



MÓDULO DIDÁTICO DE CONTROLE COM INTERFACE REMOTA

Laio Oriel Seman – laioseman@gmail.com
Daniel Castellain – daniel_castellain@yahoo.com.br
Jonata Apolinário – jonataapolinario@yahoo.com.br
Romeu Hausmann – romeuh@furb.br
Luiz Alberto Koehler – luiz@furb.br
Universidade Regional de Blumenau
Rua São Paulo, 3250 – Itoupava Seca
89030-000 – Blumenau – SC

Resumo: *Este trabalho apresenta um módulo de controle do tipo PID que, apesar da aplicabilidade universal, apresenta uma série de especificações voltadas para aplicações didáticas, com ênfase no ensino da teoria e novas tecnologias de controle. O módulo diferencia-se pela utilização de tecnologias modernas como hardware em FPGA e interface gráfica desenvolvida em linguagem Python, com possibilidade de comunicação através de protocolo UDP via rede interna ou internet. Tais características, além da possibilidade de alteração dos parâmetros PID e análise de desempenho do sistema em tempo real, servem como instrumento motivador no ensino do tema em questão.*

Palavras-chave: *PID, FPGA, ferramenta educacional, Python.*

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de controle ou controladores são utilizados nas mais diversas áreas de conhecimento, com destaque nas engenharias, mais especificamente aplicações industriais e dispositivos eletroeletrônicos. A necessidade crescente em termos de qualidade e velocidade nos processos e produtos torna cada vez mais imprescindível a utilização de controladores e por conseguinte o domínio da tecnologia e conhecimento necessários. Entretanto, dada a relativa complexidade conceitual envolvida na teoria e prática de controle e a histórica dificuldade por parte dos alunos em sedimentar e aplicar os conhecimentos, é comum uma atitude de distanciamento e desânimo em relação ao tema. Assim, torna-se fundamental a disponibilidade de sistemas ou módulos de controle para aplicações didáticas, que além das características básicas como especificação dos parâmetros PID, deveriam agregar fatores motivadores como tecnologias modernas.

Neste contexto, propõe-se neste trabalho um módulo de controle baseado em *hardware* implementado em FPGA (*Field Programmable Gate Array*), interface de comunicação através de protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), com um



computador executando uma interface gráfica criada em Python. Ou seja, utiliza-se tecnologia moderna na construção do módulo ou kit de controle como *hardware* com processadores rápidos, linguagem de alto nível na interface gráfica e possibilidade de comunicação *hardware/software* através de rede interna ou internet.

Vale destacar a dificuldade de encontrar kits didáticos com as características descritas acima, além do alto custo das unidades comerciais disponíveis.

2. ESPECIFICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MÓDULO DE CONTROLE

A utilização crescente de controladores digitais ao invés de controladores analógicos justifica-se pela disponibilidade crescente de microprocessadores e micro controladores de alto desempenho e baixo custo e as vantagens de manipulação de sinais digitais em relação aos sinais contínuos. Entretanto, devem ser considerados fatores específicos relacionados ao controle digital como o período de amostragem, efeitos da quantização e atraso de transporte da conversão digital analógica (OGATA, 1987; SIMONE, 2006).

Os parâmetros das plantas a serem controlados são tipicamente tensões e correntes, que devem ser condicionadas em sinais compatíveis com o tipo e nível do sinal de entrada do conversor analógico digital (ADC, do inglês *analog to digital converter*). O ADC converte este sinal analógico condicionado, através do processo de amostragem e quantização num sinal digital binário ou decimal equivalente, utilizado pelo processador para efetuar os cálculos necessários.

Na etapa de amostragem, duas necessidades devem ser atendidas: o ganho do sensor deve permitir um melhor aproveitamento da faixa de operação do ADC e o sinal deve ser filtrado para evitar o efeito de *aliasing*, devido ao processo de amostragem.

2.1. Estrutura do módulo de controle

O módulo ou kit de controle didático proposto utiliza um FPGA (*Field Programmable Gate Array*) ou matriz de portas programáveis em campo, para executar as funções de controle do conversor e comunicação. O FPGA é um PLD (*Programmable Logic Device*), ou dispositivo lógico programável, baseado em memória volátil, podendo ser programado sem necessidade de remoção do circuito ou placa. Também se diferem de outros dispositivos lógicos por possuírem maior capacidade de portas lógicas, permitindo a implementação de aplicações sofisticadas em um único FPGA (BROWN & ROSE, 1996).

Um PLD consiste em um conjunto de blocos lógicos simples que podem ser organizados e interligados de maneira a executarem lógicas mais complexas. Assim, as funções de controle do conversor e de comunicação são implementadas em *hardware*, o que permite maior velocidade no gerenciamento e execução das tarefas.

Dentro da proposta do módulo didático, optou-se pela utilização de uma linguagem de programação livre, de fácil utilização e bem documentada. Isto facilita não somente o desenvolvimento do aplicativo como a possibilidade de ampliação e atualização de acordo com as necessidades e objetivos didáticos.

Neste contexto a linguagem Python preencheu os requisitos necessários, uma linguagem de programação de alto nível, interpretada, imperativa, orientada a objetos, de tipagem dinâmica e forte. Ou seja, uma linguagem com elevado nível de abstração, próxima a linguagem humana, o que facilita a programação.

A Figura 1 mostra a popularização da linguagem Python nos últimos anos de acordo com o “Tiobe Programming Community Index” (TIOBE, 2013), uma indexação feita com base nos resultados obtidos para a linguagem nos mais populares buscadores da internet.

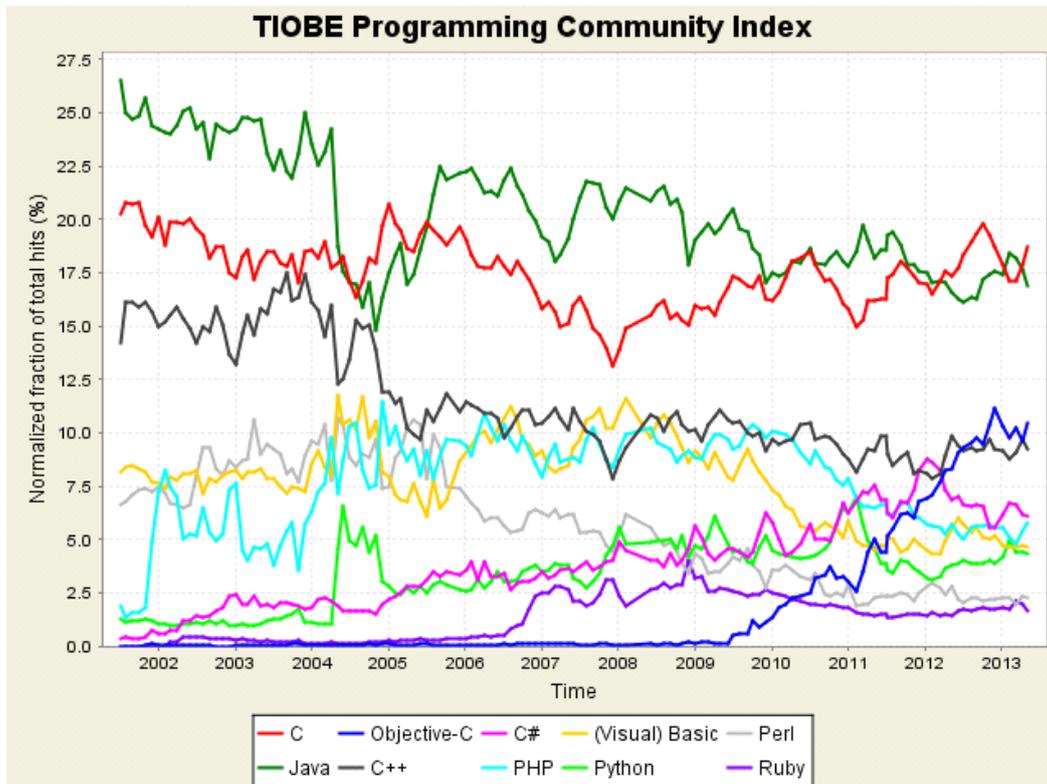


Figura 1 - Popularização da linguagem Python.

2.2. Operação do módulo e interface de controle

A operação do módulo de controle implementado em *hardware* FPGA, conforme indicado na Figura 2, é feita via a interface de usuário. A interface (SEMAN, *et. all*, 2013), indicada na Figura 3, desenvolvida em linguagem Python é executada remotamente a partir de um computador que se comunica com o controlador via protocolo UDP. O módulo de controle fornece um sinal PWM de saída que é aplicado ao processo a ser controlado. Conforme indicado, pode-se escolher dentre seis modos de operação em “Modo”.

O modo “Off” implica no módulo de controle desabilitado. No modo malha aberta “MA” de operação, como o nome indica, não existe realimentação e o sinal PWM de saída apresenta razão cíclica constante, conforme especificado em “Malha Aberta”. No modo “MA/u” especifica-se em “Degrau” uma mudança de referência degrau em termos de variação de razão cíclica em relação à razão cíclica inicial. Especifica-se também o período ou frequência de duração desta mudança de referência. O modo “MA/sen” ainda não está implementado mas tem por objetivo o levantamento da resposta em frequência da planta via injeção de um sinal senoidal.

No modo “MF”, o sistema opera em malha fechada, com realimentação, com um controlador ou compensador digital do tipo PID. Os parâmetros são especificados em

"Malha Fechada", mais especificamente o ganho proporcional K_p , tempo integral T_i e tempo derivativo T_d . O período de amostragem é o mesmo da frequência de chaveamento do conversor, especificada em "Parâmetros do Conversor". O modo "MF/u" além das características anteriores permite, conforme descrito para "MA/u", uma mudança do sinal de referência.

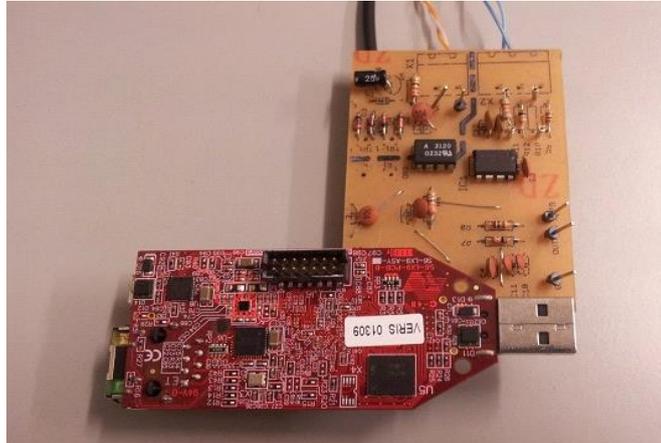


Figura 2 - Protótipo da controladora com FPGA.

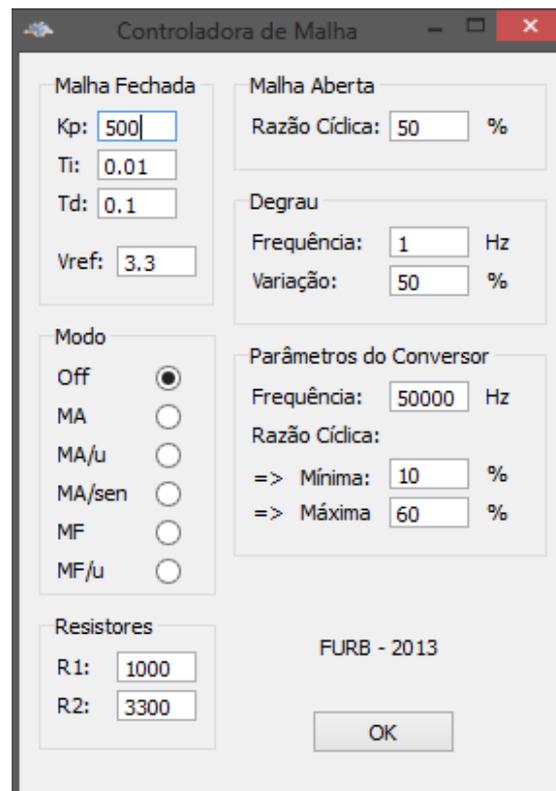


Figura 3 - Tela da interface gráfica

Além das opções acima é possível limitar a razão cíclica da ação de controle entre um mínimo e um máximo, conforme especificado em "Parâmetros do Conversor/Razão Cíclica". O ganho de realimentação é especificado em "Resistores", de acordo com o valor dos resistores R_1 e R_2 do divisor de tensão do amostrador.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÓDULO DE CONTROLE

Como exemplo de aplicação do módulo de controle aqui apresentado, escolheu-se um conversor CC-CC, planta típica, com a característica de utilização no meio industrial, comercial, residencial e também acadêmico.

3.1. O conversor CC-CC

Conversores estáticos estão presentes nos mais variados equipamentos e dispositivos utilizados no nosso dia a dia, sejam para aplicações industriais, comerciais ou domésticas. Pode-se citar como exemplo o acionamento de motores elétricos, computadores, televisores, geladeiras, carregadores de bateria e vários outros. Sua principal função é a conversão de energia CA-CC e conversão CC-CC para adequação do nível da tensão contínua.

Nas aplicações típicas, em função de variações de parâmetros da carga alimentada pelo conversor, caso de conversores estáticos CC-CC, o ganho estático de tensão pode variar. Esta variação da tensão CC de saída pode causar uma série de problemas e funcionamento inadequado dos dispositivos. Assim, faz-se necessária a utilização de um controlador ou compensador em malha fechada para o sistema.

A Figura 4 apresenta um esquema elétrico do conversor estático CC-CC abaixador de tensão não isolado (conversor Buck), aqui utilizado como planta ou processo a ser controlado.

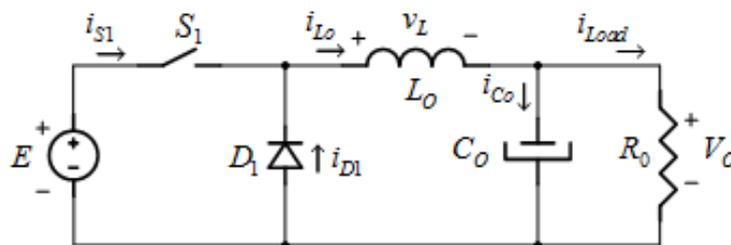


Figura 4 - Esquema elétrico do conversor Buck.

Observa-se que o modelo do conversor Buck é composto por um interruptor, um diodo e um filtro de saída L_o e C_o . O conversor aqui utilizado apresenta as especificações listadas abaixo. A Figura 5 apresenta a foto do conversor CC-CC aqui utilizado.

Modo de operação: Condução contínua

Tensão de entrada = 200V

Tensão de saída = 48V

Potência de saída = 150W

Frequência de chaveamento = 50 kHz

Indutância do filtro = 2,333mH

Capacitor do filtro = 100uF

Resistência série do capacitor = 1,7 Ω

Resistência série do indutor = 0,156 Ω

Resistência de carga = 15,36 Ω

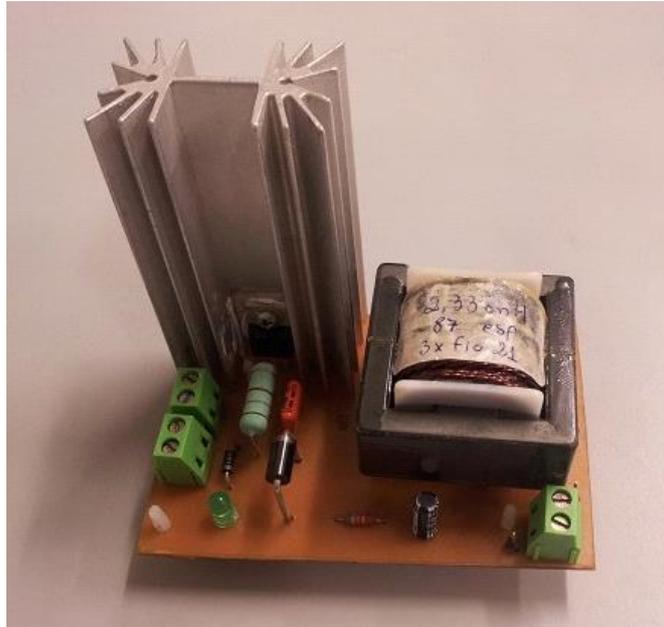


Figura 5 - Protótipo do conversor Buck.

3.2. Especificação dos parâmetros do módulo de controle

Para especificação dos parâmetros PID do controlador, deve-se primeiramente levantar o modelo da planta a ser controlada. Existem várias técnicas de modelagem para conversores estáticos CC-CC, optando-se neste trabalho por utilizar a apresentada por Middlebrook e Cúk (1976, 1977). Através desta técnica obtêm-se um modelo de variáveis médias no espaço de estado, resultando em um modelo linear, incluindo o filtro de saída. O modelo é válido para pequenas perturbações, realizando-se a linearização em torno do ponto de operação (POMÍLIO, 2005). De acordo com o modelo utilizado, a função de transferência da planta é dada por,

$$\frac{V_O(s)}{V_C(s)} = \frac{E}{V_{tri}} \cdot \left(\frac{(s \cdot C_O \cdot r_C + 1)}{s^2 \cdot (L_O \cdot C_O) + s \cdot \left(\frac{L_O}{R_O} + C_O \cdot (r_C + r_L) \right) + 1} \right) \quad (1)$$

Onde $V_O(s)$ é a variável de saída e $V_C(s)$ é a variável de entrada. A Figura 6 representa o diagrama de bloco da planta em malha fechada.

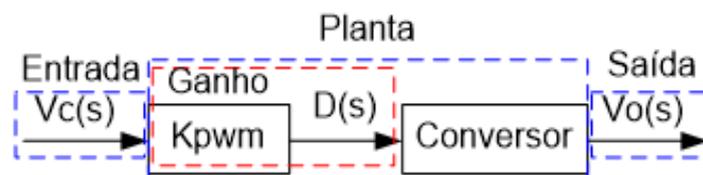


Figura 6 – Diagrama de bloco da planta em malha aberta

Observa-se que na função de transferência aparece o ganho K_{pwm} que resulta no valor da razão cíclica $D(s)$ como entrada do bloco conversor. Portanto considerando todos esses fatores de ganho, a planta apresenta um zero e dois pólos, com uma função de transferência de segunda ordem.

A Figura 7 apresenta a simulação da resposta do conversor Buck em malha aberta, para uma entrada degrau de 20% do valor nominal da tensão de saída do conversor.

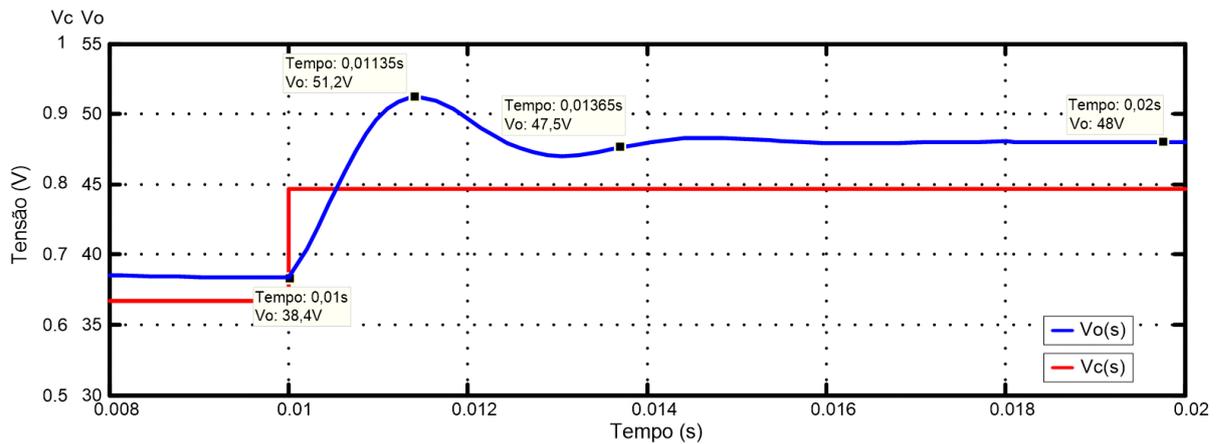


Figura 7 - Resposta ao degrau da planta em malha aberta.

Para validação do modelo teórico, levantou-se via utilização do módulo de controle aqui apresentado, operando no modo "MA", a função de transferência da planta. A função transferência foi obtida a partir da medição da resposta temporal do conversor CC-CC em malha aberta, para entrada degrau, conforme indicado na Figura 8. Os três gráficos são idênticos, sendo que no primeiro aparece indicada a medição do tempo de resposta, no segundo o instante de pico e sobressinal máximo e no terceiro valor de regime.

A Tabela 1 apresenta a comparação dos resultados obtidos em simulação e no ensaio realizado em laboratório.

Tabela 1 - Comparação dos resultados obtidos (MA).

Itens	Simulação	Ensaio
Valor Inicial	38,4 V	38,4 V
Valor Final	48 V	47,2 V
Instante de pico	1,35 ms	1,36 ms
Valor de pico	51,2 V	50,8 V
Tempo de resposta (5%)	3,52 ms	3,66 ms

A partir dos valores medidos pode-se concluir pela boa aproximação do modelo teórico via função transferência da equação (1) em relação à planta real.

Como a estrutura do compensar é digital, é necessária a implementação deste via equações a diferenças. Apesar disso, o projeto do compensador é realizado em tempo contínuo no plano S, com posterior conversão para Z e ou equações a diferenças. Existem vários métodos de aproximação discreta (PAGANO, 2012). Adotou-se a

técnica de aproximação discreta bilinear (Tustin) com período de amostragem igual ao período de chaveamento.

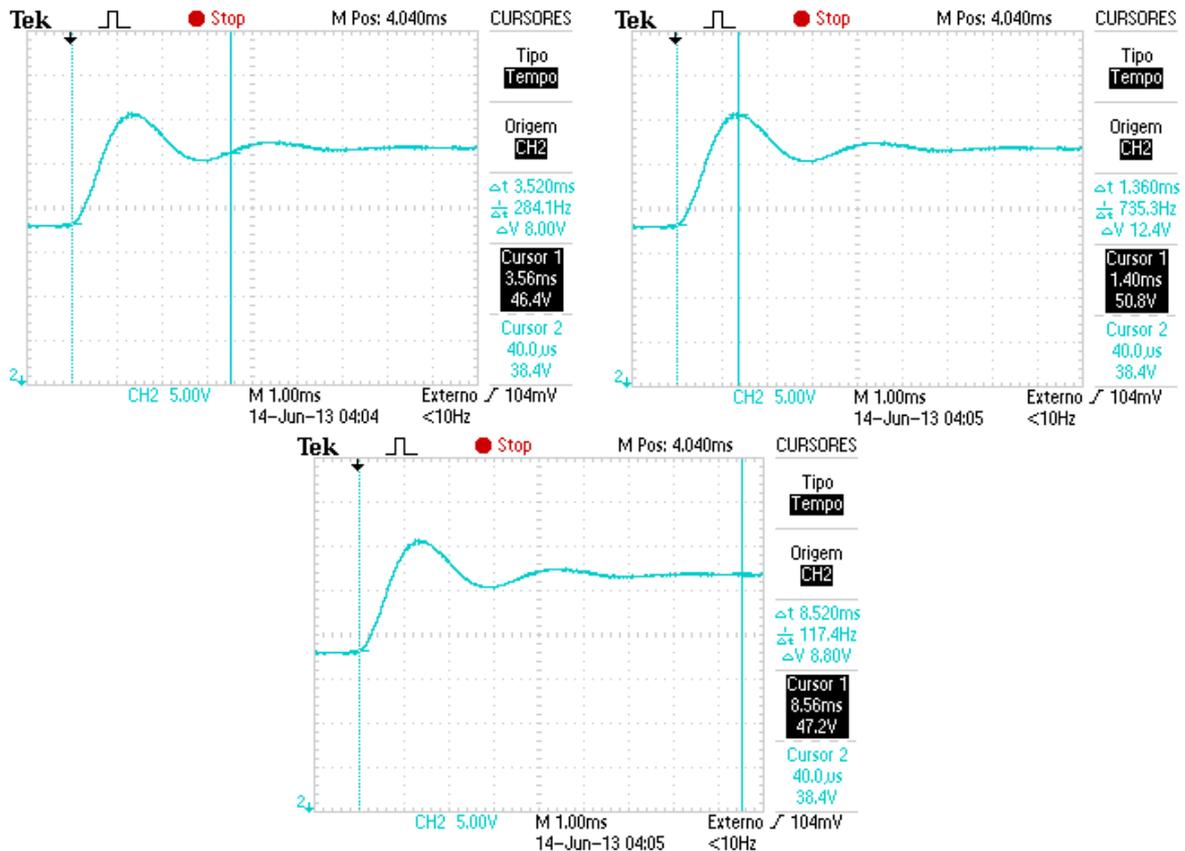


Figura 8 - Resposta ao degrau da planta em malha aberta.

Assim obtém-se a seguinte função de transferência discreta para o compensador:

$$C(z) = \frac{20,61 \cdot z^2 - 40,59 \cdot z + 20,02}{z^2 - 1,889 \cdot z + 0,8889} \quad (2)$$

Deste modo,

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} \quad (3)$$

A equação às diferenças do compensador é definida por,

$$u(k) = 1,889 \cdot u(k-1) - 0,8889 \cdot u(k-2) + 20,61 \cdot e(k) - 40,59 \cdot e(k-1) + 20,02 \cdot e(k-2) \quad (4)$$

A partir da equação a diferenças do compensador especifica-se os parâmetros do controlador na interface gráfica e procede-se a operação do sistema em malha fechada. A Figura 9 apresenta o resultado simulado da resposta ao degrau da planta em malha fechada utilizando-se o compensador especificado.

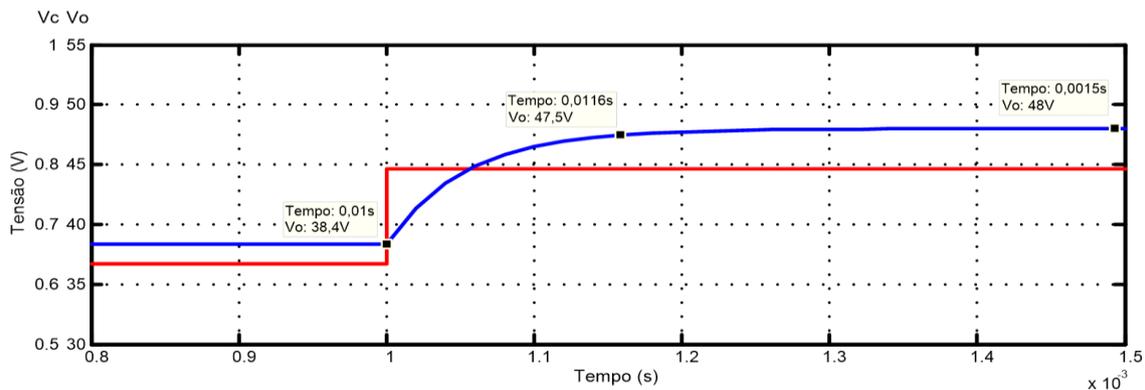


Figura 9 - Resposta ao degrau em malha fechada (simulação).

O resultado experimental do módulo de controle aqui apresentado, operando em malha fechada, aparece indicado na Figura 10.

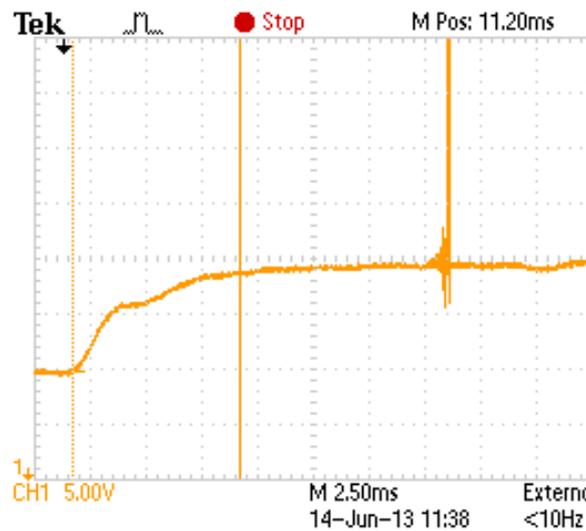


Figura 10 - Resposta ao degrau em malha fechada.

A Tabela 2 apresenta a comparação dos resultados obtidos em simulação e no ensaio realizado em laboratório.

Tabela 2 - Comparação dos resultados obtidos (MF)

Itens	Simulação	Ensaio
Valor Inicial	38,4 V	38,4 V
Valor Final	48 V	48 V



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um módulo de controle ou kit didático para utilização no ensino de técnicas de controle aplicadas a eletrônica de potência. O módulo desenvolvido, em função das tecnologias adotadas como implementação de hardware em FPGA, possibilidade de comunicação remota via UDP e interface implementada em Python, possibilita, além da eficiência em termos de parâmetros técnicos, uma abordagem sintonizada com o anseio dos alunos. Ou seja, um fator motivador para o ensino dos conceitos envolvidos e absorção dos conhecimentos necessários. Vale destacar a imediata empatia verificada entre os usuários do módulo de controle aqui apresentado, destacando-se a facilidade de operação e visualização dos parâmetros envolvidos.

Destaca-se também a adequação da linguagem Python utilizada na construção da interface gráfica e na comunicação UDP, parte essencial da estruturação do projeto. O roteiro de projeto apresentado, com levantamento do modelo da planta e especificação do controlador mais a validação via experimental em malha aberta e fechada, comprovam a eficácia do módulo de controle.

Para projetos futuros sugere-se a implementação de uma interface para a modificação de parâmetros que seja portátil e acessível em mais plataformas. Sugere-se também a possibilidade de visualização remota do gráfico temporal dos principais parâmetros do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

B. Simone, "Digital Control in Power electronics", 2006.

BROWN, Stephen e ROSE, Jonathan. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial. Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto, 1996.

OGATA, K. (1987). Discrete-time control systems (M. Rizzi, Ed.). Prentice Hall Inc.

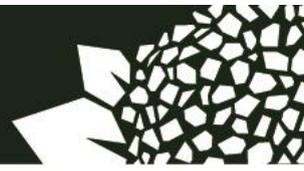
PAGANO, D. J. Teoria de sistemas amostrados e controle digital. 22 de nov. 2012. 70p. Notas de aula. eletrônico.

POMÍLIO, J. A. Modelagem de fontes chaveadas: Método das variáveis de estado. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>>. Acesso em: jun/2013.

R. D. Middlebrook and S. Cuk: "A General Unified Approach to Modeling Switching Converter Power Stage". 1976 IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp. 18-34.

S. Cuk and R. D. Middlebrook: "A General Unified Approach to Modeling Switching DC-to-DC Converter in Discontinuous Conduction Mode". 1977 IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp 36-57

SEMAN, L. O. ; HAUSMANN, R. ; GILI, C. ; GILI, L. C. . Kit experimental de conversores CC-CC controlados através de interface USB utilizando software livre sob



GPLv3. In: VIII International Conference on Engineering and Computer Education - ICECE '2013.

TIOBE Programming Community Index. Disponível em:

<<http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>> Acesso em abr/2013.

TEACHING CONTROL MODULE WITH REMOTE INTERFACE

***Abstract:** This paper presents a PID control module that despite the universal applicability, presents a series of specifications aimed at teaching applications, with emphasis on teaching the theory and new control technologies. The module distinguishes itself by the use of modern technologies such as FPGA hardware and graphical interface developed in Python, with the possibility of communication through UDP protocol via LAN or internet. These features, plus the ability to change the PID parameters and system performance analysis in real time, serve as motivational tool in teaching the subject in question.*

***Key-words:** PID, FPGA, educational tool, Python.*