação (3) é dada a função de transferência do atraso de Padé.



$$R(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (3)$$

O modulador PWM também deve ser considerado. O cálculo deste valor depende do *datasheet* do dispositivo. Para o microcontrolador TM4C123GH6PMI ARM® Cortex™ - M4 utilizado neste trabalho, o cálculo é realizado através da Equação (4).

$$PWM = \frac{Fosc}{PWMDIV * Fs} = \frac{Fosc}{\frac{bit\_TM4C}{bit\_PWM} * Fs} = \frac{80.10^6}{\frac{32}{16} * 1.10^3} = 40000 \quad (4)$$

Onde:

- Fosc é a frequência do oscilador do TM4C123GH6PMI;
- bit\_TM4C é a resolução do processador ARM®Cortex™ - M4;
- bit\_PWM é a resolução do PWM;
- Fs é a frequência de chaveamento.

O ganho do modulador PWM (triangular digital) é dado na Equação (5).

$$K_{PWM} = \frac{1}{PWM} = \frac{1}{40000} = 25.10^{-6} \quad (5)$$

O ganho do quantizador A/D é calculado a partir da Equação (6).

$$K_{A/D} = \frac{2^{n_{ADC}} - 1}{V_{alimentação}} = \frac{2^{12} - 1}{5} = 819 \quad (6)$$

A função de transferência do segurador de ordem zero (ZOH) é dada na Equação (7). Entretanto, com a utilização do Matlab® a mesma já está incluída no momento da discretização.

$$ZOH(s) = \frac{1 - e^{sT}}{s} \quad (7)$$

A função de transferência do elemento sensor, que neste caso, foi considerado os componentes: encoder + LM331 + TL074 foi obtida experimentalmente e é dada aproximadamente pela Equação (8).

$$H(s) \cong 1 \quad (8)$$

Portanto, a função de transferência da planta utilizada para se projetar os controladores é dada na Equação (9).

$$G(s) = G(s)_{motor} * H(s) * K_{A/D} * K_{PWM} \quad (9)$$

Substituindo os valores, tem-se na Equação (10) a função de transferência do protótipo

Organização



Promoção





didático proposto.

$$G(s) = \frac{2,578 \cdot 10^{-4}}{3,018 \cdot 10^{-8} s^2 + 6,869 \cdot 10^{-5} s + 1,587 \cdot 10^{-4}} \quad (10)$$

### 3.3 Implementação do compensador no TM4C123GH6PMI

A TM4C123G *LaunchPad Evaluation Board* é uma plataforma de baixo custo produzida para microcontroladores baseados na família Cortex-M4, sendo o TM4C123GH6PMI o microcontrolador da *LaunchPad* utilizada neste trabalho.

Depois da etapa do projeto de algum compensador, é então realizada a implementação deste compensador no microcontrolador. Assim, neste tópico é demonstrado, como exemplo, o algoritmo do compensador PID para ser transmitido ao microcontrolador. O código foi elaborado no programa CCs e sua comunicação é feita via conexão micro USB.

Tabela 2 – Exemplo de código do compensador PID.

<code>int32_t ek, e1k;</code>	<code>//Erro da malha de tensão</code>
<code>int32_t uk, u1k;</code>	<code>//PWM 100 a 39900</code>
<code>float setpoint = 512;</code>	<code>//Tensão de referência 2.5 V</code>
<code>uint32_t periodo;</code>	<code>//24-bit, 12.5ns</code>
<code>uint32_t RPM;</code>	<code>//Velocidade motor</code>
<code>uint32_t feedback;</code>	<code>//Realimentação</code>
<code>void TIMER2A_Handler(void) {</code>	
<code>TIMER2_ICR_R = 0X01;</code>	<code>//Habilitar timer 2A</code>
<code>RPM = 80000000/Periodo;</code>	<code>//Velocidade motor</code>
<code>feedback = RPM*0.002;</code>	<code>//Realimentação em tensão</code>
<code>ek = setpoint - feedback;</code>	<code>//Calcula o erro</code>
<code>uk = u1k + (10.1738*ek) - (10.042*e1k);</code>	<code>//Calcula o compensador PID</code>
<code>e1k = ek;</code>	<code>//Atualiza o erro anterior</code>
<code>u1k = uk;</code>	<code>//Atualiza entrada anterior</code>
<code>if(uk&gt;39900) uk = 39900;</code>	<code>//Limite superior PWM</code>
<code>if(uk&lt;100) uk=100;</code>	<code>//Limite inferior PWM</code>
<code>PWM0A_Duty(uk); }</code>	<code>//Atualiza PWM</code>
<code>}</code>	

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O módulo educacional desenvolvido é constituído por três partes principais: Estrutura física, sistema elétrico e Interface Homem Máquina (IHM), que na sua construção permitiu a consolidação de conhecimentos aprendidos em disciplinas, tais como: Desenho Técnico, Circuitos Elétricos e Eletrônicos e Programação.

Portanto, a plataforma didática desenvolvida é um resultado que é e será utilizado como ferramenta de grande potencial para auxiliar no ensino prático de sistemas de Controle, com aplicação em eletrônica automotiva, uma vez que o aluno é incentivado a aprofundar seus conhecimentos em técnicas de controle e sua implementação utilizando microcontroladores.

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção







O protótipo didático será utilizado nas disciplinas de controle do curso de Engenharia Elétrica e modelagem e simulação do curso de Engenharia Mecânica. O protótipo já foi utilizado em um trabalho de conclusão de curso em Bacharelado em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Semi-Árido pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BERGER, Arnold S. Embedded Systems Design: An Introduction to Processes, Tools and Techniques. 1. ed. Lawrence: CMP Books, 2001. 237 p, il.

BOSCH, Robert. Manual de Tecnologia Automotiva. 25 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 1232 p, il.

MATAS, Alexandre Luiz; VARGAS, Jerson Barbosa; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola de Engenharia de São Carlos. Sintonia de controladores PID com controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) aplicado a um motor de corrente contínua, 2012. 50p, il. Monografia (Graduação).

NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 5. ed. São Paulo: LTC, 2009. 706 p, il.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 824 p, il.

PAVKOVIC, D. et al. Adaptive Control of Automotive Electronic Throttle. Science Direct, vol. 14, p. 121-136, 2006.

STARR, Gregory P. Introduction to applied digital control. 2. ed. Mexico, 2006. 197 p, il.

VALVANO, Jonathan W. Volume 1. Embedded Systems: Introduction to ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>™</sup> – M Microcontrollers. 5. ed. Texas: 2016. 509 p, il.

VALVANO, Jonathan W. Volume 2. Embedded Systems: Real Time Interfacing to ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>™</sup> – M Microcontrollers. 5. ed. Texas: 2016. 530 p, il.

VALVANO, Jonathan W. Volume 3. Embedded Systems: Real Time Operating Systems for ARM Cortex – M Microcontrollers. 4. ed. Texas: 2017. 600 p, il.

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



**UNISOCIESC**  
Educação e Tecnologia

Promoção



**ABENGE**  
Associação Brasileira de Educação em Engenharia



## DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC ACCELERATOR DIDACTIC PROTOTYP FOR THE STUDY AND APPLICATION OF CONTROL PROJECT

**Abstract:** *In this work was developed an electronic accelerator for educational purposes with the following objectives: increase and disseminate the automotive scientific and technological development in the Potiguar semi-arid; make use of this technology like teaching and searching tool in the UFERSA courses of baccalaureate in Science and Technology, Electrical Engineering and Mechanical Engineering; deepen the knowledge in a several areas studied by students during their formation and develop programming skills, project of electronic circuits and drawing mechanical for automotive systems. For the development of the prototype proposed was realized the project of structure mechanical drawing and electronic circuit layout for their fabrication. It was performed the identification test of the plant parameters of the prototype. In Matlab was elaborated a graphical interface with examples of classical compensators, and a connection with the SISOTOOL that allows the creation of project of new compensators. Lastly, a model algorithm was created for the implementation of different controllers in microcontroller TM4C123GH6PMI. The results show the viability of that prototype as test base for different algorithms of control of dynamic systems, therefore stimulating a greatest learning in the control disciplines.*

**Key-words:** *Electronic Accelerator, Control, HMI, didactic prototype.*

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



**UNISOCIESC**  
Educação e Tecnologia

Promoção



**ABENGE**  
Associação Brasileira de Educação em Engenharia