

Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem de Tubos de Parede de Água de Caldeira

J. C. Dutra, LABSOLDA/UFSC e L. Felipe, Tractebel Energia

Resumo - Este documento relata os esforços para melhorar a forma com que é realizada a recuperação por soldagem dos tubos de paredes de caldeiras de usinas termelétricas. Tendo em vista a utilização de um processo pouco produtivo, o TIG manual, vários flancos de desenvolvimento foram abertos para produzir uma solução avançada desta recuperação. A atuação ocorreu no âmbito do desenvolvimento de processos e procedimentos de soldagem, no âmbito da concepção de equipamentos para estes novos processos e procedimentos e, finalmente, no âmbito do desenvolvimento de um equipamento automático para a execução da soldagem. Embora, o projeto não tenha alcançado ainda toda a magnitude das proposições, já estão disponíveis soluções em novos processos e em novos equipamentos para atender ao citado serviço. Algumas soluções já estão disponibilizadas, com uma mesma fonte de energia compacta atendendo a todas. Entre as soluções está uma automação da alimentação de arame para o TIG.

Palavras-chave - MIG-MAG, Plasma Pó, Recuperação por Soldagem, Termelétrica, Tubos de Caldeiras.

I. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Um dos problemas que as usinas termelétricas enfrentam com frequência é o rompimento de tubos das caldeiras que ocasionam paradas forçadas. Estes rompimentos ocorrem devido ao enfraquecimento dos tubos devido à erosão e corrosão, causados por diferentes agentes [1]. A erosão pode ser por partículas de carvão, cinzas leves, cinzas fundentes e causada pelos sopradores de fuligem. A corrosão ocorre por fluxo e sob tensão. Apesar dos esforços para minimizar estes fenômenos dos tubos das caldeiras, sempre haverá a necessidade de recuperação dos mesmos, já que a sua substituição implica em longos períodos de parada dos equipamentos.

O presente projeto tem como objetivo global o desenvolvimento de tecnologia para a recuperação por soldagem de tubos de caldeiras, envolvendo processos, procedimentos e equipamentos de soldagem e sua automação. Visa-se alcançar melhor performance, em termos de qualidade do revestimento, e ao mesmo tempo aumentar a produtividade em relação ao processo utilizado atualmente, o TIG manual.

Embora, um outro processo de recuperação, a aspersão térmica convencional, já tenha sido também utilizado, não produziu resultados tecnológicos satisfatórios, pois ocorreu o desprendimento de cerca de 20% das partes revestidas. Um dos desafios das possíveis soluções de processos de soldagem

é que todos tenham um elevado grau de compacticidade em termos de equipamentos em virtude da dificuldade de transportá-los nas várias regiões onde a recuperação é necessária. Conforme mostra a Figura 1, as paredes dos tubos possuem uma altura muita grande, necessitando de andaimes muitas vezes com dificuldade de possuírem uma segurança adequada aos operadores e aos equipamentos.



Figura 1 – Queimador do evaporador e posicionamento dos tubos da parede d'água

II. FUNDAMENTAÇÃO

A recuperação por soldagem de superfícies avariadas pode ser realizada de maneiras bastante diversificadas. O critério fundamental de escolha da melhor opção é baseado na qualidade do depósito, especialmente quando a superfície a ser recuperada tem dimensões reduzidas. Nestes casos, a busca por processos mais produtivos não representa ganhos substanciais. Se a superfície a ser recuperada tem dimensões apreciáveis e o processo de soldagem é pouco produtivo, a recuperação das superfícies pode não compensar em relação à substituição das partes avariadas por novas. Esta é uma situação que tende a ocorrer mais intensamente à medida do

envelhecimento dos equipamentos. Assim, para que se evite uma cirurgia radical é altamente desejável que sejam utilizados processos e procedimentos de recuperação bastante produtivos. Neste caso, não seria mais admissível a utilização de varetas com condução manual por um soldador.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, que visa uma atuação multidisciplinar com ações, tanto no desenvolvimento de processos e procedimentos de soldagem, como no desenvolvimento de sistemas automatizados inéditos.

III. PROCESSO MIG/MAG COM PULSAÇÃO TÉRMICA®

Na trilha do planejamento do projeto, o primeiro passo foi a alternativa de aplicação do processo MIG/MAG em substituição ao processo TIG. A experiência da equipe de desenvolvimento neste processo induz indubitavelmente para a utilização da versão deste processo, desenvolvida especialmente para o reparo por soldagem de pás de turbinas hidráulicas que sofreram cavitação [2]. Trata-se do MIG/MAG com Pulsação Térmica®, um desenvolvimento com patente registrada pelo LABSOLDA.

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa junto a fabricantes de arames para soldagem MIG/MAG para se selecionar um arame adequado ao metal de base a ser revestido. Este metal é o aço resistente à fluência 16Mo3, cuja composição química nominal está na Tabela 1.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DO AÇO 16MO3

%	16Mo3
C	0,12-0,20
Si	0,35
Mn	0,40-0,90
P	0,025
S	0,010
Cu	0,30
Cr	0,30
Ni	0,3
Mo	0,25-0,35

Então, juntamente com informações da própria TRACTEBEL quanto ao consumível utilizado para a soldagem TIG, foi definido que o arame correspondente seria o AWS ER80S-G de 1,2 mm de diâmetro, maciço. A variação deste arame contendo Mn e Mo, para solda de metais de base também contendo estes elementos, é o ER80S-D2. Seu nome comercial, fornecido pela BoehlerThyssen, é DMO-IG. Trata-se de um arame com 0,5 % de Mo, para aumento da resistência à fluência, e alto Mn e Si para melhor molhabilidade e desoxidação. Segundo o fabricante, apresenta um depósito de alta tenacidade e resistência a trincas, boa resistência em temperaturas de -40° C a 550° C, e boas características de soldagem, inclusive na soldagem pulsada, e que

não é envelhecível. Sua composição química nominal está na Tabela 2.

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DO ARAME BOEHLERTHYSSSEN DMO-IG

%	C	Si	Mn	Mo
DMO-IG (AWS ER80S-D2)	0,1	0,6	1,2	0,5

Para início da qualificação do procedimento de soldagem foi utilizada a versão do processo MIG/MAG pulsado sinérgico com Pulsação Térmica®, desenvolvido para um arame comum de aço carbono de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar+5%CO2. Os primeiros ensaios na posição plana se revelaram com bons resultados, mas como o gás de proteção comercial mais próximo do contido no programa possuía 8% de CO2 e não 5%, um ajuste nas variáveis melhorou o resultado, principalmente na posição de soldagem real de trabalho, que é em parede vertical com os cordões de solda na horizontal. O procedimento resultou conforme o oscilograma apresentado na Figura 2, cujos valores médios das variáveis estão descritos na tabela 3. A aparência do depósito pode ser vista na Figura 3.

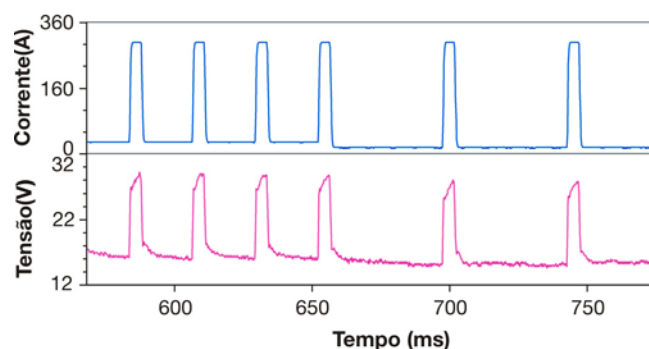


Figura 2 – Oscilograma do ensaio com novos parâmetros de soldagem

TABELA 3 - DADOS DOS ENSAIOS COM O PROGRAMA SINÉRGICO PARA ARAME DMO-IG DE 1,2 MM DE DIÂMETRO, PROCESSO MIG/MAG COM PULSAÇÃO TÉRMICA®

Imp (A)	80
Imb (A)	60
Tp (ms)	0,4
Tb (ms)	0,5
Vg (l/min)	15
Vs (cm/min)	21

(Imp=corrente média de pulso térmico, Imb=corrente média de base térmica, Tp=tempo de pulso térmico, Tb=tempo de base térmica, Vg=vazão de gás, Vs=velocidade média de soldagem)



Figura 3 – Camada depositada com os parâmetros da Tabela 3 e variáveis individuais conforme o oscilograma da Figura 1

IV. PROCESSO MIG/MAG CONVENCIONAL EM FONTE COMPACTA

Uma pequena fonte de soldagem [3] foi adaptada para atender genericamente a alguns processos, que entre eles está o MIG/MAG. Esta fonte possui tecnologia de inversor e é, por isso, bastante compacta. A Figura 5 apresenta este equipamento numa situação de soldagem com o processo TIG com alimentação contínua de arame. A sua versão, adaptada ao processo MIG/MAG, apresenta características dinâmicas especiais, propiciando melhorias na transferência metálica. A capacidade deste equipamento é para a bitola de arame de 0,8 mm, para o qual foi desenvolvido o procedimento de soldagem (Tabela 4) em parede vertical e o cordão de solda na posição horizontal. A aparência do depósito é apresentada na Figura 4.

TABELA 4 – PROCEDIMENTO MIG/MAG PARA ARAME DE 0,8 MM

Velocidade de arame média	6,4 m/min
Velocidade média de soldagem	27 cm/min
Corrente média	110 A



Figura 4 – Camada realizada com fonte inversora em modo MIG/MAG

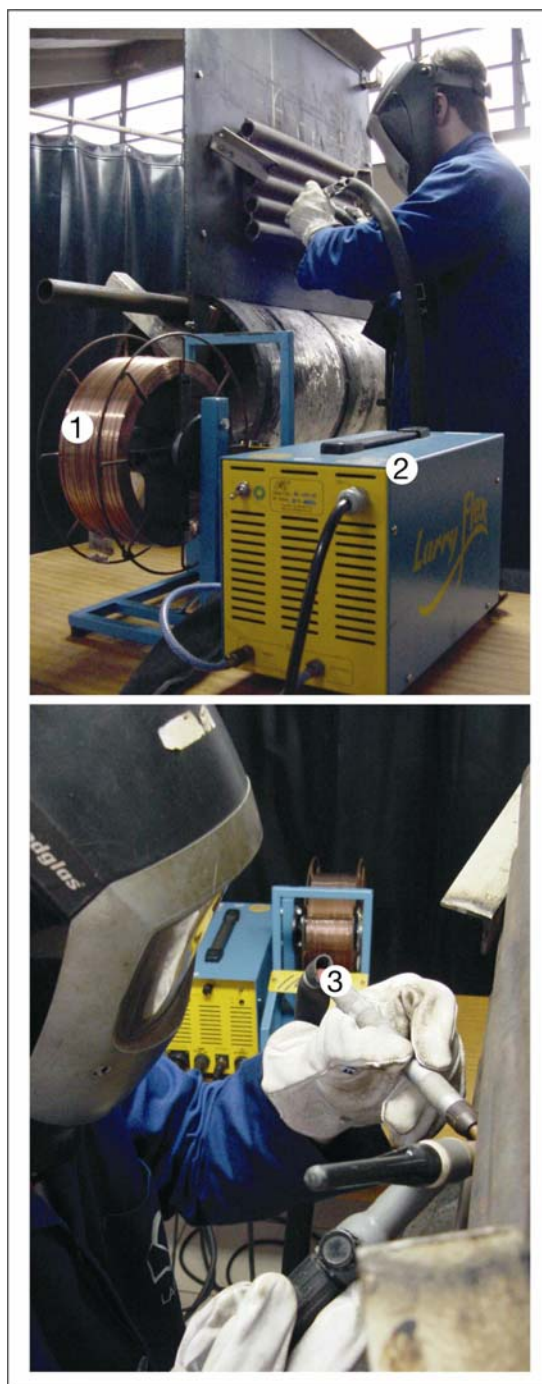


Figura 5 – Fonte de soldagem compacta, com sistema inteligente de alimentação de arame contínuo no processo TIG. 1 – cabeçote tracionador de arame, 2 – fonte de soldagem, 3 – Caneta TIG

V. DESENVOLVIMENTO DE ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE ARAME PARA O PROCESSO TIG MANUAL

Uma outra solução para a recuperação por soldagem dos tubos das caldeiras foi o desenvolvimento de um sistema de alimentação contínua de arame com controle adaptativo [4]. Neste sistema atua um circuito de controle que, realimentado com sinais adquiridos no arco TIG, determina a velocidade de arame a ser adicionado pelo cabeçote tracionador. Assim, o material só é adicionado na velocidade regulada quando é necessário, reduzindo-se a velocidade a quase zero ou zero, quando a ponta do arame está em contato com a poça ou fora

do arco, respectivamente. Para direcionar o arame, o soldador utiliza um dispositivo chamado de Caneta TIG. Este sistema apresenta diversas vantagens sobre o processo TIG convencional, com alimentação por varetas:

- Aumento da produtividade;
- Redução de custos (redução no consumo de gases, pois há menos paradas com tempos de pré e pós gás);
- Aumento da qualidade (menos paradas e re-começos, menos contaminação do material adicionado);
- Redução de resíduos (sobras de varetas);
- Conforto do operador;
- Flexibilidade na operação;
- Redução de LER/DORT (Lesões por Esforço Repetitivo).

Os impactos desses benefícios na operação de recuperação de tubos de parede d'água são claros, como a diminuição dos tempos de parada para reparo das caldeiras.

O procedimento para parede vertical e cordões na posição horizontal está descrito na Tabela 5 para bitola de arame de 1,2 mm. A aparência do depósito está apresentada na Figura 6a. e sua radiografia, mostrando isenção de defeitos, na figura 6b.

TABELA 5 – PROCEDIMENTO PARA A POSIÇÃO HORIZONTAL

Corrente [A]	160 A
Velocidade média de arame [m/min]	3(valor de referência)
Vazão de gás de proteção / Ar [l/min]	11

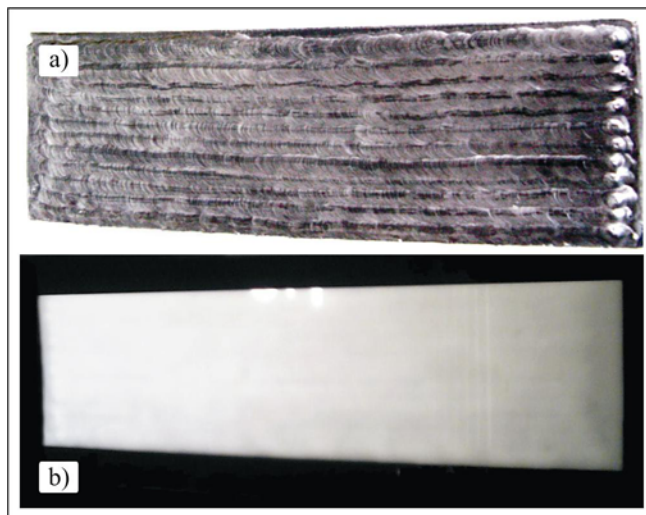


Figura 6 – Depósito realizado pelo processo TIG com alimentação contínua de arame, a) Foto ,b) radiografia

VI. PROCESSO PLASMA COM ALIMENTAÇÃO DE PÓ-PTAP

O processo denominado pelo LABSOLDA de PTAP [5] é conhecido internacionalmente como PTA (Plasma Transfer Arc) 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 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 7. Esta figura se refere a uma tocha parcialmente desenvolvida no LABSOLDA e particularmente utilizada para operações automáticas. 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. Um deles com 30° e outro com 60° em relação ao eixo da pistola. Um outro exemplo de tocha, que também foi utilizada nos experimentos é a apresentada na Figura 8, 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.

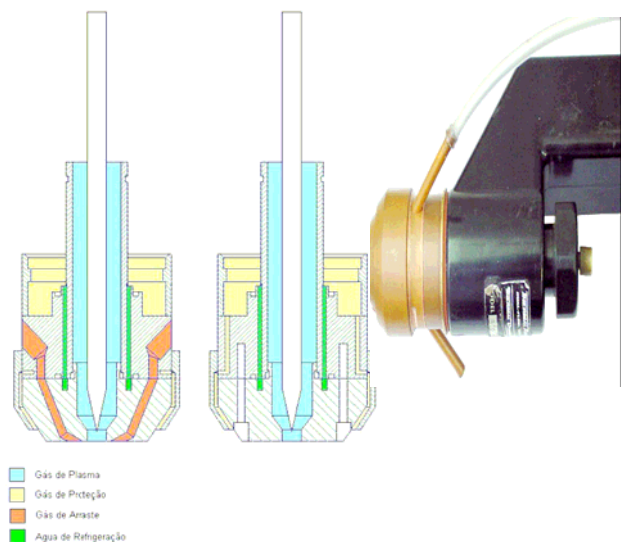


Figura 7 – Seção da tocha adaptada ao PTAP e a tocha montada

Todo um sistema de insuflamento de gases tem de fazer parte do equipamento de soldagem, constituindo-se em três circuitos: um gás que flui centralmente, formando o arco, um que é responsável pelo carregamento do pó e, um terceiro que 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 (Figura 9), 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. Entretanto, para a presente aplicação em tubos de caldeiras, foi verificado que na Europa está sendo utilizada a composição do aço 316L. Por isso, 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 8 – Tocha PTAP comercial para operação manual com 4 vias de vazão de pó

Os ensaios de soldagem (Figura 10) realizados com os procedimentos da Tabela 6 apresentaram bons resultados iniciais. Naturalmente, as características de soldas manuais dependem fortemente do treinamento do soldador e, como se trata de um processo novo, não há ainda soldador com habilidade suficiente.

TABELA 6- DADOS DE SOLDAGEM ADOTADOS PARA OS ENSAIOS COM A TOCHA PLP 300

Corrente média	160 A
Taxa de alimentação de pó	0,9 kg/h
Vazão de gás de plasma	1,8 l/min
Vazão de gás de proteção	10 l/min



Figura 10 – Depósitos iniciais com a tocha PTAP manual

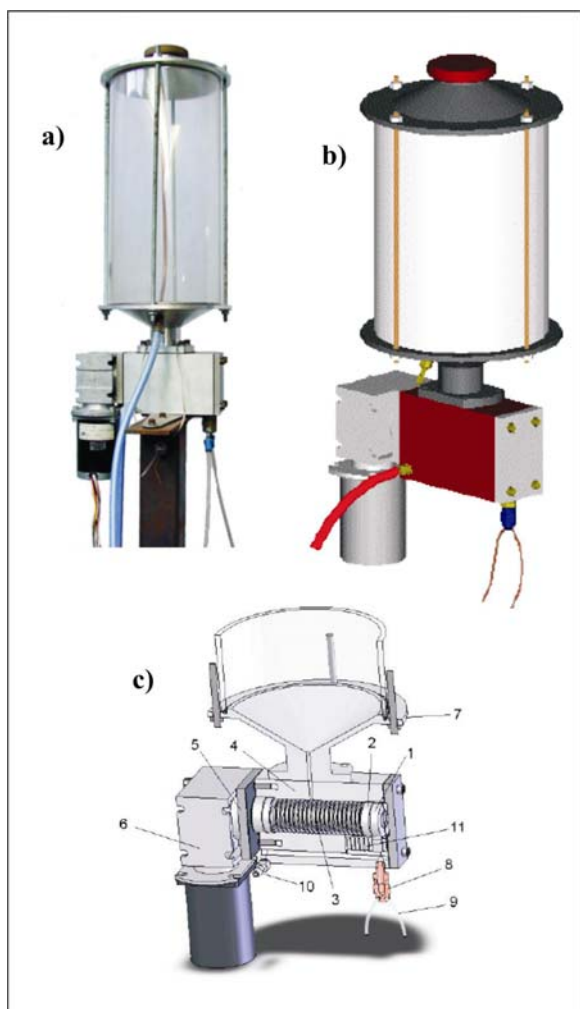


Figura 9 – Modelo do Alimentador de Pó, a) foto, b) gerado em ambiente CAD, c) corte em ambiente CAD: 1-Vedação, 2-Rolamento, 3-Fuso transportador, 4-Corpo, 5-Tampa, 6-Motor, 7-Base reservatório, 8-Divisor, 9-Mangueiras flexíveis, 10-Entrada gás de arraste, 11-Distribuidor e ADP montado

V. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE SOLDAGEM

Uma das vertentes inseridas no Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem de Tubos de Parede de Água de Caldeira se refere ao projeto e construção de um dispositivo para automatização da soldagem em questão. O LABSOLDA, detendo o know-how proveniente de projetos similares [6] e aplicando sua característica interdisciplinar, vem desenvolvendo este sistema nos seus aspectos mecânicos, computacionais e eletrônicos. A concepção básica do sistema, denominado de TARTÍLOPE V4, está apresentada na Figura 11.

O sistema é pré-concebido para quatro graus de liberdade, três com variação linear e um angular para atuar na angulação da tocha de soldagem em relação aos cordões de solda depositados. Após várias versões preliminares, o equipamento evoluiu e seu estágio construtivo está de acordo com a Figura 12.

A lógica de acionamento do Tartílope V4 foi concebida com o intuito de proporcionar o intertravamento do sistema como um todo. Logo, caso ocorra situações não planejadas durante o processo de soldagem, como, por exemplo, erro de trajetória ou colisão do manipulador, os motores são parados

simultaneamente e a fonte de soldagem desabilitada. Assim, evitam-se danos ao equipamento e também à peça que está sendo soldada.

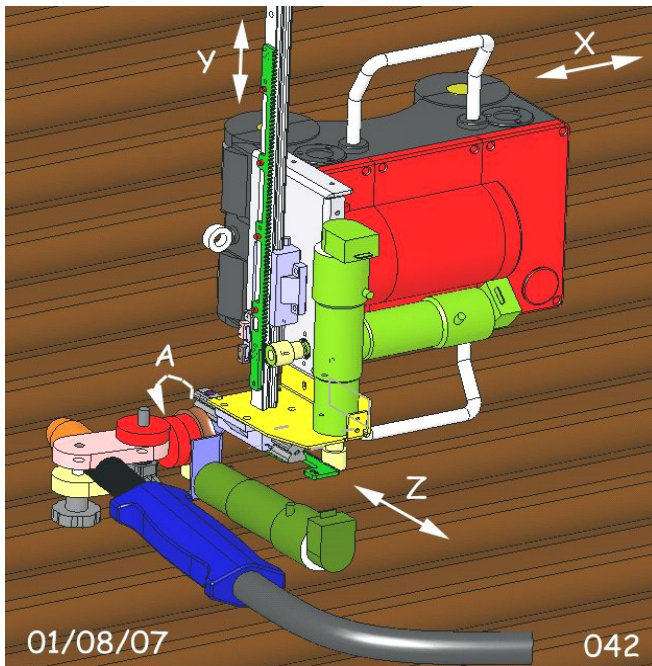


Figura 11 – Concepção geral do sistema automatizado completo com todos os eixos a serem acionados para a aplicação nas paredes de água

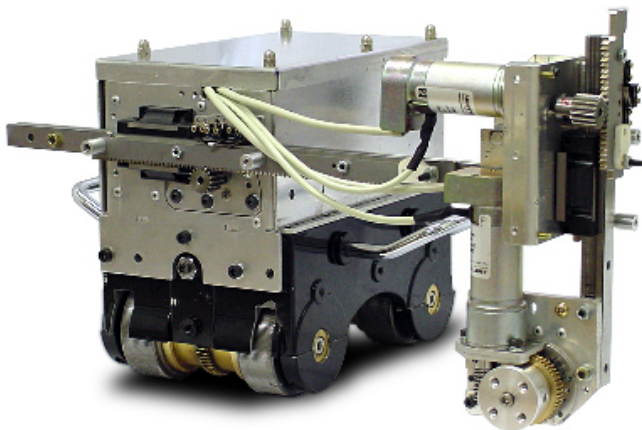


Figura 12 – Foto do equipamento em seu estágio final de desenvolvimento

Para realizar esse controle em malha fechada, optou-se por utilizar servo motores CC. Os mesmos são alimentados em 24V CC e apresentam em seu conjunto um sistema com elevada relação de redução e um encoder com resolução de 2000 linhas. Comparando-se com motores de passo, há grande diminuição de tamanho, peso, consumo de corrente, além de proporcionar maior resolução de posicionamento.

Dada à escolha de um servo motor CC, juntamente com o objetivo de se realizar o controle em malha fechada da velocidade de soldagem, foi selecionado um servo driver com características superiores a outros disponíveis no mercado, a

saber:

- Acionamento de motores CC com escovas até 100V/20A;
- Controle de movimento através de STEP/DIR, isto é, através de pulsos, de maneira semelhante ao que se tem nos controladores de motores de passo;
- Proteções contra sobre e sub-tensão, corrente de pico, erro de seguimento, com grande flexibilidade de ajuste;
- Comunicação com encoder diferencial de três canais para proporcionar maior confiabilidade na transmissão dos sinais;
- Compensador P.I.D. (proporcional, integral e derivativo) e variáveis ajustáveis via software, eliminando assim, a utilização de potenciômetros;
- Baixo custo.

Os ajustes do servo driver são configuráveis por um software através da porta paralela do computador. Além de ajustar o controlador P.I.D., são também configuráveis uma grande gama de variáveis, tais como: inversão de polaridade do servo motor, configuração do encoder, corrente limite e valor admissível para o erro de seguimento.

A análise da estrutura e dos movimentos realizados pelo Tartilope V4, gerou a idéia de controlá-lo da mesma forma que um equipamento CNC. Nessa linha de pesquisa, foi selecionado inicialmente o controlador DeskCNC, o qual apresenta um hardware, que se comunica com o computador através da porta serial e um software, que possibilita utilizar o próprio teclado do computador para deslocar o manipulador, facilitando assim as definições de trajetórias de soldagem.

Outra opção de controlador, que é denominado Mach3, está sendo estudada pelo fato de possuir uma interface gráfica extremamente flexível, podendo-se criar um ambiente dedicado a cada processo de soldagem. Tal controlador não apresenta hardware e sim um programa que roda em ambiente Windows, comunicando-se com o mundo externo através da porta paralela. Sendo assim, caso se tenha a necessidade de um maior número de entradas/saídas, basta instalar portas paralelas sobressalentes.

Para o futuro, o objetivo é substituir o computador convencional por uma plataforma computacional embarcada, gerando assim uma redução significativa no tamanho da parte de controle. Além da preocupação de ter um equipamento compacto, também se deseja que o mesmo possua fácil operacionalidade. O intuito, então é implementar uma tela de 5 polegadas, sensível ao toque (touchscreen), onde o operador teria acesso a todos os comandos do manipulador. Na programação de trajetórias almeja-se aplicar a captura de pontos através do modo de ensinamento (teaching).

VI. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos com os processos alternativos testados neste projeto, pode-se afirmar que a soldagem convencional TIG com varetas não tem mais razão de ser

utilizada. Ela é extremamente lenta, agravando a problemática de uma situação incomoda e perigosa de soldagem. Todas as novas opções testadas oferecem um potencial muito bom de aplicação. As vantagens específicas de cada um dependem do tamanho e localização dos defeitos a serem reparados.

Quanto à versão de processo MIG/MAG mais adequada (transferência por curto circuito ou transferência pulsada) ainda não está perfeitamente definida, pois todas as situações produziram resultados muito bons, em razão do adequado projeto dos equipamentos.

Quanto ao processo TIG com alimentação contínua de arame, tem-se uma solução com produção um pouco menor que a MIG/MAG, mas bastante maior que o TIG convencional. Produz uma camada de depósito com melhor controle de geometria e, por isso, seria mais indicada para a reparação de regiões não tão extensas e sem a automatização pelo TARTÍLOPE V4.

Quanto ao desenvolvimento do processo plasma com adição de pó, houve um grande avanço tecnológico, principalmente no que tange a torná-lo factível para a soldagem em posições diferentes da plana. Todavia, há que ser feita uma adequação na geometria da tocha para melhorar a sua ergonomia e possibilidade de melhor acesso nas ondulações dos tubos.

Quanto ao desenvolvimento do sistema automático de soldagem vários problemas foram enfrentados do ponto de vista de projeto e construção mecânica, mas todos superados. Entretanto, o sistema de acoplamento das rodas com o painel de tubos sendo modificado por não ter logrado sucesso um com sistema magnético. O equipamento escorregava sobre os tubos, o que conduziu a um projeto de acoplamento com pinhão e cremalheira.

Finalmente é adequado se comentar sobre a fonte de soldagem que também foi projetada e construída para atender aos vários processos de soldagem citados. De fato, neste final de projeto se dispõe de duas opções. Grande parte dos experimentos foi realizada com o modelo, que suporta correntes de até 140 a 160 A (Figura 5) em dependência do processo de soldagem. Devido à possibilidade de na obra ser necessária maior potência, foi empreendido um projeto de uma fonte de maior capacidade. Entretanto, a concepção iniciada ainda não logrou êxito completo e, por isso, foi construída uma fonte com performance intermediária, baseada no modelo menor. Este equipamento, com capacidade para 280 A, é apresentado na Figura 13. Mesmo ainda não sendo a concepção planejada inicialmente, esta fonte atende aos requisitos de potência de todos os processos de soldagem testados e é leve e de pequeno volume, requisitos inicialmente apresentados para o tipo de serviço.



Figura 13- Fonte de soldagem com tecnologia de inversor com capacidade para 280 A

VII. 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, Fís. Tiago Vieira da Cunha e Eng. Renon Carvalho. 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.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Felipe, L., Santo, E.O. E. , IISEMASE, CO-GUT-01, 1998 - GCOI/SCM
- [2] Dutra, J. C.
<http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2006/materia_revista_p&d_aneel-2006.pdf> - acessado em 03/07/2007
- [3] Dutra, J. C.
<http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/larry_flex.php> - acessado em 03/07/2007
- [4] Dutra, J.C.
<http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/>

caneta_alimentadora.php> acessado em 03/07/2007

[5] Vergara, V. INOVAÇÃO DO EQUIPAMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO ALIMENTADO COM PÓ (PTAP) PARA SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO . Tese de doutorado UFSC 02/2005

[6] Dutra, J.C.

<http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php> - acessado em 03/07/2007