



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**“DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GARRA
INSTRUMENTADA PARA A SOLDAGEM ROBOTIZADA
COM ELETRODO REVESTIDO”**

CAROLINA MEIRELLES DANTAS

Belo Horizonte, 17 de Abril de 2006.

Carolina Meirelles Dantas

“DESENVOLVIMENTO DE UMA GARRA INSTRUMENTADA PARA SOLDAGEM ROBOTIZADA COM ELETRODO REVESTIDO”

Dissertação/Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense

Universidade Federal de Minas Gerais

Co-orientador: Prof. Eduardo José Lima II

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

<http://www.demec.ufmg.br> - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

“DESENVOLVIMENTO DE UMA GARRA INSTRUMENTADA PARA SOLDAGEM ROBOTIZADA COM ELETRODO REVESTIDO”

CAROLINA MEIRELLES DANTAS

Dissertação defendida e aprovada em 17, de Abril de 2006, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração "**Processos de Fabricação**".

Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG - Orientador

Prof. Dr. Eduardo José Lima II - UFMG – Co-Orientador

Prof. Dr. Ricardo Alberto Neto Ferreira - CDTN – Examinador

Prof. Dr. Vitor Ferreira Romano - UFRJ – Examinador

AGRADECIMENTOS

Aos meus quatro pais, aos meus queridos irmãos e a toda a minha família, pela grande ajuda, compreensão e amor dedicados a mim, na realização deste trabalho e sempre.

Ao Alahdjín, que mesmo nas horas difíceis sempre me apoiou, com muito amor e carinho, e que não me deixou abalar pelos obstáculos encontrados, ao contrário, sempre me fortaleceu e me mostrou ser capaz de vencê-los.

Aos pais e irmãos do Alahdjín, que sempre estiveram presentes e sempre ajudaram em tudo que podiam e em mais um pouco.

Ao Professor Alexandre Queiroz, pela confiança em mim depositada e por mostrar que devemos seguir nossos próprios caminho e intuições.

À todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, em especial aos professores Roberto Márcio de Andrade, Ramóm Molina Valle, Ricardo Utsch, Marcos Bortolus, Ivanilza Felizardo pela ajuda material e pelo ombro amigo.

À meus queridos amigos do Laboratório de Soldagem, que sempre me ajudaram, mesmo nas horas mais inusitadas, em especial Eduardo José Lima II, Alexandre Rizutto, Rodrigo Borges Rabelo e Estevão Zanatta.

À minhas queridas amigas e amigos (Luana, Miriam, Camila, Leo, Hélio e todos) por me escutarem e me apoiarem quando as soluções não eram visíveis.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, por estarem sempre dispostos a me ajudar como fosse possível, em especial à Sandra e a Jose.

Ao CNPq e ao LRSS pelo apoio financeiro e material despendidos na execução deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

"O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim por causa daqueles que observam e deixam o mal acontecer"

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE GRÁFICOS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iv
LISTA DE EQUAÇÕES.....	v
NOMENCLATURA.....	vi
RESUMO.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1. O processo de soldagem a arco.....	03
2.1.1. Os consumíveis de soldagem.....	06
2.1.2. Tipos de eletrodos.....	07
2.2. Mecanização do processo de soldagem.....	09
2.3. Garras.....	11
2.4. Aquecimento do eletrodo revestido.....	14
2.5. Distribuição de calor ao longo do eletrodo e taxa de fusão.....	16
2.6. Medição de temperatura.....	22
2.7. Soldagem Robotizada.....	42
3. METODOLOGIA	
3.1. Projeto da Garra.....	45
3.1.1. Escolha e adequação.....	45
3.1.2. Instrumentação da garra.....	46
3.1.3. Adaptação da garra e de seu sistema de acionamento no manipulador.....	50
3.1. Preparação dos eletrodos.....	54
3.2. Sistema de Aquisição de Dados.....	55
3.3. Projeto do circuito de acionamento.....	60
4. RESULTADOS	
4.1. Testes (<i>mandril 1</i>).....	64
4.1.1. Primeira batelada.....	64
4.1.2. Segunda batelada.....	66

4.2. Testes de Acionamento.....	68
5. CONCLUSÕES.....	70
ABSTRACT.....	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	
APÊNDICE	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema da soldagem SMAW.....	04
Figura 2.2 Exemplo de porta-eletrodo.....	05
Figura 2.3 Dispositivo de solda por gravidade.....	09
Figura 2.4 Sistema de alimentação de eletrodos.....	10
Figura 2.5 Garra proposta por Rupp e Velastin.....	11
Figura 2.6 Garra proposta por Saliba e De Silva.....	12
Figura 2.7 Garra proposta por Howe.....	12
Figura 2.8 Termômetro de dilatação de líquido de material vítreo.....	24
Figura 2.9 Termômetro de dilatação de líquido de material metálico.....	26
Figura 2.10 Termômetro de dilatação de gás.....	27
Figura 2.11 Termômetro à pressão de vapor	28
Figura 2.12 Termômetro bimetálico.....	29
Figura 2.13 Termoresistência de platina.....	31
Figura 2.14 Termoresistência de platina com isolamento mineral.....	31
Figura 2.15 Termoresistência de platina num circuito tipo ponte Wheatstone.....	32
Figura 2.16 Sistema de medição utilizando termopar.....	33
Figura 2.17 Efeito Seebeck.....	34
Figura 2.18 Efeito Peltier.....	35
Figura 2.19 Termopar de isolamento mineral.....	38
Figura 2.20 Pirômetro de radiação.....	41
Figura 3.1 Mandril ROHM (adaptação do catálogo ROHM).....	46
Figura 3.2 Interior do mandril (adaptação do catálogo ROHM).....	47
Figura 3.3 Localização os termopares (mandril 1).....	48
Figura 3.4 Distribuição dos termopares.....	48
Figura 3.5 Termopar com juntas soldadas.....	49
Figura 3.6 Adaptação garra/manipulador.....	50
Figura 3.7 Chave do mandril ROHM.....	51
Figura 3.8 Adaptação (fixação motor/manipulador).....	51
Figura 3.9 Sistema adaptado.....	52
Figura 3.10 Montagem do sistema completo.....	53
Figura 3.11 Posicionamento dos termopares nos eletrodo.....	54

Figura 3.12 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	55
Figura 3.13 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	56
Figura 3.14 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	56
Figura 3.15 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	57
Figura 3.16 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	57
Figura 3.17 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	58
Figura 3.18 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	58
Figura 3.19 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	59
Figura 3.20 Diagrama em Blocos – Tela 1.....	59
Figura 3.21 Programa (parte gráfica/interface).....	60
Figura 3.22 Esquema do circuito de acionamento.....	61
Figura 3.23 Circuito (parte inferior)	61
Figura 3.24 Circuito (parte superior)	62
Figura 3.25 Esquema elétrico do circuito de acionamento.....	62
Figura 4.1 Chapa soldada.....	64
Figura 4.2 Localização dos termopares nos eletrodos (segunda batelada).....	68
Figura 4.3 Posição inicial do Manipulador – Mandril fechado.....	69
Figura 4.4 Posição intermediária do Manipulador – Mandril aberto.....	69
Figura 4.5 Posição intermediária do Manipulador – Mandril fechado e segurando o eletrodo.....	70
Figura 4.6 Posição intermediária do Manipulador – Mandril segurando o eletrodo e retornando à posição inicial.....	70
Figura 4.7 Posição final do Manipulador – Mandril segurando o eletrodo.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Materiais utilizados na fabricação da alma dos eletrodos revestidos.....	06
Tabela 2.2 Líquidos de preenchimento (termômetro vítreo).....	24
Tabela 2.3 Líquidos de preenchimento (termômetro metálico).....	26
Tabela 2.4 Gases de preenchimento.....	27
Tabela 2.5 Líquidos de preenchimento.....	28
Tabela 2.6 Termopares comerciais.....	37
Tabela 3.1 Ação executada pelo mandril.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Esquema representativo dos resultados obtidos por Rosenthal.....	18
Gráfico 2.2 - Perfil de temperatura proposto por Waszink e Piena [1985] e comprovados por Quinn et al [1997]	19
Gráfico 2.3 - Perfil de temperatura obtido por Felizardo e detalhe do perfil na região do porta- eletrodos.....	21
Gráfico 2.4 - Comportamento típico de alguns termorresistores.....	30
Gráfico 2.5 - Comportamento típico de um termistor.....	33
Gráfico 2.6 - Variação em mV devido à temperatura.....	37
Gráfico 4.1 - Resultados (primeira batelada)	65
Gráfico 4.2 – Resultados (segunda batelada)	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
LRSS	Laboratório de Robótica Soldagem e Simulação

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 Potência gerada no arame devido ao efeito Joule.....	14
Equação 2.2 Resistência elétrica dos fios condutores.....	14

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Área [mm^2]
i	Corrente Elétrica [Ampéres]
L	Comprimento [mm]
P	Potência gerada pelo efeito Joule [Watts]
R	Resistência elétrica dos fios condutores [Ohms]

Letras Gregas

ρ	Resistividade elétrica ou resistência específica do material [Ohms.mm]
--------	--

RESUMO

A robotização do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) poderia trazer grandes vantagens em relação à qualidade e a repetibilidade das soldas obtidas pelo processo. Contudo, a maior dificuldade para a robotização reside no fato de que a taxa de fusão do eletrodo varia durante a soldagem. Essa variação da taxa de fusão durante a soldagem é causada pelo aquecimento da alma eletrodo pelo efeito Joule, provocado pela constante passagem de corrente no comprimento ainda não consumido do eletrodo. O conhecimento do comportamento da taxa de fusão é indispensável para a robotização do processo, pois as velocidades de avanço e de mergulho realizadas pelo manipulador são funções desse comportamento, já que se a soldagem for realizada com velocidade de mergulho constante, obtém-se um cordão de solda com características dimensionais não homogêneas (Bracarense, 1994), pois quanto maior a taxa de consumo, maior deve ser a velocidade de avanço do eletrodo em direção à poça de fusão. Este trabalho descreve a metodologia do desenvolvimento de uma garra robótica que incorpora termopares acoplados nos pontos de contato com o eletrodo revestido, permitindo a monitoração da temperatura nesta área e a passagem da corrente necessária à fusão do eletrodo, como também apresenta os testes experimentais realizados e a modelagem experimental da temperatura obtida, com o objetivo de estimar sua taxa de fusão instantânea e conseqüentemente as velocidades de soldagem, necessárias à robotização do processo SMAW.

Palavras chave: robotização, SMAW, garra instrumentada.

OBJETIVO

Este trabalho possuiu dois objetivos: o primeiro foi o desenvolvimento de uma garra robótica instrumentada com sensores de temperatura e com abertura e fechamento automático, com o intuito de promover a robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido. Através da monitoração da temperatura na garra (mandril), torna-se possível a determinação da taxa de fusão instantânea do eletrodo, permitindo ao controlador do manipulador robótico a correta determinação das velocidades de avanço e mergulho, que devem variar devido ao pré-aquecimento dos eletrodos causado pelo efeito Joule na alma do eletrodo. O segundo objetivo foi o de correlacionar as temperaturas atingidas pelas diferentes regiões do eletrodo (regiões revestida e não-revestida do eletrodo) e a temperatura na interface garra/eletrodo, de modo a avaliar qualitativamente se através da medição de temperatura na garra é possível inferir a temperatura atingida pela alma do eletrodo.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem com eletrodo revestido, também conhecido como SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) é um dos processos de união por soldagem mais utilizados no mundo, embora muitos pesquisadores e utilizadores deste processo acreditem que se trata de uma técnica em decadência, por se tratar de um processo ainda não robotizado ou automatizado [ABM, 1979; Felizardo, 2003]. Ou seja, o SMAW ainda é realizado de maneira manual, já que o controle automático das variáveis do processo é complexo de ser realizado. Conseqüentemente, a soldagem com eletrodo revestido deixa a desejar em relação à homogeneidade microestrutural e aos aspectos físico e dimensional da junta soldada [Quinn et al., 1997], visto que esses são aspectos difíceis de serem controlados pelo operador humano.

Pode se afirmar que as vantagens deste processo são mais numerosas que suas desvantagens. Por exemplo, este processo é extremamente utilizado na soldagem subaquática, onde o emprego de outros processos torna difícil a execução de um cordão de solda adequado, além de serem custosos em relação aos equipamentos exigidos para este tipo de aplicação [Pessoa, 2003]. Deste modo, a tentativa e o estudo do procedimento de robotização do processo com eletrodo revestido se torna importante.

A mecanização do processo de soldagem já foi realizada, sobretudo através de dispositivos de soldagem por gravidade [Marques et al., 2005]. Este dispositivo de soldagem proporciona soldas com maior repetibilidade, contudo sua aplicação é muito limitada, pois a montagem do mecanismo limita a geometria do cordão e as posições de soldagem.

A robotização do processo de soldagem traria vantagens tanto em relação à repetibilidade das soldas quanto em relação às possíveis geometrias das juntas.

Um dos maiores inconvenientes, no que diz respeito à tentativa de robotização do processo SMAW, reside no fato de que a taxa de fusão do eletrodo revestido varia no decorrer da soldagem. A taxa de fusão é uma medida do consumo instantâneo do eletrodo. Durante a soldagem, a corrente passa desde o ponto de contato entre o porta-eletrodo e a região não revestida do eletrodo até o arco, causando o aquecimento do eletrodo por efeito Joule (I^2R). Como o eletrodo revestido vai sendo consumido ao longo da soldagem, seu comprimento também diminui, o que causaria a redução do efeito Joule. Contudo, o aumento da temperatura na alma do eletrodo provoca o aumento de sua resistividade [Metals Handbook, 1978], o que, apesar da diminuição do comprimento do eletrodo, causa um aumento significativo do efeito Joule por unidade de comprimento do eletrodo [Bracarense, 1993].

Portanto, à medida que o eletrodo revestido é consumido, a taxa de fusão é aumentada, já que o aumento da energia por unidade de comprimento do eletrodo é em sua maior parte utilizada para aumentar a temperatura da alma do eletrodo, que libera apenas uma pequena quantidade desta energia para o ambiente ao seu redor. Sendo assim, o aumento da temperatura do arame representa um pré-aquecimento e pré-fornecimento de energia para o comprimento não-consumido do eletrodo, e, portanto, soma-se à energia despendida pela corrente de soldagem para provocar o aumento de temperatura e fusão localizada da ponta do eletrodo.

Para uma determinada velocidade de avanço, as trajetórias e velocidades a serem executadas pelo manipulador robótico são funções do comportamento da taxa de fusão, e, portanto, o conhecimento deste comportamento é de fundamental importância para a robotização desta técnica.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma garra acionada eletricamente e instrumentada com termopares, que permitem monitorar a temperatura do eletrodo revestido, o que possibilitará, num trabalho futuro, estimar a taxa de fusão instantânea do eletrodo, através de modelos computacionais.

A garra idealizada é um mandril instrumentado com termopares. Os termopares estão conectados a um sistema de aquisição de dados, que obtém medidas de temperatura e os envia ao programa de aquisição, realizado a partir do software LabVIEW (versão Student). A partir destes dados, será possível fornecer informações ao controlador, permitindo que este se desloque corretamente em relação à junta de solda.

A garra é acionada a partir de um sistema elétrico, que permite sua abertura e fechamento automático. Este sistema é composto por um circuito elétrico que controla, pelo envio de comandos do controlador do manipulador, a abertura e fechamento da garra, através da variação da trajetória (inversão) da corrente que aciona um motor de corrente contínua. Este motor tem como finalidade promover a abertura e fechamento da garra, para o correto manuseio dos eletrodos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de soldagem a arco

A soldagem a arco elétrico é uma operação que assegura, através de uma fusão localizada, a continuidade metálica de um conjunto de peças, com o intuito de produzir uma junta com as propriedades necessárias ao seu correto desempenho [ABM, 1979].

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido [Welding Handbook, 1991], ou SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), é um processo relativamente simples, já que os equipamentos necessários para sua execução e a regulação dos parâmetros de soldagem são também relativamente simples [ABM, 1979; Juers, 1993].

Este processo tipicamente manual permite um bom controle das variáveis de soldagem pelo soldador, sendo possível empregá-lo nas mais diversas aplicações, como na soldagem de aços especiais, de alta liga e de metais dissimilares [Marques et al., 2005]. É também o processo mais utilizado na soldagem subaquática. Pode ser usado em todas as posições (inclusive em sobre-cabeça), tratando-se, portanto, de um processo bem flexível [Welding Handbook, 1991; Marques, 2005].

Uma grande vantagem deste processo em relação aos demais é o controle da microestrutura e das propriedades do metal de solda através da variação da composição química do revestimento [Marques et al., 2005], ou seja, tanto os meios de proteção da junta como suas propriedades microestruturais são obtidas pelo próprio eletrodo, não sendo necessária a utilização de equipamentos ou acessórios adicionais. Além disso, os gases de proteção gerados na fusão do eletrodo revestido são menos sensíveis a correntes de ar do que os processos com proteção gasosa externa [Marques et al., 2005].

No processo SMAW, o soldador é responsável tanto pela abertura e fechamento do arco elétrico, quanto pela troca do eletrodo e pela execução dos movimentos de avanço de mergulho do mesmo. Conclui-se, portanto, que a habilidade do soldador é um fator determinante para a qualidade final da solda, visto que os movimentos de avanço e mergulho realizados pelo mesmo devem ser sincronizados de tal forma que o comprimento do arco seja mantido o mais constante possível durante o processo. Além dos movimentos de avanço e mergulho serem fortes candidatos a provocar alterações no comprimento do arco, existe ainda a possibilidade de flutuações na tensão do arco devido a modificações na velocidade de soldagem, formação de gás e agitação da poça de soldagem [J.ter Berg e A. Larigaldie, 1952].

Portanto, é de fundamental importância que o soldador esteja atento a todos estes fatores, para que não haja mudanças dimensionais e metalúrgicas no cordão de solda.

No processo de soldagem a arco elétrico (FIG. 2.1), utiliza-se do efeito do arco como fonte de calor para a realização da soldagem, através da transformação de energia elétrica em térmica [Marques et al, 2005]. O arco é uma descarga elétrica em meio gasoso ionizado (plasma), acompanhado de geração de luz e desprendimento de calor [ABM, 1979; Marques et al., 2005]. O fluxo de corrente durante o processo SMAW ocorre pela condução de elétrons através do arco elétrico. A corrente elétrica pode ser conduzida tanto da peça para o eletrodo quanto do eletrodo para a peça, dependendo da polaridade. Pode-se ainda utilizar uma corrente de soldagem alternada; a direção do fluxo de elétrons neste caso seria invertida a cada meio período [Marques et al., 2005].

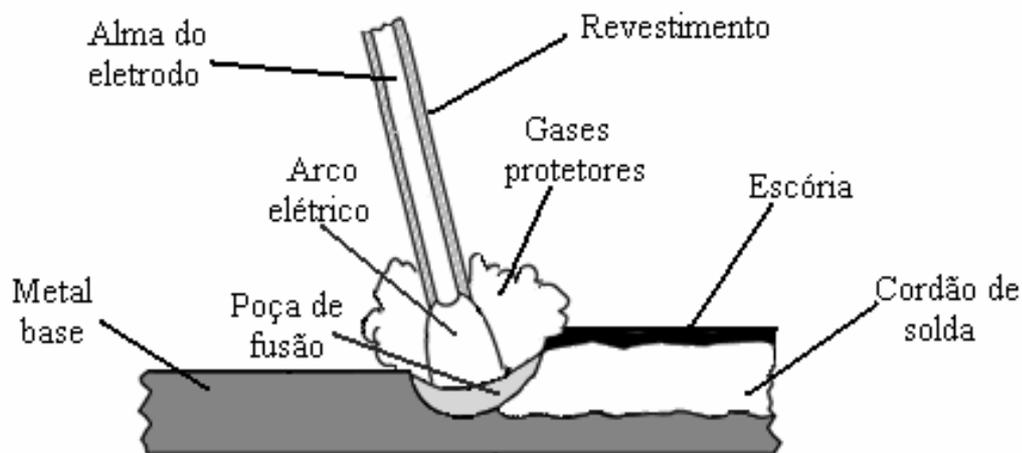


FIG. 2.1– Esquema da soldagem SMAW.

A região não revestida do eletrodo fica presa ao porta-eletrodos, permitindo a condução elétrica da corrente de soldagem. É importante salientar que os porta-eletrodos, utilizados como garras manuais para a soldagem com eletrodos revestidos, funcionam por alavanca: duas alavancas de metal que estão conectadas por um pino e ligadas por uma mola com alta rigidez, para que ao fecharem façam um bom contato com a região não revestida do eletrodo (FIG. 2.2). Seu princípio de funcionamento é extremamente simples; podendo ser feita uma analogia entre um porta-eletrodo e um pregador de roupas.



FIG. 2.2 - Exemplo de porta-eletrodo.

FONTE: www.cigsoldas.com.br (adaptação)

Na soldagem SMAW, o porta-eletrodos se conecta a fontes de soldagem do tipo corrente constante. Este tipo de fonte permite apenas pequenas variações dos valores de corrente, mesmo havendo grandes variações do comprimento do arco, controlado manualmente pelo soldador, o que diminui a variação de parâmetros durante a soldagem manual [ABM, 1979; Drapinski, 1979; Marques et al, 2005].

A corrente de soldagem, alternada ou contínua, passa do porta-eletrodo para o arame e através deste para o arco elétrico, sustentando-o. Normalmente, o eletrodo revestido é conectado ao pólo positivo da máquina (polaridade reversa), devido as características dos eletrodos utilizados nos experimentos (recomendação dos fabricantes), mantendo, assim, o arco mais estável.

O início da soldagem propriamente dita ocorre quando a ponta livre do eletrodo toca o metal de base. Promove-se então a abertura do arco elétrico, através primeiramente da aproximação do eletrodo energizado em relação à peça (ambos condutores) e seguido do afastamento, aumentando a resistência ao fluxo de corrente, elevando a temperatura na região. O arco é então mantido numa fresta de gás proveniente da queima do revestimento e da alma do eletrodo [ABM, 1979, Marques1991]. Neste momento, ocorre a formação da poça de fusão, resultado da fusão do metal de base e dos glóbulos de eletrodo revestido transferidos para a poça.

Como mencionado anteriormente, pode-se obter diversos tipos de propriedades mecânicas alterando-se os eletrodos de soldagem, já que esta alteração causa mudanças tanto na composição química da junta soldada quanto na soldagem propriamente dita (gás produzido, tamanho da poça de fusão e escória gerada, entre outros fatores).

2.1.1. Os consumíveis de soldagem

Os eletrodos revestidos para soldagem elétrica a arco são constituídos por uma alma metálica, envolta por um revestimento composto de matérias orgânicas ou minerais, de dosagens bem definidas [Marques et al, 2005; ABM, 1979].

A composição química da alma depende do tipo de metal a ser soldado, podendo ser da mesma natureza ou de natureza diferente do metal de base.

O revestimento do eletrodo consiste de uma mistura de diferentes materiais, geralmente na forma de pó, na maioria óxidos, a exceção do aglomerante; este geralmente sendo constituído de silicato de sódio ou de potássio [ABM, 1979]. A proporção de cada elemento contida no revestimento é bem definida, de acordo com as características desejadas da junta a ser soldada. Os elementos de um revestimento podem ter mais de uma função e diferentes elementos no mesmo revestimento podem contribuir para a mesma função.

Para a soldagem dos materiais abaixo mencionados, as almas dos eletrodos mais comumente encontradas são as seguintes:

TABELA 2.1

Materiais utilizados na fabricação da alma dos eletrodos revestidos.

Metal de base	Alma do eletrodo
1. Aços doces	Aço efervescente com C < 0,10%
2. Aços de baixa liga	Idem
3. Aços inoxidáveis: AISI 304 AISI 316 AISI 310	Aço inox. 304 ou o mesmo que 1 Aço inox. 304 ou 316 ou mesmo que 1 Aço inox. 310
4. Ferro fundido	Níquel puro ou liga Fe-Ni ou Liga monel ou Ferro Fundido ou o mesmo que 1 Ou Bronze
5. Cobre	Cobre puro ou ligas de Cobre
6. Alumínio e suas ligas	Liga de Al com 5% de Si ou o mesmo que metal base
7. Níquel e suas ligas	Níquel e suas ligas

FONTE: ABM, 1979.

Os elementos que compõem o revestimento do eletrodo revestido têm como funções [ABM, 1979; Drapinski, 1979; Marques et al., 2005]:

- Fornecer à poça de fusão elementos de ligas desoxidantes (ferro-cromo, ferro-manganês, etc.);
- Fornecer à poça de fusão elementos de liga que promovem o refino da microestrutura;
- Fornecer à poça de fusão elementos de liga que auxiliam o controle da composição química do metal de solda;
- Estabilizar o arco elétrico;
- Formar escória, que protege a junta soldada contra a ação da atmosfera e permitir a desgaseificação do metal de solda, através da escória, além de controlar a velocidade de resfriamento do metal de solda;
- Formar uma atmosfera protetora para o arco e poça de fusão, através dos gases provenientes da decomposição do revestimento, reduzindo a quantidade de oxigênio e nitrogênio no cordão;
- Fornecer agentes que facilitam a remoção da escória;
- Promover a ionização do arco, além de desempenhar um importante papel na estabilidade e no direcionamento do arco elétrico. A decomposição de ingredientes do revestimento pode ainda afetar tanto a temperatura do atingida pelo eletrodo durante a soldagem como as propriedades metalúrgicas da junta após solda [Bracarense, 1997].

Os eletrodos são revestidos por extrusão. A fim de permitir o contato elétrico com o porta-eletrodos, uma das extremidades do eletrodo é desnudada, num comprimento de aproximadamente 25 mm. Na outra extremidade é retirado o revestimento, somente na direção transversal, a fim de possibilitar a ignição do arco [Marques et al., 2005].

Os eletrodos revestidos são classificados como básicos, celulósicos, rútilicos, ácidos e oxidantes [Marques et al., 2005], dependendo dos componentes principais contidos no revestimento, o que confere a cada um uma característica peculiar.

2.1.2. Tipos de eletrodos

A caracterização dos eletrodos revestidos se dá a partir da composição química do revestimento, que determina características operacionais específicas e adequadas à utilização dos eletrodos. Sua composição influencia ainda tanto as propriedades mecânicas quanto a composição química da junta soldada [Marques et al., 2005].

Especificamente, pode-se classificar os eletrodos quanto a seu tipo de revestimento, e conseqüentemente quanto aos efeitos desta composição sobre o processo de soldagem [ABM, 1979; Marques et al., 2005]:

- Eletrodos oxidantes: eletrodos oxidantes possuem como principal componente no revestimento o Óxido de Ferro, podendo ainda conter Óxido de Manganês. A escória produzida por este eletrodo é abundante, pesada, compacta e freqüentemente autodeslacável. Sua escória oxidante conduz à deposição de um metal com baixos teores de Carbono e de Manganês, conseqüentemente conduzindo à produção de juntas com baixas propriedades mecânicas. A soldagem executada com estes eletrodos pode ser realizada tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. O cordão de solda obtido com este tipo de eletrodo é largo e de pequena penetração. Devido às características mecânicas das juntas produzidas, os eletrodos oxidantes estão em desuso, sendo substituído por eletrodos rútilicos.
- Eletrodos ácidos ou neutros: os eletrodos ácidos possuem revestimento à base de Óxido de Ferro, Óxido de Manganês, de Titânio ou de Silício, assim como importantes quantidades de elementos desoxidantes, tais como o FeMn e o FeSi. A escória ácida é abundante, leve e porosa e se destaca com facilidade. A soldagem pode ser realizada com corrente contínua ou alternada. A penetração e largura obtida com este eletrodo são relativamente altas. Contudo, devido a sua alta taxa de fusão, não é adequado a todos os tipos de posição de soldagem. As propriedades mecânicas obtidas ao se utilizar os eletrodos neutros são apropriadas, à exceção de sua resistência à formação de trincas de solidificação (trincas a quente), considerada baixa.
- Eletrodos básicos: eletrodos básicos contêm em seu revestimento importantes quantidades de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) ou outros Carbonatos básicos; e Fluorita (Fluoreto de Cálcio, CaF_2). A escória forma-se em pequenas quantidades, além de ser compacta e de se destacar facilmente. O metal depositado é de elevada pureza (baixos teores de S e P), e geram juntas com boas características mecânicas, sendo, portanto, utilizados em soldas de responsabilidade (turbinas, vasos de pressão, obras de arte, etc.). Esse tipo de revestimento é higroscópico, sendo necessário armazená-los e manuseá-los corretamente, a fim de evitar sua contaminação. Se protegido corretamente, a junta apresentará baixo teor de Hidrogênio e, conseqüentemente, boa resistência à fissuração do cordão.
- Eletrodos rútilicos: os eletrodos rútilicos contêm como elemento principal o Rútulo (Dióxido de Titânio, TiO_2). A escória produzida é abundante, densa e se destaca facilmente. A soldagem executada com estes eletrodos pode ser realizada tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. A sensibilidade à fissuração a quente dos eletrodos rútilicos se

assemelha a dos eletrodos ácidos. As propriedades mecânicas do metal depositado são adequadas, permitindo a utilização dos eletrodos rútilicos em diversas aplicações.

- Eletrodos celulósicos: os eletrodos celulósicos possuem um revestimento com alto teor de matérias orgânicas inflamáveis, cuja decomposição no arco produz um envoltório de gases protetores. A escória é produzida em pequena quantidade e destaca-se relativamente fácil. Este tipo de eletrodo caracteriza-se por um arco penetrante, acarretando numa grande produção de respingos e na formação de um cordão de solda com grande penetração. A decomposição de hidrocarbonetos no arco resulta numa solda com grande quantidade de hidrogênio. Portanto, desaconselha-se a utilização de eletrodos celulósicos em soldas onde haja a necessidade de altos níveis de resistência mecânica.

Os diversos tipos de eletrodo permitem a soldagem de diferentes tipos de metais base, em diversas aplicações. Contudo, mantém-se a necessidade de promover a mecanização e robotização do processo, com o intuito de melhorar a repetibilidade alcançada a partir do processo.

2.2 Mecanização do processo de soldagem

Em relação ao processo manual, os dispositivos mecanizados proporcionam maiores produtividades e repetibilidades.

O sistema comumente utilizado se baseia na ação da gravidade para proporcionar o movimento do eletrodo [Pessoa, 2003; Marques et al., 2005]. Nesse dispositivo, o eletrodo é fixado a uma peça deslizante que corre em uma barra-guia (FIG. 2.3).

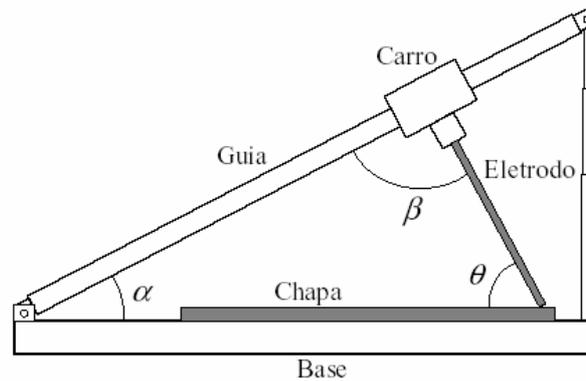


FIG. 2.3 - Dispositivo de solda por gravidade.

FONTE - PESSOA, 2003 (Adaptado por Lima II, 2006).

Durante a soldagem, o carro se movimenta devido à força peso (orientado pela barra-guia), a medida em que o eletrodo é consumido, depositando o material sobre a chapa.

A partir da variação dos parâmetros deste dispositivo de soldagem, é possível variar a velocidade de soldagem (mergulho) e conseqüentemente a taxa de fusão do eletrodo. Tais parâmetros incluem os ângulos α (ângulo entre a base e a barra-guia), β (ângulo entre o eletrodo e a barra-guia) e o ângulo de ataque do eletrodo (θ).

Através da correta configuração dos parâmetros do sistema, e conseqüentemente das velocidades de soldagem e de mergulho, é possível manter o comprimento do arco praticamente constante e ainda obter uma taxa de fusão ótima.

A utilização destes dispositivos, apesar de apresentar vantagens em relação ao processo manual, é limitada pela geometria do mecanismo, o que permite que a soldagem seja realizada apenas na posição plana e em juntas de geometria simples. Essa limitação impede que o processo mecanizado seja utilizado na maioria dos procedimentos industriais.

Outro mecanismo que visa possibilitar a robotização do processo SMAW é um sistema automático de alimentação de eletrodos. A automatização deste procedimento (alimentação – descarte de eletrodos) através de um alimentador automático de eletrodos aumentaria a capacidade produtiva do processo, pois diminuiria o “tempo morto” do manipulador.

Entre as possibilidades, há um dispositivo idealizado por Kang [Kang, 1996], que realiza a alimentação através do controle da tensão do arco e através de um motor elétrico que promove a alimentação do eletrodo (FIG. 2.4).

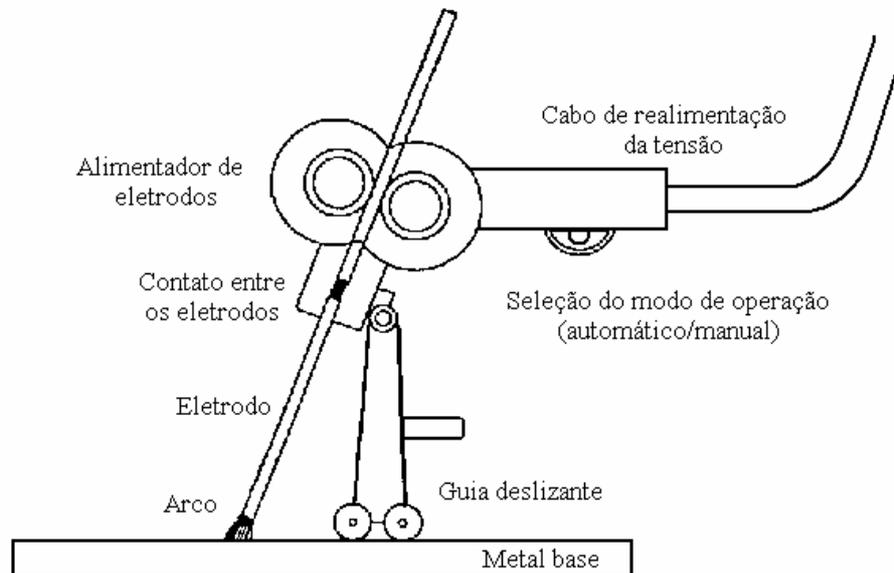


FIG. 2.4 - Sistema de alimentação de eletrodos.

FONTE - KANG, 1996 (adaptação).

Contudo, o controle de tensão do arco não é totalmente eficiente, visto que a única diferença de potencial que pode ser realmente medida é a que ocorre entre os bornes de alimentação do manipulador. Ou seja, o controle da tensão não atua realmente sobre o comprimento do arco, e sim sobre a queda de tensão entre o ponto de passagem da corrente do porta-eletrodos para a garra e o metal base ou mesa.

Os dispositivos mostrados possuem as limitações citadas, e, portanto, deve se procurar soluções mais adequadas, visando a robotização do processo SMAW.

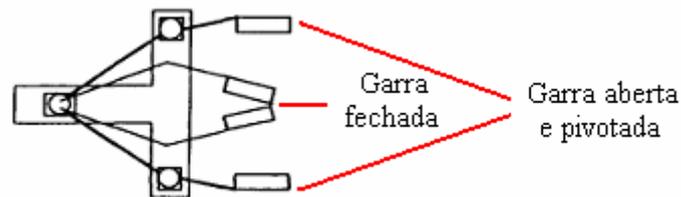
2.3 Garras

O elevado custo de produção geralmente observado na indústria e a demanda por peças de alta qualidade e melhores condições de operação impulsionam a mecanização ou automatização da maioria das atividades industriais [Merrifield, 2005]. A garra de um manipulador é o ponto mais crítico em qualquer sistema robótico, uma vez que é ela que em última instância define o nível de interação que o robô pode ter com o seu ambiente [Tlale et al, 1998].

A habilidade de uma garra de tomar decisões, e dessa forma exibir uma certa inteligência depende da aquisição de informações apropriadas que podem ser usadas como informação de entrada para circuitos de controle lógico e algoritmos de decisão [Tlale et al, 1998]. Todas essas informações necessárias são obtidas através de sensores, que podem ser projetados para coletar diversos tipos de dados, como posição, torque, temperatura, etc.

O avanço no desenvolvimento dos mais diversos sensores leva à possibilidade de produzir garras que procuram se aproximar cada vez mais de uma mão humana [Howe et al., 1990; Saliba e De Silva, 1991; Rupp e Velastin, 1994], em relação às habilidades físicas e a aptidão de interagir com o meio externo (FIG. 2.5, FIG. 2.6 e FIG. 2.7). Instrumentos como esses são empregados desde pesquisas na área médica até nos projetos de exploração espacial.

FIG. 2.5 - Garra proposta por Rupp e Velastin.



FONTE - RUPP e VELASTIN, 1994 (adaptação).

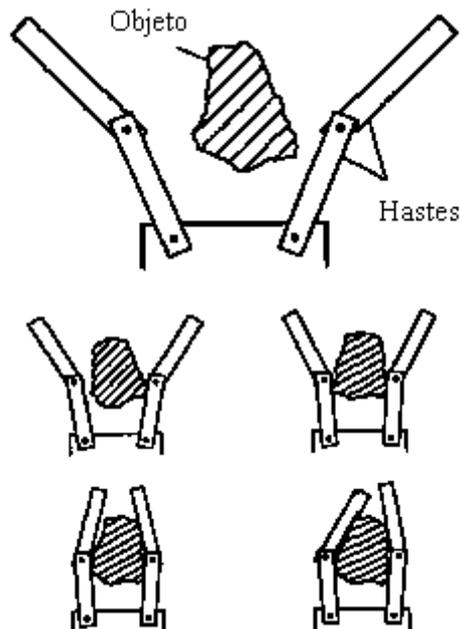


FIG. 2.6 - Garra proposta por Saliba.

FONTE - SALIBA e DE SILVA, 1991 (Adaptação).

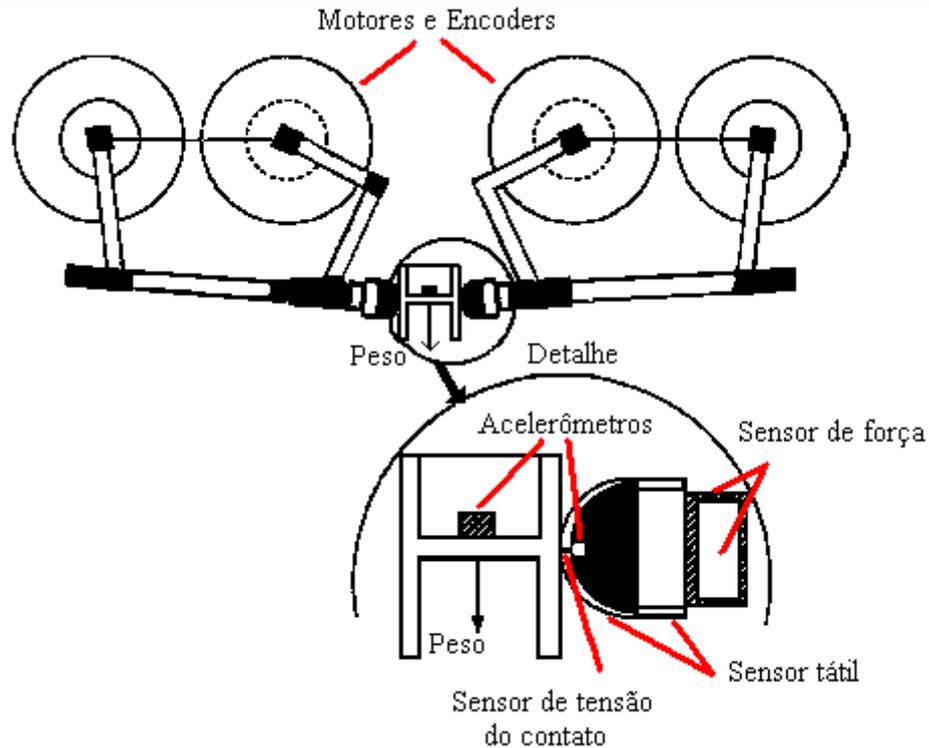


FIG. 2.7 - Garra proposta por Howe.

FONTE - HOWE et al., 1990 (adaptação).

Além disso, o desenvolvimento de novos materiais permite a obtenção de componentes, sistemas e elementos que não só funcionam como parte do corpo humano, como também se assemelham a ele, em relação ao peso, tato, aparência, entre outros.

Entretanto, nem sempre é necessária uma sensibilidade tão alta para as atividades visadas. Existem desenvolvimentos de garras inteligentes que utilizam sensores de baixo custo e produzem muito bons resultados [Tlale et al, 1998].

Nesse trabalho, o intuito não é obter uma garra com propriedades semelhantes às mãos humanas, e sim características e propriedades que permitam que funcione como a ferramenta de um manipulador, um porta-eletrodos acionado eletricamente, e que seja capaz de fornecer informações necessárias ao controlador do manipulador robótico.

Como dito anteriormente, o que confere “inteligência” a uma garra é sua instrumentação e controle (analógico ou digital), que permitem à garra uma maior capacidade de interação e poder de tomar decisões em seu volume de trabalho. Em relação aos elementos mecânicos, pode-se definir garras como sistemas compostos por componentes rígidos e que geralmente têm um grau de liberdade. Os mecanismos usados em garra mais conhecidos são do tipo alavanca, excêntrico ou de engrenagens. Geralmente, se o meio de acionamento for elétrico ou pneumático, o movimento será linear, caso contrário será rotativo. Contudo,

existem meios de transformar o movimento de linear para rotativo e vice-versa [Chelpanov, I. B. e Kolpashnikov, S. N., 1983].

Normalmente, pode-se dividir o mecanismo “garra” em cinco partes, responsáveis pela execução dos movimentos:

- Elementos de aperto, em contato direto com os objetos manipulados;
- Elementos de ligação entre os elementos de aperto e o mecanismo de execução;
- Mecanismo de execução;
- Mecanismo de transmissão entre o acionamento e o mecanismo de execução e
- Acionamento.

Assim como o conhecimento das tecnologias atualmente existentes em relação à mecanização do processo e garras, é de fundamental importância compreender os aspectos físicos que ocorrem durante o processo SMAW. Permite-se, desta maneira, optar por soluções viáveis e adequadas em relação à robotização do processo.

2.4 Aquecimento do eletrodo revestido

O aquecimento progressivo do eletrodo durante o processo de soldagem acontece pela geração e transferência de calor em duas regiões: a região do arco elétrico e no comprimento do eletrodo que sofre a passagem de corrente elétrica.

A região do arco elétrico fornece grande parte do calor para propiciar à fusão. A menor parte do calor é perdida para o ambiente e também utilizada para elevar, por condução, a temperatura da ponta do eletrodo. Esta elevação da temperatura na extremidade do eletrodo é ínfima, já que os fenômenos de transferência de calor ocorrem numa velocidade muito menor, se comparada com a velocidade de fusão [Felizardo, 2003].

A principal fonte de aquecimento do eletrodo revestido durante a soldagem ocorre devido à constante passagem da corrente elétrica pela alma do eletrodo [Waszink e Piena, 1985]. Nesse processo, ocorre geração de calor por efeito Joule no arame do eletrodo. A geração de calor associada a este fenômeno acontece porque a alma do eletrodo revestido é metálica, e oferece resistência elétrica à passagem de corrente. Sendo assim, há uma transformação da energia elétrica em trânsito no arame em energia térmica, que será responsável pelo aumento da temperatura do eletrodo, já que não há transferência de calor

(nem para o ambiente, nem para outros elementos) o suficiente para que ele se mantenha à sua temperatura inicial.

Pode-se observar que a energia produzida é função das variáveis corrente de soldagem e resistência do condutor (EQ. 2.1):

$$P = R.i^2 \quad (\text{em Watts}) \quad (2.1)$$

Onde:

- R : resistência elétrica do material da alma (*em Ohms*) e
- i : corrente elétrica que passa pelo condutor (*em Ampéres*).

Contudo, a resistência elétrica dos condutores, inclusive o arame do eletrodo, é função de outras variáveis (EQ. 2.2):

$$R = \rho \cdot \left(\frac{L}{A} \right) \quad (\text{em Ohms}) \quad (2.2)$$

Onde:

- ρ : resistividade elétrica ou resistência específica do material (*em Ohms.milímetros*);
- L : comprimento do condutor (*em milímetros*) e
- A : área da seção transversal do condutor (*em milímetros²*).

Pode se observar que, como o próprio nome indica, a resistência elétrica representa a resistência de um determinado elemento condutor à passagem de elétrons. Ao fluírem pelo condutor, os elétrons livres em movimento colidem na estrutura iônica dos metais. Com isso, os elétrons dissipam energia cinética na estrutura metálica, o que aumenta a energia dos íons; este processo causa o aumento da temperatura do condutor [Marques et al., 2005].

Para um determinado eletrodo, o calor gerado pelo efeito Joule se torna função de seu comprimento e de sua resistividade, visto que essa propriedade dos materiais não é constante [Metals Handbook, 1978]; aumentando com a temperatura. Isso porque quanto maior a temperatura, maior a energia cinética dos elétrons livres, e conseqüentemente haverá mais choques contra a estrutura cristalina e mais será elevada a temperatura. Sendo assim, se trata de um processo cíclico.

Dessa forma, no decorrer do processo de soldagem, a diminuição do comprimento do eletrodo tende a diminuir a quantidade total de calor gerado por efeito Joule, enquanto que o aumento da resistividade do material tende a aumentá-la.

Contudo, verifica-se que apesar da ocorrência simultânea da diminuição do comprimento do eletrodo e do aumento da resistividade, o aquecimento por efeito Joule continua sendo significativo. O calor gerado na alma do eletrodo é praticamente todo empregado no aquecimento do eletrodo, sendo que apenas uma ínfima porcentagem do calor gerado atua na frente de fusão. Este calor gerado não participa efetivamente do processo de fusão do eletrodo e do material de base, pois sua ordem de grandeza é bem menor que o calor gerado no arco. Logo, esta influência na temperatura do eletrodo é percebida mais efetivamente em regiões distantes da frente de fusão [Waszink e Piena, 1985].

Sabe-se, portanto, que o efeito Joule ocorrido no arame ocasiona o aquecimento do eletrodo, e que este aquecimento é progressivo: quanto mais consumido estiver o eletrodo, maior será a sua temperatura. Pode-se considerar a elevação da temperatura do eletrodo revestido como um pré-aquecimento. Com isso, a energia necessária para a fusão do eletrodo se torna menor. Contudo, a corrente de soldagem se mantém constante; conseqüentemente a quantidade de energia fornecida é a mesma. Sendo assim, o arco elétrico promoverá a fusão de uma maior quantidade de material, aumentando a taxa de fusão do eletrodo no decorrer da soldagem. Portanto, para um determinado eletrodo, quanto maior a corrente de soldagem, maior será o calor gerado e maior será a taxa de fusão do eletrodo, sendo que a taxa de fusão de eletrodos revestidos é fortemente relacionada à corrente de soldagem, e à temperatura do eletrodo [Jackson et al, 1950, Ter Berg e Larigaldie, 1952].

Conclui-se que para cada eletrodo e para cada corrente de soldagem, é possível relacionar a temperatura do arame em determinado instante de tempo a determinada taxa de fusão do eletrodo. Portanto, o conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a soldagem, como a relação entre a distribuição de temperatura no eletrodo (comportamento da temperatura ao longo do eletrodo em diversos instantes de tempo) e a taxa de fusão, pode permitir o controle do processo.

2.5 Distribuição de calor ao longo do eletrodo e taxa de fusão

A distribuição de calor ao longo do eletrodo revestido, em função do tempo, é um fenômeno de difícil análise, mas de grande importância. Como dito anteriormente, durante o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, a corrente de soldagem passa desde o contato porta-eletrodo/eletrodo até a extremidade inferior do eletrodo, onde ocorre a transferência metálica e a passagem da corrente através do arco. Nos processos de soldagem robotizados que utilizam eletrodos consumíveis, tais como o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), a corrente percorre apenas um pequeno comprimento do eletrodo, entre o bico de contato da tocha de soldagem e a ponta do consumível. Deste modo, não há tempo suficiente para que a geração de calor ocorrida pelo efeito Joule influencie a taxa de fusão do consumível e, conseqüentemente, o processo.

Ao passar pela alma do eletrodo revestido, a corrente de soldagem faz com que a temperatura desta região vá aumentando gradativamente, devido à geração de calor pelo efeito Joule. Além disso, para um mesmo eletrodo e corrente de soldagem, a taxa de fusão pode ser diferente, dependendo da extensão da região não revestida do eletrodo posterior ao contato com o porta-eletrodos [Wilson, Claussen and Jackson, 1956].

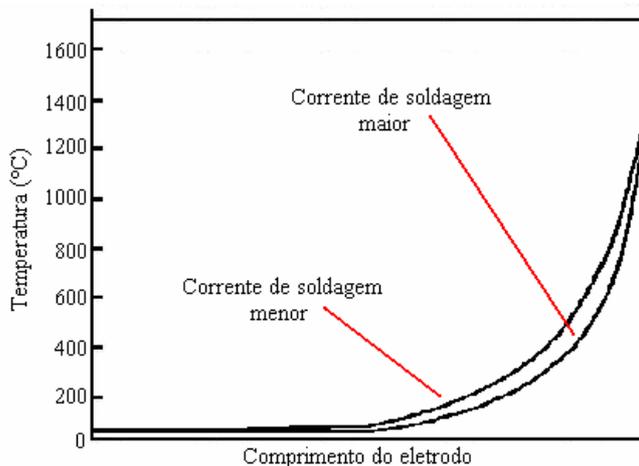
Além de provocar o crescimento da taxa de fusão [Ter Berg et al, 1953; Wazink et al, 1985; Bracarense et al, 1994; Quinn et al, 1997; Coutinho et al, 1998], o aumento da temperatura do eletrodo pode causar outros inconvenientes:

- A difusão de elementos do revestimento para a alma do eletrodo, que pode alterar tanto a composição química do revestimento, quanto da alma e da própria junta. Como conseqüência, pode-se obter uma solda com propriedades diferentes da desejada, devido a alterações da composição do cordão ao longo do comprimento da junta [Bracarense, 1993];
- Variações no modo de transferência metálica [Ter Berg et al, 1952; Bracarense, 1993]. O aumento da temperatura durante o processo provoca uma diminuição da razão área superficial/volume dos glóbulos transferidos. Conseqüentemente, quanto maior a temperatura do eletrodo, mais raro se torna o processo de desoxidação da gota, de formação de inclusões de óxidos e de remoção de elementos indesejáveis através da formação de escória [Bracarense, 1993];
- Dependendo da temperatura atingida, o revestimento pode se decompor antes de chegar à frente de fusão, afetando as propriedades metalúrgicas da solda, o modo de transferência metálica e a própria taxa de fusão [Quinn et al, 1997].

Portanto, o conhecimento do comportamento da taxa de fusão dos eletrodos revestidos durante a soldagem, e a percepção de quais são os fatores predominantemente influentes nesta taxa, são de fundamental importância na tentativa de robotização do processo SMAW.

O comportamento da taxa de fusão dos eletrodos revestidos não é um assunto que desperta interesse de muitos pesquisadores, provavelmente pelo fato de ser um objeto de estudo muito complexo e abrangente, para o estado de tecnologia atual. Além disso, acredita-se que o processo esteja em declínio, cedendo lugar aos processos já robotizados, o que não retrata a realidade, pois o processo SMAW continua sendo um dos mais utilizados no mundo, pelas vantagens que apresenta (já discutidas em capítulos anteriores).

Mesmo sendo raras vezes objeto de estudo, a primeira tentativa clara para se obter um modelo comportamental da temperatura do eletrodo revestido aconteceu há várias décadas, em 1941, por Rosenthal [Rosenthal, 1941]. O pesquisador obteve resultados interessantes, contudo, devido às várias simplificações feitas para a determinação do modelo (comprimento do eletrodo “infinito”; propriedades térmicas constantes, tais como resistividade e calor específico, entre outras; arco elétrico pontual; perdas de calor para o ambiente foram desprezadas; calor gerado por efeito Joule desprezado; entre outras simplificações), não se tornou possível prever o perfil de temperatura real no eletrodo (GRA. 2.1).



GRA. 2.1- Esquema representativo dos resultados obtidos por Rosenthal.

FONTE – ROSENTHAL, 1941, (adaptação).

Em 1985, mais de quatro décadas após o estudo realizado Rosenthal [1941], os pesquisadores Waszink e Piena desenvolveram uma modelagem matemática da taxa de fusão do eletrodo, como função do calor gerado por efeito Joule e do calor transferido do arco elétrico para o eletrodo. Através deste trabalho, avaliaram que a maior parte do calor gerado

na alma do eletrodo, pelo efeito Joule, é responsável pelo crescimento da temperatura nesta região, sendo que apenas uma ínfima porcentagem do calor gerado atua na frente de fusão.

O calor gerado pelo efeito Joule no revestimento foi desprezado, visto que se trata de uma região não metálica e não condutora de corrente elétrica. Apesar do revestimento conduzir calor, pôde-se desprezar a energia fornecida pelo arame ao mesmo, pois proporcionalmente aos outros fenômenos que ocorrem no eletrodo, este fluxo de calor é insignificante e, portanto, a energia transferida do arco para o eletrodo (alma e revestimento) é a principal fonte de calor empregada para causar a decomposição e fusão do revestimento.

Uma análise de fundamental importância obtida no trabalho de Waszink e Piena [1985] foi a observação de que o fluxo de calor na direção axial do eletrodo ocorre somente em suas regiões transientes (ou seja, suas extremidades), enquanto que entre as extremidades do consumível a temperatura é a mesma em determinado instante de tempo, e no instante posterior se torna maior, porém constante entre as extremidades, naquele instante de tempo. Isso acontece porque a energia fornecida pelo efeito Joule é gerada em todo o comprimento da alma do eletrodo, sendo que entre suas extremidades a perda de calor da alma é constante e negligenciável, proporcionando um perfil de temperatura praticamente constante nesta região.

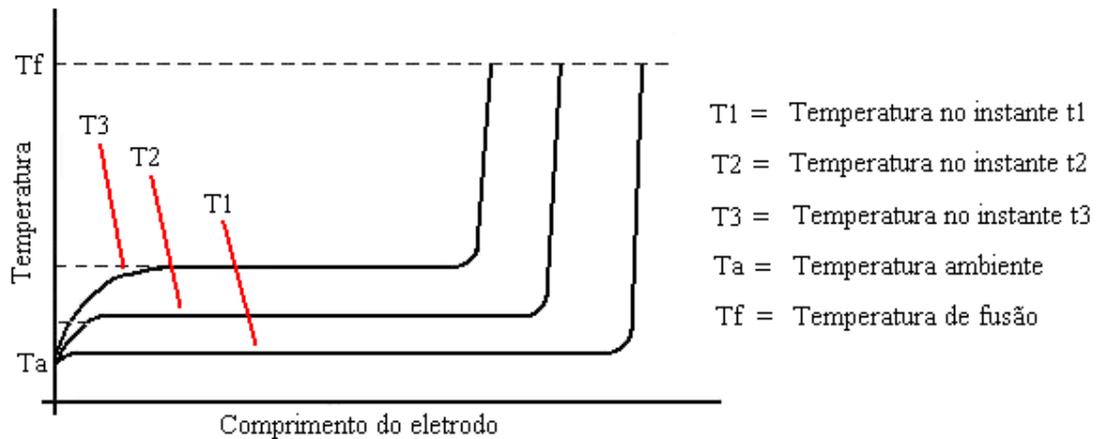
Apesar de terem sido obtidos bons resultados, este trabalho enfatizou apenas os fenômenos que ocorrem perto da frente de fusão, não sendo possível, portanto, utilizá-lo para avaliar eficazmente a distribuição de temperatura em todo o comprimento do eletrodo.

Numa tentativa de melhor prever o comportamento da temperatura ao longo do comprimento do eletrodo, em 1997, Quinn et al propuseram um modelo matemático para prever a taxa de fusão e a distribuição da temperatura no eletrodo revestido.

As considerações e simplificações realizadas na pesquisa permitiram a comprovação dos fenômenos idealizados por Waszink e Piena [1985] e a obtenção de resultados numéricos próximos aos obtidos experimentalmente pelos pesquisadores, tanto em relação à distribuição de temperatura no eletrodo, quanto no que diz respeito à taxa de fusão (GRA. 2.2). Entre as simplificações e considerações assumidas, estão:

- Idealização de um modelo unidimensional;
- O calor gerado por efeito Joule foi considerado;
- As perdas de calor para o ambiente foram desconsideradas;
- Admitiu-se a mesma distribuição de temperatura na alma e no revestimento;

- A temperatura da região não revestida do eletrodo foi considerada constante e igual à temperatura ambiente.



GRA. 2.2 - Perfil de temperatura proposto por Waszink e Piena [1985] e comprovados por Quinn et al [1997].

FONTE - QUINN et al., 1997 (adaptação).

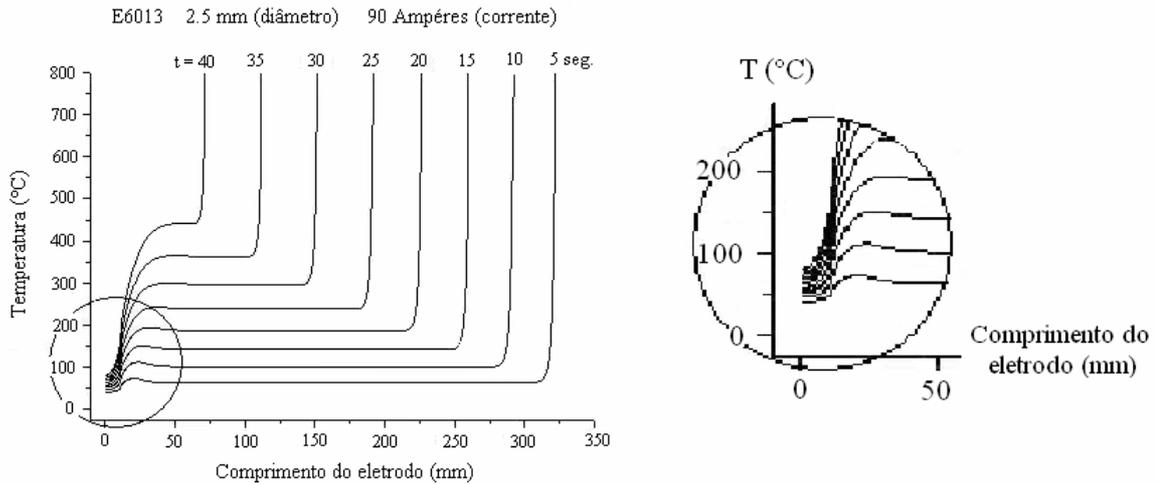
Verificou-se que, apesar dos prósperos resultados obtidos na pesquisa como um todo, houve algumas inconsistências nos resultados obtidos numericamente. Ao se comparar os resultados obtidos experimentalmente, com aqueles obtidos numericamente, observou-se que para determinadas faixas de corrente empregada, o modelo por eles idealizado superestimou a temperatura do eletrodo revestido, já que não consideraram as perdas de calor para o ambiente e assumiram a mesma distribuição de temperatura no arame e no revestimento, desconsiderando os fenômenos térmicos que ocorrem entre estas regiões.

Paralelamente, a temperatura do arame próxima ao porta-eletrodo foi considerada constante e igual à temperatura ambiente, o que não de fato ocorre. A partir do contato entre o porta-eletrodo e a região não revestida do eletrodo pela qual há passagem de corrente, há geração de calor devido ao efeito Joule, o que proporciona o aumento da temperatura desta região. Na fração mais extrema da região não revestida do eletrodo, não ocorre geração de calor, pois não há passagem de corrente elétrica. Contudo, há uma certa ampliação no valor da temperatura da região, visto que há condução de calor ao longo do eletrodo.

Em 2003, Felizardo desenvolveu, através da técnica de modelagem numérica por volumes finitos, um modelo computacional bidimensional, capaz de simular a distribuição de temperatura ao longo do eletrodo revestido. Para tal, a pesquisadora considerou todas as energias térmicas geradas e transferidas no eletrodo revestido durante a soldagem:

- Calor gerado no arco elétrico, do qual a maior parte é utilizada tanto para fundir, quanto para aquecer (através da condução de calor) o arame, revestimento e metal de base. O restante do calor é perdido para o ambiente por convecção e radiação;
- Calor gerado pelo efeito Joule na alma do eletrodo. A maior parcela deste calor é utilizada para elevar a temperatura do eletrodo, tanto na região em que é gerado (aramé), quanto no revestimento (através da condução de calor). Apenas uma pequena parcela participa da fusão dos materiais;
- O calor perdido por convecção e radiação do revestimento para o ambiente;
- Transferência de calor, da região do eletrodo que está em contato com a porta-eletrodo, para o mesmo, por condução.

O modelo mostra que o calor gerado pelo arco elétrico não influencia diretamente a temperatura ao longo do eletrodo, já que a fusão ocorre mais rapidamente que a condução do calor para o eletrodo. Observou-se que a distribuição de temperatura é influenciada pelo porta eletrodo, que remove parte do calor da região não revestida do eletrodo. Foi observado igualmente que a temperatura máxima na região não revestida do eletrodo, durante uma soldagem de 40 segundos, seria de apenas 100°C. Sem o porta eletrodo, a temperatura máxima no perfil simulado chegaria a 1200°C. Conclui-se, portanto, que a distribuição de temperatura é drasticamente influenciada pelo porta eletrodo, que remove grande parte do calor da região não revestida do eletrodo (GRA. 2.3).



GRA. 2.3 - Perfil de temperatura obtido por Felizardo e detalhe do perfil na região do porta-eletrodos.

FONTE – FELIZARDO, 2003 (adaptação).

Os resultados obtidos experimentalmente se aproximaram satisfatoriamente dos resultados obtidos a partir do modelo numérico.

De acordo com os resultados obtidos por Felizardo [2003], a partir do perfil de temperatura modelado em dado instante de tempo, e da temperatura instantânea na região não revestida do eletrodo, é possível estimar a taxa de fusão instantânea do eletrodo, e, conseqüentemente, executar corretamente a trajetória do manipulador robótico, com as devidas velocidades de soldagem.

O crescimento da temperatura no eletrodo devido ao efeito Joule é função da resistividade do metal, da corrente aplicada, da capacidade térmica e do isolamento do revestimento. Como a corrente é determinada a partir do tipo e diâmetro do eletrodo, e os demais parâmetros variam de acordo com o eletrodo utilizado, é necessário desenvolver um modelo distinto para cada tipo de consumível e para cada corrente aplicável. Portanto, o procedimento executado nestes experimentos deve ser realizado para diversas condições, fornecendo informações suficientes para a concepção de uma base de dados (diversos modelos), que irá orientar o controlador do robô durante a soldagem. Desta maneira, será necessário informar ao controlador apenas qual tipo de eletrodo e corrente serão usados para a soldagem em questão.

2.6 Medição de temperatura

A temperatura é um dos parâmetros mais utilizados para se obter informações necessárias a controle de processos. Estima-se que, entre os transdutores empregados na medição de temperatura, os termopares e os sensores resistivos estejam presentes de 70 a 80% dos processos que estejam associados à medição de temperatura [Camarano, 1993].

Existem diversos tipos de instrumentos disponíveis no mercado utilizados na termometria (medição de temperatura), que se baseiam em diferentes princípios de funcionamento. Diferentemente de outros parâmetros, tais como comprimento e tempo, a temperatura é uma grandeza abstrata, e que, portanto, precisa ser definida em termos da mudança de comportamento do material do mensurando [Dally et al, 1993].

A temperatura está relacionada com a energia cinética das moléculas em uma região de um corpo qualquer, que pode ser alterada a partir da transferência de calor de um corpo para outro, através da condução, convecção ou radiação, ou através do armazenamento de energia, que se não for dissipado, será responsável pelo aumento da temperatura de um corpo.

Como dito anteriormente, não se consegue simplesmente medir diretamente esta energia cinética e inferir uma determinada temperatura. Portanto, para que se conseguisse medir a temperatura de corpos, foi definida uma escala internacional, baseada no comportamento de determinados materiais em pontos fixos termodinâmicos. A primeira escala prática foi definida em 1927 com revisões em 1948, 1960, 1964, 1976, e 1990, sendo esta a referência em temperatura atualmente. A Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90), como é definida, se baseia em 17 materiais previamente estabelecidos, durante o estágio de equilíbrio termodinâmico em que permanecem durante uma mudança de fase. A partir desses materiais, foi possível estabelecer a escala em várias faixas e sub-faixas [Dally et al, 1993], que se estendem de $-270,15$ C (ponto de vaporização do Hélio) até $1084,62$ (ponto de fusão do Cobre).

Os instrumentos de medição de temperatura podem ser subdivididos em dois grandes grupos: transdutores por contato e transdutores sem contato com o mensurando. Quando o processo envolve temperaturas não muito altas, costuma-se utilizar instrumentos de medição por contato. Geralmente, para temperaturas muito elevadas, utiliza-se transdutores sem contato, o que permite a medição da temperatura de uma superfície sem que o elemento transdutor entre em contato com o corpo, eliminando problemas de estabilidade, e

encapsulamento que os transdutores por contato enfrentam à altas temperaturas [Dally et al, 1993].

É importante salientar que a escolha de um sistema de medição de temperatura depende da faixa de temperatura a ser medida, incertezas máximas admitidas, recursos disponíveis, tempo de resposta, entre outros; pois tudo depende do processo em questão. Por exemplo, se para determinado processo uma temperatura de 1000°C é muito alta, em outros esta temperatura pode ser a mínima esperada. Em todos os casos, deve-se avaliar a relação custo/benefício oferecida pelo transdutor.

Independentemente do grupo a que pertença (transdutores com ou sem contato), os instrumentos mais utilizados são: termômetros de coluna de líquido, termopares, termômetros de resistência e pirômetros de radiação. Em relação a processos automatizados, os transdutores elétricos do tipo termopar, sensores resistivos (termorresistor e termistor) e infra-vermelhos são, em termos globais, os mais utilizados, devido a maior facilidade que apresentam em relação à implementação do sistema de medição e aquisição de dados nos processos.

2.6.1 Transdutores de temperatura por contato

2.6.1.1 Termômetro à dilatação de líquido

Os termômetros de dilatação de líquidos baseiam-se na lei de expansão/contração volumétrica de um líquido contido num recipiente fechado, quando o recipiente for submetido à variações de temperatura.

Estes tipos de transdutores são feitos de vidro transparente ou de material metálico. Os sensores de vidro (FIG. 2.8) são constituídos de um tubo capilar de seção circular fechado. Em uma de suas extremidades há um reservatório contendo o líquido, sendo que tanto o reservatório quanto parte do capilar são preenchidos por um líquido de coeficiente de dilatação volumétrica conhecido.

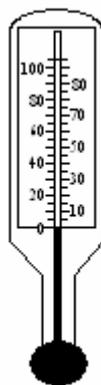


FIG. 2.8 - Termômetro de dilatação de líquido de material vítreo.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

A parede do tubo capilar é graduada em graus ou frações de graus. A medição de temperatura se faz pela leitura da escala no ponto em que se tem o topo da coluna líquida. Os líquidos mais usados neste tipo de termômetros são: mercúrio, tolueno e álcool. No termômetro de mercúrio, pode-se elevar o limite máximo até 550 °C injetando-se gás inerte sob pressão, evitando assim a vaporização do mercúrio (TAB. 2.2).

TABELA 2.2

Líquidos de preenchimento (termômetro vítreo).

Líquido	Ponto de solidificação (°C)	Ponto de ebulição (°C)	Faixa de uso (°C)
Mercúrio	-39	+357	-38 a 550
Álcool Etilico	-115	+78	-100 a 70
Tolueno	-92	+110	-80 a 100

FONTE: MICHALSKI et al., 1991.

Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico e o tubo capilar por um invólucro metálico.

Por ser constituído de material frágil e devido à dificuldade de se registrar de maneira automática sua indicação ou transmiti-la à distância, o uso deste termômetro é mais comum em laboratórios ou em indústrias, com a utilização de uma proteção metálica. Além disso, sua medição é analógica e pode apresentar erros grandes, dependendo da precisão desejada.

Já os termômetros metálicos (FIG. 2.9), são compostos por um bulbo, cujas dimensões variam de acordo com o tipo de líquido e principalmente com a sensibilidade desejada; por um capilar (o diâmetro interno deve ser o menor possível, a fim de evitar a influencia da temperatura ambiente, porém sem oferecer resistência à passagem do líquido em expansão) e pelo elemento de medição propriamente dito, que neste caso é um Tubo de Bourdon (também usado para medição de pressão, em manômetros). O Tubo de Bourdon pode ser do tipo C, em espiral ou helicoidal, dependendo da sensibilidade desejada.

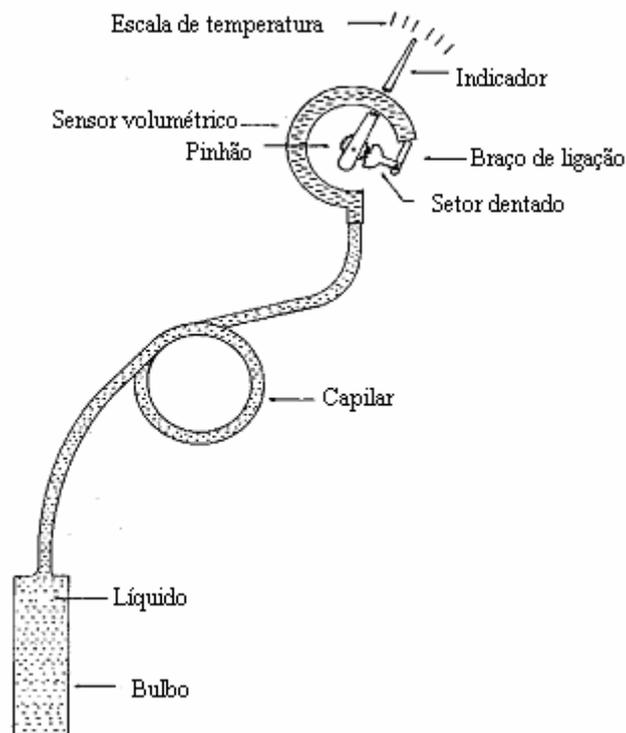


FIG. 2.9 - Termômetro de dilatação de líquido de material metálico.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Neste tipo de instrumento, o líquido preenche todo o recipiente, que sob o efeito de um aumento de temperatura se dilata, deformando o Tubo de Bourdon (sensor volumétrico). Este, por sua vez, se conecta ao braço de ligação que movimenta um conjunto setor dentado e pinhão, que transfere o movimento para o indicador. A partir da escala e da posição do indicador, faz-se a leitura da temperatura. É interessante observar que, neste caso, a leitura é feita a partir da dilatação do recipiente, e não do fluido.

Os fluidos comumente utilizados são:

TABELA 2.3

Líquidos de preenchimento (termômetro metálico).

Líquido	Faixa de utilização (°C)
Mercúrio	-35 à +550
Xileno	-40 à +400
Tolueno	-80 à +100
Álcool	50 à +150

FONTE: MICHALSKI et al., 1991.

Já em relação ao metal utilizado na construção do instrumento, os materiais mais usados são: bronze fosforoso, cobre - berílio, aço inoxidável e aço - carbono.

As variações da temperatura ambiente deveriam afetar somente o líquido inserido no sensor, porém como este termômetro é feito de material metálico, todo o sistema (bulbo, capilar e sensor) é sensível às variações da temperatura, causando erro de indicação ou registro. Este efeito da temperatura ambiente no sistema é geralmente compensado no próprio sensor, através de uma lâmina bimetálica.

Estes termômetros são bastante utilizados na indústria para indicação e registro, pois permitem leituras remotas e por serem preciso, porém não é recomendável para controle por causa de seu tempo de resposta ser relativamente grande. Recomenda-se não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se forme restrição que prejudicariam o movimento do líquido em seu interior, causando problemas de medição.

2.6.2 Termômetro à pressão de gás

Fisicamente idêntico ao termômetro de dilatação de líquido, consta de um bulbo, elemento sensor e capilar de ligação entre o bulbo e o sensor (FIG.2.10).

O volume do conjunto é constante e preenchido com um gás a alta pressão. Com a variação da temperatura, a pressão do gás varia aproximadamente conforme a lei dos gases perfeitos, com o elemento de medição operando como medidor de pressão. Neste caso, as variações de pressão são linearmente dependentes da temperatura quando o volume é constante.

O gás mais utilizado é o N_2 e geralmente é pressurizado a uma pressão de 20 a 50 atmosferas, na temperatura mínima a medir. A faixa de medição deste sensor de temperatura vai de -100 a 600 °C, sendo o limite inferior devido a própria temperatura crítica do gás e o

superior proveniente do recipiente apresentar menor ou maior permeabilidade ao gás nesta temperatura, o que acarretaria sua perda, inutilizando o termômetro.

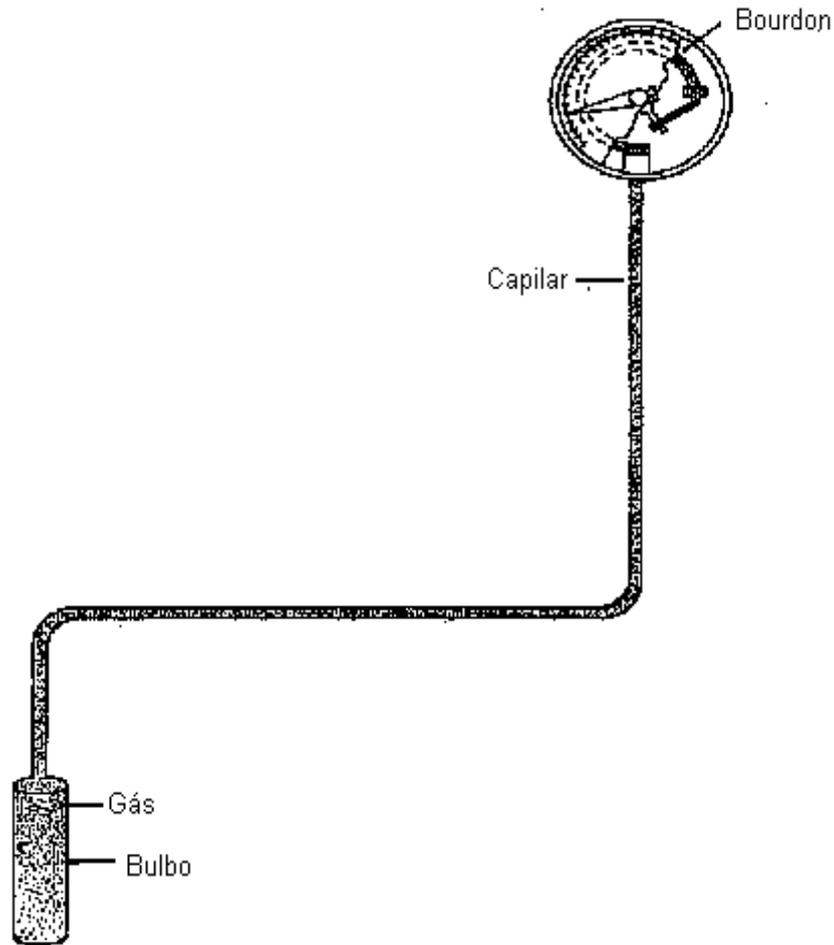


FIG. 2.10 - Termômetro de dilatação de gás.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Gases mais utilizados:

TABELA 2.4
Gases de preenchimento.

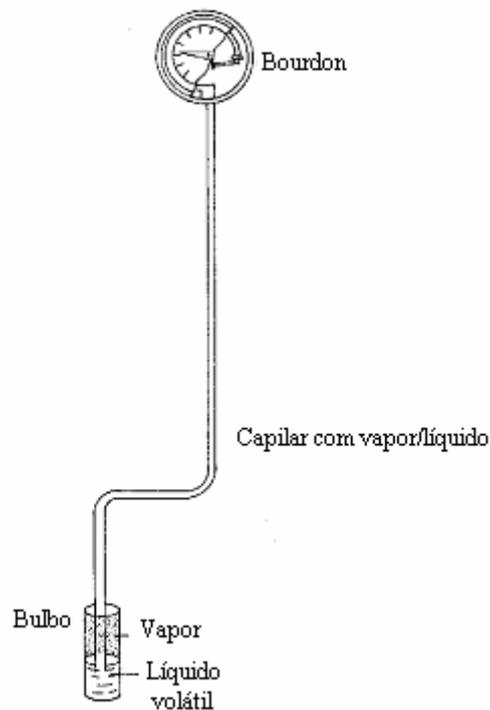
Gás	Temperatura Crítica
Hélio (He)	- 267,8 °C
Hidrogênio (H ₂)	- 239,9 °C
Nitrogênio (N ₂)	- 147,1 °C
Dióxido de Carbono (CO ₂)	- 31,1 °C

FONTE: MICHALSKI et al., 1991.

2.6.1.3 Termômetro à pressão de vapor

A construção deste instrumento também se assemelha ao de dilatação de líquidos (FIG. 2.11). O princípio utilizado neste termômetro é que qualquer variação de temperatura será acompanhada por uma variação na tensão de vapor do gás liquefeito presente no bulbo do termômetro e, em consequência disto, haverá uma variação na pressão dentro do capilar.

FIG. 2.11 - Termômetro à pressão de vapor.



FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

A tabela a seguir mostra os líquidos mais utilizados:

TABELA 2.5
Líquidos de preenchimento.

Líquido	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Cloreto de Metila	- 139	- 24
Butano	- 135	- 0,5
Éter Etílico	- 119	34
Tolueno	- 95	110
Dióxido de enxofre	- 73	- 10
Propano	- 190	- 42

FONTE: MICHALSKI et al., 1991.

2.6.1.4 Termômetros a dilatação de sólido (termômetros bimetálicos)

Baseia-se no fenômeno da dilatação/contração linear dos metais com a variação da temperatura.

O termômetro bimetálico consiste em duas laminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes, sendo que uma lâmina está sobreposta à outra, formando uma só peça (FIG. 2.12). Como estes coeficientes são diferentes, quando a temperatura do conjunto varia, observa-se um encurvamento que é proporcional a temperatura.

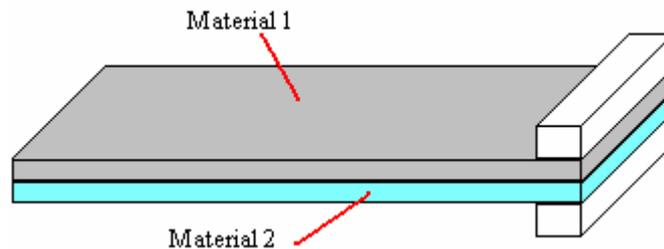


FIG. 2.12 - Termômetro bimetálico.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Geralmente a lamina bimetálica é enrolada em forma de espiral ou hélice, o que aumenta bastante a sensibilidade.

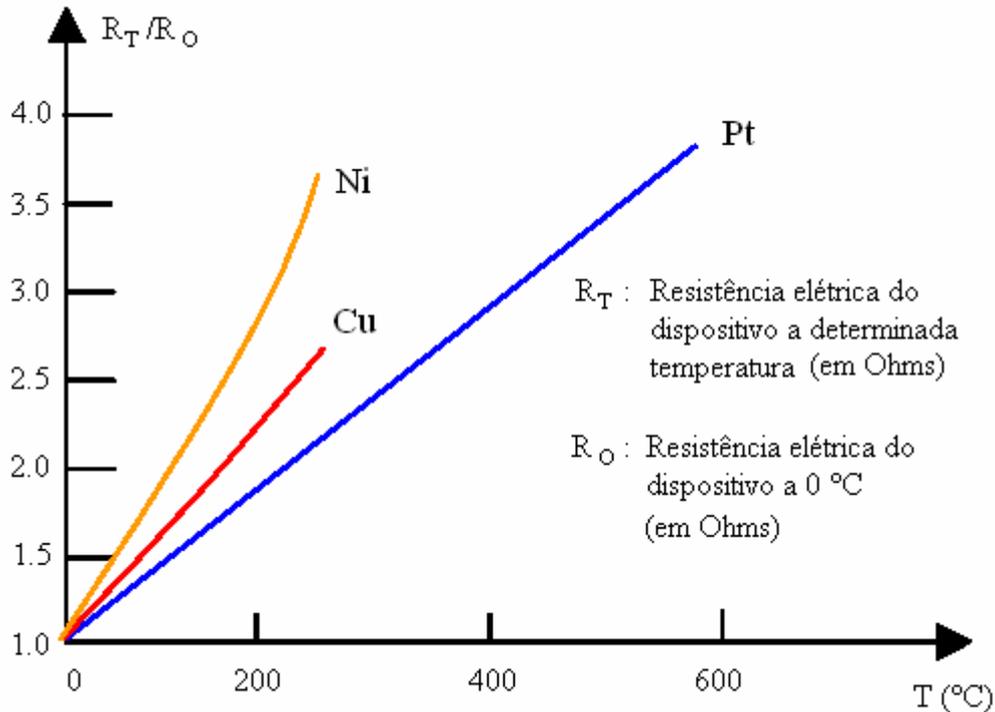
Os materiais mais utilizados para a construção deste sensor são o invar (aço com 64% Fe e 36% Ni), que tem um baixo coeficiente de dilatação, e o latão como metal de alto coeficiente de dilatação, o que também proporciona ao instrumento uma boa sensibilidade.

A faixa de trabalho dos termômetros bimetálicos vai aproximadamente de -50 a 800 °C, sendo sua escala bastante linear.

2.6.1.5 Termoresistência

As termoresistências são sensores que se baseiam no princípio de variação crescente da resistência em função do aumento da temperatura (GRA. 2.4). Esses sensores adquiriram espaço nos processos industriais por suas condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, alta repetibilidade, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso. Os materiais mais utilizados para a fabricação destes tipos de sensores são a platina, o cobre ou o níquel, que são metais que apresentam características de

alta resistividade, permitindo assim uma melhor sensibilidade do sensor; alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura e grande rigidez e ductilidade para ser transformado em fios finos.



GRA. 2.4 - Comportamento típico de alguns termorresistores.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

O elemento sensor se compõe de um filamento, ou resistência de Pt, Cu ou Ni, com diversos revestimentos, de acordo com cada tipo e utilização.

As termorresistências de Ni e Cu têm sua isolação normalmente em esmalte, seda, algodão ou fibra de vidro. Não existe necessidade de proteções mais resistentes a temperatura, pois acima de 300 °C o níquel perde suas propriedades características de funcionamento como termoresistência e o cobre sofre problemas de oxidação em temperaturas acima de 310 °C.

Os sensores de platina permitem um funcionamento até temperaturas mais elevadas e, portanto têm seu encapsulamento normalmente em cerâmica ou vidro (FIG. 2.13) porque apesar da Pt não restringir o limite de temperatura de utilização, quando a mesma é utilizada em temperaturas elevadas, existe o risco de contaminação dos fios.

Para utilização como termômetro padrão, os sensores de platina são completamente desapoitados do corpo de proteção. A separação é feita por isoladores, espaçadores de mica. Essa configuração pode suportar vibrações muito mais fortes, porém sua

faixa de utilização fica limitada a temperaturas mais baixas, devido à dilatação dos componentes.

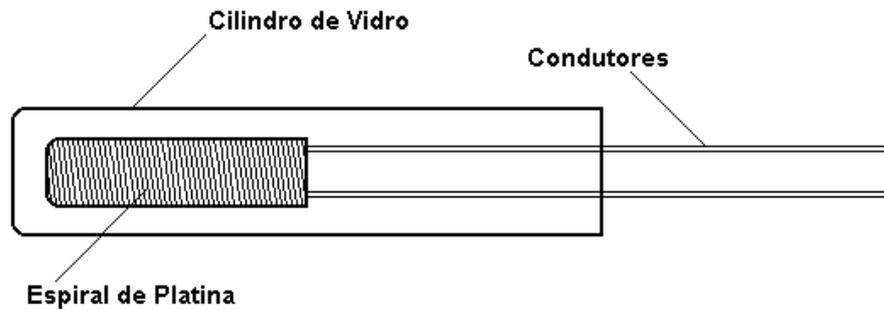


FIG. 2.13 - Termoresistência de platina.

FONTE - MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

As termoresistências Pt - 100 (termoresistência de platina que possui resistência ôhmica de 100 ohms a 0°C) são as mais utilizadas industrialmente, devido a sua grande estabilidade, larga faixa de utilização e alta precisão. São utilizadas como padrão de temperatura na faixa de -270 °C a 660 °C.

Existe um outro tipo de montagem, do tipo isolamento mineral (FIG. 2.14). Este tipo de montagem permite a redução do diâmetro e apresenta rápida velocidade de resposta.

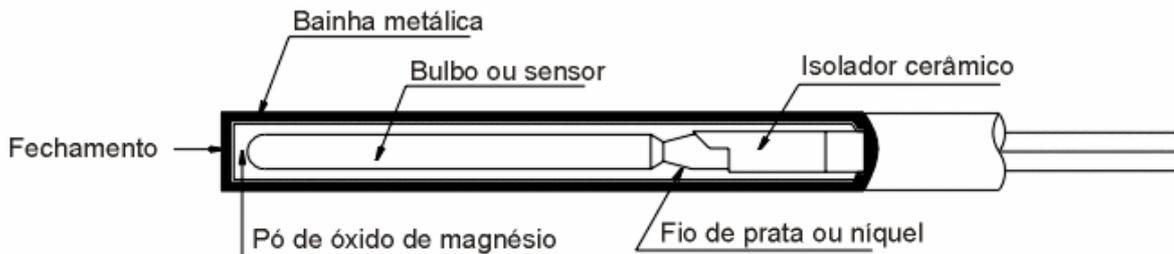


FIG. 2.14 - Termoresistência de platina com isolamento mineral.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Na montagem tipo isolamento mineral, tem-se o sensor montado em um tubo metálico com uma extremidade fechada e preenchido todos os espaços com óxido de magnésio, permitindo uma boa troca térmica e protegendo o sensor de choques mecânicos. A ligação do bulbo é feita com fios de cobre, prata ou níquel isolados entre si, sendo a extremidade aberta, selada com resina epóxi, vedando o sensor do ambiente em que vai atuar.

As termoresistências são normalmente ligadas a um circuito de medição do tipo Ponte de Wheatstone, sendo que o circuito encontra-se balanceado quando é respeitada a

relação $R_4.R_2 = R_3.R_1$ e desta forma não circula corrente pelo detector de nulo, pois se esta relação é verdadeira, os potenciais nos pontos A e B são idênticos. Exemplo de configuração do circuito é apresentado a seguir (FIG. 2.15):

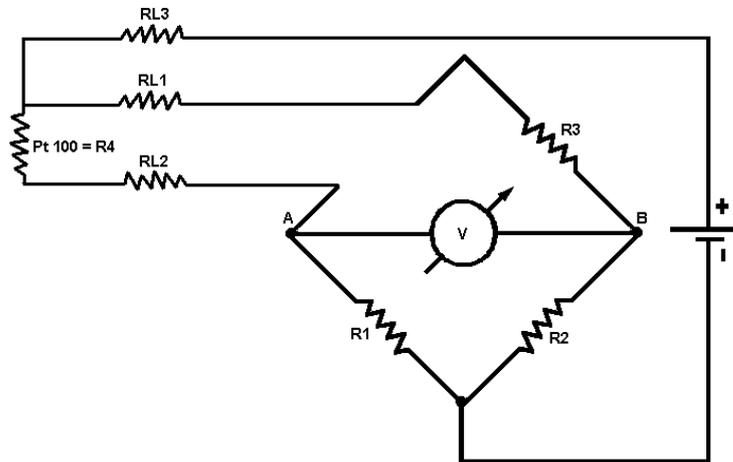
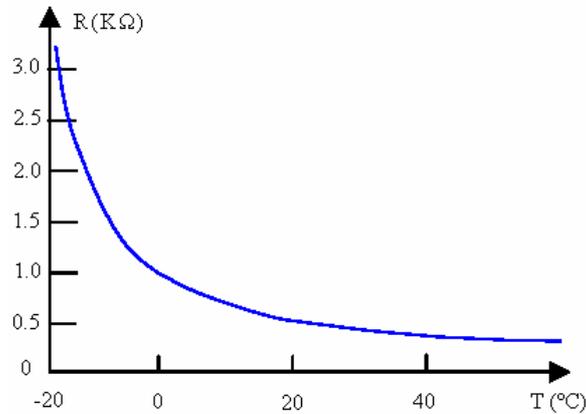


FIG. 2.15 - Termoresistência de platina num circuito tipo ponte Wheatstone.
FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Nesta situação, tem-se a tensão entre A-B variando linearmente em função da temperatura da PT-100 e independente da variação da temperatura ambiente ao longo dos fios de ligação. Este tipo de ligação garante relativa precisão, mesmo com grandes distâncias entre elemento sensor e circuito de medição.

2.6.1.6 Termistores

A resistência de alguns semicondutores apresenta mudanças exponenciais decrescentes de resistência com a temperatura. Em geral são óxidos metálicos como cromo, cobalto, ferro, manganês, rutênio e níquel, misturados em certas proporções para obter uma



constante do termistor adequada. Esses são os chamados termistores, ou NTC, já que sua resistência decresce com a temperatura. O GRA. 2.5 abaixo representa o comportamento típico de um termistor, em função da temperatura:

GRA. 2.5 - Comportamento típico de um termistor.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Os termistores quando associados a resistores fixos comuns podem ser linearizados, escolhendo o valor do resistor fixo e a forma de conexão.

2.6.1.7 Termopares

Termopares (FIG. 2.16) são sensores de temperatura compostos por dois materiais dissimilares (metais, ligas ou não-metálicos) conectados de um lado, e o outro lado livre. A extremidade conectada (junta quente) é a junta de medição, e é ela que será colocado no lugar onde se deseja medir a temperatura.

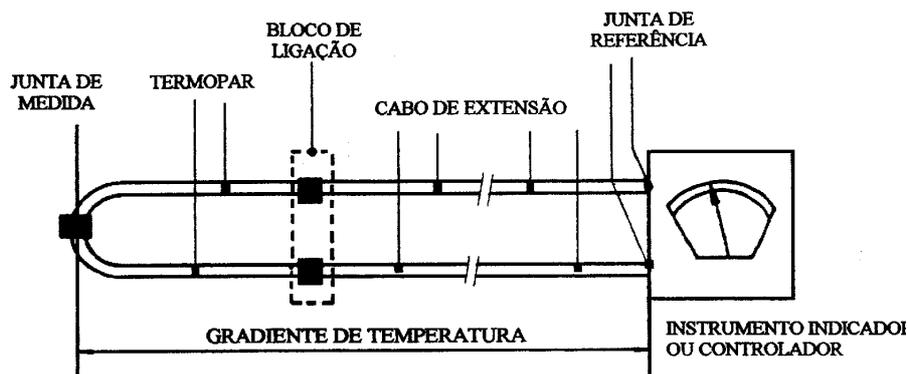


FIG. 2.16 – Sistema de medição utilizando termopar.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

O funcionamento dos termopares ocorre da seguinte maneira: o aquecimento de dois diferentes materiais condutores com temperaturas diferentes em suas extremidades gera o aparecimento de uma FEM (força eletro-motriz, da ordem de mV). Este princípio é conhecido como efeito Seebeck e ocorre porque a densidade de elétrons livres em cada tipo de material condutor é diferente.

Portanto, de acordo com a teoria de Seebeck, quando a temperatura da junção de referência é mantida constante, verifica-se que a FEM térmica é uma função da temperatura da junção de medição. Ou seja, conhecendo a temperatura de referência e a FEM gerada, determina-se a temperatura na junção de medição.

O sinal de f.e.m. gerado pelo gradiente de temperatura (ΔT) existente entre as juntas quente e fria, será de um modo geral indicado, registrado ou transmitido.

É importante compreender os efeitos físicos que acontecem nos fios e que deram origem aos termopares. Quando dois metais ou semicondutores dissimilares são conectados e as junções mantidas a diferentes temperaturas, três fenômenos ocorrem simultaneamente: o efeito Seebeck, o efeito Peltier e o efeito Thomson.

- Efeito termoelétrico de Seebeck:

O fenômeno da termoeletricidade foi descoberto em 1821 por T.J. Seebeck quando observou que em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura ΔT entre as suas junções. Denomina-se a junta de medição de T_m , e a junta de referência de T_r . A existência de uma f.e.m. térmica AB no circuito é conhecida como efeito Seebeck (FIG. 2.17). Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a f.e.m. térmica é uma função da temperatura T_m da junção de teste. Este fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro.

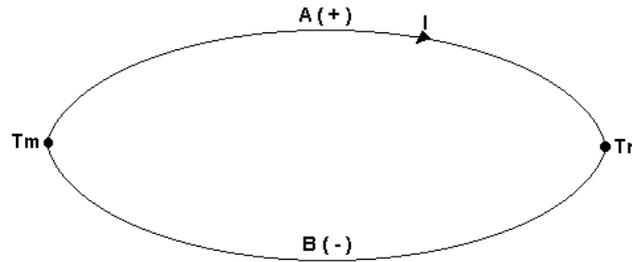


FIG. 2.17 – Efeito Seebeck.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Como dito anteriormente, o efeito Seebeck se produz pelo fato de que a quantidade de elétrons livres de um metal difere de um condutor para outro e depende da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas são mantidas a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes.

- Efeito termoelétrico de Peltier:

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma bateria exterior, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas das junções variam em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Esta variação adicional de temperatura é o efeito Peltier (FIG. 2.18). O efeito Peltier produz-se tanto pela corrente proporcionada por uma bateria exterior como pelo próprio par termoelétrico.

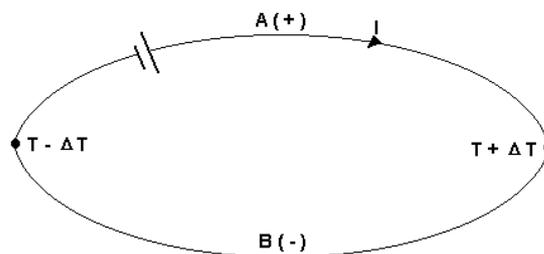


FIG. 2.18 – Efeito Peltier.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é

o mesmo, porém em sentido oposto. Ou seja, para uma determinada corrente, o acréscimo ou decréscimo de calor num par termoelétrico devido ao efeito Peltier depende do sentido de circulação desta corrente.

- Efeito termoelétrico de Thomson:

Em 1854, Thomson concluiu através das leis da termodinâmica, que a condução de calor, ao longo dos fios metálicos de um par termoelétrico, que não transporta corrente, origina uma distribuição uniforme de temperatura em cada fio.

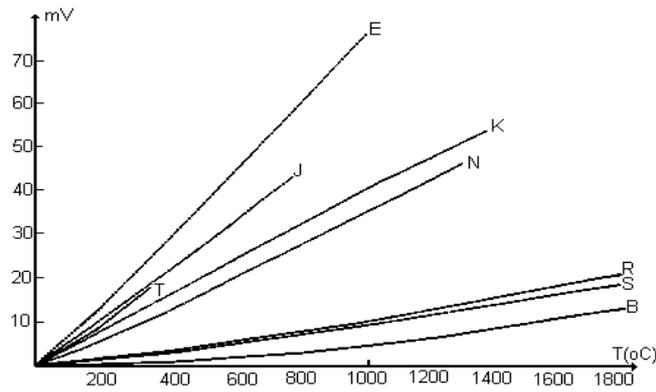
Quando existe corrente, modifica-se em cada fio a distribuição de temperatura em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Essa variação adicional na distribuição da temperatura denomina-se efeito Thomson.

O efeito Thomson depende do metal de que é feito o fio e da temperatura média da pequena região considerada. Em certos metais há absorção de calor, quando uma corrente elétrica flui da parte fria para a parte quente do metal e que há geração de calor quando se inverte o sentido da corrente. Em outros metais ocorre o oposto deste efeito, isto é, há liberação de calor quando uma corrente elétrica flui da parte quente para a parte fria do metal. Conclui-se que, com a circulação de corrente ao longo de um fio condutor, a distribuição de temperatura neste condutor se modificará, tanto pelo calor dissipado por efeito Joule, como pelo efeito Thomson.

Como dito anteriormente, a f.e.m. gerada em um termopar depende da composição química dos condutores e da diferença de temperatura entre as juntas, isto é, a cada grau de variação de temperatura, podemos observar uma variação da f.e.m. gerada pelo termopar. Pode-se, portanto, construir uma tabela de correlação entre temperatura e a f.e.m.. Por uma questão prática padronizou-se o levantamento destas curvas com a junta de referência à temperatura de 0°C.

Essas tabelas foram padronizadas por diversas normas internacionais e levantadas de acordo com a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68), recentemente atualizada pela ITS-90, para os termopares mais utilizados.

A partir dessas tabelas podemos construir um gráfico conforme o GRA. 2.6 a seguir, onde está relacionado a milivoltagem gerada em função da temperatura, para os termopares segundo a norma ANSI, com a junta de referência a 0°C.



GRA. 2.6 - Variação em mV devido à temperatura.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Os termopares comerciais mais conhecidos são mostrados na TAB. 2.6:

TABELA 2.6

Termopares comerciais:

Termopar	Faixa de temperatura (°C)	Propriedades
Cobre/Constantan (Cu – 55Cu,45Ni) Tipo T	-250 a 400	- Resistente a atmosferas oxidantes e redutoras até 350 °C; - Acima desta temperatura, não suporta atmosferas oxidantes.
Chromel/Constantan (90Ni,10Cr – 55Cu,45Ni) Tipo E	-270 a 800	- Alta FEM gerada; - Resistente a atmosferas oxidantes, porém pouco estável em atmosferas redutoras.
Ferro/Constantan (Fe – 55Cu,45Ni) Tipo J	-200 a 850	- Baixo custo; - Até 760 °C, funciona muito bem tanto em atmosfera redutora como oxidante.
Chromel/Alumel (90Ni,10Al – 95Ni + Al,Si,Mn) Tipo K	-200 a 1100	- FEM versus Temperatura quase linear; - Resistente a atmosferas oxidantes, mas em altas temperaturas é afetado em atmosferas redutoras ou que contenham enxofre.
Platina, Rhodio/ Platina (Pt,10Rh – Pt) Tipo S	-50 a 1300	- Alta resistência à corrosão; - Inércia térmica baixa; - Não tolera nenhum tipo de atmosfera redutora ou que contenha sílica ou ferro;
Platina, Rhodio/ Platina, Rhodio (70Pt,30Rh – 94Pt,6Rh) Tipo B	-50 a 1800	- Semelhante ao tipo S, porém trabalha com temperaturas mais altas, é mais resistente à sílica e ao ferro.
Platina, Rhodio/ Platina		- Alta resistência à corrosão;

(87Pt,13Rh – Pt) Tipo R	-50 a 1300	- Inércia térmica baixa; - Não tolera nenhum tipo de atmosfera redutora ou que contenha sílica ou ferro;
----------------------------	------------	---

FONTE: MICHALSKI et al., 1991.

É importante salientar que a junta de medição pode ser feita de três maneiras: por brasagem, soldagem ou simplesmente enrolando um fio no outro. De qualquer modo, um bom contato elétrico deve ser estabelecido, de maneira a se obter uma baixa resistência elétrica.

Caso o processo atinja altas temperaturas, seus termoelementos deverão ser encapsulados com material resistente a altas temperaturas e não-contaminante, para que sua integridade seja garantida. Geralmente, o material usado é cerâmica ou alumina.

Pode-se utilizar também o termopar de isolamento mineral (FIG. 2.19), que é constituído de um ou dois pares termoeletrônicos, envolvidos por um pó isolante de óxido de magnésio, altamente compactado em uma bainha externa metálica.

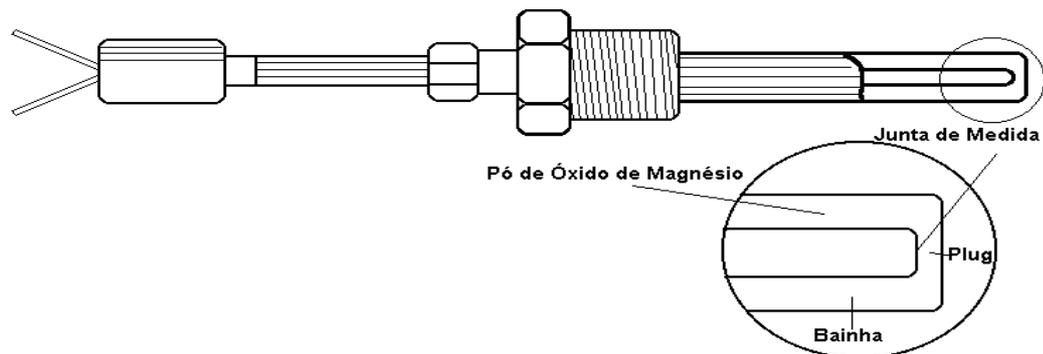


FIG. 2.19 - Termopar de isolamento mineral.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Devido a essa construção, os condutores do par termoeletrônico ficam totalmente protegidos contra a atmosfera exterior. Nesse caso, a durabilidade do termopar depende da resistência à corrosão da sua bainha e não da resistência a corrosão dos condutores. Em função desta característica, a escolha do material da bainha é fator importante na especificação destes.

Este tipo de configuração apresenta muitas vantagens:

- Estabilidade na força eletromotriz: a estabilidade da FEM do termopar é caracterizada em função dos condutores estarem completamente protegidos contra a ação de gases e outras

condições ambientais, que normalmente causam oxidação e conseqüentemente perda da FEM gerada;

- Resistência mecânica: o pó muito bem compactado, contido dentro da bainha metálica, mantém os condutores uniformemente posicionados, permitindo que o cabo seja dobrado, achatado, torcido ou estirado, suporte pressões externas e choque térmico, sem qualquer perda das propriedades termoelétricas;
- Dimensão reduzida: o processo de fabricação permite a produção de termopares de isolamento mineral, com bainhas de diâmetro externo até 1,0 mm, permitindo a medida de temperatura em locais que não eram anteriormente possíveis com termopares convencionais;
- Impermeabilidade a água, óleo e gás: a bainha metálica assegura a impermeabilidade do termopar;
- Facilidade de instalação: a maleabilidade do cabo, a sua pequena dimensão, longo comprimento e grande resistência mecânica, asseguram facilidade de instalação, mesmo nas situações mais difíceis;
- Adaptabilidade: a construção do termopar de isolamento mineral permite que o mesmo seja tratado como se fosse um condutor sólido. Em sua capa metálica podem ser montados acessórios, por soldagem ou brasagem e quando necessário, sua seção pode ser reduzida ou alterada em sua configuração;
- Resposta mais rápida: a pequena massa e a alta condutividade térmica do pó de óxido de magnésio proporcionam ao termopar de isolamento mineral um tempo de resposta que é virtualmente igual ao de um termopar descoberto de dimensão equivalente;
- Resistência à corrosão: as bainhas podem ser selecionadas adequadamente para resistir ao ambiente corrosivo;
- Resistência de isolamento elevada: o termopar de isolamento mineral tem uma resistência de isolamento elevada, numa vasta gama de temperaturas, a qual pode ser mantida sob condições mais úmidas e

- Blindagem eletrostática: a bainha do termopar de isolamento mineral, devidamente aterrada, oferece uma perfeita blindagem eletrostática ao par termoelétrico.

2.6.2 Medição de temperatura sem contato

2.6.2.1 Medição de temperatura por radiação

Ao se medir temperaturas em que o contato físico com o meio é impossível ou impraticável, faz-se uso da pirometria óptica ou de radiação térmica.

Um corpo aquecido emite energia mesmo que esteja no vácuo. Esta energia, a radiação térmica, é transportada por ondas eletromagnéticas, como a energia luminosa, mas com predominância de frequências bem menores que as do espectro visível, enquanto o corpo está à temperatura não muito elevada.

À medida que se aquece um corpo, a partir de temperaturas da ordem de 500 °C, a energia emitida começa a ficar visível, pois começa a emitir radiações que têm uma fração apreciável com frequência de luz: o espectro visível. Ainda assim, a maior parte da intensidade da radiação tem frequência localizada na região do infravermelho.

2.6.2.2 Pirômetro óptico

O pirômetro óptico é o dispositivo oficial reconhecido internacionalmente para medir temperaturas acima de 1064,43 °C. É usado para estabelecer a Escala Internacional Prática de Temperatura acima de 1064,43 °C.

O pirômetro óptico mede a intensidade de energia radiante emitida numa faixa estreita do comprimento de onda do espectro visível. A intensidade da luz no espectro visível emitida por um objeto quente varia sensivelmente com sua temperatura. Assim, com uma pequena variação da temperatura há uma grande variação na luminosidade, o que fornece um meio natural para a determinação de temperaturas com boa precisão.

O pirômetro óptico é um instrumento com o qual a temperatura desconhecida de um objeto é medida ao comparar sua luminosidade com a luminosidade conhecida de uma fonte padrão. Os pirômetros utilizam dois métodos para comparação:

- Variando a intensidade da luz emitida por uma lâmpada padrão (corrente que passa através do filamento) até atingir o mesmo brilho da fonte ou
- Variando a luminosidade aparente do corpo quente através de dispositivos ópticos enquanto uma corrente constante atravessa o filamento da lâmpada padrão que permanece com brilho constante.

A comparação do brilho entre a fonte a ser medida e o filamento da lâmpada é feita por um observador, o que faz com que essa medida dependa, portanto, da sensibilidade do olho humano às diferenças no brilho entre duas fontes da mesma cor .

Ao considerar-se uma aplicação deve-se levar em conta os seguintes dados:

- Os limites normais de utilização estão entre 750 °C e 2850 °C. Com filtros de absorção especiais, pode-se estender sua calibração até 5500 °;
- As medidas efetuadas com pirômetros ópticos são independentes da distância entre a fonte e o aparelho, além de que são providos de um conjunto de lentes que aproxima o objetivo a ser medido;
- Em uso industrial, consegue-se uma precisão de até $\pm 2\%$;
- Como a medida de temperatura é baseada na emissividade da luz (brilho), erros significativos podem ser criados, devido à reflexão de luz ambiente pela fonte a ser medida;
- Quando o meio onde se executa a medida possui partículas em suspensão, causando assim uma diminuição da intensidade da luz proveniente da fonte, diminui-se a precisão da medição.

2.6.2.3 Radiômetro ou pirômetros de radiação

Os radiômetros, ou pirômetros de radiação (FIG. 2.20) operam essencialmente segundo a lei de Stefan-Boltzmann. Neles a radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detector do tipo termopilha ou semiconductor, onde gera um sinal elétrico no caso da termopilha ou altera o sinal elétrico no caso do semiconductor.

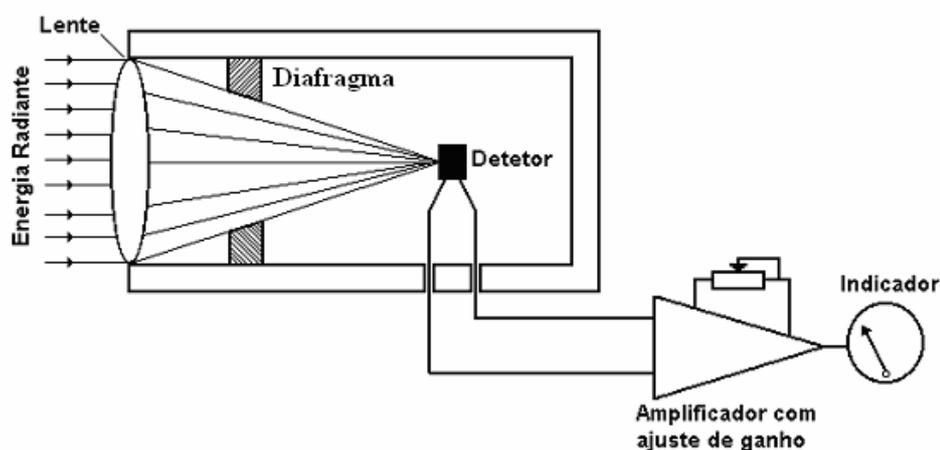


FIG. 2.20 - Pirômetro de radiação.

FONTE – MICHALSKI et al., 1991 (adaptação).

Como não possuem mecanismo de varredura próprio, o deslocamento do campo de visão instantâneo é realizado pela movimentação do instrumento como um todo. Os radiômetros são em geral portáteis, mas podem ser empregados também no controle de processos a partir de montagens mecânicas fixas ou móveis.

Graças à utilização de microprocessadores, os resultados das medições podem ser memorizados para o cálculo de temperaturas e seleção de valores.

A apresentação dos resultados é normalmente feita através de mostradores analógicos e digitais, podendo ainda ser impressa em papel ou gravada em fita magnética para posterior análise. Alguns radiômetros são diretamente conectados com unidades de controle ou registradores através de interface analógica/digital.

Como pode ser visto, existem diversos tipos de instrumentos que podem ser utilizados para se medir temperatura. A escolha do termopar como sensor de temperatura neste trabalho levou em conta diversas características intrínsecas ao instrumento, assim como a maior facilidade de incorpora-lo à ao processo de soldagem robotizado com eletrodo revestido, como será discutido no capítulo 3.

2.7 Soldagem Robotizada

Os altos custos envolvidos nos processos de manufatura, a demanda de produtos que possuam uma qualidade cada vez maior e a necessidade de melhores condições de trabalho leva à necessidade de automatização desses processos [Merrifield, 2005].

Além disso, a robotização de um processo produtivo, incluindo-se o processo de soldagem, trás consigo outros diversos benefícios, como o aumento da qualidade e produtividade (através da redução do tempo de execução, tempo de preparação das peças, eliminação de re-trabalho, possibilidade se trabalhar em até 24 horas por dia, entre outros), e a redução dos custos de mão-de-obra (que pode ser re-alocada em outras etapas produtivas), entre outros.

Neste contexto, os manipuladores robóticos empregados nos diversos tipos de soldagem robotizada surgiram como uma alternativa que proporciona o aumento da produtividade e da qualidade dos produtos, além de proteger o ser humano, evitando a execução de tarefas perigosas pelos mesmos. Como conseqüência, um robô permite uma

performance do arco elétrico bem melhor do que a proporcionada por operadores humanos [Cortina, 2005], se sua programação for realizada corretamente, visto que o posicionamento da tocha de soldagem é realizado com grande exatidão, independente do número de vezes que esta tarefa seja executada (repetitividade).

Além das razões citadas acima, pode-se citar outras que motivaram os processos de soldagem a se tornarem processos automatizados[Merrifield, 2005; Villafuerte, 2005]:

- A dificuldade de se encontrar soldadores experientes e hábeis fez com que este profissional fosse supervalorizado, sendo que a robotização de processos proporciona uma relação custo/benefício mais satisfatória;
- Alguns componentes e peças que necessitam ser soldados podem apresentar riscos à segurança e saúde dos soldadores. A inclusão de manipuladores robóticos em tais meios pode proporcionar o isolamento do operador;
- Elimina fatores inerentes à sociedade e seres humanos, que poderiam afetar o desempenho de elementos e do próprio processo de manufatura, como quebras de peças, necessidade de re-trabalho das juntas, férias do operador, doenças adquiridas, entre outros.
- A alta produtividade, repetibilidade e flexibilidade proporcionada pelos manipuladores robóticos utilizados na soldagem permite a redução dos custos de operação e aumento da quantidade de peças produzidas por unidade de tempo.

É importante salientar que a escolha de automatização de um processo de soldagem deve levar em consideração diversos fatores associados não só ao processo, como também a indústria em si. Ou seja, deve se balancear a relação custo/benefício ao se avaliar:

- A capacidade da indústria em incorporar o novo processo (tanto em relação ao custo como em relação a fornecedores, possíveis gargalos, entre outros);
- O objetivo da aquisição de uma nova tecnologia (deseja-se aumentar o volume de produção, diminuir a quantidade de mão-de-obra, melhorar a repetibilidade e qualidade das peças produzidas, entre outros);

- Verificar se o tempo de retorno do investimento proporcionado pela tecnologia atende as necessidades da indústria;
- Observar se haverá necessidade de mudança nas dimensões e matérias das peças, além da melhoria no ajuste entre as peças;
- Verificar a viabilidade e as maneiras de incorporar e integrar o novo sistema com os demais existentes na indústria, entre outros.

3 METODOLOGIA

3.1 Projeto da Garra

O projeto da garra compreendeu a escolha de um sistema que pudesse ser incorporado ao manipulador robótico e que funcionasse como porta-eletrodo; tanto em relação à passagem de corrente quanto em relação ao aperto, e que pudesse ser instrumentado, para que pudesse fornecer informações ao controlador do robô.

3.1.1 Escolha e adequação

O foco deste trabalho é implementar uma garra instrumentada e acionada, e verificar a possibilidade de seu uso para a medição indireta da temperatura da alma do eletrodo. Optou-se por usar uma ferramenta comercialmente encontrada e adequá-la ao projeto: o mandril porta-brocas. Além de ser encontrada no mercado facilmente, esta ferramenta tem um custo baixo e serve adequadamente ao propósito desta dissertação: o mandril é capaz de travar eletrodos de diversos diâmetros e permite um contato apropriado entre a alma do eletrodo e os termopares. Será mais facilmente incorporado em uma indústria, pelos motivos citados acima, do que uma garra de difícil confecção e de alto custo. Além disso, apesar da maioria dos estudos na área de garras robótica ser feita com o intuito de torná-las mais semelhantes às mãos humanas, em relação ao tato, força aplicada, percepção do posicionamento do objeto, etc; este não foi o objeto de estudo, visto que o objetivo era obter um porta-brocas robotizado.

As castanhas do mandril manual são equidistantes e possuem uma área de contato eficiente. Essa área de contato é suficiente para promover uma pequena resistência de contato entre o eletrodo e as castanhas e permitirá uma medição correta de temperatura.

Os mandris de pequeno porte encontrados comercialmente são o 10LL 3/8x24 (F), que tem a capacidade de travar eletrodos de 1mm até 10mm de diâmetro da alma, e o 13L 1/2x20 (F), que tem a capacidade de travar eletrodos de 1,5mm até 13mm de diâmetro da alma (nomenclatura de acordo com a Norma DIN). Utilizou-se o mandril de ½ polegada, pois seu talhe irá exigir um torque menor do motor de acionamento. Além disso, possui uma massa maior, permitindo uma distribuição maior de temperatura e uma elevação menor da mesma, já

que além de travar o eletrodo a garra deverá suportar a passagem de corrente, pois funcionará também como porta-eletrodo, fornecendo a corrente necessária para a soldagem.

A marca de mandril utilizada como garra é ROHM, por se tratar de uma marca conhecida e que garante a qualidade de seus produtos (deve-se garantir que as castanhas não sejam deformadas durante o aperto da garra). Os mandris da ROHM possuem castanhas, coroas e chaves temperadas (FIG. 3.1).



FIG. 3.1- Mandril ROHM.

FONTE - Adaptação do catálogo ROHM.

Como citado anteriormente, as garras geralmente são compostas de cinco elementos. No caso do mandril porta-brocas ROHM, os elementos de aperto são as castanhas, o mecanismo de execução é a engrenagem da chave do mandril, o mecanismo de transmissão entre o acionamento e o mecanismo de execução é a alavanca ligada à engrenagem cônica e o acionamento pode ser tanto manual, como elétrico. Já os elementos de ligação entre os elementos de aperto e o mecanismo de execução são as roscas das castanhas, como pode ser visto na FIG. 3.2:

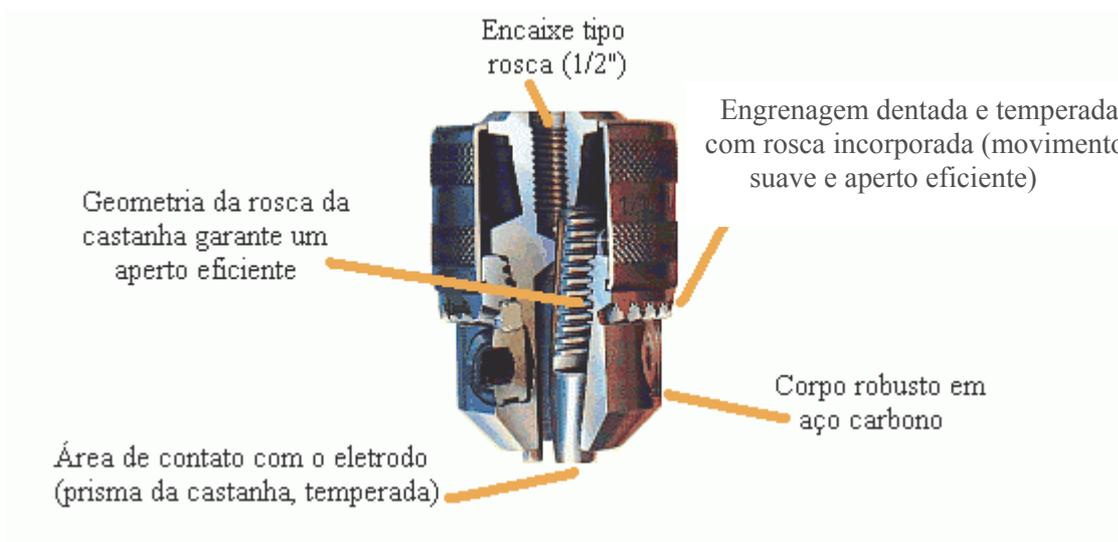


FIG. 3.2 - Interior do mandril.

FONTE - Adaptação do catálogo ROHM.

Foram utilizados dois mandris durante o trabalho, ambos de $\frac{1}{2}$ polegada, cujas principais diferenças baseiam-se no processo de furação das castanhas do mandril e na localização dos furos. A primeira e a segunda batelada de testes foram realizadas com o mandril que será aqui referenciado como *mandril 1*, e os testes finais, cujo intuito era o de simular o processo de captura e descarte do eletrodo, foram realizados com o *mandril 2*.

Para comportar os termopares, o *mandril 1* foi furado manualmente. A broca de aço carbono de 1,5mm utilizada na tentativa de furar as castanhas se rompeu, pois as castanhas são temperadas. Deste modo, se tornou necessária a normalização das castanhas. Para tal, aproximou-se as castanhas (tentando manter afastado o corpo do mandril) de um maçarico e logo em seguida inseriu-se as mesmas em um recipiente com cal, afim de proporcionar um resfriamento lento. Esse procedimento foi realizado diversas vezes. Notou-se que as castanhas foram levemente deformadas e escurecidas. Apesar dessa alteração não apresentar risco para a medição de temperatura e nem para o travamento dos eletrodos, ela é inviável e, portanto, no *mandril 2* (mandril final) foram realizados outros procedimentos, que serão comentados posteriormente.

Depois de normalizadas, as castanhas puderam ser furadas e os termopares inseridos nos orifícios restantes.

Uma das castanhas do mandril foi perfurada em sua região central (transversalmente), enquanto outra foi furada próximo à sua extremidade (FIG. 3.3). O objetivo deste deslocamento relativo ao posicionamento dos termopares era o de analisar

qualitativamente se a posição dos termopares nas castanhas tem alguma influência considerável sobre a medição de temperatura:

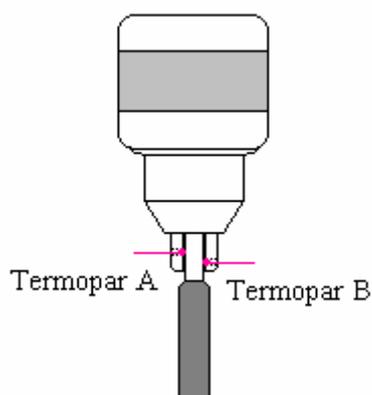


FIG. 3.3 - Localização dos termopares (mandril 1).

Além dos termopares inseridos na garra, cada eletrodo utilizado nos experimentos continha um termopar em sua região não revestida (termopar C), de modo que quando o mandril estivesse fechado, este termopar estaria posicionado na mesma posição plana do que o termopar A, como mostrado na FIG. 3.4.

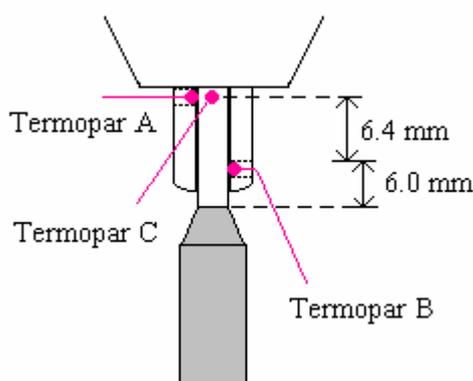


FIG. 3.4 – Distribuição dos termopares.

O objetivo da utilização dos termopares no próprio eletrodo é avaliar a influência do mandril na medição de temperatura, já que uma parte do calor é dissipada na garra.

Já no *mandril 2*, o furo foi realizado próximo à extremidade da castanha, visto que estudos preliminares [Dantas et al., 2005] mostraram que nesta posição a influência do mandril e conseqüentemente da castanha sobre a medição da temperatura será menor, como será mostrado no capítulo “Resultados e Discussão”. Para que o mandril não sofresse danos com o processo de furação, os furos foram realizados pelo processo de eletro-erosão a fio.

Com esse processo, pôde-se obter furos de 2mm mais precisos e corretamente centralizados horizontalmente.

3.1.2 Instrumentação da garra

Os sensores utilizados para monitorar a temperatura dos eletrodos revestidos durante as soldagens foram termopares do tipo K, independentemente de estarem posicionados na garra ou no eletrodo revestido. Este tipo de termopar é resistente a atmosferas oxidantes e é um dos mais acessíveis (tanto em relação ao custo quanto à disponibilidade no mercado). Além disso, apresenta uma faixa de temperatura de trabalho suficiente para os testes realizados.

A escolha da utilização do termopar na garra levou em consideração alguns fatores:

- Suas dimensões são pequenas, sendo possível seu acoplamento à garra;
- Seu preço é acessível em comparação com outros instrumentos, como pirômetros;
- Sua temperatura de medição máxima é muito alta, dependendo do tipo escolhido, característica difícil de se conseguir em outros tipos de sensores (termoresistências e à dilatação), ou quando possível acarreta um acréscimo em seu preço e tamanho inviável;
- A aquisição de dados e registro é fácil de ser realizada com este tipo de sensor, inclusive remotamente, sem prejuízo dos dados;
- Não necessita de fonte de alimentação e principalmente
- No atual estágio de desenvolvimento tecnológico, não há outro transdutor que permita a leitura da temperatura na interface garra/eletrodo.

Para que a junta de medição de cada termopar realizasse uma leitura correta, os fios que os compõe (nesse caso um fio de cromel e outro de alumel) foram previamente soldados utilizando-se o processo a chama oxiacetilênica (FIG. 3.5).



FIG. 3.5 - Termopar com juntas soldadas.

Subseqüentemente o termopar foi posicionado no orifício e uma solda por descarga capacitiva foi realizada entre o termopar e um eletrodo. Um adesivo resistente a altas temperaturas (Loctite 4210) foi adicionado ao furo e, depois de solidificado, a solda entre o termopar e o eletrodo foi desmanchada. O objetivo deste procedimento foi o de garantir o isolamento da junta de medição, evitando seu contato com a parede do furo e, conseqüentemente, uma leitura incorreta da temperatura do eletrodo. Além disso, o procedimento assegurou um bom contato entre os termopares e os eletrodos durante o processo robotizado de soldagem.

3.1.3 Adaptação da garra e de seu sistema de acionamento no manipulador

Para adaptar o mandril no elemento final do manipulador robótico KUKA KR16, inicialmente foi necessária a confecção de uma bucha de Nylon[®] que isolasse o mandril do manipulador, impedindo a passagem de corrente da garra para o mesmo.

Posteriormente foi necessário acoplar a garra ao elemento final do manipulador. Para tal, utilizou-se um porta-ferramentas, que comporta diversos tipos de instrumentos, já adaptada ao robô KUKA KR16 (FIG. 3.6).

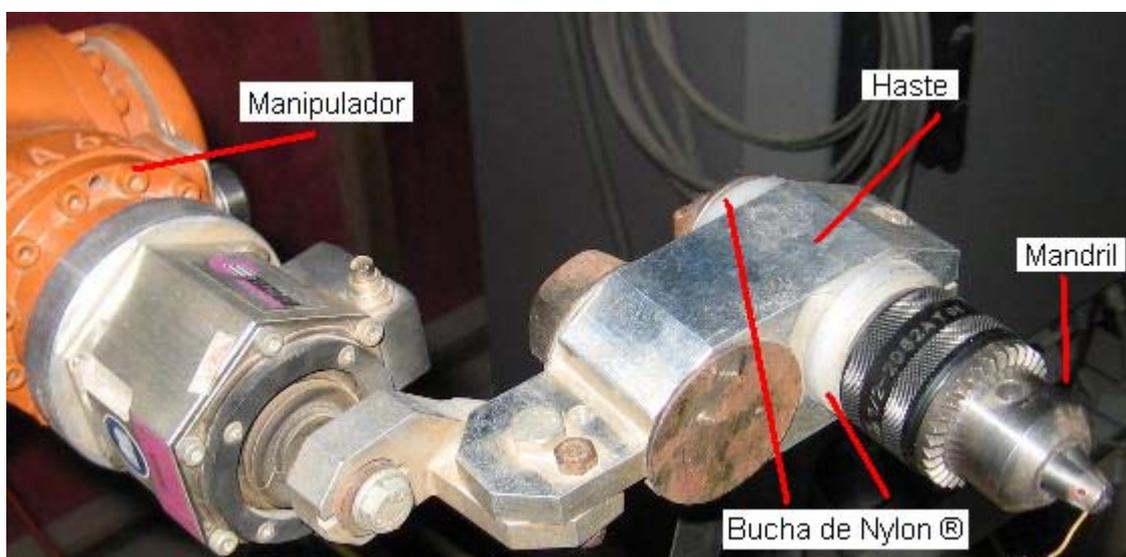


FIG. 3.6 - Adaptação garra/manipulador.

Uma das etapas para a automatização da soldagem com eletrodo revestido é o processo de abertura e fechamento do mandril, para retirada e inserção de eletrodos. O

mandril é aberto ou fechado por um motor de corrente contínua Magneti Marelli , ligado à uma fonte retificadora de corrente regulável, alimentada com 127 volts.

Para que o motor pudesse girar em dois sentidos, podendo assim abrir e fechar o mandril, foi necessária a confecção de um circuito de acionamento, que será detalhado posteriormente. Além disso, foi necessário cortar a cabeça engrenada da chave do mandril e depois soldá-la diretamente ao eixo do motor (FIG. 3.7).

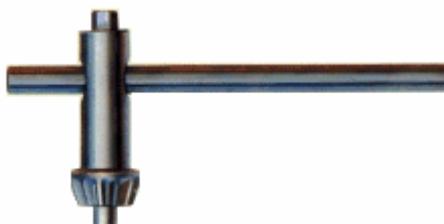


FIG. 3.7 - Chave do mandril ROHM.

FONTE – Catálogo ROHM.

Para fixar o motor ao lado do mandril, foi necessário parafusar duas barras de Nylon® em sua extremidade inferior, com o intuito de isolar o motor do porta-ferramenta, evitando a passagem da corrente de acionamento do motor para o mesmo. Para sustentar esta montagem, foi parafusada às barras de Nylon® uma barra de ferro, em forma de “L” (FIG. 3.8).

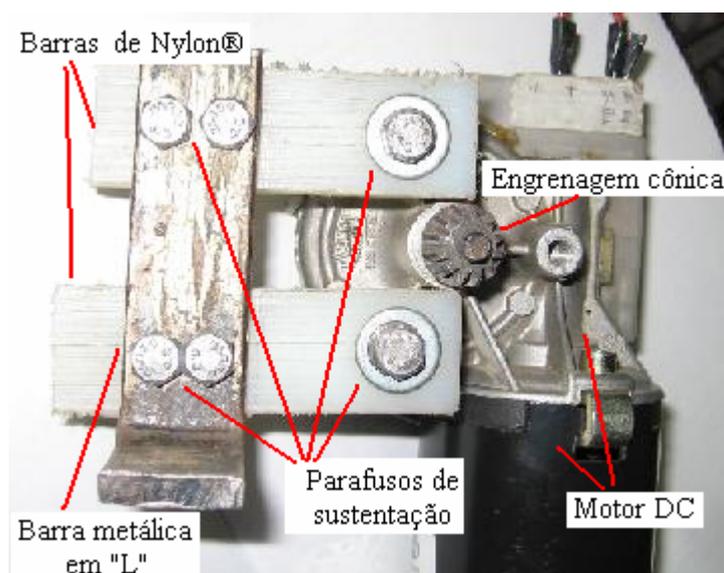


FIG. 3.8 – Adaptação (fixação motor/manipulador).

A incorporação do motor no manipulador foi feita através de um conjunto parafuso – rosca (FIG. 3.9), encaixado no segundo furo do porta-ferramentas do robô.

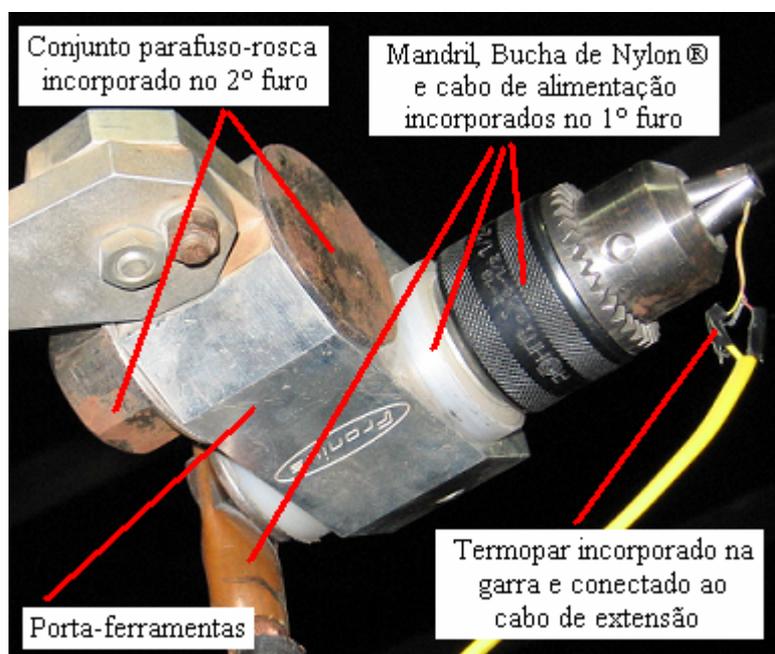


FIG. 3.9 - Sistema adaptado.

O motor foi então posicionado ao lado do mandril, e através deste conjunto e de um elemento de fixação (sargento), ele pôde ser fixado ao robô de soldagem, logo abaixo do ponto de fixação do mandril (FIG. 3.10).

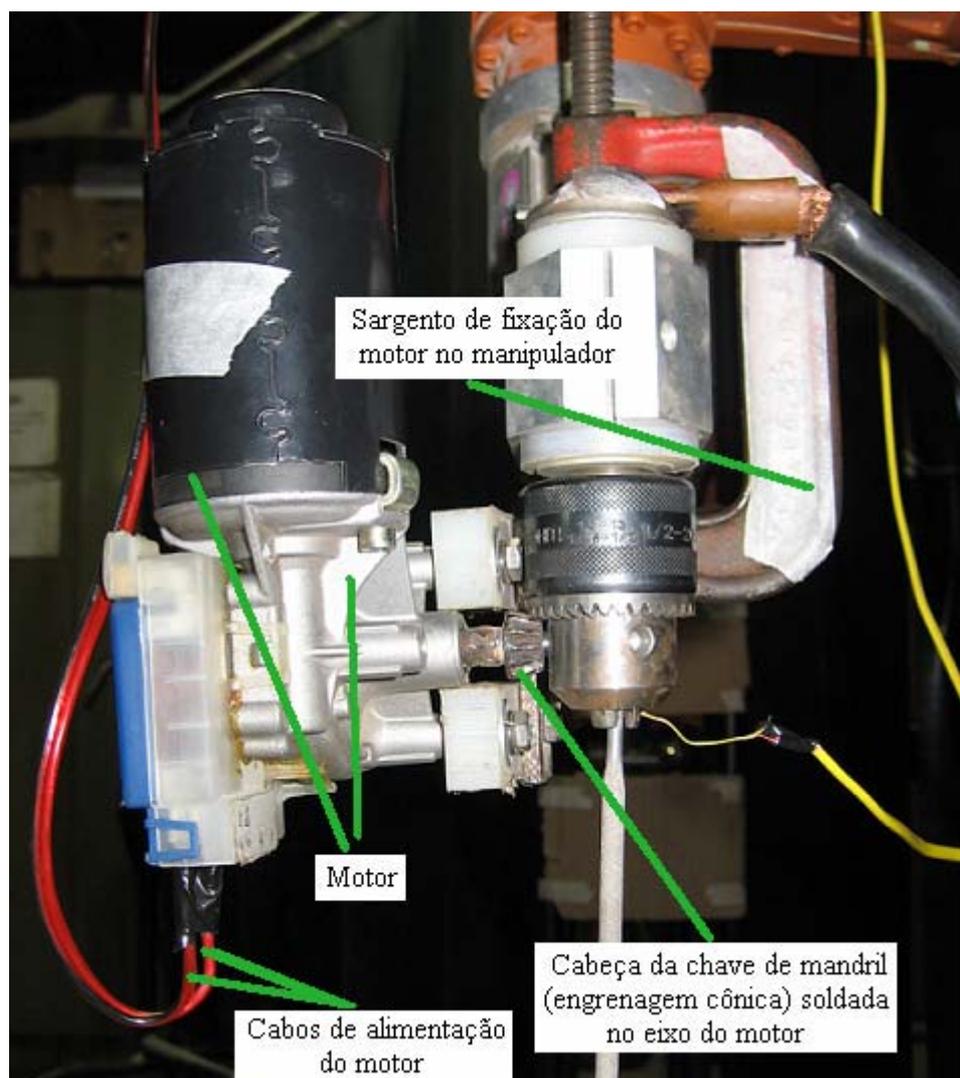


FIG. 3.10 – Montagem do sistema completo.

Esta montagem é adequada para a obtenção de um processo automatizado de abertura e fechamento do mandril. O motor está rigidamente fixado e adequadamente isolado eletricamente, para que não interfira nas medições do termopar.

È importante salientar que a força de contato entre os eletrodos e as castanhas do mandril é suficiente e constante (independe do diâmetro do arame), visto que o aperto máximo é limitado pela maior corrente aplicada sobre o motor pela fonte de alimentação. Desta maneira, o torque é mantido constante e a força de contato será sempre a mesma, independentemente do diâmetro da alma do eletrodo.

3.2 Preparação dos eletrodos

Como citado anteriormente, os termopares do tipo K apresentam diversas vantagens, e, portanto, foi utilizado na monitoração da temperatura do eletrodo revestido, tanto estando fixado na garra quanto fixado no próprio eletrodo.

Cada eletrodo utilizado nos experimentos teve dois termopares fixados em seu corpo. Um termopar foi unido ao eletrodo em sua região não-revestida e outro em sua região revestida. A união dos termopares à alma do eletrodo foi realizada através do processo de soldagem por descarga capacitiva.

Para que o termopar fosse posicionado na região revestida do eletrodo, inicialmente uma pequena quantidade de revestimento foi retirada, até que a alma do eletrodo fosse descoberta. Então, o termopar foi soldado e posteriormente a região foi recoberta com uma massa feita com o próprio revestimento do eletrodo e uma pequena quantidade de adesivo Loctite 4210 (FIG. 3.11).

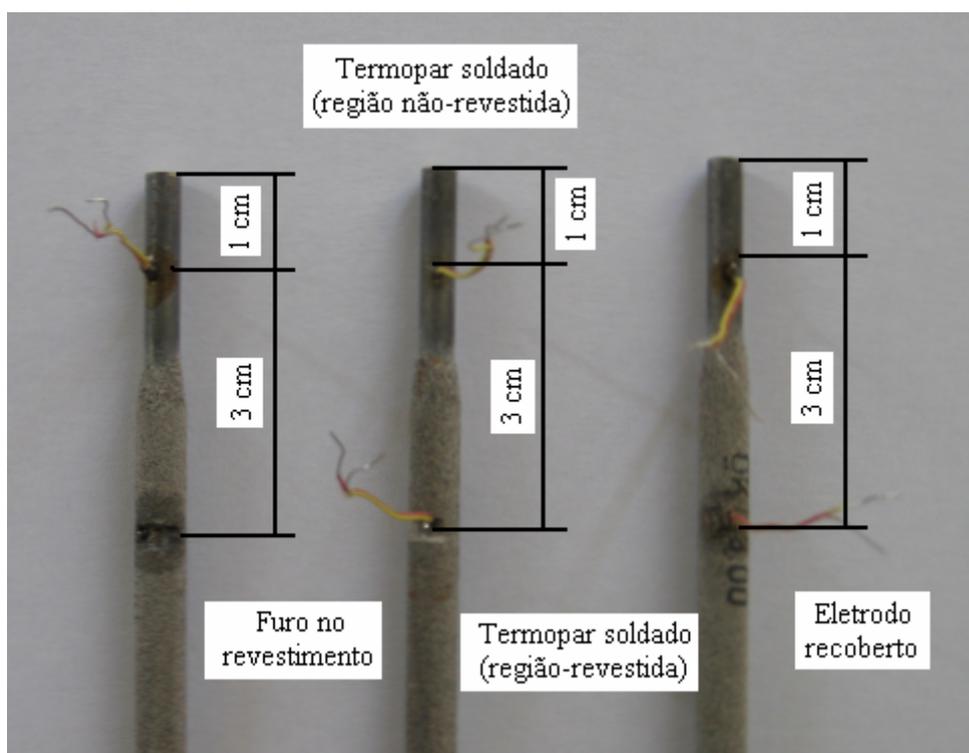


FIG. 3.11- Posicionamento dos termopares nos eletrodos.

3.3 Sistema de Aquisição de Dados

Foi utilizada uma placa de aquisição de dados de 16 canais diferenciais da marca CIO DAS, modelo PCI 1202L. A monitoração foi feita através do software LabVIEW Student (FIG. 3.12 e FIG. 3.13.). Foi utilizada uma taxa de aquisição de 200 leituras por segundo, visto que a variação da temperatura é um fenômeno relativamente lento, se comparado a outros.

Além de o programa permitir o acompanhamento em tempo real da variação da temperatura com o tempo, ele permite a gravação dos dados no formato “.xls”, para posterior tratamento dos dados e análise.

O software LabVIEW possui bibliotecas direcionadas para a aquisição de dados, o que facilita a construção de um programa de aquisição, pois não é necessário, por parte do programador, inicializar a placa, verificar status dos canais e etc. Contudo, para a construção do programa de aquisição utilizado neste trabalho, foi necessário utilizar um pacote primitivo de aquisição de dados que acompanhava a placa PCI 1202L, visto que o LabVIEW reconhece apenas placas da National Instruments, fabricante do software. Ou seja, além do programa de aquisição de dados em si, foi necessário inicializar o Driver, ativar a placa, definir endereço na memória para armazenamento de dados, verificar o status dos canais (quais serão utilizados) e verificar as configurações de cada canal (FIG. 3.12 a FIG. 3.21):

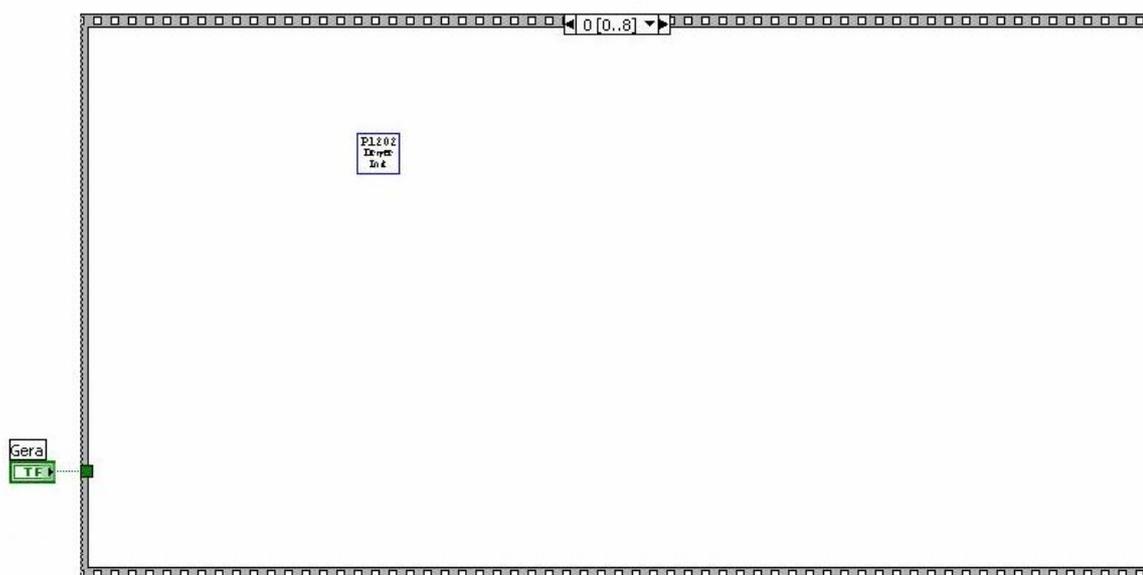


FIG. 3.12 – Diagrama em Blocos – Tela 1.

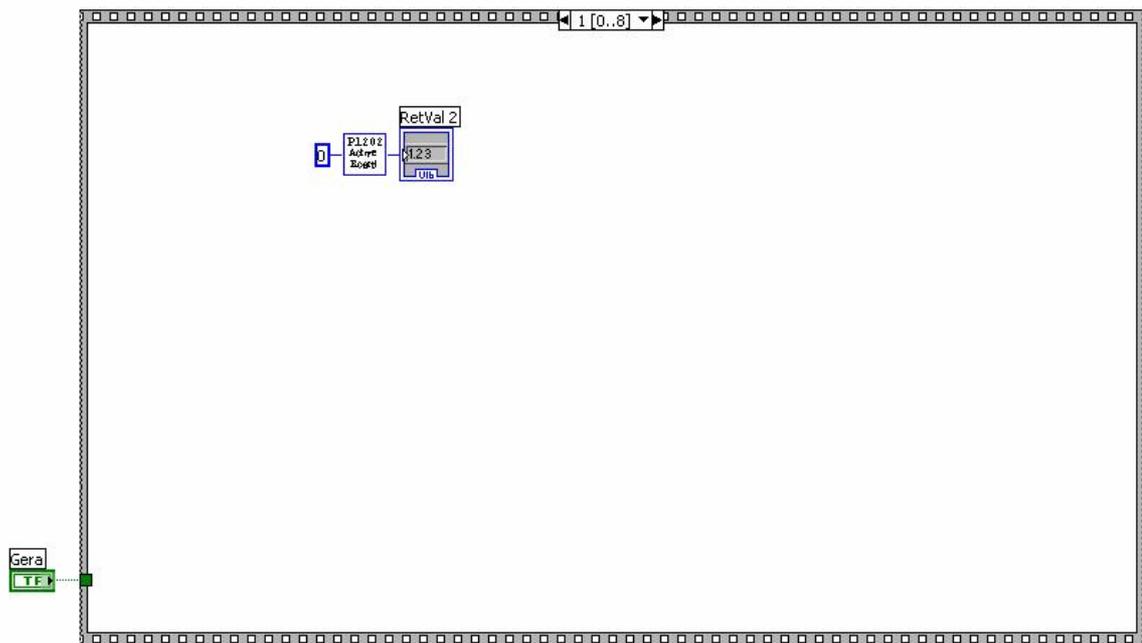


FIG. 3.13 – Diagrama em Blocos – Tela 2.

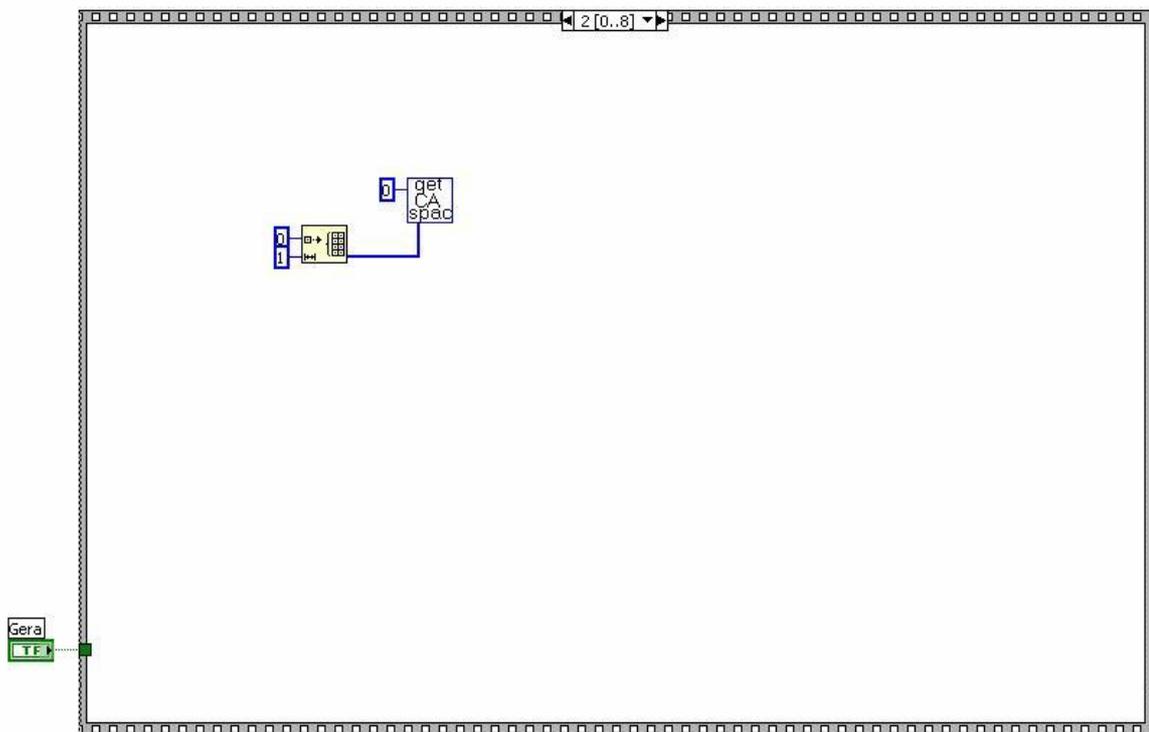


FIG. 3.14 – Diagrama em Blocos – Tela 3.

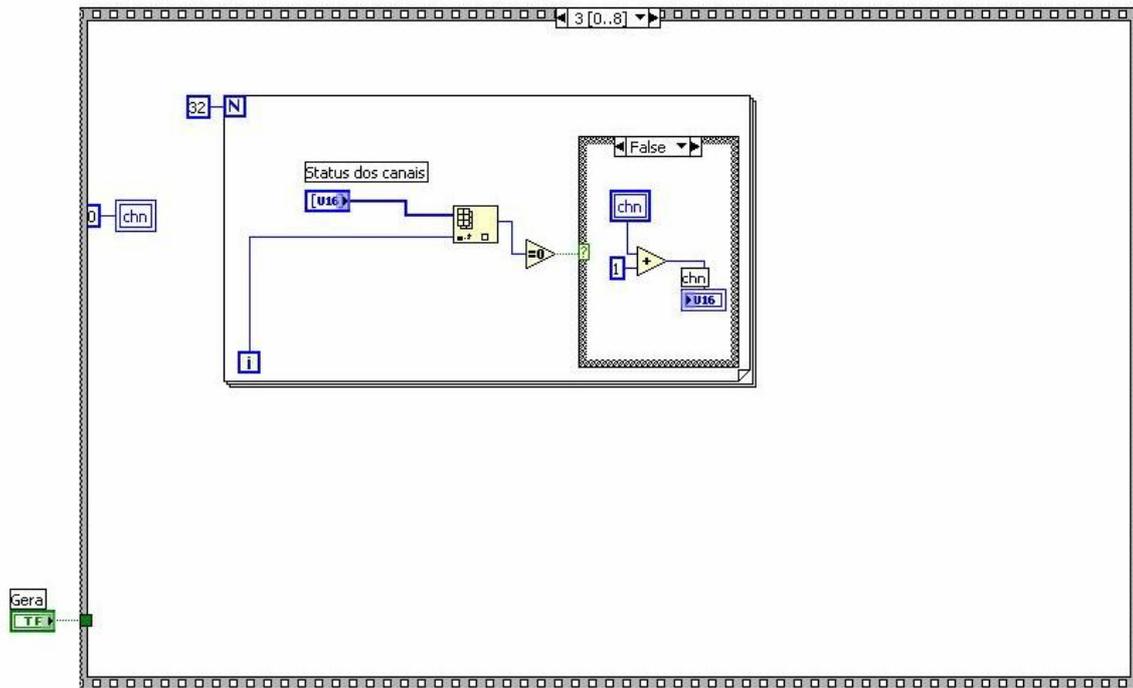


FIG. 3.15 – Diagrama em Blocos – Tela 4.

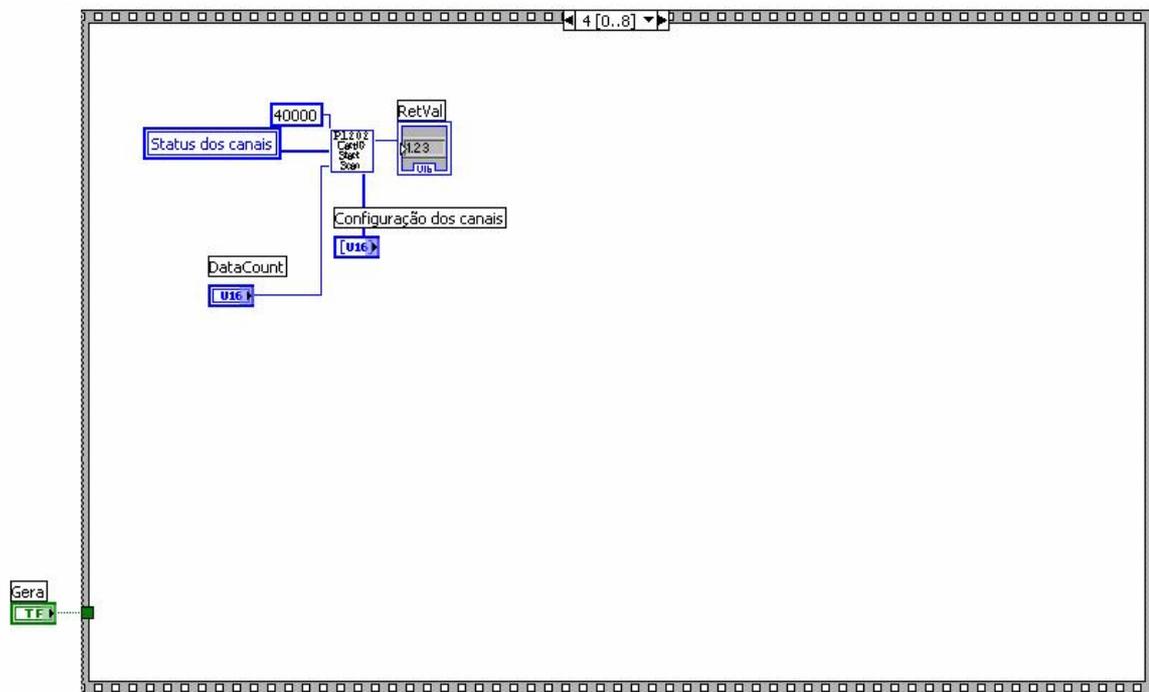


FIG. 3.16 – Diagrama em Blocos – Tela 5.

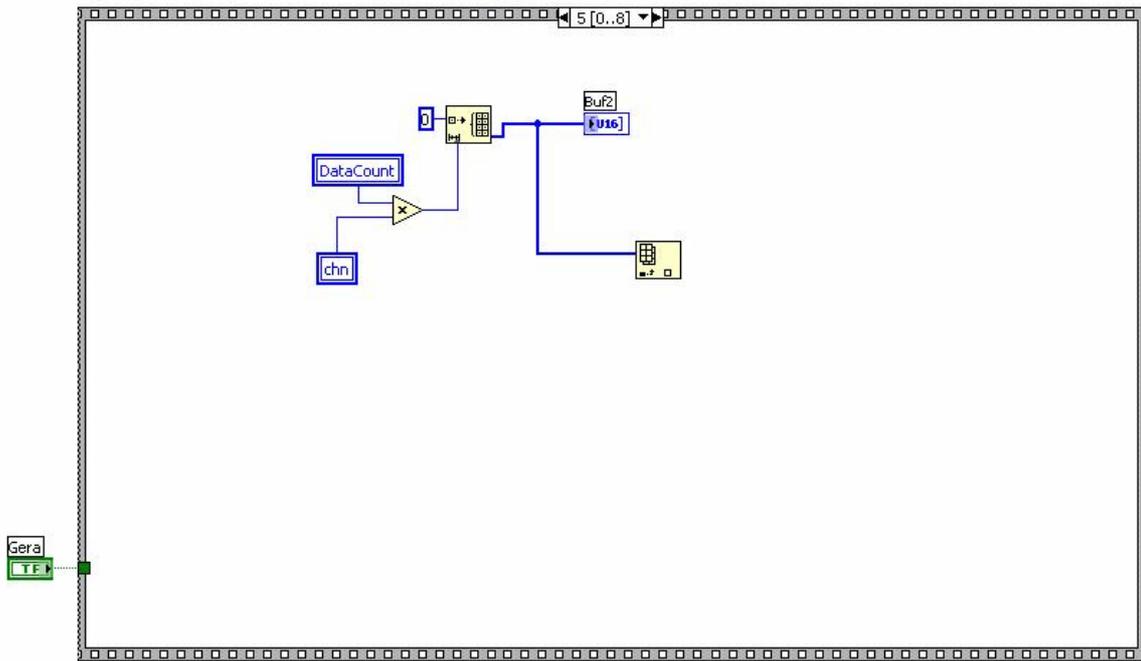


FIG. 3.17 – Diagrama em Blocos – Tela 6.

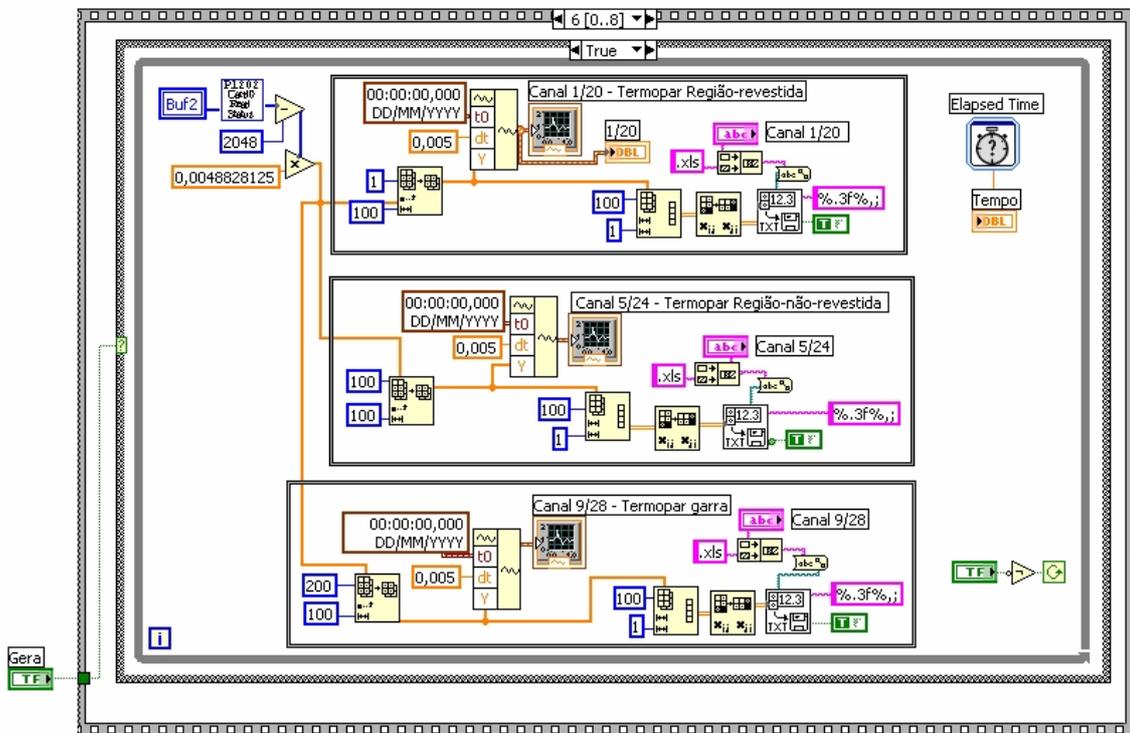


FIG. 3.18 – Diagrama em Blocos – Tela 7.

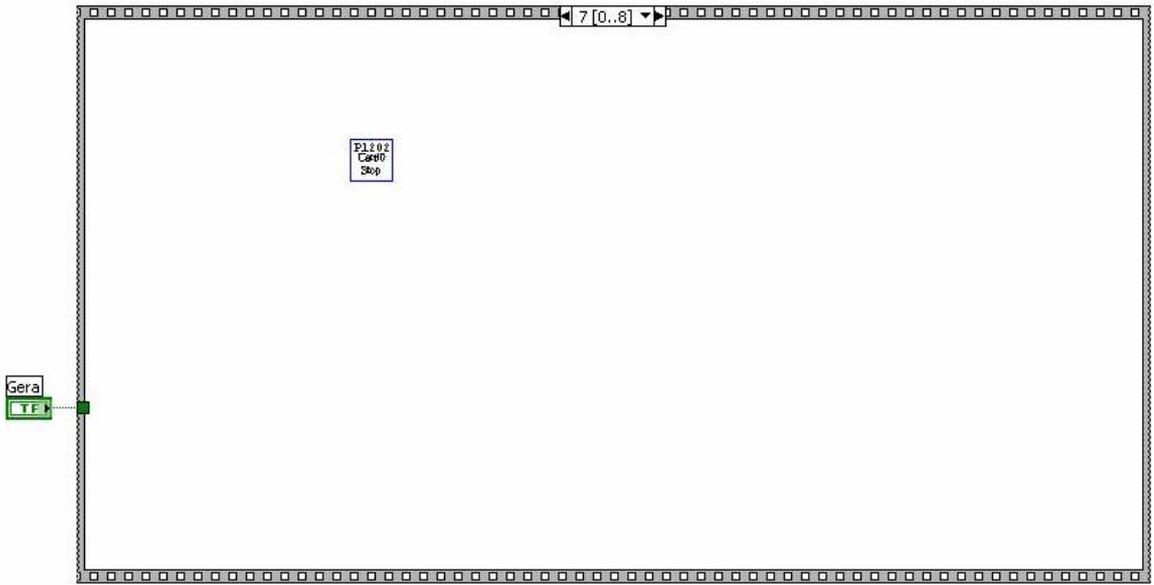


FIG. 3.19 – Diagrama em Blocos – Tela 8.

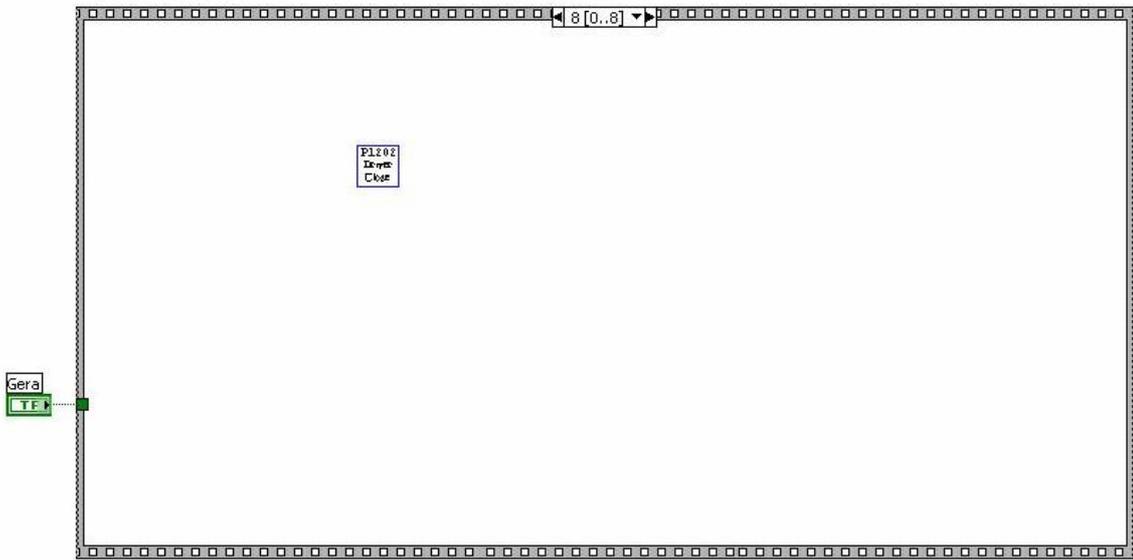


FIG. 3.20 – Diagrama em Blocos – Tela 9.

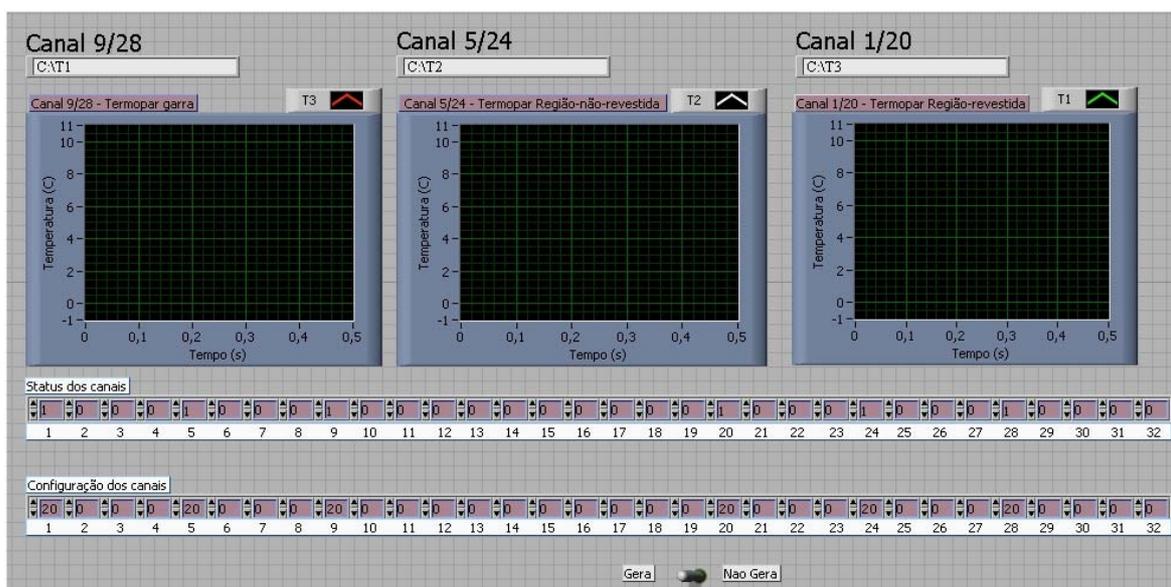


FIG. 3.21 – Programa (parte gráfica/interface).

Tanto os termopares soldados nos eletrodos revestidos quanto os que foram soldados na garra, foram interligados, através de cabos de extensão, a um condicionador de sinal eletrônico com proteção galvânica, que protege a placa de aquisição de dados contra possíveis descargas elétricas que viessem a ocorrer durante a soldagem. Esse condicionador de sinais realiza também a compensação de junta fria, além de linearizar e amplificar o sinal de mV para um sinal de 0 a 12V (representando temperaturas de 0°C a 1200°C). Esse sinal é enviado à placa de aquisição de dados através de um bloco de conectores de canais, por meio de fios de cobre.

3.4 Projeto do circuito de acionamento

Para tornar a robotização do processo SMAW mais produtiva, a garra de soldagem deve ser acionada automaticamente, através de sinais lógicos enviados pelo controlador do sistema robótico. Para tal, foi necessária a construção de um circuito de acionamento da garra, visto que suas castanhas devem ser abertas, permitindo a acomodação dos eletrodos, e fechadas, fornecendo um bom contato entre o eletrodo e as castanhas.

O circuito foi construído de maneira a inverter a corrente de alimentação do motor de acionamento da garra, através de switches que recebem sinais lógicos do controlador e, através de chaves, conduzem a corrente elétrica na direção correta.

Devido à alocação dos termopares nas castanhas do mandril, a abertura da garra foi temporizada através do controlador do robô, impedindo a extração do sensor durante seu processo de abertura. Esquemas simplificado do circuito e fotos são mostrados abaixo (FIG. 3.22, FIG. 3.23, FIG 3.24 e FIG 3.25):

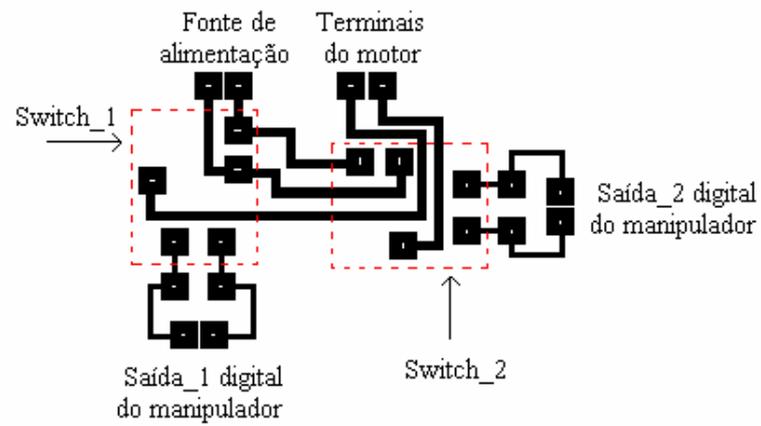


FIG. 3.22 – Esquema do circuito de acionamento.

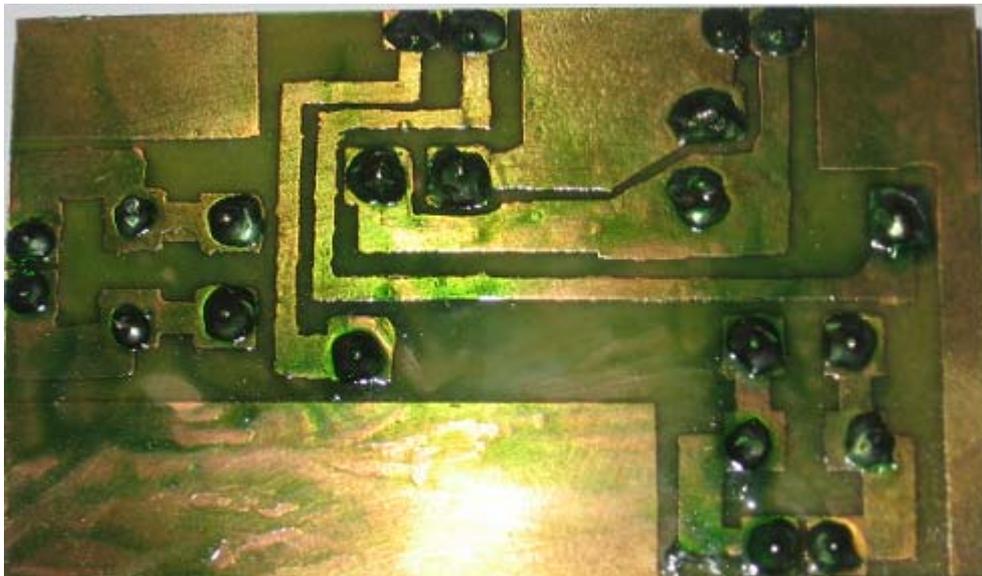


FIG. 3.23 – Circuito (parte inferior).

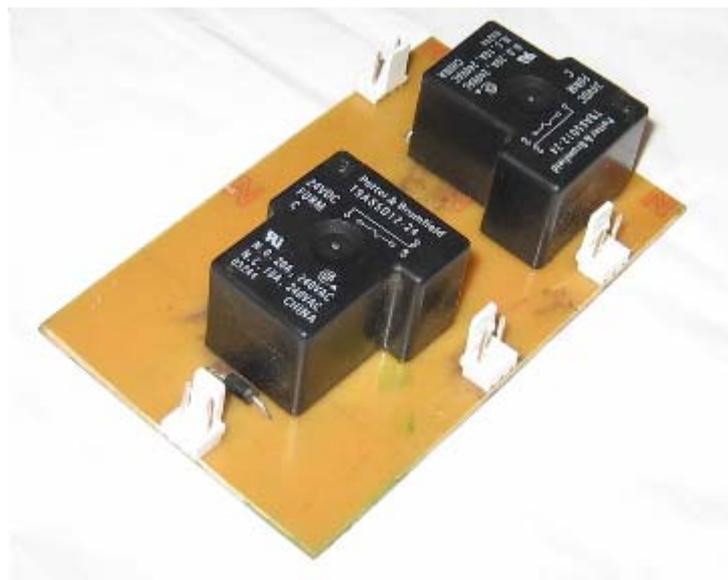


FIG. 3.24 – Circuito (parte superior).

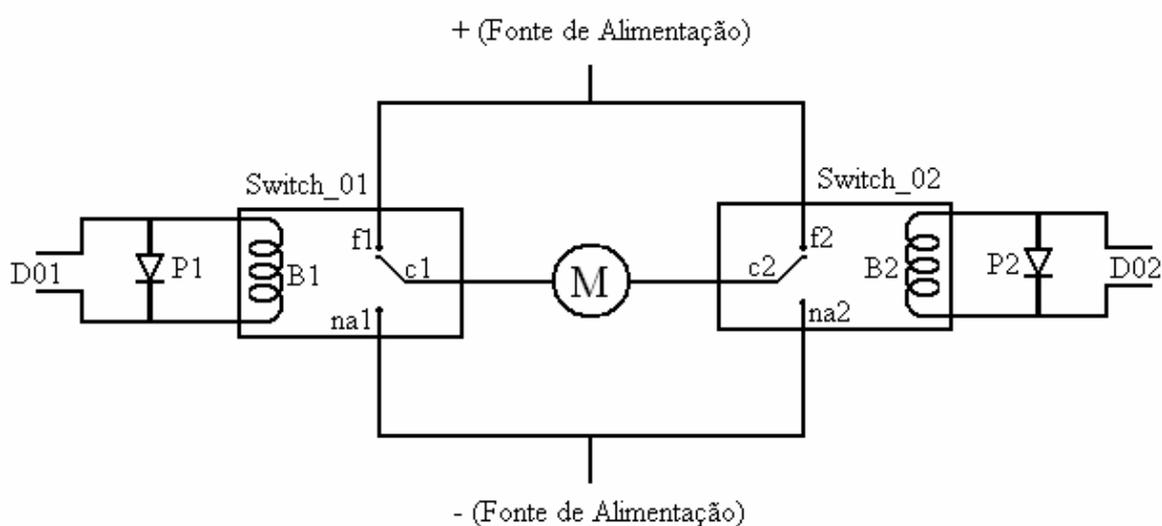


FIG. 3.25 –Esquema Elétrico do Circuito de Acionamento.

Onde:

D01 e D02: saídas lógicas 01 e 02 do controlador do robô, respectivamente;

P1 e P2: diodos de proteção (contra corrente reversa) 01 e 02, respectivamente;

B1 e B2: bobinas 1 e 2 dos switchies 1 e 2, respectivamente;

c1 e c2: chaves 1 e 2 dos switchies 1 e 2, respectivamente;

na1 e na2: posições normalmente-abertas na1 e na2, dos switchies 1 e 2, respectivamente;

f1 e f2: posições fechadas f1 e f2, dos switchies 1 e 2, respectivamente;

M: motor

A ação tomada pelo motor de acionamento do mandril é função da diferença de potencial de seus bornes de alimentação. Essa, por sua vez, é função da combinação das saídas do controlador do manipulador, que, através das chaves dos switchies, direciona (se houver) a corrente de alimentação do motor de acionamento. A tabela abaixo (TAB. 3.1) nos mostra as possíveis ações do mandril, a partir das combinações das saídas do controlador do manipulador robótico.

TABELA 3.1

Ação executada pelo mandril:

Saída 1	Saída 2	Chave 1	Chave 2	Ação
0	0	Fechada	Fechada	Nenhuma
0	1	Fechada	Aberta	Abre o Mandril
1	0	Aberta	Fechada	Fecha o Mandril
1	1	Aberta	Aberta	Nenhuma

4 RESULTADOS

4.1 Testes (mandril 1)

Os testes realizados com o *mandril 1* foram feitos com o intuito de:

1. Avaliar o comportamento da temperatura em pontos diferentes da castanha;
2. Comparar estes dados com a temperatura obtida na região não revestida do eletrodo;

4.1.1 Primeira batelada

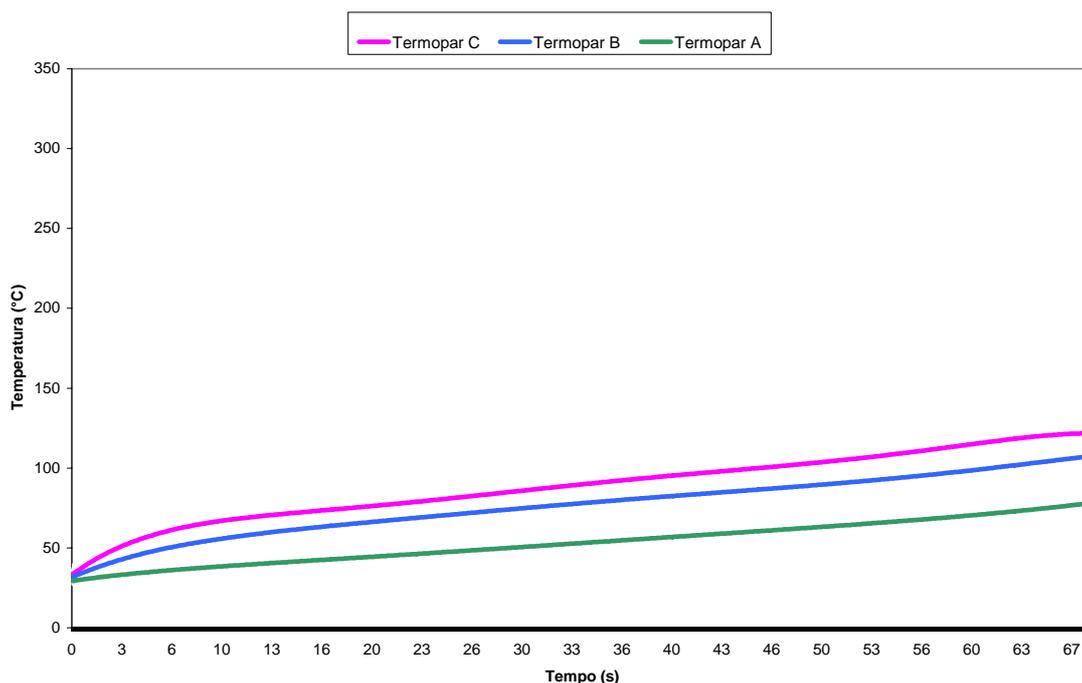
As temperaturas foram medidas como função do tempo durante 20 soldagens, realizadas por um soldador qualificado (FIG. 4.1), na tentativa de eliminar possíveis variações e garantir a maior repetibilidade possível para o processo manual.

Entre a execução das soldagens aguardou-se o resfriamento da garra para garantir que sua temperatura não influenciasse no processo de medição.



FIG. 4.1 - Chapa soldada.

Observou-se um comportamento regular (GRA. 4.1) em todos os testes executados, mostrando uma repetibilidade adequada do processo e procedimentos. Para efeitos de simplificação, este gráfico mostra apenas as curvas ajustadas de temperatura em função do tempo [Dantas et al., 2005].



GRA. 4.1 - Resultados.

Pode-se observar que a temperatura na região não revestida do eletrodo (Termopar C) mantém-se sempre acima das temperaturas obtidas nas castanhas (Termopares A e B). Isso acontece devido ao fato de que a temperatura medida diretamente no eletrodo é afetada apenas pela perda de calor por convecção e radiação. Já nas castanhas, o calor é perdido tanto por convecção e radiação, quanto por condução. De qualquer maneira, é importante observar que comportamento da temperatura nas três regiões onde estão posicionados os termopares se mantém praticamente constante (mesma inclinação).

A posição do termopar nas castanhas afeta a medição da temperatura. Na ponta da castanha (Termopar B) a temperatura é medida antes da dissipação do calor, ao contrário da temperatura medida pelo Termopar A.

Além disso, é importante observar que a distribuição de temperatura no eletrodo idealizada por Felizardo [Felizardo, 2003] considera o uso de um porta-eletrodos, mas a medição de temperatura foi realizada no próprio eletrodo. Portanto, é importante conhecer a temperatura na região não revestida do eletrodo. Como o progresso da temperatura foi bem-comportado, é possível obter experimentalmente a diferença entre a temperatura medida no eletrodo e a temperatura medida na castanha do mandril. Essa diferença, somada à temperatura medida na castanha durante a soldagem pode ser usada durante a soldagem

robotizada para determinar a temperatura do eletrodo e a taxa instantânea de fusão. A única ressalva necessária é que, como a variação de temperatura nas castanhas se refere à determinada posição, é necessário estipular apenas uma posição para inserir os termopares na garra [Dantas et al, 2005].

4.1.2 Segunda batelada

Nos testes realizados durante a segunda batelada, a temperatura foi medida em apenas uma localização na castanha do mandril (como já comentado anteriormente). Já nos eletrodos, a temperatura foi medida tanto na região não revestida como na região revestida (FIG. 4.2):

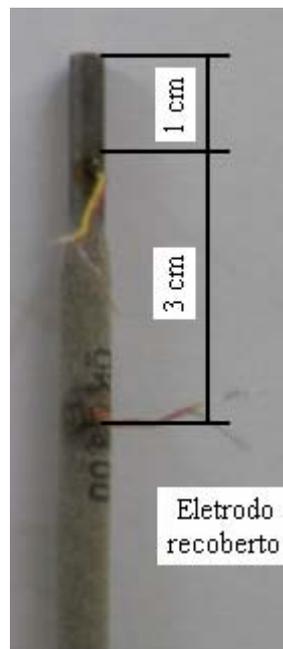
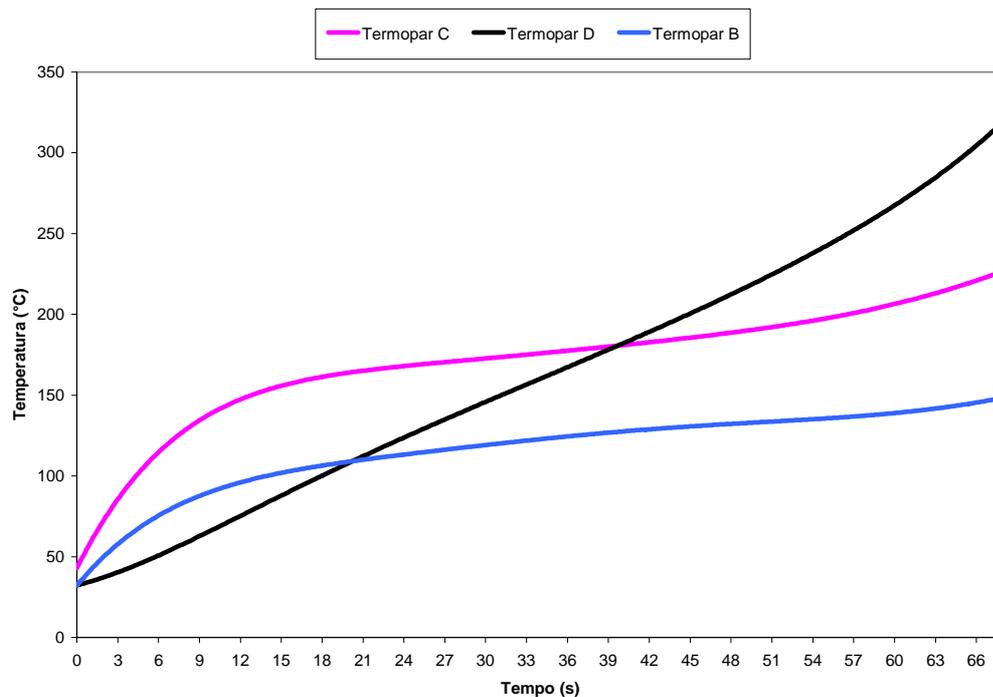


FIG. 4.2: Localização dos termopares no eletrodo.

As temperaturas foram medidas como função do tempo durante 10 soldagens, também realizadas por um soldador qualificado. Como na primeira batelada, entre a execução das soldagens aguardou-se o resfriamento da garra para garantir que sua temperatura não influenciasse no processo de medição.

Também foi verificado um comportamento regular da temperatura medida, tanto nos eletrodos como na garra.

O gráfico abaixo (GRA. 4.2) mostra o comportamento da temperatura dos três termopares ao longo do tempo, para um dos testes realizados, sendo que os termopares B e C estão posicionados no mesmo local da primeira batelada de testes e o termopar D está posicionado na região revestida dos eletrodos, como mostrado na figura acima. Como nos resultados obtidos anteriormente, as curvas apresentaram uma repetibilidade adequada.



GRA. 4.2 - Resultados.

Observa-se que a temperatura medida na região revestida do eletrodo aumenta de forma aproximadamente linear até por volta de 60 segundos. De acordo com Felizardo (2003), para alguns tipos e diâmetros do revestimento, o mesmo pode funcionar como isolante térmico, razão pela qual a temperatura da região revestida não se estabiliza, como a temperatura da região não revestida. Após 60 segundos de soldagem, a frente de fusão se aproxima do ponto de contato do termopar e a alma do eletrodo sofre um aumento da temperatura devido ao calor produzido pelo arco elétrico. Observa-se, ainda, que no início da soldagem, a temperatura da região não revestida sofre um aumento maior que a da região revestida. Isso pode ser atribuído à perda de calor devido à decomposição dos ingredientes do revestimento [Smith and Van Ness, 1975], que não acontece na região não revestida.

Devido a perdas de calor tanto para o ambiente como para o porta-eletrodo, a temperatura da região não revestida começa a se estabilizar após aproximadamente 20 segundos e sofre um aumento lento até 30 segundos, devido ao equilíbrio entre o calor gerado por efeito Joule e o calor perdido para o ambiente. Após $t=30$ segundos, essa temperatura passa a sofrer um aumento gradual devido ao calor recebido da região revestida, que, como pode ser observado, ultrapassa a temperatura da região não revestida.

Finalmente, pode-se observar que o comportamento da temperatura medida na garra é o mesmo da temperatura da região não revestida, com uma diferença atribuída ao fato de que o termopar que mede a temperatura da região não revestida estar soldado ao eletrodo, possuindo um contato íntimo com o mesmo, ao contrário do termopar da garra, que possui um contato menos eficiente com o eletrodo.

Ao se comparar as curvas obtidas na primeira batelada de testes e na segunda, pode-se observar que as temperaturas medidas tanto na castanha como na região não revestida do eletrodo foram maiores na segunda batelada do que as obtidas na primeira batelada. Estima-se que este fato tenha ocorrido devido à diferenças ambientais entre as semanas nas quais foram executadas a primeira e segunda batelada de testes. Além disso, o processo repetitivo de aquecimento e resfriamento do mandril pode ter mudado alguma de suas propriedades microestruturais, afetando e interferindo no processo de medição de temperatura.

4.2 Testes de acionamento

Os testes realizados com o *mandril 2* tiveram como intuito analisar o funcionamento do sistema como um todo, que é composto por:

- Mandril possuindo termopares incorporados;
- Sistema de fixação do mandril e de proteção do manipulador contra correntes reversas;
- Motor de corrente contínua com chave de mandril soldada no eixo;
- Sistema de acoplamento do motor no manipulador e de proteção do sistema de aquisição contra correntes reversas;
- Sistema de alimentação do motor, composto pelo circuito de acionamento, sendo devidamente alimentado pela fonte de corrente contínua e pelos sinais do controlador do manipulador e
- Manipulador e controlador.

A corrente do motor de acionamento, fornecida pela fonte retificadora, foi de 4,5 Amperes, mantendo-se dentro da faixa especificada pelo fabricante do motor. Como dito anteriormente, a abertura da garra foi temporizada através do controlador do robô, impedindo a extração do sensor durante seu processo de abertura. O tempo de abertura do mandril, medido experimentalmente, é de 11 segundos.

Os quadros abaixo mostram as etapas executadas pelo manipulador e sistema da garra durante o teste:



FIG 4.3 - Posição inicial do Manipulador – Mandril fechado.



FIG 4.4 - Posição intermediária do Manipulador – Mandril aberto.



FIG 4.5 - Posição intermediária do Manipulador – Mandril fechado e segurando o eletrodo.



FIG 4.6 - Posição intermediária do Manipulador – Mandril segurando o eletrodo e retornando à posição inicial.



FIG 4.7 - Posição final do Manipulador – Mandril segurando o eletrodo.

5 CONCLUSÕES

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de uma garra instrumentada. A garra é composta por um atuador, sistema de acionamento automático e instrumentação embarcada, permitindo a monitoração e aquisição de dados de temperatura.

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que o protótipo de garra se comportou de maneira eficiente, e poderá ser utilizado na robotização do processo de soldagem com eletrodo revestido. Para tal, será necessário um estudo mais detalhado do sistema construído, de maneira a se compreender quais são os aspectos mecânicos e robóticos a serem trabalhados para se obter um sistema robusto.

Os resultados de medição de temperatura durante os testes com o *mandril 1* mostraram que a temperatura medida na garra pode ser utilizada para se obter a temperatura da região não revestida do eletrodo e, conseqüentemente, através de modelos matemáticos, calcular a taxa de fusão instantânea. Ou seja, os termopares inseridos na garra poderão ser utilizados na aquisição de dados de temperatura do eletrodo revestido durante o processo de soldagem, permitindo o ajuste em tempo real das velocidades do manipulador robótico. Não se observa uma relação direta entre a temperatura medida na garra e a medida na região revestida do eletrodo, que não se conduz de uma maneira “bem-comportada”. Essa relação deverá ser estudada através de modelos matemáticos, para que se possa utilizar a garra instrumentada para inferir a temperatura instantânea do eletrodo.

6 TRABALHOS FUTUROS

A inferência da velocidade de mergulho através da determinação da temperatura do eletrodo e determinação da taxa de fusão deverá provocar variações muito grandes nas juntas soldadas, pois o comprimento do arco será muito sensível a erros e variações no modelo, que não será capaz de se ajustar de acordo com as condições atuais (instantâneas). Deste modo, a robotização do processo SMAW poderia ser feita através de um modelo que pudesse ter, como entrada, a tensão atual sobre o arco, que é um resultado obtido através da monitoração da temperatura e determinação da taxa de fusão e velocidade de avanço. Contudo, a tensão sobre o arco não pode ser medida diretamente. O que se consegue, com a tecnologia atual, é medir e controlar a queda de tensão entre os bornes da alimentação do manipulador.

A diferença de potencial nos bornes é a soma das quedas de tensão nos cabos, no eletrodo revestido e no arco elétrico. Se, para o controle do movimento do manipulador for considerada apenas a tensão de alimentação, ocorre um gradual afastamento do arco em relação à peça. Isso porque, com o passar do tempo, ocorre o aquecimento do eletrodo devido ao efeito Joule e a diminuição do comprimento do eletrodo, causando a redução da tensão sobre o eletrodo. Como a tensão de alimentação é mantida constante pelo controlador, o manipulador afasta o eletrodo da peça e aumenta o comprimento do arco.

Para compensar esse efeito, sugere-se implementar um modelo da queda de tensão sobre o eletrodo. Como a resistividade do material é função da temperatura, os resultados da determinação da temperatura com a utilização da garra instrumentada podem ser utilizados no cálculo da resistividade em tempo real.

Além de um modelo de queda de tensão sobre o eletrodo, seria importante compreender os ciclos térmicos que ocorrem no mandril durante as soldas, de maneira a tornar possível a verificação da influência destes ciclos no modelo de temperatura no eletrodo.

Deste modo, pode se compensar, através do controlador do manipulador, o aumento do comprimento do arco e a influência dos ciclos térmicos sobre a garra, permitindo uma soldagem robotizada eficiente, tanto em relação à produtividade, quanto em relação à qualidade e repetibilidade das soldas.

Em relação ao protótipo de garra, é de fundamental importância analisar todos os aspectos mecânicos e robóticos envolvidos no sistema, tais como: desenhos e

dimensionamento do sistema, análise cinemática e estática, redução total, velocidade de abertura e fechamento do mandril, rigidez do sistema; sistemas de coordenadas de referência, matrizes de transformação homogêneas, erros de posicionamento, sistema de alimentação de eletrodos e intercambialidade, respectivamente.

ABSTRACT

The robotization of the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) would led greate advantages in relation to the weld quality and repeability attained through the process. However, there is some difficults to promote the process robotization. The main problem is the variation of the electrode melting rate during the execution of a weld. This variation occurs due to the electrode heating by Joule effect, provoked by the constant current flow. Thus, the knowledge of the melting rate behavior is important to promote the robotization of the process, since manipulator's velocities are function of this behavior. The maintenance of a constant diving would led to an inhomogenuos joint (Bracarense, 1994). This work describes the development of a robotic gripper prototype, with connected thermocouples in the contact points with the electrode. The sensors are connected to a data acquisition system, allowing the monitoration of the temperature during weld. The experimental tests and the experimental temperature modelation are also presented.

Key-words: robotization, SMAW, gripper.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ABM, “Soldagem”, São Paulo, Brasil, 1979, 720 p.
- 2 BRACARENSE, A. Q.; LIU, S., “Chemical Composition and Hardness Control by Endothermic Reactions in the coating of Covered Electrodes”, *Welding Journal*, Vol. 76, N° 12, pp. 509- 516, 1997.
- 3 BRACARENSE, A. Q.; LIU, S., “Chemical Composition Variations in Shielded Metal arc Welds”, *Welding Research Supplement*, 1993, pp. 529- 536.
- 4 BRACARENSE, A. Q.; LIU, S., “Control of Covered Electrode heating by Flux Ingredients Substitution”, *Welding and metal Fabrication*, Vol. 62, N° 5, pp. 224 - 229, 1994.
- 5 CAMARANO, D. M., “Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos”, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina*, Florianópolis, 1993.
- 6 CHELPANOV, I. B.; S. N. KOLPASHNIKOV, “Problems with the Mechanics of Industrial Robot Grippers”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, n. 4, 1983, pp. 295- 299.
- 7 CORTINA, P.; “Solid Wire vs. Metal Cored Wire: Which Should be Used to Optimize the Robotic Process?” *Welding Journal*, Maio de 2005, pp. 30-32.
- 8 COUTINHO, J. A., “Estudo dos Efeitos do Aquecimento do Eletrodo Revestido Durante a Soldagem de Aços Inoxidáveis Austeníticos”, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte*, 1998.

- 9 DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNEL, K. G., "Instrumentation for Engineering Measurements", Ed. John Wiley & Sons, New York, 1993, 584p.
- 10 DANTAS, C. M.; LIMA II, E. J.; BRACARENSE, A. Q., "Development of an Instrumented Gripper to Robotic Shielded Arc Welding", COBEM 2005, Ouro Preto, 2005.
- 11 DRAPINSKI, J., "Elementos de soldagem: Manual Prático de Oficina", Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1979, 280p.
- 12 FELIZARDO, IVANILZA, "Estudo Experimental e Numérico do Aquecimento de Eletrodos Revestidos Durante a Soldagem", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2003.
- 13 HOWE, R. D.; POPP, N.; AKELLA, P.; KAO, I.; CUTKOSKY, M. R., "Grasping, Manipulation, and Control with Tactile Sensing", IEEE, 1990, pp. 1258- 1263.
- 14 JACKSON, C. E., "Fluxes and Slags in Welding", WRC Bulletin 190, Welding Research Council, N. Y., Vol. 73, pp. 1- 25, Dezembro de 1973.
- 15 JUERS, R. H., "Naval Surface Welfare Center", Welding Brazing and Soldering, ASM Handbook, 1993.
- 16 KANG, Daein, "Development of an Arc Voltage Mechanism for Underwater Wet SMAW Process", Dissertação de Mestrado, The Ohio State University, Columbus, 1996.
- 17 LIMA II, E. J., "Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2006.
- 18 MARQUES, P. V. (coord.), "Tecnologia da Soldagem", Ed. O Lutador, Belo Horizonte, 1991, 352p.

- 19 MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., “Soldagem – Fundamentos e Tecnologia”, Ed. UFMG, 2005, 362p.
- 20 MERRIFIELD, T., “Guidelines for Implementing Robotic Arc Welding”, Welding Journal, Abril de 2005, pp. 34- 37.
- 21 Metals Handbook – “Properties and selection: Irons and Steels”, ASM International, Materials Park, Ohio, Vol. 1, 1978.
- 22 MICHALSKI, L.; ECKERSDORF, K.; MCGHEE, J., “Temperature Measurement”, Ed. John Wiley & Sons - Wiley Series in Measurement Science and Technology, 1991, 514p.
- 23 OLIVEIRA, H. B., “Estudo e Implementação de um Sistema para Monitoração e Controle na Soldagem Robotizada com Eletrodo Revestido”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2000.
- 24 PESSOA, E. C. P., “Estudo Comparativo do Desempenho de Eletrodos Comerciais E6013, E7018 e E7024 em Ambiente Molhado”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2003.
- 25 QUINN, T. P.; BRACARENSE, A. Q.; LIU, S., “A Melting rate and Temperature Distribution Model for Shielded Metal Arc Welding Electrodes”, Welding Research Supplement, 1997, pp. 532- 538.
- 26 ROSENTHAL, D., “Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting”, Welding Journal, pg. 230-233, 1941.
- 27 RUPP, A.; VELASTIN, S. A., “A Gripper and Sensor System for Controlled Slip and Force”, IEEE, 1994, pp. 329- 334.

- 28 SALIBA, M.; DE SILVA, C. W., “An Innovative Robotic Gripper for Grasping and Handling Research”, IEEE, 1991, pp. 975- 979.
- 29 SMITH J. M. and VAN NESS, H. C., “Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics”, McGraw-Hill, New York, 1975, pp. 116-132.
- 30 TER BERG, J. and LARIGALDIE, A., “ Melting Rate of Coating Electrodes”, Welding Journal, Vol. 32, No. 5, 1952, pp. 268-271.
- 31 TLALE, N.S., MAYOR, R., BRIGHT, G., “Intelligent Gripper Using Low Cost Industrial Sensors”, IEEE, 1998, pp.415-419.
- 32 VILLAFUERTE, J., “Advances in Robotic welding Technology”, Welding Journal, Janeiro de 2005, pp. 28- 33.
- 33 WASZINK, J.H. and PIENA, M.J., “Thermal Process in Covered Electrode”, Welding Journal, Vol. 64, No. 2, 1985, pp. 37-48.
- 34 WELDING HANDBOOK, “Welding Process”, American Welding Society (AWS), Eight Edition, Vol. 2, 1991.
- 35 WILSON, J.L., CLAUSSEN, G.E. AND JACKSON, C.E., “Effect of I^2R Heating on Electrode Melt Rate”, Welding Journal, Vol.35, No. 1, 1956, pp. 1-8.

ANEXO A

A seguir são apresentadas as descrições das funções de aquisição de dados fornecidas em conjunto com a placa PCI 1202. Elas foram utilizadas juntamente com as funções da biblioteca do programa LabVIEW, para a execução do programa de monitoramento e captura de dados relativos à temperatura do eletrodo revestido.

A.1. P1202 DriverInit

Descrição: esta função “apaga” todas as outras placas instaladas no sistema, e deve ser sempre chamada antes das outras funções serem chamadas.

Sintaxe:

WORD P1202_DriverInit(WORD *wTotalBoard);

Parâmetros:

*wTotalBoard :[Saída] Endereço que armazena a quantidade de placas encontradas no sistema.

WTotalBoard: quantidade de placas encontradas no sistema.

Valor Retornado:

NoError: OK.

NoFoundBoard: não foram detectadas placas PCI-1202.

FindBoardError: erro de verificação durante o *handshak*.

DriverHandleError: abre janela indicando erro.

DriverCallError: retorna o valor do erro.

A.2. P1202 ActiveBoard

Descrição: essa função ativa uma das placas instaladas no sistema. Deve ser chamada uma vez antes de funções do tipo D/I/O, A/D e D/A serem chamadas.

Sintaxe:

WORD P1202_ActiveBoard(WORD wBoardNo);

Parâmetro:

wBoardNo: número da placa.

Retorna:

NoError : OK.

ExceedBoardError: número da placa é inválido.

A.3. P1202 GetConfigAddressSpace

Descrição: Captura o endereço de I/O da placa PCI-1202 de número n. Esta função é utilizada para depuração do sistema e não precisa ser chamada.

Sintaxe:

WORD P1202_GetConfigAddressSpace(WORD wBoardNo, WORD *wAddrTimer, WORD *wAddrCtrl, WORD *wAddrDio, WORD *wAddrAdda);

Parâmetros:

wBoardNo: número da placa PCI-1202.

wAddrTimer, wAddrCtrl, wAddrDio, wAddrAdda: parâmetros avançados do sistema.

Retorna:

NoError: OK.

FindBoardError: verifica erro.

ExceedBoardError: wBoardNo inválido.

A.4. P1202 Card0 StartScan

Descrição: essa função inicia as funções da aquisição contínua da placa.

Sintaxe:

WORD P1202_Card0_StartScan(WORD wSampleRateDiv, WORD wChannelStatus[], WORD wChanelConfig[], WORD wCycles);

Parâmetros:

wSampleRateDiv :[Entrada] **taxa de amostragem AD = 8M/wSampleRateDiv.**

wSampleRateDiv=800 (sampling rate=8M/800=100K).

wChannelStatus[] :[Entrada] (0=no scan, 1=scan) para cada canal.

wChannelConfig[] :[Entrada] código de configuração para cada canal.

wCycles:[Entrada] Número de ciclos de operação A/D para cada canal observado. É utilizado para computar o número de dados e usado para checar se os dados requisitados estão “prontos” ou não. Número de dados requisitados = wCycles * TotalChannels

Retorna:

NoError : OK

FindBoardError : a placa PCI-1202 não foi detectada.

AdControllerError: função avançada do sistema.

A.5. P1202 Card0 Stop

Descrição: Esta subrotina para a operação de captura continua e para a sequência de instruções paralelas.

Sintaxe:

void P1202_Card0_Stop(void);

Parâmetros:

(Nenhum)

Retorna:

NoError : OK

StopError: Pare a mensagem de erro (stop Error)

A.6. P1202 Card0 ReadStatus

Descrição: esta subrotina pega o status e dados da função de captura continua. Esta subrotina não bloqueia o programa enquanto pega o status.

Sintaxe:

```
P1202_Card0_ReadStatus(WORD wBuf[], WORD wBuf2[], DWORD *dwP1,  
DWORD *dwP2, WORD *wStatus);
```

Parâmetros:

wBuf[] :[Saída] Endereço do buffer que armazena os dados em ordem sequencial (012...N012...N.....012...N)



wBuf2[] :[Saída] Endereço do buffer que armazena os dados que estão na ordem sequencial por canal (00000.....11111.....22222.....NNNNN.....)



*dwP1 :[Entrada/ Saída] Endereço do dwP1, reservado para uso interno.

*dwP2 :[Entrada/ Saída] Endereço do dwP2, reservado para uso interno.

*wStatus :[Saída] 1=inicia instruções, 2=TimeOut, 8=FIFO overflow, 0x80= final das instruções

Retorna:

0: dado disponível

1: dado não disponível

A.7. P1202 DriverClose

Descrição: retorna todas as fontes do sistema. Esta função deve ser chamada antes do programa ser finalizado.

Sintaxe:

```
void P1202_DriverClose(void);
```

Parâmetros:

(Nenhum)

Retorna:

(Nenhum)