

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“AUTOMAÇÃO DE MÁQUINA DE SOLDA POR PONTOS PARA MODELAGEM MATEMÁTICA DO PERFIL DE TEMPERATURA NO AQUECIMENTO DA SOLDAGEM DE TOPO DE AÇO AISI 409”

Attenister Tarcísio Rêgo

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

ORIENTADOR: Prof. José Rubens G. Carneiro, Dr.

Banca Examinadora:

Prof. José Rubens G. Carneiro, Dr. – PUC Minas – Orientador
Prof. Paulo J. Modenesi, PhD - UFMG – Examinador Externo
Prof. Denílson Laudaes Rodrigues, Dr. – PUC Minas – Examinador Interno

Belo Horizonte, 2 de abril de 2004



À Dea, Renata, Tarcísio, Cibelle e Thaís pela
compreensão e paciência pela ausência nos
momentos de dedicação aos estudos.



ABC Amber PDF Merger
Please register to remove it

AGRADECIMENTOS

Ao amigo Pedro Paiva Brito pela sua inestimável dedicação e comprometimento.

Ao amigo e orientador José Rubens, pelo incentivo, dedicação e espírito acadêmico.

A esposa Déa pela compreensão e incentivo nas horas mais difíceis.

Ao filho Tarcísio Flávio Umbelino Rêgo, pelo apoio prestado.

A filha Renata Umbelino Rêgo, pelo seu apoio.

Ao amigo Tarcísio José de Almeida pela boa vontade em ajudar.

Ao amigo Flávio Maurício de Souza por sua colaboração.

Aos meus pais Attenister e Violeta pelo incentivo e dedicação.

Ao apoio das pessoas que de várias formas participaram da elaboração deste trabalho:

Carlos Eduardo dos Santos

Diego Barros Stelling

Donato Vitelli

Gilmar Cordeiro da Silva

Ivan José de Santana

Marcio Jose da Silva

Paulo Cesar de Melo Bernardo

Pedro Kapler

René Silva Daré

Thiago Martins de Vasconcelos

Vinícius Maia De Sá

Warley Magno Faria



RESUMO

Este trabalho objetiva a automação de um equipamento para a modelagem do perfil de temperatura no aquecimento na soldagem de topo, construído a partir de uma máquina de soldagem por pontos. Na automação, foi utilizada uma fonte tiristorizada CA/CA para a alimentação, software de aquisição, controle e supervisão, fontes de alimentação, sistema para condicionamento de sinal e termopares. Foi desenvolvido, também, um sistema para controle de pressão, utilizando-se uma válvula pneumática acionada por motor de passo. A automação do equipamento possibilitou o controle da corrente e da tensão no primário e secundário, medição de temperatura, da corrente e tensões primárias e secundárias e resistência de contato. Foi adquirido o perfil térmico em chapas de aço de 1,6mm de espessura, do aço AISI 409, nas distâncias da linha de soldagem de 3, 5 e 7mm, em tempos de soldagem de 3,4,5,6 e 8s. Alguns modelos matemáticos existentes na literatura que calculam esse perfil térmico foram testados para verificar o ajuste dos mesmos na modelagem do perfil de temperatura obtido e monitorado pelo software, durante o teste de soldagem de topo em chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 409. A partir dessas correlações, o erro médio obtido na modelagem das curvas experimentais foi de 15,29% com desvio padrão de 10,23. A não aplicabilidade da solução de Grong (Grong, 1994) para o modelo de Rosenthal (Rosenthal, 1935), se justifica, pela consideração do rendimento térmico decrescente em função da distância e, possivelmente, pela não consideração do fluxo volumétrico e formação de rebarba que desloca os pontos de fixação dos termopares em relação à linha de soldagem e modifica a unidirecionalidade do fluxo de calor.



ABSTRACT

The objective of this work was the automation of equipment, adapted from a spot-welding machine, for the mathematical modeling of the heating curves of a butt welding process. To this end, an AC/AC SCR power source was used, as well as data acquisition, supervision and control software, pressure transducers, amplification system and thermocouples. In addition, a system for pressure control based on a pressure valve and a stepper motor was developed. Through the automation process, control of current and tension of the primary and secondary phase of the machine was made possible, as well as the measuring of the temperature in the heat affected zone, current and tension at the primary and secondary phase and contact resistance. The temperature was acquired in AISI 409 steel sheets, with 1,6mm width, at the distances of 3, 5 and 7mm from the welding joint, with welding times of 3, 4, 5, 6 and 8s. Some of the existing mathematical models for the temperature distributions were tested through comparison with the data collected by the software, during the welding of AISI 409 ferritic stainless steel plates. This was done in order to investigate the viability of the application of such models in the determination of the temperature curves of the afore-mentioned process. The mean error found in this modeling was 15,29%. Grong's solution (Grong, 1994) for the model proposed by Rosenthal (Rosenthal,1935) was not found to be applicable, due to the consideration regarding thermic performance, which decreases with the distance from the welding point.



Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Motivação

Um sistema de exaustão automotivo moderno típico pode ser dividido em duas partes conhecidas como extremidades quente e fria. A extremidade quente inicia-se diretamente na saída dos gases do motor, compreendendo o coletor, o tubo primário e o catalisador. Em sistemas de exaustão mais elaborados existe, também, uma junta flexível, que tem a função de absorver vibrações do motor que poderiam provocar danos ao sistema. A extremidade fria inicia-se logo após o catalisador, consistindo-se principalmente do tubo intermediário, do abafador e do tubo secundário.

Os sistemas de exaustão com catalisadores geralmente trabalham em temperaturas mais altas que os sem catalisadores e requerem materiais com maior resistência a altas temperaturas e à corrosão, como os aços inoxidáveis. Os aços inoxidáveis são utilizados com mais frequência nas peças que estão entre o catalisador e o motor, uma vez que qualquer processo de corrosão que se inicie antes do catalisador pode gerar resíduos que ficarão aderidos na superfície do corpo catalítico e diminuir a eficiência da catálise. Automóveis mais sofisticados utilizam na extremidade quente peças de aço inoxidável revestidas com liga alumínio-silício (93% Al – 7% Si), sendo que a função básica do revestimento é



manter o apelo visual do produto, pois o aço inoxidável, com apenas alguns dias de serviço no sistema de exaustão, adquire coloração escura, sem, contudo, prejuízo de suas qualidades metalúrgicas (Baptista, 2002).

Em muitos projetos os aços inoxidáveis são utilizados, também, na extremidade fria, porém, para carros mais populares, é comum a utilização de aço baixo carbono revestido com a mesma liga alumínio-silício (93% Al – 7% Si). Alguns projetos optam, inclusive, por montar as peças internas em aço inoxidável e revestidas externamente com o aço aluminizado, reduzindo assim o custo que seria de uma peça com a espessura total em inoxidável.

Os veículos movidos a álcool e diesel, conforme as leis brasileiras atuais, não necessitam de catalisadores em seus sistemas de exaustão, praticamente não utilizando aço inoxidável em seu projeto, sendo, por esta razão, excluídos deste estudo.

Os aços inoxidáveis ferríticos com baixos teores de cromo atendem às exigências da aplicação de resistência à corrosão, desempenho em alta temperatura e boa tenacidade para serem conformados na configuração de tubos. Os tubos de um sistema de exaustão são fabricados através do processo de soldagem por indução de alta frequência que, devido à sua alta produtividade, permite um custo reduzido do produto. A soldagem por indução de alta frequência é um processo de soldagem por deformação pertencente ao segmento de soldagem por resistência elétrica, que utiliza o calor gerado na interface dos materiais pela passagem de um fluxo de corrente elétrica (efeito Joule) simultaneamente com a aplicação de pressão (Cary, 1998; Wright, 2002; Martin, 1971 e Rudd, 1957).



Os equipamentos de soldagem por indução de alta frequência possuem, em geral, um alto índice de automatização e são caracterizados por serem equipamentos compactos e de alto valor agregado (Welding Handbook, 1991). No entanto, a alta produtividade desse equipamento torna-o inadequado para a realização de testes de simulação, uma vez que acarreta desperdício elevado de matéria-prima, aumentando o custo. Santana et al (Santana, 2002) buscaram o desenvolvimento de um equipamento utilizando uma máquina de soldagem por pontos, para simular o processo de soldagem por indução de alta frequência industrial. Observou-se a necessidade de quantificação de parâmetros de processo no equipamento desenvolvido para propiciar maior flexibilidade e reprodutibilidade dos resultados industriais. Em razão da necessidade da automação, são objetivos deste trabalho:

1.2 – Objetivos

- Automação do equipamento com a medição dos seguintes parâmetros: tensão e corrente de soldagem no primário, corrente no secundário, resistência de contato e força aplicada aos corpos-de-prova, tempo de soldagem e perfil de temperatura na zona termicamente afetada;
- Obtenção das curvas de aquecimento para diferentes tempos (3,4,5,6 e 8s) e distâncias da linha de soldagem (3, 5 e 7mm);
- Verificar a eficiência de modelos matemáticos existentes na literatura na quantificação das curvas de aquecimento obtidas experimentalmente.



1.3 – Estado da Arte

Com a evolução dos processos de soldagem e com o aumento considerável da automação de tais sistemas, faz-se necessário um adequado sensoramento das máquinas responsáveis por tais processos. Uma boa automação implica em um bom controle das variáveis do processo. Isso pode ser conseguido com a instalação de sensores, controladores e computadores de maneira correta e a implementação de modelos matemáticos que possam assegurar todas as condições necessárias à obtenção de uma boa solda.

Considerando a não existência na literatura de um modelo matemático específico para a situação proposta neste trabalho, vimos a necessidade de obtê-lo a partir de dados alcançados experimentalmente.

1.4 – Escopo da Proposta

Este trabalho apresenta um estudo experimental do aquecimento na soldagem de topo do aço inoxidável ferrítico AISI 409, nas distâncias de 3, 5 e 7mm da linha de soldagem e com tempos de soldagem de 3,4,5,6 e 8s e a sua modelagem matemática.

No Capítulo 2 foram identificados alguns trabalhos de pesquisadores que estudaram o processo de soldagem de indução de alta frequência e por pontos, relacionando-o com aspectos microestruturais e propriedades.

No Capítulo 3 apresenta-se a metodologia e todo aparato experimental utilizados para a realização dos ensaios.



Os resultados experimentais dos ensaios realizados são apresentados no Capítulo 4, por meio de gráficos, acompanhados de comentários e análises pertinentes, juntamente com a modelagem proposta. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.



Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis constituem um grupo de ligas especiais desenvolvidas para resistir à corrosão. O principal elemento de liga é o cromo. Outros elementos, com destaque para Ni, Mo, Ti, Si e Nb são adicionados de modo a conferir estrutura e propriedades mais adequadas para aplicações específicas. Os tipos de aços inoxidáveis encontrados são: os austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

Em geral, é necessária uma quantidade de aproximadamente 12% Cr para conferir propriedades de inoxidabilidade em ligas de ferro (Baptista, 2002). Nesse sentido, as vantagens em relação a outros aços, residem na capacidade do cromo formar camadas de óxido altamente aderentes na superfície do material. O segundo elemento de liga usualmente presente em aços inoxidáveis é o níquel. O níquel é responsável pela estabilização da estrutura cúbica de face centrada do ferro.

O mercado anual de aço inoxidável no mundo representa 16 milhões de toneladas e cresce a um ritmo de 10% ao ano. O segmento de transportes, cujo maior consumo são as peças para o sistema de exaustão de automóveis,



representa 16% desse mercado (Baptista, 2002).

2.2 – Aço Inoxidável Ferrítico

Os aços inoxidáveis ferríticos são essencialmente ligas Fe-Cr que possuem aproximadamente 12% Cr, ou mais, em uma matriz primariamente ferrítica. O aço inoxidável AISI 409 possui baixo teor de cromo (11%) e adição de titânio e nióbio como elementos estabilizadores da fase ferrítica. O Nb e o Ti endurecem a ferrita por solução sólida e formam carbonitretos, o que melhora as propriedades mecânicas a altas temperaturas (Fujita, 1996).

Os aços inoxidáveis ferríticos vêm, a partir da década de 1980, chamando atenção da indústria em virtude de seu baixo custo e da sua maior resistência à formação de trincas devidas à corrosão sob tensão em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos. Os aços inoxidáveis ferríticos não são temperáveis por via de tratamento térmico e possuem propriedades ferromagnéticas. A maior limitação na utilização de aços inoxidáveis ferríticos é a perda de resistência à corrosão e ductilidade como consequência da exposição às altas temperaturas durante a soldagem e tratamento térmico. A Tabela 2.1 mostra a composição química média de alguns aços inoxidáveis ferríticos.

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam problemas de soldabilidade metalúrgica: sensitização, crescimento de grão e fragilização por hidrogênio. A sensitização de aços inoxidáveis ferríticos ocorre acima de 925°C



Tabela 2.1 – Composição química média de alguns aços inoxidáveis ferríticos (Baptista, 2002).

AISI	C	Cr	Ni	Mo	N	Outros
405	0,08	11,5-14,5	-	-	-	0,10-0,30%Al
409	0,08	10,5-11,75	0,5	-	-	6*(%C) até 0,75%Ti
430	0,12	16-18	-	-	-	-
439	0,12	16-18	-	0,75-1,2	-	6*(%C) até 0,75%Ti
444	0,025	17,5-19,5	1,0	1,75-2,5	0,025	[0,20+4(C+N)] até 0,80% (Ti +Nb)

e a imunidade à corrosão intergranular é restaurada através de recozimento entre 650 e 815°C por um tempo de 10 a 60min (Uhlig, 1971).

Devido aos altos valores de temperatura de sensitização, a degradação da junta soldada nos aços inoxidáveis ferríticos ocorre na região imediatamente adjacente ao metal de solda.

A diminuição da quantidade de carbono não se mostra eficiente na redução da degradação da solda nos aços inoxidáveis ferríticos. De acordo com Kou (Kou, 1987), mesmo aços com baixo teor de carbono (0,009% para o aço 430), são susceptíveis a degradação da junta soldada. Como a taxa de difusão de carbono é muito maior em estruturas de corpo centrado (ferrita) do que em estruturas de face centrada (austenita), o rápido resfriamento a partir de temperaturas superiores a 925°C não suprime eficientemente a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão em aços inoxidáveis ferríticos. Pela mesma razão, a diminuição do teor de carbono não reduz a precipitação de carbonetos, a não ser que o teor de carbono seja extremamente baixo (por exemplo 0,002% para o aço 446). De acordo com Uhlig (Uhlig, 1971),

recozimento pós-soldagem entre temperaturas de 650 e 815°C facilita a difusão de átomos de cromo para a região de baixo-cromo adjacente aos precipitados de carbonetos de cromo auxiliando, pois, o restabelecimento de uma composição uniforme de cromo. Como consequência, tem-se uma ZTA resistente à corrosão intergranular.

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma elevada tendência ao crescimento de grão a temperaturas elevadas. Este crescimento se inicia à temperatura de aproximadamente 870°C (Cary, 1998) e aumenta rapidamente, à medida que a temperatura cresce. O crescimento de grão na junta soldada ocorre na região imediatamente adjacente à zona fundida, em que a faixa de temperatura está entre 1000°C e a temperatura solidus, o que aumenta a temperatura de transição dúctil-frágil. Esse crescimento de grão é facilitado pela inexistência de carbonetos/carbonitreto precipitados nos contornos de grão. A temperatura de dissolução desses carbonitreto pode ser determinada pelas expressões propostas por Narita *et al* (Narita, 1975). Quanto maior o tempo de aquecimento acima dessa temperatura de dissolução de precipitados, maior é o crescimento de grão ferrítico. Assim, é importante controlar a energia de soldagem e a eficiência do processo para reduzir o crescimento de grão ferrítico (Easterling, 1992).

Os aços inoxidáveis ferríticos de baixo cromo apresentam certa tendência à formação de martensita nos contornos de grão na zona termicamente afetada, o que acarreta em aumento da dureza. Isto leva à diminuição da ductilidade e da resistência à corrosão na solda. Em secções maiores, pré-aquecimento à 200°C pode se mostrar útil para evitar essa formação de martensita.



O revenimento da martensita através de tratamento térmico pós-soldagem à temperatura de 800°C melhora a resistência ao entalhe significativamente (Castro e Cadenet, 1974). A adição de 0,5% de titânio ou 1% de nióbio aumenta a estabilidade da ferrita- α , suprime a formação de austenita e martensita e forma carbonetos a altas temperaturas (portanto, o teor de carbono é reduzido bem como a tendência de formação de martensita). Kou e Le (Kou, 1987) notaram que a transformação ferrita-austenita (α - γ) e, por conseguinte, a formação de martensita, pode ser suprimida através de uma rápida têmpera durante a soldagem. O crescimento excessivo de grão pode ser evitado, utilizando-se menor aporte térmico na soldagem. Sugere-se, também, que elementos formadores de nitreto e carboneto tais como B, Al, V e Zr sejam adicionados aos aços inoxidáveis ferríticos para suprimir o crescimento de grão durante a soldagem (Kath e Dickinson, 1981).

2.3 – Máquina de Soldagem por Pontos

A máquina de soldagem por pontos pode ser entendida, sob o ponto de vista elétrico, como um transformador monofásico. O funcionamento do transformador é baseado em fenômenos de mútua indução presentes entre dois circuitos isolados eletricamente, porém conectados magneticamente. A Figura 2.1 mostra o transformador composto de dois enrolamentos (primário e secundário) que possuem um número distinto de espiras. Ao se aplicar uma determinada tensão V_1 no primário, ocorrerá a indução de uma tensão no secundário V_2 , resultante da ação do campo magnético ϕ . De modo



Capítulo 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1- Materiais

O material utilizado para a confecção dos corpos-de-prova foi o aço inoxidável ferrítico AISI 409, na forma de chapa com dimensões 50x20x1,6mm, utilizado para a fabricação de tubos de descarga para automóveis. As amostras para análise química têm seção de 42 x 42 mm² e foram lixadas com óxido de alumínio. A análise química dos elementos foi feita por espectrometria de emissão ótica, em equipamento marca SRS3000. Os elementos C e S, em equipamento Leco CS444LS, enquanto que para N e Al foi realizada em espectômetro ótico de emissão.

A preparação do corpo-de-prova para a soldagem foi feita através de corte e, em seguida, fresamento das superfícies, conforme mostrado na Fig. 3.1.

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo do trabalho é a modelagem da distribuição de temperatura ao longo do metal de base, utilizando-se um equipamento de soldagem por resistência. Santana (Santana, 2002) desenvolveu a parte mecânica desse equipamento, modificando-o através da inserção de garras, instalação de célula de carga e temporizador (Fig. 3.2).



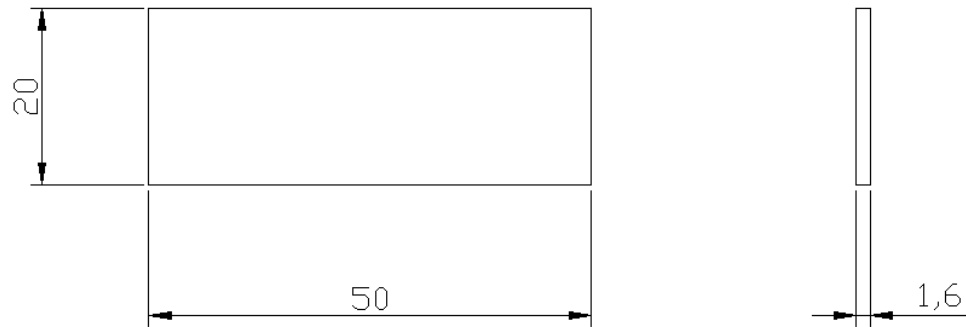


Figura 3.1 – Dimensões do corpo-de-prova de aço inoxidável AISI 409, utilizados nos experimentos.



Figura 3.2 – Máquina de solda a ponto utilizada no desenvolvimento do equipamento para simulação do processo de indução para a obtenção dos dados referentes à ZTA e de rebarba (Santana, 2002).

Foi feita a medição da ZTA e do índice de rebarba. Neste trabalho, para a automação e obtenção do perfil de temperatura de aquecimento da soldagem de topo do aço inoxidável ferrítico AISI 409, foram adotadas as seguintes etapas, descritas a seguir:

- Projeto do circuito de alimentação para o controle da tensão de alimentação da máquina de solda, da corrente do primário da máquina e da taxa de acréscimo desta corrente com o tempo de soldagem;
- Projeto do sistema eletro-mecânico, utilizando-se motor de passo para controle e monitoramento da pré-carga e carga aplicadas;
- Projeto do sistema de amplificação para aquisição dos dados de temperatura;
- Elaboração do software para obtenção dos dados e controle do processo de soldagem e do sistema supervisor;
- Execução de pré-testes para aferição do equipamento e levantamento de dados relativos ao processo.

3.2 – Projeto do Circuito de Alimentação

A Figura 3.3 apresenta o esquema geral da alimentação e controle da máquina de solda com as modificações gerais para a instrumentação da mesma. O controle da corrente de soldagem foi feito pelo controle da tensão de alimentação do primário da máquina de solda, obtido a partir de uma fonte AC-AC tiristorizada (Apêndice A), onde foram substituídos os tiristores de 16A por 80A.



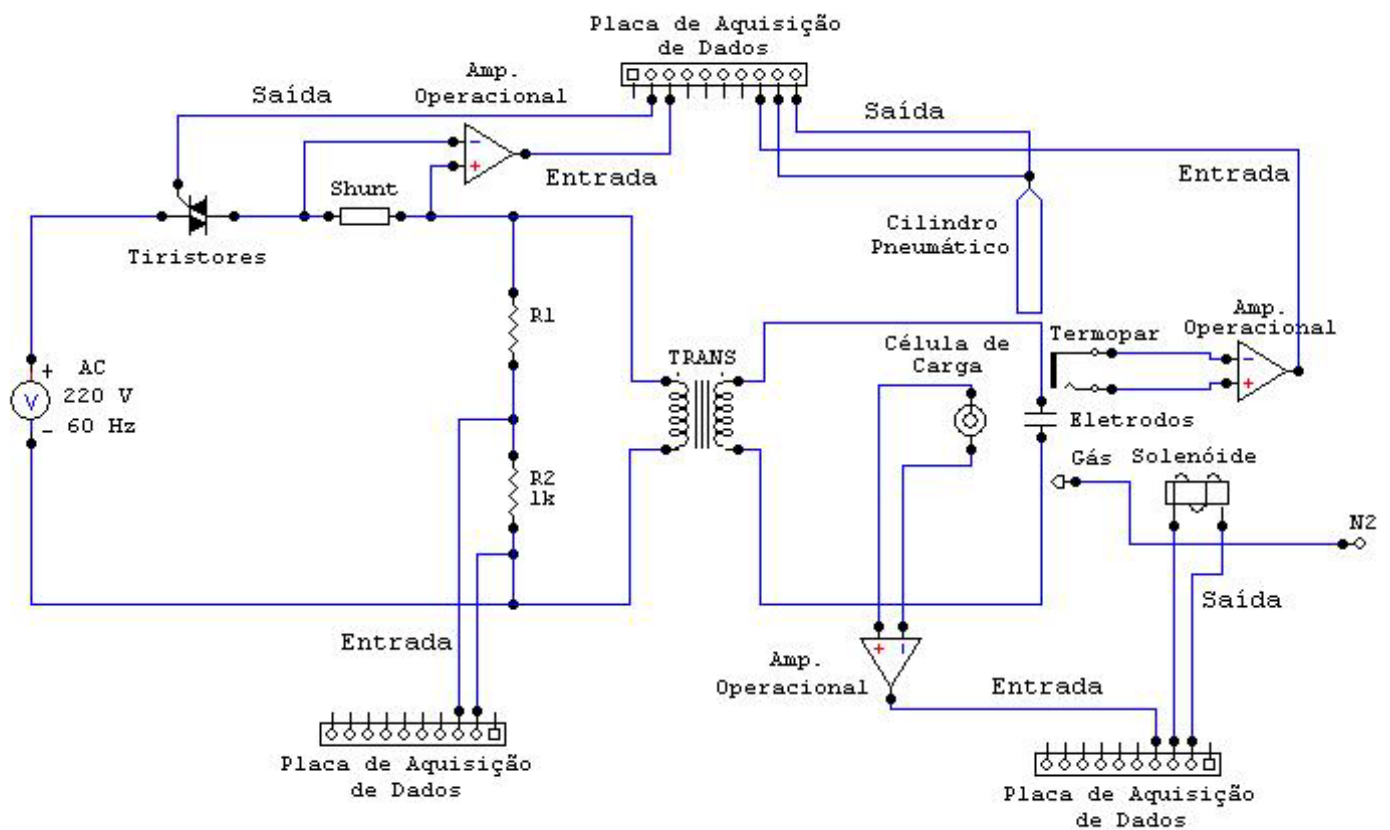


Figura 3.3 – Esquema geral do circuito de alimentação e controle da máquina de solda.



Foi modificado o circuito de gatilhamento com o objetivo de propiciar o controle do valor e da taxa de crescimento da tensão através do computador. Foram, também, acrescentados divisores de tensão na entrada e na saída da fonte com o objetivo de determinar a tensão instantânea aplicada à máquina.

Para a medição da corrente no primário, utilizou-se um transformador de corrente cuja relação é de 75/5. Esse transformador de corrente (TC) possui as seguintes características: Tipo TI – 44 – HB, 600V, 5VA, precisão de $\pm 1\%$.

Para a aquisição do valor de corrente no primário, foi instalada uma placa de aquisição de dados Advantech de 12bits, com frequência de aquisição de dados de 1kHz modelo PCL-718B. Os sinais de tensão de entrada e de saída obtidos através de divisores de tensão instalados na fonte foram aplicados diretamente às entradas analógicas da placa de aquisição. Uma vez que a placa de aquisição de dados trabalha com sinais de entrada da ordem de 0 a 5V, e os termopares geram sinais da ordem de milivolts, foram construídas duas placas de condicionamento de sinal, onde os sinais foram amplificados e levados, posteriormente, através de cabos de sinal à placa de aquisição. Os sinais amplificados coletados na placa de aquisição Advantech não apresentaram estabilidade, em razão de ruídos. Tais ruídos foram eliminados através de blindagem dos cabos, aterramento do painel, isolamento e aterramento em poço próprio da carcaça da máquina de solda e instalação de filtros capacitivos.

A obtenção da corrente de soldagem foi feita através da instalação, no secundário, de um shunt com resistência de $0,005\Omega$ e corrente de 750A. A tensão sobre o corpo-de-prova foi aplicada diretamente a um transformador,



Capítulo 4

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1- Experimentos Preliminares

Nos experimentos preliminares foram levantadas através da placa de aquisição de dados PCL 718B, as forma de onda da tensão primária e da tensão secundária. Foram realizados, também, testes a vazio e testes em curto-circuito e oscilogramas para levantamento das características elétricas da máquina de soldagem a ponto.

A partir dos sinais de tensão e corrente no primário e no corpo-de-prova, coletados dinamicamente na placa de aquisição de dados a uma frequência de 1kHz, foi possível calcular a potência elétrica. A Figura 4.1 mostra a evolução da tensão do primário com o tempo de soldagem de 3 segundos. A forma de onda da tensão primária é senoidal, com frequência de 60Hz, durante o tempo de soldagem. A aquisição de dados foi feita a uma frequência de 1kHz o que permitiu recompor o sinal senoidal como pode ser visto na Fig 4.1. As tensões de pico foram da ordem de 312V, uma vez que a tensão de pico é igual à tensão eficaz multiplicada por $\sqrt{2}$. A Figura 4.2 mostra a evolução da corrente do primário com o tempo de soldagem de 3s.



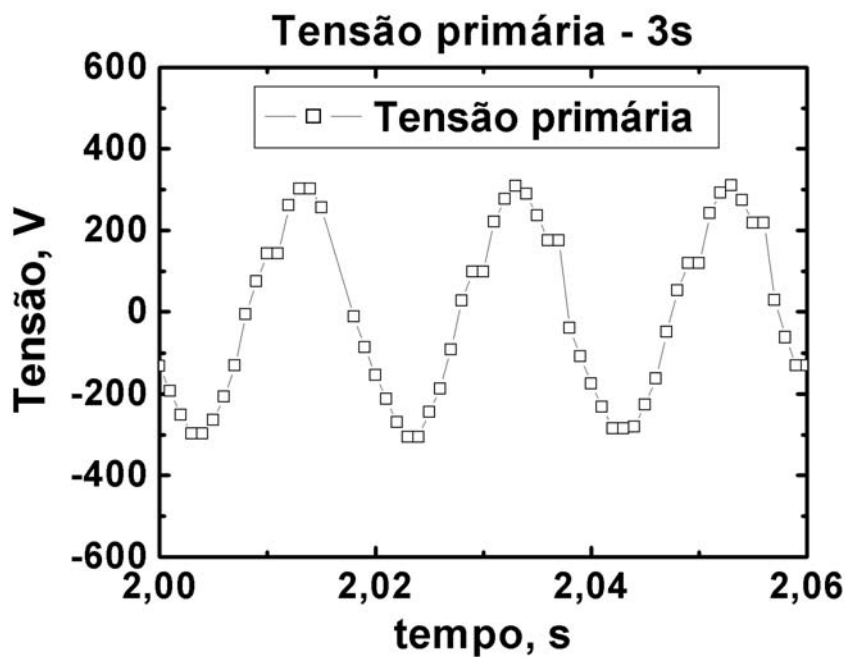


Figura 4.1 – Forma de onda da tensão primária, obtida para um tempo de soldagem de 3s, no intervalo de 2,00 a 2,06s.

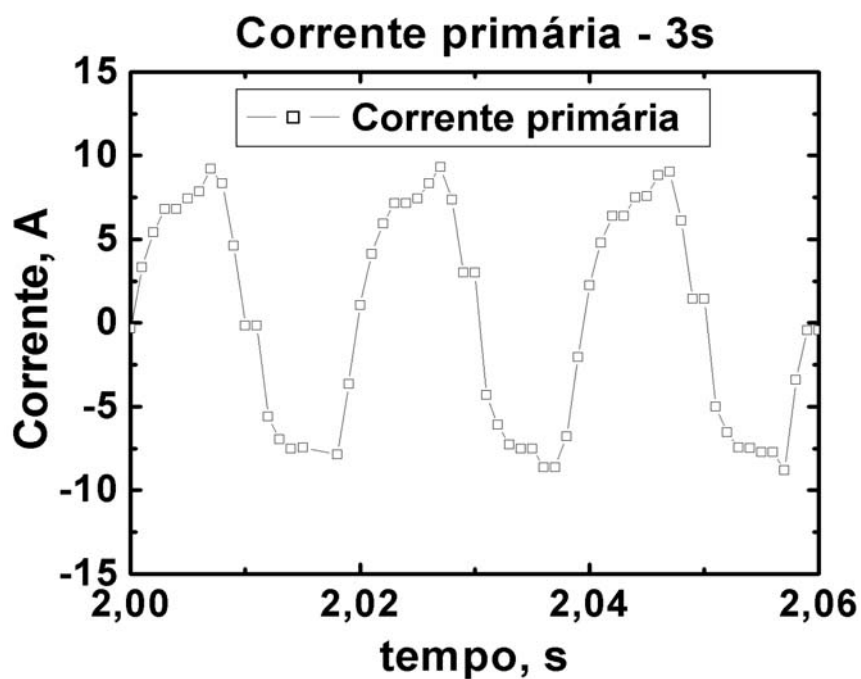


Figura 4.2 – Forma de onda da corrente primária, obtida para o tempo de soldagem de soldagem de 3s, para o intervalo de 2,00 a 2,06s.



A Figura 4.3 mostra a evolução da tensão sobre o corpo-de-prova com o tempo de soldagem de 3s. Observa-se que o crescimento da tensão ocorreu a partir do tempo de aproximadamente 1,5s. Este tempo se deve à aquisição e atualização dos dados no sistema supervisor e posterior envio do sinal de energização ao relé auxiliar pela placa de aquisição de dados e, também, ao tempo necessário para a energização do contator principal, que é responsável por conectar a máquina de solda a ponto ao sistema de alimentação. Nota-se, também, na Fig. 4.3, o tempo de crescimento da tensão até 2,7V é reduzido (aproximadamente 100ms). A partir daí, a variação de tensão ocorrida durante a soldagem é devido à variação da resistência elétrica total do corpo-de-prova (R_t). Essa, por sua vez, é afetada pela resistência das chapas (que cresce com o aumento da temperatura) e pela diminuição da resistência de contato (devido ao aumento da área efetiva de contato entre as chapas).

A Figura 4.4 mostra a evolução da corrente de soldagem secundária versus tempo de soldagem. A tensão e a corrente são medidas diretamente sobre o corpo-de-prova. Nota-se que a corrente, de modo análogo à tensão, cresce rapidamente até atingir 900A aproximadamente e, após o tempo de soldagem de 3s, cai a zero. No intervalo de 1,3 a 4,3s, observou-se um decréscimo de 100A na corrente secundária. A Figura 4.5 mostra a evolução da corrente e tensão no secundário com o tempo de soldagem, para o tempo de soldagem de 3s. Nota-se que durante o aquecimento e fusão no contato entre as chapas, a corrente, após atingir 900A, decresce até 800A no final de soldagem.



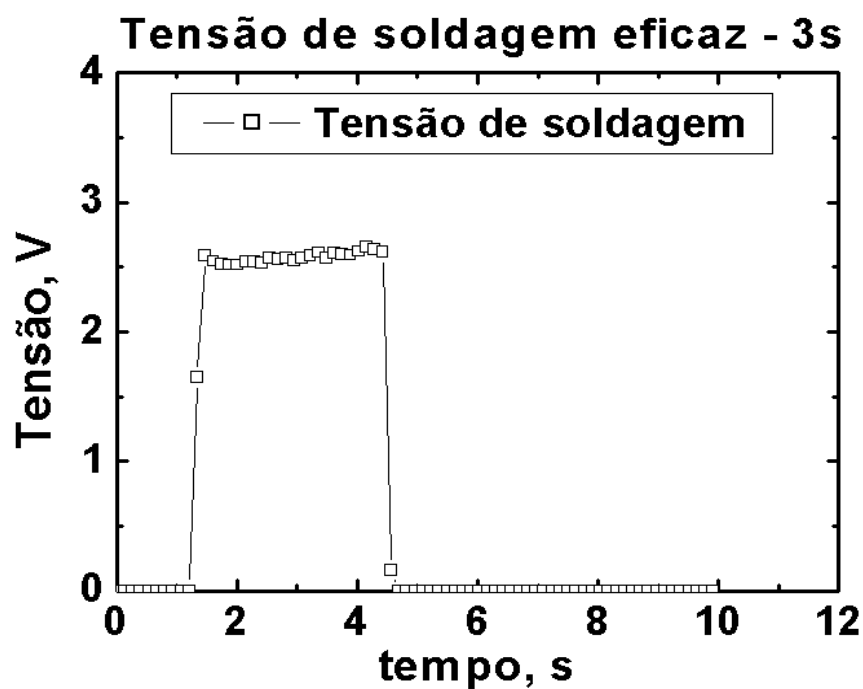


Figura 4.3 – Tensão eficaz sobre o corpo-de-prova, obtida para o tempo de soldagem de 3s.

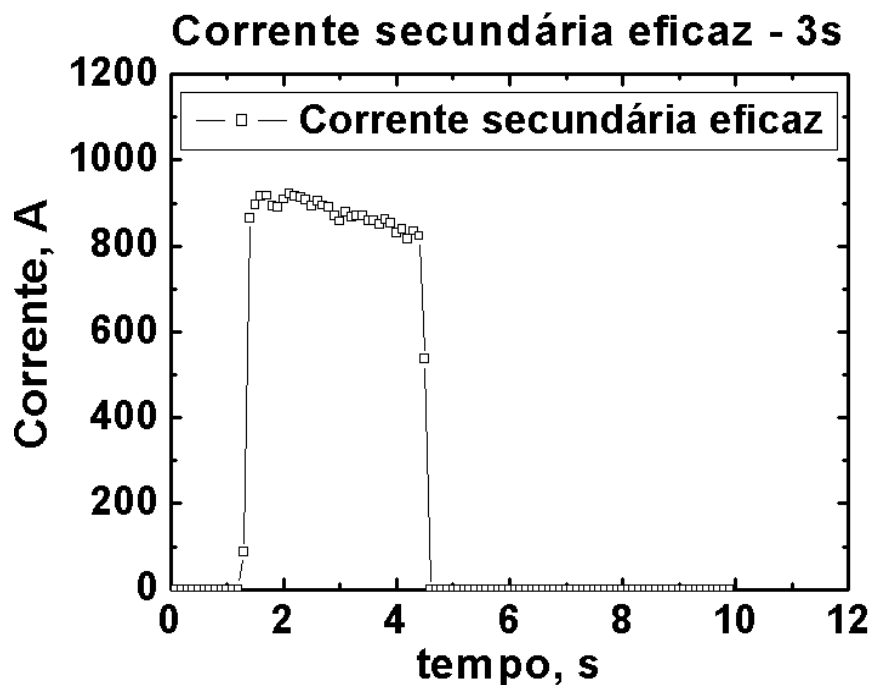


Figura 4.4 – Corrente secundária eficaz, obtida para o tempo de soldagem de 3s.



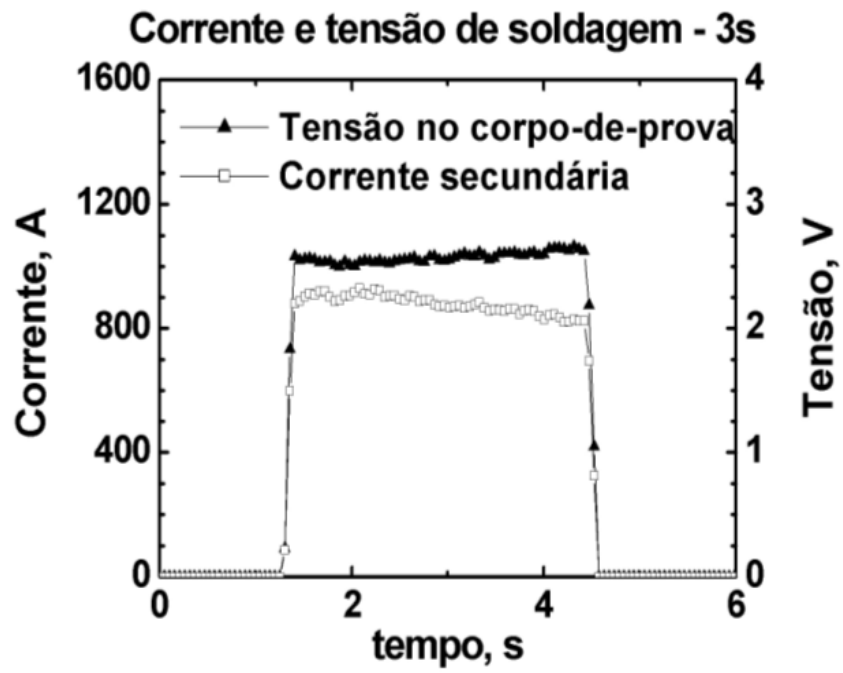


Figura 4.5 – Corrente secundária e queda de tensão sobre o corpo-de-prova, em fase, obtidas para o tempo de soldagem de 3s.



Capítulo 5

CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas dos resultados da automação da máquina e ensaios experimentais realizados durante o trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

- A elaboração do sistema supervisorio que permite a operação automática e manual do sistema trouxe, como benefício, o controle e monitoração das variáveis do processo, tais como: tensão e corrente primárias, tensão e corrente secundárias e temperatura.
- Através do sistema supervisorio é possível identificar com rapidez a atuação dos elementos de controle tais como: fonte tiristorizada, pistão pneumático e válvula reguladora de pressão.
- O sistema proposto para medição da resistência dinâmica através da medição da tensão e corrente sobre os corpos-de-prova permitiu avaliar a resistência dinâmica com auxílio da interface com a placa de aquisição de dados e o sistema supervisorio.
- As medidas (propostas no trabalho, item 4.2 na página 97) para eliminação dos ruídos possibilitaram obtenção adequada dos sinais de temperatura dos termopares.



- A elaboração do software de gerenciamento para a placa de aquisição de dados Advantech PCL 718B permite a sua utilização em ambiente de programação Windows.
- O circuito equivalente referido ao primário é mostrado na Fig 4.13 e os parâmetros são mostrados na tabela abaixo::

Derivação	$R_{eq} (\Omega)$	$X_{eq} (\Omega)$	$R_t (\Omega)$
1	9,80	6,03	0,0025
2	8,26	4,36	0,0025
3	6,64	3,57	0,0025
4	5,36	3,34	0,0025

- A não aplicabilidade da solução de Grong (Grong, 1994) para o modelo de Rosenthal (Rosenthal, 1935) se justifica , pela consideração do rendimento termico decrescente em função da distância.
- A modificação realizada da solução proposta por Grong (Grong,1994) para o modelo de Rosenthal (Rosenthal , 1935) foi eficiente na modelagem do aquecimento do perfil de temperatura com o tempo e a distância. O erro médio obtido na modelagem foi de 15,29% com desvio-padrão de 10,23%.

5.1 – Sugestões para Trabalhos Futuros

- Implantar um sistema de adição de gás com controle automático de pressão e vazão para levantamento do modelo de resfriamento.
- Desenvolver o modelo bidimensional da transferência de calor nas chapas, utilizando uma solução numérica pelo método de diferenças finitas.
- Estabelecer, através do sistema de automação pela aplicação de pré-carga, entre os corpos-de-prova, valores de resistência de contato inicial, testando, em seguida, a qualidade das soldas obtidas.
- Controlar através da fonte tiristorizada o crescimento da corrente através do corpo-de-prova para simular pré-aquecimento da junta.
- Instalação de câmera de TV, controlada pelo sistema supervisório, para acompanhamento visual da formação de rebarba, procurando-se verificar através da imagem obtida, parâmetros que possam indicar a qualidade da solda.
- Instalação de um controlador PID no sistema de aplicação de força para permitir um controle eficiente a partir de um valor de referência fornecido pelo operador.
- Estudar a soldabilidade de diferentes materiais.



Apêndice A

FONTES TIRISTORIZADAS

Tiristores são dispositivos eletrônicos cuja principal característica é a capacidade de ora conduzir, ora não, corrente elétrica. A Figura A.1 mostra o diagrama elétrico deste componente, ilustrando as condições em que ele conduz corrente.

Para que haja condução, duas condições devem ser satisfeitas:

- o tiristor deve estar polarizado positivamente, de acordo com o sentido indicado;
- deve haver uma corrente secundária (i_G) atuando no gatilho do tiristor. Essa corrente possui a forma de pulso e é denominada corrente de gatilho (ou disparo).

A corrente de gatilho é controlada por um circuito de comando. Através do controle da frequência de atuação da corrente de gatilho, determina-se a faixa de condução do tiristor. Se a tensão aplicada for alternada (da forma $V = V_{\max} \sin(\omega t)$) e θ for o ângulo de aplicação do pulso no gatilho do tiristor, a tensão de saída do circuito possuirá o aspecto mostrado na Figura A.2.

Um controlador de onda completa com uma carga RL (carga resistiva e indutiva) é mostrado na Figura A.3. Se o tiristor T_1 for disparado durante o semiciclo positivo



da tensão haverá condução da corrente através da carga. Devido à indutância no circuito, a corrente no tiristor T_1 não cai a zero em $\omega t = \pi$, quando a tensão de entrada começa a ficar negativa. O tiristor T_1 continuará a conduzir, até que sua corrente i_l caia a zero em $\omega t = \beta$. O ângulo de condução do tiristor T_1 é $\delta = \beta - \theta$ e depende do ângulo de disparo θ e do ângulo do fator de potência da carga ζ . As formas de onda para corrente no tiristor, pulsos de gatilho são mostradas na A.4.

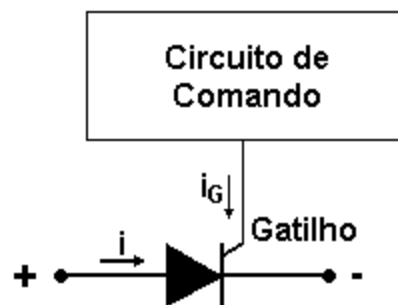


Figura A.1 – Diagrama elétrico de um tiristor

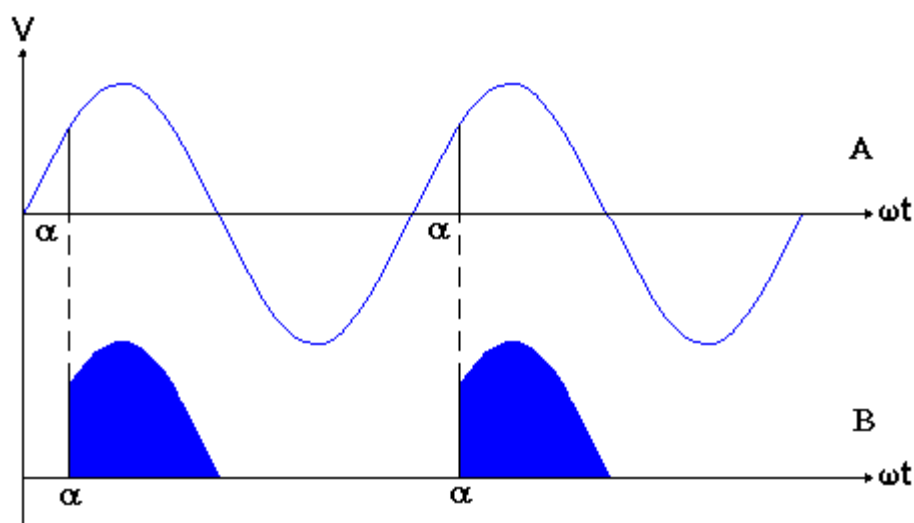


Figura A.2 – (A) Gráfico da tensão aplicada em um tiristor. (B) A tensão de saída como função do ângulo de disparo do tiristor.

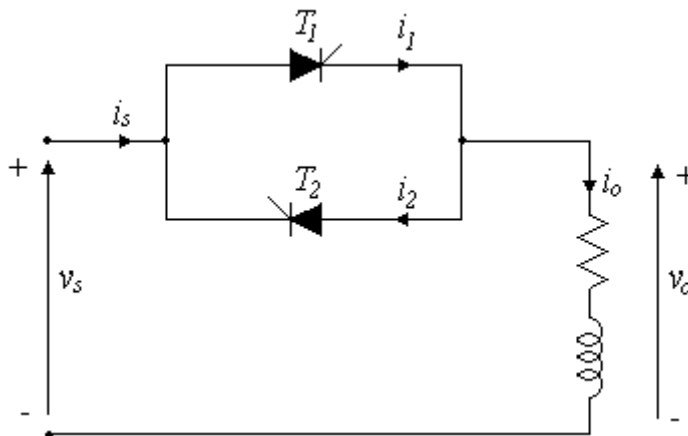


Figura A.3 – Circuito do controlador monofásico de onda completa com carga RL .



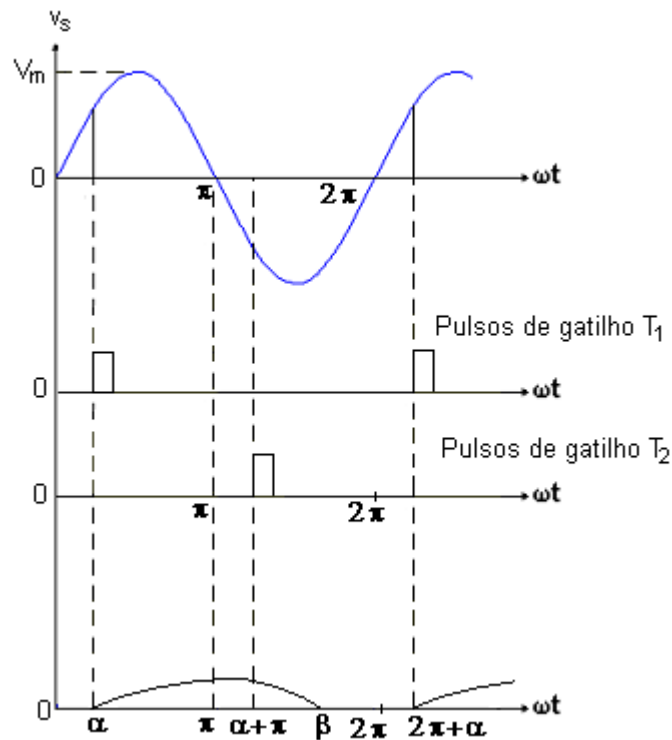


Figura A.4 – Formas de onda para o controlador monofásico de onda completa com carga RL.

Se $v_s = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t)$ for a tensão instantânea de entrada e o ângulo de disparo do tiristor T_1 for igual a θ , a corrente no mesmo i_1 poderá ser encontrada a partir de:

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (\text{A.1})$$

A Equação A.1 é a soma das quedas de tensão ao longo do circuito e sua solução é da forma:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-(R/L)t} \quad (\text{A.2})$$

onde $Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$ é a impedância de carga;

$\zeta = \tan^{-1}(\omega L / R)$ é o ângulo de carga.

A constante A_1 pode ser determinada a partir da condição inicial: em $\omega t = \theta$, $i_1 = 0$. A partir da Equação (A.2), determina-se o valor dessa constante:

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \sin(\theta - \zeta) e^{(R/L)(\theta/\omega)} \quad (A.3)$$

A substituição de A_1 em (A.2) fornece:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} [\sin(\omega t - \zeta) - \sin(\theta - \zeta) e^{(R/L)(\theta/\omega - t)}] \quad (A.4)$$

O ângulo β , quando a corrente i_1 cai a zero no tiristor T_1 é desligado, pode ser encontrado a partir da condição $i_1(\omega t - \beta) = 0$ na Equação (A.3) e é dado por:

$$\sin(\beta - \zeta) = \sin(\theta - \zeta) e^{(R/L)(\theta - \beta)/\omega} \quad (A.5)$$

Os sinais de gatilho dos tiristores para um controlador com carga resistiva podem ser pulsos curtos. Entretanto, esses pulsos de curta duração não são apropriados para cargas indutivas. Isso pode ser explicado com base na Figura A.4. Quando o tiristor T_2 é disparado em $\omega t = \pi + \alpha$, o tiristor T_1 ainda está conduzindo devido à indutância da carga. Quando a corrente no tiristor T_1 cai a zero e este é desligado em $\omega t = \beta = \alpha + \delta$, o pulso do gatilho do tiristor T_2 já cessou (caiu a zero) e, conseqüentemente, T_2 não será disparado. Como resultado, apenas o tiristor T_1 operará, causando formas de onda assimétricas da tensão e corrente de saída.



Apêndice B

RELAÇÃO DE ENTRADAS E SAÍDAS

Tabela B.1 – Relação de entradas e saídas analógicas, para cada equipamento ou sensor.

RELAÇÃO DE ENTRADAS ANALÓGICAS		
Nº	EQUIPAMENTO	FUNÇÃO (Obs.)
01	Fonte	Medição da tensão de entrada
02	Fonte	Medição da tensão de saída
03	Shunt	Medição da corrente de entrada (<i>ganho 100</i>)
04	Termopar 1	Medição de temperatura (<i>ganho 100</i>)
05	Termopar 2	Medição de temperatura (<i>ganho 100</i>)
06	Termopar 3	Medição de temperatura (<i>ganho 100</i>)
07	Célula de Carga	Medição da força de soldagem (<i>ganho 100</i>)
08	Resistência de Contato	Medição da queda de tensão durante a aplicação da força

RELAÇÃO DE SAÍDAS ANALÓGICAS		
Nº	EQUIPAMENTO	FUNÇÃO (Obs.)
01	Fonte	Controle da tensão de saída da fonte

RELAÇÃO DE ENTRADAS DIGITAIS		
Nº	EQUIPAMENTO	FUNÇÃO (Obs.)
00	Motor de Passo	Geração de pulsos

RELAÇÃO DE SAÍDAS DIGITAIS		
Nº	EQUIPAMENTO	FUNÇÃO (Obs.)
01	Motor de Passo	Ajuste do sentido de rotação do motor
02	Motor de Passo	Ajuste da frequência de pulsos
03	Motor de Passo	Habilitação e desabilitação do circuito
04	Cilindro Pneumático	Válvula direcional de pressão: soltar
05	Cilindro Pneumático	Válvula direcional de pressão: apertar
06	Válvula de Gás	Abertura e fechamento da válvula

Tabela B.2 – Relação de entradas e saídas.

Equipamento	TAG	Borneira – Terminal	
Fonte de Tiristores AC	FAT	A1	Entrada: 220VAC R
		A2	Entrada: 220VAC S
		A3	Saída: 0 ~ 220VAC
		A4	Saída: 0 ~ 220VAC
		B1	Divisor de Tensão: Entrada
		B2	Comum SHUNT: Entrada
		B3	Divisor de Tensão: Saída
		B5	Referência de Voltagem
		B6	Comum Referência de Voltagem
Máquina de Solda por Pontos	MSP	C1	Entrada: 220VAC R
		C2	Entrada: 220VAC S

Placa Amplificadora 1 (Ganho 100)	PA1	D1	Alimentação: +15V
		D2	Alimentação: -15V
		D3	Comum
		E	Entrada Sinal Amplificador 1
		E2	Entrada Sinal Amplificador 1
		E3	Entrada Sinal Amplificador 2
		E4	Entrada Sinal Amplificador 2
		E5	Entrada Sinal Amplificador 3
		E6	Entrada Sinal Amplificador 3
		F1	Saída Amplificador 1
		F2	Comum
		F3	Saída Amplificador 2
		F4	Comum
		F5	Saída Amplificador 3
		F6	Comum
Placa Amplificadora 2 (Ganho 500)	PA2	G1	Alimentação: +15V
		G2	Alimentação: -15V
		G3	Comum
		H1	Entrada Sinal Amplificador 1
		H2	Entrada Sinal Amplificador 1
		H3	Entrada Sinal Amplificador 2
		H4	Entrada Sinal Amplificador 2
		H5	Entrada Sinal Amplificador 3
		H6	Entrada Sinal Amplificador 3
		I1	Saída Amplificador 1
		I2	Comum
		I3	Saída Amplificador 2
		I4	Comum
		I5	Saída Amplificador 3



		I6	Comum
Placa Controladora do Motor de Passo	PMP	J1	Entrada Alimentação: +9V
		J2	Entrada Alimentação: Terra
		K1	Enrolamento 1
		K2	Comum $\frac{1}{2}$
		K3	Enrolamento 2
		K4	Enrolamento 3
		K5	Comum $\frac{3}{4}$
		K6	Enrolamento 4
		L1	Saída Alimentação: +5V
		L2	Habilitação (Enable)
		L3	Direção
		L4	Terra
		L5	Passo a Passo (Step)
		L6	Meio Passo (Half-Step)
		L7	Fase (Phase)
Fonte de 5V	F05	M1	Entrada: 127VAC Fase
		M2	Entrada: 127VAC Neutro
		N1	Saída: +5V
		N2	Terra
Fonte 15V	F15	O1	Entrada: 127VAC Fase
		O2	Entrada: 127VAC Neutro
		P1	Saída: +15V
		P2	Comum: Terra
		P3	Saída: -15V
Fonte 24V	F24	P4	Saída: +24Vcc
		P5	Terra
Fonte Motor de Passo (+9V)	FMP	Q1	Entrada: 127VAC Fase
		Q2	Entrada: 127VAC Neutro
		R1	Saída: 9V

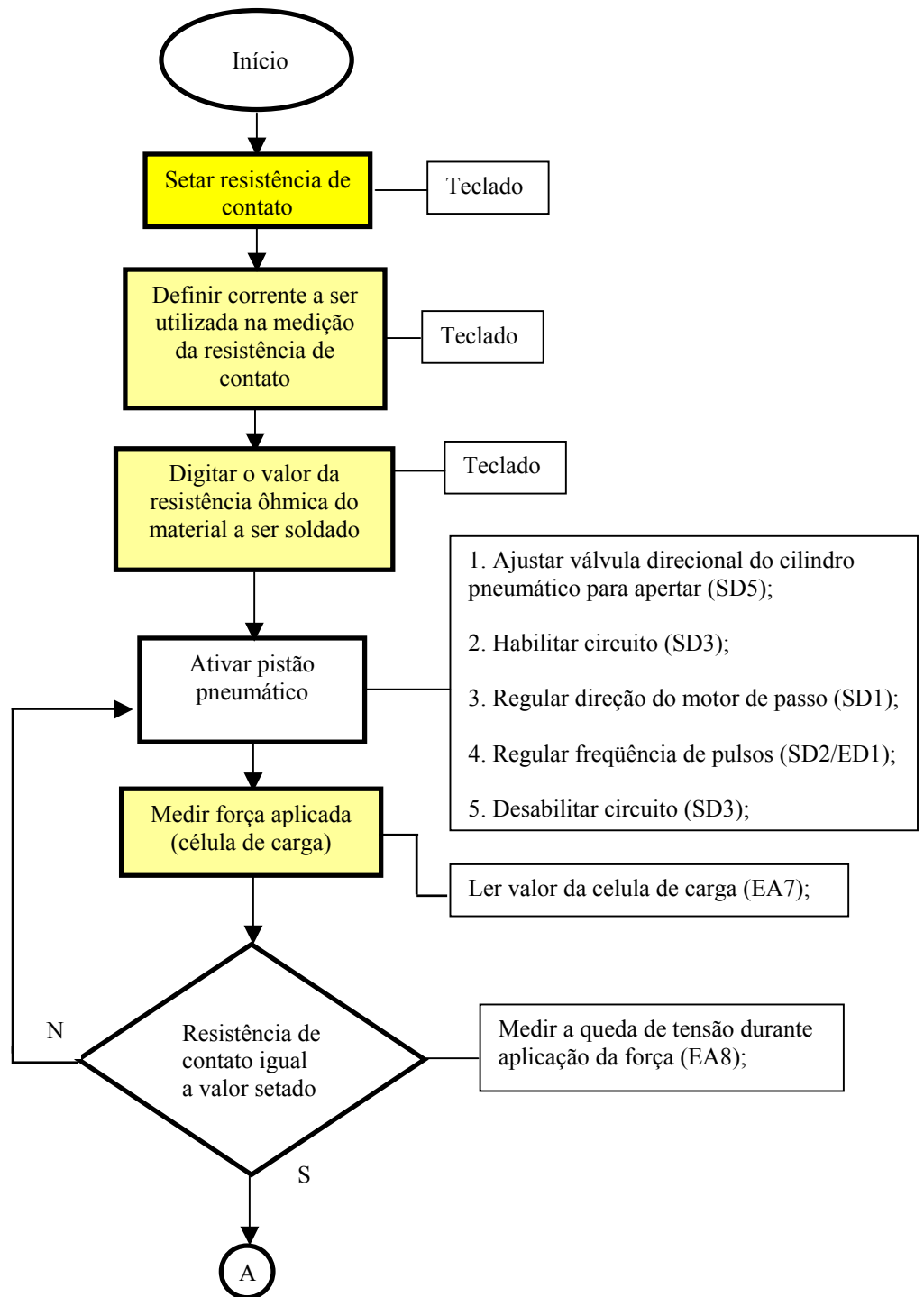


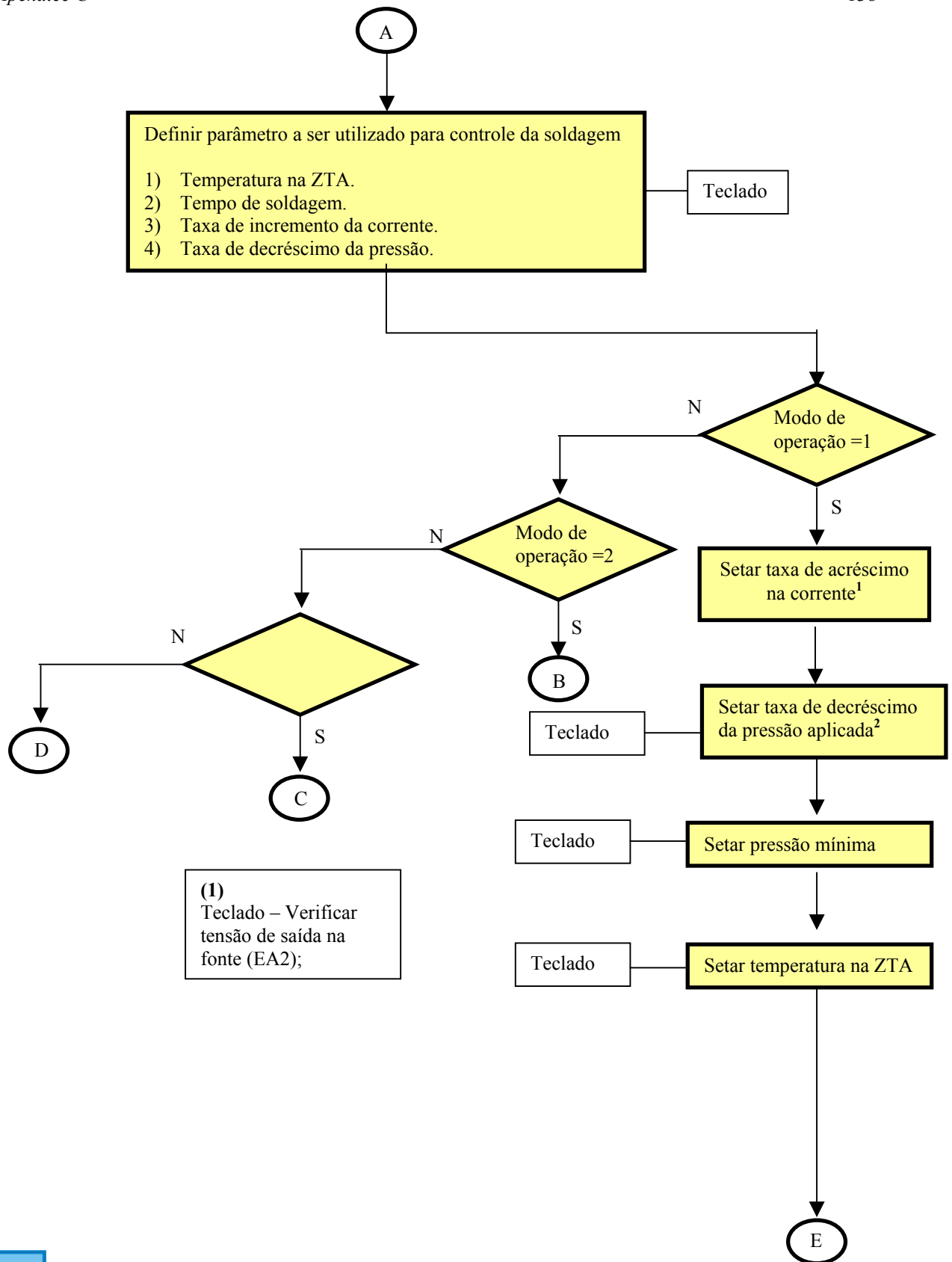
		R2	Saída: Terra
Válvula de Controle de Pressão	VCP	S1	Enrolamento 1
		S2	Comum $\frac{1}{2}$
		S3	Enrolamento 2
		S4	Enrolamento 3
		S5	Comum $\frac{3}{4}$
		S6	Enrolamento 4
		T1	Alimentação: +5V
		T2	Terra
		T3	Saída: Gerador de Pulso
		T4	Comum Saída: Gerador de Pulso
Placa de Relés 1 (Relés 1,2 e 3)	PR1	U1	Entrada de Habilitação (Relé1)
		U2	Entrada de Habilitação (Relé2)
		U3	Entrada de Habilitação (Relé3)
		U4	Entrada de Habilitação: Terra
		V1	Entrada: +15V
		V2	Entrada: Terra
		V3	Contato (Relé1)
		V4	Contato (Relé1)
		V5	Contato (Relé2)
		V6	Contato (Relé2)
Célula de Carga	CDC	V7	Contato (Relé3)
		V8	Contato (Relé3)
		Y1	Saída de Sinal
		Y2	Saída de Sinal

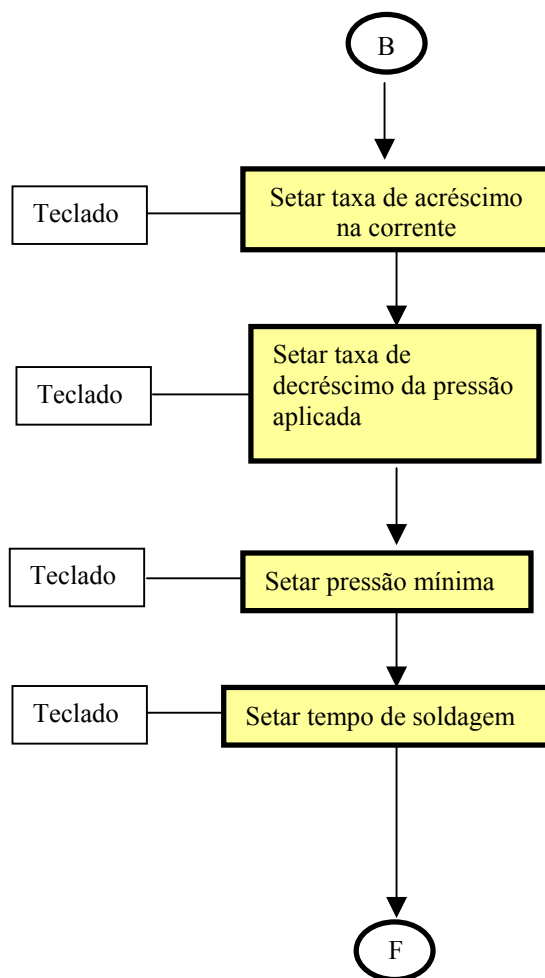


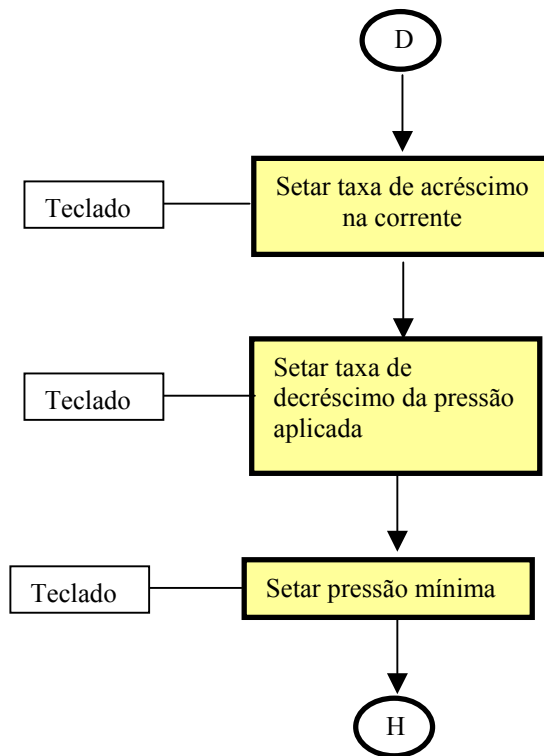
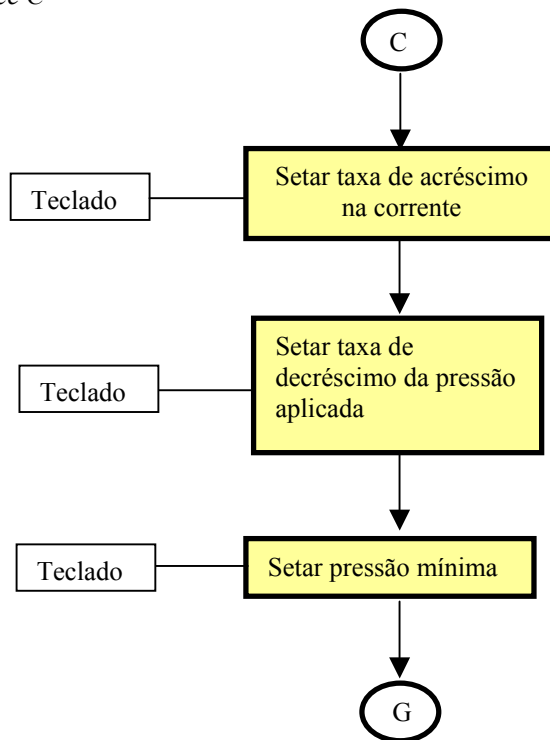
Apêndice C

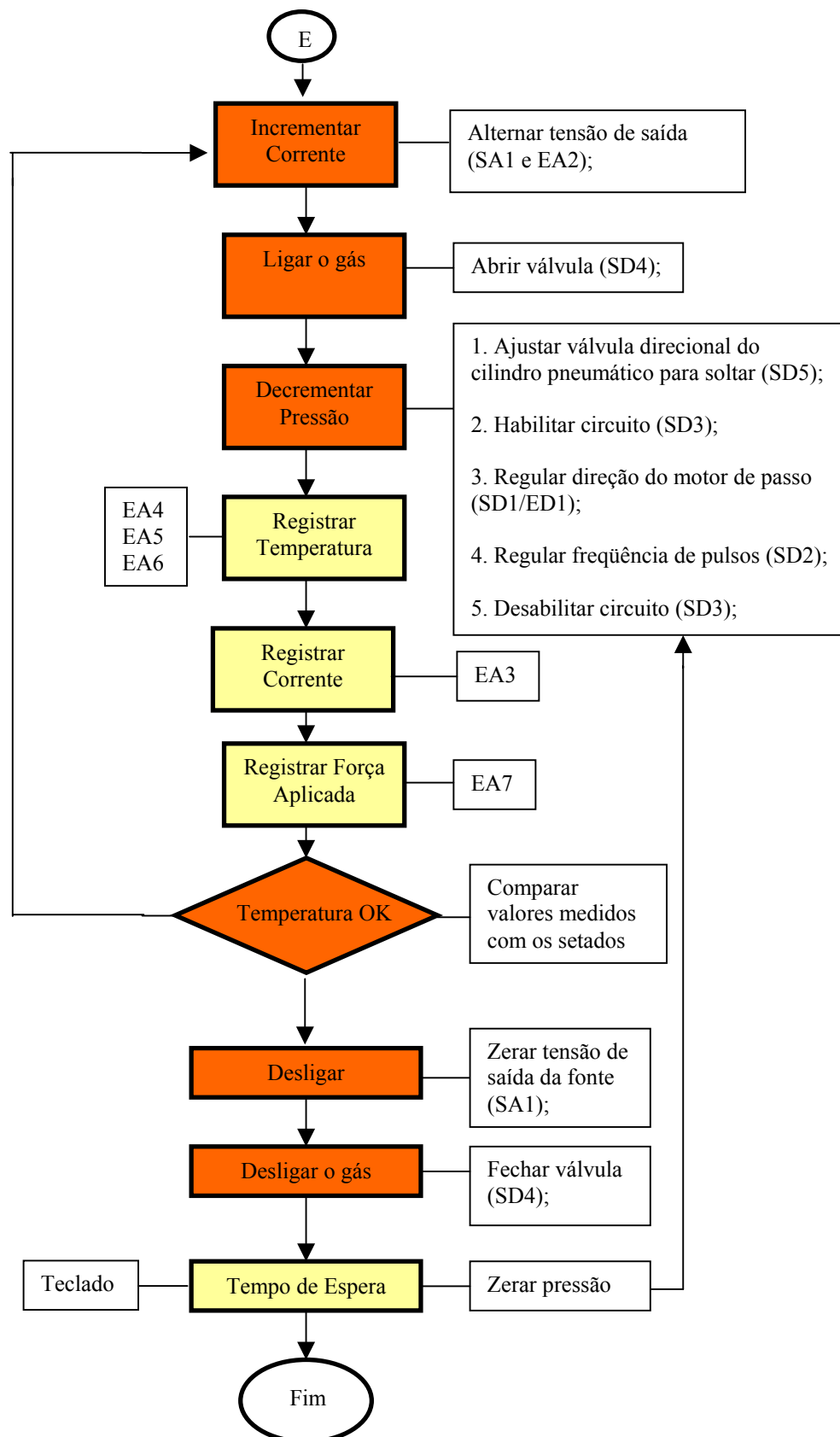
FLUXOGRAMA











Apêndice D

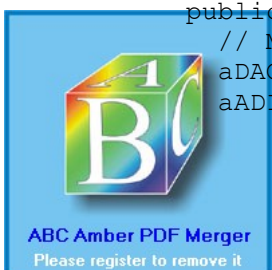
CÓDIGO FONTE DO PROGRMA DE GERENCIAMENTO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

```
//-----//
// Sistema de aquisicao de dados //
// Driver da placa PCL 812-PG, PCL 718B e PCL711 //
// PUC Minas - Mestrado em Engenharia Mecânica //
//-----//
unit DataAQ;

interface

uses
  Classes, Windows, DataTypes;

// Classe principal
type
  TDataAQ = class(TThread)
  private
    // Parametros da placa
    iBaseAddr: Integer;
    iBoard: Integer;
    // Variavel para sinaliar a inicializacao
    bInitiated: Boolean;
    // Mapa de temporizacao das analogicas
    aDAOutTMR: array[0..1] of Cardinal;
    aADInTMR: array[0..15] of RTimer;
    // Mapa de temporizacao das digitais
    aDGInTMR: array[0..15] of Cardinal;
    aDGOutTMR: array[0..15] of Cardinal;
    procedure RefreshIO();
    procedure WritePort(wPort: Word; yData: Byte);
    function ReadPort(wPort: Word): Byte;
    function ReadAD(iChannel: Integer): Real;
    procedure WriteDA(iChannel: Integer; fValue: Real);
    function ReadDG(iChannel: Integer): Boolean;
    procedure WriteDG(iChannel: Integer; bValue: Boolean);
  protected
    //Codigo da thread aqui
    procedure Execute; override;
  public
    // Mapa de saida / entrada analogica
    aDAOut: array[0..1] of TAnalogOutputChannel;
    aADIn: array[0..15] of TAnalogInputChannel;
```



```

// Mapa de saida / entrada digital
aDGIn: array[0..15] of TDigitalChannel;
aDGOut: array[0..15] of TDigitalChannel;

// Mapa de valores capturados
aCapMap: array[1..65536, 1..10] of Double;

// Numero de amostras capturadas

iSamples: Cardinal;
bStop: Boolean;

// Funcao de inicializacao da placa - DEVE SER CHAMADA OBRIGATORIAMENTE APOS
INSTANCIAR A CLASSE
procedure BoardInit(iBoard, iBsAddr: Integer);
end;

implementation

{ TDataAQ }

procedure TDataAQ.Execute;
var
  i1t: int64;
  i2t: int64;
  itr: int64;
begin
  // Loop principal da thread
  while ((not Terminated) and (bInitiated = true)) do
  begin

    QueryPerformanceCounter(i1t);

    // Chama funcao de atualizacao de mapas
    RefreshIO();

    if (bStop = false) then
    begin
      // Atualiza o mapa interno
      aCapMap[iSamples, 01] := aADIn[00].Value;
      aCapMap[iSamples, 02] := aADIn[01].Value;
      aCapMap[iSamples, 03] := aADIn[02].Value;
      aCapMap[iSamples, 04] := aADIn[03].Value;
      aCapMap[iSamples, 05] := aADIn[04].Value;
      aCapMap[iSamples, 06] := aADIn[05].Value;
      aCapMap[iSamples, 07] := aADIn[06].Value;
      aCapMap[iSamples, 08] := aADIn[07].Value;
      aCapMap[iSamples, 09] := aADIn[08].Value;
      aCapMap[iSamples, 10] := aADIn[09].Value;

      // Incrementa o contador de amostras
      Inc(iSamples, 01);

      // Verifica o limite
      if (iSamples > 1048576) then
      begin
        iSamples := 1;

```



```

        end;
    end;

    QueryPerformanceCounter(i2t);
    itr := i2t - i1t;

    while (itr < 1000) do
    begin
        QueryPerformanceCounter(i2t);
        itr := i2t - i1t;
    end;

    // Dorme 1 milisegundo para nao fazer a cpu estourar em 100% de
    processamento
    sleep(0);
    end;
end;

//-----//
// Esta funcao faz a atualizacao do status da placa
// Atualiza todas as entradas digitais e analogicas
// Parametros:
//     nenhum
//-----//
procedure TDataAQ.RefreshIO;
var
    iCount: Integer;
    iTick: Cardinal;
begin
    // Pega o tickcount
    iTick := GetTickCount();

    // Atualiza as saidas analogicas
    for iCount := 0 to 1 do
    begin
        // Verifica se a saida esta ativa
        if (aDAOut[iCount].bActive = true) then
        begin
            // Verifica se ja esta na hora de gravar novamente
            if ((aDAOutTMR[iCount] + aDAOut[iCount].SamplingRate) <= iTick) then
            begin
                // Faz a escrita da porta
                WriteDA(iCount, aDAOut[iCount].Value);
                // Atualiza o timer
                aDAOutTMR[iCount] := iTick;
            end;
        end
        else
        begin
            // Escreve o valor na placa
            WriteDA(iCount, 0.0);
        end;
    end;
end;

// Atualiza as entradas analogicas

```



```

for iCount := 0 to 15 do
begin
    // Verifica se a entrada esta ativa
    if (aADIn[iCount].bActive = true) then
    begin
        // Verifica se ja esta na hora de ler novamente
        if ((aADInTMR[iCount].iTMRTick + aADIn[iCount].SamplingRate) <= iTick)
then
        begin
            // Faz a gravacao na porta
            aADIn[iCount].Value := ReadAD(iCount);
            // Atualiza o timer
            aADInTMR[iCount].iTMRTick := iTick;
            // Atualiza o contador de amostras
            aADInTMR[iCount].iSamples := aADInTMR[iCount].iSamples + 1;
            // Soma mais uma parcela do acumulado
            aADInTMR[iCount].fAverage := aADInTMR[iCount].fAverage +
aADIn[iCount].Value;
            // Verifica se completou as amostras para calcular a media
            if (aADInTMR[iCount].iSamples = aADIn[iCount].AverageSamples) then
            begin
                // Calcula a media
                aADIn[iCount].AverageValue := (aADInTMR[iCount].fAverage /
aADInTMR[iCount].iSamples);
                // Reinicializa os contadores e valores
                aADInTMR[iCount].iSamples := 0;
                aADInTMR[iCount].fAverage := 0.0;
            end;
        end;
    end
    else
    begin
        // Faz a atualizacao do mapa
        aADIn[iCount].Value := 0.0;
    end;
end;

// Atualiza as entradas digitais
for iCount := 0 to 15 do
begin
    // Verifica se a entrada esta ativa
    if (aDGIn[iCount].bActive = true) then
    begin
        // Verifica se ja esta na hora de ler novamente
        if ((aDGInTMR[iCount] + aDGIn[iCount].SamplingRate) <= iTick) then
        begin
            // Faz a leitura da porta
            aDGIn[iCount].Value := ReadDG(iCount);
            // Atualiza o timer
            aDGInTMR[iCount] := iTick;
        end;
    end
    else
    begin
        // Faz a atualizacao do mapa
        aDGIn[iCount].Value := false;
    end;
end;

```



```

end;

// Atualiza as saidas digitais
for iCount := 0 to 15 do
begin
    // Verifica se a saida esta ativa
    if (aDGOut[iCount].bActive = true) then
    begin
        // Verifica se ja esta na hora de ler novamente
        if ((aDGOutTMR[iCount] + aDGOut[iCount].SamplingRate) <= iTick) then
        begin
            // Faz a escrita na porta
            WriteDG(iCount, aDGOut[iCount].Value);
            // Atualiza o timer
            aDGOutTMR[iCount] := iTick;
        end;
    end
    else
    begin
        // Faz a gravacao na porta
        aDGOut[iCount].Value := false;
        // Faz a escrita na porta
        WriteDG(iCount, aDGOut[iCount].Value);
    end;
end;
end;

//-----//
// Esta funcao le um dado canal analogico
// Parametros:
//   iChannel -> Numero do canal
// Retorna:
//   Valor float lido do canal
//-----//
function TDataAQ.ReadAD(iChannel: Integer): Real;
var
    fData: Real;
    iADHigh: Word;
    iADLow: Word;
    fCal: Real;
    aADCr: array [0..4] of ADCorr;
    iGain: Integer;
    iTimeout: Integer;
begin
    // Define a tabela de calibracao da placa 812PG
    aADCr[0].fCorrLo := -5;
    aADCr[0].fCorrHi := 5;
    aADCr[1].fCorrLo := -2.5;
    aADCr[1].fCorrHi := 2.5;
    aADCr[2].fCorrLo := -1.25;
    aADCr[2].fCorrHi := 1.25;
    aADCr[3].fCorrLo := -0.625;
    aADCr[3].fCorrHi := 0.625;
    aADCr[4].fCorrLo := -0.3125;
    aADCr[4].fCorrHi := 0.3125;

```



Apêndice E

ANÁLISE DE INCERTEZAS

As incertezas existentes na medição de temperatura podem ser atribuídas aos seguintes fatores:

- Flutuações no sistema de amplificação de sinal utilizado para enviar os sinais de temperatura provenientes dos termopares à placa de aquisição de dados;
- Resolução do conversor analógico-digital da placa de aquisição de dados utilizado na obtenção dos sinais de temperatura dos termopares. Como a placa é de 12bits, os valores de temperatura obtidos são discretizados em 4096 pontos. Considerando-se que a amplitude da escala de temperatura é de 1066°C , da temperatura ambiente (25°C) à temperatura máxima atingida em todos os ensaios (1081°C), tem-se, na aquisição dos dados de temperatura, uma precisão de $0,26^{\circ}\text{C}$.
- Erros presentes no software utilizado para a manipulação dos dados experimentais obtidos, que implicaram na eliminação de alguns dos pontos adquiridos. Face ao elevado número de pontos levantados (entre dez a quinze mil, em média, para cada ensaio), considera-se que o número de dados eliminados em cada ensaio (da ordem de 50 pontos), não irão gerar

Incertezas significativas.



- Adequação da curva de calibração levantada. Ao se assumir que a temperatura variou linearmente com o sinal de tensão proveniente dos termopares e sistema de amplificação, incorreu-se em um erro de 2%. Além disso, deve-se considerar a precisão de temperatura do forno segundo o qual os termopares deste trabalho foram calibrados. De acordo com o exposto no item 3.5, conforme o fabricante do forno, esta precisão é de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991, *Welding Handbook. Welding Processes*. 8ªed. V2. Miami: AWS, p. 651-670.

BAPTISTA, Manuel N., 2002, *Simulação da Soldagem por ERW de Tubos de Aço Inoxidável Ferrítico AISI para Sistemas de Exaustão Automotivos*, USP, São Paulo.

CARY, Howard B., 1998, *Modern Welding Technology*, Prentice Hall 4ªed, New Jersey.

CASTRO R. e DE CADENET, J.J. 1974, *Welding Metallurgy of Stainless and Heat-Resisting Steels*, Cambridge University Press, London.

CHO, H.S. e CHO, Y. J., 1989, *Welding Journal*, 68(6): 236s.

CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO, 1988, *Princípios e Aplicações Práticas de Termopares*, pg. 32- 38.

EASTERLING, K., 1992, *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth, pg. 149-164.

ENGRO, 1987, *Especificação Técnica: Termoelementos*, São Paulo.

FUJIMOTO, K. et al, 1997, *Loading System for Resistance Welding*, *Welding International*, 371-383.

FUJITA, N. Ohmura et al, 1996, *Effect of Nb on High-Temperature Properties for Ferritic Stainless Steels*, *Scripta Materialia*, v.35, nº 6, pp 705-710, 1996.



GRONG, Oystein, 1994, *Metallurgical Modeling of Welding*, The Institute of Materials, Materials Modeling Series, 579 p.

HUTCHINGS, I. M., 1992, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, London.

INCROPERA, Frank P. e DEWITT, David P., 1998, *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*, LTC, Rio de Janeiro.

KATH, D.H., e DICKINSON, D. W, 1981, *Welding Journal*, 60: 135s.

JORGE Junior, Alberto Moreira, 1997, *Análise do Comportamento Mecânico de Aços Inoxidáveis em Altas Temperaturas e Altas Taxas de Deformação*, São Carlos.

KATH, D. H., e DICKINSON, D. W., 1981, *Welding Journal*, 60: 135s.

KOU, Sindo e LE, Y., 1987, *Metallurgical. Transactions*, 13A: 1141.

LINNERT, George, 1965, *Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels*, American Welding Society 3^aed, New York.

MACHADO, Ivan G., 2000, *Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicações*, Imprensa Livre Editora Ltda, Porto Alegre.

MARTIN, D. C., 1957 *High-Frequency Resistance Welding*, *Welding Journal*, p. 703-707.

MARTIGNONI, Alfonso, 1973, *Transformadores*, Editora Globo, Porto Alegre, 1973.

NARITA, K, 1975., *Physical Chemistry of the Groups Iva (Ti, Zr), Va (V, Nb, Ta) and Rare Earth Elements in Steel*, *Transactions ISIJ*, Vol. 15, p. 145-152.



NA, S. e PARK, W., 1996, *A Theoretical Study on Electrical and Thermal Response in Resistance Spot Welding*, Welding Journal, 233-s.

PUC-MINAS, 1999, *Elementos Sensores de Temperatura: Termopares e Termoresistências*, Belo Horizonte.

ROSENTHAL, Daniel, 1935, *Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting*, Bruxelas, pp 1277-1292.

RUDD, Wallace C., 1957, *High Frequency Resistance Welding*, Third Annual Midwest Welding Conference, Chicago.

SANTANA, Ivan José e MODENESI, Paulo J., 2002, *Desenvolvimento de um Sistema para a Simulação da Soldagem por Indução de Alta Frequência*, Belo Horizonte, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas.

SANTANA, Ivan José, 2003, *Simulação da Soldagem por Indução de Alta Frequência em Tubos de Aço Inoxidável Ferrítico*, Belo Horizonte, UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas.

SCOTT-a , P. F., 1996, *Key Parameters of High Frequency Welding*, Proceedings of the Tube/Pipe Congress 96, Dusseldorf, Alemanha, Abril 16-18.
<http://www.thermatool.com>

SCOTT-b, Paul F., 1996, *The Effects of Frequency in High Frequency Welding*, Disponível em: <<http://www.thermatool.com>>. Acesso em 19 de maio de 2003.

STOUT, K. J., 1981, *Materials in Engineering*. Página 287-295 Livro Hutchings 1992.

TANG, H. et al, 2000, *Force Characteristics of Resistance Spot Welding of Steels*, Welding Journal. 175-s.



TSALF, A., 1989 *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, No.1, pp. 147-152.

UDIN, Harry et al., 1954 *Welding for Engineers*, John Wiley & Sons, New York.

UHLIG, H.H., 1971, *Corrosion and Corrosion Control*, Wiley 2^aed, New York.

VAN VLACK, L., 1984, *Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais*, Campus Ltda, Rio de Janeiro.

WILLIAMS, David, 1998, *Build This Stepper Motor Controller*, Nuts & Volts Magazine.

WRIGHT, J., 1998, *HF Tube Welding Processes*, Electronic Heating Equipment Inc. www.impeder.com/Efficiency/efficiency.html

