

# UTILIZAÇÃO DA ESPECTROSCOPIA ÓPTICA DE EMISSÃO PARA MONITORAÇÃO E CONTROLE DA TEMPERATURA DA SOLDAGEM GTAW<sup>1</sup>

Diogo de Souza Mendonça<sup>2</sup>

Sadek Crisóstomo Absi Alfaro<sup>3</sup>

Geovany Araújo Borges<sup>4</sup>

## Resumo

Este artigo apresenta uma nova técnica de monitoração e controle da qualidade da soldagem em tempo real utilizando a emissão eletromagnética da coluna de plasma no arco de soldagem GTAW, medida por meio de espectrometria óptica de emissão. A monitoração é realizada pelo cálculo da temperatura média dos elétrons do Argônio presente na coluna do arco de solda. O método empregado para obter o valor da temperatura eletrônica foi o da razão das intensidades relativas, advinda das Leis de Boltzmann, Saha e da definição de intensidade de linhas de emissão. Admitindo que a temperatura média dos elétrons do Argônio na coluna de plasma seja proporcional ao aporte térmico empregado, atua-se na corrente de soldagem de forma que a temperatura eletrônica permaneça estável. Com um controlador digital, mantém-se a temperatura eletrônica em torno de um determinado valor de referência, de forma que o efeito de possíveis perturbações externas seja compensado, possibilitando uma solda de melhor qualidade, com propriedades mecânicas constantes ao longo da peça soldada.

**Palavras-chave:** Espectrometria; Soldagem; Plasma; Controle de soldagem.

## REAL TIME CONTROL AND MONITORING SYSTEM OF GTAW WELDING WITH USE OF OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY METHOD FOR ELECTRONIC TEMPERATURE SENSING

## Abstract

This paper presents a new technique for monitoring and control of welding quality in real time by electromagnetic emission analysis from plasma column of arc welding GTAW using emission spectroscopy. The monitoring is made by estimating the mean temperature of electrons of Argon present on plasma column. The electron temperature is estimated using the intensity ratio of a couple of emission lines, obtained by combination of Saha, Boltzmann and emission intensity equations. Considering that the mean temperature of electrons of Argon in plasma column is proportional to heat input, act in welding current to maintain the electronic temperature constant, with a digital control. The effect of external disturbances is compensated by the controller, offering a better weld quality, with mechanical properties constant in the welded surface.

**Key words:** Spectroscopy; Welding; Plasma; Welding control.

## I INTRODUÇÃO

A indústria lida permanentemente com o desafio de reduzir o custo da produção e ao mesmo tempo promover a melhoria constante na qualidade de seus produtos. A soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizados e mais propício a erros, uma vez que é um processo complexo, devido ao grande número

de variáveis que a caracterizam e por sua sensibilidade a fatores externos.

Os sensores de soldagem atualmente desenvolvidos visam atender à condição de não interferência, na qual se destacam aplicações de técnicas de visão computacional, medições com lasers, ultra-som e espectroscopia óptica

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro - RJ

<sup>2</sup> Eng. GRACO (Grupo de Automação e Controle), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília (Diogo@ps5.com.br)

<sup>3</sup> Ph.D. GRACO (Grupo de Automação e Controle), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília (sadek@unb.br)

<sup>4</sup> D.Sc., LCVC (Laboratório de Controle e Visão por Computador), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília (gaborges@unb.br)

de emissão.<sup>(1)</sup> Dentre os dispositivos “não-interferentes”, o estudo da emissão eletromagnética por meio da espectroscopia óptica vem ganhando impulso com a redução nos custos dos equipamentos de espectroscopia e desponta como uma ótima alternativa no sensoriamento para análise e controle em tempo real de processos de soldagem, uma vez que a espectroscopia atômica de emissão pode ser utilizada para o cálculo da temperatura eletrônica de determinados elementos que estão sendo ionizados na coluna de plasma.<sup>(1)</sup>

Com o intuito de obter um arco de solda que forneça um aporte térmico constante a um corpo de prova, foi desenvolvido um sistema de controle da temperatura dos elétrons no segundo nível de ionização do argônio (ArII), cujo sensoriamento é baseado na espectrometria óptica de emissão. Com isso, atua-se na corrente de soldagem GTAW de forma que a temperatura eletrônica do ArII siga um determinado valor de referência. Tal sistema de controle pode ser descrito pelo diagrama de blocos representado na Figura 1.

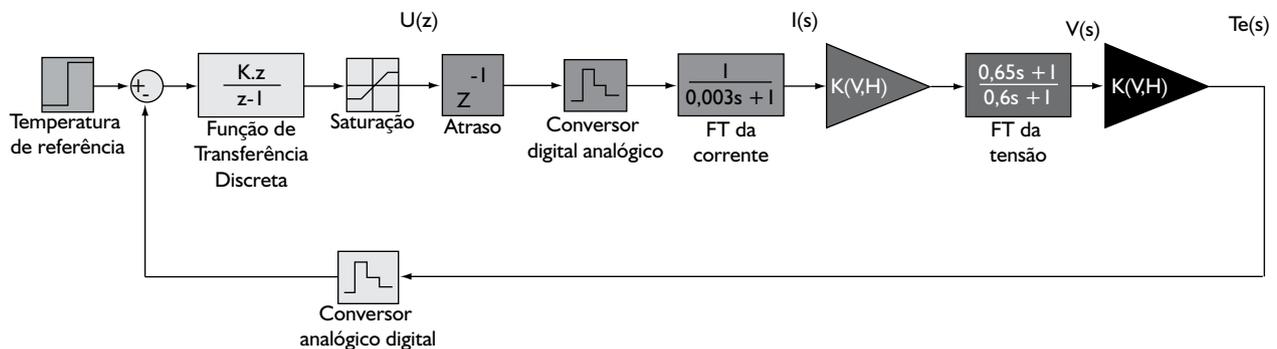


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura eletrônica do ArII.

### 1.1 Espectrometria de Emissão

A espectrometria é um conjunto de técnicas experimentais, relacionadas à absorção, emissão ou espalhamento da radiação eletromagnética de átomos ou moléculas. Por se tratar de técnicas analíticas, fornecem uma série de dados relevantes para a análise dos processos de soldagem.<sup>(2)</sup>

Inicialmente a espectrometria de emissão é empregada na identificação dos comprimentos de onda, a partir dos quais se obtêm os parâmetros termodinâmicos e quânticos para o cálculo das propriedades de interesse. Observa-se, na Figura 2, o espectro utilizado para se obter os comprimentos de ondas necessários para o cálculo da temperatura eletrônica do ArII. No caso da soldagem, a análise qualitativa (identi-

ficação dos elementos) permite determinar a composição e/ou detectar possíveis contaminações da solda,<sup>(3)</sup> selecionar e qualificar métodos de proteção gasosa<sup>(4)</sup> e estudar o grau de dissolução de solda com metais dissimilares.<sup>(5)</sup> A análise quantitativa é a medição da intensidade de cada um dos comprimentos de onda emitidos pela radiação eletromagnética do plasma, permitindo o diagnóstico das principais propriedades do plasma, sua temperatura e densidade.<sup>(5)</sup>

### 1.2 Cálculo da Temperatura do Plasma

A temperatura do plasma é calculada através da temperatura dos elétrons (energia cinética dos elétrons), admitindo a hipótese de equilíbrio termodinâmico local (LTE, sigla em inglês). Isto significa que, as partículas têm distribuição energética dada pela equação de Maxwell e que os processos de colisão são dominantes sobre os radiativos. Ou seja, as temperaturas dos elétrons e das partículas pesadas são similares.<sup>(6)</sup>

A temperatura dos elétrons é estimada pelo uso da razão de intensidades relativas de um par de linhas de emissão (subíndices 1 e 2 na Equação 1) do mesmo elemento químico, como proposto por Marotta,<sup>(7)</sup> que leva em conta a diferente distribuição de densidade ao longo da coluna de soldagem.

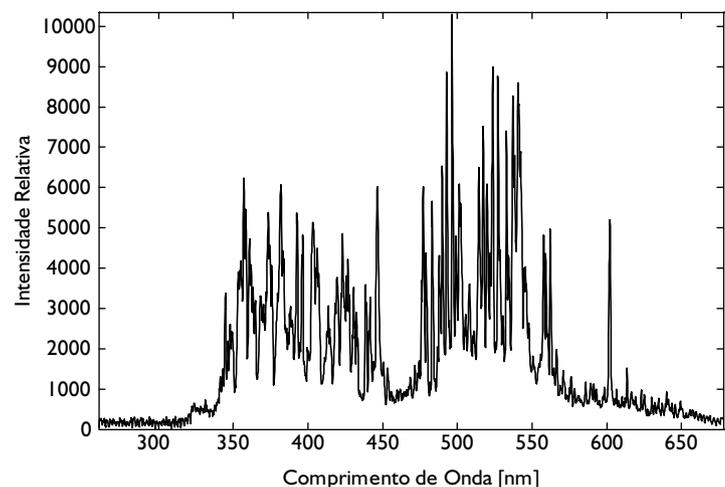


Figura 2. Espectro emitido por solda GTAW sobre uma placa de cobre resfriada a água.

$$T_e \approx \frac{E_{m_2} - E_{m_1}}{k \ln \left[ \frac{E_{m_1} g_{m_2} I_1 A_{m_2} \lambda_1}{E_{m_2} g_{m_1} I_2 A_{m_1} \lambda_2} \right]} \quad (1)$$

Na equação acima,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $8,6173 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$ ),  $I$  corresponde as intensidades relativas obtidas pelo sistema de medição para cada comprimento de onda  $\lambda$  (em nm). A energia no nível superior em eV,  $E_m$ , a probabilidade de transição (em  $\text{s}^{-1}$ ),  $A_{mn}$ , e o peso estatísticos,  $g_m$ , são tabelados para um conjunto de linhas de emissão. Estes valores podem ser obtidos pelo banco de dados do NIST.<sup>(8)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho tem como objetivo inicial a análise e controle do arco de solda GTAW aberto em uma base de cobre resfriada a água, de forma que não haja fusão do material de base. Com isso, adquire-se o espectro característico do argônio, uma vez que é o gás de proteção da soldagem GTAW.

Para capturar a emissão eletromagnética do arco, acoplou-se um suporte a tocha contendo uma lente colimadora com distância focal de 11 mm, conectada por uma fibra óptica de 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro no núcleo com conector SM905 a um espectrômetro CCD policromático (SM240-USB da Spectral Products). O espectrômetro CCD tem resolução de 0,3 nm a 400 nm no intervalo de 258 nm a 677 nm, grade de difração de 1200 g/mm e obturador de 10  $\mu\text{s}$ .

O arco de solda foi obtido pela fonte BDH 320 da MIGATRONIC, a qual é controlada por um computador remoto através de uma comunicação serial do tipo RS 232. No caso da soldagem GTAW, a variável de controle é a corrente. Logo, envia-se um sinal de controle, cujo valor corresponde a corrente desejada e obtém-se uma resposta da fonte contendo a corrente e a tensão de soldagem.

A tocha de soldagem GTAW é fixada a um robô IRB 2000 da ABB, que permite posicioná-la a diferentes comprimentos de arco com precisão, permitindo assim uma maior confiabilidade dos dados adquiridos. O arranjo sistemático pode ser observado na Figura 3.

Para todos os experimentos a vazão é de 12 L/min do gás de proteção (Ar), corrente contínua e um eletrodo de tungstênio de 1,6 mm de diâmetro afiado a 60° e com 2% de tório. O comprimento do arco varia de 3 mm a 7 mm e a corrente de soldagem teve seus limites inferior e superior em 100 A e 300 A, respectivamente. Para o cálculo da temperatura eletrônica do ArII, foram utilizados os comprimentos de onda apresentados na Tabela I, onde estão presentes, também, as respectivas constantes.

**Tabela I.** Comprimentos de onda e respectivas constantes para cálculo da temperatura eletrônica.

Elemento	$\lambda$ (nm)	$E_m$ (eV)	$A_{mn}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$g_m$
ArII	349,1536	22,7728	$2,31 \times 10^8$	8
ArII	460,9567	21,1430	$7,89 \times 10^7$	8

Todo o procedimento de aquisição do espectro, cálculo da temperatura eletrônica, controle da fonte de soldagem e aquisição de corrente e tensão da soldagem é realizado por um programa, escrito em linguagem C, com tarefa de controle em tempo real executada a cada 32 ms (31,25 Hz).

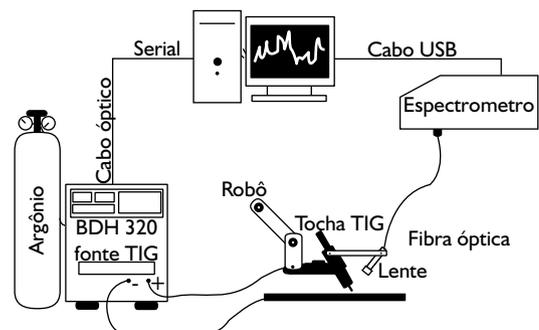
O controle da temperatura eletrônica é realizado por um controlador digital que analisa o sinal de erro entre a temperatura desejada e a temperatura adquirida pelo espectrômetro e envia um sinal de controle para fonte de soldagem, correspondente ao valor da corrente de soldagem desejada. Esse controlador é descrito pela função transferência no domínio  $Z$ <sup>(9)</sup> dada na Equação 2, onde  $KI$  é o ganho do integrador.

$$K_I \frac{z}{z-1} \quad (2)$$

Os parâmetros de soldagem adquiridos pela fonte e a temperatura eletrônica são armazenados e, posteriormente, geram-se os gráficos para a análise do controlador. Foram realizados diversos experimentos para o ajuste do ganho do integrador. Depois de realizado o ajuste ótimo do ganho, realizou-se experimentos com e sem perturbações, para verificar a eficácia do controlador.

## 3 RESULTADOS

Após ajustar o ganho do integrador,  $KI$ , para 0,015, realizou-se um experimento com o arco sem perturbações, com o comprimento do arco de 5 mm e a temperatura eletrônica do ArII a 13.000 K, podendo ser observado seu comportamento na Figura 4. Observa-se que a temperatura eletrônica do ArII, permanece estável, em torno



**Figura 3.** Arranjo esquemático.

do seu valor de referência, porém, a corrente de soldagem comporta-se de forma que a tensão permaneça constante, mostrando a relevância da tensão sobre o comportamento da temperatura eletrônica do ArII.

Em seguida, a temperatura eletrônica da ArII foi controlada a 12.500 K (Figura 5), porém com a incitação de uma perturbação. Esta perturbação se deu variando o comprimento do arco de 7 mm para 5 mm durante o processo de soldagem. Observa-se que uma pequena diferença na temperatura eletrônica do ArII, gera um sinal de erro que é corrigido pelo controlador, gerando um sinal de controle que atua sobre a corrente de soldagem, fazendo que a temperatura siga em torno do valor de referência.

#### 4 DISCUSSÃO

Para elaboração e projeto do controlador, foi necessário o levantamento do comportamento da temperatura eletrônica do ArII em relação aos valores de tensão, corrente e comprimento de arco. Verificou-se que a tensão e o comprimento de arco influenciavam de forma mais significativa que a corrente de soldagem. Logo a temperatura eletrônica é dada em função da tensão e do comprimento do arco.

A tensão varia de acordo com a corrente e o comprimento do arco, tendo uma resposta em regime permanente semelhante à mostrada na Figura 6a, que foi levantada experimentalmente. Analisando o gráfico da Figura 6a, observa-se que a tensão tem uma resposta em regime estacionário não linear, pois o comportamento da tensão quando a corrente é menor e maior que 100 A são diferentes.

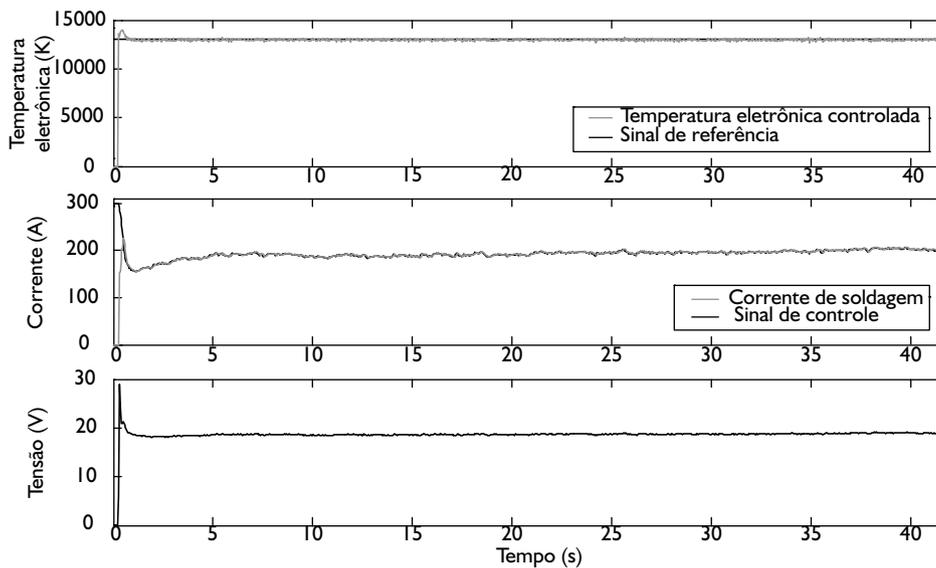


Figura 4. Controle da temperatura eletrônica do ArII a 13.000 K sem perturbações.

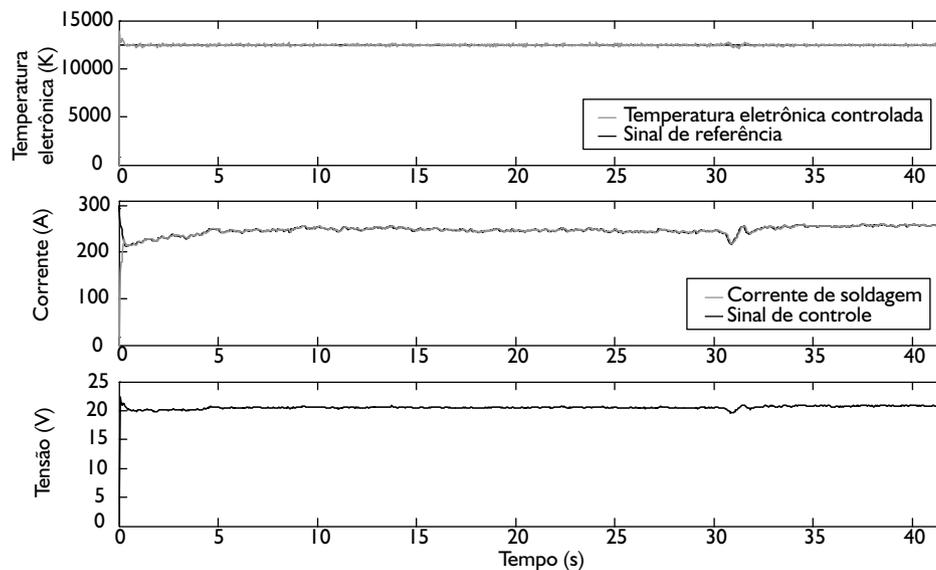
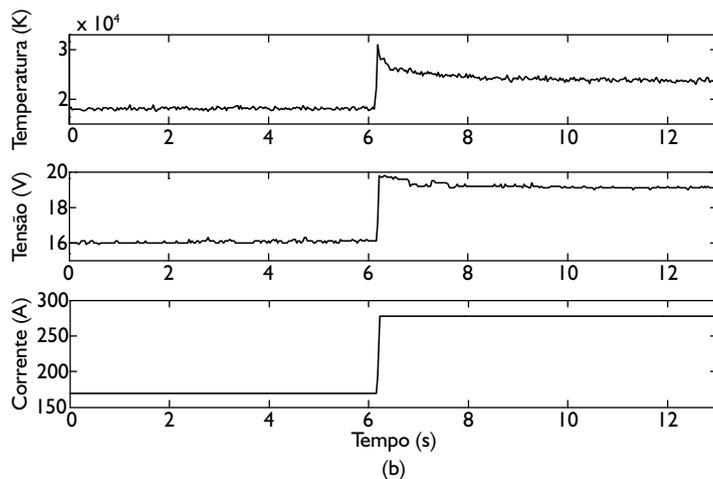
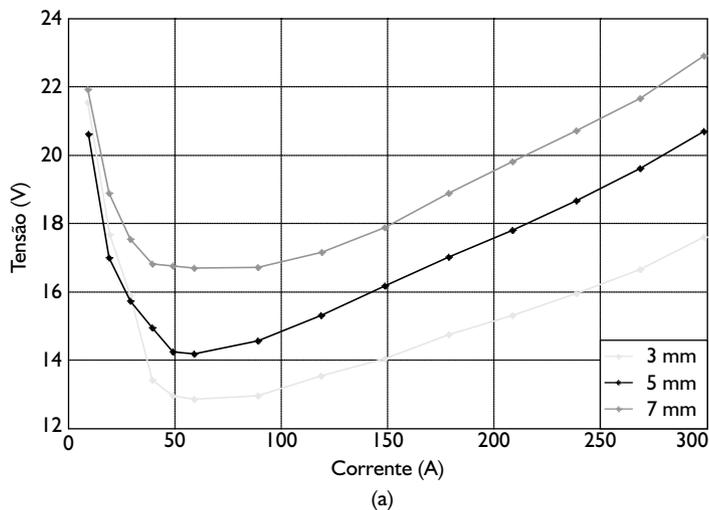


Figura 5. Controle da temperatura eletrônica do ArII a 12.500 K com perturbação durante o processo.



**Figura 6.** a) Resposta em regime permanente da tensão pela corrente. b) Dinâmica da temperatura e da tensão para a resposta ao degrau de corrente.

A dinâmica da tensão tem um comportamento indutivo, conforme pode ser verificado na Figura 6b, na qual o ganho de tensão é diretamente proporcional a variação da corrente. A função transferência, em domínio de Laplace,<sup>(9)</sup> é semelhante a mostrada na Equação 3.

$$H(s) = K_v(I, H) \frac{0,65s + 1}{0,6s + 1} \quad (3)$$

O ganho  $K_v$  da função transferência  $H(s)$  varia de acordo com a corrente  $I$  e o comprimento de arco  $H$ , fazendo com que o sistema seja não linear. Entretanto, essa não linearidade não interfere na posição dos pólos e zeros do sistema, fazendo que seja desnecessária à compensação dessa não linearidade pelo controlador. Logo, limita-se, inferiormente, o controlador a 100 A, trabalhando apenas na região linear, e superiormente a 300 A, pois o limite máximo da fonte é de 320 A. O controlador foi projetado levando em consideração diversos valores de  $K_v$ , na qual

para todos os casos o sistema devia apresentar comportamento estável.

Com o ganho do integrador,  $K_I$ , igual a 0,015, obteve-se um controlador que mantém a temperatura eletrônica num mesmo valor de referência, compensando de forma rápida as perturbações inerentes aos processos de soldagem. Na Figura 5, pode ser observado, com a diminuição do comprimento de arco, que a temperatura eletrônica do ArII caiu consideravelmente, fazendo com que o controlador compensasse esse erro de temperatura aumentando a corrente de soldagem, corrigindo, assim, sua temperatura eletrônica.

## 5 CONCLUSÃO

Foi proposto um sistema de sensoramento e controle da temperatura eletrônica do ArII (utilizando espectrometria óptica de emissão) no arco de solda GTAW, que, por sua vez, está correlacionado com o aporte térmico empregado na peça soldada. Levantou-se o comportamento dessa temperatura em relação aos parâmetros de soldagem (corrente, tensão e comprimento de arco), para a elaboração do controlador digital, que envia para fonte de soldagem o valor de corrente necessário para que essa temperatura siga um determinado valor de referência.

O sistema tem como principais características:

- ser bastante compacto, pesando menos que 350 g todo o aparato de focalização e o espectrômetro, e ocupando um volume bastante reduzido;
- ser um sistema não intrusivo;
- possibilita migração para controle de temperatura eletrônica de diversos outros elementos, quando conhecida à composição do arco. Possibilitando a utilização em outros processos de soldagem, como o GMAW; e
- uma taxa de amostragem de 31,25 Hz em tempo real, permitindo a realização do controle de forma bem adequada.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro fornecido pela Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) e o Grupo de Automação e Controle (GRACO).

## REFERÊNCIAS

- 1 DEGOUT, D.; CATHERINOT, A. Spectroscopic analysis of the shapes created by double-flux tungsten inert gás (TIG) arc shapes torch. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 19, n.6, p. 811-823, May 1986.
- 2 HOLLAS, J.M. **Modern spectroscopy**. New York: John Wiley, 1996.
- 3 ONSOIEN, M.; PETERS, R.; OLSON, D.L.; LIU, S. Effect of hydrogen in argon GTAW shielding gas: arc characteristics and bead morphology. **Welding Journal**, v.74, n.1, p. 10S-15S, Oct. 1994.
- 4 TUSEK, J.; SUBAN, M., Experimental research of the effect of hydrogen in argon the shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 25, n. 4, p. 369-376, Apr. 2000.
- 5 LACROIX, D.; BOUDOT, C.; JEANDEL, G. Spectroscopic studies of GTA welding plasmas. temperature calculation and dilution measurement. **The European**
- 6 GRIEM, H.R., **Plasma spectroscopy**. New York: McGraw-Hill, 1964.
- 7 MAROTTA, A. Determination axial of thermal shapes temperatures without abel inversion. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 27, n.2, p. 268-272, Feb. 1994.
- 8 RALCHENKO, Y.; A.E. Kramida, A.E.; Reader, J. NIST Atomic Spectra Database. **NIST - National Institute of Standards and Technology (version 3.0.2)** . 2005. Disponível em: < [http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)> Acesso em: 23 de Agosto de 2005.
- 9 FRANKLIN, G.F.; POWELL, J.D.; WORKMAN, M. **Digital control of dynamic systems**. 3.ed. Menlo Park : Addison Wesley, 1998.

Recebido em: 03/12/06

Aceito em: 13/04/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM, 2006.