

Automatic Thermocouple Welding System

I. Fermo, R. Sakiyama, M. De Souza, and C. Andrade

Abstract—Thermocouples are electrical devices used in temperature measurement, of simple design and have great use on industry. The basic principle of work of the Thermocouple involves two wires of different compositions that are joined at both ends and when one end was at the different temperature than other a current was created. The thermocouple needs an efficient junction for the two metal wires, which is commonly done by welding. The welding process used to construct a thermocouple can be done in several ways and the most common and efficient is the capacitive discharge welding. This work aims to develop an equipment able to performing this soldering, by capacitive discharge, whose value of energy to be discharged is determined using the principle of conservation of mass and energy in pre-established alloys and gauges of some most common types of thermocouples, in an inertial environment produced with argon gas. The equipment automation manages all the bank charge process. The results obtained with the welding of different types and thermocouple gauges were considered of good quality according to the established analysis parameters of Image, electrical resistance and use of all amount of energy at welding process. The equipment construction cost is approximately 16% of a commercial equipment with less technology.

Index Terms—Welding, Thermocouple, Capacitive equipment.

I. INTRODUÇÃO

A UNIÃO de dois metais, iguais ou diferentes, expostos a temperatura ambiente é realizada por meio do fornecimento de energia para ambas as partes, elevando sua temperatura até o ponto de fusão das ligas metálicas.

Segundo [1] o processo de soldagem deve preencher os requisitos de: gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, remover contaminações das superfícies a serem unidas, evitar a contaminação pelo ar atmosférico e propiciar o controle da transformação de fase.

Um dos métodos mais usuais e simples de elevar a temperatura de ligas metálicas é pelo efeito Joule, que consiste em submeter um objeto metálico a passagem de uma corrente elétrica intensa. A colisão de elétrons ocasionada pela corrente provocará o aquecimento do objeto metálico, e a energia gerada será proporcional à intensidade da corrente elétrica e ao tempo no qual o metal é submetido à passagem da corrente elétrica.

Desta forma, esta energia gerada funde os metais envolvidos, ocasionando o processo de soldagem de uma forma simples e de baixo custo.

Técnicas de união de ligas metálicas de pequena espessura são descritas por Tohyoh et. al. [2], Peng et. al. [3] também relata o uso do efeito Joule para a soldagem de micro e nano fios. Técnicas de soldagem mais modernas como feixes laser são relatadas por Kim et. al. [4] e Hu et. al. [5], porém estas técnicas envolvem um alto custo e possuem limitações de aplicação dos feixes em determinadas estruturas, ou em pontos de difícil acesso de uma estrutura. São descritos por Kumar [6] a união por vibrações ultrassônicas, que consistem em aplicar pressão juntamente com vibrações da ordem de 22 kHz sobre os objetos metálicos produzindo energia por meio de vibrações na estrutura, fundindo o metal e criando a união, mas ao se utilizar esta técnica, abre-se mão da simplicidade e baixo custo de produção.

A micro solda ponto por descarga capacitiva esta dentre os métodos mais utilizados para a soldagem de ligas de pequena espessura, sendo uma de suas principais características a simplicidade do sistema. A soldagem por resistência realizada por descarga capacitiva consiste na sustentação de uma diferença de potencial, mantida por meio de eletrodos, na região que deve ser unida. O fluxo da corrente elétrica que atravessa o metal, provoca um aumento de temperatura de acordo com a lei de Joule. O calor gerado faz com que ocorra uma pequena fusão nas proximidades do eletrodo, produzindo uma mistura líquida homogênea das ligas metálicas que ocupará os espaços vazios na extremidade dos condutores. Essa mistura, ao se solidificar, forma uma esfera de solda na extremidade dos condutores, resultando na união das ligas metálicas em questão [7].

Uma aplicação comum da solda capacitiva em ligas de pequena espessura é na confecção de termopares. O termopar é um sensor de temperatura constituído de dois fios de metais puros ou ligas metálicas distintas que precisam ter uma boa condutividade elétrica para assegurar mais precisão em suas medições.

A conservação da massa das ligas metálicas envolvidas é importante em uma solda realizada em um termopar, pois não há a inserção de uma terceira liga metálica ou elementos externos no sistema. A inclusão de um terceiro elemento no sistema de pares metálicos deve ser evitada para a obtenção de uma maior eficiência e precisão do equipamento de medição [8].

Termopar ou par termoelétrico são sensores de temperatura de simples concepção, com ampla faixa de medição e precisão, cuja construção se baseia na junção de dois condutores metálicos compostos de metais puros ou ligas metálicas. A união de dois segmentos de metais em uma das extremidades caracteriza o termopar. À extremidade na qual a união é feita atribui-se o nome de junta quente, e essa

I. R. Fermo is with the State University of Maringá, Maringá, PR 87020-900 Brazil (e-mail: igor_fermo@hotmail.com).

R. Z. Sakiyama., is with State University of Maringá, Maringá, PR 87020-900 Brazil. (e-mail: rubens.uem@gmail.com).

M. De Souza is with State University of Maringá, Maringá, PR 87020-900 Brazil, (e-mail: msouza2@uem.br).

C. M. G. Andrade is with the State University of Maringá, Maringá, PR 87020-900, Brazil (e-mail: cidmga@yahoo.com.br).

extremidade é colocada em contato com o corpo cuja temperatura deseja-se medir. A outra extremidade é denominada junta fria, a qual se atribui uma temperatura de referência, normalmente 0 °C. Quando as extremidades são submetidas a uma diferença de temperatura, as diferentes composições ou materiais empregados na solda produzem um fluxo elétrico, obedecendo às leis da termoeletrônica descobertas por T.J. Seebeck [8]. O termopar possui as características de tamanho reduzido, baixa capacidade térmica e possui um fluxo de energia desprezível [9].

Os termopares mais utilizados são os termopares de base metálica. De acordo com Wang [10], os termopares são divididos em tipos, os mais comuns e de baixo custo são: tipo T (Cobre/Constantan; -180 a 370 °C); tipo E (Cromel/Constantan; -200 a 900 °C); tipo J (Ferro/Constantan; -40 a 750 °C); tipo K (Cromel/Alumel; -180 a 1300 °C).

Métodos de soldagem de termopares são relatados por diversos pesquisadores desde o século passado [11-15]. No entanto destaca-se a falta de tecnologias novas que permitam a obtenção de uma solda de qualidade, eficiente e automatizada, e que seja de baixo custo. A solda da junta metálica dos termopares é um item importante na qualidade destes sensores de temperatura. Desta forma, faz-se necessário um método eficiente de soldagem.

Termopares são amplamente usados na indústria para o acompanhamento da temperatura dos processos, desta forma o desenvolvimento de técnicas de soldagem que propiciem um menor custo e maior qualidade na confecção de termopares é desejável. Neste trabalho consideramos uma solda de boa qualidade aquela que apresenta, visualmente, um formato esférico e aparência homogênea, que utilize toda a energia armazenada no banco de capacitores e que apresente uma baixa resistência elétrica.

Equipamentos de solda foram desenvolvidos por Zanstra [14] e Orr e Roth [15], no entanto ambos equipamentos não garantem a qualidade e o uso adequado da energia no processo de soldagem.

No mercado encontram-se disponíveis equipamentos Amada Miyachi [16], VMV Welders [17], OMEGA [18], MES [19], TIP-TEMP [20] e BEL [21]. Em uma rápida análise a respeito das características dos dispositivos, pode-se observar que apenas [17] apresenta um display LCD para interação com o operador, no entanto, o display apresenta somente o nível da carga do banco de capacitores. Todos esses equipamentos têm controle da energia despendida de forma empírica para cada bitola de termopares, sem levar em consideração o tipo. Os equipamentos [16], [18], [20] e [21] têm atmosfera de soldagem inerte, os outros não. No entanto, esta atmosfera inerte não é controlada, ou seja, não possui controle automático sobre o gasto do gás inerte utilizado, sendo o gás injetado constantemente durante a operação do equipamento, ao invés de somente no momento da soldagem, desperdiçando matéria prima.

Ao realizar uma pesquisa de mercado, constatou-se que os equipamentos disponíveis comercialmente possuem um valor elevado, o que por si só justifica o desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos de soldagem. A Tabela I apresenta os custos de equipamentos de solda disponíveis comercialmente.

Como pode-se ver na Tabela I, temos valores de R\$ 1777,00 até R\$ 14050,00. Assim, desenvolvemos um

equipamento de soldagem de termopares e ligas de pequena espessura. Esse equipamento se distingue dos que temos no mercado por possibilitar o uso controlado da energia para a soldagem, que é feita em um ambiente com atmosfera inerte. Para tal, o equipamento possui um *display* LCD para que o usuário possa selecionar o tipo e bitola do termopar a ser soldado. Desta forma descarregando a quantidade necessária para a soldagem. Bem como, um sistema que libera a quantidade necessária para manter a atmosfera inerte.

TABELA I
CUSTOS DE EQUIPAMENTOS DE SOLDA COMERCIAIS PARA
TERMOPARES

Marca	Modelo	Custo (R\$)
VMV	EW900	2520,00
OMEGA	TL-WELD	14050,00
MES	TL-WELD	1777,00*
TIP-TEMP	Model 300	5596,00*
BEL	TL-WELD9	5312,00*

*Valores em real convertidos do dólar, cotação R\$ 4,00, em 05/06/19.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta sessão foi dividida em 5 partes, a saber: o desenvolvimento do equipamento, cálculo da quantidade de energia, programação da plataforma de desenvolvimento Arduino, soldagem e análise de custo.

A. Desenvolvimento do Equipamento

O equipamento para solda capacitiva desenvolvido realiza a soldagem de fios metálicos de baixa espessura utilizados na confecção de termopares. Compõem o equipamento: fonte de tensão contínua simétrica de 31 V, banco capacitivo de 37600 µF, plataforma de desenvolvimento Arduino UNO e módulo relé, que será utilizado como chave comutadora entre o banco de capacitores e fonte e ativação da válvula solenoide.

A carga do banco de capacitores ocorre a partir da fonte de tensão contínua e é monitorada pela plataforma de desenvolvimento Arduino, por meio da leitura da tensão sobre o banco de capacitores. Para que o microcontrolador efetue a leitura dos valores de tensão no banco de capacitores e, por meio desta, calcule a energia armazenada, utiliza-se um divisor de tensão resistivo, que adequa a tensão no banco de capacitores a valores apropriados para serem lidos pela plataforma de desenvolvimento Arduino.

A plataforma de desenvolvimento Arduino controla o processo de carga do banco de capacitores, a qual utiliza a tensão nos terminais do banco como parâmetro de controle. A plataforma de desenvolvimento também é responsável pelo acionamento de uma válvula solenoide, responsável por injetar gás Argônio para a inertização da atmosfera de soldagem.

Para conectar o banco de capacitores à fonte de tensão, faz-se uso de um relé, que por meio da plataforma de desenvolvimento é responsável pelo controle da carga do banco. O relé possui características desejáveis ao circuito, pois isola o circuito do microcontrolador do circuito de potência, uma vez que a tensão nos terminais da fonte é incompatível com a tensão que a plataforma de desenvolvimento pode suportar (5 V). Um diagrama esquemático do funcionamento do equipamento de solda é ilustrado na Fig. 1.

O banco de capacitores é formado pela associação de oito

capacitores em paralelo, para que seja atingida a carga necessária para a soldagem e ainda exista uma reserva para futuras soldas de maior espessura.

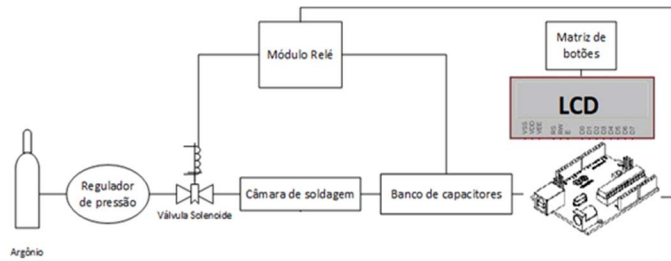


Fig. 1. Fluxograma do circuito do equipamento de solda.

Para a construção do banco foram utilizados capacitores do tipo eletrolítico de $4700 \mu\text{F}$ e 63 V que foram conectados com o uso de um fio de cobre de $2,5 \text{ mm}^2$. Quando o banco de capacitores atinge plena carga é possível obter uma energia aproximada de $74,62 \text{ J}$.

Como já mencionado, para o acoplamento do banco de capacitores ao circuito de carga foi utilizado um módulo relé, uma vez que a plataforma de desenvolvimento Arduino não consegue acionar o circuito de carga do banco de capacitores diretamente de suas portas de saída. Optou-se pelo uso de um módulo de expansão de dois relés, um deles utilizado para o controle de carga do banco de capacitores e o outro para a abertura da válvula solenoide de controle de injeção de gás inerte na câmara de solda. O módulo escolhido possui, além dos dois relés, um circuito amplificador, o que o torna compatível com a plataforma de desenvolvimento Arduino. O relé possui uma bobina com tensão de operação de 5 V e corrente de 25 mA . Os contatos do relé podem operar com a corrente máxima de 10 A .

A fonte de tensão simétrica, responsável pela alimentação do banco de capacitores é composta de um transformador abaixador de tensão, que altera a tensão da rede de alimentação de $127/220 \text{ V}$ para 24 V . Após a redução da tensão, a retificação do sinal alternado proveniente do transformador é realizada por uma ponte retificadora, que é composta por quatro diodos $1\text{N}4007$. Após a retificação do sinal ainda haverá uma característica oscilatória, necessitando de um ajuste final do sinal, o que é efetuado por meio de capacitores eletrolíticos de $4700 \mu\text{F}$.

Após a redução da tensão proveniente da rede, retificação e filtragem, a tensão deve ser regulada, o que é feito utilizando o regulador $\text{LM}317$ no lado positivo e o $\text{LM}337$ no lado negativo. Juntamente com os reguladores foram instalados potenciômetros, que serão responsáveis por criar um divisor de tensão, fazendo com que a saída da fonte seja ajustada a uma tensão desejada. Antes da saída de tensão final da fonte ainda é necessário mais uma filtragem no sinal, a qual é realizada por um par de capacitores eletrolíticos e cerâmicos de $10 \mu\text{F}$ e 100 nF , respectivamente. O resultado final é uma fonte de tensão contínua simétrica de 31 V de amplitude positiva, a qual poderá atingir valores de 62 V em corrente contínua. A característica simétrica foi escolhida devido à disponibilidade dos componentes no mercado, sendo a forma mais prática de atingir o objetivo do trabalho a um menor custo. A Fig. 2 mostra as etapas de retificação do sinal que é

realizada pela fonte. A Fig. 3 mostra o layout final do circuito da fonte de tensão desenvolvida.



Fig. 2. Etapas da conversão do sinal.

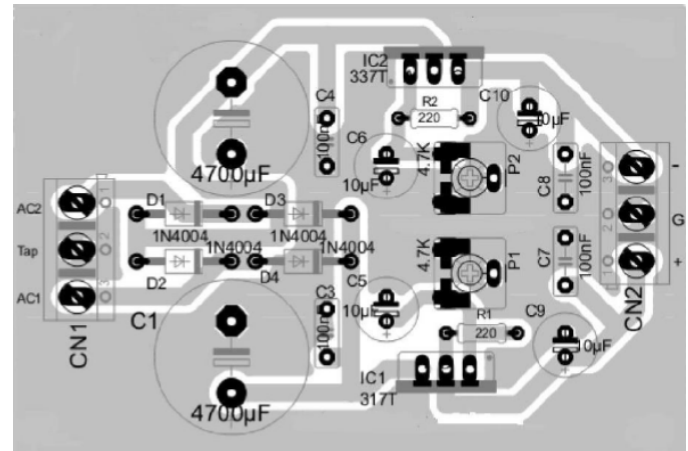


Fig. 3. Circuito final da fonte de tensão.

B. Cálculo da Quantidade de Energia

Para a determinação dos montantes de energia necessários para a soldagem dos termopares, realizam-se cálculos da conservação da massa e da energia envolvidos no processo. Uma solda de boa qualidade é aquela que garante o bom contato elétrico entre os dois materiais, mantendo suas propriedades químicas e físicas. Para isso é necessário que a energia gerada seja suficiente para fundir as ligas metálicas. Os cálculos devem levar em consideração as propriedades termodinâmicas para que tal fenômeno aconteça.

As propriedades requeridas no cálculo da quantidade de energia necessária para a realização da solda são: calores específicos, calores latentes, densidades, massas e temperatura de fusão das ligas metálicas que constituem os termopares.

O equipamento foi dimensionado para três bitolas de ligas metálicas a serem soldadas, sendo elas de 24 AWG , 26 AWG e 32 AWG . Valores de referência para indicar um raio satisfatório da esfera de solda foram estipulados por meio de experimentos práticos do tipo “tentativa e erro”, sendo ele de 2,4 vezes o diâmetro do fio para a bitola de 32 AWG e de 1,9 vezes para as bitolas de 26 AWG e 1,8 de 24 AWG . Com os valores de referência para o raio da esfera de solda gerada. Esse resultado será utilizado para os cálculos da quantidade de energia necessária para soldagem de cada termopar. Utilizando (1), (2), e (3) é demonstrado o balanço de energia realizado para que fosse determinado o montante de energia necessário para a fusão das ligas metálicas envolvidas. Para efeitos de cálculos foram desprezadas perdas para o meio externo.

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{Sensível}} + Q_{\text{Latente}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{Total}} = mc\Delta t + mL \quad (2)$$

$$Q_{Total} = V\rho c\Delta t + V\rho L \quad (3)$$

em que: Q_{Total} – Quantidade de calor total (J), $Q_{Sensível}$ – Quantidade de calor sensível (J), $Q_{Latente}$ – Quantidade de calor latente (J), V – Volume da esfera de solda (cm^3), ρ – Densidade do material (g cm^{-3}), c – Calor específico do material ($\text{J g}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-1}$), ΔT – Gradiente de temperatura (K), L – Calor latente de fusão, ou latência (J g^{-1}).

Na Tabela II são apresentados os resultados dos cálculos teóricos das energias necessárias para que ocorra a fusão das ligas metálicas e conseqüentemente a soldagem em cada tipo de termopar. Os compostos Alumel, Cromel e Constantan foram considerados como sendo compostos por 95% Ni e 5% Al, 90% Ni e 10% Cr, 55% Cu e 45% Ni respectivamente.

Considerando a composição de cada liga metálica utilizada nos diferentes tipos de termopares e suas respectivas bitolas, obtém-se a quantidade de energia necessária para a soldagem dos termopares. A escolha dos tipos de termopares a serem utilizados baseou-se na praticidade, baixo custo, precisão e facilidade na obtenção de cada liga metálica. A energia total necessária para a soldagem das ligas metálicas foi considerada como sendo a soma de cada liga metálica individualmente.

TABELA II
ENERGIA NECESSÁRIA PARA SOLDAGEM POR TIPO DE TERMOGAR (J)

Tipo de Termopar	Bitolas Termopar		
	24 AWG	26 AWG	32 AWG
E	46,755	27,420	6,852
J	47,373	27,783	6,942
K	54,441	31,928	7,978
T	38,567	22,618	5,65

Pode-se ver da Tabela II que a energia necessária para a soldagem varia devido ao tipo e bitola do termopar.

Para que a plataforma de desenvolvimento Arduino possa controlar a energia que será armazenada no banco de capacitores, a fim de garantir que os valores corretos de energia sejam desprezados no processo de soldagem dos diferentes tipos e tamanhos de termopares, foi realizado, por meio da (4), o cálculo da quantidade de energia que o banco de capacitores armazena de acordo com a tensão em seus terminais. O resultado deste cálculo é apresentado na Tabela III.

$$V = (2WC^{-1})^{1/2} \quad (4)$$

onde: V – Tensão (V), W – Energia (J), C – Capacitância (F).

TABELA III
TENSÃO NECESSÁRIA PARA SOLDAGEM (V)

Tipo de Termopar	Bitolas Termopar		
	24 AWG	26 AWG	32 AWG
E	49,869	38,191	19,091
J	50,198	38,442	19,217
K	53,813	41,210	20,6
T	49,293	34,686	17,339

Da mesma forma, pode-se ver na Tabela III, que de forma similar à Tabela II, a tensão também varia, naturalmente, com o tipo e bitola do termopar.

C. Programação da Plataforma de Desenvolvimento Arduino

Foram convertidos os valores calculados teoricamente para valores compatíveis e reconhecidos pela plataforma de desenvolvimento e que serão utilizados para a realização da soldagem dos termopares.

Os valores de tensão que deverão ser monitorados pela plataforma excedem em grande escala os valores aceitos pelo microcontrolador ATMEGA 328, sendo necessário desenvolvimento de um circuito, que realize a conversão das tensões no banco de capacitores para valores que variem de 0 a 5V. Para tal fim, foi desenvolvido um circuito, o qual faz uso de um divisor de tensão com resistores de $1\text{M}\Omega$ e $100\text{ k}\Omega$. Por meio da realização de testes experimentais, constatou-se que há uma proporção de 10:163 no divisor de tensão, fator utilizado para conversão de tensão.

Realizando a conversão dos valores de tensão lidos no banco de capacitores para a escala próxima de 0 a 5V que será lida pela plataforma, obtém-se os dados dispostos na Tabela IV.

TABELA IV
TENSÃO APRESENTADA NO DIVISOR DE TENSÃO (V)

Tipo de Termopar	Bitolas do Termopar		
	24 AWG	26 AWG	32 AWG
E	3,059	2,343	1,171
J	3,080	2,358	1,179
K	3,301	2,528	1,264
T	2,779	2,128	1,064

Como pode-se ver da Tabela IV, os valores são muitas vezes muito próximos.

Ao realizar a leitura, a plataforma converte o sinal de sua entrada analógica em valores que irão variar de 0 a 1023, sendo 0 para uma tensão de 0 V e 1023 para uma tensão de 5 V, de forma linear. A constante de conversão é aproximadamente igual a $4,8828 \times 10^{-3}$. Convertendo-se os valores da tensão para valores de representação numérica no microcontrolador, obtém-se os dados que são dispostos na rotina de programação da plataforma para que o microcontrolador possa atuar no processo de soldagem.

Desta forma, sabendo-se o tipo e a bitola do termopar pode-se ajustar o equipamento para o uso, o que é feito em um painel de botões, as informações escolhidas no menu interativo são apresentadas em um *display* LCD, o que facilita a interface com o usuário.

D. Soldagem

Os eletrodos de solda do aparelho, onde são fixadas as ligas metálicas para soldagem, devem ser acoplados por meio de um dispositivo que possibilite a transmissão de energia do banco de capacitores para as ligas metálicas que serão soldadas. Para a condução da energia do banco de capacitores até as ligas metálicas foi escolhido um condutor de cobre de 4 mm^2 no intuito de tornar a resistência a condução a menor possível.

A obtenção de uma soldagem de boa qualidade está diretamente ligada a uma boa fixação das ligas metálicas ao terminal de solda, que foi realizada com uma pinça ortodôntica que tem a função de manter as ligas metálicas o mais firmes possível para a soldagem. A pinça é conectada ao polo positivo do banco de capacitores, sendo a extremidade negativa disposta em uma escova de carvão proveniente de motores elétricos de indução. A escolha do carvão deve-se ao fato de que ele apresenta uma baixa resistência elétrica e um elevado ponto de fusão, características requeridas para que, no processo de soldagem das ligas metálicas, não seja inserido um terceiro componente na solda.

Com o objetivo de evitar a inclusão de elementos externos ao sistema na solda e que seja reduzida a oxidação causada pelo oxigênio atmosférico a soldagem é realizada no interior de uma câmara de solda que foi desenvolvida para o equipamento.

A câmara consiste de um tubo de vidro e diâmetro $\frac{3}{4}$ " de comprimento 10 cm. Numa das extremidades o tubo é aberto, na outra possui uma redução para o diâmetro $\frac{1}{4}$ ", lugar no qual é conectada uma mangueira para injeção de gás inerte, neste caso, argônio. A escova de carvão onde se deposita o eletrodo negativo do banco de capacitores fica posicionada no ponto médio do tubo, sendo que na parte superior existe um orifício e um corte longitudinal até a extremidade aberta do tubo. O orifício é utilizado para a introdução do par metálico no interior da câmara até que a escova de carvão seja tocada e ocorra a descarga capacitiva sob o fluxo de gás argônio. O gás argônio é proveniente de um cilindro com um regulador de pressão específico para o gás o qual é ajustado aproximadamente para 40% da vazão máxima de 40 Lmin^{-1} . O gás será liberado logo após a carga do banco de capacitores, no *display* LCD é indicada a informação de que a soldagem pode ser realizada. Logo após a soldagem, com a descarga do banco de capacitores, a válvula de gás é desativada. A Fig. 4 ilustra a câmara de solda, a Fig. 5 mostra o fluxograma do processo de soldagem de termopares.

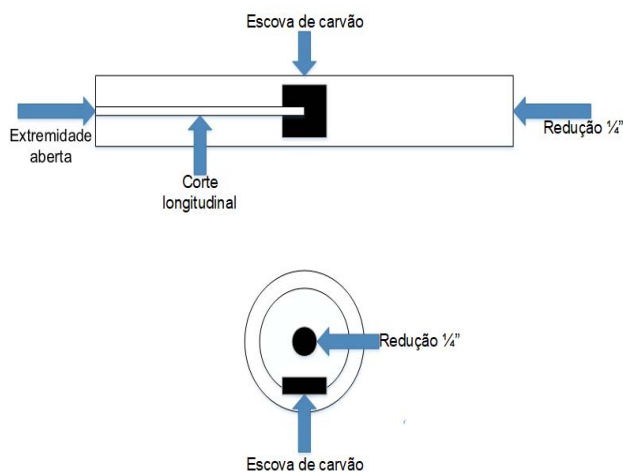


Fig. 4. Diagrama esquemático da câmara de soldagem.

O código de programação completo referente ao equipamento de soldagem está disponível em [22].

O procedimento de solda é realizado após as ligas metálicas que irão compor o termopar serem trançadas entre si para

obter a maior proximidade possível entre elas, com a finalidade de a descarga de corrente provocar a união estável das duas ligas metálicas. A Fig. 6 mostra um par metálico cobre/constantan trançado antes da soldagem, A Fig. 7 ilustra o processo de soldagem das ligas e na Fig. 8 apresenta o *layout* interno do equipamento de solda e a Fig. 9 o *layout* externo.

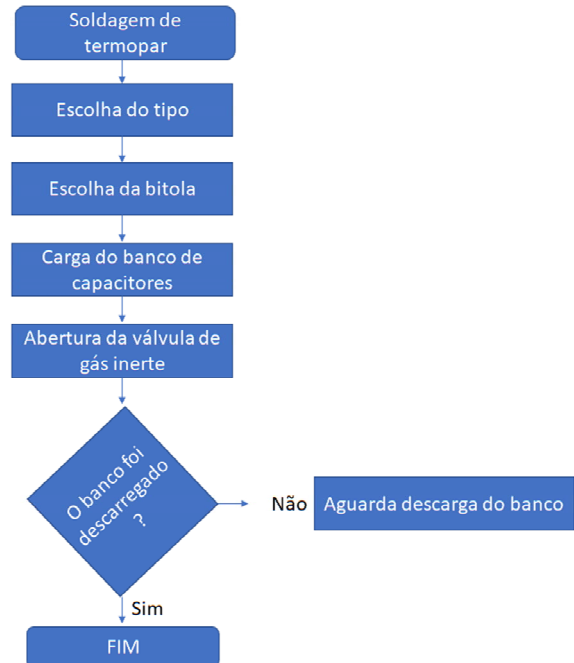


Fig. 5. Fluxograma do processo de soldagem.



Fig. 6. Par metálico termopar tipo T antes da soldagem.

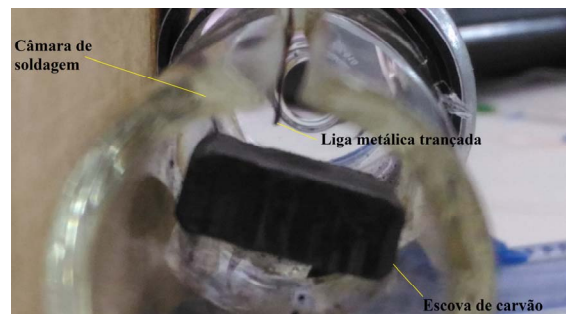


Fig. 7. Câmara de solda, posicionamento da escova de carvão e par metálico.

A Fig. 10 apresenta as informações exibidas no *display* LCD do equipamento de soldagem.

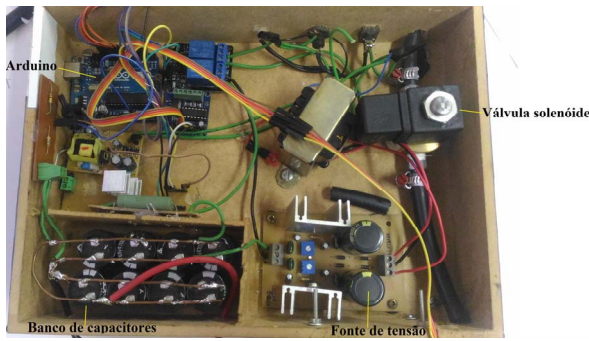


Fig. 8. Layout interno do equipamento de soldagem.

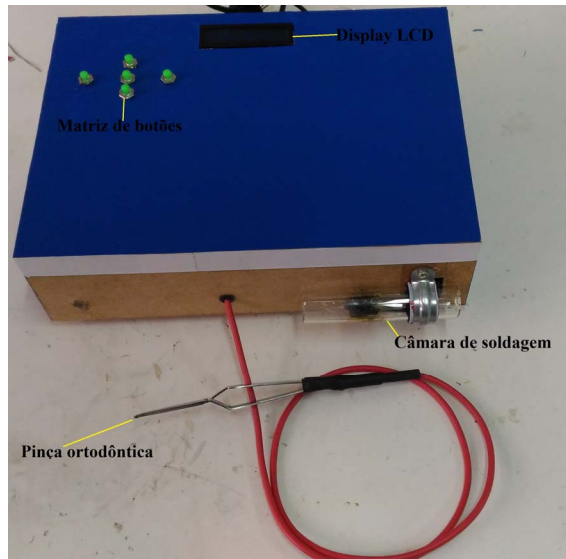


Fig. 9. Layout externo do equipamento de soldagem.



Fig. 10. Menu do dispositivo exibido no display LCD.

E. Análise de Custo

O equipamento desenvolvido possui a proposição de realizar uma solda de qualidade a um baixo custo de produção, uma vez que já foram apresentados os custos de

aquisição de equipamentos comercialmente disponíveis, apresenta-se nesta seção uma estimativa dos custos envolvidos no desenvolvimento do equipamento de solda, sem levar em conta mão de obra e lucro de revenda. A Tabela V apresenta os componentes que compõe o equipamento e seu respectivo custo.

TABELA V
ESTIMATIVA DE CUSTO

Componente	Custo (R\$)
Diodos	1,50
Capacitor eletrolítico fonte	10,00
Capacitor poliéster Fonte	2,00
Trimpot	8,00
Conectores de parafuso	1,60
Capacitores Banco	40,00
Arduino uno®	35,00
Módulo Relé 2 canais	10,00
Módulo L293D	16,00
Placa de fenolite	10,00
Válvula solenóide	205,00
Display LCD I2c	18,00
Botões pulsantes	2,50
Transformador	50,00
Total	409,60

Os custos envolvidos no desenvolvimento do equipamento são aproximadamente 16% do valor de mercado do equipamento disponível comercialmente mais barato. Ressalta-se que estes são custos estimados para a produção de um único equipamento, e que sua produção em larga escala pode reduzir consideravelmente os custos.

Da Tabela V podemos ver que o custo total do equipamento desenvolvido fica muito abaixo R409,00 do que os comerciais apresentados na Tabela I.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram realizados com 3 tipos de termopares, tipo K de bitola 32 AWG, tipo T com bitola de 26 AWG e um tipo E de 32 AWG. As soldas foram examinadas no microscópio para verificar as suas características, analisando o formato, tamanho, homogeneidade e cor. Os resultados são ilustrados na Fig. 11.



Figura 11. Termopar tipo E bitola 32 AWG (esq); Termopar tipo T bitola 26 AWG (centro); Termopar tipo K bitola 32 AWG (dir).

Pode-se verificar pelas ilustrações da Fig. 11 que todas as soldas apresentam bons resultados, pois possuem formato esférico, com pequenas imperfeições, o que indica uma boa união dos condutores. As esferas são visivelmente regulares, o que indica que a soldagem foi realizada com uma massa mínima. Quanto ao aspecto de coloração, possuem uma coloração próxima à dos fios metálicos, indicando que não houve uma significativa oxidação do material, mostrando que

o de gás argônio inserido na câmara de solda foi adequado.

Outro parâmetro estabelecido para a qualidade das soldas realizadas no equipamento foi a total utilização da energia armazenada no banco de capacitores na soldagem das ligas metálicas. Para isso utilizou-se o osciloscópio Tektronix que gerou as Figuras 12, 13 e 14 apresentando a curva de carga e descarga do banco de capacitores durante o processo de soldagem dos respectivos termopares tipo E, T e K nas bitolas de 32, 26 e 32 AWG respectivamente. Como pode ser observado, toda energia armazenada no banco de capacitores corresponde com a energia estimada matematicamente e é totalmente utilizada no processo de soldagem.

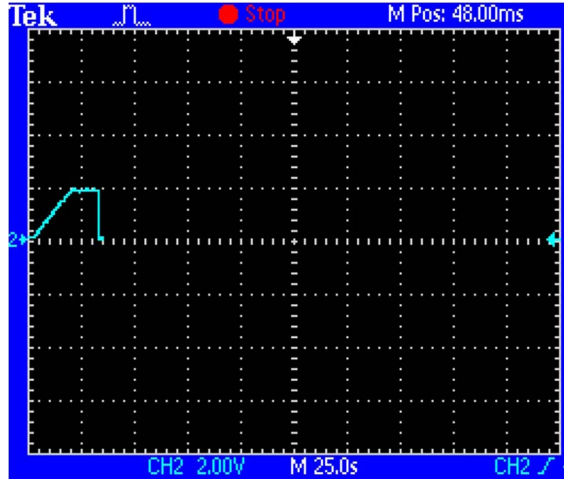


Fig. 12. Curva de carga e descarga do banco de capacitores para solda do termopar tipo E bitola de 32 AWG.

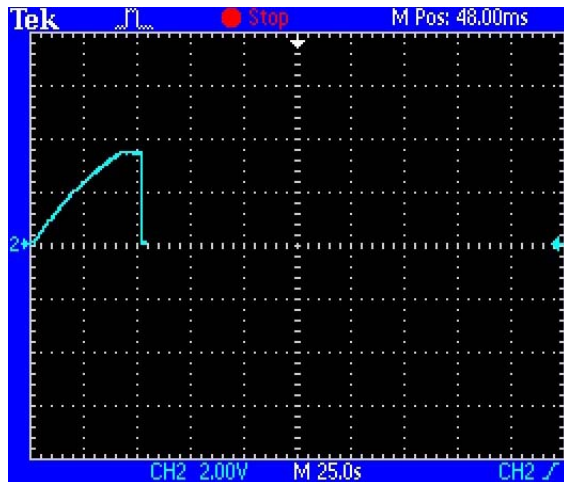


Fig. 13. Curva de carga e descarga do banco de capacitores para solda do termopar tipo T bitola de 26 AWG.

Ao analisar os dados dispostos nas figuras, pode-se afirmar que o valor teórico de tensão estimado foi totalmente armazenado no banco de capacitores e totalmente utilizado na descarga capacitiva de soldagem. A carga do banco de capacitores foi aproximadamente exponencial como esperado em uma curva de carga capacitiva e a descarga foi abrupta num intervalo de tempo muito pequeno (aproximadamente 400 ms), indicando que toda a energia foi utilizada no momento em que a liga metálica toca a escova de carvão no interior da câmara de solda.

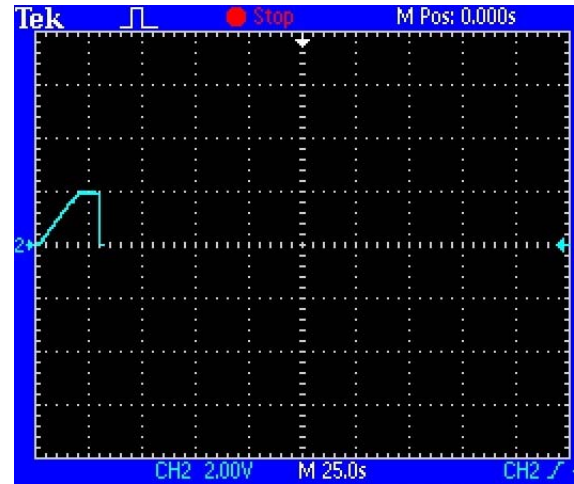


Fig. 14. Curva de carga e descarga do banco de capacitores para solda do termopar tipo K bitola de 32 AWG.

Outro critério de análise para a qualidade das soldas foi a resistência elétrica do condutor, uma resistência elétrica mínima indica um condutor elétrico próximo ao ideal. A Tabela VI apresenta os dados obtidos experimentalmente em um multímetro de bancada Tektronix com precisão de 4 casas decimais e acurácia de 15 ppm (15 m Ω). Para a determinação das resistências foram soldados 11 termopares de cada tipo, todos com o mesmo comprimento e suas extremidades foram submetidas a um multímetro de precisão.

TABELA VI
RESISTENCIA ELÉTRICA DOS TERMOPARES (Ω)

Tipo - Bitola		
T - 26 AWG	E - 32 AWG	K - 32 AWG
1,3865	2,1472	1,9305
1,3038	1,7738	1,7755
1,3595	2,1407	1,8601
1,3390	2,0267	1,9714
1,3423	1,9094	1,9964
1,3577	2,0887	1,9317
1,3284	2,1736	1,7261
1,3542	2,3145	1,9901
1,3778	2,1841	2,0530
1,3306	2,1270	1,9000
1,3000	2,2066	1,9010

Conforme pode se observar na Tabela VI as resistências para todos os tipos e bitolas de termopares estão entre 1,3 a 2,2 Ω , que podemos considerar como resistências baixas.

A análise estatística dos valores de resistência elétrica coletados dos experimentos é mostrada na Tabela VII. Os resultados estatísticos das resistências elétricas quanto a média, variância e desvio padrão, permitem afirmar que não houve grandes variações com relação às medidas, pois a variância se conservou próxima de zero com duas casas de

precisão após a vírgula. O desvio padrão também apresentou valores próximos a zero.

TABELA VII
ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Análise estatística			
Tipo - Bitola	Média	Variância	Desvio Padrão
T - 26	1,3436	0,0007	0,0261
E - 32	2,0993	0,0202	0,1423
K - 32	1,9123	0,0085	0,0922

Ao analisar os dados de resistência elétrica, constata-se que as resistências seguem a 2ª lei de Ohm, pois ocorre a redução da resistência elétrica dos pares metálicos com o aumento da secção transversal do condutor metálico que compõe o termopar.

Conforme vemos na Tabela VII, os dados estatísticos quantitativos mostram qualidade compatível.

Portanto o equipamento cumpriu bem o seu propósito. Em trabalhos futuros pretendemos automatizar a condução do par metálico para dentro da câmara de solda, eliminado ao máximo o contato humano durante o processo, o que garante uma menor oxidação e inclusão de elementos externos na solda, assim como uma maior firmeza no movimento. A utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para determinar a morfologia da solda, juntamente com uma análise química elementar, que poderia determinar precisamente a qualidade da solda e característica ocultas no interior da esfera de solda.

IV. CONCLUSÃO

Foi apresentado o desenvolvimento e aplicações de um equipamento para a solda de metais de ligas de pequena espessura, mais especificamente os termopares. Conforme descrito, o equipamento é de adequado manuseio. Tem como distinção em relação aos comerciais, os fatos de que a energia para a solda é a necessária, levando-se em conta a bitola e o tipo de material, bem como é executada num ambiente inerte. Os resultados apresentados mostram que os sistemas de automatização, a quantidade de energia despendida e a atmosfera inerte, foram alcançados, conforme os resultados da avaliação dos termopares obtidos.

Para avaliação dos termopares produzidos consideramos: análise visual da solda (formato, tamanho, homogeneidade e cor), averiguação de que a energia utilizada era a adequada (via medição da descarga dos capacitores), avaliação da resistência elétrica (via medida da resistência nos termopares) que ficou entre 1,3 à 2,2, assim como os dados estatísticos quantitativos são adequados. Segundo estes critérios pode-se dizer que os termopares apresentam boa qualidade e que o equipamento usa a energia prevista, cumprindo seu propósito. Apresentou-se, também, uma análise de custo em relação aos existentes no mercado. O desenvolvido, sem considerar a mão de obra, é em torno de 16% do valor do de menor custo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] Houldcroft, R. L., "Properties and classification of welding processes" in *Welding Process Technology*, 1st ed. New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1977 pp. 1-15.
- [2] Tohmyooh, H., Imaizumi, T., Hayashi, H., Saka, M., "Welding of Pt nanowires by Joule heating," *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 10, pp. 953-956, aug. 2007, DOI. 10.1016/j.scriptamat.2007.07.018.
- [3] Peng, Y., Cullis, T., Inkson, B., "Bottom-up nanoconstriction by the welding of individual metallic nanoobjects using nanoscale solder", *Nano Letters*, vol. 9, no.1, pp. 91-96, out. 2009, DOI. 10.1021/nl8025339.
- [4] Kim, S. J., Jang, D. -J., "Laser-induced nanowelding of gold nanoparticles", *Applied Physics Letters*, vol. 86, no.3, pp. 1-3, jan. 2005, DOI: 10.1063/1.1856139.
- [5] Hu, A., Peng, P., Alarifi, H., Zhang, X. Y., Guo, J. Y., Zhou, Y., Duley, W. W., "Femtosecond laser welded nanostructures and plasmonic devices", *Journal of Laser Applications*, vol. 24, no 4, pp. 1-7, jul. 2012, DOI. 10.2351/1.3695174.
- [6] Kumar, S., Wu, C. S., Padhy, G. K., Ding, W., "Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review", *Journal of manufacturing processes*, vol. 26, pp. 295-332, 2017, DOI. 10.1016/j.jmapro.2017.02.027.
- [7] Beard, R.F., "Basics of GMAW and GTAW: Gas Metal arc welding, gas tungsten arc welding" Amer. Assoc. Vocat Instruction., New York, USA, jun, 1999.
- [8] Thermoelectric Materials for Thermocouples, The operating principle, Cambridge University, Disponível em <<https://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>>. Acessado em 5/6/2019 as 11:00 h.
- [9] Capgo, "Thermocouple Theory". Disponível em: <<http://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html>>. Acessado em abril de 2019.
- [10] Wang, T. P., "Thermocouple Materials", *ASM Handbook*, Vol. 2, 1990.
- [11] Hart, E.D., Elkin, W.H., "Welding Fine Thermocouples Wires". *Journal of scientific instruments*, Ed. 23 Vol. 1, pp. 17-18, nov. 1945.
- [12] Hickson, V. M., "The Welding of Thermocouples Junctions", *Journal of scientific instruments*, Vol. 17, Ed.7, pp. 182-186. mar. 1940. DOI. 10.1088/0950-7671/17/7/303.
- [13] Amitabha G., et. al., "Microwelding using Electrochemical Discharge", Elsevier Science, Vol. 37, n° 9, pp. 1303-1312, 1997, DOI. 10.1016/s0890-6955(96)00064-8.
- [14] Zanstra, P. E., "Welding Uniform Sized Thermocouple Junctions for thin Wires". *Journal of physics E Scientific Instruments*, vol. 9, no.7, pp. 526-528, 1976, DOI. 10.1088/0022-3735/9/7/004.
- [15] Orr, G., Roth, M., "Safe and consistente method of spot-welding platinum thermocouple wires and foils for high temperature measurements", *Review of scientific instruments*, Vol. 83, no. 8, ago. 2012, DOI.10.1063/1.4746383.
- [16] Amada Miyachi, thermocouple welder TCW, Disponível em:<<http://br.amadamiyachi.com/products/resistance-welding/rw-power-supplies/thermocouple-welder>>. Acessado em 7 junho de 2019.
- [17] VMV Costa, eletronic welder EW900, Disponível em: <<http://vmvcosta.com.br/#blog>>. Acessado em 7 de junho de 2019.
- [18] OMEGA, fine wire and thermocouple welder model TL-WELD, Disponível em: <https://br.omega.com/pptst/TL_WELD.html>. Acessado em 7 de junho de 2019.
- [19] MES, thermocouple and fine wires welder model TL-WELD, Disponível em: <<https://www.amazon.com/TL-WELD-Thermocouple-Welding-reliability-thermocouple/dp/B01ALZ2HK4>>. Acessado em 7 de junho de 2019.
- [20] TIP-TEMP, Thermocouple wire welder model 300, Disponível em: <<http://www.tiptemp.com/Products/Welding-Brazing-Thermocouple-Welder/THEACC001-Thermocouple-Wire-Welder-Model-300.html>>.Acessado em 7 de junho de 2019.

- [21] BEL, Thermocouple Welder model TLWELD9, Disponível em: <https://testerstore.en.eplaza.net/products/bel-thermocouple-welder-tlweld9_1705736>. Acessado em 7 de junho de 2019.
- [22] Fermo, I. R., “Desenvolvimento de equipamento automatizado de solda capacitiva em ambiente inerte para ligas metálicas de pequena espessura de soldagem”, Dissertação de Mestrado, DEQ, UEM, Maringá, BR, 2017.



Igor Rossi Fermo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Maringá (2015), mestrado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (2017) e atualmente é aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá e bolsista CAPES. Tem experiência na área de Engenharia elétrica com ênfases na instrumentação (sensores), modelagem, simulação e controle de suas operações unitárias, automação de processos e processamento digital de imagens.



Marcos de Souza possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá, concluídos, respectivamente, em 1991, 2003 e 2007. Professor na Universidade Estadual de Maringá (Paraná). Tem experiência na área de Engenharia Química, com ênfase em Cinética Enzimática, Reatores de microcanais e Secagem, atuando principalmente nos seguintes temas: Produção de Ciclodextrina, Reforma a Vapor de Etanol e Secagem de Soja e Farelo de Soja.



Rubens Zenko Sakiyama possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) (1983), especialização em Automação Industrial pela Universidade Estadual de Maringá (2011), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Maringá (2014) e atualmente é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá onde também atua como Professor do curso de Engenharia Elétrica. Tem experiência na área de circuitos digitais e microcontroladores, onde desenvolveu projetos nas áreas de instrumentos eletrônicos, emuladores para microprocessadores, supervisão de centrais telefônicas e automação de processos industriais em empresas onde atuou no período de 1984 a 2008.



Cid Marcos Gonçalves Andrade possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (1983), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (1990) e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (2000). Realizou Pós-Doutorados na UFRJ e na Universidade de Calgary-Canadá, onde atuou também como Professor Visitante. Atualmente é professor da Universidade Estadual de Maringá, atuando nos cursos de graduação em Eng. Química e Eng. Elétrica, e nos cursos de Mestrado e Doutorado em Eng. Química e Mestrado em Eng. Mecânica. Tem experiência nas áreas de Engenharia Química, Ciência e Tecnologia de Alimentos, Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica. Com ênfases na instrumentação (sensores), modelagem, simulação e controle de suas operações unitárias, assim como, os processos globais de produção, sob os aspectos energéticos. Atua também na área de Ensino. É o Coordenador do Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Coordena o Laboratório de Sistemas Microcontrolados-EE e o Laboratório de Projeto, Simulação e Controle de Processos-EQ. É bolsista do CNPq.