



PLATAFORMA DE REALIDADE MISTA PARA APOIO AO ENSINO DE ENGENHARIA BASEADA EM UM SISTEMA EMBARCADO

Rodolfo Picoreti – rodolfo.picoreti@gmail.com

Peterson da Silva Cezar – petersondasilvacezar@gmail.com

Danilo Marquesini Junior– danilomarquesini@gmail.com

André Ferreira – andrefer@ele.ufes.br

Programa de Educação Tutorial – PET – <http://pet.ele.ufes.br>

Departamento de Engenharia Elétrica - Centro Tecnológico

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras

29075-910 – Vitória – ES

***Resumo:** Laboratórios de engenharia requerem, em geral, um investimento muito elevado devido a vários fatores e esse é um fato comum nas disciplinas que envolvem controle de processos, por exemplo. Por outro lado, estudantes de engenharia necessitam vivenciar as situações práticas que farão parte de seu cotidiano profissional. Nesse sentido, a utilização de laboratórios remotos é cada vez mais frequente devido à facilidade de acesso e desenvolvimento dos computadores atuais. Assim, este artigo apresenta uma plataforma de apoio ao ensino de engenharia baseado em um sistema embarcado e uma aplicação ao ensino de controle automático, envolvendo a modelagem e controle de um forno resistivo.*

***Palavras-chave:** Realidade mista, Apoio ao ensino, Servidor web embarcado.*

1. INTRODUÇÃO

Um fator indispensável na formação de um engenheiro é a capacidade de relacionar as distintas situações práticas com o conhecimento teórico adquirido. É neste contexto em que se inserem as atividades de laboratório, propiciando um *aprendizado ativo*, no qual *o aluno aprende fazendo* (WATSON, 1995; SMITH, 1989) e uma oportunidade de aplicar a teoria em um cenário prático e real (AUER *et al.*, 2003).

No entanto, o custo envolvido com a montagem de laboratórios de um curso de engenharia é elevado, dado a complexidade dos equipamentos, necessidade de instalações adequadas (civil, elétrica, mecânica), manutenção, apoio técnico capacitado, dentre outros.

Por outro lado, a facilidade de acesso à Internet com conexões de alta velocidade, mesmo para usuários domésticos, e a máquinas com maior capacidade computacional, tem contribuído significativamente para a projeção da Internet como canal de apoio ao ensino. De acordo com dados do Censo da Educação Superior de 2010, a educação à distância (EAD), que praticamente inexistia dez anos atrás, já responde pelo percentual de 14,6% do total das matrículas na graduação. Em 2001, apenas 5.359 estudantes



estavam matriculados na modalidade de cursos à distância. Uma década depois, esse número aumentou 170 vezes, chegando a 930.179 estudantes (CENSO, 2010).

O crescimento da Internet e a disponibilidade de laboratórios remotos, através dos quais os usuários podem realizar experimentos à distância, representam uma opção para atender a demanda de que alunos vivenciem situações reais, principalmente aqueles de ciência e engenharia (COOPER, 2000). Esta prática proporciona aos alunos a *segunda melhor alternativa de estar lá* (ATKAN *et al.*, 1996), preparando-os para o efetivo exercício da profissão. Dentre as principais vantagens dessa abordagem, podem ser citadas (ZEILMANN, *et al.*, 2003):

- Permite o acesso a uma plataforma experimental comum, que pode ser acessada por qualquer usuário com acesso à Internet;
- O sistema pode funcionar 7 dias na semana durante 24h/dia;
- Professores podem utilizar esta abordagem para realizar ensaios reais durante aulas teóricas sem a necessidade de deslocar um grande número de alunos para um laboratório ou equipamentos para a sala de aula.

A maioria dos laboratórios remotos disponíveis atualmente baseia-se em soluções computacionais completas, com grande capacidade de cálculo e armazenamento. Alguns exemplos são:

- O OnlineLab (DUAN *et al.*, 2003), desenvolvido pela Universidade Tecnológica de Nyang, Singapura, é um laboratório remoto que possui dois experimentos: pêndulo invertido e sistema de tanques acoplados.
- O NetLab (ZHANG *et al.*, 2004), desenvolvido pela Universidade de Zhejiang, na China, é um laboratório remoto que oferece mais de trinta experimentos remotos divididos em quatro categorias:
 - Eletroeletrônica: Circuitos analógicos e digitais.
 - Eletrônica de potência: Retificadores e inversores.
 - Controle automático: Elementos clássicos de controle, resposta em frequência, sistemas servo motores, pêndulo inverso, ventoinha e disco, controle de motor de passo, tanques acoplados, controle de elevadores.
 - Motores elétricos: Operação de motores elétricos.
- O VLab (ALBU *et al.*, 2004), *Virtual Laboratory*, é um laboratório real de experimentação remota que é acessível via Web pela interface criada no LabVIEW®. O experimento é utilizado em aulas de sistemas de potência, pois envolve um circuito trifásico com três chaves contactoras e diversas cargas elétricas.
- O LAR (OLIVEIRA *et al.*, 2012), Laboratório de Acesso Remoto, é uma plataforma de acesso remoto implementada por alunos do Instituto Federal do Amazonas baseada na comunicação do NI ELVIS® com o Multisim®, através de uma interface gráfica desenvolvida em linguagem LabVIEW®.



O que se apresenta neste artigo é uma adequação da plataforma de prototipação e de código aberto Arduino (ARDUINO, 2013) para a realização de experimentos remotos e testes de simulações, com vistas ao apoio do ensino de engenharia. Uma das principais vantagens deste sistema é o baixo consumo de energia, podendo ser utilizado em regiões remotas como em uma lagoa, por exemplo, para monitorar parâmetros de pH, salinidade e temperatura. Além da adequação da plataforma, a criação de uma nova biblioteca para tratamento dos pacotes do servidor *web* e a implementação de um banco de dados em cartão *Secure Digital* (SD), contribuíram para um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

A plataforma desenvolvida e suas principais características são apresentadas na Seção 2. A Seção 3 expõe uma aplicação desta plataforma em um forno resistivo disponível no Laboratório de Supercondutividade Aplicada (SUPERA), do departamento de Engenharia Elétrica da UFES. Por fim, as conclusões deste trabalho são apresentadas na Seção 4.

2. A PLATAFORMA DESENVOLVIDA

A plataforma é implementada em um sistema embarcado baseado em Arduino, conforme apresentado na Figura 1. Qualquer usuário com acesso à Internet pode conectar-se à plataforma remota, localizada no laboratório onde é realizado o experimento. No núcleo da plataforma há um servidor *web*, responsável por toda a interface com o usuário e gerência de conexão, além de um módulo controlador genérico, capaz de tratar dados provenientes da instrumentação da planta e gerar sinais de controle para serem enviados aos atuadores. Uma interface *Ethernet Shield* conecta o servidor *web* à Internet. Um cartão SD armazena históricos dos experimentos e informações do servidor *web*. Esta é a implementação genérica da plataforma, provendo funções básicas que podem ser especializadas de acordo com o laboratório ou experimento desejado.

Para a realização dos experimentos, o usuário acessa o site do sistema através de seu navegador e, ao fazê-lo, um pacote de dados é enviado ao servidor *web* em execução no sistema embarcado. A análise do pacote é facilitada devido à implementação da pilha *TCP/IP* da placa de extensão *Ethernet Shield*, que disponibiliza o pacote tratado em um *buffer* com limitação de 2Kb. A extração dos dados desse *buffer* é feita através da biblioteca *ethernet* nativa do Arduino.

Na etapa de interpretação do pacote, optou-se pela criação de uma nova biblioteca para o tratamento das funções do servidor *web* para um melhor aproveitamento da memória disponível no microcontrolador. Assim, a cada pacote recebido, os seguintes parâmetros são analisados:

- Método: responsável por indicar a ação a ser executada no servidor. Dentre os mais comumente usados pode-se citar os métodos *get* e *post*. Esses métodos diferem entre si principalmente pela restrição no tamanho dos dados e na forma como são enviados para o servidor.
- URL (*Uniform Resource Locator*): representa o endereço acessado pelo usuário.

- Autorização: contém a informação do nome de usuário e senha, quando solicitado pelo servidor. Esse parâmetro foi utilizado para proteger a parte administrativa do servidor *web*.

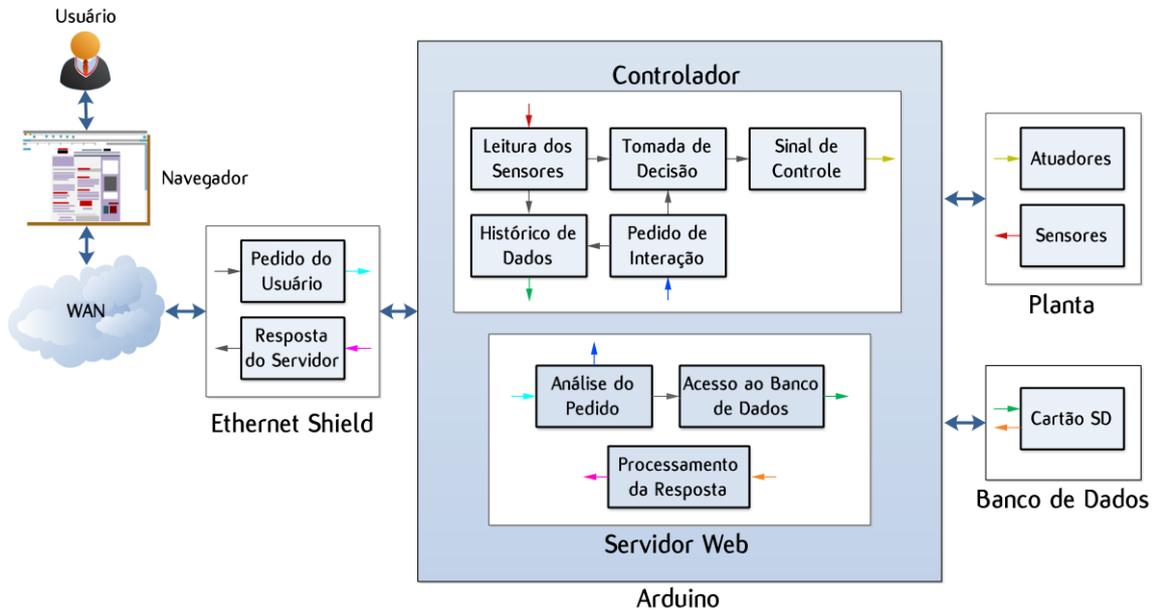


Figura 1 - A plataforma genérica para apoio ao ensino de engenharia.

Ao finalizar a interpretação do pacote, o servidor interage com o banco de dados, a fim de que a ação requerida e a resposta ao cliente sejam executadas.

O banco de dados do sistema foi desenvolvido utilizando um cartão SD, reduzindo significativamente o uso da memória ROM do microcontrolador, uma vez que este não mais necessita armazenar o código das páginas do servidor. Adicionalmente, todo o histórico do experimento é armazenado no mesmo cartão.

Para acessar a plataforma, o usuário deve fazer um agendamento prévio para realização dos experimentos que segue a regra *first-come, first-served*, em que os primeiros usuários têm maior opção de escolha de horário (DUAN *et al.*, 2003).

Para acesso ao painel de administração, devem ser informados na aba de autenticação, parâmetros de nome de usuário e senha, conforme apresentado na Figura 2. Esses dados são codificados com Base64 e enviados para o servidor sempre que uma requisição é feita. Para o acesso do usuário ao painel de controle da planta no horário agendado é necessária a utilização de um código único gerado no ato do cadastro. Tais cuidados com a segurança são necessários, visto que a plataforma experimental é compartilhada por vários usuários. Adicionalmente, limites físicos como chaves fim de curso, faixa de ganhos do sistema de controle, limites de velocidades de juntas, espaço de trabalho do equipamento, dentre outros, devem ser bem estabelecidos, pois o usuário terá acesso total ao experimento.

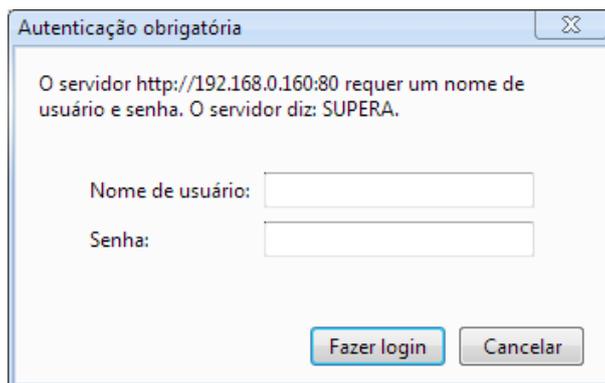


Figura 2 - Aba de autenticação obrigatória enviada ao usuário ao tentar acessar o painel de administração.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: USO DA PLATAFORMA EM UM FORNO PARA FABRICAÇÃO DE CERÂMICAS SUPERCONDUTORAS

Para validação da plataforma de apoio ao ensino desenvolvida, o sistema foi adequado para ser aplicado no monitoramento e atuação de um forno resistivo localizado no Laboratório de Supercondutividade Aplicada (SUPERA), vinculado ao departamento de Engenharia Elétrica da UFES. Assim, um usuário cadastrado no sistema pode realizar ensaios neste forno a partir de qualquer lugar que tenha acesso à Internet, mesmo de um *smartphone*.

O laboratório SUPERA em parceria com o laboratório de Altas Pressões (PRESLAB) do departamento de física da UFES fabrica, desde 2003, diversas cerâmicas supercondutoras de alta temperatura crítica. Todas as cerâmicas utilizam o processo de sinterização para a obtenção dos supercondutores. Sendo assim, vários tratamentos térmicos são necessários na obtenção de cada uma delas. O controle e a variação manual das diversas temperaturas utilizadas em cada um dos tratamentos térmicos é um trabalho que demanda bastante tempo e atenção. O monitoramento permite o acompanhamento preciso da escalada térmica do material durante o tratamento, aumentando a confiabilidade do processo.

A Figura 3 apresenta a especialização da plataforma para o processo térmico em questão. Nesta planta, aqui representada por um forno, termopares informam valores de temperatura e um atuador elétrico transmite a potência para o seu interior.

No bloco de controle é utilizado um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), amplamente aplicado em sistemas de controle industrial. Este controlador calcula um valor de erro como a diferença entre a variável do processo medida e um ponto de ajuste desejado (*setpoint*) e tenta minimizar este erro. Tal realização é feita com base em uma biblioteca PID com boa documentação e sólida implementação do algoritmo (BEAUREGARD, 2011).

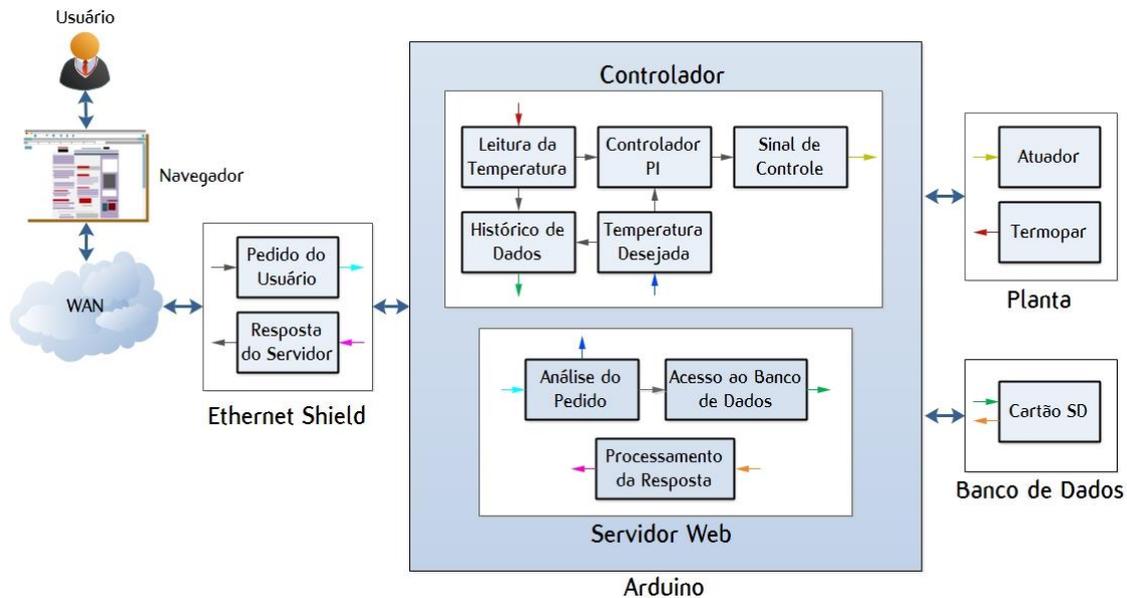


Figura 3 – Diagrama da plataforma aplicada no monitoramento e atuação de um forno resistivo.

Para o controle da potência entregue ao forno, foi desenvolvido um atuador a partir da utilização de um circuito de acionamento constituído por um TRIAC e opto acopladores. A Figura 4 mostra a tensão na carga para diferentes tempos de acionamento do TRIAC em relação ao sinal de detecção de zero da tensão da rede, resultando em diferentes valores de potência na carga.

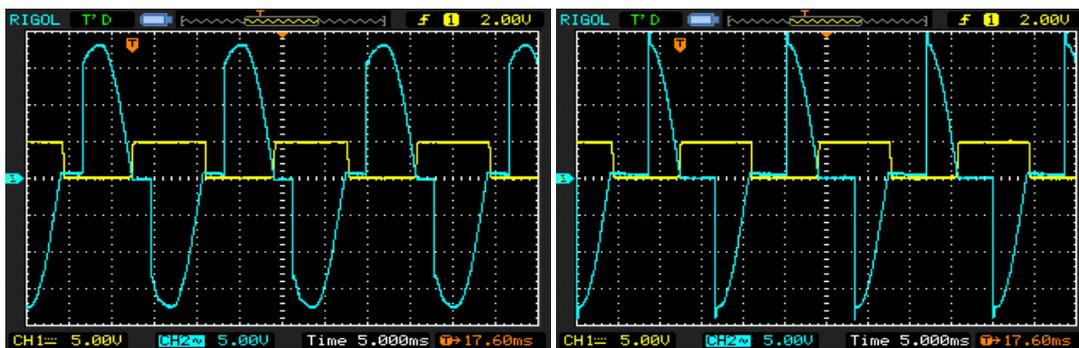


Figura 4 – Tensão na carga (azul) para distintos sinais de acionamento e o sinal de detecção de zero da tensão da rede (amarelo).

No monitoramento da temperatura do forno foi utilizado um termopar tipo k, com um circuito de condicionamento baseado em um amplificador de instrumentação INA118, que amplifica o sinal proveniente do sensor e filtra possíveis ruídos. O sinal amplificado é encaminhado a um dos conversores analógico-digital do Arduino para que a temperatura possa ser determinada. Um histórico dessa temperatura é armazenado no banco de dados.

3.1. Interface do Usuário

Para obter acesso ao painel de controle e ao laboratório remoto é necessário que o usuário se cadastre no site do PET Elétrica UFES. No momento do cadastro, o usuário escolhe um horário no qual o forno será disponibilizado para realização do seu experimento. O servidor retorna um código único que será utilizado para ter acesso à interface de controle da planta.

No painel de controle, apresentado na Figura 5, o usuário pode monitorar a evolução do perfil de temperatura do forno e a potência instantânea aplicada, ajustar valores de referências (*setpoint*) e ajustar ganhos do controlador PID, dentre outros.

Ainda no painel de controle, o usuário pode optar por realizar a identificação da planta para obtenção do seu modelo, e ensaiar o controlador projetado com base neste levantamento. Caso o usuário deseje somente projetar um controlador, um modelo do forno é disponibilizado no site do PET Elétrica UFES.

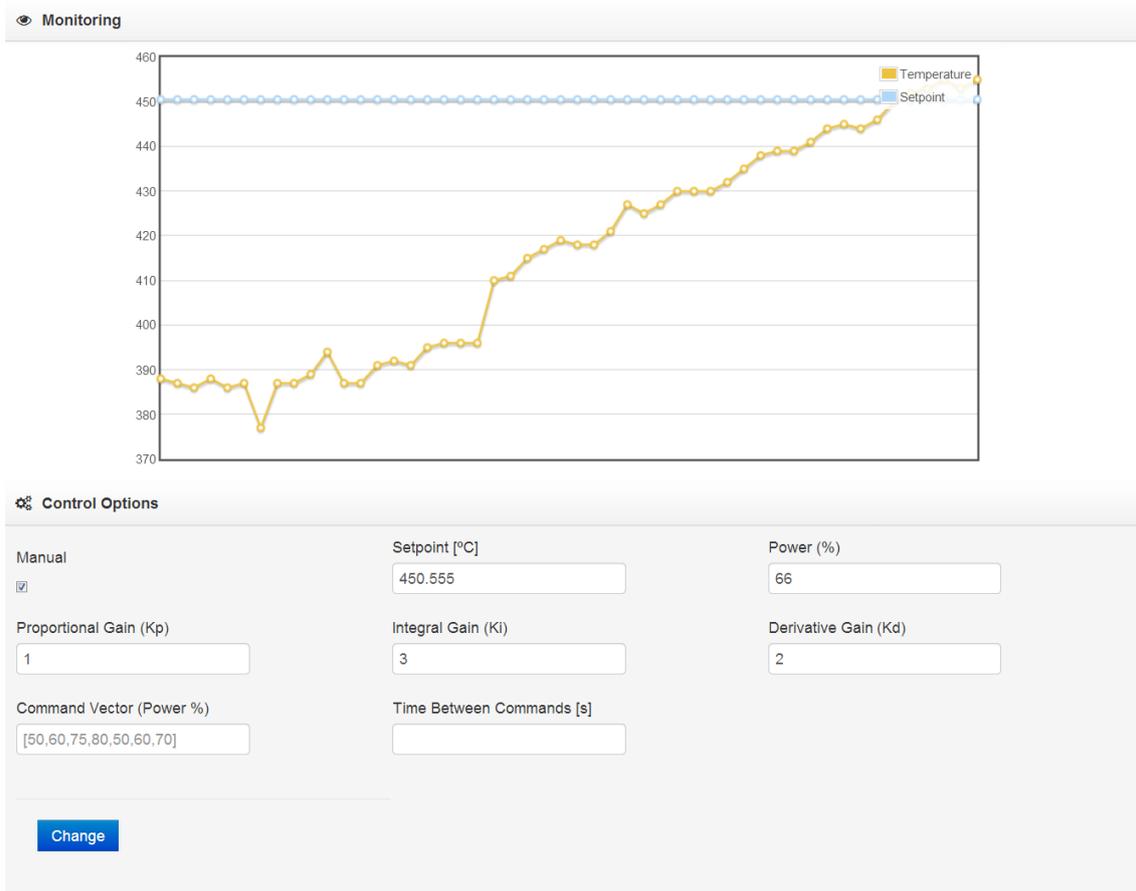
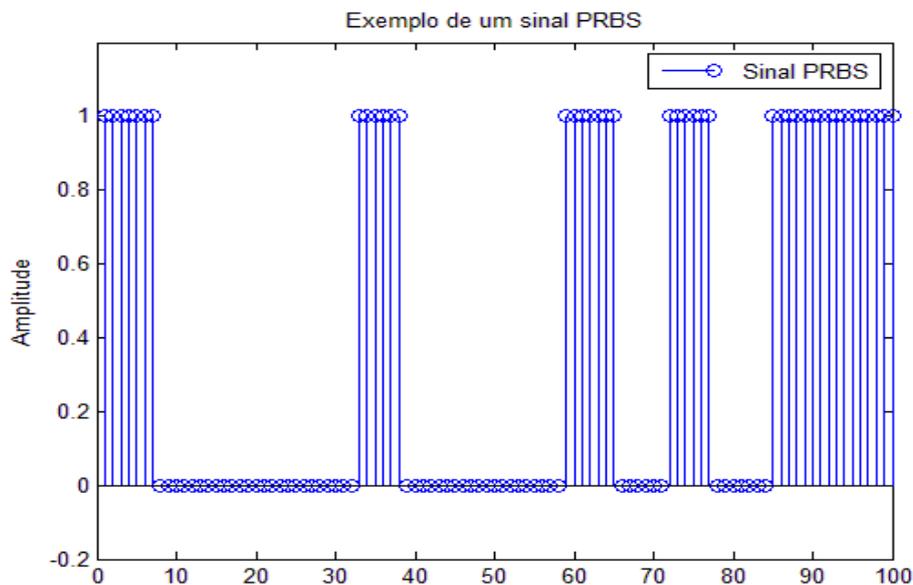


Figura 5– Painel de controle

3.2. Identificação da Planta

Para a identificação da planta é disponibilizado ao usuário o campo *command vector*, onde deve ser inserido um vetor de potências percentuais a serem enviadas ao forno em intervalos de tempo definidos pelo campo *time between commands*. Uma possível estratégia para a determinação do modelo do forno é o uso da técnica em que se aplica um sinal binário pseudo-aleatório (PRBS, do inglês *Pseudo Random Binary Sequence*) na entrada da planta. Este sinal é determinístico, mas com certas propriedades próximas às de sinais aleatórios. O sinal é periódico, mas se o período for suficientemente longo, a função de autocorrelação aproxima-se à de um sinal aleatório (AGUIRRE, 2007), e possui largura de pulso variável, que pode ser composta por vários pulsos.

A Figura 6 apresenta um típico sinal PRBS e um exemplo de vetor inserido através do painel de controle. O vetor é composto por valores 50 e 30, o que estabelece uma potência aplicada ao forno de no máximo 50% do valor total e de no mínimo 30%. Esta faixa foi escolhida, pois representa a região de trabalho na qual os usuários do SUPERA tem interesse.



PRBS=[50,50,....,50,30,30,....,30 ,50,50,50,30,30,....,30,50,....,50,30,....,30,50,50,....,50]

Figura 6 – Exemplo de um sinal PRBS e vetor de entrada inserido no painel de controle.

Ao final do experimento o usuário recebe um arquivo contendo as informações sobre o sinal de entrada aplicado, o perfil de temperatura do forno e o tempo ao longo do experimento. A Figura 7 foi construída a partir destes dados.

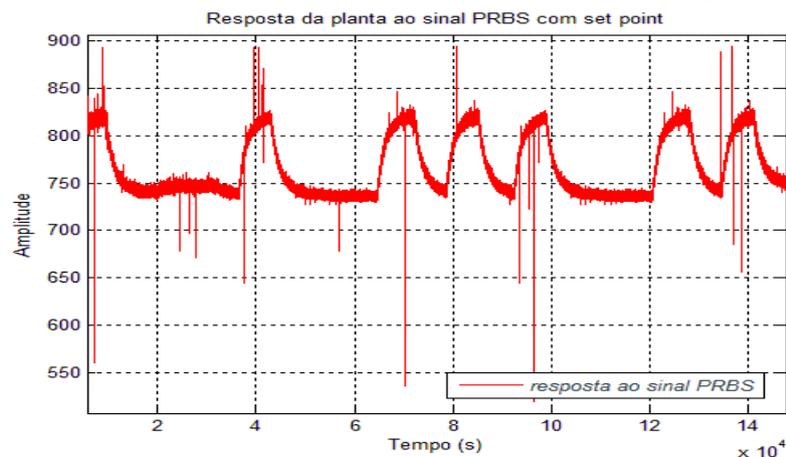


Figura 7 - Resposta do forno ao sinal PRBS.

O *toolbox* Ident® do *software* Matlab® constrói modelos matemáticos de sistemas dinâmicos a partir dos dados de entrada e saída, através de técnicas estatísticas. Esse *toolbox* foi utilizado para o levantamento do modelo do forno. Na Figura 8 é apresentado em preto uma amostra dos dados coletados que é utilizada para validação do modelo e, em azul, o gráfico estimado da resposta do modelo gerado pelo Ident®. Na parte direita da figura é apresentado o grau de confiabilidade da resposta em percentagem.

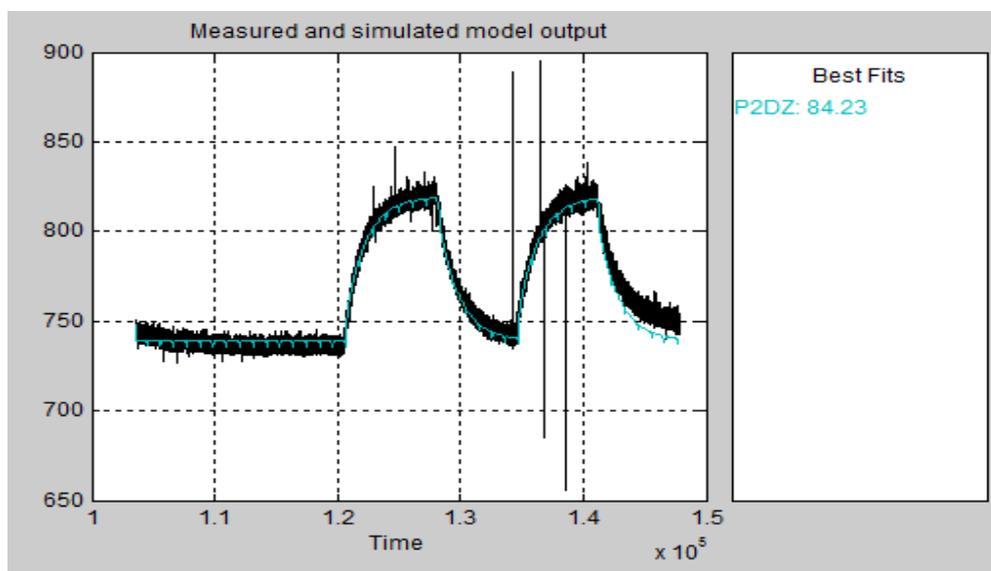


Figura 8 - Resposta do forno ao modelo estimado (azul) comparada com a resposta real (preto).

A função de transferência gerada pelo Ident®, a partir da resposta referente à Figura 8 é apresentada na Equação 1 e os valores dos parâmetros estão na Tabela 1.

$$G(s) = K_P \frac{1+T_Z s}{(1+T_{P1} s)(1+T_{P2} s)} e^{-T_D s} \quad (1)$$

Tabela 1 - Valores dos parâmetros da função de transferência.

K_P	T_{P1}	T_{P2}	T_D	T_Z
1,0051	1658,3	39,114	3,2048e-9	302,1

3.3. Avaliação do Controlador

De posse do modelo do forno, é possível realizar inúmeras simulações com os diferentes tipos de controladores P, PI, PD e PID. Para a determinação dos parâmetros desses diferentes tipos de controladores podem ser utilizados *softwares* como o Matlab® e o Simulink®. Para a comparação entre a resposta real e a obtida por simulação o usuário poderá inserir os parâmetros K_P , K_I e K_D em seus respectivos campos no painel de controle.

4. CONCLUSÃO

A plataforma desenvolvida permitiu que usuários realizassem experimentos completos em um forno resistivo remoto através da Internet. Foi possível monitorar a evolução da temperatura em resposta a uma entrada PRBS, obter modelos do processo térmico e projetar um controlador PID. A plataforma permite ainda que os parâmetros deste controlador sejam inseridos no sistema para realização de novos experimentos.

Baseada em um sistema embarcado, a plataforma apresenta baixo custo e consumo muito reduzido de energia quando comparada a outras implementações, mas possui recursos computacionais suficientes para grande parte das aplicações de engenharia.

O *software* da plataforma foi desenvolvido de modo a ser genérico, permitindo que alterações na interface, planta, atuadores, sensores e controlador possam ser realizadas de forma simples.

Embora tenha sido aplicada ao controle de um processo térmico, a plataforma pode ser facilmente adaptada a uma variedade de situações de engenharia, e até de outros cursos. Tal ferramenta provê um canal alternativo para realização de experimentos de alto nível para educadores e alunos. O uso simultâneo da plataforma por vários usuários está entre os aprimoramentos futuros.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais Ed. UFMG, 2007 – 3. ed., p. 219.

ALBU, M. M. et al. Embedding Remote Experimentation in Power Engineering Education. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 19, p. 139-143, Fev. 2004.

ARDUINO. **Arduino**. Disponível em <<http://arduino.cc>>. Acesso em 17 jun. 2013.

ATKAN, B.; BOHUS, C. A.; CROWL, L. A.; SHOR, M. H. Distance Learning Applied to Control Engineering Laboratories. IEEE Transactions on Education, New York, v. 39, p.320 – 326, Aug. 1996.

AUER, M.; PESTER, A.; URSUTIU, D.; SAMOILA, C. Distributed Virtual and Remote Labs in Engineering. Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Maribor, 2003.

BEAUREGARD, B. **Arduino PID Library – Version 1.1.0**. Disponível em: <<https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/>> Acesso em: 12 jun. 2013.

COOPER, M. The Challenge of Practical Work in a eUniversity - real, virtual and remote experiments. In: Information Society Technologies (IST), 2000, Nice, France. Proceedings., 2000.

DUAN, B.; LING, K. V.; HOSSEINI, H. Developing a Framework for Online Laboratory Learning Objects. In: IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Sentosa, Singapura. Proceedings. New York: IEEE, 2003, v. 3, p. 467 – 157.

INEP. **Censo de Educação Superior 2010**. Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/>> Acesso em: 17 jun. 2013.

OLIVEIRA, J.M.C.; JÚNIOR, S.S.M.; CALAZANS, J.R.B.; DA SILVA, J.B.; RODRIGUES, W.M.R.; SAMPAIO, R.B.. Desenvolvimento da plataforma do laboratório de acesso remoto e instrumentação virtual via web. Anais: XL – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Belém: UFPA, 2012.

SMITH, K.A. The Craft of Teaching Cooperative Learning: an active learning strategy. Proceedings of IEEE Frontiers in Education Conference. Binghamton, 1989.

WATSON, K. Utilization of Active and Cooperative Learning in EE courses: three classes and the results. Proceedings of IEEE Frontiers in Education Conference. Atlanta, 1995.

ZEILMANN, R. P.; SILVA, J. M. G.; BAZANELLA, A. S.; PEREIRA, C. E. Web-based Control Experiment on a Foundation Fieldbus Pilot Plant. In: IFAC International



Conference on Fieldbus Systems and Their Applications, 2003, Aveiro, Portugal. Proceedings. IFAC, 2003. p. 325 – 330.

ZHANG, S. et al. NETLAB – an internet based laboratory for electrical engineering education. Journal of Zheijang University, 2004.

MIXED REALITY PLATFORM TO SUPPORT THE EDUCATION OF ENGINEERING BASED ON AN EMBEDDED SYSTEM

***Abstract:** Engineering laboratories generally require a very high investment due to several factors and this is a common fact in disciplines involving process control, for example. On the other hand, engineering students needs to experience the practical situations that will be part of their daily work. In this sense, the use of remote labs is increasingly common due to the ease of access and development of today's computers. Thus, this paper presents a platform to support the teaching of engineering based on an embedded system and an application to teaching automatic control involving the modeling and control of a resistive furnace.*

***Key-words:** Mixed reality, Education support, Embedded web server.*