



## DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID DIGITAL PARA UMA PLANTA DIDÁTICA

**Patrick Nasser Oliveira Martins** – [patricknasser.eng@gmail.com](mailto:patricknasser.eng@gmail.com)

**Charles Luiz Silva de Melo** – [charles.melo@yahoo.com.br](mailto:charles.melo@yahoo.com.br)

Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia

Av. Darcy Vargas, 1200

69055-035 – Manaus – Amazonas

**Resumo:** *Dentro de um contexto didático, este trabalho propõe o desenvolvimento do controle de velocidade em malha fechada através do acionamento de um motor BLDC (Brushless DC) recorrendo a métodos de aquisição de dados através da plataforma Arduino. Estes dados são oriundos da realimentação da VP (variável de processo), que proporciona, dessa forma, um controle digital PID. O simulador de processo LABV IEW atuará tanto no controle do sistema, quanto na supervisão em tempo real. Uma estrutura rígida que compõe o sistema oferece IGD (Um Grau de Liberdade) que através de uma hélice acoplada ao motor BLDC se desloca para uma altitude estipulada como Setpoint. Esse sistema foi chamado de planta didática de controle. Além da integração dos diversos conhecimentos envolvidos, este trabalho também transmite a ideia de se criar um protótipo didático relativamente barato em comparação aos kits educacionais de punho comercial existente no mercado com custo elevadíssimo. Uma vantagem que pode ser muito bem aproveitada dentro dos laboratórios de controles.*

**Palavras-chaves:** *Planta didática, Controle PID digital, Motor BLDC, Controle de velocidade.*

### 1. INTRODUÇÃO

Para Silveira (1998) controlar nasceu de uma necessidade humana, mesmo desprovido das grandes tecnologias, o homem buscava manter a qualidade daquilo que produzia conforme suas necessidades e exigências. Com o advento da Revolução Industrial, originada na Inglaterra em meados do século XVIII, culminou na evolução do modo de produção, um marco histórico para a época, passando dos métodos agrícola e artesanal, para a produção seriada, isto é, uma produção industrial.

O aprendizado de controle e automação requer práticas de laboratórios, onde é feita a integração da teoria conceitual abordada em sala de aula com a sua aplicação na indústria. A respeito disso, Garrido (1999) enfatiza que os educadores necessitam se apropriar desses princípios, que se dão na medida em que amplia a consciência de uma práxis transformadora, que deve vir subsidiada pela ética profissional e pela autonomia sobre o seu saber-fazer, tais



princípios se referem ao tipo de identidade profissional que o educador vai construindo ao longo da sua trajetória.

É de conhecimento geral que estudantes aprendem muito melhor aplicando o conhecimento obtido, sendo que geralmente o melhor aprendizado reside na integração da teoria com a prática.

No caso da engenharia, seus egressos assumirão tarefas, cargos e responsabilidades complexas e com grande impacto social nos seus resultados, fortemente vinculados ao desenvolvimento nacional, que exige uma qualificação profissional e institucionalizada (Mota R. & Martins R., 2008).

Com o intuito de preparar e elaborar uma ferramenta a mais de ensino, a estudantes no ambiente de controle, primeiramente serão apresentadas experiências de simulação de processos usando controladores digitais P, PI, PD e PID; posteriormente é apresentada uma experiência de laboratório para controle de uma planta didática.

A incumbência na evolução dos métodos e conceitos aplicados nas instituições de ensino, expressa a necessidade da implementação de instrumentos didáticos, com objetivo de facilitar a visão limitada do aluno ou até mesmo a explicação do professor quanto a disciplina. Em razão disso tem-se tornado comum ver, com uma frequência maior do que o normal, equipamentos eletrônicos restritos a laboratórios para encontra-los em sala de aula, sabendo-se que muito embora, em algumas situações a exposição do conteúdo seja através do quadro branco ou outros recursos visuais não são capazes de fornecer uma visão real do que está sendo discutido em aula.

O ensino do controle clássico normalmente é realizado por meio de controladores pré programados, onde o usuário apenas insere os parâmetros de sintonia. Apesar desta prática ser exaustivamente aplicada no ambiente industrial, num ambiente acadêmico se faz necessário que os alunos possam desenvolver seus próprios algoritmos de controle de uma forma rápida e eficiente, obtendo-se plena segurança no conhecimento adquirido. Podendo fazer uso de ferramentas práticas no ensino de controle, como por exemplo, simulação e aplicação prática do controlador PID, que na grande maioria das vezes somente é visto nos simuladores de processos, aplicação essa que pode servir como um guia para o ensino das disciplinas de controle. Estreitando a distância entre o aprendizado teórico e prático no ensino de controle.

## 2. PROPOSTA

Desenvolver uma planta didática de testes com controle PID digital utilizando simulador de processos no software LabVIEW. Para cumprir este objetivo o algoritmo capaz de realizar o cálculo com as variáveis de proporcionalidade, integral e diferencial possa fornecer como resultado a informação necessária para o funcionamento de um motor DC. E uma interface de controle que permita que o usuário possa inserir os valores de cada constante (P, I e D), velocidade desejada para o motor DC e o tempo de atualização dos dados no sistema, para que um Sistema de 1GDL, movido por uma hélice acoplada ao motor DC permaneça na altitude estipulado como *Setpoint* via porta serial USB através do computador. Sistema ilustrado Figura 1.

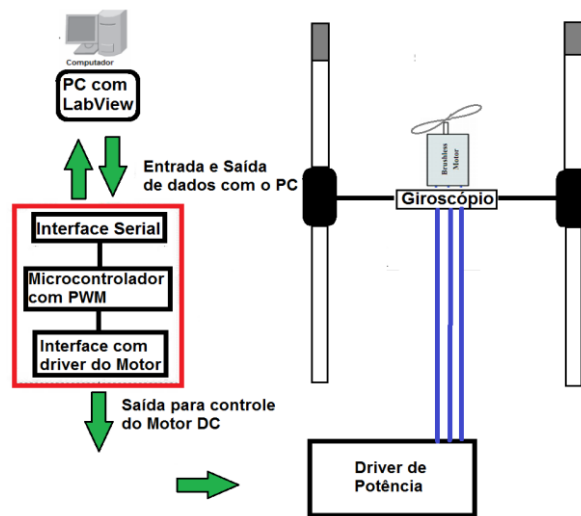


Figura 1 – Esboço da Planta Didática

## 2.2 Projeto do Controlador

Um sistema de controle contínuo tem como característica um controlador cuja saída varia continuamente, podendo assumir qualquer valor compreendido entre os limites máximo e mínimo (TEIXEIRA, 2006).

Basicamente, um controlador digital é composto por um conjunto de blocos conforme mostra a Figura 2.

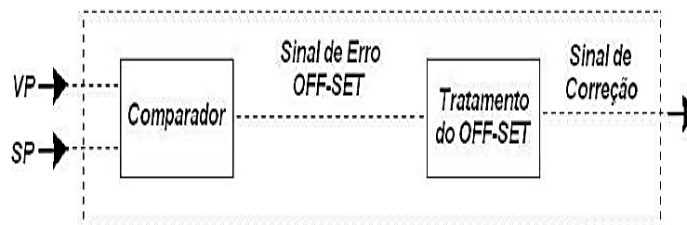


Figura 2 – Blocos de Controle

Onde:

VP: Variável de entrada do processo.

SP: Set-Point (valor desejável para a variável do processo).

COMPARADOR: Tem como função gerar um sinal de erro proporcional à diferença instantânea entre a variável e o set-point.

TRATAMENTO: Tem como função processar o sinal de erro (off-set) gerando um sinal de correção do *off-set*.

Dependendo da forma como o sinal de erro é processado, pode-se dispor de um sistema de controle digital subdividido em:

- Controle Proporcional
- Controle Proporcional + Integral
- Controle Proporcional + Derivativo
- Controle Proporcional + Integral + Derivativo

A utilidade dos controles PID reside na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. No campo dos sistemas de controle de processos contínuos, é fato conhecido que as estruturas de controle PID e PID modificadas provaram sua utilidade ao propiciar controle satisfatório, embora não possam fornecer o controle ótimo em muitas situações específicas (OGATA, 2000).

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Motor sem escova Brushless (BLDC)

Este tipo de motor (FOUR,R.; RAMOUNTAR,E.;ROMEO,J.; COPELAND,B.) tem sua parte mecânica similar a um motor *brushed* (com escova), entretanto um *brushless* não possui nenhum ponto de contato mecânico entre o rotor e o estator para passagem de eletricidade, e outra diferencial importante é que este tipo de motor possui um ímã na parte externa que gira em torno de seu próprio eixo, desta forma girando também o rotor. Este tipo de motor vem se popularizando nos últimos tempos por possuir uma serie de vantagens em relação ao motor *brushed*.

Os métodos de controle mais comuns desse tipo do motor BLDC (Figura 3) incluem o uso de sensores de efeito Hall ou de *encoders* para medir a velocidade de rotação do eixo. Caso os mesmos não estejam disponíveis deve-se recorrer a meios indiretos de estimativa da velocidade do motor, como medir a força contra eletromotriz gerada pelas bobinas ou medir a aceleração vertical. Em resumo, para acionar esses motores é necessário um circuito acionador também denominado driver de potência, e de um circuito controlador de velocidade (ESC).



Figura 1: Motor BLDC.

Os BLDC (TRINDADE, 2009) são considerados motores síncronos onde os ímanes permanentes polarizados fazem parte do rotor e este não necessita de qualquer alimentação devido ao fato de conter somente os ímanes permanentes. O estator é fixo e composto por bobinas que irão produzir o campo magnético responsável pelo movimento. Os BLDC podem ter configurações de uma, duas ou três fases, no entanto, os mais populares são os de 3 fases. Correspondente à sua configuração, o estator tem o mesmo número de enrolamentos.

#### 3.2 Controle PWM

PWM é a abreviação de *Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso. Para que se entenda como funciona esta tecnologia no controle de potência, partindo-se de um circuito imaginário formado por um interruptor de ação muito rápida e uma carga que deve ser controlada (Figura 4). Quando o interruptor está aberto não há corrente na carga e a potência aplicada é nula. No instante em que o interruptor é fechado, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima.

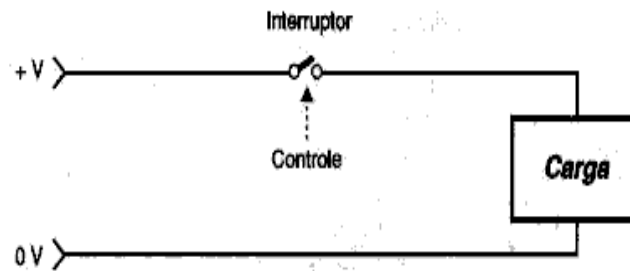


Figura 2: Circuito de controle de corrente na carga.

Segundo (GHIRARDELLO, 2008) para obter uma potência intermediária, digamos 50%, aplicada à carga, uma ideia é fazer com que a chave seja aberta e fechada rapidamente de modo a ficar 50% do tempo aberta e 50% fechada. Isso significa que, em média, teremos metade do tempo com corrente e metade do tempo sem corrente.

A potência média e, portanto, a própria tensão média aplicada à carga é neste caso 50% da tensão de entrada. Veja que o interruptor fechado pode definir uma largura de pulso pelo tempo em que ele fica nesta condição, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto. Os dois tempos juntos definem o período e, portanto, uma frequência de controle. A relação entre o tempo em que temos o pulso e a duração de um ciclo completo de operação do interruptor nos define ainda o ciclo ativo (Figura 5).

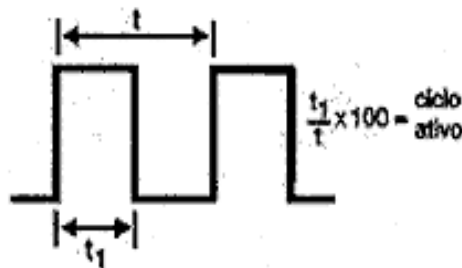


Figura 5: Ciclo ativo do controle PWM.

Este princípio (GHIRARDELLO, 2008) é usado justamente no controle PWM: modula-se (varia-se) a largura do pulso de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela.

### 3.3 Driver de Potência

Seria prático (DANTAS, 2012) se pudéssemos simplesmente conectar um motor a um circuito integrado ou a uma placa de prototipagem de hardware (Arduino) e pronto, teríamos o motor funcionando. No entanto, a maioria dos dispositivos mencionados não conseguem suprir a tensão e a corrente necessária para fazer um motor girar. Além disso, motores tendem a gerar ruídos elétricos, spikes, o que podem retornar corrente para as linhas de controle quando a direção do motor ou sua velocidade é alterada. Baseado nisso, circuitos especializados (chamados drivers de motor) foram desenvolvidos (em chips independentes para garantir reusabilidade) para suprir as necessidades elétricas de um motor e proteger os outros circuitos de problemas elétricos. Um driver de motor bastante conhecido pela sua simplicidade de prototipagem é a ponte-H. Este driver tem esse nome pela semelhança com a letra H maiúscula na visualização de seu esquemático. O diferencial de uma ponte-H é a sua

capacidade de mover um motor para frente e para trás, em diferentes velocidades, utilizando inclusive alimentação externa independente, o que é opcional.

Uma ponte-H tem diversos recursos para garantir o bom funcionamento de um de motor. Existem resistores *pull-up*, por exemplo, para garantir que ambos terminais terão a mesma tensão. Sem diferença de potencial, o motor não irá rotacionar, o que evita que o motor “gagueje” quando se liga ou desliga o sistema. Quando por alguma razão (sinal, atrito, entre outros fatores) um motor acelera ou desacelera, o campo elétrico presente nas bobinas do motor resiste a mudança. Essa alteração no campo elétrico induz corrente, e esta corrente pode retornar ao controlador. Existem diodos para proteger o circuito, quando a tensão vinda do motor é maior que a oriunda da bateria, por exemplo. Desse modo, a bateria acaba absorvendo essa corrente (DANTAS, 2012).

### 3.4 Acelerômetro

Um acelerômetro em termos básicos (FIGUEIREDO, 2007) é um instrumento para medir aceleração. Em outras palavras pode-se dizer que é um componente que se baseia em leis da física para medir aceleração e por consequência a velocidade e localização do objeto ao qual o acelerômetro pertence. Essas medições podem ser feitas em uma direção, duas e até três dimensões, o que faz deste equipamento um instrumento muito útil. No estudo dos acelerômetros constatou-se que existem alguns modelos, dos quais apenas serão citados, pois não é o foco deste trabalho, existe o acelerômetro capacitivo, o acelerômetro piezoeletrico, o acelerômetro piezoresistivo e, o mais utilizado, acelerômetro eletromecânico (também chamado MEMS).

### 3.5 Acelerômetro Eletromecânico (MEMS)

Este é o modelo de acelerômetro muito usado, ele possui sensores que detectam a aceleração e a vibração em até três dimensões. Estes sensores são sensíveis e versáteis, permitindo acrescentar novas capacidades, tornando-os mais eficazes. O movimento medido por este sensor é convertido em um sinal analógico ou digital. Estes tipos de acelerômetros são vistos em celulares, GPS, videogames, e será o modelo usado neste projeto.

### 3.6 Hélices

Uma hélice (Figura 6) é um instrumento de aerodelismo, que pode ser de tração ou repulsão, esquerdas ou direitas, e converte a energia mecânica fornecida pelo motor, em movimento de tração do dispositivo (RODRIGUES, 1964). Das características das hélices, o diâmetro e o passo são as mais importantes. O diâmetro é dado pelo diâmetro do círculo descrito quando a hélice gira, enquanto o passo é a distância que a hélice percorre quando completa uma volta completa. A notação utilizada é descrita da seguinte forma:  $10 \times 4.5$ , onde 10 é o diâmetro e 4.5 o passo.



Figura 6: Hélice 10x4.5

O comportamento de uma hélice pode ser baseado em 3 parâmetros; o Coeficiente de Thrust  $cT$ , Coeficiente de Potência  $cp$  e Raio da Hélice  $r$ , que permitem calcular as seguintes Equação 1 e Equação 2.  $\rho$  é a densidade do ar e  $w$  a velocidade angular (MCCORMICK, 1995).

$$T = cT \frac{4\rho r^4}{\pi^2} w^2 \quad (1)$$

$$Pp = cp \frac{4\rho r^5}{\pi^3} w^3 \quad (2)$$

Através destas equações é possível observar que  $T$  e  $Pp$  aumentam consideravelmente com o aumento do diâmetro, e por consequência o consumo de energia também, diminuindo a autonomia. Deve-se ter em atenção esta relação no momento da escolha das Hélices, de forma a encontrar um bom compromisso.

#### 4. IMPLEMENTAÇÃO

A implementação deste trabalho foi dividida basicamente em três etapas que correspondem as seguintes:

- Hardware;
- Software;
- Integração do sistema.

Na fase inicial do projeto, definiu-se, com base na literatura pertinente, o tamanho final e peso do sistema para que fosse possível dimensionar adequadamente todas as partes. O formato da estrutura e a escolha dos componentes utilizados foram determinados de acordo com outras plataformas de voos semelhantes. O projeto e os componentes da estrutura desenvolvida neste trabalho são descritos na sequencia. a base principal da estrutura, fator que contribuiu para o aumento da rigidez, evitando sobrecarga, foi produzida com perfis de alumínio, que acabou deixando a estrutura com uma massa reduzida.

O sistema descrito ao longo deste trabalho é apresentado na Figura 7 com todas as suas etapas de desenvolvimento reunidas.

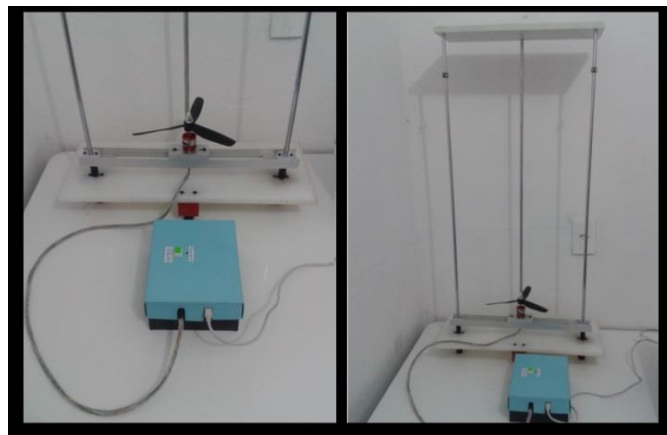


Figura 7: Planta didática finalizada.

#### 4.1 Painel

Para abrigar as partes elétrica e eletrônica foi construído um painel, conforme Figura 8. Dentro do painel está o arduino, que tem conectada a sua porta serial um cabo USB e uma malha de circuito que se liga à placa protoboard composta de outros circuitos pequenos. Contém uma fonte de alimentação ligada ao ESC, do qual saem três fios que se juntam a outros, formando um emaranhado de fios que são organizados por um arrumador de cabo.

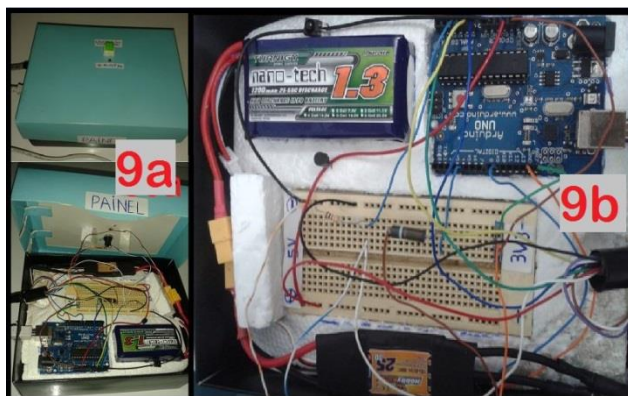


Figura 8: Painel de circuitos.

#### 4.2 Integração do sistema

Os comandos são enviados via protocolo de comunicação RS-232 por um computador para o arduino que está conectado a um microcontrolador na estrutura microcontrolada ATmega 168. Este trata os dados recebidos e envia os comandos para acionamento do motor através do ESC. São enviados comandos de altitude como *setpoint* que tem uma relação da rotação do motor. O esquema de funcionamento do sistema é mostrado na Figura 9.

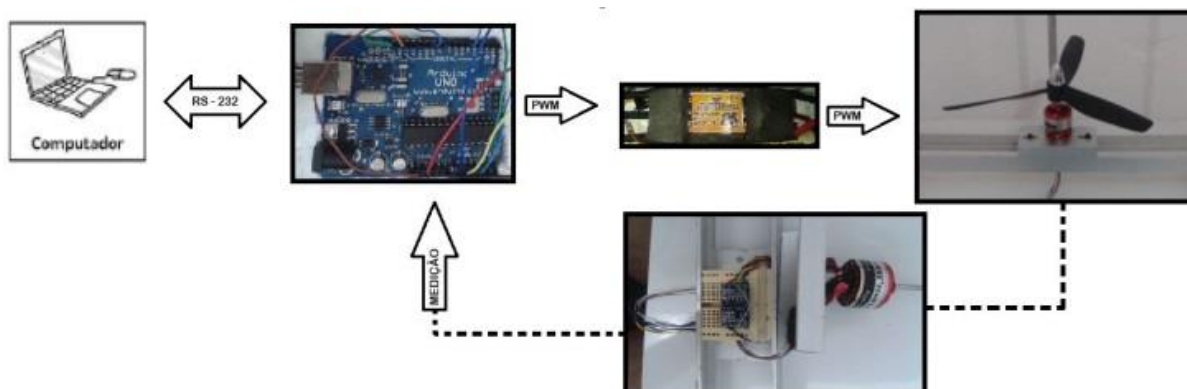


Figura 9: Arquitetura do sistema

#### 4.3 Realimentação

Neste trabalho optou-se por utilizar do acelerômetro MMA7361 para a retroalimentação do sistema proposto, pois a medida da saída de velocidade do BLCD pode ser medida por meios diretos, assim como, através de meios indiretos de estimativa da respectiva velocidade como já foi mencionado neste trabalho anteriormente. Primeiramente definiu-se a variável a controlar como sendo a velocidade relacionada com a altitude da base



quando em voo, mas o monitoramento desta não se apresentou como uma tarefa simples, pois os recursos de instrumentação para tal se mostraram escassos e trabalhosos.

## 5. APLICAÇÃO E RESULTADOS

### 5.1 Algumas Simulações obtidas no MatLab para o Controle do Motor DC

Nos gráficos das Figuras 10a e 10b, a parte de superior mostra o sinal de controle, enquanto a parte de baixo mostra 2 sinais: a vermelha é o setpoint, e a azul é a velocidade do motor. Através dos gráficos obtidos na experiência, verificou-se que a resposta do sistema é consideravelmente lenta devido à geração do gráfico em tempo real. Existe também o problema de variação de velocidade. Isso ocorre devido ao conversor analógico-digital construído em *MatLab* não ser preciso (onde ocorre a conversão da leitura do segundo motor).

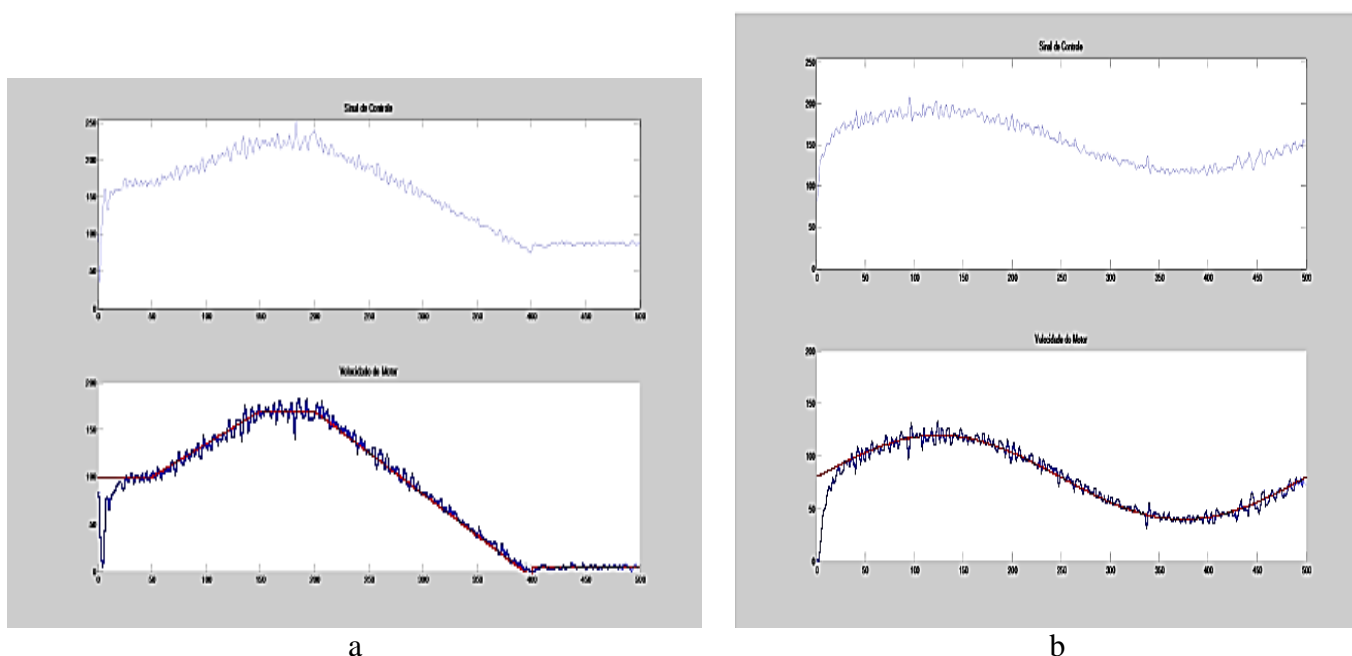


Figura 10: Set point (Linha Vermelha) - Velocidade do Motor (azul).

Nos gráficos das Figuras 11a e 11b, notam-se grandes variações na velocidade em alguns pontos. Elas ocorreram por variação intencional na carga do motor, para verificar a eficácia do controle do mesmo, e também para avaliar o atraso entre os dados mostrados na tela e a velocidade real.

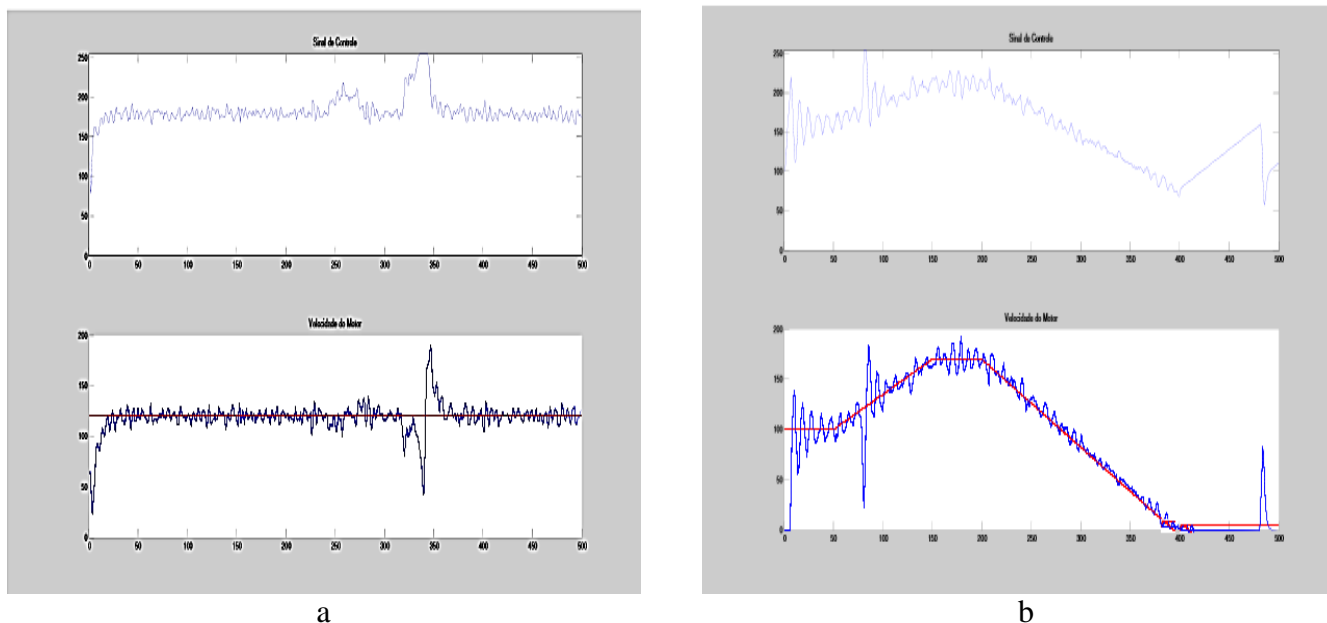


Figura 11: Variação de velocidade

## 6. RESULTADO DA PLANTA REAL

As variações dos valores das constantes foram realizadas para mostrar que o controle PID pode ser uma alternativa em potencial em sistemas estáveis como instáveis também. Portanto, foi realizado uma série de variações de set-point e das constantes P, I e D, de modo a apresentar o desempenho do sistema ao acaso. Podemos observar tal resultado na figura 12.

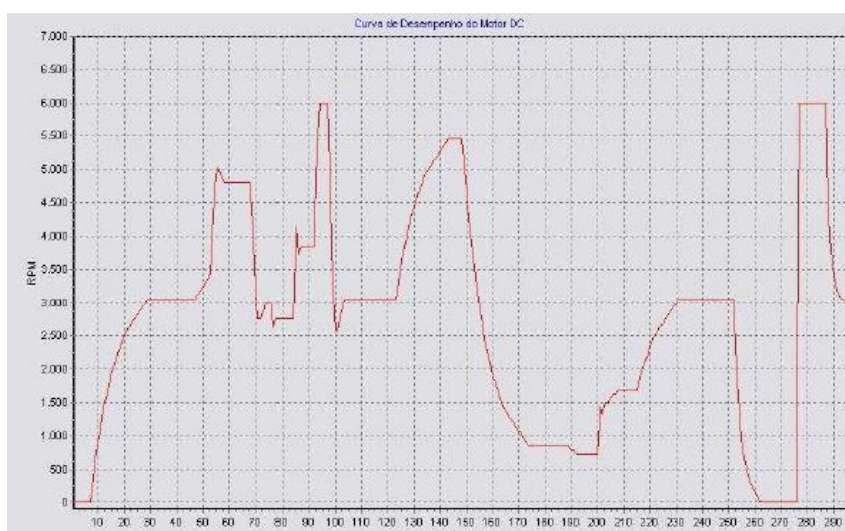


Figura 12: Comportamento do controlador PID digital com diversas variações de entrada e das constantes P, I e D.

Outra variação foi testada, de modo a verificar o comportamento do sistema quanto a correção do erro, baseado numa combinação de erro e tentativa. Foram obtidos os valores  $P=1.0$ ,  $I=0.1$  e  $D=1.0$ , cuja resposta pode ser observada no gráfico da figura 13



Figura 13: Resposta do sistema para  $P=1.0$ ,  $I=0.1$  e  $D=1.0$

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

São construtivos os benefícios produzidos na utilização dos motores brushless DC em várias aplicações em substituição a outros tipos de motores que são comumente empregados. O motor BLDC traz a vantagem de possuir características fortes em relação aos motores de indução e os motores DC com comutadores, em razão de sua eficiência energética que traduz o seu desempenho alcançado. Todo estudo realizado para o embasamento do tema abordado, chamou atenção para um universo tecnológico crescente em torno das máquinas elétricas, tanto em termos construtivos, como de acionamento e também numerosas técnicas, que evoluem e se multiplicam rapidamente, empregadas em diversas aplicações que curiosamente se encontram muito próximas dos nossos olhos cada vez mais.

A sintonia da variedade de controladores constitui um desafio aos engenheiros de processo e operadores uma vez que tal tarefa depende de um completo conhecimento das plantas que são muitas vezes complexas, e que podem possuir variáveis com fortes interações entre si, além de não linearidades e de objetivos de controle conflitantes.

Este artigo apresentou uma proposta de sintonia de controladores PID digital através do método de sintonia usando para isto a equação a diferenças.

A abordagem deste trabalho buscou realizar o uso de ferramentas e componentes semelhantes aos comumente empregados na graduação e indústria, mostrando uma solução compatível com a realidade acadêmica/industrial, sendo claro e objetivo. Vale ressaltar, detalhe percebido no andamento do trabalho, que a exploração funcional de um simples microcontrolador pode se tornar uma solução poderosa, como por exemplo, o excelente papel desempenhado na aquisição de dados utilizando a plataforma arduino, que ao invés de utilizar uma placa de uma fabricante comercial com um custo desanimador, que apesar dos vários recursos contidos, vale muito a pena maximizar os recursos existente num dispositivo que se tenha em mãos, mais acessíveis se comparado aos dispositivos específicos desse mercado.

## 8. REFERÊNCIAS

MCCORMICK, W. Barnes and W. **Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics**. s.l. : New York: Wiley 2nd editon, 1995.



OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

VIEIRA, José Carlos S. **Plataforma Móvel Aérea QuadRotor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores) – Universidade do Minho, Braga-Portugal. 2011.

SIQUEIRA, Daniel Souto. **Projeto e Simulação da Operação de um Motor de Corrente Contínua sem Escovas**. Encontro interno (Seminário de iniciação científica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2008.

AMARAL, Rogério Passos. **Ambiente para Simulação e Aplicação Numa Planta Didática de um Controlador PID com Anti WIN-UP**. Artigo apresentado no COBENGE – Instituto Federal do Espírito Santo. Blumenau, 2011.

ZORZI, Cleber. **Controlador PID Digital de Velocidade de um Motor de Corrente Contínua**. Monografia (Engenharia de Computação). Universidade São Francisco. Itatiba – SP, 2004.

SILVEIRA, Paulo R. da. SANTOS, Winderson E. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Érica, 1998. 229p.

GARRIDO, Selma Pimenta. **Saberes Pedagógicos e Atividades Docente**. Cortez. São Paulo: 1999.

LOPES, Messias de Oliveira. **Oratória- A arte de falar em público-** Manaus: CIBIAR/ AM – 2013. 128p.

## **DEVELOPMENT OF A PID CONTROLLER DIGITAL FOR A PLANT TRAINING**

**Abstract:** *Within an educational context, this paper proposes the development of speed control in closed loop through the activation of a BLDC motor (Brushless DC) using methods of data acquisition through the Arduino platform. These data are derived from the feedback of PV (process variable), providing thus a digital PID control. The process simulator LabVIEW act both in the control system, as monitoring in real time. A rigid structure that makes up the system offers 1GDL (A Degree of Freedom) that through a BLDC motor coupled to the propeller travels to an altitude stipulated as setpoint . This system was called didactic plant control. Besides the integration of diverse knowledge involved, this work also conveys the idea of creating a didactic prototype relatively inexpensive compared to existing commercial educational kits standard in the market with high cost. An advantage that can be very well used within the laboratories of controls.*

**Keywords:** *Didatic plan, Digital PID control, BLDC moto, Speed control.*