

FERRAMENTA E METODOLOGIA INTERDISCIPLINAR PARA ENSINO ATRAVÉS DO CONTROLE DE TEMPERATURA DE UMA CALDEIRA

Mauro A. Pagliosa ; César R. C. Torrico

Universidade do Oeste de Santa Catarina, Curso de Graduação em Engenharia Elétrica,
Av. Getúlio Vargas 2125
CEP. 89600-000, Joaçaba – SC- Brasil
mauro.pagliosa@unoesc.edu.br, cesar.torrico@unoesc.edu.br

Resumo: *Este trabalho apresenta um equipamento e uma metodologia para ensino da teoria de controle, instrumentação e eletrônica de potência referente aos conversores CA-CC e CA-CA básicos. O sistema como um todo consiste em controlar a temperatura de uma pequena caldeira composta por sensor de temperatura, resistência de aquecimento, atuador e controlador. O controlador é implementado por meio da ferramenta Simulink do software Matlab e uma placa de aquisição de dados microcontrolada desenvolvida para esta finalidade. Como atuador, utiliza-se uma estrutura especificada de conversores CA-CC ou CA-CA conectado a resistência de aquecimento. A metodologia de ensino envolve o projeto e a montagem de um protótipo do conversor, estudo da instrumentação necessária para o monitoramento da temperatura e da teoria de controle envolvida. Esta metodologia tem sido aplicada nas disciplinas experimentais de Eletrônica de Potência I e Controle II na Universidade do Oeste de Santa Catarina Campus de Joaçaba – SC.*

Palavras-chave: *Aquisição de dados; Conversores CA-CA; Conversores CA-CC; Ensino; Sistemas de Controle.*

1. INTRODUÇÃO

Na grande maioria dos projetos em Eletrônica de Potência, costuma-se distinguir dois estágios: estágio de potência e estágio de controle.

Em virtude do extenso conteúdo e limitação de tempo, o ensino da eletrônica de potência no nível de graduação relacionado aos conversores CA-CC e CA-CA, é restrito, na grande maioria das vezes, apenas com o estágio de potência, sem utilizar malha de controle realimentado. Da mesma forma, o ensino da teoria de controle clássico NISE (2002) na disciplina de Sistemas de Controle, também é restritamente conceitual e os resultados dos experimentos são apenas observados por meio de simulação em computador. Em ambos os casos, no ensino de eletrônica de potência e de controle, falta a percepção do aluno para a aplicação do assunto estudado, ou ainda, permanecem dúvidas de como integrar os dois assuntos para a implementação.

O desenvolvimento da metodologia e ferramenta de ensino proposto tem por objetivo, promover a interdisciplinaridade no ensino através da eletrônica de potência e sistemas de controle motivando o aluno por meio do estudo aplicado e preparando-o para o mercado de trabalho na indústria.

2. SISTEMA DE CONTROLE DA TEMPERATURA DE UMA PEQUENA CALDEIRA

O conteúdo abordado refere-se ao estudo dos conversores CA-CC e CA-CA na área da eletrônica de potência e da teoria de controle clássica. O estudo é feito por meio do projeto e implementação de um sistema para controle da temperatura de uma pequena caldeira como parte integrante das disciplinas de Controle Experimental e Eletrônica de Potência.

O sistema de controle de temperatura proposto no projeto é composto por atuador, controlador e sensoriamento formando um sistema de controle em malha fechada conforme mostra o diagrama da Figura 1.

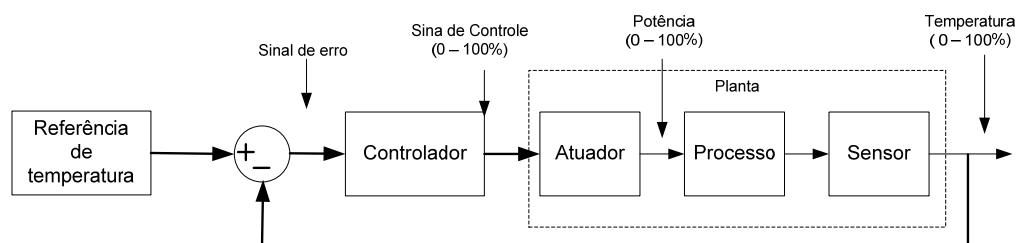


Fig. 1 Sistema de controle de uma caldeira.

O valor da referência de temperatura desejada para a caldeira pode ser ajustado entre os limites de 0 e 100% correspondendo a faixa de operação de temperatura. Tanto a variável de entrada do sistema de controle quanto a de saída pode ser monitorada através de uma Interface Homem-Máquina que será apresentada a seguir. Os demais blocos apresentados na Figura 1 também serão discutidos neste trabalho.

2.1 Interface Homem Máquina

Processos físicos integrados com interfaces computadorizadas Homem-Máquina permitem um melhor aproveitamento no aprendizado em disciplinas laboratoriais. Na Figura 2 apresenta-se um modelo esquemático geral envolvendo esta idéia.

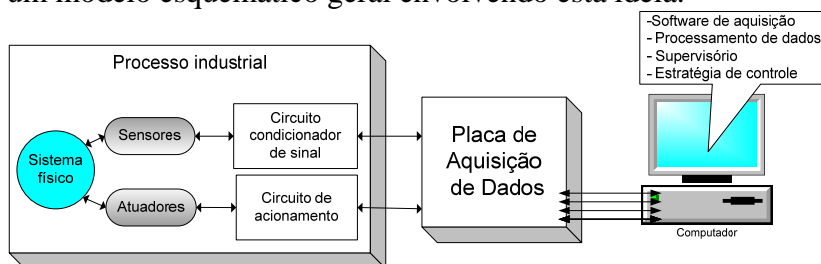


Fig. 2 Modelo de Interface Homem - Máquina.

Para um controle computadorizado, tem-se verificado um crescente desenvolvimento nos sistemas de aquisição e tratamento digital de sinais. Diversos fatores têm proporcionado a evolução nesta área: o avanço da tecnologia microeletrônica, que tem possibilitado o aumento das capacidades e velocidades dos Micro-controladores, responsáveis pelo nível de inteligência, autonomia e versatilidade exigido pelos processos; o crescente desempenho dos computadores pessoais, tal como a sua relação qualidade/preço e confiabilidade que eles garantem aos seus usuários; a existência de cada vez maior e melhores ferramentas de desenvolvimento de software, que permitem criar aplicações de alto nível com avançadas interfaces gráficas, facilitando a comunicação homem-máquina. Os sistemas de aquisição de dados têm a função de digitalizar valores de tensão lidos de um processo e transferir os

valores binários para o computador (TOCCI E WIDMER, 2003). Além da digitalização de tensões, é prática comum entre os fabricantes, incluírem outras funções nas placas, tais como saída de sinais analógicos, entradas e saídas digitais paralelas, temporizadores, contadores, saídas PWM (Pulse Wide Modulation), etc.

A necessidade de implementação de um laboratório para o ensino das disciplinas de Controle Experimental e Eletrônica de Potência oferecido na 8a fase do curso de Engenharia Elétrica da UNOESC levou ao desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados e uma interface com a ferramenta computacional Simulink/Matlab. A placa de aquisição de dados dispõe dos seguintes componentes básicos: 3 conversores A/D de 10 bits, 3 conversores D/A de 10 bits, dois canais de saída PWM, 2 portas de saída digital e 3 portas de entrada digital. Os sinais de tensão foram padronizados entre 0 e 5 Volts.

No Simulink foram criados blocos de comunicação, (Figura 3) ligados diretamente com a placa de aquisição de dados.

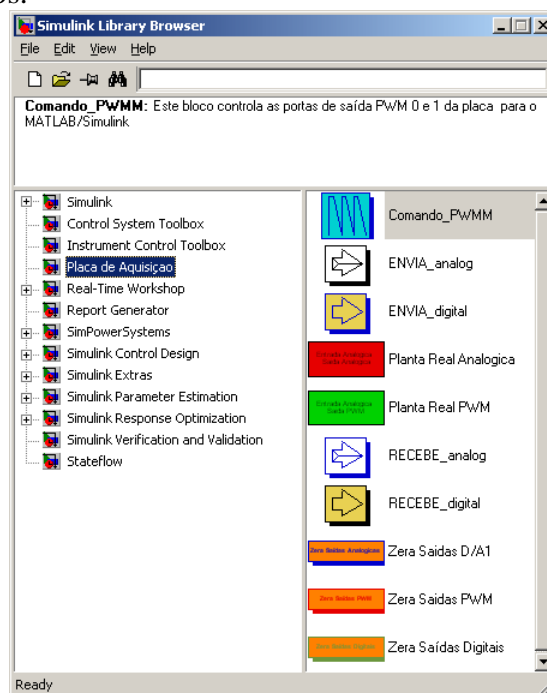


Fig. 3 Blocos de comunicação do Simulink com a placa de aquisição de dados.

O projeto desta interface apresenta uma consistência visual e funcional, apropriado para ensino, onde diversas técnicas podem ser implementadas e mudadas rapidamente.

2.2 Atuador

O atuador é responsável por manter a potência dissipada na resistência de aquecimento da caldeira determinada pelo controlador. Afim de estudar os conversores controlados CA-CA e CA-CC básicos, especifica-se uma destas estruturas para a função de atuador..

2.3 Processo

Refere-se a uma pequena caldeira onde se deseja controlar a temperatura. Esta caldeira pode ser um recipiente com água e com uma resistência de aquecimento imersa. Recomenda-se que o volume da água utilizado na caldeira fique entre 3 e 5 litros para uma potência de aquecimento de 1kW. Nesta potência, o tempo para que 5 litros de água alcance 75°C é de aproximadamente 15 minutos partindo da temperatura ambiente de 25°C.

2.4 Sensor

Como sensor de temperatura, deve-se utilizar um sensor para variações de temperatura entre 0 e 100°C e que possa ser imerso em água. Este sensor tem a finalidade de medir a temperatura da água e enviar o dado para o controlador. Como o controlador é implementado no computador, o sinal de resposta do sensor deve ser acondicionado no padrão da entrada de dados da placa de aquisição utilizada para comunicação com o computador.

O sistema completo de controle de temperatura da caldeira é apresentado no esquema da Figura 4.

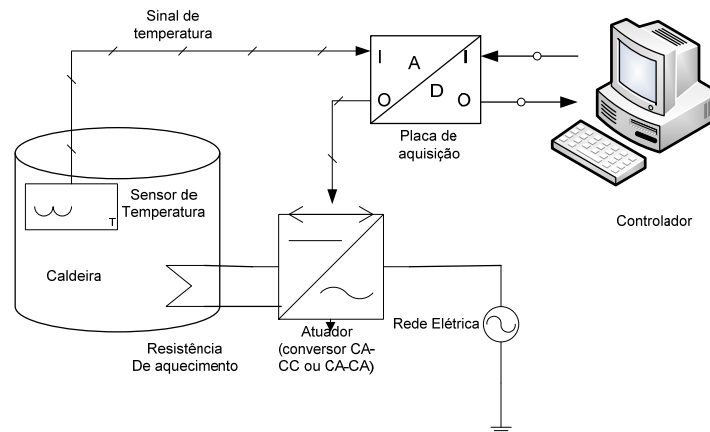


Fig. 4 Esquema funcional do processo.

3. METODOLOGIA DE ENSINO.

O aprendizado do aluno acontece através da execução de uma seqüência de tarefas definida pelo professor e que será apresentado mais adiante. Para a execução destas tarefas, é necessário primeiramente que o professor estabeleça a especificação do projeto.

Especificação necessária para o projeto do sistema de controle:

- Determinar o tamanho da caldeira;
- Topologia do conversor controlado CA-CC ou CA-CA para operar na função de atuador;
- Máxima potência;
- Tempo de resposta para a temperatura atingir 95% do valor da temperatura de referência em regime permanente;
- Máxima ultrapassagem de temperatura durante regime transitório;
- Máximo erro permitido em regime permanente.

Para estabelecer o tempo de resposta se deve ter o cuidado para que não resulte em uma potência do atuador muito elevada, a fim de reduzir custos com a implementação do protótipo e segurança dos alunos. Um ensaio simples que pode ser realizado para especificar este parâmetro consiste em aquecer a caldeira de um tamanho determinado utilizando a resistência de aquecimento, que atenda a especificação da potência do atuador, através de um retificador de meia onda a diodo, ou seja, com a metade da potência especificada no projeto. Este ensaio proporciona ao professor uma noção do tempo e temperatura que podem ser atingidos na caldeira para aí sim, especificar o projeto dentro de limites viáveis de implementação.

Após a especificação, inicia-se a execução das etapas do projeto conforme descritas a seguir:

3.1 Obtenção do modelo matemático do processo

Para poder analisar os sistemas de controle se deve contar com um modelo representativo da dinâmica do processo. Esta representação é denominada “Modelo Matemático” do sistema. A análise deste modelo permite conhecer as características da resposta temporal do sistema a controlar. Com a informação recolhida do processo é possível determinar a estratégia de controle mais adequada para o sistema.

Para este caso se fez uso de um método experimental onde se aplica uma entrada degrau (50% da potencia de entrada – 2.5 Volts do sinal de comando) logo se lê o valor da temperatura a intervalos de tempo adequado. A Figura 5 representa o comportamento da resposta para o caso da caldeira, nota-se que a escala de temperatura foi alterada e para começar em zero, importando apenas a dinâmica do sistema.

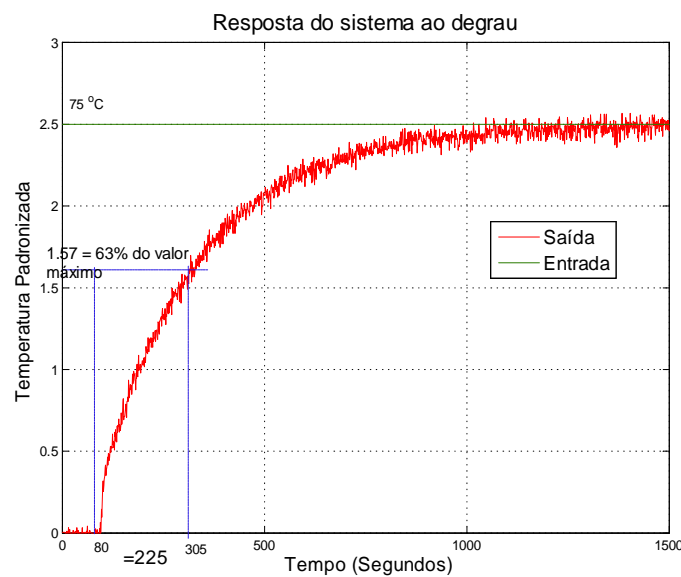


Fig. 5 Curva de resposta do processo.

Por ser um processo de temperatura a função que melhor se aproxima da curva de resposta é um modelo de primeira ordem com atraso, da forma:

$$G(s) = \frac{Ke^{-sT}}{(\tau s + 1)} \quad (1)$$

Onde T é o atraso, τ a constante de tempo e K a relação de ganho entre entrada e saída.

Considerando que a constante de tempo é o tempo em que o sistema demora em atingir o 63,2% do seu valor final. Da Figura 5 obtêm-se os parâmetros do modelo: $T=80s$, $\tau=225s$ e $K=2.5/2.5=1$.

Confrontando a resposta do processo real e do modelo matemático, na Figura 6 observa-se a semelhança de ambos, validando desta forma o modelo.

É importante observar, que apesar do atuador e a placa de aquisição possuírem uma dinâmica de resposta a um sinal de entrada, apenas a caldeira está sendo considerada como processo, pois sua resposta é muito mais dominante em relação as outras.

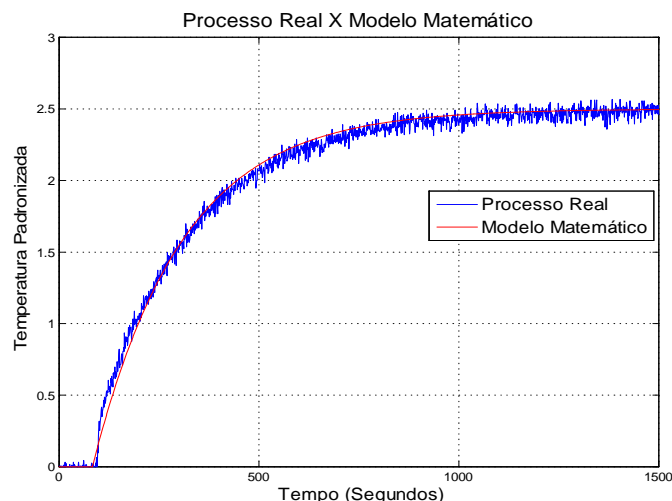


Fig. 6 Confronto entre processo real e modelo matemático.

3.2 Especificação do sensor de temperatura e acondicionador de sinal.

O monitoramento da temperatura da caldeira deve estar interligado com o controlador, para isso, é sugerido que o aluno realize um estudo de quais as tecnologias de sensoriamento que podem ser adotadas. Como resposta, o sensor deve proporcionar um sinal de 0 a 5V para ser compatível com a entrada analógica da placa de aquisição de dados, por este motivo é necessário a elaboração de um circuito eletrônico acondicionador de sinal.

Destacam-se como sensores de temperatura mais usuais os de resistência variável (RDT), termopares e sensores com resposta de tensão proporcional a temperatura (semicondutores). Apesar de simples, este estudo deve ser cuidadoso para viabilizar o experimento. A tabela 1 mostra algumas vantagens e desvantagens destes sensores para a aplicação em estudo LIPTAK (1995).

Para o caso de estudo foi utilizado o sensor semicondutor LM35, pela simplicidade do circuito eletrônico para acondicionamento de sinal.

Tabela 1 - Quadro comparativo de sensores de temperatura

Sensor	Vantagens	Desvantagens
RDT	Robusto	Circuito eletrônico para acondicionamento de sinal complexo para evitar o auto-aquecimento do sensor
Temopar	Precisão e resposta rápida	Mais susceptível a ruído elétrico.
Semicondutores	Circuito acondicionador de sinal simples.	Necessidade de isolamento do sensor com a água provocando menor sensibilidade de temperatura.

3.3 Projeto do atuador

O atuador controla a potência dissipada na resistência de aquecimento através do sinal proveniente do controlador. Como atuador, recomenda-se o emprego dos conversores estáticos controlados básicos CA-CA diretos ou CA-CC que servem de objeto de estudo para os alunos. As estruturas estudadas são: Retificador Controlado Monofásico de Meia Onda, Retificador Controlado Monofásico de Onda Completa, Retificador Controlado Três Pulsos e

Seis Pulsos, Gradador Monofásico e Controlador por Ciclos Inteiros (BABI, 2005; RASHID, 1999).

Não se recomenda o emprego de conversores estáticos CC-CC para esta aplicação pois a modelagem matemática destes conversores, implica em uma dinâmica de controle mais rápida que a capacidade de processamento digital (placa de aquisição e computador).

O desenvolvimento do atuador pode ser feito através da execução das seguintes etapas após a determinação da topologia adotada:

Estudo do funcionamento do conversor

Nesta etapa o aluno deve entender o funcionamento do conversor, reconhecer as formas de onda de corrente e tensão em todos os elementos de potência e realizar a análise matemática para extrair as equações de dimensionamento.

Dimensionamento dos elementos de potência

A partir das equações obtidas da análise matemática pode-se dimensionar e especificar os elementos de potência.

Elaboração do circuito de comando

O circuito eletrônico onde são gerados os sinais de comando para o conversor deve possuir comando isolado para evitar que ocorra mais de uma referência de tensão pois a placa de aquisição está conectada a referência de tensão do computador e que não necessariamente será a mesma do circuito de potência. Com o comando isolado evita que tanto a placa de aquisição como o microcomputador possam ser danificados por um erro de ligação.

Como o circuito de potência é um conversor CA-CA ou CA-CC controlado estudado na disciplina de Eletrônica de Potência a nível de graduação, há a necessidade de sincronismo entre os sinais de comando dos semicondutores com a rede elétrica. Neste caso, recomenda-se o uso do componente integrado TC785 que ao mesmo tempo em que proporciona a sincronização dos pulsos de comando, também permite a padronização com o sinal proveniente do controlador que está entre os níveis de 0 e 5V. A Figura 7 mostra a variação da potência de saída de um Retificador Controlado Monofásico de Onda Completa para uma variação do sinal de controle de 0 a 5V, adotado para o caso de estudo.

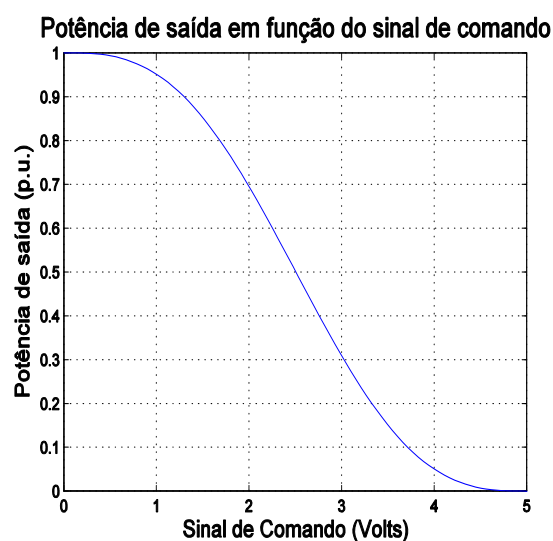


Fig. 7 Comportamento da potência em função do sinal de comando.

Confeção da placa de circuito impresso (PCB);

A confecção da PCB envolve o desenvolvimento do Layout utilizando software apropriado e soldagem dos componentes. Apesar de simples, esta é a única oportunidade, para muitos alunos, de aprendizado relacionado à elaboração da PCB durante o curso de graduação.

Ensaio experimental

O ensaio experimental do protótipo e aquisição das principais formas de onda utilizando osciloscópio é necessário para avaliação da funcionalidade que relaciona os resultados experimentais com os teóricos e para a elaboração do relatório técnico.

No termino da quinta etapa, o conversor está pronto para ser utilizado como atuador no sistema de controle proposto. A Figura 8 apresenta um exemplo de atuador utilizando a estrutura do conversor Monofásico de Onda Completa.

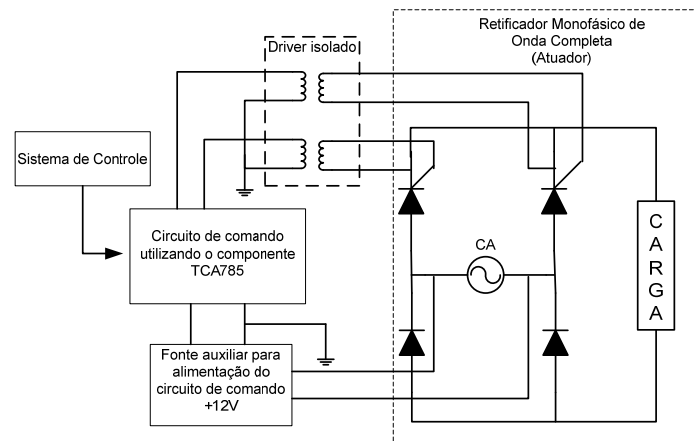


Fig. 8 Exemplo de atuador utilizando conversor controlado monofásico.

3.4 Projeto do controlador

No projeto do atuador observa-se que para uma variação linear do sinal de comando obtém-se uma variação não linear na saída da potência do atuador, vide Figura 7. Isto se deve a que uma variação linear do ângulo de disparo dos tiristores não produz uma variação linear na saída de potencia do atuador. Uma vez que este fato não foi previsto no levantamento do modelo matemático do processo, terá que ser considerado no projeto do controlador.

O projeto do controlador devido às características do sinal de comando de entrada será dividido em duas etapas: Linearização do comando de acionamento e; Projeto do controlador PID.

Linearização do comando de acionamento.

Para um controle adequado que se aproxime ao do modelo matemático obtido anteriormente, deseja-se que para uma variação linear do sinal de comando se tivesse uma variação linear e proporcional na saída da potência do atuador. Esta correção será feita por uma função matemática em cascata com a planta. Para este caso específico verificou-se que um ajuste de curva por uma função cúbica atende satisfatoriamente. A equação 2 indica esta função cúbica e o resultado desta compensação apresenta-se na Figura 9.

$$V_{\text{ajustado}} = \frac{5(-0.036881V^3 + 0.27661V^2 - 0.9494V + 2.7918)}{\pi} \quad (2)$$

Onde V representa o sinal de entrada ao processo e $V_{ajustado}$ representa o sinal que dispara os tiristores.

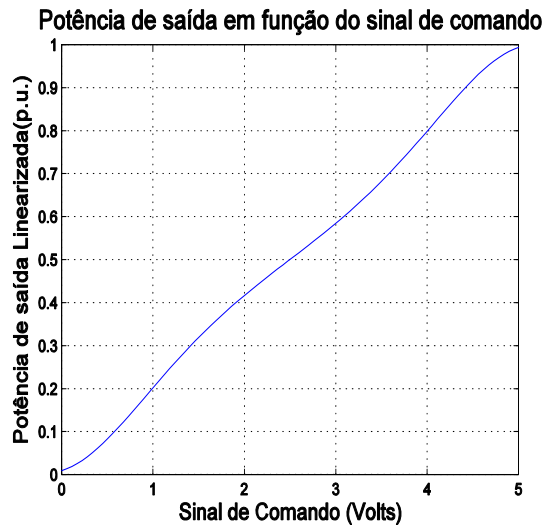


Fig. 9 Linearização do sinal de comando.

Projeto do controlador PID.

Escolhe-se a estrutura PID tradicional tal como apresentado na equação 3.

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

Onde $u(t)$ é a saída do controlador, $e(t)$ o erro dinâmico do sistema, K_c o ganho proporcional do controlador, T_i a constante do integrador, T_d a constante do derivador.

Na Figura 10 apresenta-se o sistema a malha fechada incluindo a estrutura do controlador. O controlador é composto pelos ganhos Proporcional (Ganho P), Integrador (Ganho I) e Derivativo (Ganho D). A função de transferência da caldeira é representada pelo bloco “Modelo Planta” e o atraso do sistema pelo bloco “Atraso de Transporte”. Os blocos Scope e Simout são utilizados para observação gráfica dos resultados.

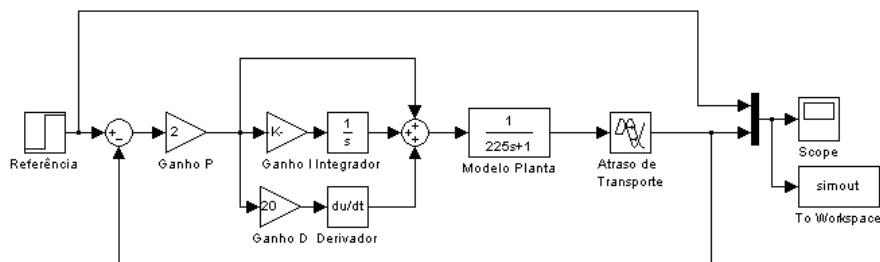


Fig. 10 Sistema a malha fechada incluindo o controlador PID.

Um critério de comportamento muito utilizado pela simplicidade da sua verificação é o chamado “razão de amortecimento de 1/4” que está indicado na Figura 11.

Ao especificar a razão de amortecimento se pretende garantir uma adequada margem de estabilidade e ao mesmo tempo garantir que as variações da variável controlada serão praticamente desprezíveis depois do quarto ciclo de oscilação. Existem alguns autores tais

como COHEN & COON (1953) e ZIEGLER & NICHOLS (1942) que garantem esta especificação.

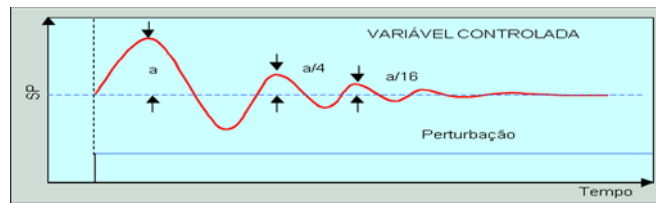


Fig. 11 Critério de comportamento “Razão de amortecimento 1/4”.

Para este caso o método de Ziegler-Nichols (Tabela 2) teve melhor desempenho.

Tabela 2 - Parâmetros de sintonia PID pelo método de Ziegler-Nichols.

Modo	K_c	T_i	T_d
P	$\tau/(TK)$	-	-
PI	$0,9 \tau/(TK)$	$3T$	-
PID	$1,2 \tau/(TK)$	$2T$	$0,5T$

Seguindo a tabela anterior ajustam-se os parâmetros PID, resultando em : $K_c = 3$; $T_i=160$ s e $T_d=40$ s. Baseados nestes valores se fizeram alguns reajustes para melhorar o desempenho, no final resultou em: $K_c = 2$; $T_i=250$ s e $T_d=40$ s.

Após a simulação, na Figura 12 apresenta-se o comportamento do sistema a malha fechada sob ação do controlador PID.

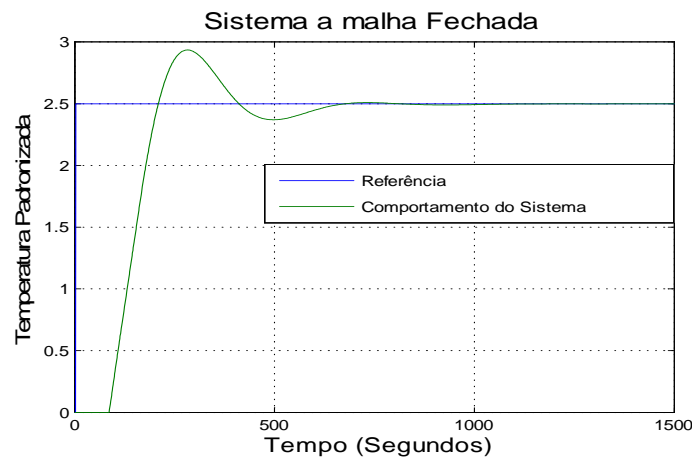


Fig. 12 Resposta do sistema a malha fechada – Modelo Matemático.

Com o resultado da simulação verifica-se que as especificações impostas ao sistema são atendidas.

3.5 Montagem e testes experimentais.

Uma vez o sistema ser projetado e simulado, resta substituir o modelo matemático da planta pela planta real através do sistema de aquisição de dados. Na Figura 13 apresenta-se o sistema a malha fechada do processo real.

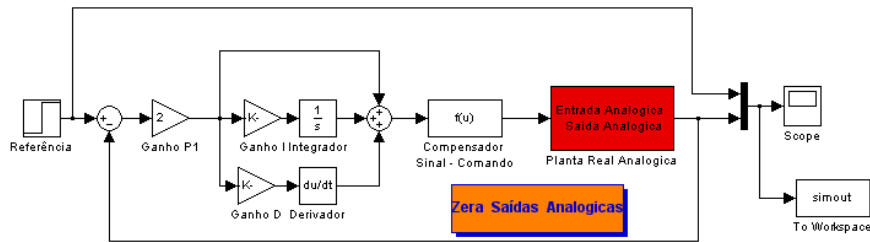


Fig. 13 Sistema a Malha Fechada da Planta Real.

O bloco “Compensador Sinal-Comando” da Figura 13 representa a equação de linearização do comando apresentado em (2) e o bloco “Zera Saídas Analógicas” representa um botão para desligar o atuador que zera o sinal de comando.

Como resultado da aplicação da estratégia de controle, na Figura 14 apresenta-se a resposta do processo real em confronto com a resposta do modelo matemático.

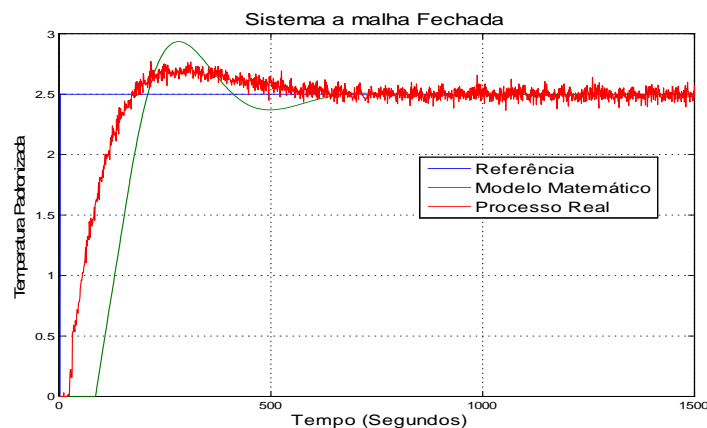


Fig. 14 Resposta do Sistema a Malha Fechada - Processo Real × Modelo Matemático.

Observa-se que a resposta do processo real teve uma pequena melhora com relação ao modelo matemático, porém, manteve alguns índices de desempenho tais como o tempo de pico e tempo de assentamento, variando apenas na ultrapassagem. Esta variação se deve a que um modelo matemático é apenas uma aproximação de um processo de real, por outro lado o sinal de comando não é perfeitamente linear com relação à potência do atuador.

Na Figura 15 apresenta-se o protótipo do estudo de caso que foi desenvolvido por um grupo de alunos.

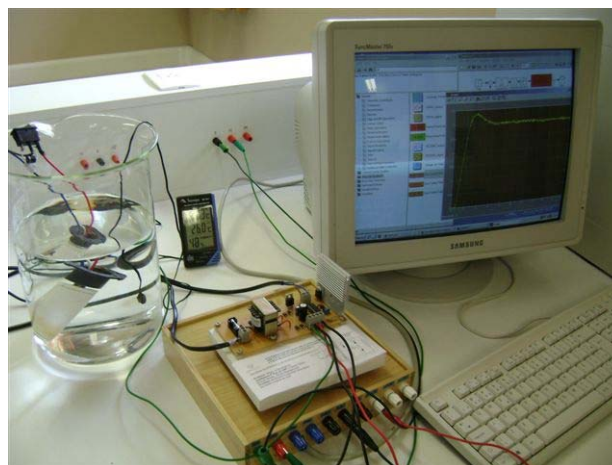


Fig. 15 Protótipo do sistema de controle de temperatura.

4. CONCLUSÕES.

A ferramenta e metodologia apresentadas neste documento demonstraram ser de baixo custo e funcional, uma vez que os algoritmos de controle são desenvolvidos apenas no software e a placa de aquisição de dados é padrão para vários tipos de processos. A funcionalidade possibilita ao processo a conexão de controladores e dispositivos de aquisição de dados digitais e analógicos, como os controladores industriais, computadores e microcontroladores.

Com o sistema de controle de uma caldeira conseguiu-se apresentar uma metodologia a qual permite aplicar os conhecimentos teóricos multidisciplinares na implementação de um sistema real. Os resultados confirmaram a ligação entre a teoria e prática.

Como mais de uma topologia de conversor pode ser utilizada nesta aplicação, cada topologia pode ser delegada a grupos de alunos. A demonstração dos resultados através de relatório e apresentação oral serve como comparativo de desempenho entre as topologias estudadas, reforçando os conceitos teóricos e a percepção do emprego da eletrônica de potência na indústria.

Do ponto de vista de controle, pôde-se verificar que uma ferramenta funcional permite uma verificação dos modelos teóricos em casos práticos. Ainda, esta ferramenta possibilita que novos algoritmos de controle possam ser adaptados facilmente sem ter que alterar a estrutura física do sistema, reduzindo custo, tempo e aumentando a motivação no aprendizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBI I. **Eletrônica de Potência**, 5^a Edição, Florianópolis, 2005.

COHEN G. H., COON G. A. Theoretical consideration of retarded control, *TRANSACTIONS ASME*, vol. 75, pp 827–834, 1953.

LIPTAK, G. **Instrument Engineers Handbook**. 3.ed. Krause Publications, 1995.

NISE N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**, LTC, 3^a Edição, 2002.

RASHID M. H. **Eletrônica de Potência**, São Paulo: Makron Books, 1999.

TOCCI R. J., WIDMER N. S. **Sistemas Digitais**, Grantz Hall, 8^a Edição.

ZIEGLER J. G., NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers, *TRANSACTIONS ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.

TOOL AND INTERDISCIPLINARY METHODOLOGY FOR TEACHING THROUGH THE TEMPERATURE CONTROL OF A KETTLE

Abstract: *This work presents an equipment and a methodology for teaching of the control theory, instrumentation and power electronics regarding the AC-CC and basic AC-AC converters. The system as a whole consists of controlling the temperature of a mini kettle composed of temperature sensor, heating resistance, actuator and controller. The controller is implemented through the Simulink tool of the Matlab software and a micro-controlled data acquisition board developed for this purpose. As actuator, a specified structure of AC-CC or AC-AC converters is used connected to the heating resistance. The teaching methodology involves the project and the assembly of a converter prototype, study of the necessary instrumentation for the temperature monitoring and the involved control theory. This methodology has been applied in the experimental disciplines of Power Electronics I and Control II in West of Santa Catarina University Campus of Joaçaba - SC.*

Key-words: *AC-AC Converters; AC-CC converters; Control Systems; Data acquisition; Teaching.*