

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA USO
EM SOLDAGEM ORBITAL**

Por,
Klexyuz Vinicius Lourenço Garcia
João Augusto Martins de Santana

Brasília, Fevereiro de 2015



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA USO
EM SOLDAGEM ORBITAL**

POR,

**Klexyuz Vinicius Lourenço Garcia
João Augusto Martins de Santana**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho,
UnB/ ENM (Orientador)

Prof., Walter de Britto Vidal Filho
UnB/ ENM

Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero,
UnB/ ENM

Brasília, Fevereiro de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

GARCIA, KLEXYUZ VINÍCIUS LOURENÇO
SANTANA, JOÃO AUGUSTO MARTINS DE
Construção de uma bancada para uso em soldagem orbital

[Distrito Federal] 2014.

xiii, 74p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2014).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1.Bancada
3.Soldagem Orbital

2.GMAW
4.Controle

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Construção de uma Bancada para uso em
Soldagem Orbital

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GARCIA, K. V. L., SANTANA, J. A. M. (2014). Construção de uma bancada para uso em soldagem orbital. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 22, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 74p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Klexyuz Vinicius Lourenço Garcia e João Augusto Martins de Santana.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Construção de uma bancada para uso em soldagem orbital

GRAU: Engenheiro de Controle e Automação

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Klexyuz Vinicius Lourenço Garcia
SCLRN 703 Bl. F Entrada 44 – Asa Norte.
70730-516 Brasília – DF – Brasil.

João Augusto Martins de Santana
Altiplano Leste, Chácara Interlagos, número 02
71617-991 Brasília – DF – Brasil.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a modelagem, projeto e confecção de uma bancada para a soldagem orbital automatizada usada para fins didáticos e de pesquisa. São apresentados todos os equipamentos, circuitos e especificações que compõem a bancada, além de dados para fazer um projeto diferente deste. A parte de automação da bancada conta com sensores e um controle por computador usando o software LabView, os softwares e os sensores usados também são apresentados e explicados. Ao final do trabalho é apresentada a bancada que foi implementada.

Palavras Chave: Projeto, Bancada, Soldagem Orbital Automatizada, Controle.

ABSTRACT

This work presents the modeling, design and fabrication of a bench for automated orbital welding used for educational and research purposes. Lists all equipment, circuits, and specifications, which make up the bench and data to make a project different of this. The bench automation has sensors and a computer control using LabView software, the software and sensors used are also presented and explained. Finally, the paper presents the bench that was made.

Keywords: Design, Workbench, Automated Orbital Welding, Control.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 SOLDAGEM	1
1.1.1 Automação da Soldagem	1
1.1.2 Soldagem Orbital	2
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
1.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO PROJETO DA BANCADA	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 DIFERENÇAS ENTRE SOLDAGEM NORMAL E SOLDAGEM ORBITAL	5
2.2 POSIÇÕES DE SOLDAGEM	7
2.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM	10
2.3.1 Fonte de Energia	11
2.3.2 Fontes Térmicas	12
2.3.3 Carregamento Mecânico	13
2.3.4 Proteção	13
2.4 BANCADA DE SOLDAGEM ORBITAL	16
2.5 ESTADO DA ARTE	19
2.5.1 Rotacionador	19
2.5.2 Mesa Posicionadora	21
2.5.3 Cabeças de Soldagem	23
CAPÍTULO 3 – CONCEPÇÃO DA BANCADA	26
3.1 ESPECIFICAÇÕES DA BANCADA	26
3.1.1 Dimensões da Bancada	26
3.1 SISTEMAS DA BANCADA	27
3.2 SISTEMA DE FIXAÇÃO	27
3.3 SISTEMA DE SOLDAGEM	29
3.4 SISTEMA DE CONTROLE	30
3.5 SISTEMA DE ALINHAMENTO	31
CAPÍTULO 4 – PROJETO DA BANCADA PROPOSTA	32
4.1 SISTEMA DE FIXAÇÃO	32
4.1.1 Motor e Caixa de Redução do Disco de Fixação	32

4.1.2	Disco de Fixação.....	36
4.1.3	Caixa de Fixação	37
4.1.2	A Base de Fixação	40
4.2	SISTEMA DE SOLDAGEM	43
4.2.1	ROB 5000 ROBOT INTERFACE.....	44
4.3	SISTEMA DE CONTROLE	46
4.3.1	USB N6009.....	46
4.3.2	Placa de Condicionamento de Sinais	48
4.3.3	Programa de controle – LabVIEW	50
4.3.4	Medição de Velocidade e Posição	60
CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS		63
5.1	SISTEMA DE FIXAÇÃO.....	63
5.2	CALIBRAÇÃO.....	65
5.3	TESTES.....	66
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO		71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Soldagem Orbital Manual e Mecanizada [7]	2
Figura 2.1. Ângulo de ataque α e ângulo de posição de soldagem ϕ . [7]	5
Figura 2.2. Força gravitacional (a) Visão geral, (b) Sentido da força segundo a posição de soldagem ϕ [7].....	6
Figura 2.3. Experimento exploratório sem regulação de parâmetros [7]	6
Figura 2.4. Posição Plana: A) PA/1G, B) PA/1F, C) PA/1G e D) PA/1G	7
Figura 2.5. Posição Horizontal: A) PC/2F B) PC/2G, C) PC/2G e D) PC/2G.....	7
Figura 2.6. Posição Horizontal Vertical: A) PB/2FR, B) PB/2F e C) PB/2F	7
Figura 2.7. Posição Vertical Descendente: A) PG/3G, B) PG/3F e C) PG/3G.....	8
Figura 2.8. Posição Vertical Ascendente: A) PF/3G, B) PF/3F e C) PF/3G.....	8
Figura 2.9. Posição Vertical Sobre Cabeça: A) PD/4F, B) PD/4F.....	8
Figura 2.10. Posição Sobre Cabeça: A) PE/4F, B) PE/4G, C) PE/4F e D) PE/4G	8
Figura 2.11. Posição Sobre Cabeça: A) PH/5F e B) PH/5G	8
Figura 2.12. Posição Sobre Cabeça: A) PJ/5F e B) PJ/5G	9
Figura 2.13. Posição Sobre Cabeça: A) PK/5F e B) PK/5G	9
Figura 2.14. Posição Sobre Cabeça: A) PK-L045/6F e B) PK-L045/6G.....	9
Figura 2.15. Posição Sobre Cabeça: A) PH-L045/6F e B) PH-L045/6G.....	9
Figura 2.16. Posição Sobre Cabeça: A) PJ-L045/6F e B) PJ-L045/6G	10
Figura 2.17. Gráfico de Classificação da Soldagem por Fusão [13].....	11
Figura 2.18. Diagrama: Electroslag welding (ESW).....	12
Figura 2.19. Diagrama: Flux-Cored Arc Welding (FCAW)	14
Figura 2.20. Diagrama: Flux-Cored Arc Welding (FCAW)	14
Figura 2.21. Diagrama: Submerged Arc Welding (SAW)	14
Figura 2.22. Diagrama: Gas Metal Arc Welding (GMAW)	15
Figura 2.23. Quadro de classificação de processos de soldagem.....	16
Figura 2.24. Planta experimental de trajetória circular – Vista Frontal[7]	17
Figura 2.25. Planta experimental de trajetória circular – Vista Lateral [7].....	17
Figura 2.26. Sistema de Alinhamento Angulável.	18
Figura 2.27. BODE rotacionadores convencionais – CR100 [15]	19
Figura 2.28. BODE rotacionadores convencionais - CR.10.000 [15].....	20
Figura 2.29. BODE rotacionadores autoalinháveis – SAR 2000 [16]	20
Figura 2.30. BODE rotacionadores autoalinháveis – SAR 5000 [16]	20

Figura 2.31. ProArc rotacionadores [17].....	20
Figura 2.32. Red Rock rotacionadores [18]	21
Figura 2.33. BODE Posicionadores Convencionais – 5. VH/A [19].....	21
Figura 2.34. BODE Posicionadores Convencionais – 20. VH/A [19].....	21
Figura 2.35. ProArc mesas posicionadores [17]	22
Figura 2.36. ProArc posicionador cabeçote-contraponta [20]	22
Figura 2.37. ProArc E.Z. Arc System [17].....	22
Figura 2.38. BODE Posicionador Especial – VP.100 [19]	23
Figura 2.39. Lincoln Electric - APEX™ 2100 [21]	24
Figura 2.40. Lincoln Electric - APEX™ 2100 – trilho do robô [21]	24
Figura 2.41. Liburdi Dimetrics cabeça de soldagem [22]	24
Figura 2.42. Arc Machines, Inc - Cabeças De Soldagem [23].....	24
Figura 2.43. Arc Machines, Inc - Cabeça De Soldagem Interna [24]	25
Figura 3.1. ProArc mesas posicionadoras (adaptada) [17].....	26
Figura 3.2. Sistemas da Bancada de Soldagem Orbital.....	27
Figura 3.3. Sistema de Fixação montado	28
Figura 3.4. Caixa de Fixação.....	28
Figura 3.5. Sistema de Giro da Tocha (sem o Disco de Fixação): Motor (em verde), Caixa de Redução (em cinza) e Placa de Fixação (em branco).....	28
Figura 3.6. Sistema de Giro da Tocha.	29
Figura 3.7. Base de Fixação.	29
Figura 3.8. Sistema de Soldagem – Fonte de Soldagem	30
Figura 3.9. Sistema de Controle – Diagrama de Conexões.....	30
Figura 3.10. Sistema de Alinhamento	31
Figura 3.11. Sistemas de Fixação e Alinhamento conectados	31
Figura 4.1. Motor e Caixa de Redução do Disco de Sustentação	32
Figura 4.2. Motor e Caixa de Redução do Disco de Sustentação	32
Figura 4.3. Inversor de Frequência CFW 08 da WEG	34
Figura 4.4. Posições de um objeto fixado no disco.....	36
Figura 4.5. Disco de Fixação de frente e conexão com a caixa de redução.....	36
Figura 4.6. Disco de Fixação – detalhes de suporte.....	37
Figura 4.7. Adaptador e fixador da tocha.....	37
Figura 4.8. Sistema de coordenadas da Caixa de Fixação.	38
Figura 4.9. Caixa de Fixação.....	39

Figura 4.10. Caixa de Fixação Vistas: A) Frontal, B) Posterior e C) Lateral	39
Figura 4.11. Caixa de Fixação - posição de estabilidade	40
Figura 4.12. Projeto da Base de Fixação	41
Figura 4.13. Projeto da Base de Fixação	41
Figura 4.14. Sistema de Fixação	42
Figura 4.15. Sistema de Fixação Vistas: A) Frontal e B) Lateral	43
Figura 4.16. Fonte TransPuls Synergic 5000	44
Figura 4.17. ROBOT INTERFACE 5000.....	44
Figura 4.18. USB N6009.....	46
Figura 4.19. USB N6009 - Montagem [32]	47
Figura 4.20. USB N6009 - Pinagem [32].....	47
Figura 4.21. Módulo De Entrada Digital.....	49
Figura 4.22. Módulo De Saída Digital	49
Figura 4.23. Módulo De Saída Analógica.....	50
Figura 4.24. Painel Frontal.....	51
Figura 4.25. Módulo de Configuração do Sistema – Portas1.....	52
Figura 4.26. Módulo de Estatísticas do Processo.....	53
Figura 4.27. Display de ângulo	53
Figura 4.28. Display Velocidade de Rotação	54
Figura 4.29. Estrutura “flat sequence”	54
Figura 4.30. Interface Diagrama de Blocos.....	55
Figura 4.31. Diagrama de Blocos – Primeiro Estágio.....	56
Figura 4.32. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio.....	56
Figura 4.33. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Matriz de Dados.	57
Figura 4.34. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Leitura da Corrente de Solda.....	58
Figura 4.35. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Escrita da Velocidade do Arame.....	58
Figura 4.36. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Cálculo do Tempo de Soldagem.	58
Figura 4.37. Diagrama de Blocos – Terceiro Estágio.	59
Figura 4.38. Esquemático do Programa de LabView.....	60
Figura 4.39. Potenciômetro – Desacoplado Sobre a Mesa.....	61
Figura 4.40. Potenciômetro – Acoplado à Bancada	61
Figura 4.41. Encoder	61
Figura 4.42. Funcionamento do Potenciômetro.	62
Figura 5.1. Alterações no Sistema de fixação.	63

Figuras 5.2. Sistema de Fixação – Chapa de Fixação.	64
Figuras 5.3. Sistema de Fixação –Parte Inferior da Base.	64
Figuras 5.4. Sistema de Fixação – Posição de Estabilidade.	64
Figuras 5.5. Sistema de Fixação – Posição de Trabalho.	64
Figuras 5.6. Novo Painel Frontal – Detalhe de Sentido de Rotação e Botão de Reset.	67
Figuras 5.7. Novo Painel Frontal.	68
Figuras 5.8. Novo Diagrama de Blocos.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Tabela de parâmetros do motor	33
Tabela 4.2. Parâmetros para dimensionamento da Caixa de Fixação	38
Tabela 4.3. Propriedades mecânicas do aço SAE 1010	40
Tabela 4.4. ROB 5000 – Entradas Digitais	45
Tabela 4.5. ROB 5000 – Entradas Analógicas	45
Tabela 4.6. ROB 5000 – Saídas Digitais.....	45
Tabela 4.7 ROB 5000 – Saídas Analógicas	45
Tabela 4.8. USB N6009 - Pinagem	47
Tabela 4.9. ROB 5000 – Sinais de Entrada.....	51
Tabela 5.1. Dados Colhidos para a Medição da Velocidade do Motor.....	65
Tabela 5.2. Velocidade de Rotação do Disco.....	65
Tabela 5.3. Tensão do Potenciômetro por Volta	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a	aceleração tangencial	[m/s ²]
C	torque do motor	[Nm]
C2	torque do motor para o rendimento η_2	[Nm]
C3	torque do motor à 10% da velocidade	[Nm]
CP	base de medida para o alongamento	[mm]
d	distância do centro de massa do equipamento fixado no disco ao centro dele	[m]
Δe	alongamento	[%]
F	força eletromagnética do arco elétrico	[N]
g	força gravitacional	[N]
I	corrente de linha do motor	[A]
J	momento de inércia do disco com equipamentos acoplados	[kgm ²]
LE	limite de escoamento	[MPa]
LR	limite de resistência	[MPa]
M	massa do disco	[kg]
m	massa dos equipamentos acoplados ao disco	[kg]
n	velocidade de rotação do motor	[rpm]
PA	potência ativa do motor	[kW]
Pi	potência do inversor de frequência	[kW]
Pm	potência do motor	[kW]
r	raio do disco de sustentação	[m]
rt	raio do tubo soldado	[m]
T	torque do equipamento acoplado ao disco	[Nm]
t	tempo	[s]
T1	tensão de cisalhamento na base de fixação	[N/m ²]
T2	tensão de cisalhamento na caixa de fixação	[N/m ²]
U	tensão de linha do motor	[V]
v	velocidade de soldagem	[m/s]

Símbolos Gregos

γ	aceleração angular	[rad/s ²]
η	rendimento	[%]
η_2	rendimento do motor com perdas do inversor	[%]
θ	ângulo do fator de potência	[°]

α	ângulo de ataque	[°]
φ	ângulo de posição de soldagem	[°]

Grupos Adimensionais

Red redução da caixa de redução

Siglas

ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BMAW	Bare Metal Arc Welding
CAW	Carbon Arc Welding
EGW	Electrogas Welding
EBW	Electron Beam Welding
ESW	Electroslag Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
FLOW	Flow Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
ISO	International Organization for Standardization
IW	Induction Welding
LBW	Laser Beam Welding
PAW	Plasma Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 SOLDAGEM

Soldagem é uma técnica usada para a junção de materiais, comumente metálicos, por meio de aquecimento. Esta técnica data de milhares de anos, quando se começaram a criar peças metálicas a partir da união de suas partes por meio de seu aquecimento usando processos como a brasagem ou a soldagem por forjamento. Porém os processos utilizados atualmente para a soldagem foram extremamente aperfeiçoados e hoje em dia pode-se dividi-los em diversas categorias baseadas em suas diferentes características. Independente do processo utilizado, o resultado da soldagem, ou seja, a união das partes metálicas, deve ser semelhante e, devido a isso, a escolha do processo é baseada principalmente no material a ser soldado. Modenesi, Marques e Santos [1] apresentam análises de diferentes definições de soldagem, umas mais amplas, outras incompletas. A definição mais ampla que diferencia soldagem de brasagem é: "Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas".

1.1.1 Automação da Soldagem

Diversos estudos apresentam motivos para se automatizar a soldagem, um dos principais é o ambiente perigoso que esta técnica gera. As regras para segurança na soldagem apresentadas pela Esab [2] e pela AWS [3] citam as diversas precauções que se deve cumprir antes mesmo de se iniciar o processo de soldagem. O aquecimento de metais é um procedimento perigoso e não deve ser realizado perto de pessoas inexperientes sem a devida supervisão, uma vez que o metal aquecido não possui uma diferença visível em relação ao metal não aquecido dependendo de sua temperatura. Além disso, diversas técnicas de soldagem apresentam perigos adicionais como brilho excessivo, gases inflamáveis e tóxicos e choques elétricos, o que reafirma a ideia de se automatizar a soldagem para evitar riscos às pessoas.

Segundo Silva [4], A automação da soldagem não representa a diminuição da oferta de empregos, mas sim um aumento da produtividade e da qualidade dos processos e uma redução dos riscos apresentados às pessoas envolvidas no processo. A automação visa tornar as empresas mais competitivas, por aumentar sua produção e qualidade. Além disso, a oferta de empregos é mantida, pois, mesmo automatizados, os processos de soldagem necessitam da supervisão de um operador. As linhas de pesquisa nessa área contribuem para a geração de recursos humanos especializados, com conhecimentos científico-tecnológicos, os quais cada vez mais propiciarão a agregação de valor aos produtos nacionais.

O trabalho apresentado no 3.º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás [5] apresenta um outro ponto de vista sobre as melhorias propiciadas pela automação da soldagem. Ele cita que as pesquisas na área da soldagem não buscam o aprimoramento dos processos, mas buscam afastar o soldador do ambiente de solda, por ser altamente agressivo. Os diversos riscos amplamente analisados pela Esab [2] contribuem para gerar este ambiente perigoso, mas, além disso, o soldador ainda realiza muitas tarefas: como ajustar parâmetro e variáveis de soldagem, controlar a qualidade do cordão de solda, guiar a pistola, etc. Este tipo de trabalho faz com que o soldador fique fadigado rapidamente e isto é uma das principais causas da baixa produtividade em procedimentos com solda manual. A regularidade exigida em soldagens retilíneas e curvilíneas no plano é difícil de ser alcançada com soldagem manual, pois o soldador, por mais experiente que seja, não consegue manter constante por um longo período, parâmetros importantes, como velocidade de soldagem, altura de arco, ângulo de ataque e posicionamento da pistola sobre a trajetória. O esforço repetitivo por ter que realizar diversos passes de solda é mais um motivo para a utilização da soldagem automatizada.

1.1.2 Soldagem Orbital

O nome Soldagem Orbital vem do movimento circular da ferramenta de soldagem ao redor da peça de trabalho [6]. Pode-se definir soldagem orbital como a técnica de soldagem de tubulações que demanda o movimento da tocha ao redor da junta a ser soldada [7]. Porém, é interessante diferenciar a soldagem orbital de uma soldagem com um movimento circunferencial e expandir a soldagem orbital para outras estruturas além de tubos, como cones e esferas. Dessa forma, pode-se definir soldagem orbital como a técnica utilizada para soldar peças de formatos cilíndricos, esféricos ou seus derivados de forma que durante o processo haja variações entre a posição da tocha e da superfície soldada de forma gradual. Essa denominação é empregada no inglês, onde a soldagem que se realiza rotacionando-se a peça e mantendo o arco estacionário é chamada de Stationary Welding e enquanto que a soldagem orbital, que desloca o arco de maneira a orbitar a peça, é chamada de Circular/Orbital/Girth Welding [8].



Figura 1.1. Soldagem Orbital Manual e Mecanizada [7]

Ao se tratar de soldagem orbital, novos problemas se criam, como a mudança de posição da tocha e da posição de soldagem durante o processo, isso será melhor abordado no capítulo 2. Por mais capacitados que sejam os soldadores, erros na solda são prováveis de acontecer e a ideia de se ter uma máquina programada de tal forma que sempre acerte é o grande foco na indústria.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A soldagem é uma técnica imprescindível no ramo da produção de equipamentos, prédios, veículos, etc., e, com a crescente industrialização de todos os ramos de produção, cada vez mais se percebe a necessidade de automatizar os processos de fabricação.

A soldagem de tubulações, cilindros, esferas, relaciona-se facilmente com soldagem orbital. A soldagem orbital apresenta um grande desafio para a automação, com a mudança dos parâmetros de posição durante o processo de soldagem, além das dificuldades e mudanças de parâmetros naturais de qualquer processo de soldagem, como velocidade de soldagem, altura de arco, ângulo de ataque e posicionamento da pistola. A mudança constante de posição de soldagem inevitavelmente acarreta numa perda da qualidade da soldagem das tubulações quando os parâmetros de soldagem são inadequados [7].

Outro desafio nesta área é a soldagem sem interrupção do fluxo nas tubulações, conhecida como soldagem em operação. A soldagem em operação é uma técnica frequentemente empregada no reparo ou modificação de tubulações devido às suas vantagens econômicas, pois evita as perdas oriundas da interrupção do serviço e garante a continuidade no fornecimento do fluido [9]. Quando se realiza uma soldagem em operação, há dois riscos principais a serem considerados: a perfuração quando o metal abaixo da poça de fusão, pelo aquecimento localizado, não consegue resistir à pressão interna do fluido e o surgimento de microestruturas duras na solda, geradas pelo resfriamento acelerado da solda como efeito do escoamento de calor provocado pelo fluido, que aumentam a susceptibilidade às trincas [10].

A motivação deste trabalho é o estudo de técnicas para a automação da soldagem orbital, considerando as dificuldades intrínsecas deste processo, o estudo de parâmetros que visam otimizar o método de soldagem e reduzir as chances de falhas e erros durante o processo.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento necessário para o estudo de processos de soldagem orbital e técnicas para a sua automação. Desta forma, é apresentado o projeto de uma bancada didática para ser utilizada no ensino de soldagem orbital e como objeto de estudo.

Além disso, objetiva-se que este trabalho possa ser usado como manual, a fim de que outras pessoas possam operar esta bancada. Dessa forma, são expostas todas as informações

necessárias para sua operação e, se necessário, a realização de reparos, alterações ou aperfeiçoamentos.

1.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO PROJETO DA BANCADA

Primeiramente apresentam-se as motivações para o projeto da bancada e, através delas, um esboço de como ela deve ser. A bancada será usada para fins didáticos ou de pesquisa e não para manufatura de tubulações e outras peças, logo ela deverá ser mais adaptável e controlável, além de precisar suportar uma carga de trabalho reduzida. Por ser adaptável, ela pode garantir certa liberdade de operação dentro da definição de soldagem orbital e pode ser utilizada em processos diferentes na soldagem. O fato de a bancada ser controlável indica que ela precisará ter muitos tipos de sensores e, por isso, processos difíceis de medir não serão a meta deste trabalho, mais à frente foi feita uma análise de processos e, ao final, se escolheu o processo GMAW. A bancada será utilizada para soldagem de pequenos tubos, sendo um aparato de pequeno porte, de forma que os cilindros de raio ou espessura muito grandes estão fora de questão. Por final, é necessário ter a liberdade de usar ou não adição de material e, como o processo GMAW caracteriza intrinsecamente uma adição de material, o processo GTAW foi escolhido para ser usado em soldagens sem adição.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta o projeto e construção de uma bancada de soldagem orbital de pequeno porte. O trabalho é dividido em 6 capítulos sendo eles: Capítulo 1 – Introdução, Capítulo 2 – Revisão da literatura, onde é feito um estudo mais detalhado sobre a soldagem orbital. Capítulo 3 – Concepção da Bancada, onde é apresentada a modelagem de toda a estrutura da bancada e os parâmetros utilizados como referência, Capítulo 4 – Projeto da Bancada Proposta, onde são descritas as especificações e a forma de utilizar cada componente da bancada, Capítulo 5 – Implementação e Resultados, onde é apresentado como ficaram a bancada e seus componentes, Capítulo 6 – Conclusão, onde são apresentados os resultados e a conclusão.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DIFERENÇAS ENTRE SOLDAGEM NORMAL E SOLDAGEM ORBITAL

Neste trabalho, é considerado soldagem normal todo tipo de soldagem que não se enquadra na definição de soldagem orbital apresentada no capítulo anterior. Enquanto na soldagem normal a posição de soldagem é definida no início da soldagem e mantida constante durante o processo, na soldagem orbital a posição da soldagem é definida pelo ângulo φ criado entre o plano vertical e o plano que está a ponta do eletrodo e o centro do tubo, em soldagens a arco elétrico. Para essa análise, é usado a ponta do eletrodo e não a tocha de soldagem, pois a tocha não fica perpendicular à tangente da circunferência do tubo durante a soldagem, ela faz um ângulo α com o plano citado. O ângulo φ é chamado de ângulo de posição de soldagem e o α de ângulo de ataque [7]. A Figura 2.1 ilustra esta disposição.

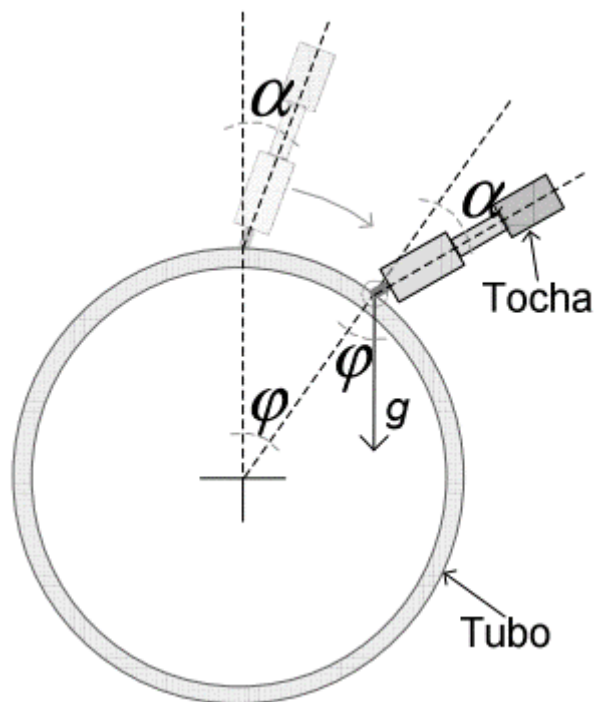


Figura 2.1. Ângulo de ataque α e ângulo de posição de soldagem φ . [7]

A variação do ângulo de soldagem altera a dinâmica das forças que afetam a gota de solda que está sendo adicionada à poça de solda. Esta variação da dinâmica é o principal fator que distingue a soldagem orbital da soldagem normal e, sem isso, mesmo que a tocha faça um movimento circunferencial ao redor da junta soldada, não há motivos para chamá-la de orbital. As duas principais forças que afetam a solda são a força eletromagnética do arco, F , e a força gravitacional, g . Para um ângulo de soldagem de 0° , estas forças são paralelas e de mesmo sentido, mas com o aumento de φ a direção da força eletromagnética muda, o que pode gerar certa instabilidade na solda. A Figura 2.2 ilustra esta situação.

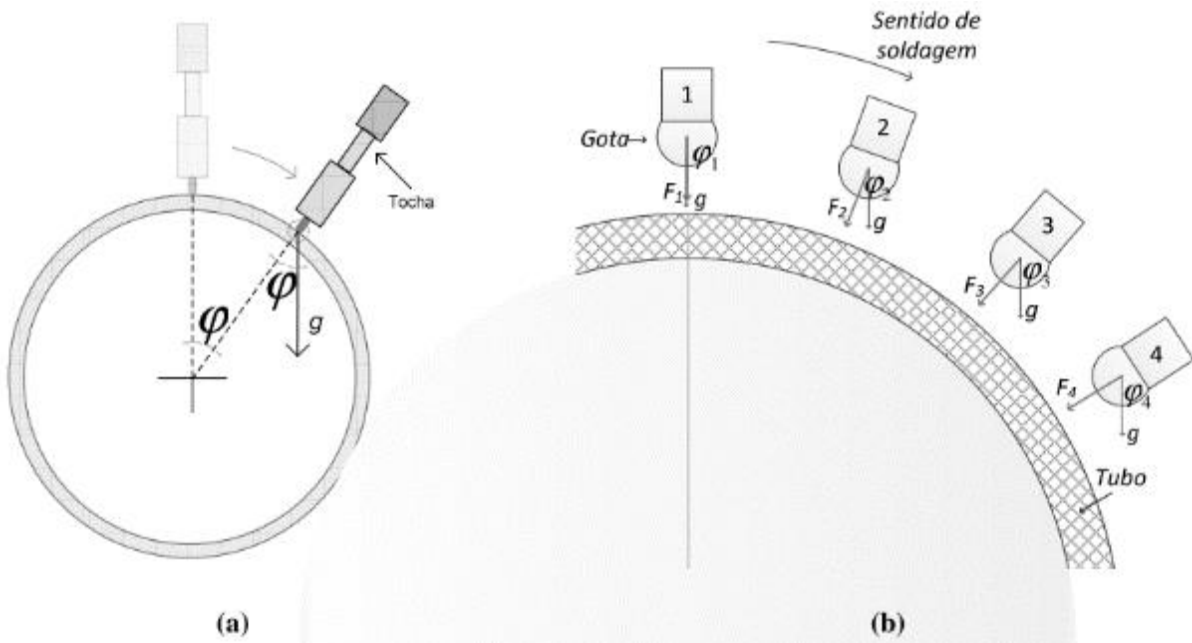


Figura 2.2. Força gravitacional (a) Visão geral, (b) Sentido da força segundo a posição de soldagem φ [7]

Além da gota, outro material que sofre grande influência dessas forças é a poça de fusão. A poça de fusão escorre durante a soldagem devido à força gravitacional e, principalmente por causa desse fenômeno, evitam-se soldagens orbitais ascendentes. A Figura 2.3 ilustra experimentos realizados tanto de forma ascendente quanto de forma descendente, as setas S_1 , S_2 e S_3 indicam o sentido da soldagem. Nota-se um grande prejuízo na soldagem ascendente pelo escoamento da solda e uma melhora considerável ao se realizar passes descendentes, apesar deles também apresentarem irregularidades e/ou escoamentos parciais na geometria da solda [7].

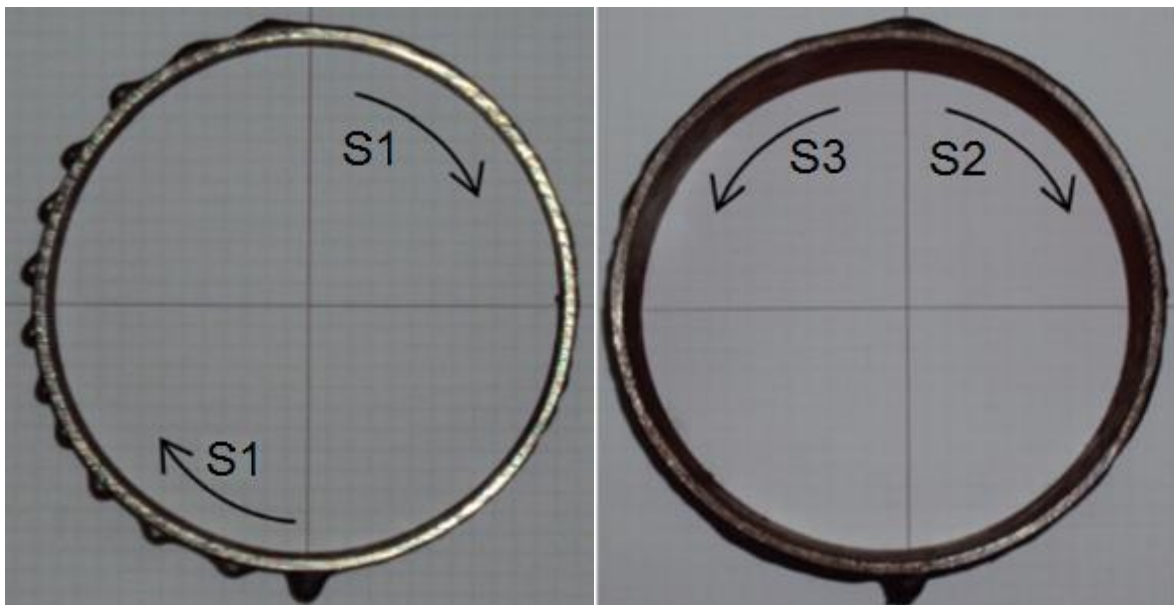


Figura 2.3. Experimento exploratório sem regulação de parâmetros [7]

2.2 POSIÇÕES DE SOLDAGEM

A grande diferença entre uma técnica de soldagem normal e a soldagem orbital está na posição de soldagem. Para definir a posição de soldagem, as duas normas mais utilizadas são a norma ISO [11] e as da ASME [12]/AWS [13], sendo que ambas apresentam várias considerações sobre diversas posições de soldagem de tubos e suas relativas variações e limites entre uma posição e outra. Mas, pela definição de soldagem orbital, o tubo a ser soldado deverá estar estático e ter seu eixo na posição horizontal ou inclinada, pois, saindo destes parâmetros, não haverá mudança de posição de soldagem durante o processo. As Foram feitas as Figuras 2.4 a 2.16 para apresentar as posições de soldagem e a nomenclatura da norma ISO e ASME, nestas figuras as setas vermelhas representam a movimentação do tubo e as setas verdes representam a movimentação da tocha.

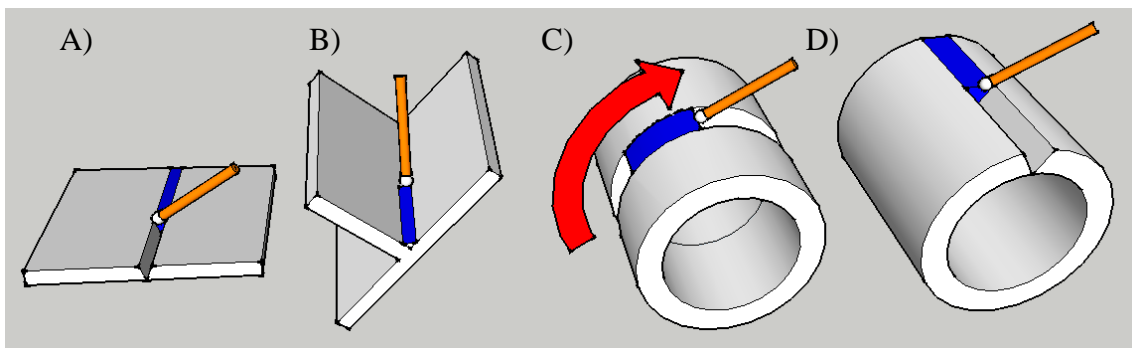


Figura 2.4. Posição Plana: A) PA/1G, B) PA/1F, C) PA/1G e D) PA/1G

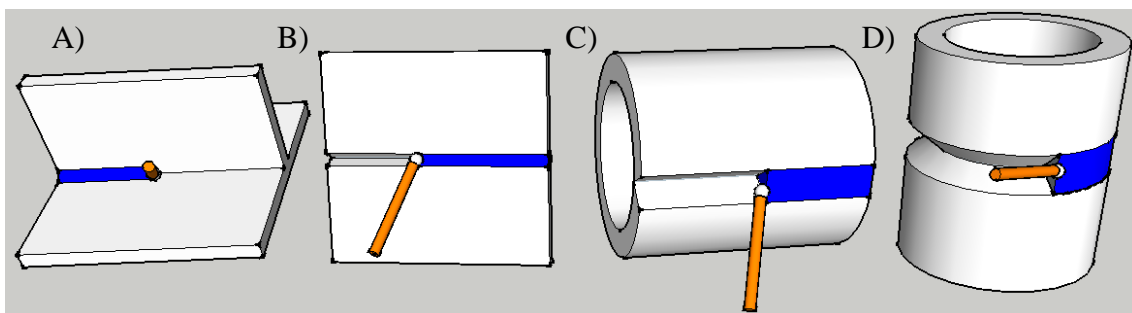


Figura 2.5. Posição Horizontal: A) PC/2F B) PC/2G, C) PC/2G e D) PC/2G

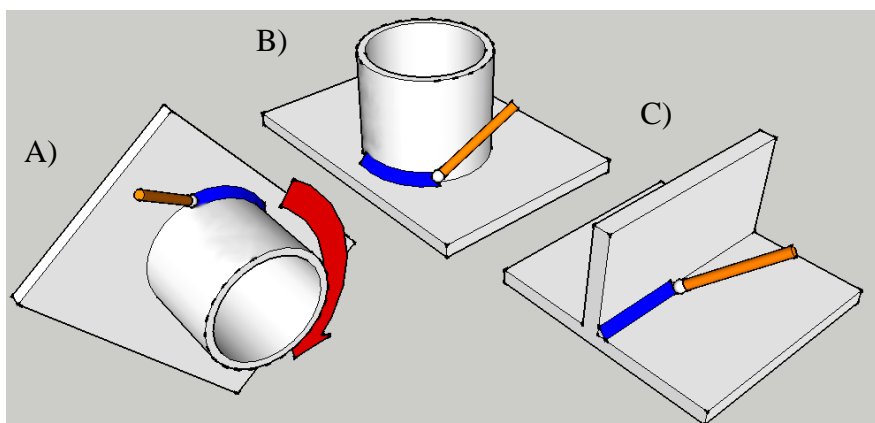


Figura 2.6. Posição Horizontal Vertical: A) PB/2FR, B) PB/2F e C) PB/2F

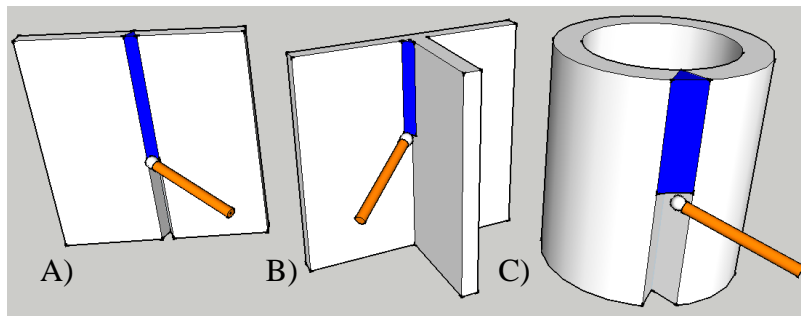


Figura 2.7. Posição Vertical Descendente: A) PG/3G, B) PG/3F e C) PG/3G

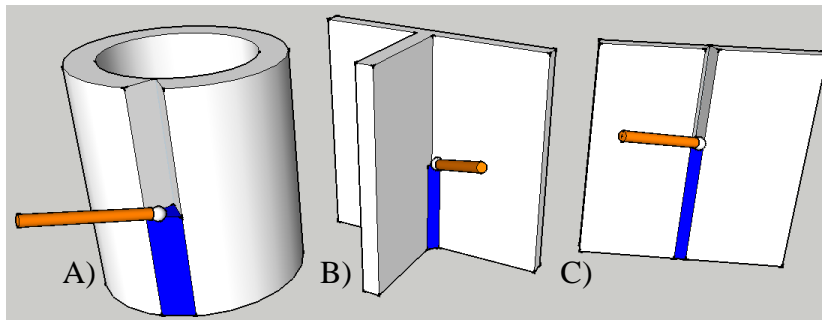


Figura 2.8. Posição Vertical Ascendente: A) PF/3G, B) PF/3F e C) PF/3G

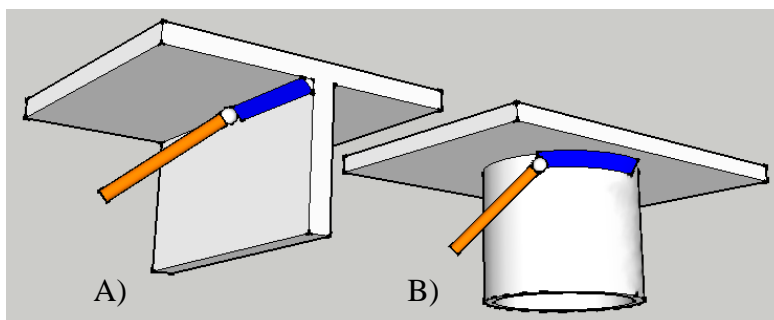


Figura 2.9. Posição Vertical Sobre Cabeça: A) PD/4F, B) PD/4F

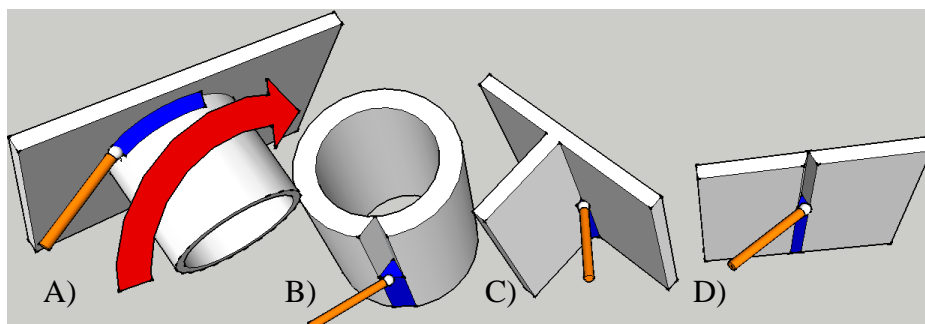


Figura 2.10. Posição Sobre Cabeça: A) PE/4F, B) PE/4G, C) PE/4F e D) PE/4G

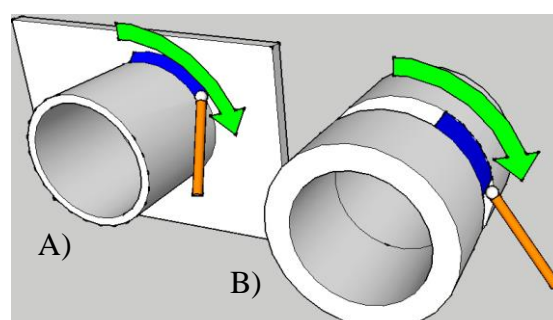


Figura 2.11. Posição Sobre Cabeça: A) PH/5F e B) PH/5G

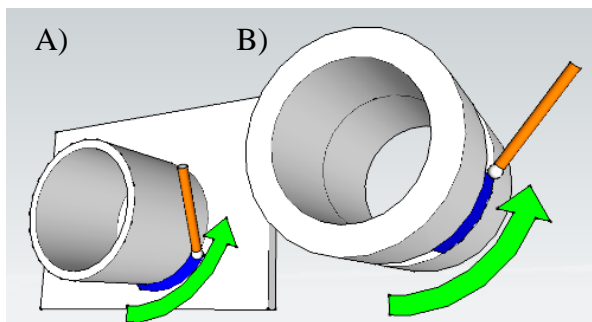


Figura 2.12. Posição Sobre Cabeça: A) PJ/5F e B) PJ/5G

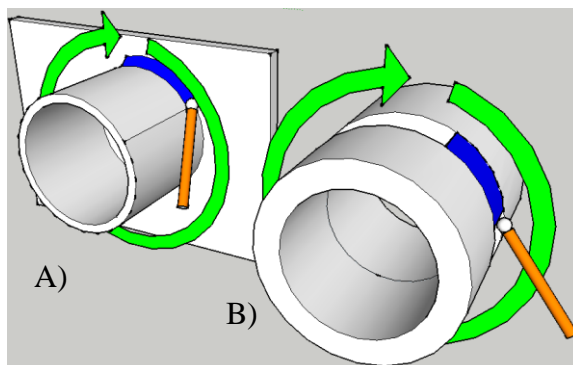


Figura 2.13. Posição Sobre Cabeça: A) PK/5F e B) PK/5G

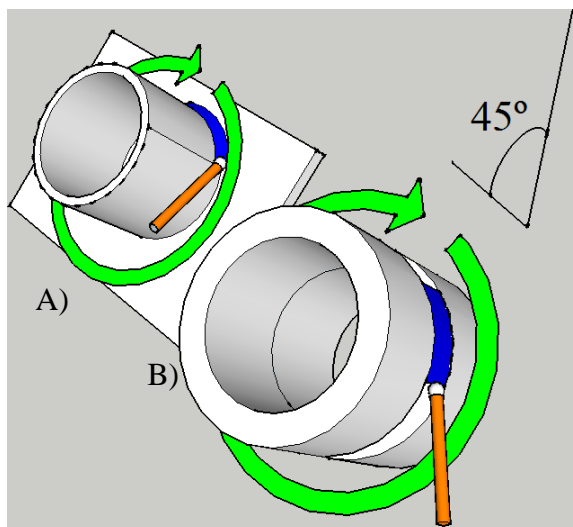


Figura 2.14. Posição Sobre Cabeça: A) PK-L045/6F e B) PK-L045/6G

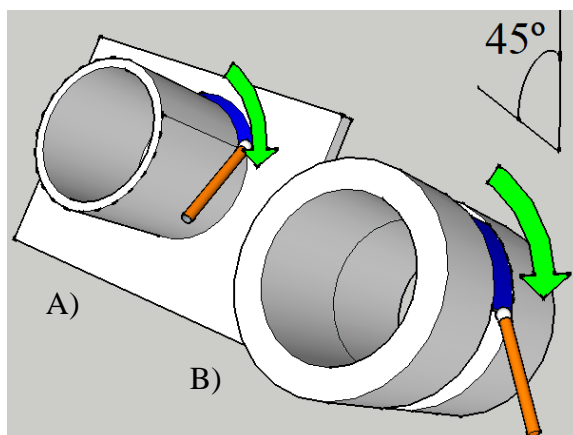


Figura 2.15. Posição Sobre Cabeça: A) PH-L045/6F e B) PH-L045/6G

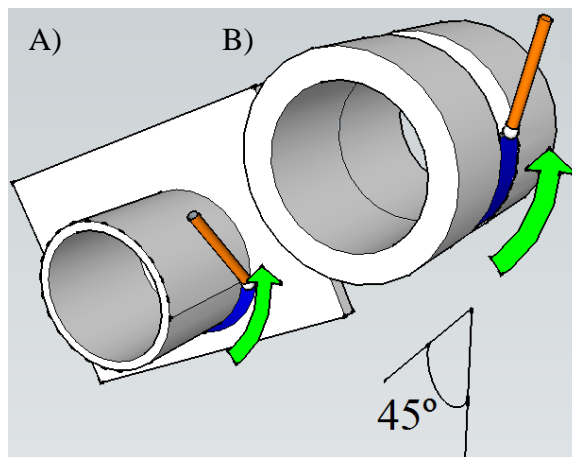


Figura 2.16. Posição Sobre Cabeça: A) PJ-L045/6F e B) PJ-L045/6G

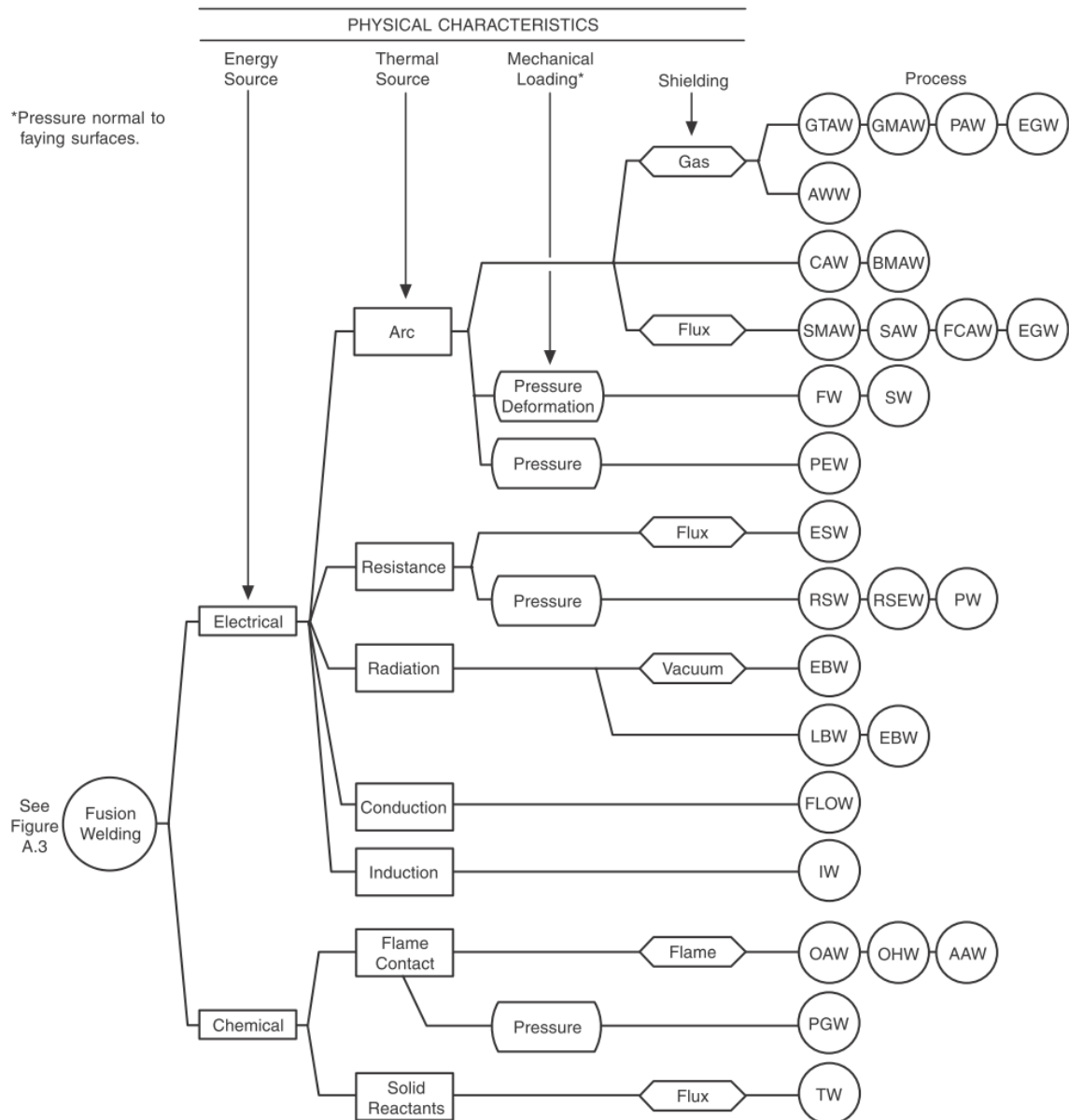
A partir de um estudo das Figuras 2.4 a 2.16, nota-se que a norma ISO usa o tipo de interação existente entre a tocha e o objeto a ser soldado para definir a posição a ser soldada, por outro lado a norma ASME usa a posição do objeto e sua forma, sem analisar a tocha. Considerando a definição de soldagem orbital apresentada no capítulo anterior, nota-se que apenas as posições das Fig. 2.11 a 2.16 são consideradas para soldagem orbital, pois apenas nestas posições há variações entre a posição da tocha e da superfície soldada.

A norma ASME considera uma variação de ângulo do objeto soldado de 15° a 80° em relação ao plano do chão para ser considerado na posição 6G, de 0° a 15° é a posição 5G e de 80° a 90° é a posição 3G. Como apenas as posições 5G/F e 6G/F foram consideradas soldagem orbital, a angulação projetada para a bancada estar em atividade será de 0° a 80° e a posição 90° será a posição de repouso.

2.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Como está sendo analisada a soldagem orbital e, provavelmente, a soldagem de tubos longos, métodos de soldagem que necessariamente precisam estar na vertical não se aplicam, assim como métodos de soldagem que precisam ter acesso a ambos os lados do material a ser soldado como, por exemplo, em soldagem por pressão. A definição de soldagem separa esta técnica da brasagem, logo descartam-se todos os processos que usam a brasagem e, como foi dito anteriormente, descartam-se também as técnicas de união a estado sólido, restando apenas as técnicas de soldagem por fusão.

Pelas definições da AWS [13], pode-se guiar na classificação dos processos de soldagem pela árvore de processos, apresentada na Fig. 2.17, analisando fontes de energia, fontes térmicas, possível carregamento mecânico, possível proteção da solda e, por final, processos:



Designation	Welding Process	Designation	Welding Process	Designation	Welding Process
AAW	air acetylene welding	FW	flash welding	PGW	pressure gas welding
AHW	atomic hydrogen welding	GMAW	gas metal arc welding	PW	projection welding
BMAW	bare metal arc welding	GTAW	gas tungsten arc welding	RSEW	resistance seam welding
CAW	carbon arc welding	IW	induction welding	RSW	resistance spot welding
EBW	electron beam welding	LBW	laser beam welding	SAW	submerged arc welding
EGW	electrode gas welding	OAW	oxyacetylene welding	SMAW	shielded metal arc welding
ESW	electroslag welding	OHW	oxyhydrogen welding	SW	stud arc welding
FLOW	flow welding	PAW	plasma arc welding	TW	thermite welding
FCAW	flux cored arc welding	PEW	percussion welding		

Figura 2.17. Gráfico de Classificação da Soldagem por Fusão [13]

2.3.1 Fonte de Energia

Considerando a característica da bancada de ser automatizada, a utilização de uma fonte de energia química, como a soldagem a chama, traria dificuldade na medição, tomada de dados e controle. Dessa forma, é preferível a utilização de fonte de energia elétrica.

2.3.2 Fontes Térmicas

Neste tópico são abordadas as categorias arco elétrico, resistência, radiação, condução e indução:

- Resistência: Na soldagem por resistência, eliminando os processos que usam pressão, tem-se ESW. ESW não é apropriado para a soldagem de tubos, pois ele é realizado criando-se uma poça de fusão na junta a ser soldada, usado para juntas de 25mm a 300mm, e, por isso, se fosse usado para tubulações, a poça de fusão iria escorrer. Nota-se que este processo é restrito à posição vertical ou próximo da vertical [13]. A Figura 2.18 ilustra esse processo.

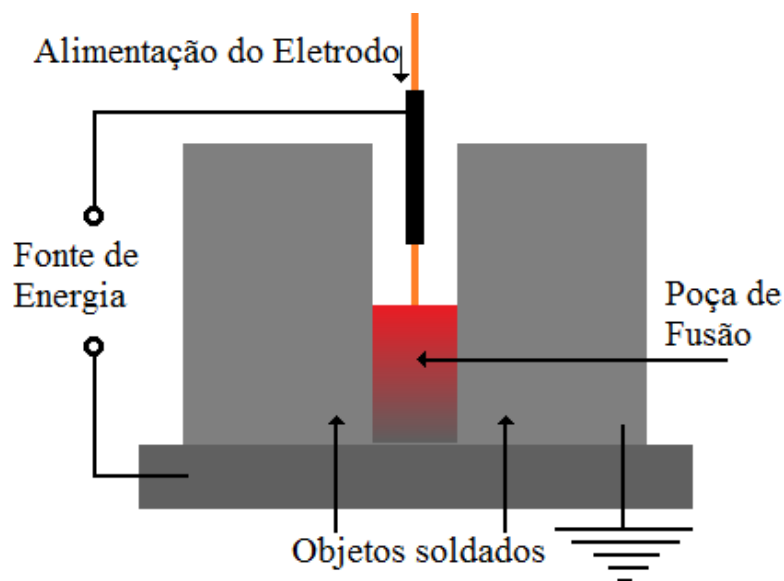


Figura 2.18. Diagrama: Electroslag welding (ESW)

- Arco Elétrico: Processos que utilizam arco elétrico como fonte térmica já são utilizados na soldagem orbital, como GTAW [6], por exemplo. Então pode-se usar esta fonte. Este tipo de fonte térmica apresenta grande variedade de processos e eles serão abordados no decorrer da análise.
- Radiação: Na soldagem por radiação tem-se os processos EBW e LBW. EBW é o processo de soldagem baseado em criar um feixe de elétrons para fornecer energia às duas peças de material que serão soldadas. Este processo é perigoso e precisaria de uma câmara de isolamento, por isso não seria viável girar o equipamento. O equipamento para este processo também conta com outros sistemas, como um sistema para centralizar o feixe de elétrons, e não seria possível usar a bancada feita para ele com outros processos. Por outro lado, LBW é usado para soldagem orbital atualmente. LBW é o processo de soldagem que utiliza um feixe de laser como fonte térmica.
- Condução: O processo de soldagem por condução, FLOW, é obsoleto. Este processo se baseia em gerar a temperatura de soldagem na junta a ser soldada pela própria

temperatura do metal de adição. A penetração no material base não era boa e não assegurava uma boa continuidade das propriedades físicas para a solda.

- Indução: Pela descrição do processo de soldagem por Indução [14], IW é um processo de aquecimento da peça por indução, sem contato físico. A indução é gerada ao se colocar uma bobina ao redor do tubo a ser soldado e, ao ligá-la, a corrente induzida no tubo aquece a junta a ser soldada. Logo, como não há uma exata definição da posição de soldagem e nem sua variação, não é considerado um processo de soldagem orbital.

2.3.3 Carregamento Mecânico

Como abordado anteriormente, não é viável usar pressão neste tipo de soldagem, por isso estes processos foram desconsiderados.

2.3.4 Proteção

Os processos de soldagem tendem a necessitar um tipo de proteção para não contaminar a solda:

- Vácuo: A proteção a vácuo é usada em apenas para o processo EBW e ele foi discutido anteriormente e não foi considerado viável.
- Fluxo: Os processos que usam proteção por fluxo de material são todos a arco elétrico. FCAW é um processo já usado em soldagem orbital atualmente, logo pode-se considerar este tipo de proteção. FCAW é o processo de soldagem que usa arco elétrico e um arame tubular com o material de adição em pó em seu interior, a proteção neste caso é o próprio fluxo em pó. A Figura 2.19 ilustra esse processo. Outros processos de proteção por fluxo são SMAW, EGW e SAW. SMAW é o processo em que o eletrodo é revestido com uma camada de material de proteção e é um processo manual, não automatizado, logo não é adequado para este trabalho. EGW e SAW precisam soldar na posição vertical, logo não são adequados. EGW é um processo semelhante a ESW, que foi explicado anteriormente, porém em EGW o arco elétrico se mantém aberto durante toda a soldagem e costuma-se usar gás de proteção. A Figura 2.20 ilustra esse processo. SAW é um processo em que o fluxo de pó é depositado acima da junta soldada e o arco elétrico é aberto dentro dele. A Figura 2.21 ilustra esse processo.

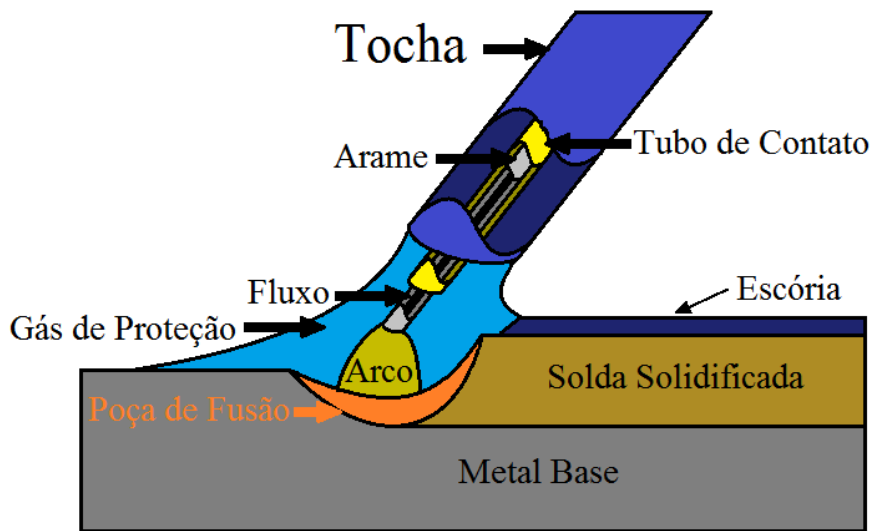


Figura 2.19. Diagrama: Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

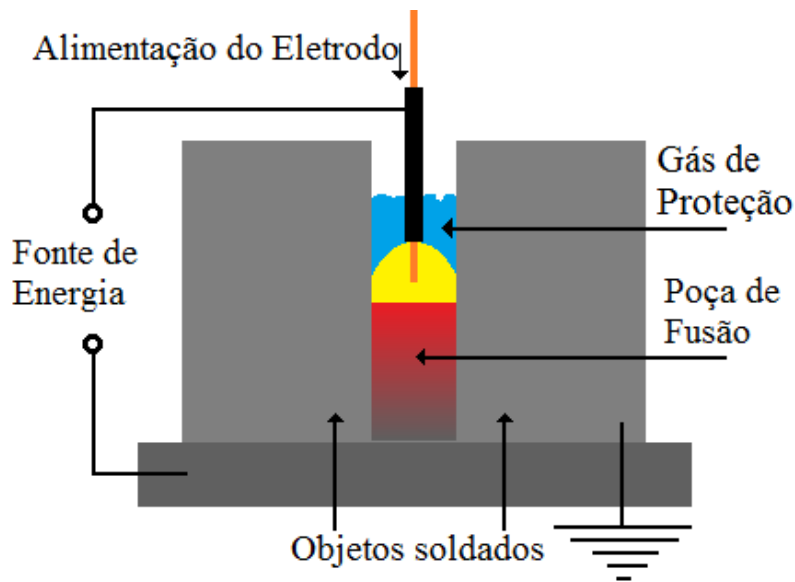


Figura 2.20. Diagrama: Flux-Cored Arc Welding (FCAW)

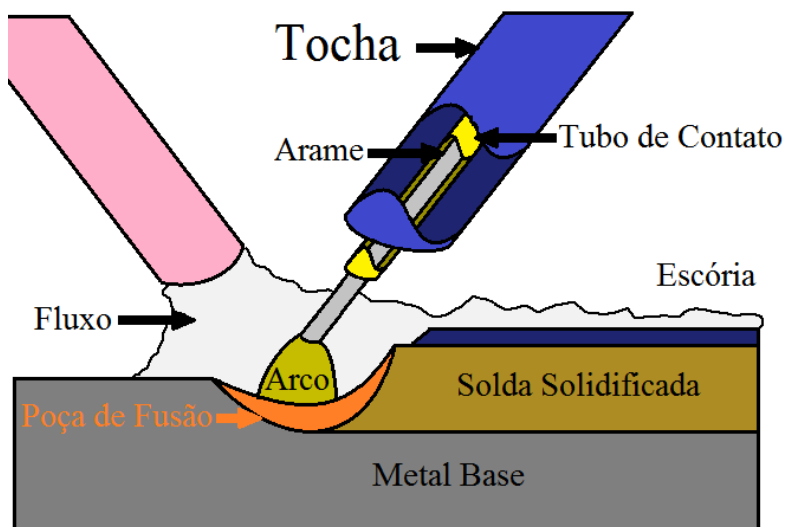


Figura 2.21. Diagrama: Submerged Arc Welding (SAW)

- Gás: os processos de proteção a gás são GTAW, GMAW, PAW. GMAW é o processo de soldagem que usa um eletrodo consumível e gás de proteção que pode ser do tipo ativo ou inerte, diferenciando-se dessa forma os processos MIG (gás inerte) e MAG (gás ativo), este processo é atualmente utilizado em soldagem orbital e foi o escolhido para ser usado na bancada. A Figura 2.22 ilustra esse processo. GTAW é um processo semelhante a GMAW, porém ele apresenta um eletrodo não consumível de tungstênio, por isso ele pode ser utilizado sem adição de material, este processo também é utilizado atualmente em soldagem orbital e foi o escolhido para ser usado na bancada quando não for necessária a adição de material. PAW é semelhante ao GTAW, mas é usado para soldagens onde é necessária maior penetração, ou seja, chapas mais grossas, o que não é o foco da bancada.

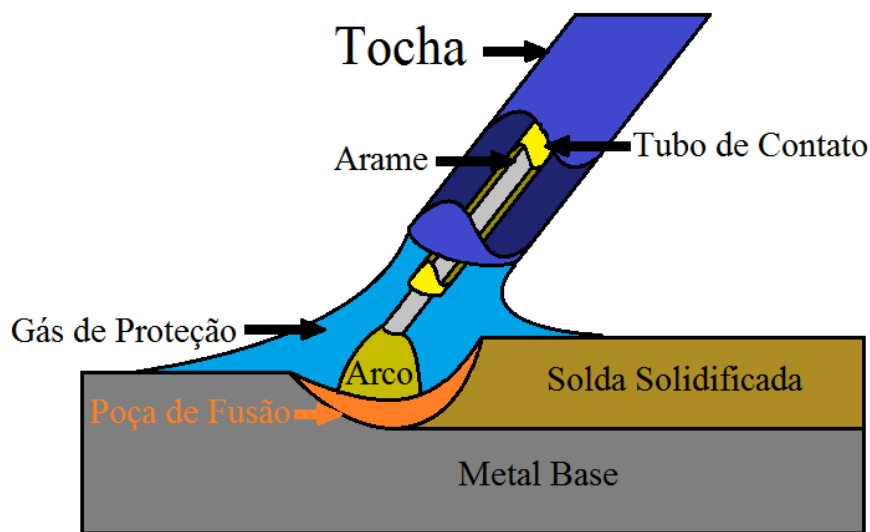


Figura 2.22. Diagrama: Gas Metal Arc Welding (GMAW)

- Sem proteção: CAW e BMAW são processos que não usam proteção e considerados obsoletos. CAW foi um dos primeiros processos de soldagem a arco elétrico criados, se baseia em criar um arco elétrico entre o metal base e um eletrodo de carbono não-consumível e foi substituído por outros processos como o GTAW e PAW. BMAW é o processo de soldagem em que é criado um arco elétrico entre o eletrodo e o metal base, porém sem usar nenhuma proteção. A soldagem sem proteção foi substituída por algum tipo de proteção, pois isso impedia a contaminação da solda por poeira e gases do ar.

Para finalizar, a preferência foi dada a processos semelhantes e que possam usar ou não adição de material. Entre os processos escolhidos, GMAW e GTAW são os mais semelhantes, sendo GMAW usado para a soldagem com adição de material e GTAW usado sem adição. Como a parte de controle do processo GMAW é mais complexa, pois o eletrodo é consumido, deu-se preferência a ele na bancada. O projeto da bancada não dará suporte para um sistema

de adição de material para ser usado em GTAW, pois este processo foi escolhido para ser usado sem adição.

A Figura 2.23 resume a árvore de escolhas do processo de soldagem. Nela usa-se a identificação: vermelho - processo que não pode ser aplicado à soldagem orbital, amarelo – processo que pode ser aplicado, verde – processo que se escolheu para usar na bancada.

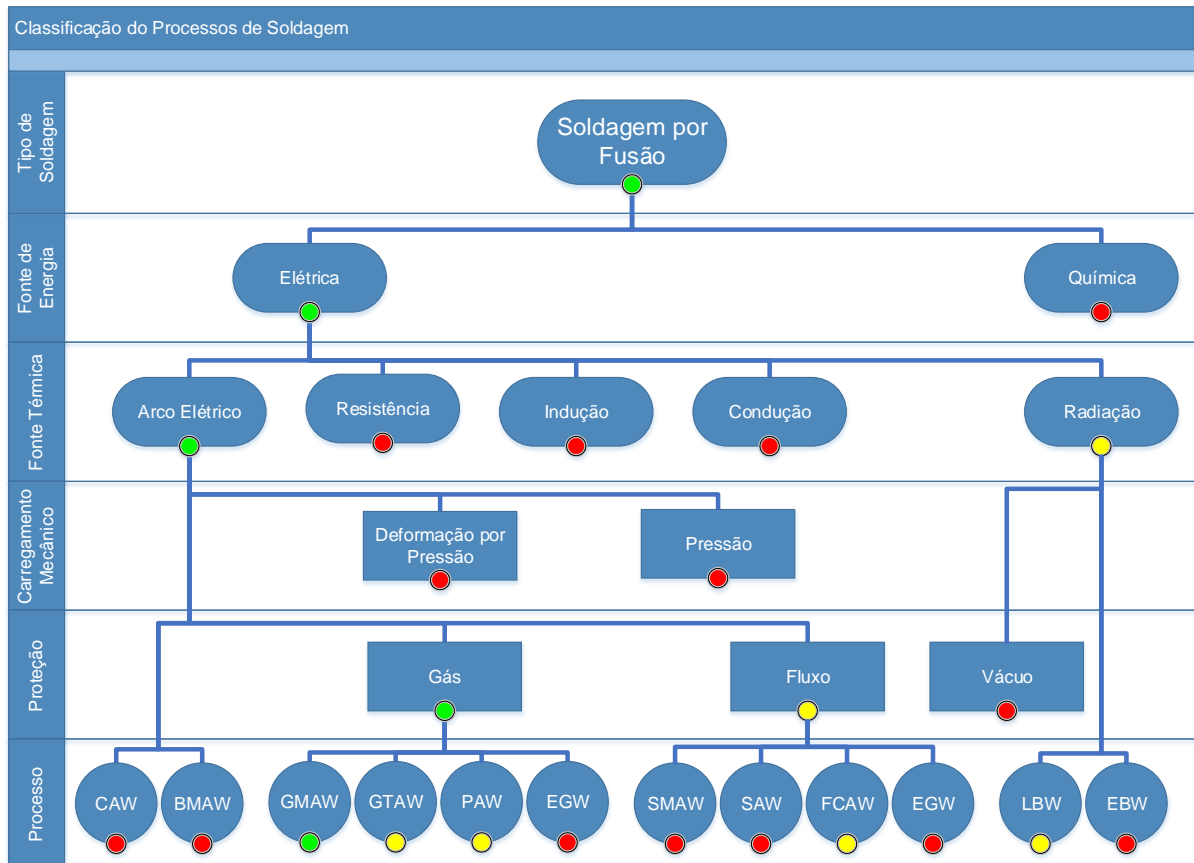
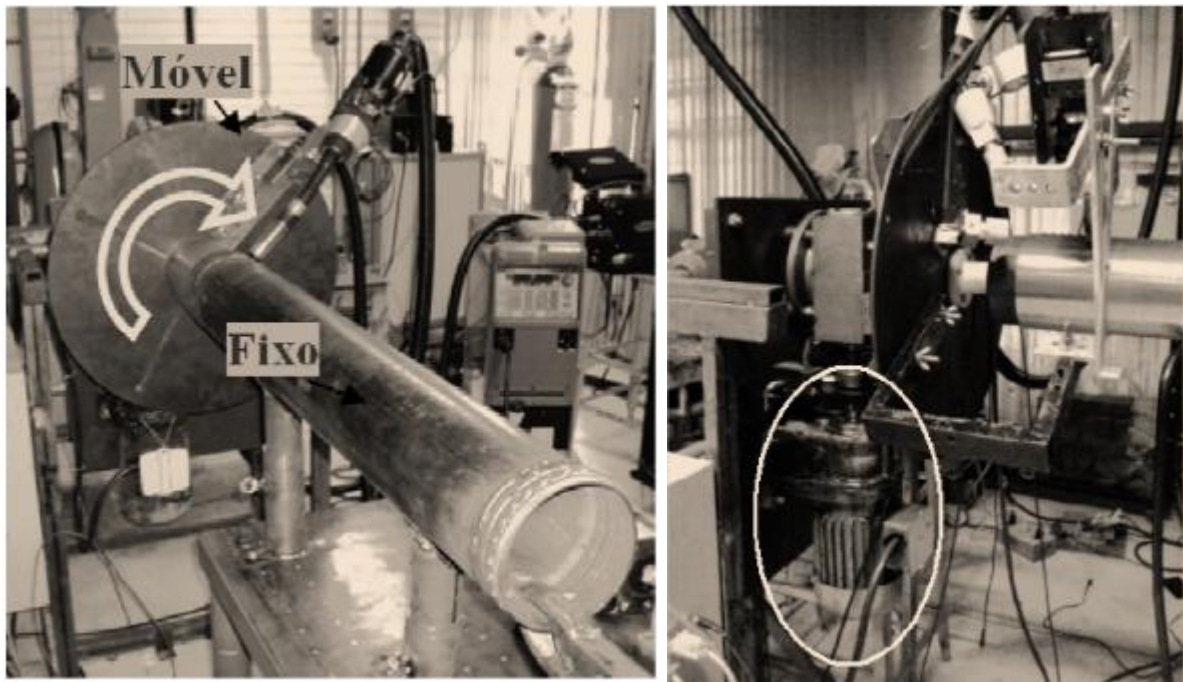


Figura 2.23. Quadro de classificação de processos de soldagem

2.4 BANCADA DE SOLDAGEM ORBITAL

A bancada de soldagem desenvolvida neste trabalho é um aperfeiçoamento da bancada criada no trabalho de Cayo [7]. As Figuras 2.24 e 2.25 apresentam a bancada criada por ele. Nelas é possível ver as partes frontal e lateral da bancada, onde se observa a parte móvel, que é composta pelo o disco de fixação com a tocha acoplada indicados pela seta, e a parte fixa, que é composta pelo tubo que é soldado e seu apoio na mesa.



Figuras 2.24 e 2.25. Planta experimental de trajetória circular – Vista Frontal e Lateral [7]

Cayo criou uma bancada para soldagem orbital e uma para soldagem plana e as utilizou em seu trabalho, porém não forneceu uma descrição detalhada da bancada. Como propostas de melhorias, pode-se citar:

- Tornar a bancada de soldagem orbital operacional: após o trabalho de Cayo, a bancada ficou em desuso. Anos depois, não foi possível utilizá-la devido a diversos fatores como falta de informação técnica, problema na comunicação dentre os componentes, dificuldade de compreender o programa de controle.
- Solucionar o problema de vazamento de óleo: a bancada foi construída de forma que a caixa de engrenagens não ficava na posição para a qual ela foi projetada e, por isso, vazava óleo. O óleo que vazava, caía sobre do motor, o que agravava o problema.
- Desenvolver um programa para controle: O programa de controle foi desenvolvido por Cayo e para uso dele e não era um dos objetivos de seu trabalho explicá-lo. Por isso, um dos objetivos deste trabalho é criar um programa simples e bem explicado de forma que se possa modificá-lo
- Criar as conexões para comunicação das partes da bancada: as placas de condicionamento de sinais deram alguns problemas e não possuíam conexões para toda a capacidade de controle da bancada.
- Produzir um relatório para ser um manual: um dos principais problemas ao se estudar um equipamento é a ausência de manual, isso força os operadores a fazerem deduções ou pesquisar equipamentos semelhantes. Este trabalho visa ser o próprio manual da bancada.

- Projetar um sistema de alinhamento: pela descrição de Cayo não foi possível compreender como a bancada era alinhada ao tubo. O tubo deve estar devidamente alinhado à bancada para que a soldagem ocorra corretamente, pois durante o processo a tocha deverá estar a poucos milímetros de distância do tubo. Para a soldagem a arco elétrico, um pequeno desvio no alinhamento pode gerar um curto circuito ou abrir o circuito.

Abaixo são descritas algumas melhorias possíveis à bancada, mas que não serão objetivos deste trabalho.

- Realizar a angulação automatizada: Usando um motor de passos e uma caixa de redução acoplados ao eixo da bancada é possível realizar sua angulação automatizada. A aplicação disso seria para facilitar a angulação se fosse necessário adicionar um peso extra na Caixa de Fixação, como no caso de criar um sistema de alinhamento angulável, mas não será utilizado enquanto a bancada estiver ativa. A angulação durante a atividade da bancada geraria um tipo de trajetória helicoidal, e não seria possível soldar nenhuma forma geométrica assim.
- Projetar um sistema de alinhamento angulável: o sistema de alinhamento criado pode ser utilizado apenas na posição horizontal. Uma das maneiras de se criar um sistema angulável é construí-lo na Caixa de Fixação, porém, para isso, seria necessário o desenvolvimento do sistema de alinhamento angulável automatizado, pois o peso adicionado à Caixa de Fixação tornaria inviável a angulagem manual. Além disso, também seria necessário recalcular a estrutura da bancada para o novo peso aplicado a ela e talvez adicionar mais rigidez à estrutura com novas barras de sustentação. A Figura 2.26 apresenta essa proposta.

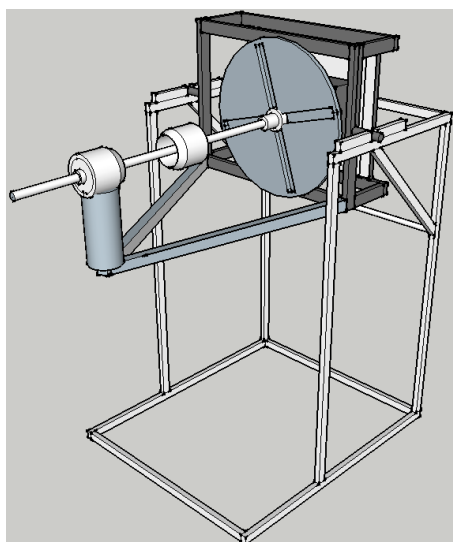


Figura 2.26. Sistema de Alinhamento Angulável.

- Reforçar a estrutura da bancada: A bancada foi projetada para a soldagem de tubos de 120 mm de diâmetro e tubos um pouco maiores, cerca de 200 mm, ainda podem

ser soldados, porém para soldar tubos ainda maiores serão necessárias alterações na bancada, como a substituição do disco de fixação da tocha por um maior, o que traria a necessidade de recalcular os esforços na estrutura da bancada e, talvez, aumentar sua rigidez.

- Criar um sistema de costura para a solda: este tipo de aplicação é raramente utilizado e não foram encontradas referências relevantes dessa aplicação na soldagem orbital, apesar de se poder encontrar vídeos de soldagem orbital utilizando-o. Por isso este sistema não foi aplicado à bancada.
- Programar a bancada para velocidades variáveis: outra aplicação que não possui referências relevantes na soldagem orbital. Apesar de o aquecimento do metal base ocorrer durante a soldagem e, com isso, acelerar o derretimento e a formação da poça de solda, esse efeito é mais visível e relevante na soldagem à chama. Para a soldagem a arco elétrico, costuma-se usar velocidades constantes, como foi observado no trabalho de Cayo [7].

2.5 ESTADO DA ARTE

Existem diversas empresas especializadas em soldagem e diversos tipos de equipamentos para soldagem orbital. O equipamento mais semelhante à bancada que é proposta neste trabalho é conhecido como mesa posicionadora. A empresa inglesa BODE é uma das empresas especializadas em soldagem de tubos e fornece diversas alternativas para esse ramo da indústria, duas de suas alternativas são o rotacionador e a mesa posicionadora.

2.5.1 Rotacionador

O rotacionador é uma estrutura plana com rolos que sustentam e giram os tubos. Essa alternativa visa soldar na posição plana, PA/1G das normas ISO/ASME, e é necessária quando se necessita soldar tubos imensos, com raios de alguns metros, e extremamente pesados. As Figuras 2.27 e 2.28 apresentam dois exemplos de rotacionadores: o CR.100, um rotacionador de baixa capacidade, até 5 toneladas, e o CR.10000, um de alta capacidade, até 500 toneladas.



Figura 2.27. BODE rotacionadores convencionais – CR100 [15]



Figura 2.28. BODE rotacionadores convencionais - CR.10.000 [15]

Outra facilidade dessa alternativa é a facilidade de alinhamento e a capacidade de auto alinhamento proporcionada por certas máquinas. As Figuras 2.29 e 2.30 mostram os rotacionadores autoalinháveis da BODE, o SAR 2000 e o SAR 5000, que tem uma capacidade máxima de 250 toneladas.



Figuras 2.29 e 2.30. BODE rotacionadores autoalinháveis – SAR 2000 e SAR 5000 [16]

Outras empresas também atuam na produção de rotacionadores, como exemplo pode-se citar a ProArc e a Red Rock. As Figuras 2.31 e 2.32 apresentam os equipamentos dessas empresas.



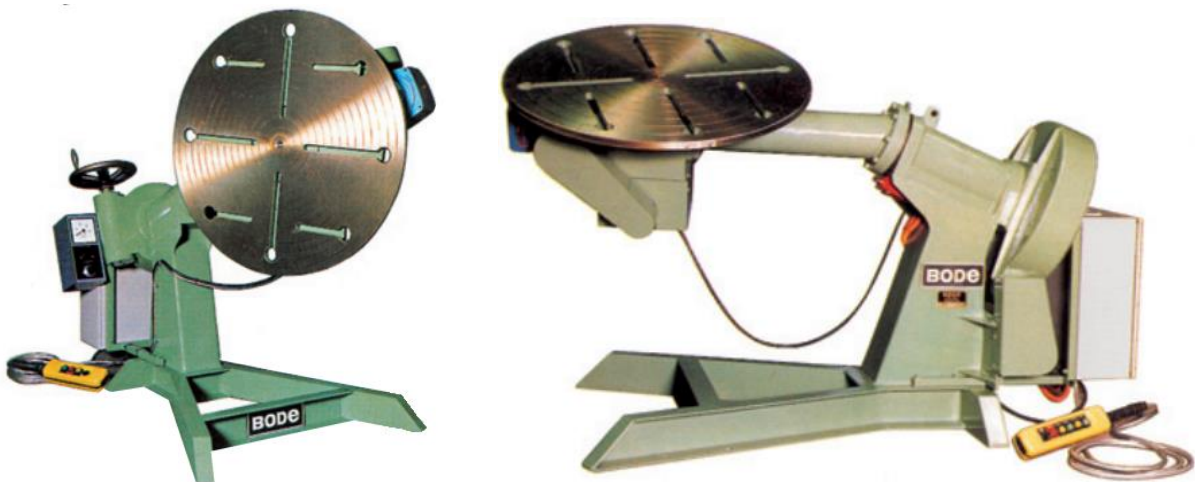
Figura 2.31. ProArc rotacionadores [17]



Figura 2.32. Red Rock rotacionadores [18]

2.5.2 Mesa Posicionadora

A mesa posicionadora é outra alternativa apresentada pelas empresas de soldagem. Ela visa deixar a peça a ser soldada de tal forma que a junta a ser soldada sempre esteja em uma posição favorável, normalmente a plana. Como objetiva carregar a peça soldada e não a tocha, esta solução comporta cargas médias, algumas centenas de quilos. As figuras 2.33 e 2.34 apresentam duas mesas da BODE, modelos 5. VH/A e 20. VH/A, que carregam até 250 kg e 1000 kg respectivamente.



Figuras 2.33 e 2.34. BODE Posicionadores Convencionais – 5. VH/A e 20. VH/A [19]

A empresa ProArc apresenta uma grande variedade de posicionadores, entre elas podem-se citar a mesa posicionadora (Fig. 2.35), o posicionador cabeçote-contraponta (do inglês: Headstock-Tailstock Positioners, Fig. 2.36) e o E.Z. Arc System (Fig. 2.37), que é uma combinação de posicionador e torno.



Figura 2.35. ProArc mesas posicionadores [17]



Figura 2.36. ProArc posicionador cabeçote-contraponta [20]



Figura 2.37. ProArc E.Z. Arc System [17]

Apesar da grande maioria das mesas posicionadoras ser usada para cargas não tão elevadas quanto os rotacionadores, há empresas como a BODE que fabricam mesas extremamente potentes, para cargas de até 100 toneladas, como é o caso da VP.100 da BODE. A Figura 2.38 apresenta essa mesa.



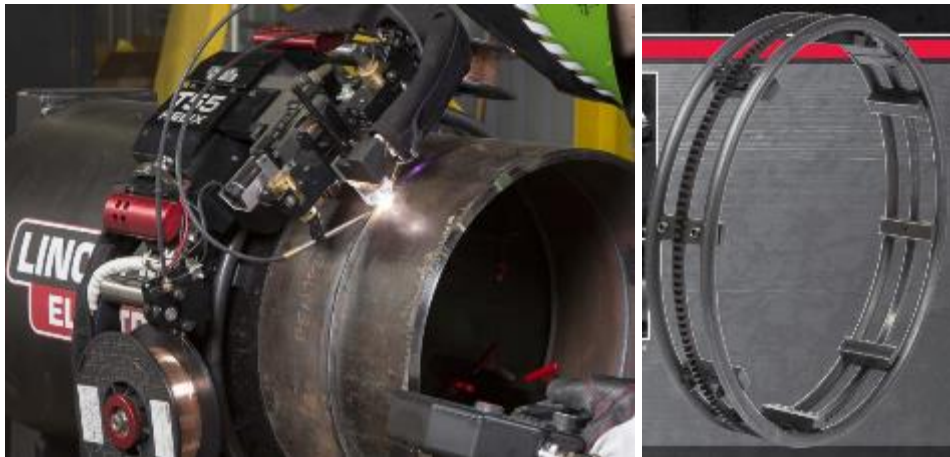
Figura 2.38. BODE Posicionador Especial – VP.100 [19]

Apesar da abordagem interessante e digna de ser mostrada, essas alternativas fogem da ideia da soldagem orbital ao manterem a soldagem na posição plana. É possível fixar a tocha a mesa posicionadora para realizar a soldagem girando-a e esse é exatamente o objetivo deste trabalho, porém muitas das mesas aqui apresentadas não são automatizadas e todas elas apresentam uma carga exagerada, pois a tocha não chega a pesar 10 kg.

2.5.3 Cabeças de Soldagem

As soluções mais comuns do mercado que usam o conceito de soldagem orbital são chamadas de cabeças de soldagem (welding head). Elas se acoplam ao tubo de três modos, dependendo de seu diâmetro: por um trilho acoplado no tubo, para grandes e médios diâmetros, em formato de garra, para diâmetros médios ou pequenos, ou por dentro do tubo, para pequenos diâmetros.

A Figura 2.39 mostra a cabeça de soldagem da Lincoln Electric que faz parte do sistema do APEX™ 2100 que é um sistema de soldagem completo com suporte, fonte de soldagem cabeça e trilho. A Figura 2.40 apresenta o trilho usado nesse sistema chamado de HELIX™ Track Ring. Apesar do movimento da tocha poder proporcionar certa flexibilidade de diâmetros de tubos possíveis, nota-se que seria necessário ter um trilho para cada diâmetro de tubos que se queira usar.



Figuras 2.39 e 2.40. Lincoln Electric - APEX™ 2100 e trilho do robô [21]

A Figura 2.41 apresenta a cabeça de soldagem em forma de garra da Liburdi Dimetrics, essa aplicação é ainda mais restrita ao formato do tubo que a anterior, pois seria necessário comprar uma nova cabeça de soldagem para novos diâmetros de tubo. A Figura 2.42 mostra diferentes cabeças de soldagem da Arc Machines, Inc. para diferentes tipos de tubos. São apresentadas cabeças, da maior para a menor, para tubos de 19mm a 61mm, de 25mm a 90mm e de 50mm a 170mm.



Figura 2.41. Liburdi Dimetrics cabeça de soldagem [22]



Figura 2.42. Arc Machines, Inc - Cabeças De Soldagem [23]

A Figura 2.43 apresenta a cabeça de soldagem interna da Arc Machines, Inc. De todas as aplicações, esta é a mais limitada, pois a cabeça é feita para o diâmetro certo de tubo, mas a empresa fornece adaptações para diâmetros diferentes. Outra desvantagem é a necessidade de filmagem, pois a soldagem é interna.



Figura 2.43. Arc Machines, Inc - Cabeça De Soldagem Interna [24]

CAPÍTULO 3 – CONCEPÇÃO DA BANCADA

O presente capítulo apresenta os parâmetros utilizados para o desenvolvimento da bancada.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DA BANCADA

Como foi apresentado no capítulo anterior, as soluções comerciais que mais se assemelham com a proposta da bancada de soldagem orbital deste trabalho são as mesas posicionadoras. A concepção dessas mesas, em geral, é idêntica, pois elas são sempre compostas de três estruturas: uma base, uma estrutura de angulação acoplada à base e uma estrutura de giro acoplada à estrutura de angulação. A figura 3.1 apresenta estas três estruturas com a base marcada de azul, a estrutura de angulação marcada de verde e a estrutura de giro de vermelho.



Figura 3.1. ProArc mesas posicionadoras (adaptada) [17]

A bancada não precisará ser tão robusta quanto as propostas comerciais, pois ela precisará sustentar o peso de equipamentos leves se comparados às estruturas soldadas, como cones e cilindros de metal. A bancada será projetada para suportar no máximo 20 Kg de material, que será a tocha de soldagem, possíveis adaptadores e possíveis câmeras e medidores.

3.1.1 Dimensões da Bancada

Considerando a altura média de 1,67 m do operador, que é a média entre homens e mulheres de 20 a 29 anos no Distrito Federal de acordo com o IBGE [25], a bancada deve ter uma altura aproximada de 1,2 m para que não seja necessário se abaixar ou usar degraus ao manuseá-la.

Quanto as dimensões de largura e profundidade, não há motivos para a bancada ser grande. Estas dimensões serão estipuladas para ser o mínimo necessário para comportar os equipamentos internos da bancada.

3.1 SISTEMAS DA BANCADA

A bancada de soldagem orbital é, simplificada, um sistema de movimentação da tocha de soldagem que gira sobre o eixo do tubo que será soldado. O sistema de soldagem, que é composto pela fonte, tocha, alimentação, também está contido na bancada e tanto ele quanto o sistema de fixação devem se comunicar com um sistema de controle. A Figura 3.2 ilustra os três sistemas que compõem a bancada.

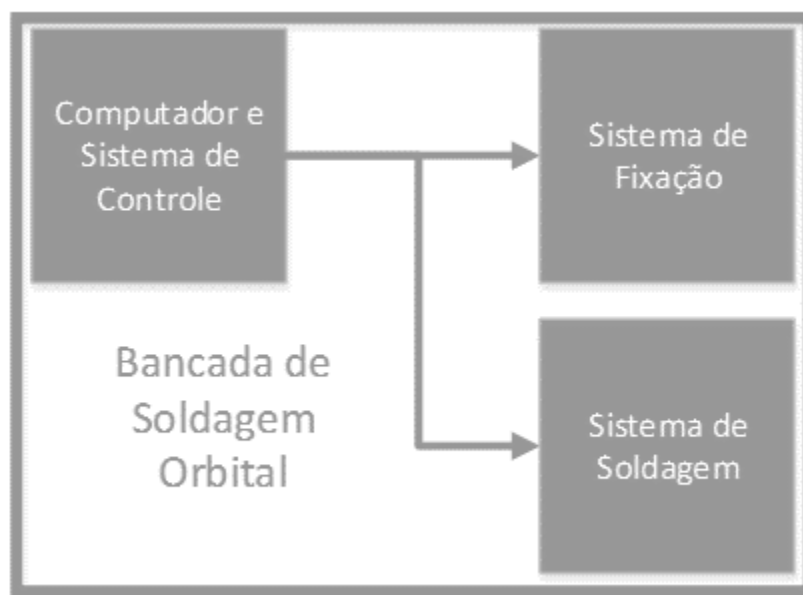


Figura 3.2. Sistemas da Bancada de Soldagem Orbital

Além desses três sistemas, há também o Sistema de Alinhamento do tubo que será soldado. A bancada não tem uma conexão real com o tubo, exceto pelo alinhamento.

3.2 SISTEMA DE FIXAÇÃO

O sistema de fixação deve contar com um suporte que gira ao redor do tubo a ser soldado, centralizado pelo seu eixo e, como o suporte gira, é necessário um motor.

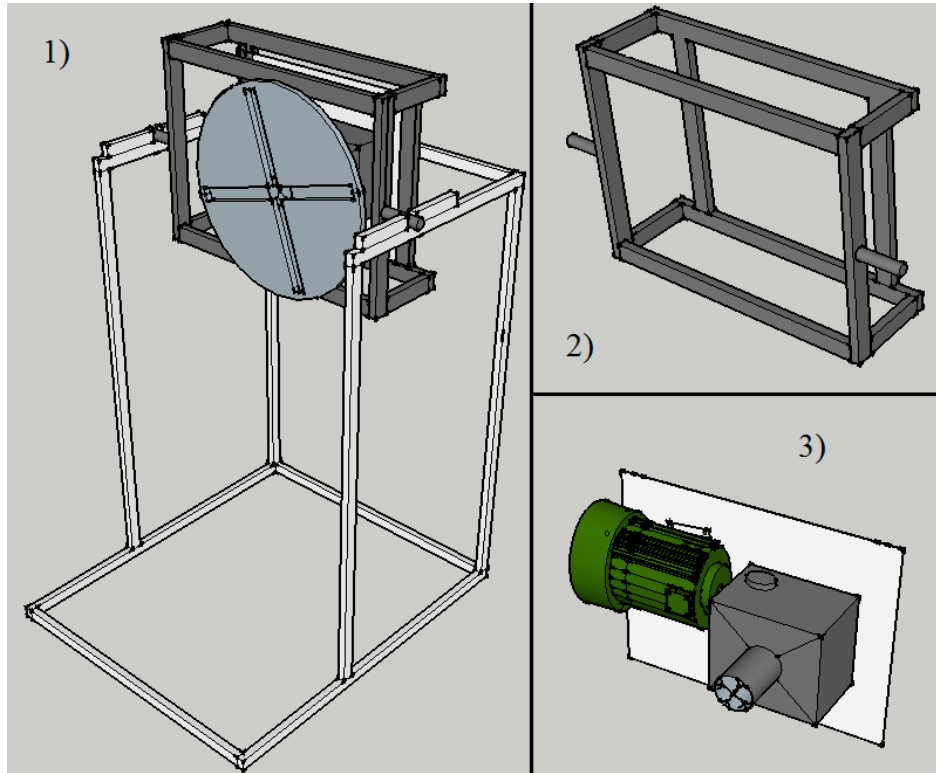
As especificações do motor dependem da modelagem da bancada, pois o torque que o motor precisará suportar depende do peso do suporte e do que está fixado nele, mas a especificação de velocidade é mais simples de se obter. Uma vez que foi escolhido trabalhar com GTAW e GMAW. GTAW é um processo geralmente mais lento que GMAW, é necessário projetar o motor para a velocidade máxima que é usada em GMAW. O parâmetro de velocidade de

soldagem de 14 mm/s foi obtido do trabalho de Cayo [7], logo a velocidade de soldagem deve girar em torno deste valor, sendo que uma velocidade de 20 mm/s já é pouco usual. Outra complicação da soldagem orbital é que a velocidade de soldagem não é exatamente a velocidade em que o motor gira o suporte, mas sim a velocidade em que a ponta da tocha de solda passa pelo cilindro a ser soldado, ou seja, isso depende do raio do cilindro.

As especificações do motor dependem basicamente da massa do equipamento utilizado e da massa do disco de sustentação, os quais estabelecem o conjugado necessário para o funcionamento da bancada, uma vez que a velocidade de giro já foi especificada. Uma boa solução encontrada foi utilizar um motor de indução em conjunto com uma caixa de redução, uma vez que a caixa aumentará o torque do motor e diminuirá sua velocidade, que é muito maior que a necessária.

Além disso, a bancada deve ser angulável para aceitar as posições de soldagem de 0° a 90° em relação ao solo. Para isso seria necessário outro motor e a utilização de outra caixa de redução. Nessa especificação a velocidade é menos importante, pois a bancada será posicionada antes da soldagem e, uma vez que a soldagem se inicie, permanecerá nesta posição. Com base nisto, o segundo motor é considerado dispensável e a bancada pode ser angulada de forma manual antes do início da soldagem.

As Figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam a uma prévia da idealização desse sistema.



Figuras 3.3, 3.4 e 3.5. 1) Sistema de Fixação montado; 2) Caixa de Fixação; 3) Sistema de Giro da Tocha (sem o Disco de Fixação): Motor (em verde), Caixa de Redução (em cinza) e Placa de Fixação (em branco).

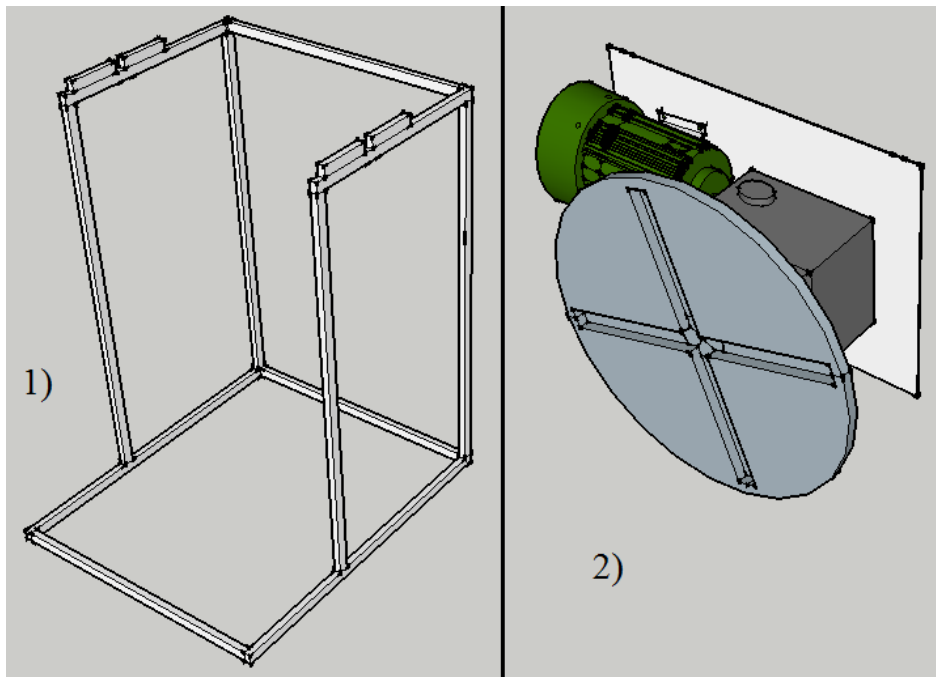


Figura 3.6 e 3.7. 1) Sistema de Giro da Tocha; 2) Base de Fixação.

Outra consideração a respeito do sistema de fixação é a conexão com o computador. O sistema de fixação deve ser controlável, pois a velocidade de soldagem deve ser controlável, então é necessário enviar dados de velocidade e ângulo de soldagem para o computador. Serão discutidos os métodos de medição no Capítulo 4 – Projeto da Bancada.

3.3 SISTEMA DE SOLDAGEM

O sistema de soldagem é algo bem desenvolvido atualmente, sendo necessários uma fonte, um alimentador para soldagem com adição de material e a tocha de soldagem. Baseado na necessidade de adaptação e de controle via computador da bancada, foi escolhida a fonte TransPuls Synergic 5000 da Fronius.

A fonte TransPuls Synergic 5000 é completamente digitalizada, sendo controlada por microprocessadores, possui design modular e módulos que podem ser acoplados a ela, assegurando um elevado grau de flexibilidade. Esta fonte possui capacidade de trabalhar com vários processos de soldagem, incluindo os dois escolhidos, GMAW e GTAW. Os dados de medição necessários para o controle da bancada, tensão, corrente, velocidade de alimentação, etc., já são enviados por essa fonte via o controlador ROB5000 para o sistema de controle.



Figura 3.8. Sistema de Soldagem – Fonte de Soldagem

3.4 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle realiza a conexão e controle da bancada. Na parte de conexão, encontram-se os conversores e os condicionadores de sinal que irão adaptar os sinais provenientes dos outros sistemas para serem recebidos pelo computador. Foi utilizado a placa USB N6009 para realizar a conversão dos sinais recebidos para a porta USB do computador. Na parte de controle, encontra-se o software que será utilizado para controlar a bancada remotamente. Cada componente do sistema será detalhado no Capítulo 4 – Projeto da Bancada.

A Figura 3.9 apresenta a parte de conexão entre os componentes da bancada, nela pode-se ver: 1) Fonte de Soldagem, 2) ROB 5000, 3) Placa de Condicionamento de Sinais ROB-USB, 4) USB N6009, 5) Computador, 6) Placa de Condicionamento de Sinais USB-Motor, 7) Sistema de Fixação.

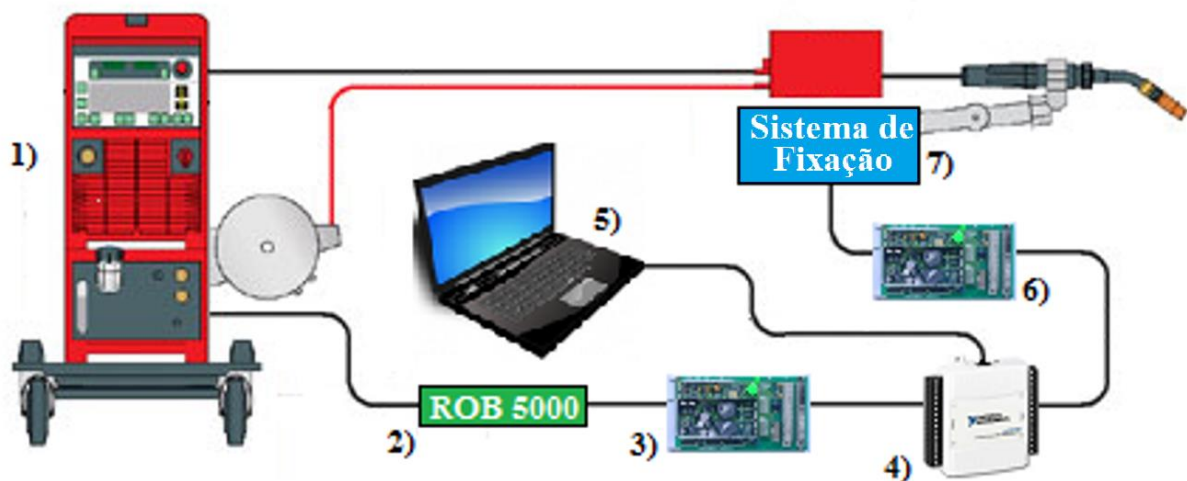


Figura 3.9. Sistema de Controle – Diagrama de Conexões

3.5 SISTEMA DE ALINHAMENTO

A solução trivial para o alinhamento do tubo com o disco de fixação é ligar o centro de ambos por um eixo. Esta solução foi utilizada apesar de apresentar algumas limitações, como a impossibilidade de inclinar o tubo e de se usar tubos de vários diâmetros diferentes.

Na figura 3.10 é apresentado este sistema idealizado, onde é possível observar a base de suporte onde é fixado um acoplador do tubo e outro acoplador solto, estes acopladores (representados em branco) são fixados no tubo por pressão. Os acopladores possuem um rolamento que se conecta ao eixo e ao final deste eixo há uma peça (representada em amarelo) que conecta o eixo ao disco. A figura 3.11 apresenta os sistemas de Fixação e Alinhamento juntos.

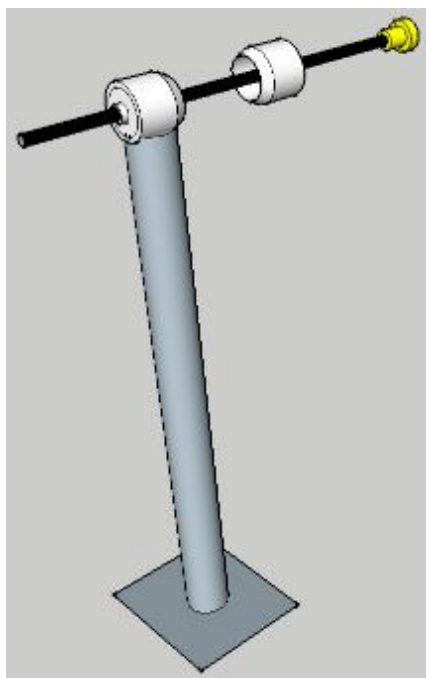


Figura 3.10. Sistema de Alinhamento

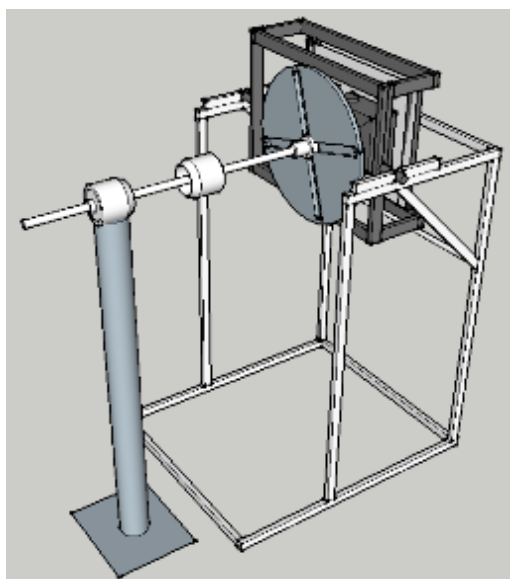


Figura 3.11. Sistemas de Fixação e Alinhamento conectados

CAPÍTULO 4 – PROJETO DA BANCADA PROPOSTA

O presente capítulo apresenta a especificação de cada componente de cada sistema da bancada.

4.1 SISTEMA DE FIXAÇÃO

O sistema de fixação foi projetado segundo a definição de soldagem orbital discutida no Capítulo 2. Dessa forma, foi projetada uma bancada que é capaz de realizar o giro de um eixo angulado de 0° a 90° em relação ao solo.

4.1.1 Motor e Caixa de Redução do Disco de Fixação



Figura 4.1. Motor e Caixa de Redução do Disco de Sustentação

O motor de indução é acoplado à caixa de redução que transmite sua rotação em 90° para o disco de sustentação. A Figura 4.2 mostra a conexão motor-caixa de redução em vermelho e a transmissão em 90° em verde, um adaptador é utilizado nesta conexão, os eixos dessa imagem foram marcados na mesma cor na Fig. 4.1.

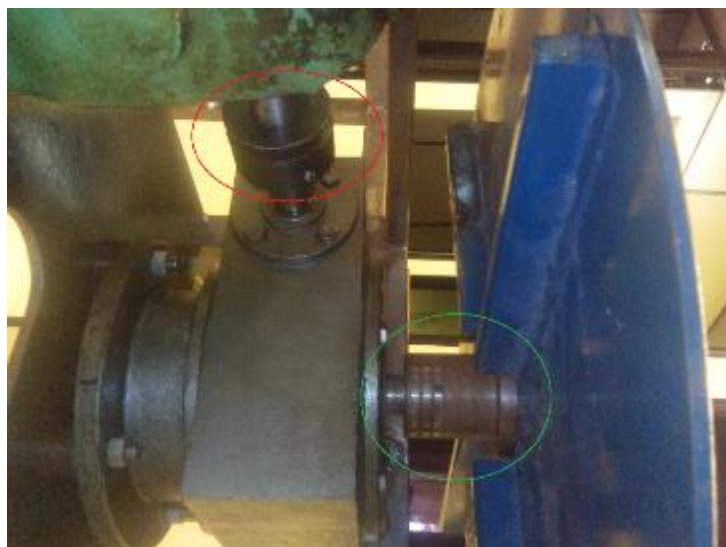


Figura 4.2. Motor e Caixa de Redução do Disco de Sustentação

O motor terá que sustentar o que for acoplado ao disco. Este disco foi retirado do projeto de Valdez [26]

Tabela 4.1. Tabela de parâmetros do motor

Modelo	Potência	RPM	Fator de Potência	Alimentação		
Z1KR 71.2/4 THA II	0.5 kW	1630	0.72	220/380 V	2.5/1.4 A	60Hz
Grau de Proteção		Corrente de partida		Temperatura de atividade		
44		X8		45°		

Desses dados foi calculado o rendimento:

$$PA = \sqrt{3} * U * I * \cos(\theta)$$

$$Pm = PA * \eta = \sqrt{3} * U * I * \cos(\theta) * \eta$$

$$\eta = \frac{Pm}{\sqrt{3} * U * I * \cos(\theta)} * 100 = \frac{1000 * 0,5}{\sqrt{3} * 220 * 2,5 * 0,72} * 100 \approx 73\% \quad (1)$$

Onde PA é a potência ativa do motor, U é a tensão de operação do motor e I é a corrente. Cos(θ) é o fator de potência, Pm é a potência útil do motor e η é o rendimento.

Então foi calculado o torque fornecido na velocidade máxima do motor, a equação foi retirada do Guia de Especificação de Motores Elétricos da WEG [27]:

$$Pm = \frac{C * n}{9555}$$

$$C = \frac{9555 * Pm}{n} = \frac{9555 * 0,5}{1630} = 2,93 \text{ Nm} \quad (2)$$

Onde n é a velocidade do motor e C é o torque entregue por ele nessa velocidade. 9555 é apenas uma constante.

Para o rendimento de 73%, o motor poderia fornecer um torque máximo de 2,14 Nm, 2,93x0,73.

O conjunto da Caixa de Redução e Disco de Fixação foi projetado para suportar um torque axial de 20 Nm. A caixa tem uma redução de 1 pra 80, o que aumenta o torque para 171 Nm, 2.14x80.

O motor é acionado pelo inversor de frequência CFW 08 da WEG que fornece uma potência máxima de 0.18 kW. A Figura 4.3 mostra este inversor. O acionamento e demais detalhes do inversor de frequência foram omitidos, pois o seu controle é realizado pelo programa de controle e não diretamente no inversor. Alguns comentários sobre isso serão feitos na parte 4.3.3 LabVIEW.



Figura 4.3. Inversor de Frequência CFW 08 da WEG

Considerando a perda de rendimento por causa da potência máxima do inversor, tem-se:

$$\eta_2 = \frac{P_m}{P_i} * \eta = \frac{0,18}{0,5} * 0,73 * 100 = 26 \% \quad (3)$$

Onde η_2 é o novo rendimento considerando a potência máxima fornecida pelo motor como a potência P_i , do inversor de frequência.

Nota-se uma queda drástica no rendimento do motor. Dessa forma, o torque máximo que pode ser entregue por este conjunto de acionamento é:

$$C_2 = C * \frac{\eta_2}{100} * Red = 2,93 * \frac{26}{100} * 80 = 60,94 Nm \quad (4)$$

Onde Red é o aumento do torque gerado pela caixa de redução e C_2 é o novo torque do motor.

Por último, faz-se algumas considerações a respeito do torque fornecido pelo motor. Inicialmente foi avaliado se a aceleração fornecida pelo motor é aceitável para a velocidade requerida na bancada. Primeiramente calcula-se o momento de inércia do conjunto composto pelo Disco de Fixação e o equipamento fixado nele. Para isso usa-se o valor do raio do disco que é 252,5mm.

$$J = \int r^2 dM + d * m = \frac{1}{2} * M * r^2 + d^2 * m = \frac{1}{2} * 10,02 * 0,253^2 + 20 * 0,04^2 = 0,35 kg * m^2 \quad (5)$$

Onde J é o momento de inércia, r é o raio do disco, M é a massa do disco, d é a distância do centro de massa dos equipamentos fixados no disco ao centro dele e m é a massa desse equipamento.

Considerando o motor em 10% de sua velocidade, usando a Eq. 4 e substituindo nela o valor do torque do motor da Eq. 2, tem-se:

$$C_2 = C * \frac{\eta_2}{100} * Red = \frac{9555 * P_m}{n} * \frac{\eta_2}{100} * Red$$

$$C_3 = \frac{9555 * P_m}{163} * \frac{\eta}{100} * Red = \frac{9555 * 0,5}{163} * \frac{0,26}{100} * 80 = 6,09 Nm \quad (6)$$

Onde C3 é o torque do motor a 10% de sua velocidade.

Para esse torque, o motor consegue fornecer a aceleração angular de:

$$C2 = J * \gamma$$
$$\gamma = \frac{C2}{J} = \frac{6,09}{0,35} = 17,4 \text{ Rad/s}^2 \quad (7)$$

γ é a aceleração angular do disco.

Agora, considerando-se a utilização de um tubo de 100 mm de raio, calcula-se a aceleração:

$$a = r * \gamma = 0,1 * 17,4 = 1,74 \text{ m/s}^2$$

Onde a é a aceleração tangencial do disco e r é o raio do tubo.

Conclui-se que o sistema do motor é robusto o suficiente para este conjunto, pois $0,81 \text{ m/s}^2$ é uma aceleração muito maior que a necessária para as velocidades que se considera utilizar, por volta de $0,02 \text{ m/s}$. Com essa aceleração e a partir de velocidade zero, chega-se na velocidade desejada em:

$$t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{0,02}{1,74} \approx 0,011 \text{ s}$$

Onde t é o tempo para se chegar à velocidade v , que é de soldagem desejada. Considera-se 11 milissegundos um atraso aceitável para a soldagem.

Agora, calcula-se o torque máximo que se necessita para suportar o peso máximo dos objetos sustentados com o disco, essa é uma análise estática. Como simplificação nesta etapa, foi desprezado o momento de inércia do motor e da caixa de engrenagens, tem-se:

$$T = m * g * d = 20 * 9,8 * 0,04 = 7,84 \quad (8)$$

O pior caso seria se o motor acelera-se o conjunto quando passa-se no ponto de maior torque. Nessa condição tem-se a equação:

$$T = m * (g + a) * d = 20 * (9,8 + 1,74) * 0,04 = 9,32 \quad (9)$$

Pela fórmula do torque do motor, Eq. 6, se o motor estiver a 16% de sua velocidade máxima ele conseguirá fornecer este torque. Este torque é o máximo necessário, existem apenas duas posições que ele ocorre. A Figura 4.4 mostra possíveis posições de um objeto que gira com o Disco de Fixação. Nota-se que nas posições A e D o torque é nulo, pois o ângulo entre o vetor g e o vetor r é 0° e 180° respectivamente, logo seu seno é 0. O torque nas posições F e C é o máximo, $9,32 \text{ Nm}$, e nas posições B e E é $6,59 \text{ Nm}$, sendo que nas posições B e C o torque está a favor do movimento do disco e nas E e F ele está contra.

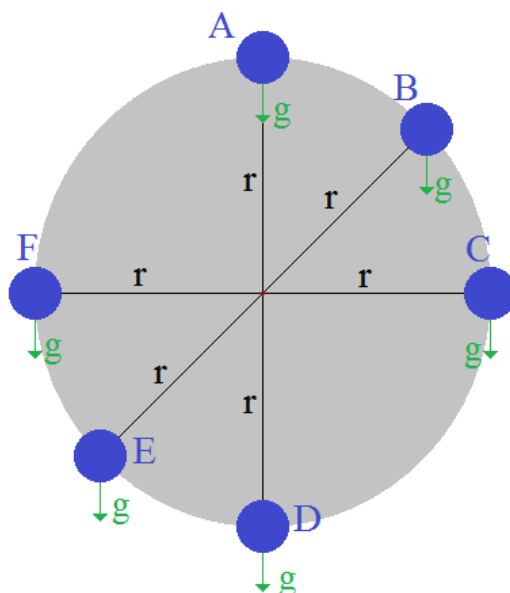


Figura 4.4. Posições de um objeto fixado no disco

4.1.2 Disco de Fixação

O Disco de Fixação é uma placa de metal circular conectada ao eixo da caixa redutora e, em seus rasgos, será fixado qualquer equipamento usado na soldagem e que precise acompanhar o movimento da poça de soldagem, incluindo a própria tocha de soldagem.

A Figura 4.5 apresenta o disco conectado à caixa, nele estão os dois adaptadores que fixam a tocha ao disco. A Figura 4.6 apresenta esses adaptadores separadamente. O primeiro, em verde, tem função de fixar o segundo ao disco quando se usa apenas um parafuso, o segundo fixa a tocha ao disco, o local de fixação da tocha está marcado em vermelho. Esta figura também apresenta os rasgos do disco em vermelho, onde serão ficam os suportes e adaptadores dos objetos fixados no disco.



Figura 4.5. Disco de Fixação de frente e conexão com a caixa de redução.



Figura 4.6. Disco de Fixação – detalhes de suporte.

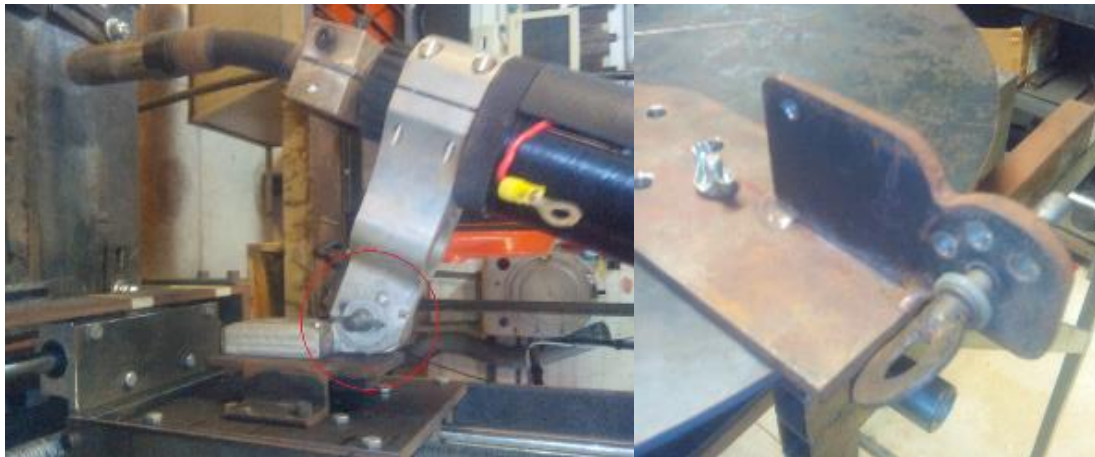


Figura 4.7. Adaptador e fixador da tocha.

A Figura 4.7 mostra a tocha fixada na planta experimental de trajetória plana, que é uma bancada de soldagem para solda plana que também foi construída no trabalho do Cayo [7]. Em vermelho está marcado o local do fixador da tocha que se conecta com o adaptador em detalhe na segunda imagem dessa figura.

4.1.3 Caixa de Fixação

A Caixa de Fixação é uma estrutura que visa diminuir o torque no eixo de angulação da bancada. Para isso a caixa foi feita com um eixo na direção do centro de gravidade do Sistema de Giro da Tocha. Uma consideração necessária nesse ponto é a posição estimada do centro de massa dos objetos fixados na bancada, sendo que o peso de 20 Kg foi estipulado anteriormente, foi projetada a distância máxima de 140 mm a partir do disco de sustentação, perpendicular ao disco, e uma distância de 40 mm do centro do disco no plano do próprio disco. Essa medidas foram estimadas a partir de um posicionamento hipotético que usaria uma tocha, uma câmera de ultra velocidade, fixadores e alguns pesos para equilibrar o sistema. A alteração do momento de inércia do conjunto disco-objetos foi considerada desprezível.

Tabela 4.2. Parâmetros para dimensionamento da Caixa de Fixação

Parte	Peso	Centro de gravidade	
		Horizontal	Vertical
Motor	15,09 Kg	113 mm	140 mm
Caixa de Redução	15,46 Kg	113 mm	210 mm
Placa de Fixação	11,15 Kg	0 mm	Aprox. 210 mm
Disco de Fixação	10,02 Kg	265 mm	210 mm
Objetos Fixados	20 Kg (Máximo)	410 mm	250 mm

Para o dimensionamento, realiza-se as seguintes contas no eixo y:

$$15,09 * (y - 113) + 15,46 * (y - 113) + 11,15 * y = 10,02 * (265 - y) + 20 * (410 - y)$$

$$y \approx 199 \text{ mm}$$

A posição y tem como origem a placa.

No eixo z:

$$15,09 * (z - 140) = 15,46 * (210 - z) + 11,15 * (210 - z) + 10,02 * (210 - z) + 20 * (250 - z)$$

$$z \approx 206 \text{ mm}$$

A posição z tem como origem a parte superior da placa. Isso significa que, considerando a imagem da caixa da Fig. 4.8, se a placa for fixada 15 mm abaixo da barra em verde na imagem e as barras forem de 40x20 mm², a posição do eixo deve estar a 261 mm, 206+15+40, do topo da caixa.

O eixo x não tem relevância nesses cálculos, pois é o próprio eixo de giro. A Figura 4.8 apresenta o sistema de coordenadas utilizado.

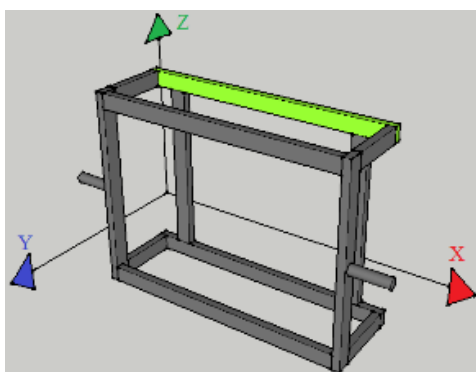


Figura 4.8. Sistema de coordenadas da Caixa de Fixação.

A posição do centro de gravidade foi obtida a partir do topo da Placa de Fixação. A Placa de Fixação foi dividida em três partes para os cálculos, por isso sua medida é aproximada. Foram desconsiderados os pesos de parafusos, alinhadores e outros componentes, assim como o peso da própria Caixa de Fixação, que estava sendo dimensionada, sendo que os centros de gravidade do Motor e da Caixa de Redução foram considerados sobre seus eixos. Dessa fora, a estrutura não irá ficar em equilíbrio, mas terá uma redução drástica do esforço necessário para angulá-la, o que era o objetivo. A caixa ficou dimensionada da seguinte forma:

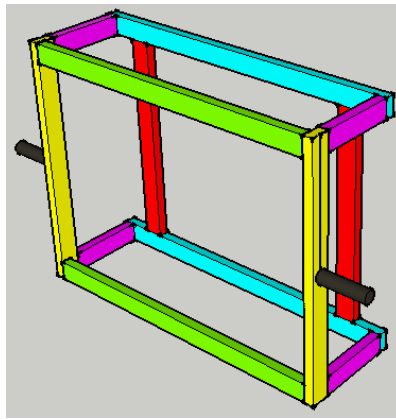


Figura 4.9. Caixa de Fixação

A estrutura da caixa ficou dessa forma, pois foi necessário englobar o motor, que necessitava ser fixado na Placa de Fixação. A Figura 4.10 apresenta as medidas da caixa.

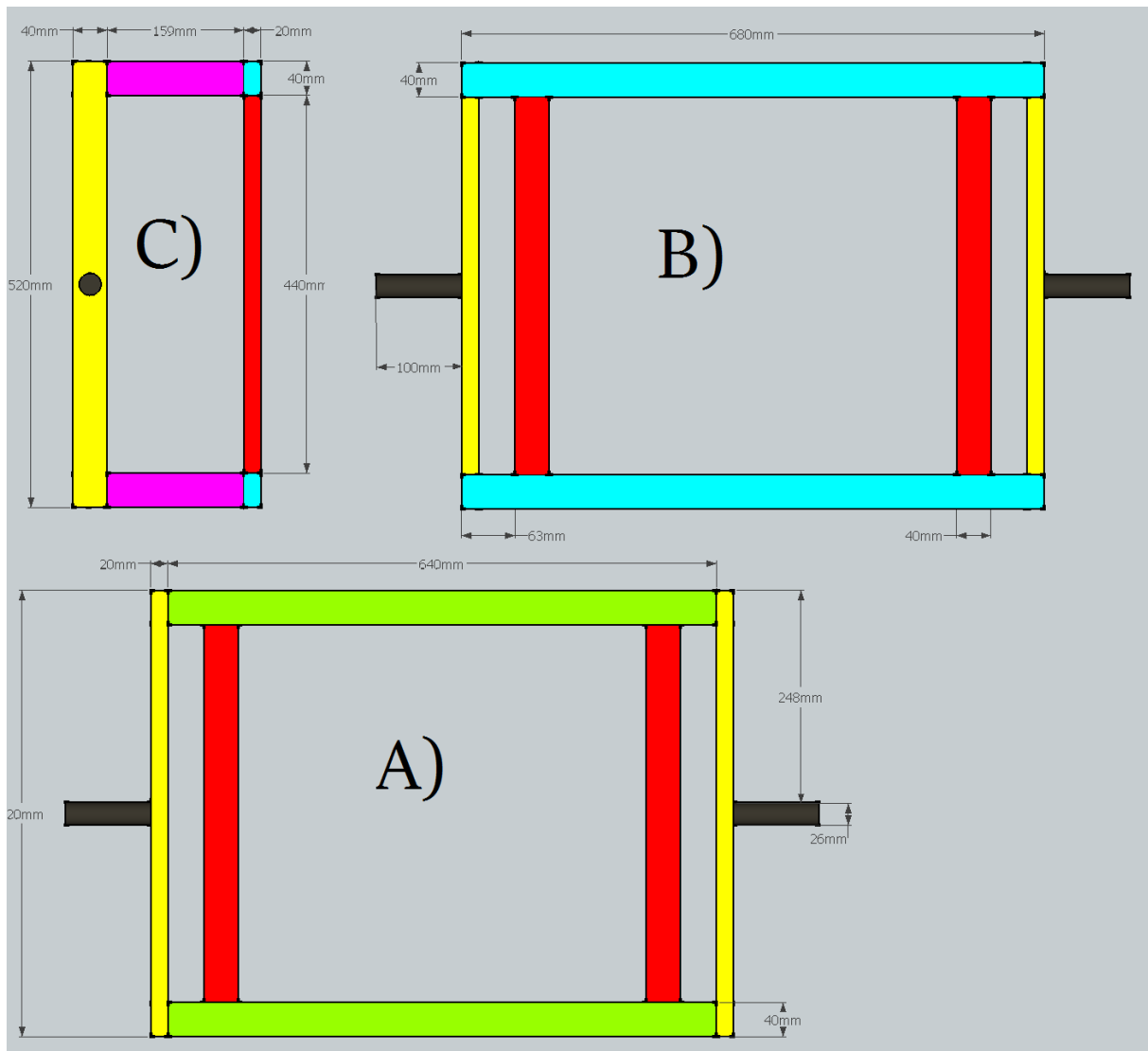


Figura 4.10. Caixa de Fixação Vistas: A) Frontal, B) Posterior e C) Lateral

As barras vermelhas tinham que ter entre si uma distância máxima do tamanho da Placa de Fixação menos 100 mm, para garantir que as elas pudessem ser fixadas na placa.

Os eixos em cor preta, dessa forma, ficam exatamente na posição do centro de massa do Sistema de Giro da Tocha quando sob a carga máxima e deverão estar apoiados na Base de Fixação.

O tamanho das barras azuis e verdes é o mínimo necessário para garantir uma folga apropriada para conectar o motor à caixa de engrenagens.

O tamanho das barras vermelhas e amarelas visou manter a simetria do conjunto, deixando o tubo preto em seu centro.

A Caixa de Fixação possui uma posição de estabilidade, obtida quando o disco está apontado para cima, paralelo ao chão. Esta posição foi estabelecida pela facilidade de montagem e desmontagem do sistema neste arranjo. A Figura 4.11 mostra esta posição.

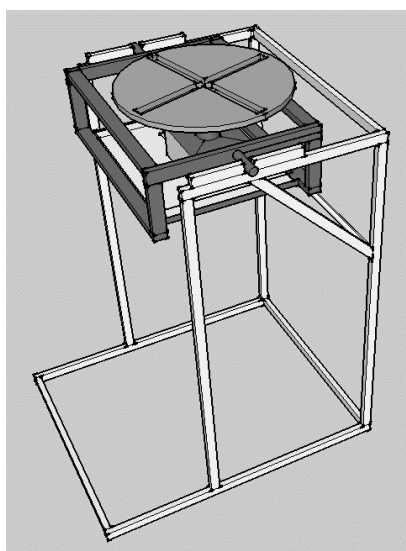


Figura 4.11. Caixa de Fixação - posição de estabilidade

4.1.2 A Base de Fixação

A base de fixação foi construída usando barras de aço. Segundo o fornecedor, a composição de carbono nestas barras gira em torno de 1%, por isso ela foi considerada composta por aço 1010 para efeito de cálculos, os valores das propriedades mecânicas desse aço variam muito pouco entre os fornecedores devido às normas regulamentadoras de sua fabricação. A Tabela 4.3 apresenta as principais propriedades mecânicas desse aço fornecido pela GRAVIA [28].

Tabela 4.3. Propriedades mecânicas do aço SAE 1010

LE – limite de escoamento (MPa)	LR – limite de resistência (MPa)	CP – base de medida do alongamento (mm)	Δe – alongamento (%)
183	330	50	28

Os parâmetros de máxima tensão de cisalhamento deste aço variam bruscamente, pois eles são influenciados pela geometria do objeto desde 80% [29] até 51% [30] da resistência à tração. Considerou-se que a resistência ao corte, cisalhamento, do material utilizado é 51%

da resistência à tração pelo fato de trabalhar-se com duas geometrias diferentes, os cilindros de 13mm de raio externo e 11,5 interno que são os braços de apoio da Caixa de Fixação e o retângulo de 30x20mm² que é o material que compõe a base. Assim, sua tensão limite de cisalhamento para não danificar o material é 93 Mpa. O material da base deveria possuir uma resistência ao corte maior que os braços, devido à sua geometria, porém sua espessura é de aproximadamente 1mm, o que o torna mais frágil.

A Figura 4.12 mostra como ficou projetada a estrutura da base, nela estão marcados de vermelho os locais que recebem a caixa de fixação. Em uma análise de esforços estáticos, nenhum lugar desta base, a não ser os locais marcados em vermelho, recebe qualquer tipo de esforço mecânico externo.

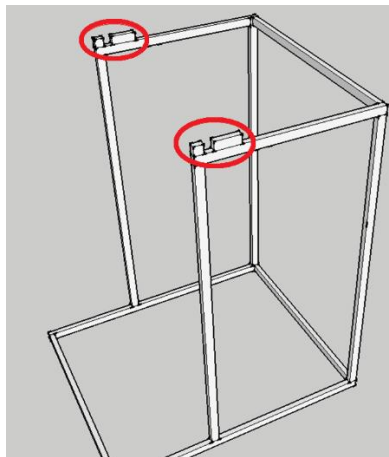


Figura 4.12. Projeto da Base de Fixação

A Figura 4.13 mostra em detalhe a região da figura 4.12 marcada em vermelho com a Caixa de Fixação. A barra verde desta figura é apenas para segurança, para impedir que a caixa saia de seu lugar. Nela são apresentadas a força p , que é o peso do equipamento na caixa, e a força f , que é a força de reação da base.

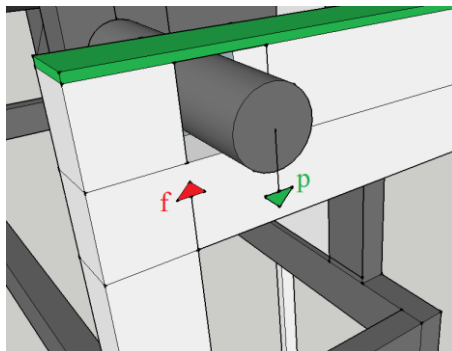


Figura 4.13. Projeto da Base de Fixação

Considerando a caixa suportando o peso máximo, quando o material fixado no disco pesa 20 kg, tem-se um peso total de aproximadamente 775 N:

$$Peso\ total = (Peso\ da\ caixa + peso\ do\ equipamento) * 9,8 \quad (9)$$

$$Peso\ total = (7,38 + 15,09 + 15,46 + 11,15 + 10,02 + 20) * 9,8 = 775,18\ N$$

Porém este peso é dividido em dois apoios, logo cada apoio recebe 387,59 N, 775,18/2.

A tensão de cisalhamento aplicada à estrutura da base é:

$$T1 = \frac{Peso}{Área} = \frac{387,59}{(0,02+0,02+0,04+0,04)*0,001} = 3229916 Pa \approx 3,23 MPa \quad (10)$$

A tensão de cisalhamento aplicada ao braço da caixa é:

$$T2 = \frac{Peso}{Área} = \frac{387,59}{\pi*0,013^2 - \pi*0,0115^2} = 3357108 Pa \approx 3,36 MPa \quad (11)$$

Nota-se que as tensões são semelhantes e que ambas são muito inferior ao mínimo necessário para produzir uma deformação permanente nas estruturas, pois 3,4 MPa é muito menor que 93 MPa.

A Figura 4.14 apresenta o projeto da base de fixação, suas dimensões dependem da Caixa de Fixação.

Como foi mencionado no início deste capítulo, a bancada deve ter aproximadamente 1,2m de altura e o mínimo necessário de largura e profundidade para comportar a Caixa de Fixação, baseado nisso foi dimensionado o tamanho das barras vermelhas.

Para dimensionar as barras azuis, foram deixados espaçamentos de aproximadamente 3,5 cm entre a caixa e a base nos pontos de apoio para permitir sua movimentação.

As barras brancas tiveram um valor escolhido de 1 m. Elas tinham que ser necessariamente maiores que as barras brancas para que se assegurasse que a estrutura não iria tombar para frente.

As barras verdes foram dimensionadas baseando-se em um projeto anterior que visava distribuir o peso concentrado entre as barras amarelas. Porém, a posição das barras amarelas foi modificada e o projeto antigo foi considerado desnecessário, mas o dimensionamento das barras foi mantido.

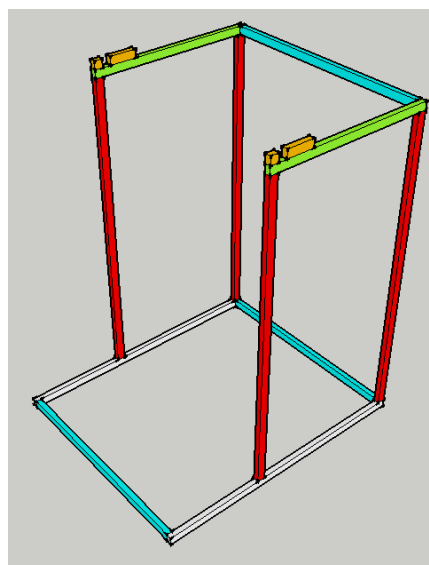


Figura 4.14. Sistema de Fixação

A figura 4.15 apresenta as medidas do projeto:

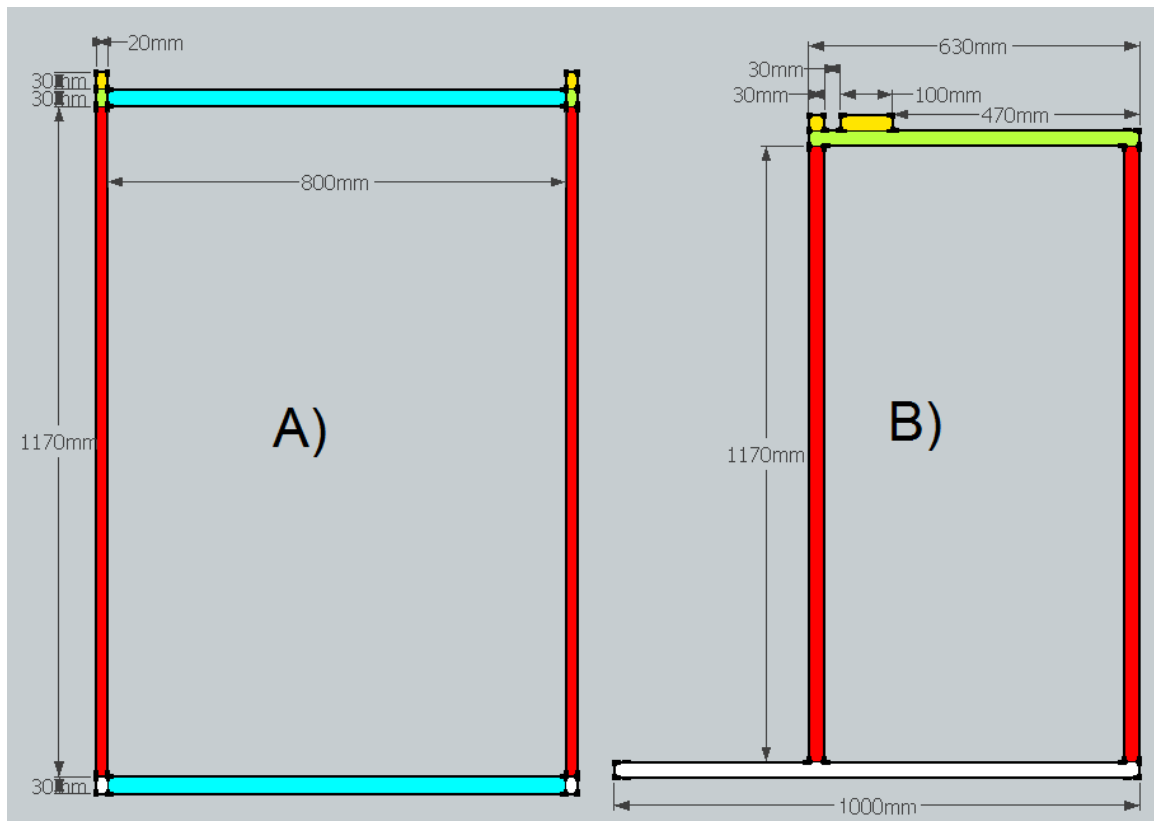


Figura 4.15. Sistema de Fixação Vistas: A) Frontal e B) Lateral

O eixo de angulação está conectado à parte inferior da placa de suporte do motor e, ao ser movido para frente ou para trás, realiza a angulação da bancada. Há um limite físico para a angulação da bancada, ao chegar a 90° , perpendicular ao chão, ela está na posição de estabilidade e ela deve ser angulada até 0° , paralela ao chão, pois angulações negativas farão o Disco de Fixação tocar a Base de Fixação. Tornar a bancada viável para ser utilizada em angulações negativas não foi possível neste projeto, pois estas posições fariam a caixa de redução e o motor vazarem óleo. Foi feita a angulação da bancada de forma manual e não automatizada, pois não foi encontrada uma aplicação prática para se realizar uma soldagem orbital com angulação variável, principalmente pelo fato de uma soldagem desse tipo poder ser dividida em outras soldagens menores com angulação fixa. Dessa forma, anteriormente à soldagem, a angulação deve ser ajustada, a partir da posição de estabilidade, permanecendo fixa até o final do processo.

4.2 SISTEMA DE SOLDAGEM

O sistema de soldagem da bancada é composto principalmente pela a fonte de soldagem TransPuls Synergic 5000 da Fronius. Essa fonte é um sistema completo de soldagem controlado por microprocessador adequado para a soldagem GMAW, GTAW e SMAW, mas,

como já foi descrito, SMAW não é adequado para esse trabalho. A Figura 4.16 apresenta este sistema.

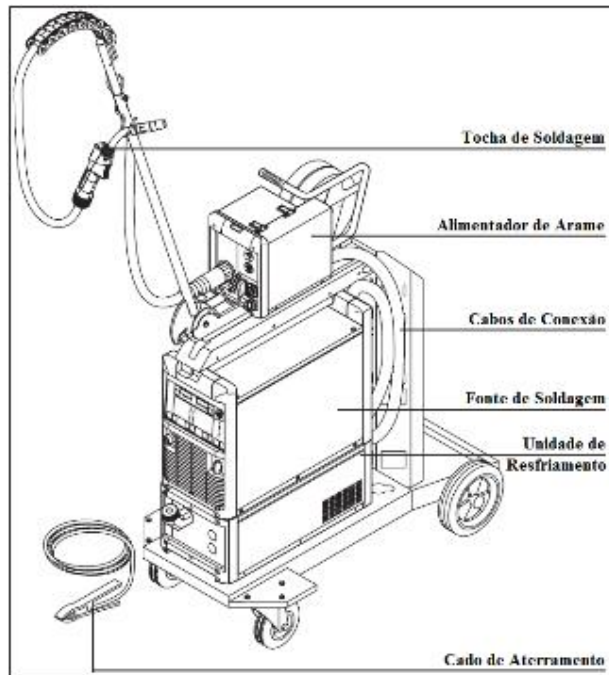


Figura 4.16. Fonte TransPuls Synergic 5000

O modo de utilização da fonte encontra-se no manual da TransPuls Synergic 5000 [31].

4.2.1 ROB 5000 ROBOT INTERFACE

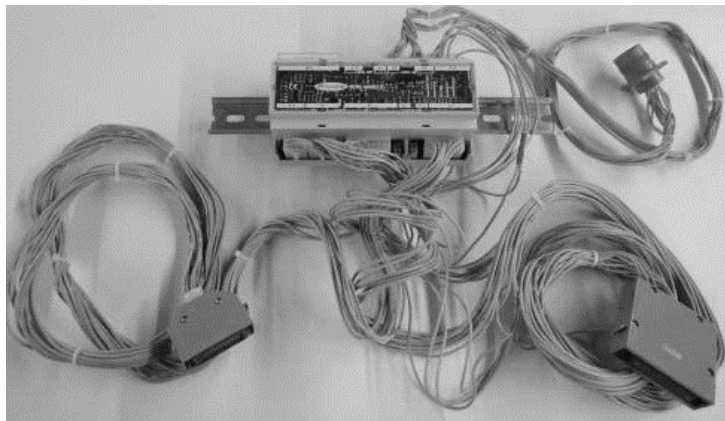


Figura 4.17. ROBOT INTERFACE 5000

O ROB 5000 da Fronius é o auxiliar de conexão da fonte de soldagem com o computador. Ele recebe os dados enviados pelo computador, faz a compatibilização dos padrões e envia os dados para a fonte, o mesmo acontece para os dados enviados pela fonte. O ROB 5000, apesar de fazer parte das conexões é uma ferramenta integrada da fonte e feita para ela. Pode-se então visualizar o conjunto fonte-ROB como um único elemento da bancada.

O Rob 5000 possui 19 portas de entrada digital, 5 portas de saída digital, 3 pares de portas para entrada analógica e 5 para saída analógica. Além destas portas ele também possui um

par extra de conexões analógicas e outro de conexões digitais, os quais permanecem como reservas a fim de substituírem outras portas que possam apresentar defeito. As tabelas abaixo relacionam as portas com sua função primária, a função de algumas portas pode variar dependendo das configurações do sistema.

Tabela 4.4. ROB 5000 – Entradas Digitais

Porta	Função:
x2:4	Início e término do processo de soldagem
x2:5	Fonte pronta para início e parada de emergência
x2:6	Seleção de modo de operação, bit 0
x8:1	Seleção de modo de operação, bit 1
x8:2	Seleção de modo de operação, bit 2
x2:7	Testa o fluxo de gás
x2:11	Liga a alimentação do arame, sem iniciar o processo de solda
x14:6	Recolhe o arame
x8:5	Apaga mensagens de erro na fonte
x14:2	Simula o processo de soldagem
x14:5	Libera ar comprimido, para limpeza da tocha
x8:8	Habilita a função SincroPuls

Tabela 4.5. ROB 5000 – Entradas Analógicas

Porta +	Porta -	Função
x2/1	x2/8	Welding power
x2/2	x2/9	Correção do tamanho do arco
x14/3	x14/11	Controla a dinâmica de curto circuito ou desprendimento da gota
x5/1	x5/8	Controla o tamanho final do arame após processo
x5/2	x5/9	Reserva

Tabela 4.6. ROB 5000 – Saídas Digitais

Porta	Função:
x12/2	Arco estável
x8/10	Soldagem em processo
x8/9	Corrente de solda
x14/10	Reserva
x2/13	Colisão da tocha
x2/14	Fonte pronta para trabalho

Tabela 4.7 ROB 5000 – Saídas Analógicas

Porta +	Porta -	Função
x5/4	x2/11	Tensão de solda
x2/3	x2/10	Corrente de solda
x5/7	x5/14	Corrente no atuador
x5/6	x5/13	Velocidade do arame
x5/5	x5/12	Reserva

As portas analógicas e digitais do ROB 5000 aceitam sinais de tensão de 0V a 10V. Não é um dos objetivos deste trabalho apresentar o modo de utilização do ROB 5000, porém são necessárias algumas explicações para a apresentação da parte de controle, as informações detalhadas de cada uma das entradas e da utilização do ROB 5000 se encontram no manual.

4.3 SISTEMA DE CONTROLE

Como foi dito no capítulo anterior, o sistema de controle compreende a parte de conexões e comunicação entre os sistemas de fixação e soldagem e a parte de controle da bancada por software.

A parte de conexões conecta os três sistemas da bancada a partir do computador. Os sistemas se comunicam enviando dados ao computador e recebendo dados deste, não há comunicação direta entre o sistema de Fixação e o de Soldagem.

O computador envia dados pela porta USB, que está conectada ao USB N6009 da National Instruments. O USB N6009 divide os dados provenientes da porta USB do computador e os envia para placas de condicionamento de sinais para que o sinal seja adaptado às entradas dos sistemas de Fixação e Soldagem.

A parte de controle da bancada por software é um programa feito em LabVIEW que recebe todos os dados de medição e envia os dados de controle para os sistemas.

4.3.1 USB N6009



Figura 4.18. USB N6009

O USB N6009 é um auxiliar de conexão da National Instruments que irá separar o sinal serial proveniente da porta USB do computador para diversos sinais que serão enviados para as placas de condicionamento de sinais.

A montagem do USB N6009 é apresentada na Fig 3.5. Nela tem-se: 1) etiqueta com guias de orientação de pinos, 2) Parafuso conector do terminal, 3) rótulo de sinais, 4) cabo usb.

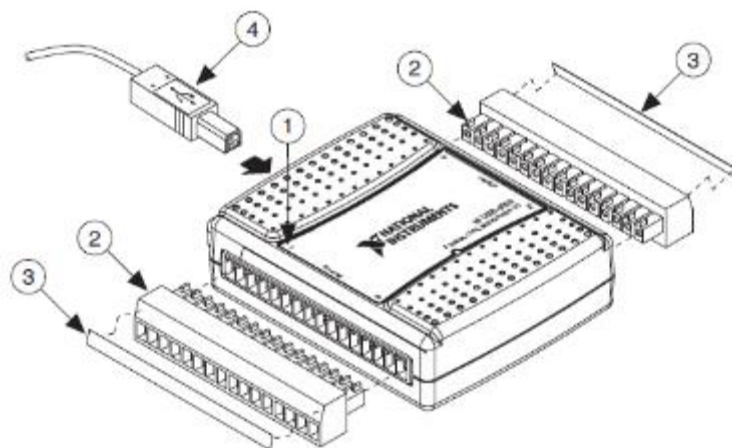


Figura 4.19. USB N6009 - Montagem [32]

De um lado da USB N6009 estão suas entradas e do outro suas saídas. A Figura 4.20 ilustra sua pinagem e a Tab. 4.6 explica a função de cada pino.

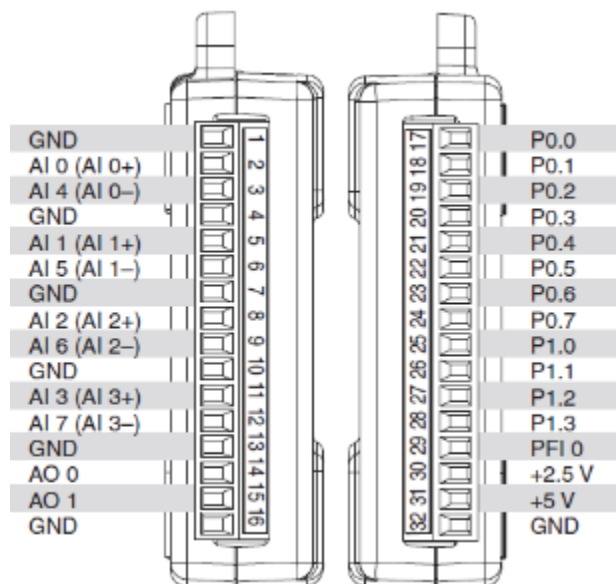


Figura 4.20. USB N6009 - Pinagem [32]

Tabela 4.8. USB N6009 - Pinagem

Nome do sinal	Referência	Direção	Descrição
GND	-	-	Ground - ponto de referência para medições da entrada analógica de terminação única, tensões de saída analógica, os sinais digitais, fornecimento de +5 VDC, e +2,5 VDC no conector de I / O, e o ponto de retorno da corrente de polarização para diferencial medições.
AI<0..7>	Varia	Entrada	Analog Input Channels de 0 a 7 - Para medições de terminação única, cada sinal é um canal de tensão de entrada analógica. Para medições diferenciais, AI 0 e AI 4 são as entradas analógicas positivas e negativas do

			canal de entrada diferencial 0. Os seguintes pares de sinal também formam entrada diferencial canais: AI <1, 5>, AI <2, 6>, e AI <3, 7>.
AO<0,1>	GND	Saída	Analog Output Channels 0 e 1- Suprem a tensão de saída dos canais AO 0 e AO 1.
PO<0..7>	GND	Entrada ou Saída	Port 0 Digital I/O Channels do 0 ao 7 – Podem ser configurados individualmente como entrada ou saída.
PI<0..3>	GND	Entrada ou Saída	Port 1 Digital I/O Channels do 0 ao 3 – Podem ser configurados individualmente como entrada ou saída.
PFI 0	GND	Entrada	PFI 0 - Este pino é configurável como um disparo digital ou um contador de entrada do evento.
+2.5 V	GND	Saída	+2.5 V External Reference – Fornece uma referência externa de 2.5V.
+5 V	GND	Saída	+5 V Power Source – Fornece +5 V de tensão de até 200 mA.

Para utilizar a USB N6009 basta instalar no computador o driver dela, o LabVIEW possui blocos especiais para usá-la. O LabVIEW será discutido melhor na parte 3.3.3 LabVIEW.

Estas são as informações necessárias para a utilização da USB N6009, mais informações podem ser encontradas no manual da placa [32].

4.3.2 Placa de Condicionamento de Sinais

Para fazer a compatibilização de sinais entre os módulos USB N6009 e ROB 5000 é necessária a conversão dos sinais, isso é feito através da placa de condicionamento de sinais.

O placa usb de aquisição de dados, USB N6009, se comunica a partir do padrão TTL (transistor transistor logic) ou seja reconhece tensões entre 0 e 3 volts. Já o ROB5000 da Fronius trabalha com o padrão 0 e 24v, onde o seu zero logico são tensões na faixa de 0 a 5 volts e seu um logico são tensões entre 20 e 24 volts.

Foi desenvolvida uma placa de condicionamento de sinais, para que os dois dispositivos, ROB5000 e NI6009USB, conseguissem se comunicar. Ela pode ser subdividida em 4 módulos: entrada digital, entrada analógica, saída digital e saída analógica.

O módulo de entrada digital, converte uma tensão de 0 ou 24 v, proveniente do ROB5000 para uma tensão de 0 ou 5 volts. Esse módulo foi feito, utilizando reguladores de tensão associados com circuito divisor de tensão. O circuito divisor de tensão a princípio não é necessário, mas para deixar o sistema mais robusto a interferências elétricas ele foi implementado. Seu objetivo é dar uma maior margem de segurança a ruídos, principalmente quando o sinal correspondente ao zero logico estiver ativo. A Figura 4.21 apresenta esse módulo.

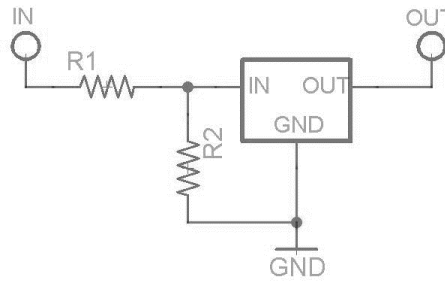


Figura 4.21. Módulo De Entrada Digital

O sinal zero lógico do ROB5000 pode assumir valores de tensão entre 0 e 4 volts, caso ocorra um ruído de cerca de 10% do valor máximo admitido nesse canal o valor que o ROB está enviando não sofreria nenhuma distorção na lógica de controle dele, porém a placa USB N6009 teria pulado do zero lógico para o um lógico, causando picos de tensão e mostrando um falso positivo. Fazendo os resistores do divisor de tensão apresentarem a mesma resistência, teria-se uma queda de potencial igual nos dois resistores, atenuando o valor lido do ruído para 5% e também reduzindo a tensão enviada para o regulador de tensão pela metade. Desta maneira, como o mesmo ruído, de 10%, o regulador de tensão estaria recebendo uma tensão de no máximo 3 volts, o que é 50% do valor máximo admissível para o zero lógico na entrada do regulador de tensão.

Pela facilidade de serem encontrados no mercado, foram adotados resistores de 0,25 W de potência máxima. Tomando o maior valor possível de tensão como 24 volts, com o divisor de tensão, cada resistor fica sujeito a 12 volts. Com isso calcula-se o valor da resistência:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{24^2}{0,25} = 576 \Omega$$

Como o valor da resistência precisava ser maior ou igual ao valor calculado, foi adotado o valor de 1k ohm, reduzindo assim a potência dissipada para 0,144W por resistor e fazendo com que a corrente dissipada seja menor.

O módulo de saída digital, converte uma tensão de 0 ou 5 volts, originada na placa USB, para uma tensão de 0 ou 24 volts. Isso é feito através do circuito 2, o valor do resistor R1 foi calculado de forma que o módulo de saída digital fosse imune a ruídos em sua entrada. A Figura 4.22 apresenta esse módulo.

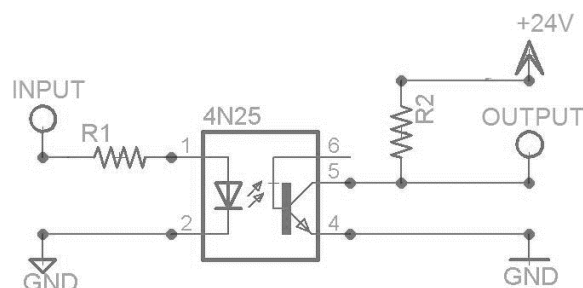


Figura 4.22. Módulo De Saída Digital

Para o correto funcionamento do optoacoplador sua corrente de entrada deve ser menor que 20mA, como o sinal de entrada é de 5 volts e o optoacoplador drena 1.5volts durante sua operação, é necessário resistores maiores que 180 ohms. Após analisar esses dados foi escolhido resistores de 1k, que fornece 3.5mA para o optoacoplador. Para a sua saída utiliza-se um resistor de pull-up para fazer com que o circuito nunca fique aberto, sempre receba algum sinal da fonte, ou 0v ou 24v. Para limitar a corrente dissipada no resistor de pull-up, foram utilizados os mesmos valores que no divisor de tensão do módulo de entrada analógica, 1k ohms.

O sinal proveniente da placa USB N6009 varia de 0 a 5 volts para tensões analógicas, com seu valor podendo estar em qualquer nível nesse intervalo. O ROB5000 entende sinais analógicos de 0 a 10 volts, desse modo foi necessário amplificar duas vezes o sinal de recebido na entrada do módulo, para que o rob5000 o entenda, isso foi feito utilizando amplificador operacional na configuração inversora, com ganho 2. A Figura 4.23 apresenta o módulo que realiza essa função.

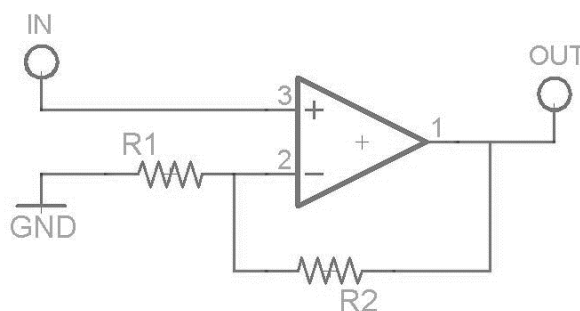


Figura 4.23. Módulo De Saída Analógica

Pelo modo que o circuito foi montado, para se ter ganho 2 na saída, os resistores devem ter a mesma resistência. Para a dissipação de potência em todo o circuito ser a mesma, foram adotados resistores de 1k ohm. O máximo alcance da tensão de saída é garantido com a alimentação simétrica de 15volts que os amplificadores operacionais são submetidos.

O sinal entregue pelo ROB5000 varia de 0 a 10 volts. A placa USB N6009 entende sinais entre 0 e 10 volts. Desse modo é desnecessário fazer a compatibilização dos sinais, já que eles já estão na mesma faixa de operação.

4.3.3 Programa de controle – LabVIEW

O programa que o computador irá utilizar para controlar os equipamentos, utilizando a USB N6009 e se comunicando com o ROB 5000 deve ser capaz de realizar as seguintes ações ao se ligar a fonte: selecionar o tipo de solda como manual, colocar a fonte em modo de espera, apagar as mensagens de erro da fonte, escolher a velocidade do arame, a tensão de solda e a velocidade do motor.

Após esses passos o processo de solda será iniciado, sendo necessário enviar um bit de início para a fonte ligar o motor. Enquanto o processo estiver ocorrendo, o programa deve ler o valor de corrente e tensão que estão sendo entregues pela fonte e, para finalizar o processo, ele deve enviar sinal de parada para a fonte, câmera e motor.

A tabela 4.7 apresenta os sinais que o ROB 5000 deve receber durante a operação.

Tabela 4.9. ROB 5000 – Sinais de Entrada

Função	Portas			Sinais (respectivos às portas)		
Fixar o tipo de solda como manual:	x2:6	x8:1	x8:2	0	0	1
Fonte em espera:	x2:4			0		
Apagar mensagens de erro	x8:5			1, por 10ms, depois voltar para 0.		
Iniciar solda:	x2:4			1		
Velocidade do arame:	x2/1	x2/8		Tensão entre 0v e 10v, a ser determinada pelo usuário		
Tensão de solda:	x2/2	x2/9		Tensão entre 0v e 10v, a ser determinada pelo usuário		
Ler tensão real de solda:	x5/4	x2/11		Valor entre 0v e 10v proporcional à tensão de soldagem		
Ler corrente real de solda:	x2/3	x2/10		Valor entre 0v e 10v proporcional à corrente de soldagem		
Finalizar processo:	x2:4			0		

O programa de controle do processo de soldagem e do posicionamento da peça foi desenvolvido em LabVIEW, um ambiente gráfico de programação. Ele possui duas interfaces diferentes, o painel frontal e o diagrama de blocos. Na interface painel frontal é feita a comunicação entre usuário e bancada de soldagem enquanto na interface diagrama de blocos é feita toda a programação que permite o funcionamento do sistema. A Figura 4.24 apresenta o painel frontal.

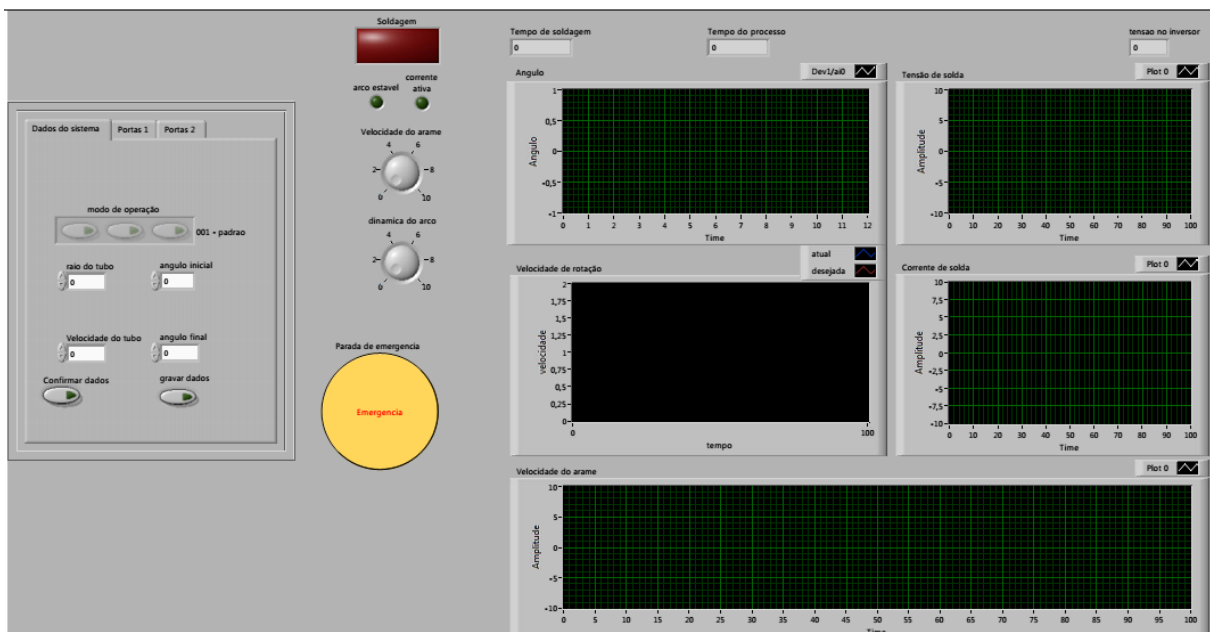


Figura 4.24. Painel Frontal

O painel frontal pode ser dividido em dois módulos, configuração do sistema e estatísticas do processo, o módulo de configuração do sistema está mostrado na Fig. 4.25:

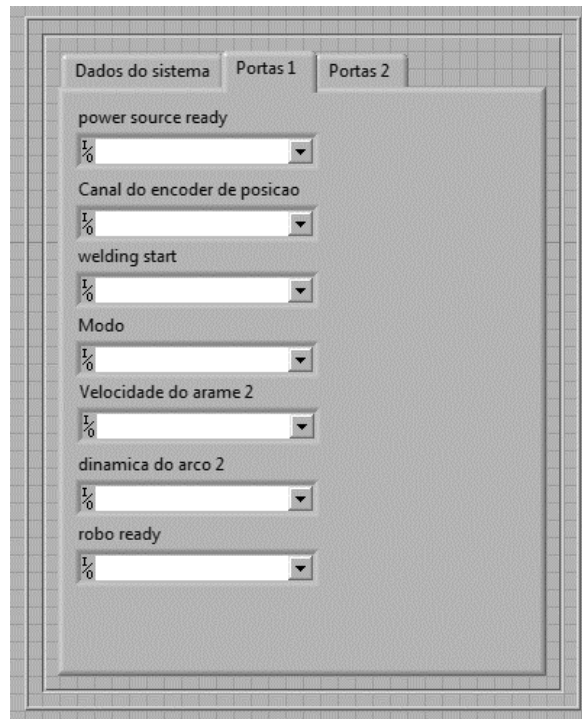


Figura 4.25. Módulo de Configuração do Sistema – Portas1

Esse módulo deve ser configurado antes que o processo de solda seja iniciado, na primeira aba dele se define parâmetros do processo como o raio do tubo em milímetros, ângulo inicial do processo de soldagem e ângulo final do processo de soldagem dados em graus, velocidade de rotação do tubo, em milímetros por segundo, assim como se os dados obtidos do processo serão gravados em disco.

Nas duas abas seguintes são especificados os endereços das portas que serão utilizados para a receber ou enviar dados para o ROB5000 através das placas USB N6009, caso o usuário queira mudar o meio de comunicação basta indicar o endereço das portas do novo meio de comunicação. Também na aba “portas2” pode ser definido o local onde os dados serão gravados em disco. Caso o usuário necessite de receber ou enviar algum parâmetro que não está disponível, basta adicioná-lo no painel “diagrama de blocos”.

O módulo de estatísticas do processo possui diversos displays gráficos onde se pode ver como alguns parâmetros evoluem com o tempo, como ângulo, velocidade, corrente e tensão de solda, este módulo também possui displays numéricos onde é possível ver em tempo real o tempo total do processo e tempo que a solda ficou ligada. Possui também dois seletores para ajuste de parâmetros, velocidade do arame e dinâmica do arco, e um botão de parada de emergência. A Figura 4.26 apresenta o módulo de estatísticas.

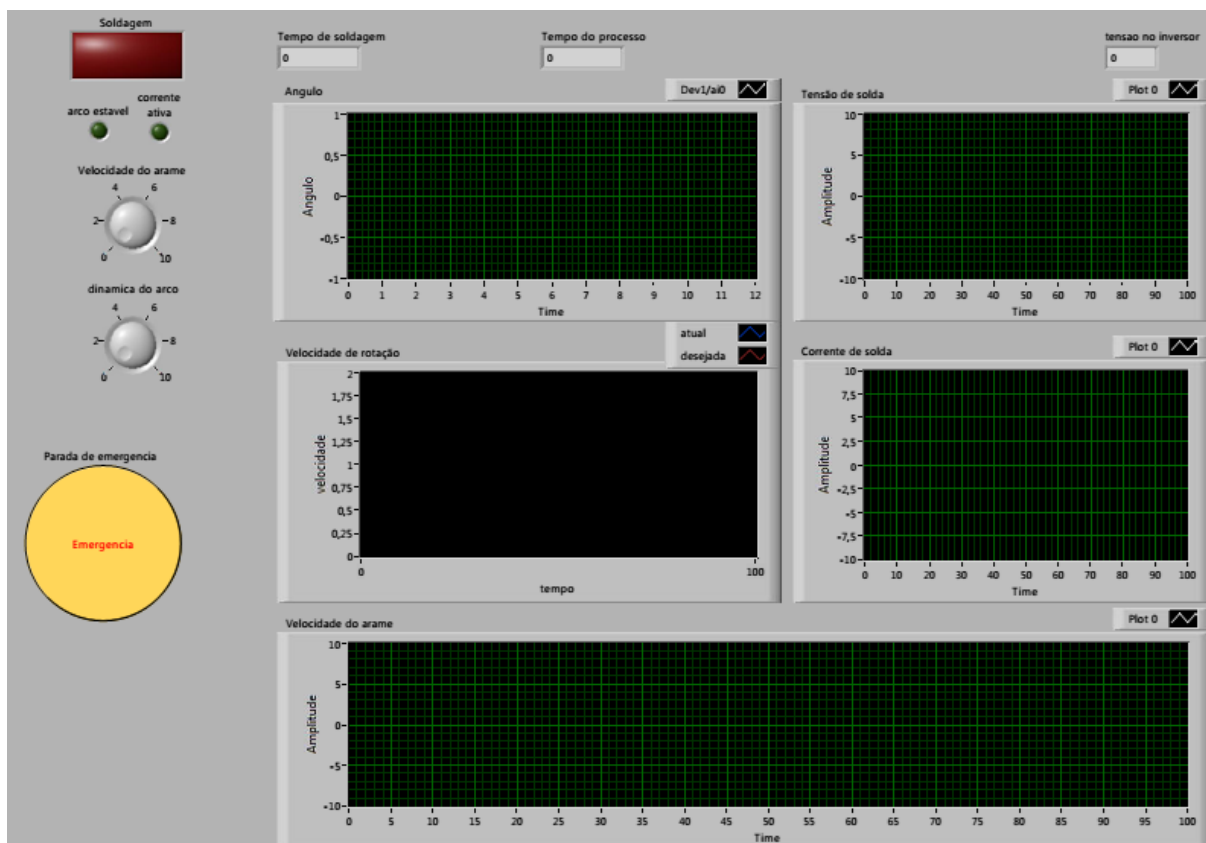


Figura 4.26. Módulo de Estatísticas do Processo

Foram utilizados displays gráficos com uma ou duas variáveis, de uma variável tem-se como exemplo o display Ângulo, nele é mostrada a variação do ângulo através do tempo, ele recebe 1000 pontos novos a cada segundo, todos os valores recebidos durante o processo são armazenados e o alcance dos eixos X e Y são definidos dinamicamente, quanto maior for a leitura ou tempo, maior será o valor máximo mostrado no display. A Figura 4.27 apresenta o display de ângulo.

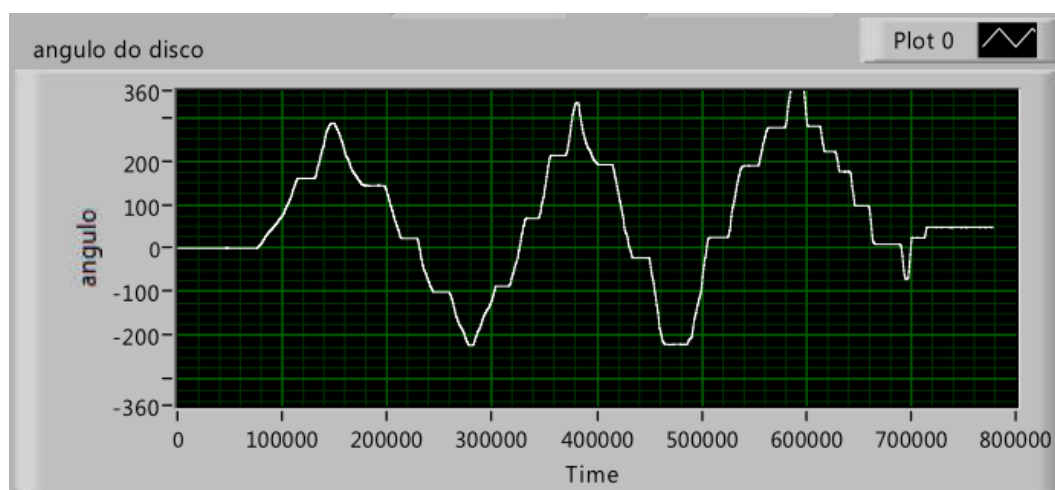


Figura 4.27. Display de ângulo

Como é mostrado na Fig 4.27 no canto superior direito, é possível ver o endereço da variável que está sendo mostrada, neste caso Dev1/ai0, o que quer dizer que este é o valor lido pela porta analógica 0 do dispositivo 1.

Como display de duas variáveis, tem-se como exemplo o display de Velocidade de rotação, nele apresentam-se todas as características do display de uma variável, explicado anteriormente, mas pode-se também verificar a diferença entre a velocidade instantânea e a velocidade desejada. A Figura 4.28 apresenta este display.

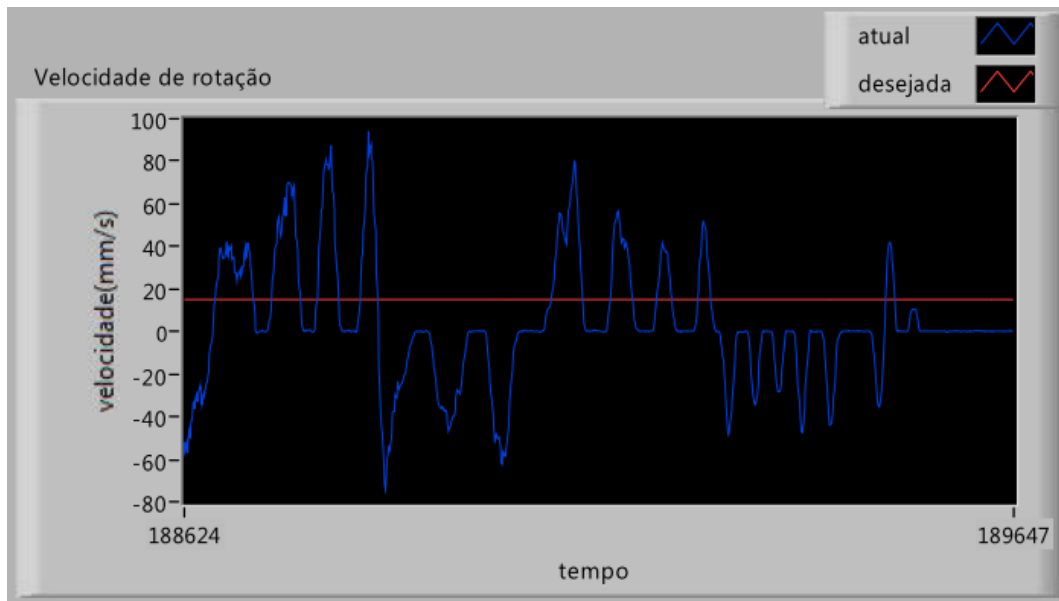


Figura 4.28. Display Velocidade de Rotação

Caso seja selecionado salvar os dados do processo, todos os parâmetros do sistema, assim como todos os pontos mostrados nos gráficos estarão disponíveis para uma análise posterior. Os gráficos estarão disponíveis como um conjunto de pontos que poderão ser recolocados a partir de quase todos os programas de análise de dados disponíveis no mercado, como MatLab, Excel entre outros.

A interface diagrama de blocos foi feita dentro de uma estrutura de “flat sequence” essa estrutura garante que o próximo estágio só será iniciado assim que todas as ações disponíveis no estado presente sejam completamente executadas. A Figura 4.29 apresenta essa estrutura, cada retângulo branco comporta blocos que deverão ser executados antes de se passar para o próximo retângulo.

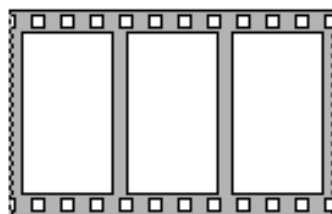


Figura 4.29. Estrutura “flat sequence”.

O código foi dividido em três estágios: o primeiro de configuração do sistema, segundo de loop e terceiro para salvar os dados, isso pode ser observado na Fig 4.30:

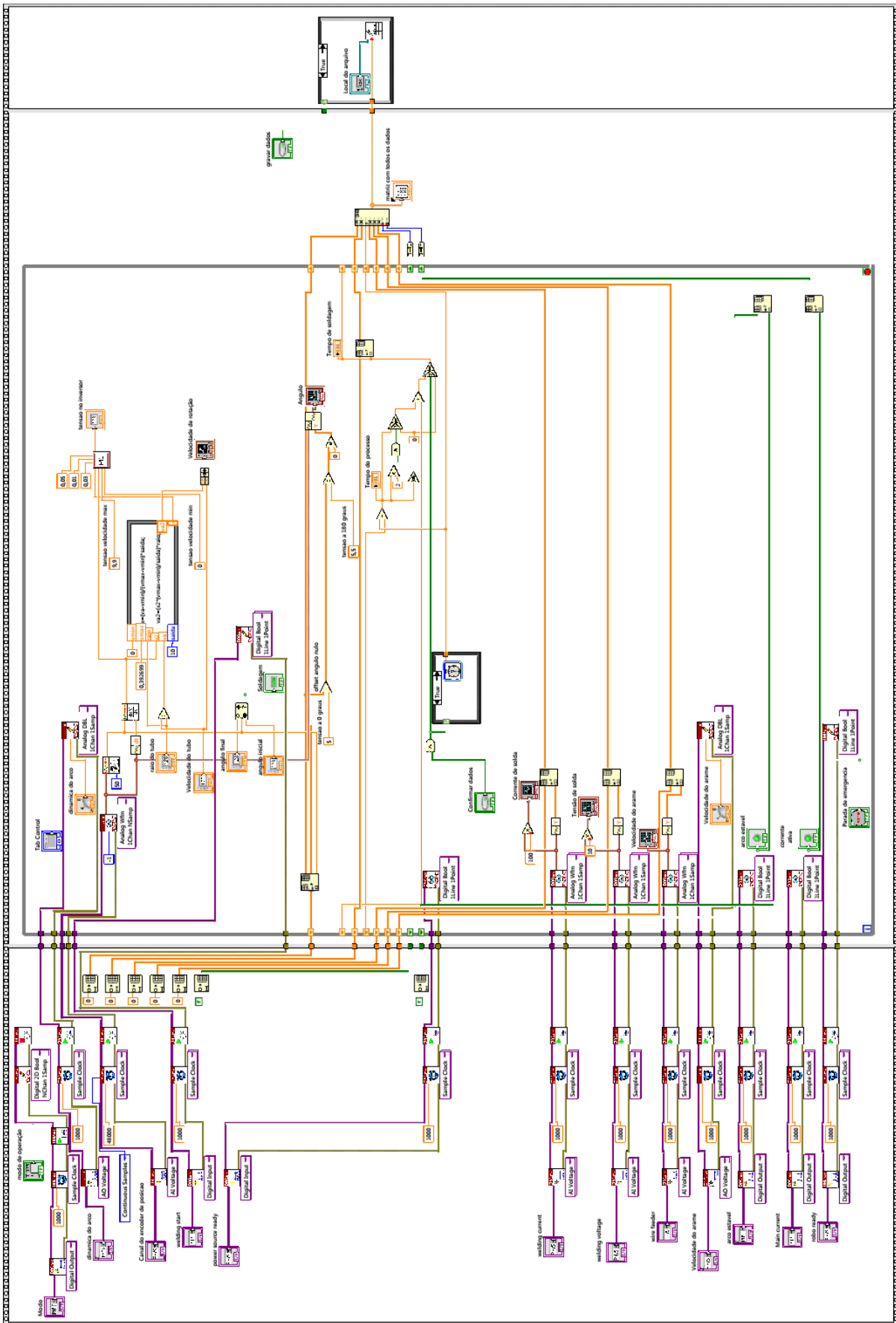


Figura 4.30. Interface Diagrama de Blocos.

No primeiro estágio é feita a alocação de espaço em memória e reserva das portas para as variáveis de entrada e saída. A Figura 4.31 apresenta essa configuração.

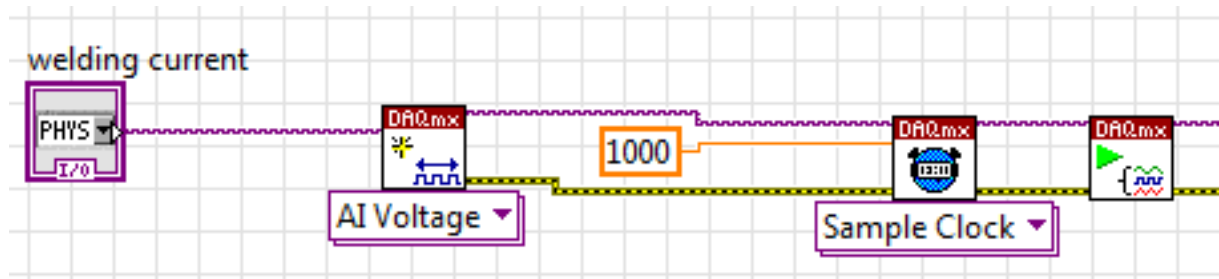


Figura 4.31. Diagrama de Blocos – Primeiro Estágio.

No primeiro bloco é onde se seleciona a porta física onde o programa vai ler/escrever a variável. No segundo é selecionado o tipo de variável, analógica ou digital, assim como se a variável será de entrada ou saída de dados, neste caso entrada analógica. No quarto bloco é selecionada a frequência com que essa variável será atualizada, neste caso 1000 vezes por segundo, assim como de onde vira o clock de referência, onde em sample clock é utilizado o clock do sistema. No último bloco, todas essas configurações são alocadas em memória e a porta selecionada é reservada para o programa e fica a espera de mais instruções.

Essa configuração foi repetida para todas as variáveis do sistema.

No segundo estágio do código, tem-se uma estrutura que deve ser adicionada em todas as variáveis que serão monitoradas pelo programa. A Figura 4.32 apresenta essa estrutura.

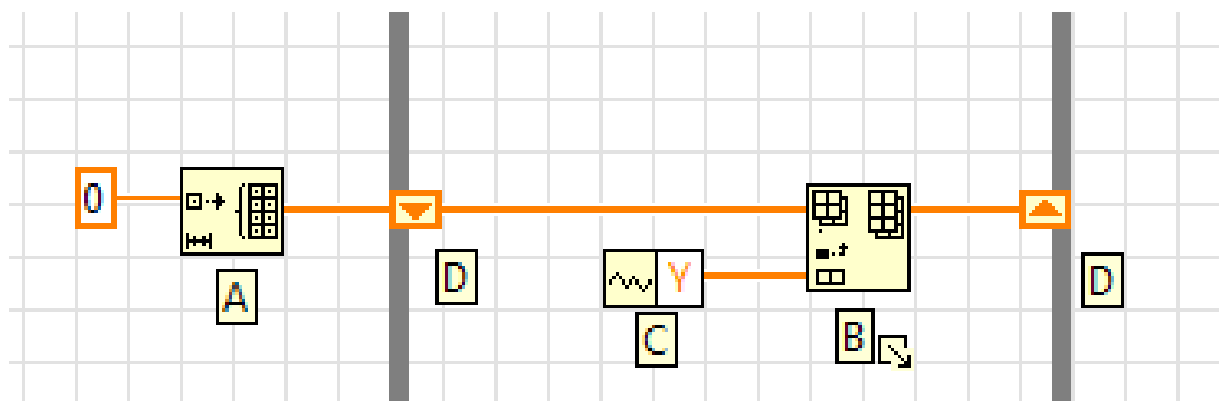


Figura 4.32. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio.

No bloco “A” é feita inicialização de um vetor vazio do tipo da variável a ser lido, nesse caso “double” ou seja números reais com 16 bits de precisão. No bloco “B” é feita a concatenação do vetor que entra na entrada superior com o elemento que entra na entrada inferior, de modo que o elemento anexado ao vetor fique ao final. O bloco “C” recebe uma forma de onda, com informação de tempo e amplitude, na sua saída tem-se apenas o valor referente a sua amplitude, nesse caso um número real. Os blocos “D” representam um registrador de deslocamento, que faz com que a saída do último ciclo seja colocada na entrada do próximo, fazendo assim com que o vetor nunca perca nenhum dos seus elementos.

Todas as variáveis que serão gravadas para posterior análise devem ser ligadas a entrada do bloco “C”, caso estejam em forma de vetor ou de onda, ou diretamente na entrada inferior de “B” caso seja apenas um elemento.

No final do segundo estágio todos os vetores obtidos no passo anterior, são colocados em uma matriz, onde cada coluna corresponde a um vetor, onde a primeira coluna corresponde ao tempo total do processo e a segunda corresponde ao tempo em que a tocha de solda ficou ativa. As demais colunas correspondem as variáveis de interesse do sistema. A Figura 4.33 apresenta essa matriz.

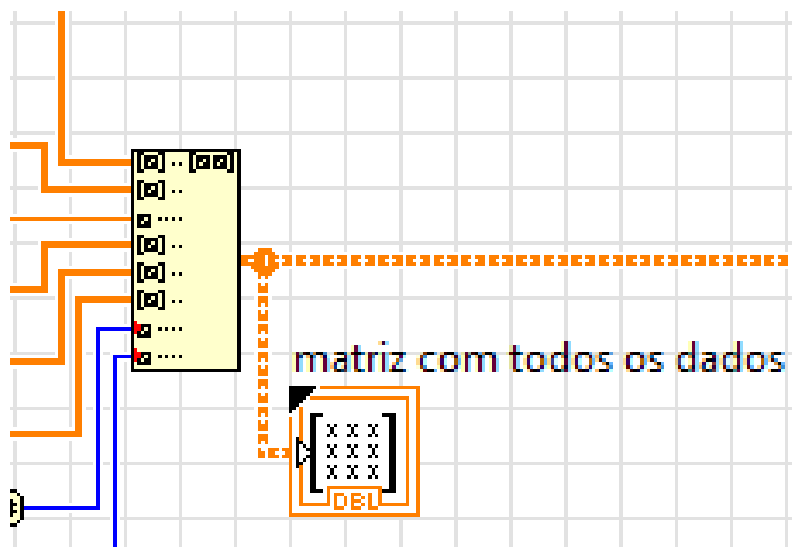


Figura 4.33. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Matriz de Dados.

As variáveis que precisam de ser lidas ou enviadas ao ROB5000 foram feitas utilizando a base mostrada nos dois módulos seguintes.

Primeiramente o módulo de leitura dos dados da fonte. Neste módulo é feita a leitura dos dados recebidos pela placa USB N6009, através do bloco Analog Wfm, onde é lido um vetor de cada vez, o valor analógico lido é convertido para o valor real do sistema, é depois é colocado no display adequado do painel frontal.

A Figura 4.34 apresenta o exemplo da Corrente de solda. Todas as variáveis lidas possuem uma forma semelhante a essa, sendo que a diferença está no tratamento do dado recebido e com a sua utilização, que pode ser recebida apenas para visualização, como neste caso, ou pode ser utilizada para os cálculos do sistema.

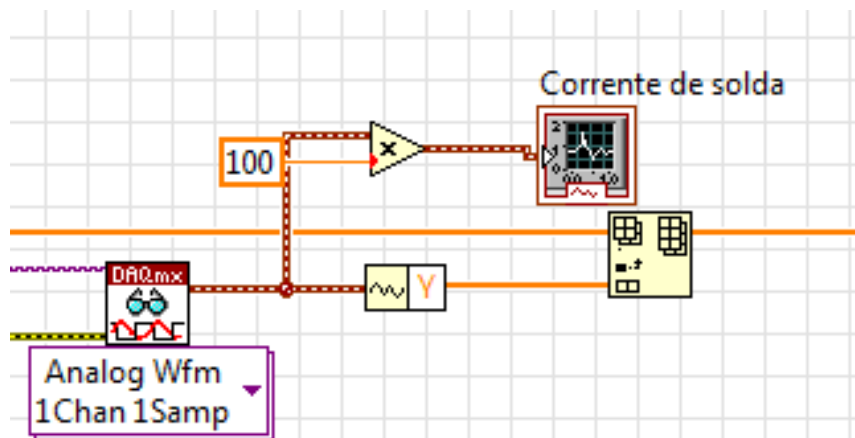


Figura 4.34. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Leitura da Corrente de Solda.

A seguir, tem-se o módulo de escrita dos dados para a fonte. Neste módulo é feita a escrita do dado na saída de dados da placa USB N6009 para leitura do ROB5000. A Figura 4.35 apresenta o caso da correção da velocidade de alimentação do arame. O bloco Analog DBL, se encarrega de escrever o seu valor atual. De modo similar foram implementadas todas as saídas do computador para a fonte.

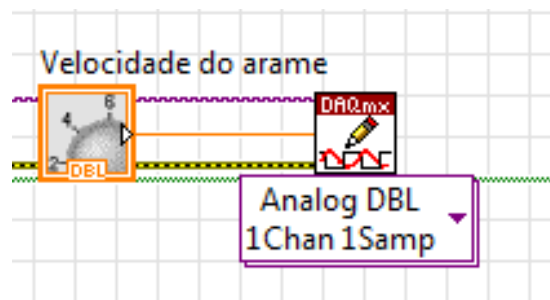


Figura 4.35. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Escrita da Velocidade do Arame.

Outro módulo muito importante que é utilizado neste estágio é o módulo de cálculo de tempos. A Figura 4.36 apresenta este módulo.

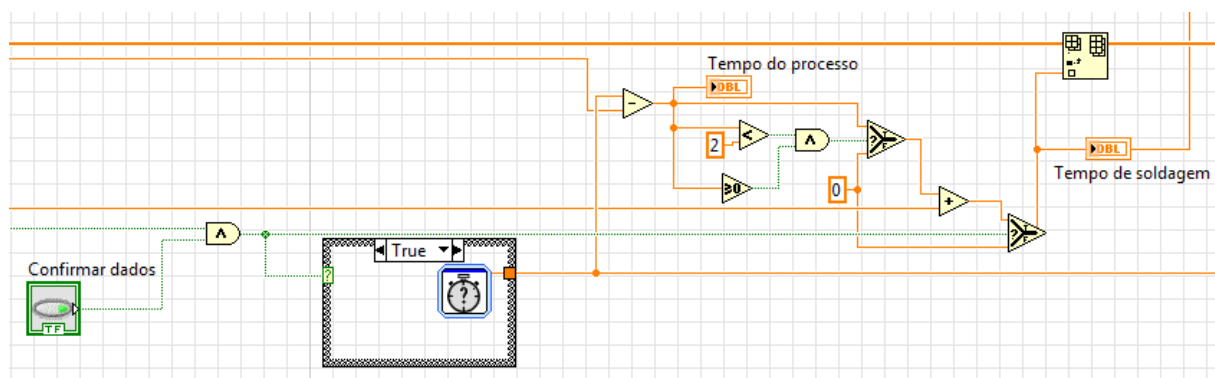


Figura 4.36. Diagrama de Blocos – Segundo Estágio – Cálculo do Tempo de Soldagem.

Neste módulo, assim que o usuário confirma os dados e iniciada a contagem do tempo do processo, ele subtrai do tempo atual do sistema o tempo em que a contagem foi iniciada. O tempo de soldagem retorna a zero cada vez que a tocha é desligada e quando ela é religada

o tempo começa a andar novamente, possibilitando a correta contagem do tempo que a tocha ficou ligada caso mais de um processo de solda seja feito na mesma utilização do programa.

O terceiro estágio checka se o usuário quer gravar os dados ou não, caso ele queira salvar, será criada uma planilha no local selecionado anteriormente e após salvar os dados o programa será finalizado, caso não seja necessário gravar os dados, o programa é finalizado imediatamente ao entrar neste módulo. A Figura 4.37 apresenta este módulo.

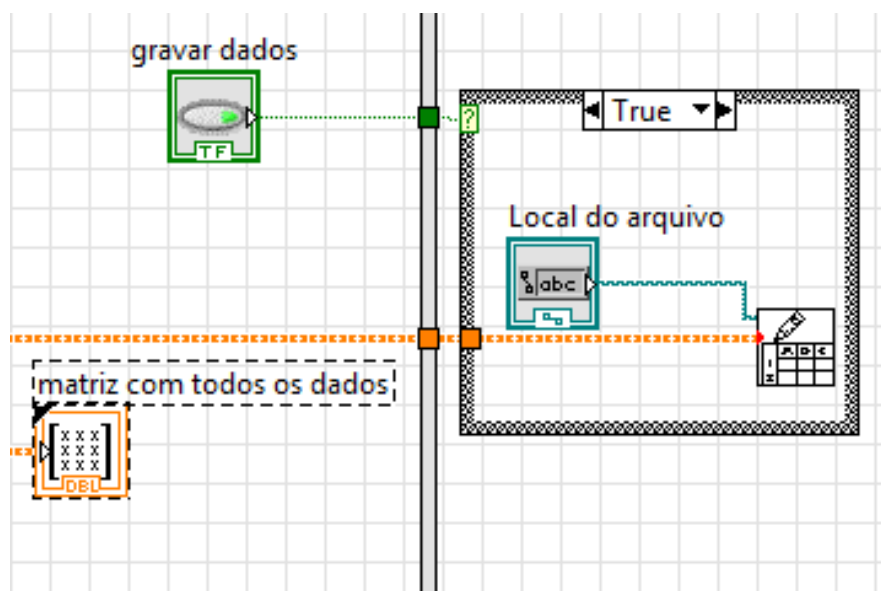


Figura 4.37. Diagrama de Blocos – Terceiro Estágio.

A Figura 4.38 apresenta um pequeno esquemático do programa. O programa recebe três tipos de entradas: os dados provenientes do ROB 5000, os sinais dos sensores e os parâmetros fornecidos pelo usuário. As etapas mostradas na Figura 4.14 com um disco verde são apresentadas ao usuário na interface do programa, as etapas com um contorno preto são sinais digitais.

Os dados provenientes do ROB 5000 são usados para o monitoramento do processo de soldagem, o programa apenas apresenta-os para o usuário, com exceção do sinal que indica que a fonte está pronta, pois ele é usado para habilitar o início do programa.

Os sinais dos sensores são usados para calcular a posição e velocidade de soldagem, usando também o parâmetro de diâmetro do tubo fornecidos pelo usuário. O programa compara estes dados com os dados de velocidade de soldagem e posição de início e final da soldagem fornecidos pelo usuário para realizar o controle do motor e da fonte de soldagem.

Os parâmetros fornecidos pelo usuário são, em sua maioria, sinais utilizados pelo ROB 5000 para o controle da fonte, estes sinais são enviados ao ROB 5000. Além destes sinais e dos outros sinais abordados anteriormente, é fornecido os sinais de início do programa e de parada de emergência.

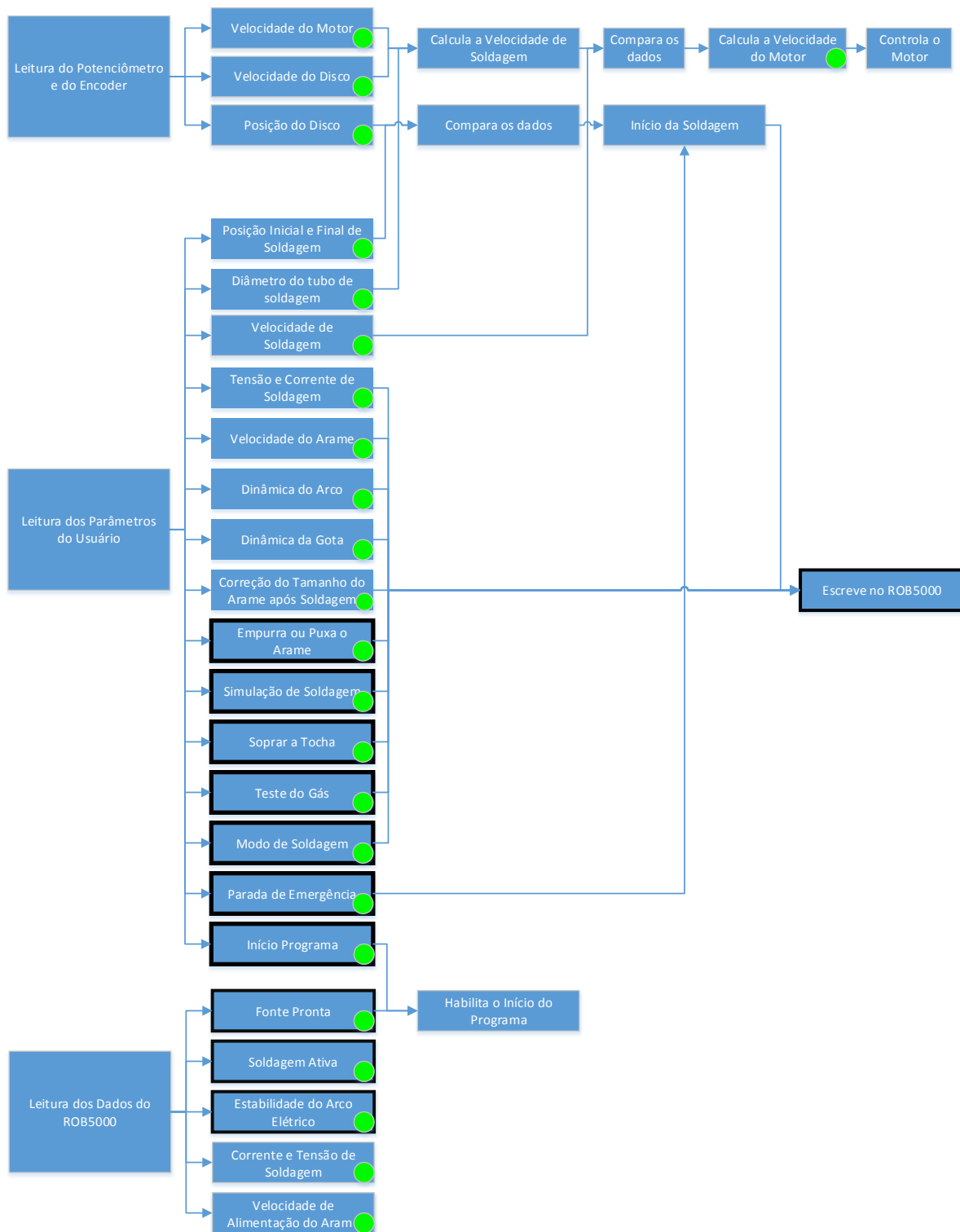
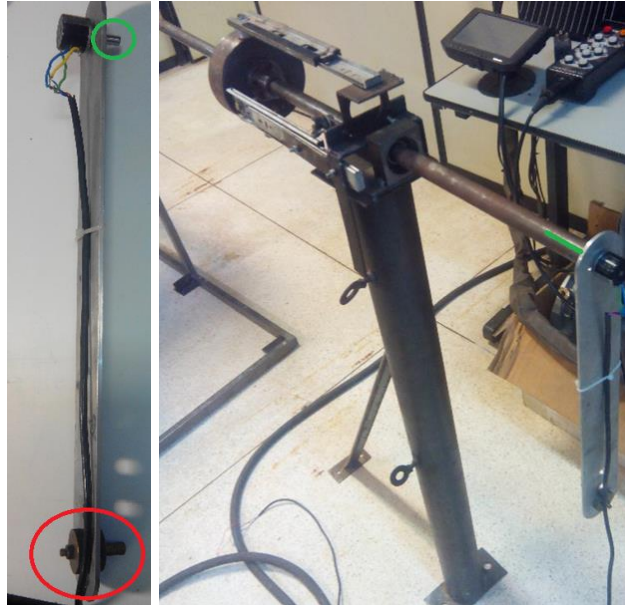


Figura 4.38. Esquemático do Programa de LabView

4.3.4 Medição de Velocidade e Posição

O Programa necessita de dados de velocidade e posição do disco. Esses dados são enviados por dois sensores, um potenciômetro, que marca a variação de ângulo do disco e, com esse dado, consegue-se calcular sua velocidade, e um encoder de rotação, que mede a velocidade do motor. O potenciômetro é acoplado ao final do sistema de alinhamento e roda junto do eixo

fixado no disco para medir sua posição, já o encoder está diretamente conectado ao motor ou no adaptador que fica entre o eixo do motor e o da caixa de redução. As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 apresentam esses dispositivos.



Figuras 4.39 e 4.40. Potenciômetro – Desacoplado Sobre a Mesa e Acoplado à Bancada



Figura 4.41. Encoder

O pequeno eixo do potenciômetro marcado em verde na Fig. 4.39 se encaixa no eixo que se acopla ao disco na parte marcada em verde na figura 4.40. Ao final da haste fixada no potenciômetro, na parte marcada em vermelho na Fig. 4.39, é posto um peso para que esta haste sempre aponte para baixo, mesmo durante o funcionamento da bancada e, conseqüentemente, o giro do eixo.

A Figura 4.42 ilustra essa composição. As setas verdes representadas nesta figura mostram o giro do eixo, que acompanha o giro do disco, e a seta vermelha mostra a direção que a haste irá apontar.

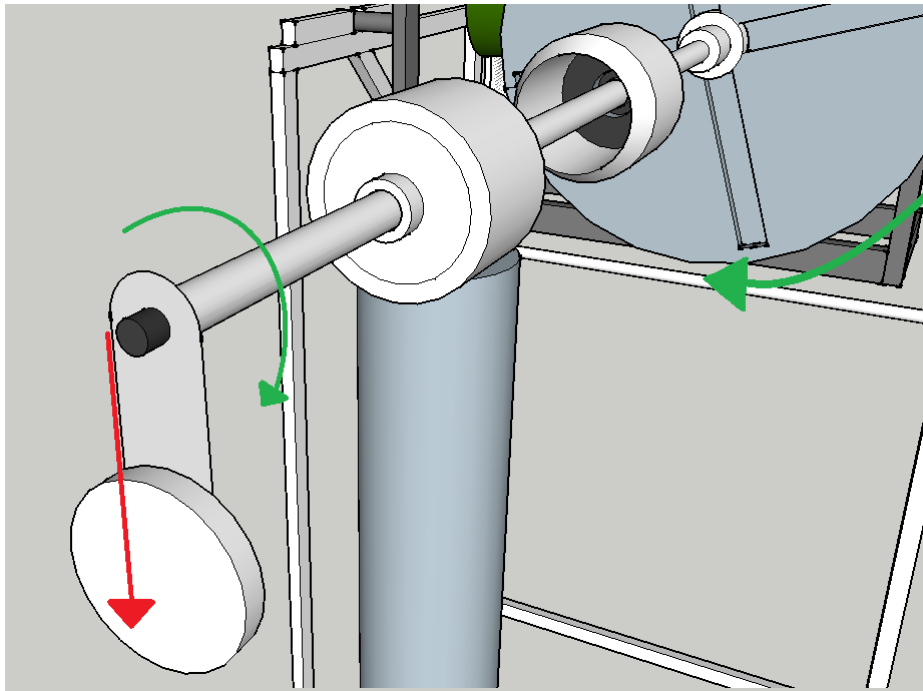


Figura 4.42. Funcionamento do Potenciômetro.

O giro do disco produz um giro no eixo do potenciômetro, porém a haste impede que sua caixa gire. Assim o valor da resistência do potenciômetro varia de acordo com o giro do disco.

CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

5.1 SISTEMA DE FIXAÇÃO

A base de fixação foi um pouco alterada para ter mais rigidez. Não foi feita uma análise de esforços dinâmicos na bancada, pois a aceleração fornecida pelo motor é relativamente baixa, como foi calculada na parte 4.1.1. Tendo em vista também que dependendo da angulação da bancada os esforços dinâmicos possuem orientações completamente diferentes, optou-se por criar um reforço de tipo treliça, eliminando possíveis vibrações em diferentes sentidos na bancada.

Durante a soldagem, pequenos movimentos errados, cerca de milímetros, podem prejudicar muito a solda, por isso foram adicionadas barras para melhorar sua rigidez e o eixo de apoio do eixo que realiza a angulação da bancada foi elevado para que ele ficasse na posição horizontal e não vertical. Além disso, no projeto inicial, a bancada teria rodas para seu deslocamento no laboratório, porém as rodas proporcionavam demasiada instabilidade a ela, por isso as rodas foram removidas e foram inseridas pequenas bases para parafusar a bancada no chão se necessário. A figura 5.1 mostra em vermelho as modificações na bancada e em azul o eixo de angulação.

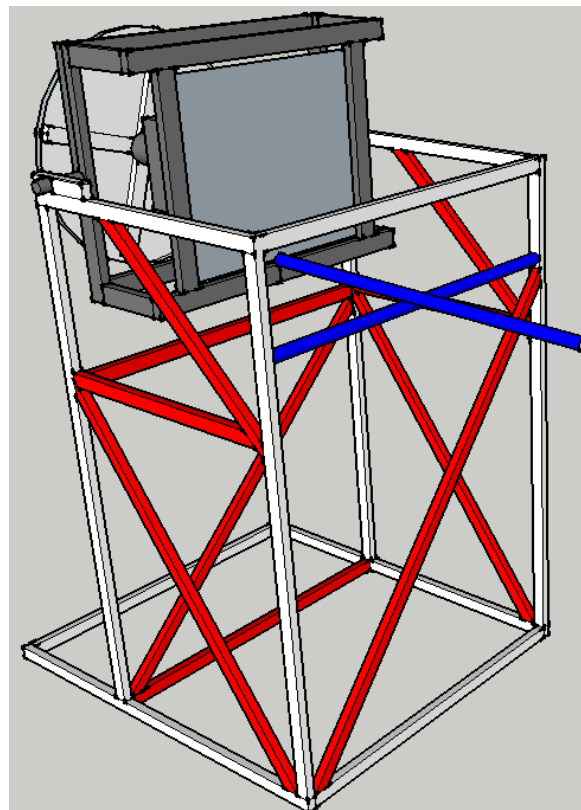


Figura 5.1. Alterações no Sistema de fixação.

Além disso, foram colocadas chapas na parte inferior da base para que ela possa ser fixada no chão, se necessário. Cada chapa possui quatro pequenos furos para parafusos.

Inicialmente se pensou em colocar rodinhas com freios na bancada para que ela pudesse ser deslocada dentro do laboratório com mais facilidade. Porém essa alternativa se mostrou equivocada, pois, mesmo acionando os freios, as rodinhas tinham certa folga e giro no eixo perpendicular ao solo, o que gerava grande instabilidade, por isso não se aconselha a utilização de rodas nessa estrutura. O padrão de rodinhas necessitava das seis chapas, que foram mantidas, para fixar a bancada no solo apenas as quatro chapas mais afastadas serão suficientes. As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam essas chapas, a chapa da Fig. 5.2 é a chapa mais brilhante da Fig 5.3.



Figuras 5.2 e 5.3. Sistema de Fixação – Chapa de Fixação e Parte Inferior da Base.

As figuras 5.4, 5.5 mostram como ficou a bancada.



Figuras 5.4 e 5.5. Sistema de Fixação – Posição de Estabilidade e Posição de Trabalho.

5.2 CALIBRAÇÃO

Para o correto funcionamento do programa foi necessário descobrir alguns parâmetros, o primeiro e mais importante deles é a velocidade máxima de rotação do disco e seu comportamento ao apresentarmos diversas tensões de entrada no inversor de frequência.

Esse teste foi realizado sem nenhuma carga no disco, gerando os dados da tabela a baixo:

Tabela 5.1. Dados Colhidos para a Medição da Velocidade do Motor

Tensão	Numero De Voltas	Tempo (S)
0	0	
1,25	1	02:05:25
2,5	4	03:52:32
5	5	02:26:01
7,5	10	03:12:58
9,78	15	03:38:19

Ao se aplicar a tensão de 0V o motor gira a uma velocidade muito baixa, estando ele praticamente parado. Quando é enviado 10V para o inversor, ele tenta acelerar o motor a sua velocidade máxima, mas nessa situação o motor necessita de uma corrente muito próxima do limite que o inversor consegue fornecer, sendo necessário acelerar o motor lentamente de modo que ele chegue à velocidade máxima sem nenhum pico de corrente que desative o inversor. Deste modo não é recomendado o uso de tensões muito próximas do valor limite, pois isso pode fazer com que o processo de soldagem tenha erros devido a velocidade de rotação do disco. Além disso, a introdução de carga irá requerer mais corrente do inversor e, como apresentado na parte 4.1.1, a carga aplicada ao motor varia de forma senoidal de acordo com o ângulo do produto vetorial da força peso da carga e sua distância ao centro do disco, equação (8).

Com base nos dados da tabela anterior, foi feita a Tab. 5.2, que relaciona a velocidade de rotação do disco com a tensão enviada ao inversor.

Tabela 5.2. Velocidade de Rotação do Disco

tensão	Velocidade (graus/segundo)
0	0
1,25	2,87
2,5	6,2
5	12,32
7,5	18,69
9,78	24,75

O próximo teste realizado foi para obter uma relação entre o ângulo do disco e a saída no potenciômetro. Este teste foi feito realizando giros de 360 graus no disco, no sentido horário ou anti-horário, a escolha de passos de 360 graus para esse teste é baseada no fato de o sistema se orientar com a gravidade, ou seja, ao se deixar o disco parado e se fazer com que o sensor gire uma volta completa e fique livre para oscilar, ao atingir sua posição de repouso terá efetuado exatamente uma volta, ou seja 360 graus, diminuindo assim o erro de posicionamento. Foram obtidos os seguintes resultados, partindo de uma posição arbitrária do transdutor:

Tabela 5.3. Tensão do Potenciômetro por Volta

Voltas (sentido horário)	Tensão lida (V)
-1	2,034
0 (posição inicial)	2,557
1	3,083
2	3,601

Com base nos resultados obtidos, a variação média de tensão por volta é de 0,522V, ou seja 0,522V/360 graus, que pode ser escrito como 0,0015 volts por grau. Com este valor foi feita a conversão da tensão para o deslocamento do disco.

5.3 TESTES

Para o sistema conseguir ler a posição de entrada e a velocidade de rotação do disco é necessário o uso de um sensor ou conjunto de sensores que transformem a variação da posição do disco e sua velocidade de rotação em variáveis elétricas.

Visando reduzir o custo dos sensores, o primeiro a ser analisado foi um potenciômetro de várias voltas. Nele a variação angular é linearmente convertida na variação da resistência entre seus terminais. Este tipo de transdutor possui a vantagem de guardar fisicamente o valor de sua variação, de modo que em falta de energia ou se desligarmos o equipamento, quando o sistema ficar online novamente a informação do ângulo que ele se encontrava estará imediatamente disponível para o sistema. Mas, por outro lado, a posição inicial é indefinida e um valor de tensão diferente do nulo estaria associado à esta posição. Uma grande desvantagem deste transdutor é que como o valor de saída dele depende diretamente da sua tensão de entrada, todos os ruídos que a o sistema ou a fonte transmitam causam variação no seu valor de saída. Para contornarmos o problema da sensibilidade do transdutor a ruídos foi empregado um cluster de sensores, ou seja, agrupar sensores de modo a aumentar a precisão da sua leitura.

O segundo sensor escolhido para fazer parte do conjunto foi um encoder angular incremental. Esse tipo de equipamento gera um trem de pulsos ao sofrer deslocamento, cada pulso corresponde a um “passo” (menor medida do sensor), quando contado o número de pulsos gerados e multiplicando este valor pelo “passo” do sensor é obtido o deslocamento angular do sensor.

Como descrito anteriormente, o sistema de aquisição de dados é a placa USB N6009 da National Instruments. Depois de serem implementadas várias possíveis soluções de como utilizar o encoder nesta placa sem sucesso, em contato com o suporte técnico da National Instruments, foi constatado que a placa de captura de dados não suporta esse tipo de sensor, devido a limitações de suas portas de entrada de dados. A solução para isso seria o desenvolvimento de um driver à parte para a compatibilização do sensor à placa, isso não foi empregado neste trabalho.

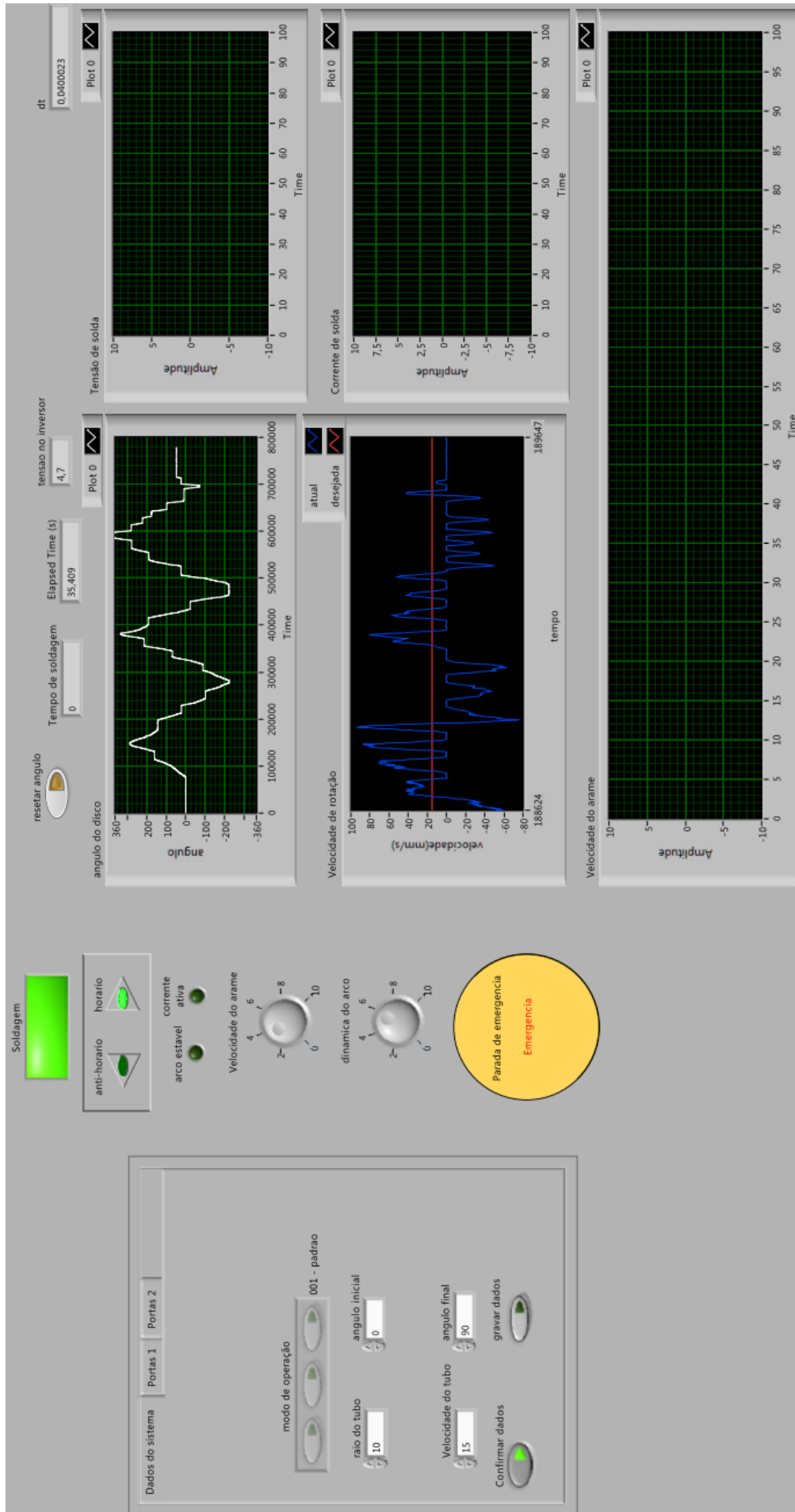
Visando contornar a falta deste sensor, o programa de controle foi um pouco alterado. Nada em sua estrutura descrita anteriormente foi alterada, mas algumas funcionalidades foram implementadas. Estas funcionalidades implementadas são facilmente visualizadas no Painel Frontal.

O botão resetar ângulo foi implementado para zerar o valor do potenciômetro para que aquele seja considerado o ângulo inicial da soldagem. Isso não foi implementado automaticamente para a pessoa poder utilizar o mesmo ângulo, como no caso de para o processo e continuá-lo em seguida. Um display de sentido do ângulo foi implementado, isso é oriundo da tensão fornecida, mas poderia ser medido se o encoder angular incremental tivesse sido implementado. A Figura 5.6 apresenta estas novas funções do painel frontal.

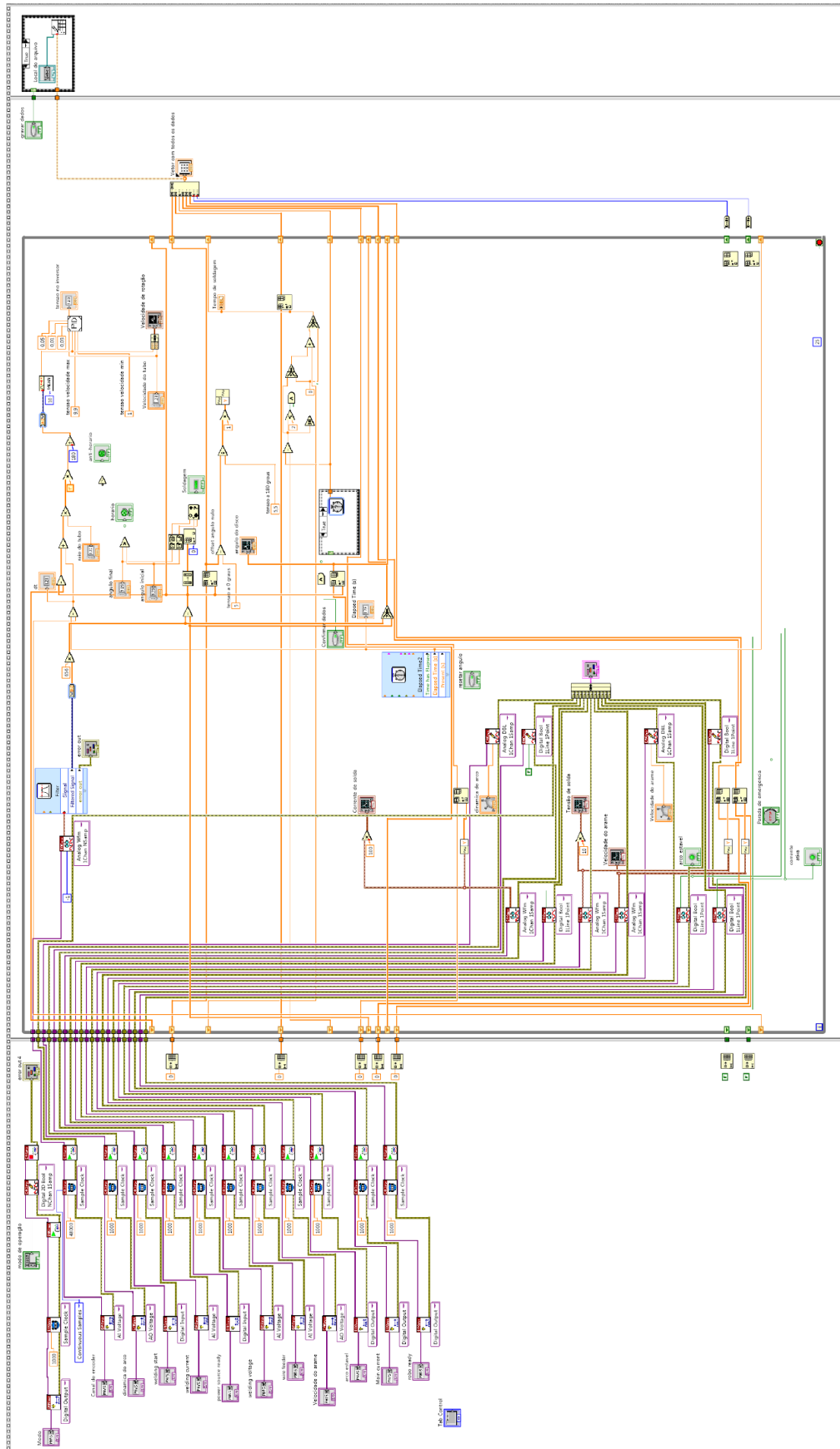


Figuras 5.6. Novo Painel Frontal – Detalhe de Sentido de Rotação e Botão de Reset.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam as novas interfaces do programa.



Figuras 5.7. Novo Painel Frontal.



Figuras 5.8. Novo Diagrama de Blocos.

À primeira vista pode parecer que o diagrama de blocos foi muito alterado, pois a Fig. 5.8 é muito diferente da Fig. 4.30. Porém poucos blocos foram mudados, o LabView altera demasiadamente a dispersão de blocos ao reorganizá-los, ainda que os blocos sejam os mesmos.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

A partir dos conceitos apresentados no Capítulo 2 deste trabalho foi possível projetar uma bancada para utilização em soldagem orbital. O estudo das técnicas de soldagem foi indispensável para a formulação do programa de controle. A maior dificuldade deste trabalho foi deixar a estrutura estável o suficiente para não haver vibrações durante a soldagem, o que poderia arruinar a solda. A complexidade dos cálculos de esforços dinâmicos inviabilizou um estudo mais aprofundado de um sistema de sustentação. A base da bancada foi reforçada para que não houvesse vibrações, porém um estudo mais detalhado da análise de vibrações considerando a bancada atual e utilizando a carga máxima dela pode ser realizado para a construção de uma futura bancada com uma estrutura de sustentação feita especificadamente para este caso.

Os testes foram realizados com o sistema de soldagem desligado e talvez seja necessário aumentar a rigidez da bancada para casos em que se pretenda usar tubos grandes, porém a estrutura está robusta o suficiente para a soldagem de tubos de 12 cm de diâmetro, mas, dependendo das necessidades dos estudos realizados nela, pode-se precisar de melhorias. Algumas melhorias possíveis foram descritas no Capítulo 2, mas não foram efetivadas pois elas fugiam das especificações iniciais. O projeto da bancada atendeu-se à sua proposta e, dentro disso, foi considerado bem sucedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG/DEMET, 2012. 209 p.
2. ESAB. **Regras para Segurança em soldagem, goivagem e corte ao arco elétrico..**]. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostila_seguranca_na_soldagem_rev1.pdf>. Acesso em: 4 Fevereiro 2015.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY. **Safety in welding, cutting and allied processes**. Disponível em: <<http://www.aws.org/technical/facts/Z49.1-2005-all.pdf>>. Acesso em: 4 Fevereiro 2015.
4. SILVA, R. H. G. E. **DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO COM CONTROLE DE CORRENTE PARA APLICAÇÃO EM PASSES DE RAIZ**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/mig_mag_cc.php>. Acesso em: 4 Fevereiro 2015.
5. ABREU, B. A. D.; DUTRA, J. C.; BROERING, C. E. Florianópolis SC: Laboratório de Soldagem, LABSOLDA, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0641_05.pdf>. Acesso em: 4 Fevereiro 2015.
6. FRONIUS INTERNATIONAL GMBH. **Orbital welding facts**. Áustria: FRONIUS, 2010. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/fronius_international/Orbital-welding_facts_en.pdf>. Acesso em: 31 de Março de 2014.
7. CAYO, E. H. **Modelagem e Controle da Soldagem Orbital Através do Processo GMAW-S**. Brasília, DF: ENM.TD-04/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2013. 127 p.
8. LUKKARI, J. **Orbital TIG - A Great Way to Join Pipes**. The ESAB Welding and, 2006. 60 p.
9. ALDO S. PEREIRA, AUGUSTO J. A. BUSCHINELLI, NORTON Z. KEJELIN. **Avaliação da Perfuração na Soldagem em Operação pelo Processo MIG/MAG de Dutos de Alta Resistência e Baixa**. UTFPR, DAMEC, Curitiba, UFSC, EMC/LABSOLDA, Florianópolis, Faculdade SATC, Departamento de Eng^a Mecânica, Criciúma, 2013.
10. NOVICKI, N. **APLICAÇÃO DA ASPERSÃO TÉRMICA NA SOLDAGEM EM OPERAÇÃO DE TUBULAÇÕES COM PEQUENA ESPESSURA REMANESCENTE**. Florianópolis: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2008. 207 p.
11. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/FDIS 6947 2010(E) - Welding and allied processes — Welding positions**. Geneva: ISO, 2010. 24 p.
12. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME boiler and pressure vessel code. Section IX - Welding and brazing qualifications**. Nova York: ASME, 2010. p. 36-37.
13. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A3.0M/A3.0 Standard Welding Terms and Definitions**. Miami, US-FL: AWS, 2010. 162 p.

14. BERGGREN, K.; STIELE, H. **Induction Heating - A Guide to the Process and Its Benefits**. Julho de 2012. Disponível em:
<<http://www.gearsolutions.com/article/detail/6216/induction-heating-a-guide-to-the-process-and-its-benefits.html>>. Acesso em: 31 de Março de 2014.
15. BODE. **BODE CONVENTIONAL ROTATORS**. Disponível em:
<<http://www.bode.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/Conventional-Rotators-2.pdf>>.
16. BODE. **BODE SELF-ALIGNING ROTATORS AND BODE TRAVERSING SELF-ALIGNING ROTATORS**. Disponível em: <<http://www.bode.co.uk/wp-content/uploads/2014/11/Self-Aligning-Rotators1.pdf>>.
17. PROARC. **Welding Positioners**. Disponível em: <<file:///C:/Users/Snalis/Desktop/SD-4010BE.pdf>>.
18. RED ROCK. **POSITIONIERUNGS- UND HANDLING- EQUIPMENT**. Disponível em: <<http://www.redrockautomation.com/RedRockBrochure2013.pdf>>.
19. BODE. **CONVENTIONAL POSITIONERS**. Disponível em:
<http://www.westermans.com/downloads/conventional_positioners.pdf>.
20. PROARC. **Headstock-Tailstock Positioners**. Disponível em:
<<http://www.proarc.com.tw/en/download>>.
21. LINCOLN ELECTRIC. **APEX™ 2000 ORBITAL WELDING SYSTEM**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/K52082-1/e9620.pdf>>.
22. LIBURDI DIMETRICS. **Full Function in Place Orbital Pipe Welding Heads**. Disponível em: <http://www.westermans.com/downloads/ffip_datasheet.pdf>.
23. ARC MACHINES, INC. **Model 79 Full-function weld heads**. Disponível em:
<http://www.westermans.com/downloads/0773_0001.pdf>.
24. ARC MACHINES, INC. **SMALL-BORE ID Pipe Weld Head**. Disponível em:
<<http://www.criticalsystemsinc.com/wp-content/uploads/2013/08/M73-Small-Bore-ID-Pipe-Weld-Head.pdf>>.
25. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados amostrais e estimativas populacionais das medianas de altura e peso da população, por sexo, segundo a idade e os grupos de idade - Distrito Federal - período 2008-2009**. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pof/2008_2009_en_caa/tabelas_pdf/tab3_27.pdf>. Acesso em: 8 Janeiro 2015.
26. VALDÉS, E. G. **Mesa osionadora de soldagem**. Brasília: Universidade de Brasília, v. Departamento de Engenharia Mecânica, 1999.
27. WEG. **Motores Elétricos - Guia de Especificação**. 2014. Disponível em:
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 5 Fevereiro 2015.
28. GRAVIA. **Catálogo Técnico**. Disponível em:
<<http://www.gravia.net.br/visualizar/catalogo-tecnico>>. Acesso em: 9 Janeiro 2015.
29. ARCELORMITTAL. **Guia do Aço**. 2003. Disponível em:
<<http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>>. Acesso em: 5 Fevereiro 2015.
30. HARD. **Boletim Técnico - HARD Barra Roscada**. Disponível em:
<<http://www.hard.com.br/wp-content/uploads/2013/01/boletim-barra-roscada.pdf>>. Acesso em: 9 Janeiro 2015.

31. FRONIUS. **TransSynergic 4000 / 5000 TransPuls Synergic 2700 TransPuls Synergic 3200 / 4000 / 5000 TIME 5000 Digital.**
32. NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications.** Disponível em: <www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>.