

# Sistema Robótico de Quatro Graus de Liberdade e Processos de Soldagem Dedicados para o Revestimento de Tubos de Caldeiras

Jair Carlos Dutra, Luiz Felipe e Renon Steinbach Carvalho

**Resumo** – O setor energético brasileiro é predominantemente formado por usinas hidrelétricas, o que o torna vulnerável a períodos de estiagem. Neste contexto, usinas termelétricas possuem papel de agente equalizador durante períodos de seca. Desta maneira, é fundamental o desenvolvimento de tecnologias que aumentem o período entre paradas de manutenção e reduzam o tempo da mesma. É neste foco que este trabalho está sendo realizado. Ele trata do projeto e construção de um robô compacto, com quatro graus de liberdade e flexibilidade de adaptação às diferentes superfícies encontradas em evaporadores de caldeiras de termelétricas. Juntamente com o desenvolvimento do manipulador é apresentado o estudo de tecnologias de soldagem para o revestimento dos tubos utilizados na construção das paredes d'água. Por fim, é efetuada uma análise sobre as vantagens da operação de revestimento automatizada em relação à operação manual, além dos prós e contras de cada processo com seu respectivo material de adição.

**Palavras-chave** – MIG pulsado com pulsação térmica, PTAP, recuperação de superfícies, robô manipulador, soldagem robotizada.

## MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

As usinas termelétricas desempenham atualmente no Brasil um papel importante de equalização de energia e, por isto, se tornam fundamentais durante os períodos de estiagem. Assim, é de vital importância um plano de manutenção das referidas usinas, a fim de que estejam adequadamente aptas a suprirem o sistema sempre que necessário. Um plano de manutenção moderno não deve se restringir a recuperar o que foi avariado e deixar o equipamento na situação original. A manutenção deve ser de tal natureza que o equipamento ofereça melhores condições de resistir as elevadas taxas de corrosão e erosão do que originalmente [1]-[3]. Este é o caso dos tubos das caldeiras, que pela ação da erosão e corrosão [4], [5], conforme figura 1, devem ser substituídos em parte.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

J. C. Dutra e R. S. Carvalho trabalham no Laboratório de Soldagem (LABSOLDA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). (e-mails: jdutra@labsolda.ufsc.br; renon@labsolda.ufsc.br).

L. Felipe trabalha na TRACTEBEL Energia – Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – Tractebel Manutenção e Serviços (e-mail: lfelippe@tractebelenergia.com.br).

Outro fator que contribui significativamente para os danos são os sopradores de vapor mostrados na figura 2. Os referidos sopradores têm a função de realizar a limpeza das paredes da caldeira. Tal limpeza é fundamental, pois a fuligem gerada na queima do carvão se deposita sobre os tubos, prejudicando drasticamente a troca de calor, fato que diminui a eficiência na produção de energia.

Entretanto, quando o vapor retira a camada de fuligem é extraído também o material que constitui o tubo. Deste modo, com o passar do tempo a espessura destes tubos chega a níveis preocupantes no que diz respeito a suportar a pressão interna.

A substituição pura e simples dos tubos é no Brasil um trabalho ainda bastante artesanal. Tanto, a união dos tubos entre si, como a união dos tubos com a membrana são executadas por soldagem TIG manual, uma operação lenta, que ocasiona grandes períodos de paralisação das caldeiras. Além disso, estas operações não agregam características de melhorias de resistência contra os mecanismos de falhas [1], [6]. Estas citadas melhorias seriam obtidas se os tubos repositos fossem revestidos por um material mais resistente aos citados danos. Entretanto, executar os revestimentos por operação manual significa uma tarefa difícil, demorada e extremamente dependente da qualificação de profissionais.



Figura 1. Região afetada por erosão e corrosão.



Figura 2. Soprador de vapor.

Na indústria mundial, a soldagem aparece como o processo de fabricação que mais emprega robôs manipuladores [7]. Na Alemanha, por exemplo, no final de 2003 cerca de 30% dos 34.700 robôs manipuladores em operação na indústria eram voltados para soldagem. Este número salta para aproximadamente 55% quando analisado isoladamente o setor automobilístico [8]. No Brasil há na faixa de 8.000 robôs instalados na indústria e, assim como na Alemanha, a maioria é aplicada no setor automotivo [9].

Neste contexto, fica claro que o emprego de robôs vem se mostrando cada vez mais importante para a obtenção de trabalhos com melhor repetitividade e realizados em menor tempo. Isto gera significativa diminuição no custo final de produção ou de reparo de peças [10].

No que tange a soldagem, é interessante a implementação de sistemas robotizados principalmente porque:

- Robôs podem realizar soldagem por longos períodos, bem como proporcionar maior produtividade, repetitividade e eliminar as condições desfavoráveis ao soldador, uma vez que este passa a não mais atuar em um ambiente altamente insalubre [11];
- Sendo o robô um equipamento flexível, é factível e rápida a alteração do *software* de controle para a execução de tarefas distintas. Logo, além de ter maior produtividade comparada ao processo manual, atua em diferentes tarefas, seja no processo de fabricação de peças ou na manutenção, fato que não ocorre na automação dedicada [12].

Todavia, a implantação da automatização não deve ser encarada simplesmente sob um aspecto cartesiano, mas sim, sob um cenário global, onde nem sempre a produtividade deve ser analisada pela simples medição de quantidades produzidas em um determinado instante. Muitas vezes esta quantidade pode ser menor do que a obtida em um processo produtivo já estabelecido porque o que importa muitas vezes é o que ocorre após a produção. Este é o caso da recuperação das paredes de caldeiras, onde o objetivo principal é a longevidade do equipamento sem precisar de manutenção.

Apesar da potencialidade dos robôs, eles normalmente são disponíveis no mercado em versões bem genéricas para o atendimento a um grande número de aplicações. Entretanto, em grande parte delas, o que são necessários são robôs

dedicados, inseridos em tamanho, peso e forma a cada situação em particular. Para algumas destas situações ainda não existem no mercado soluções prontas e por isso, são encontradas tentativas de adaptação, como é a situação apresentada na figura 3 de um equipamento do fabricante BUG-O.

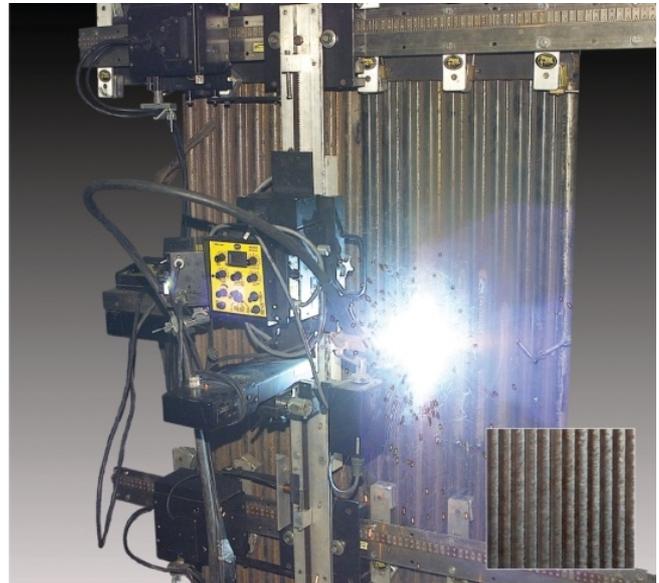


Figura 3. Sistema para o revestimento de paredes de caldeiras.

É devido a esta lacuna tecnológica que é fundamentado o presente trabalho, o qual segue a filosofia de pesquisa e desenvolvimento característica do LABSOLDA, que busca além dos conhecimentos científicos e tecnologias, os meios físicos para a fabricação industrial. Tal conduta proporciona maior desenvolvimento nacional, pois não fica concentrada apenas na utilização de equipamentos existentes no mercado. No âmbito da tecnologia da soldagem isto é relevante para o Brasil, uma vez que os produtos mais avançados são oriundos de tecnologia estrangeira. Além disso, o desenvolvimento de tecnologia própria gera grande flexibilidade para a pesquisa, pois não se está restrito as limitações impostas por um equipamento comercial, sendo factível realizar alterações de acordo com necessidades encontradas no decorrer do projeto e do uso em campo.

No presente caso tem-se a construção de um manipulador CNC (Comando Numérico Computadorizado) robótico versátil com quatro graus de liberdade, composto por três juntas prismáticas e uma rotacional, voltado a operação de revestimento de tubos de parede de caldeira de usinas termelétricas. Dado que o Complexo Termelétrico ao qual o equipamento é destinado apresenta caldeiras com diferentes diâmetros de tubos, o fator versatilidade é fundamental. Logo, com pequenas mudanças mecânicas e mantendo-se o mesmo sistema de controle, por intermédio de microcomputador, é possível efetuar a operação de revestimentos em todas as caldeiras.

É evidente que o desenvolvimento de um manipulador robótico, com tecnologia nacional, para o revestimento dos tubos das paredes de caldeira representa um grande avanço para o país. Entretanto, é fundamental a elaboração de procedimentos de soldagem, que utilizem materiais nobres visando o aumento da resistência dos tubos a corrosão e erosão.

Neste sentido, são apresentados resultados iniciais de revestimento com materiais nobres, aço inox 309L e INCONEL 625 [6], e diferentes processos de soldagem, MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica [13] e PTAP (Plasma de Arco Transferido Alimentado com P6) [14].

O desenvolvimento de tecnologias foi realizado no âmbito do projeto P&D ANEEL 0403-006/2005 intitulado “Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem de Tubos de Parede de Água de Caldeira”. A realização da pesquisa ocorreu entre os anos de 2005 e 2007, tendo a Fundação de Amparo a Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU), a IMC – Engenharia de Soldagem, Instrumentação e Automação e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) como entidades executoras, e a TRACTEBEL Energia como entidade financiadora.

#### SISTEMA ROBÓTICO

Para atender a soldagem em superfícies circulares dos tubos das caldeiras, o projeto do sistema, um manipulador robótico CNC, teve de contemplar quatro graus de liberdade, quatro graus de liberdade, ilustrados na figura 4, onde cada junta tem função específica no processo de soldagem, a saber:

- Junta prismática X: realiza o deslocamento no sentido axial do tubo da parede com a velocidade de soldagem especificada. O alcance é ilimitado, visto que é empregado um trilho com 1,5 m com a possibilidade de serem adicionados trilhos sobressalentes para o aumento do espaço de trabalho do manipulador;
- Junta prismática Y: responsável pelo seguimento da junta a ser soldada e movimento de tecimento. Possui um deslocamento máximo de 120 mm;
- Junta prismática Z: ajuste da distância bico de contato peça (DBCP). Apresenta um deslocamento máximo de 40 mm;
- Junta rotacional A: deslocamento angular em torno da junta prismática X ou Y, com o objetivo de regular o ângulo de ataque da tocha de soldagem. É possível um giro de  $\pm 50^\circ$  em relação a normal da superfície a ser soldada.

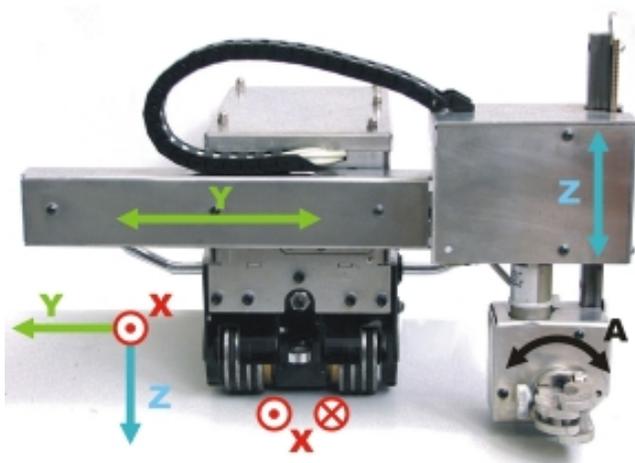


Figura 4. Juntas do manipulador robótico.

Além da questão dos graus de liberdade, o projeto teve de considerar os aspectos do ambiente de trabalho, que possui grande dificuldade de acessibilidade. Isto requer equipamentos leves e de fácil adaptabilidade.

O sistema pode ser subdividido em três grandes conjuntos, de acordo com a figura 5, onde cada um representa:

- Painel elétrico de comando: é constituído pela fonte de alimentação e o circuito elétrico lógico de intertravamento. O referido circuito lógico proporciona segurança ao sistema, uma vez que ocorrendo algum problema, relacionado com o deslocamento, o manipulador e a fonte de soldagem são imediatamente desabilitados. Isto diminui a possibilidade de falhas nos cordões de solda;
- Periféricos: são os componentes diretamente ligados com o controle do robô. O primeiro elemento deste conjunto é o computador. Este tem a função de controlar toda a programação de trajetória e o deslocamento do manipulador. Em segundo tem-se a IHM (Interface Homem-Máquina), a qual é constituída por um monitor sensível ao toque (*touchscreen*), onde o operador tem acesso a todas as informações sobre o equipamento. Por fim, a fonte de soldagem pode ser conectada ao robô. Isto implica que o início e o fim da soldagem ocorrerão de forma automática;
- Manipulador: é constituído pela estrutura mecânica, além de placas para o isolamento de sinais, servo *drivers*, servo motores e os sensores de *home* e limites das juntas, que também pertencem a lógica de acionamento.

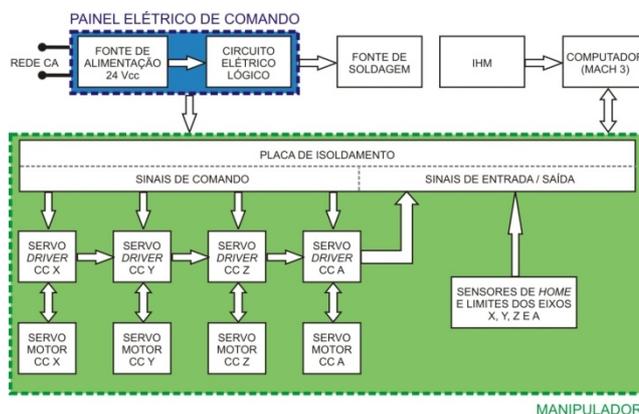


Figura 5. Diagrama de funcionamento do manipulador robótico.

Uma vez que em geral os ambientes que o manipulador é destinado, são de difícil acesso, é primordial que o painel de controle do equipamento acompanhe a filosofia de ser o mais compacto possível. A solução adotada foi conceber e instalar uma eletrônica de acionamento, servo *drivers* e placas de isolamento, no interior do sistema robótico.

A utilização desta eletrônica embarcada diminui o tamanho e a quantidade dos periféricos. As placas de isolamento são indispensáveis para garantir a confiabilidade de funcionamento do manipulador. Isto se deve ao fato de que o processo de soldagem gera grande quantidade de ruídos, os quais são nocivos aos circuitos eletrônicos sem isolamento. As referidas placas foram projetadas em conjunto com a estrutura mecânica, posto que o espaço para a instalação é demasiadamente restrito. A figura 6 mostra o resultado final com a eletrônica instalada sobre o manipulador robótico.

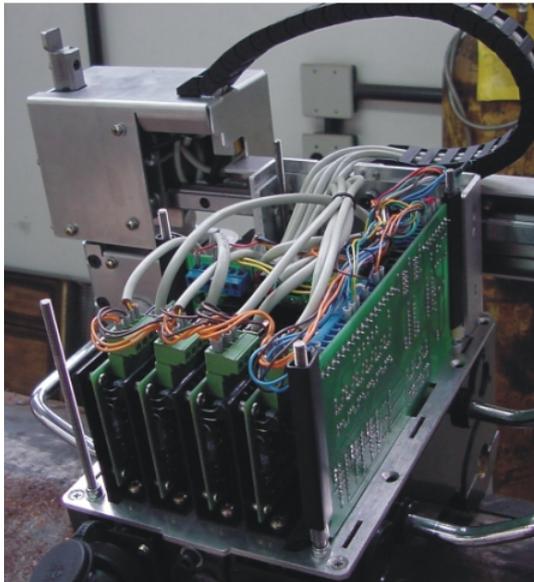


Figura 6. Placas eletrônicas no interior do manipulador robótico.

Este desenvolvimento eletrônico buscou uma concepção genérica, a qual poderia ser utilizada independentemente da metodologia de controle de movimento empregada. Assim, pôde-se analisar diferentes opções de *softwares* de movimentação.

A partir da avaliação estrutural e dos movimentos realizados pelo robô, optou-se por utilizar um método de controle similar ao empregado em equipamentos CNC's baseados em microcomputadores. O objetivo de tal linha de pesquisa foi elaborar IHM's mais intuitivas, além de facilitar a interação com *softwares* de CAD (*Computer Aided Design*), possibilitando assim o planejamento de trajetórias complexas sem que haja dificuldade de programação.

Ao se tratar da implementação de controladores CNC em máquinas especiais, e não em máquinas de fresamento ou torneamento, na maioria dos casos é vantajoso o emprego dos controladores mais simples e com baixo custo. Isto ocorre fundamentalmente porque sistemas com menor custo possuem flexibilidade para a reprogramação de algumas funções. Fato este que não ocorre com os sistemas mais complexos, posto que em geral são *softwares* de arquitetura fechada, não possibilitando desta forma a configuração de parâmetros fundamentais para o correto funcionamento de um equipamento desenvolvido.

Inicialmente os *softwares* simples e com baixo custo, interessavam principalmente a pessoas que fabricavam máquinas CNC apenas por *hobby*. Com o passar do tempo e significativa evolução destes sistemas, os mesmo tornaram-se muito procurados pela indústria. Neste campo da automação para a manufatura, os programas computacionais mais difundidos e com melhores resultados são o DeskCNC [19] e o Mach3 [20].

O DeskCNC é um pacote que engloba um *hardware*, conforme figura 7, que se comunica com o computador por intermédio da porta serial. Operando em conjunto com o referido *hardware*, há um *software*, de acordo com a figura 8, que possibilita utilizar o próprio teclado do computador para deslocar o manipulador, facilitando assim as definições de trajetórias de soldagem. Outro atrativo é o fato de converter

arquivos de formatos variados (DXF, STL, Gerber) para código G. Assim, é factível criar trajetórias em diferentes programas, as quais serão transformadas para linguagem G automaticamente.

A linguagem G é amplamente difundida para a programação de máquinas de fresamento e torneamento CNC. Nesta forma de programação o operador determina o deslocamento de cada junta e a velocidade que o mesmo deve ser realizado. Por exemplo, ao se programar "G1 X200 Y50 Z10 A0 F700", o equipamento sairá de sua posição original e percorrerá 200 mm em X, 50 mm em Y, 10 mm em Z, 0° em A com uma velocidade de 700 mm/min e em linha reta.

Observando a figura 8, tem-se em 1 a barra com as opções de parametrização do *software*, além do campo MDI (*Manual Data Input*) e acionamento das saídas digitais (*Mist, Flood, CW, CCW, AUX1, AUX2 e AUX3*). Nas opções de parametrização do *software* são ajustadas todas as relações de transmissão do sistema mecânico, bem como as rampas de acelerações dos motores de cada junta do sistema robótico. O número 2 ilustra a trajetória programada, a qual será percorrida pelo manipulador. Em 3 é observado o programa em código G, sendo que este pode ser editado caso o operador visualize algum erro. Os controles de deslocamento manual dos eixos, bem como a posição atual, botão de pausa e parada de emergência são vistos em 4. Estas opções facilitam a programação do equipamento e proporcionam melhores condições para que o operador acompanhe a correta execução da tarefa de soldagem.

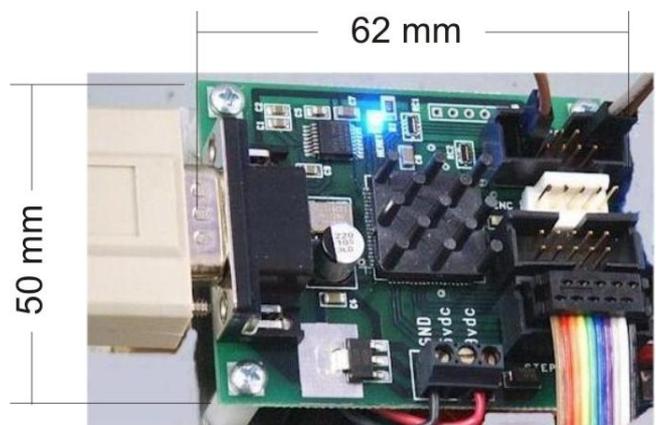


Figura 7. DeskCNC (*hardware*).

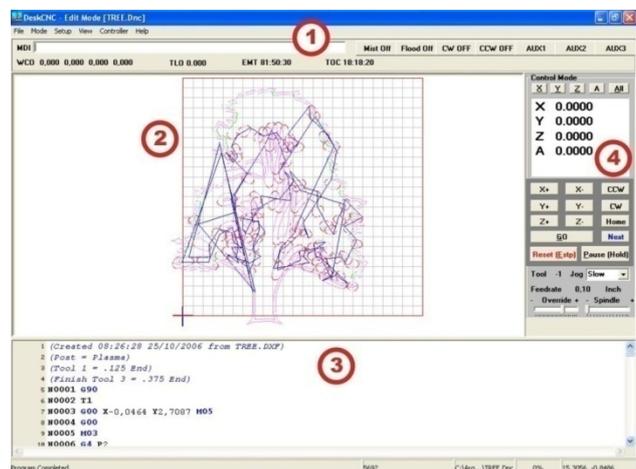


Figura 8. Tela de comando DeskCNC.

Os primeiros testes de soldagem com o robô, a fim de avaliar a dinâmica do sistema, foram realizados com o controlador DeskCNC. Os resultados foram satisfatórios, sendo que o controlador apresentou facilidades para a programação e acompanhamento da soldagem.

Entretanto, mesmo com as vantagens do DeskCNC, cada vez mais a indústria necessita de ferramentas flexíveis, com possibilidade de adaptação a diferentes tarefas. Tal fato é relevante, pois assim se evita gastos com aquisições de novos sistemas, além de redução no treinamento de mão-de-obra.

A fim de viabilizar maior flexibilidade ao equipamento, principalmente ao que tange a criação de IHM's, foi primordial encontrar uma solução distinta ao DeskCNC. Neste contexto, o controlador CNC Mach3 desponta como uma excelente opção de controle com baixo custo para fresadoras, tornos e robôs cartesianos com até 6 juntas, 3 prismáticas e 3 rotacionais.

Este controlador possibilita o desenvolvimento de interfaces gráficas extremamente flexíveis, podendo-se criar um ambiente dedicado a cada atividade de soldagem. Apresenta também bibliotecas para telas sensíveis ao toque e configuração de *teach pendant* mais intuitiva que o teclado do computador. Estes pontos foram primordiais para a escolha do mesmo.

Um grande atrativo do Mach3 é o fato de ser um *software* livre para programas com até 500 linhas de código G. Logo, é possível um estudo preliminar de suas funcionalidades sem que haja necessidade de aquisição do programa. O custo da versão completa é de US\$159,00, o que o torna bem acessível. Outro ponto de estímulo ao uso do Mach3 é a grande rede de comunicação existente entre os usuários do sistema pelo mundo. Os diversos fóruns e grupos de pesquisa garantem uma excelente base de suporte, o que proporciona maior eficiência e dinamismo para o desenvolvimento de novas aplicações e funcionalidades.

A figura 9 apresenta a tela básica de comando do Mach3, a qual é fornecida pela empresa desenvolvedora e voltada para a operação de fresamento, onde se tem as suas funções principais. Na região 1 destaca-se a barra com as opções de configuração do *software*. Já em 2, visualiza-se o programa em código G que será executado. Em 3 encontram-se as posições correntes dos eixos, bem como a opção de referenciá-los. Em 4 tem-se a ilustração das trajetórias a serem realizadas. Em 5 o controle do processo, com opções de *start*, *stop*, *load G code*, *edit G code*, entre outros. Este item traz as principais ações de comando do Mach3. Já os itens 6, 7 e 8 apresentam funções ligadas diretamente com a tarefa de fresamento, não sendo assim utilizadas.

Em virtude da elevada complexidade e de informações dispensáveis para o processo de soldagem, a tela básica do Mach3 não é aconselhável para a operação de um robô para soldagem.

Destá maneira, foi elaborada, pelos pesquisadores do LABSOLDA, uma interface gráfica totalmente nova, visando a tarefa de soldagem e a facilidade de treinamento de operários. Com a criação de uma IHM intuitiva têm-se ganhos não apenas com o tempo de treinamento dos operários, mas também há a diminuição de re-trabalho na soldagem. Tal fato ocorre porque quanto mais simples e lógica for a programação de um robô, menor é a probabilidade de falha humana.

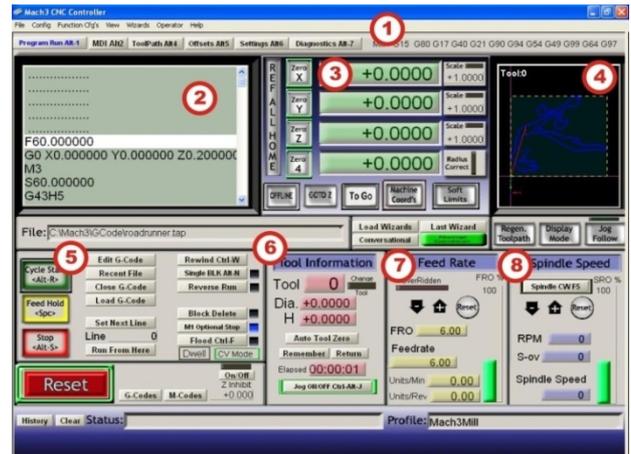


Figura 9. Tela de comando Mach3.

Em suma, a dificuldade em operar um manipulador robótico gera uma situação onde não se alcança o desempenho máximo proporcionado por um sistema automatizado.

Neste contexto, a figura 10 apresenta as duas telas principais do novo ambiente gráfico desenvolvido para a interação entre usuário e robô. A tela inicial de programação, apresentada na figura 10(a), possibilita ao usuário iniciar uma nova programação por intermédio de captura de ponto ou então um deslocamento a partir da posição atual do manipulador. Além disto, é factível carregar um arquivo previamente salvo ou gerado por um *software* de CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Já a figura 10(b) mostra a tela para a inserção das variáveis ligadas ao deslocamento da tocha de soldagem para um tecimento com forma triangular. Nesta tela o operador seleciona a variável desejada (velocidade de soldagem, amplitude ou frequência) e digita no teclado virtual os valores de cada uma. Pode-se também ativar o disparo da fonte de soldagem. Assim, o início e termino da soldagem será comandado pelo robô, proporcionando maior automação à tarefa.



Figura 10. Telas de comando elaboradas para programação do manipulador robótico.

O projeto mostra-se inovador também quando analisado sua estrutura de acionamento. No contexto geral, equipamentos destinados para a soldagem em campo possuem acionamentos simples, geralmente empregando motores de passos. Entretanto, este projeto utiliza uma tecnologia mais

avançada, a qual faz uso de servo motores de corrente contínua com escovas.

A tecnologia de servo acionamento opera em uma configuração chamada de malha fechada, enquanto que os motores de passo trabalham em malha aberta, de acordo com a figura 11. A diferenciação entre elas se dá pelo fato de que em malha fechada quando o servo motor é comandado ele envia o seu deslocamento e velocidade para o controle. Já em acionamento por malha aberta não há este envio de sinal, o que implica na falta de confiabilidade do deslocamento.

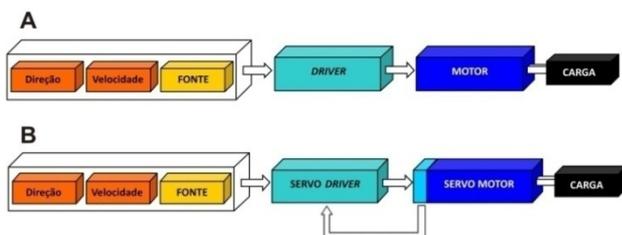


Figura 11. Em (a) acionamento em malha aberta e em (b) em malha fechada.

Evidentemente as referidas tecnologias apresentam vantagens e desvantagens. Ou seja, cada aplicação terá um acionamento mais indicado. As tabelas I e II exemplificam as vantagens e desvantagens das duas formas de acionamento elétrico.

Tabela I. Vantagens x Desvantagens dos motores de passo

Motores de passo	
Vantagens	Desvantagens
Solução de custo mais baixo	Ruído, ressonância e baixa suavidade em pequenas velocidades
Poucas restrições ambientais	Perda de posição não detectada em malha aberta
Baixo índice de defeitos	Consumo de corrente quando parado
Elevado torque contínuo em relação ao tamanho	Excessiva perda eletromagnética em altas velocidades

Tabela II. Vantagens x Desvantagens dos servomotores de corrente contínua com escovas

Servo motores de corrente contínua com escovas	
Vantagens	Desvantagens
Baixo custo e grande variedade no mercado	Manutenção das escovas
Rotação suave em baixas velocidades	Baixo desempenho térmico
Altas velocidades em regime e alto pico de torque	Problemas em ambientes de risco ou vácuo

Com o sistema de acionamento por intermédio de servo motores de corrente contínua com escovas, conseguiu-se uma significativa redução de problemas relacionados com vibrações e ruídos, problemas estes comuns em um acionamento tradicional com motores de passo. Com o emprego de realimentação de posição e velocidade, o sistema eletrônico de controle de movimento dosa a corrente fornecida ao motor, mantendo os parâmetros desejados mesmo que forças externas e/ou perturbações atuem no manipulador. Logo, insucessos no deslocamento passaram a ser menos prováveis.

Outro ponto relevante a considerar é a maior velocidade

alcançada por servo motores de corrente contínua com escovas. Pôde-se assim adicionar uma redução em sua saída. Com tal redução, a inércia refletida sobre o eixo do motor diminui consideravelmente, aumentando a carga máxima que o mesmo consegue deslocar. Deste modo, é factível o uso de motores com menor potência.

Em resumo, o emprego deste sistema de acionamento acarretou na diminuição do peso e ruídos do equipamento, aumentou a velocidade de deslocamento, tornou mais elevada a rampa de aceleração e proporcionou maior confiabilidade e repetitividade na execução de trajetórias.

Como resultado final, a figura 12 traz todo o conjunto utilizado como base para os testes, tanto em laboratório como em campo. Sendo o sistema de controle formado por um microcomputador e um painel eletrônico de acionamento com botões de liga, desliga, emergência, pausa, verifica trajetória e desabilita limites. A IHM é composta por um monitor sensível ao toque de 9 polegadas, o qual garante total controle sobre o sistema. A fonte de soldagem é parte integrante da pesquisa em soldagem de tubos de caldeiras e por este fato apresenta um tamanho reduzido, posto as dificuldades de acessibilidade dos locais de trabalho. Por último, tem-se o sistema robótico de quatro graus de liberdade.



Figura 12. Componentes do sistema automático de soldagem.

#### DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE SOLDAGEM DEDICADOS

A soldagem, quando aplicada como processo de recuperação de partes que sofreram perda de material, apresenta uma gama muito variada de possibilidades e normalmente a variante que é utilizada na indústria não está otimizada. Visando o aprimoramento do processo de soldagem utilizado pela indústria, o LABSOLDA desenvolve há algum tempo metodologias de soldagem que ousam além do convencional. Para esta aplicação nos tubos de caldeiras, utilizam-se procedimentos de soldagem que tratam primordialmente do emprego de materiais nobres, como o aço 316L, o 309L e as ligas de INCONEL, entre elas, a mais conhecida, 625. O uso de tais ligas proporciona um considerável aumento na vida útil dos tubos, passando-se de 3 para até 20 anos entre parada para manutenção [17].

Com a disponibilidade de um robô dedicado a este tipo de serviço, é fundamental a utilização de um processo e procedimentos de soldagem que consigam transferir para a prática todo o potencial do equipamento. Existem requisitos que são fundamentais de processos de soldagem destinados a operações de revestimentos: pequena diluição com o material de base, isenção de defeitos superficiais e para o presente caso, uma espessura de camada relativamente pequena. Este últi-

mo quesito é relevante em função dos elevados custos dos materiais de adição, a exemplo, o aço inox 309L e o INCONEL 625. Para tanto, foram utilizados dois processos de soldagem: um de mais experiência da equipe de desenvolvedores, o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica [13] e um outro processo de desenvolvimento mais recente, o processo Plasma com injeção de pó metálico, denominado de PTA (Plasma Transfer Arc) ou PTAP.

#### A. Processo MIG/MAG com Pulsação Térmica®

O primeiro processo é um bom exemplo da linha de pesquisa do LABSOLDA, a qual busca sempre a inovação no âmbito da soldagem. Inicialmente este processo foi desenvolvido para a recuperação de usinas hidrelétricas da TRACTEBEL Energia. Neste trabalho foi empregado o processo MIG/MAG, entretanto muito distinto do que convencionalmente é conhecido. Esta variante do processo MIG/MAG foi denominada de MIG/MAG pulsado com pulsação térmica ou duplamente pulsado [13]. A introdução de uma pulsação térmica promove um efeito de adequação e sustentação da poça metálica com uma conseqüente melhoria na qualidade do depósito. Como outras vantagens da utilização do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica podem-se citar [18]:

- Controle sobre o tamanho da poça de fusão, melhoria nas condições de viscosidade e de tensão superficial e no aspecto do perfil do cordão de solda;
- Redução no nível de defeitos como porosidades e mordeduras.

A tecnologia tem como base a associação das vantagens da pulsação, tanto do processo MIG/MAG, como do processo TIG. A pulsação da corrente em frequência compatível com a formação de gotículas na ponta do arame-eletrodo (a partir de 30 Hz) tem o objetivo de controlar a transferência metálica, o que proporciona um arco estável. Fazendo-se com que a corrente média desta pulsação MIG varie de forma a produzir ciclos térmicos, conforme ocorre no processo TIG pulsado (na faixa de 0,5 a 2 Hz), produz-se um efeito de adequação e sustentação da poça metálica e conseqüentemente melhoria na qualidade do depósito. Tal melhoria não é somente do ponto de vista de acabamento, mas também relativa às suas características intrínsecas.

Por causa da ação dos ciclos térmicos produz-se uma agitação na poça metálica, a qual expulsa os gases dissolvidos, eliminando as porosidades. Os ciclos de alta energia atuam no sentido de eliminar a falta de fusão, enquanto que os ciclos de baixa energia são os responsáveis pela adequada sustentação do banho metálico na posição sobre-cabeça. Do ponto de vista visual, o depósito se apresenta extremamente superior a um depósito realizado com o MIG convencional [18]. Juntamente com a introdução do referido processo de soldagem, foi empregado o aço inox 309L.

A qualificação do procedimento de soldagem foi realizada com um arame de aço inox 309L de 1,2 mm e gás de proteção 95%Ar + 3%CO<sub>2</sub> + 2%N<sub>2</sub>.

#### B. Processo Plasma com Alimentação de Pó - PTAP

O processo denominado pelo LABSOLDA de PTAP [16] é conhecido internacionalmente como PTA e se refere a um processo de soldagem plasma, que ao invés de utilizar como material de adição arames ou varetas, utiliza pó metálico e, é esta a razão para a introdução da letra P na sua nomenclatura. O referido processo é similar a uma aspersão com pó, entretanto se diferencia principalmente pelo fato da fonte calorífica ser um arco voltaico estabelecido entre o eletrodo e a peça, uma vez que na aspersão convencional por arco, este é interno à tocha.

Este processo de soldagem é promissor, posto que permite a mistura de ligas, aumentando seu espectro de aplicação. Esta tecnologia foi desenvolvida inicialmente como método alternativo de fabricação para revestimentos de alta qualidade sobre componentes utilizados na indústria nuclear. Várias são as vantagens atribuídas ao processo, as quais compreendem [16]:

- O processo PTAP produz uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores de 20-25% obtidos com o processo MIG/MAG. Para avaliar a qualidade de um determinado revestimento, um requisito importante é a diluição que quantifica o grau de mistura entre o metal de base, o qual apresenta baixa resistência, e o metal de adição, este com alta resistência. Assim, quanto menor a diluição, maior será a eficiência do revestimento aplicado na proteção a erosão, corrosão ou desgaste;
- Maior facilidade para a fabricação de materiais de enchimento para diferentes finalidades experimentais misturando distintos pós.

O plasma é na verdade um arco voltaico que é estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, centralmente localizado em uma tocha e que é canalizado por um orifício em um bocal de cobre. O pó é insuflado por orifícios circunferencialmente dispostos ao redor do arco, como mostra a figura 15.

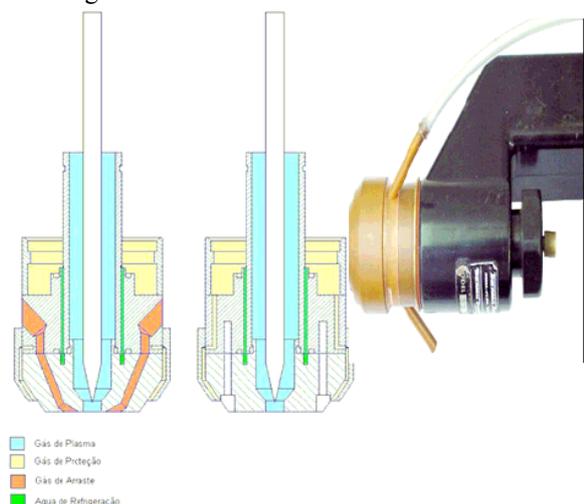


Figura 15. Seção da tocha adaptada ao PTAP e a tocha montada.

Esta figura se refere a uma tocha parcialmente desenvolvida pela equipe do LABSOLDA e particularmente utilizada para operações com deslocamento automático. A

mesma possui dois orifícios de injeção de pó em um bocal intercambiável. Cada bocal apresenta os orifícios com um determinado ângulo de incidência do pó. Sendo que um deles com 30° e outro com 60° em relação ao eixo da pistola. Outro exemplo de tocha, que também foi utilizada nos experimentos é a apresentada na figura 16, que possui quatro orifícios, dispostos angularmente à 15° em relação ao eixo da tocha. Esta, de fabricação da empresa TBI, se adapta para operações manuais.



Figura 16. Tocha PTAP comercial para operação manual com 4 vias de vazão de pó.

Todo um sistema de insuflamento de gases tem de fazer parte do equipamento de soldagem, constituindo-se em três circuitos. Destes três circuitos um gás flui centralmente, formando o arco, um é responsável pelo carregamento do pó e, um terceiro flui periféricamente, sob a delimitação de um bocal. Este último gás tem a função primordial de proteção.

Para a alimentação do pó foi desenvolvido um sistema mecânico, visto na figura 17, constituído por um reservatório que dá vazão de pó diretamente sobre um fuso transportador. Além da ação mecânica do fuso no carregamento do pó, há ainda um fluxo de gás de arraste, conforme citado no parágrafo anterior.

Uma das limitações do processo é a disponibilidade comercial de pós com a composição química idêntica aos dos arames usados nos processos já descritos. Neste contexto, para a presente aplicação em tubos de caldeiras, foi utilizado como material de revestimento o INCONEL 625. Esta liga, assim como o aço inox 309L, vem sendo utilizada nas operações de revestimento na Europa e nos Estados Unidos. Por isto, as experiências, aqui conduzidas, foram com este pó, já disponível comercialmente. Além do desenvolvimento da tecnologia de processo e procedimento, está sendo realizado o projeto de um sistema customizado, isto é, compacto, para a aplicação nas caldeiras.



Figura 17. Modelo do Alimentador de Pó, a) foto, b) gerado em ambiente CAD, c) corte em ambiente CAD: 1-Vedação, 2-Rolamento, 3-Fuso transportador, 4-Corpo, 5-Tampa, 6-Motor, 7-Base reservatório, 8-Divisor, 9-Mangueiras flexíveis, 10-Entrada gás de arraste, 11-Distribuidor e ADP montado.

## RESULTADOS

Os testes preliminares foram realizados na caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda localizado no município de Capivari de Baixo no estado de Santa Catarina. O processo utilizado foi o MIG/MAG com arame ER80S-G e o objetivo era testar a performance do manipulador em um ambiente real de trabalho, como visto na figura 18(a). Os resultados foram satisfatórios, apesar dos cordões de solda não terem ficado suficientemente sobrepostos, fato observado na figura 18(b).

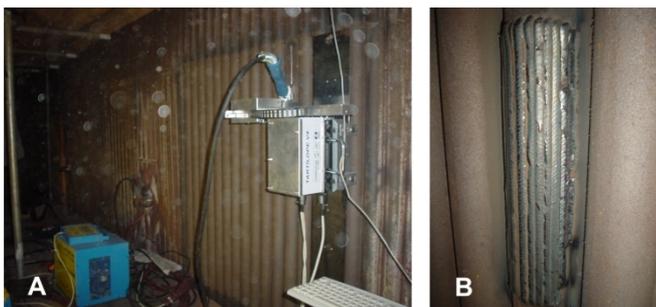


Figura 18. Testes em campo. Em (a) o robô CNC e em (b) os resultados iniciais de revestimento.

A fim de efetuarem-se testes iniciais e comparativos para o revestimento de tubos de paredes de caldeiras, foram elaboradas duas metodologias distintas. A primeira delas empregou o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e o aço inox 309L como material de adição. Já a segunda, fez uso do processo PTAP com adição de INCONEL 625 em pó. Todos os testes tiveram o mesmo padrão de corpo de prova, sendo este um tubo com 50 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Quanto à característica da soldagem de revestimento, foram efetuadas na posição horizontal e em apenas 180° do tubo.

Os testes com o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e inox 309L, apresentaram bons resultados quanto a continuidade dos cordões e estabilidade da soldagem. A figura 19 apresenta os primeiros resultados, onde foi utilizado uma velocidade de soldagem de 40 cm/min e tecimento trapezoidal com frequência de 1,7 hz, amplitude de 5 mm e tempo de parada de 0,1 s. Mesmo com esta técnica, que tem como característica proporcionar maior controle sobre a geometria do cordão, não foi conseguido um depósito com espessura menor do que 2,5 mm. Esta espessura é considerada exagerada para um revestimento com materiais mais nobres do que o material de base. Além do desperdício de material, tal espessura acarreta uma deformação grande nos tubos. Nos ensaios de revestimento um corpo de prova de 500 mm teve uma deformação de cerca de 6 mm de flecha.

Um dos principais problemas durante a execução dos ensaios foi a instabilidade no arco elétrico, está por sua vez era decorrente de uma elevada amplitude de tecimento. Tal fato é natural, dado que ao fazer-se o tecimento sobre uma superfície curvada ocorre grande variação na DBCP (Distância Bico-de-Contato Peça). Esta variação de DBCP impossibilitou alcançar-se amplitudes maiores que 5 mm para o processo MIG/MAG. Desde forma, para o revestimento de 180° do tubo foi necessária a realização de 10 cordões de solda.

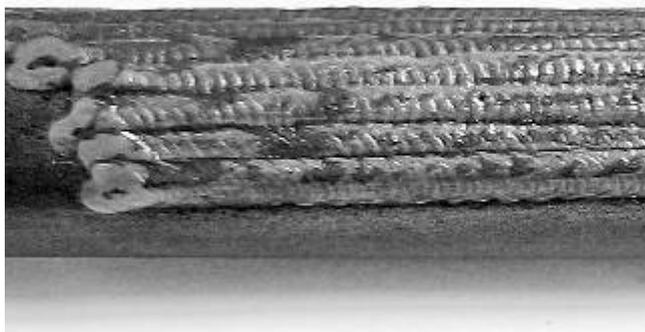


Figura 19. Detalhe do revestimento.

A segunda solução aplicada foi com o processo PTAP. Aqui foi empregado como material de adição o pó INCONEL 625. A não utilização do inox 309L se deve a sua não disponibilidade comercial. Quando comparado com o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, o PTAP apresenta um arco elétrico extremamente estável para variações de DBCP na ordem de 3 a 5 mm. Assim, foi possível a utilização de amplitudes bem maiores do que no caso anterior, chegando-se ao valor limite de 13 mm. Desta forma, com apenas 3 cordões, ao invés de 10, foi factível efetuar o revestimento do tubo. A figura 20 mostra a característica do revestimento no tubo de 50 mm de diâmetro.



Figura 20. Tubo revestido com o processo PTAP.

Com o revestimento por intermédio do processo PTAP, os cordões de solda apresentaram alturas menores do que 1 mm, o que é altamente desejado em um procedimento de revestimento.

#### CONCLUSÕES

As considerações finais do projeto analisam separadamente as duas linhas de pesquisa desenvolvida. Quanto ao processo de soldagem utilizado, os dois apresentaram bons resultados no quesito de continuidade dos cordões. Como melhor opção para o revestimento tem-se o processo PTAP com adição de INCONEL 625. Embora, o custo do INCONEL 625 seja alto, cerca de R\$150,00 por quilo contra R\$58,00 por quilo do inox 309L, a sua aplicação pelo processo PTAP produz cordões com espessuras menores, o que economiza material e o acabamento é mais uniforme. Outra vantagem diz respeito ao tempo total de soldagem. Com a utilização do processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica a velocidade de soldagem ficou na casa de 40 cm/min e são necessários a realização de 10 cordões. Já com o processo PTAP, a velocidade de soldagem ficou na ordem de 20 cm/min, entretanto foram feitos apenas 3 cordões para conseguir-se o revestimento em 180° do tubo.

No que tange ao projeto do manipulador robótico para a automatização da operação de revestimento de tubos de parede de caldeira de usinas termelétricas, o desenvolvimento até o ponto atual é satisfatório, posto que os testes efetuados em campo mostraram bons resultados. Assim, é viável a continuidade no desenvolvimento buscando tornar o protótipo em produto. Neste sentido, tem-se como sugestão a troca do microcomputador convencional por um sistema de controle embarcado, o que reduziria significativamente o tama-

nho do mesmo. Também é fundamental a continuidade no aperfeiçoamento da IHM para torná-la ainda mais simples e intuitiva.

No que diz respeito à estrutura mecânica, existem alguns pontos deficientes a serem aperfeiçoados em um segundo protótipo. A avaliação deste primeiro protótipo indica que o centro de massa do equipamento deve ser deslocado ao máximo para o entre eixos. Assim, espera-se maior repetitividade no deslocamento, devido ao melhor equilíbrio entre as forças envolvidas durante a execução de uma tarefa de soldagem. É necessária também a substituição da fixação atual por uma destinada a robótica. Deste modo, podem-se ter maiores deslocamentos nas juntas, postos que um dos problemas atuais é a acomodação dos fios, os quais são relativamente grossos e com pouca flexibilidade.

Este trabalho também poderá servir como base para futuras pesquisas no que tange à tecnologia da soldagem, seja na parte de desenvolvimento de novos processos ou em novos métodos para a automação da soldagem. Um bom exemplo é o desenvolvimento de um sistema para o controle de altura da tocha de soldagem. Este sistema certamente traria muitas vantagens para a soldagem, posto que tende a proporcionar maior estabilidade ao arco elétrico no transcorrer da realização do cordão de solda. O aumento da estabilidade reflete-se diretamente na melhoria da qualidade do cordão. Outro exemplo é a integração de sistemas CAD/CAM na determinação das trajetórias de soldagem principalmente no corte de metais por intermédio dos processos de oxicorte e plasma. Com esta integração é factível que o manipulador trabalhe como uma fresadora CNC, ou seja, o equipamento além de realizar a soldagem passaria a fazer operações de corte com excelente resolução e confiabilidade.

#### AGRADECIMENTOS

Um trabalho como o aqui apresentado, que envolve várias ciências e tecnologias, não poderia ser executado somente pelos autores citados. Mais de uma dezena de técnicos, tanto de nível médio, como de nível superior, participaram e participam do presente projeto em atividades de eletrônica de controle, eletrônica de potência, *software*, projeto mecânico e tecnologia da soldagem. A todos eles é fundamental um grande agradecimento. Entretanto, faz-se necessário citar aqueles que, além destas atividades relevantes, exercem também funções decisórias: Eng. Raul Gohr Jr., Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva e Fís. Tiago Vieira da Cunha. Por último, resta agradecer a empresa TRACTEBEL Energia, especialmente os responsáveis pelo que pode ou deve ser uma atribuição da área de P&D, pela confiança depositada na equipe do LABSOLDA/UFSC e da empresa IMC.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dooley, B., Manual of Investigation and Correction of Boiler Tube Failures - EPRI CS 3945 pg 4-14, and GS 6467.
- D. W. C. Baker et al., London: CEGB, 1977 - Estimate of Remaining Life With Waterwall Fire-Side Corrosion.
- Blogg N., Brooks R., - WSE UK and NL, Power Gen Europe 2002, Innovative Technique Developed as Permanent Solution to Fireside Waterwall Erosion / Corrosion issues within Fossil Fired Boilers;
- Felippe, L. Santo, E. O. E. II SEMASE, CO-GUT-01, 1998 - GCOI/SCM
- Tilley, R., EPRI - Electric Power Research Institute, Final Report 1004324, March 2003, Inherently Reliable Boiler Component Design - Waterwall Fireside Corrosion, pg 4-28.

- Coleman, K., EPRI - Electric Power Research Institute, Report 1009755, April 2005, Application and Repair of Overlay Welds.
- Klafter, R. D., Chmielewski, T. A., Negin, M. Robotic Engineering - An Integrated Approach: Prentice Hall, 1989.
- UNECE - United Nations Economic Commission for Europe. Solid recovery of sales and production of industrial robots in Germany - the world's second largest user and producer of industrial robots. [Online] [Citado em: 2008 de Out. de 28.] [http://www.unece.org/press/pr2004/04stat\\_p03e.pdf](http://www.unece.org/press/pr2004/04stat_p03e.pdf).
- Marques, P. V., Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- Pires, J. N., Loureiro, A., Bolmsjö, G., Welding robots: technology, system issues and applications. Springer. London. 2006.
- Broering, C. E. Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico. Fev. 2005. 96p. Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2005.
- Sciavicco, L., Siciliano, B. Modelling and control of robot manipulators. London: Springer, 2004.
- Dutra, J. C. O processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação Térmica [http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/processos/cavitacao\\_turbinas.php](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/processos/cavitacao_turbinas.php)
- PLASMA TEAM: Powder Plasma Arc Welding e Equipamentos. Località LE VAIE-15061 AEQUATA SCRIVIA (AL) - ITALY. (2002).
- ART SOFT. Using Mach3 Mill. [Online] [Citado em: 03 de 11 de 2008.] [http://www.machsupport.com/documentation/M3M1\\_84-A2.pdf](http://www.machsupport.com/documentation/M3M1_84-A2.pdf).
- Díaz, V. M. V. Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para soldagem fora de posição. Florianópolis: Tese de doutorado, Dept. de Engenharia Mecânica, Fev. 2005.
- Lai, G., Stamper, D., Jirinec, M., Hulsizer, P. Use of pulse spray gas metal arc weld overlay technology for boiler tube protection against corrosion and erosion. Welding Services, Inc.
- Barra, S. R. Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida. Florianópolis : Tese de doutorado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC., Ago. 2003.
- CARKEN CO. DeskCNC Setup & Operating Manual. [Online] [Citado em: 03 de 11 de 2008.] <http://www.deskcnc.com/DeskCNCManual.pdf>.
- ART SOFT. Using Mach3 Mill. [Online] [Citado em: 03 de 11 de 2008.] [http://www.machsupport.com/documentation/M3M1\\_84-A2.pdf](http://www.machsupport.com/documentation/M3M1_84-A2.pdf).