



# **Melhoria e Otimização de um Sistema Automático de Soldadura**

David Neves Nascimento

Relatório Final da Dissertação apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Outubro de 2023



# **Melhoria e Otimização de um Sistema Automático de Soldadura**

David Neves Nascimento

Relatório Final da Dissertação apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em

ENGENHARIA INDUSTRIAL

Orientadores do Instituto Politécnico de Bragança:

Prof.º Dr. João Ribeiro

Prof.º Dr. José Gonçalves

Outubro de 2023

Dedico este trabalho a todos aqueles que de uma forma ou de outra  
contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus orientadores João Ribeiro e José Gonçalves pela orientação e ajuda ao longo do período de trabalho, que apesar do seu tempo limitado estavam sempre dispostos para ajudar e a dar suporte para melhorar.

Uma dedicatória especial ao Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade que me foi confiada de trabalhar nos laboratórios da Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, dando total disponibilidade para trabalhar com os seus equipamentos e ferramentas, um obrigado especial aos técnicos de laboratório, Jorge Paulo e Abílio Marcelo pelo auxílio prestado.

Tenho uma imensa gratidão também por todas as pessoas que me ajudaram e me apoiaram ao longo deste processo, a todos os meus amigos, principalmente ao Bruno Olavo Marinho que teve um papel importante no auxílio da conceção da parte eletrônica do projeto.

Agradeço também aos meus pais pela oportunidade de estudar, pelos sacrifícios feitos e pela paciência, eles que foram os meus pilares nesta época tão trabalhosa e foram a minha fonte de força para avançar e nunca desistir.

Um bem-haja a todos os que contribuíram.

## Resumo

Esta dissertação aborda a otimização de uma Máquina de Controle Numérico Computadorizado (CNC) para realizar solda 3D, uma técnica promissora na fabricação de estruturas metálicas complexas. O projeto, originado por uma atribuição específica, evoluiu de uma CNC inicialmente inoperante para uma máquina funcional e eficiente.

O estudo detalha a estrutura e componentes da CNC, destacando três graus de liberdade nos eixos X, Y e Z, essenciais para movimentos precisos. A máquina, inicialmente apresentando problemas elétricos e de movimentação, passou por uma revisão completa, incluindo a substituição da fonte de alimentação, a reorganização das ligações e a lubrificação dos componentes mecânicos.

O foco na solda 3D guiou a otimização, resultando em experimentos detalhados para aperfeiçoar parâmetros como aceleração e velocidade. Além disso, a adaptação do sistema elétrico para integrar a tocha de soldagem e a resolução de falhas durante a comunicação com o software Gcode Sender foram etapas fundamentais.

O êxito do projeto não apenas transforma a CNC em uma ferramenta de solda 3D funcional, mas também estabelece uma base para estudos futuros. O manual do utilizador em anexo oferece um guia passo a passo para operar a máquina otimizada. Este trabalho destaca a importância da otimização na automação industrial, demonstrando como desafios técnicos podem ser superados para impulsionar a eficácia operacional e explorar novas fronteiras tecnológicas.

## Abstract

This dissertation addresses the optimization of a Computer Numerical Control (CNC) Machine for 3D welding, a promising technique in the manufacturing of complex metal structures. The project, initiated by a specific assignment, has evolved from an initially non-operational CNC to a functional and efficient machine.

The study details the structure and components of the CNC, highlighting its three degrees of freedom in the X, Y, and Z axes, essential for precise movements. The machine, initially plagued by electrical and movement issues, underwent a comprehensive review, including the replacement of the power supply, reorganization of connections, and lubrication of mechanical components.

The focus on 3D welding guided the optimization process, resulting in detailed experiments to refine parameters such as acceleration and speed. Additionally, adapting the electrical system to integrate the welding torch and resolving communication issues with the Gcode Sender software were crucial steps.

The success of the project not only transforms the CNC into a functional 3D welding tool but also establishes a foundation for future studies. The attached user manual provides a step-by-step guide for operating the optimized machine. This work highlights the importance of optimization in industrial automation, demonstrating how technical challenges can be overcome to boost operational efficiency and explore new technological frontiers.

# Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo .....	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras.....	x
Índice de tabelas.....	xiii
1. Introdução.....	- 1 -
1.1. objetivos.....	- 2 -
1.2. Organização do trabalho .....	- 3 -
2. Fundamentação teórica .....	- 4 -
2.1. Introdução ao projeto mecânico .....	- 4 -
2.1.2 Descrição dos programas.....	- 6 -
2.2. Processos de soldadura .....	- 7 -
2.3. Soldadura e o seu englobamento.....	- 8 -
2.4. Caracterização do Processo de Soldadura MAG .....	- 10 -
2.4.1. Equipamentos Utilizados.....	- 14 -
2.5. Gases de Proteção do processo de soldadura MAG.....	- 15 -
2.5.1. Árgon .....	- 16 -
2.5.2. Hélio .....	- 16 -
2.5.3. Oxigénio .....	- 16 -
2.5.4. Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	- 17 -
2.6. Emissões de Nanopartículas nos Processos de Soldadura .....	- 17 -
2.6.1. Fumos Resultantes do Processo de Soldadura MIG/MAG .....	- 19 -
2.6.2. Formas de reduzir a emissão de fumos.....	- 20 -

2.6.3. Variáveis de soldadura MIG/MAG .....	- 22 -
2.7. Influência dos parâmetros de soldadura.....	- 22 -
2.8. Contextualização CNC.....	- 26 -
2.9. Princípio de funcionamento de um CNC .....	- 29 -
2.10. As várias etapas de maquinação CNC .....	- 31 -
2.10.1. Passo 1: Projeto de modelo CAD .....	- 31 -
2.10.2. Passo 2: Conversão de arquivo.....	- 31 -
2.10.3. Passo 3: Configuração da máquina.....	- 32 -
2.10.4. Passo 4: Execução de Operação de Maquinagem .....	- 32 -
2.11. As vantagens do CNC .....	- 33 -
2.12. Componentes de uma máquina CNC.....	- 34 -
2.13. Informações ao funcionamento da CNC.....	- 36 -
2.14. Pontos de referência usados em CNC.....	- 36 -
2.14.1. Eixos .....	- 37 -
2.14.2. Zero da peça.....	- 38 -
2.15. Transferência de dados para a CNC.....	- 39 -
2.16. Código G-code.....	- 40 -
2.16.1 Contextualização .....	- 41 -
3. Metodologia.....	- 43 -
3.1. Funcionamento experimental.....	- 43 -
3.2. Otimização .....	- 44 -
3.3. Mecanismos e projeto .....	- 45 -
3.4. Software Gcode Platform.....	- 49 -
4. Resultados e análise.....	- 51 -
4.1. Procedimentos experimentais .....	- 51 -
5. Conclusões .....	- 61 -

5.1. conclusão do trabalho .....	- 61 -
5.2. Trabalhos futuros .....	- 62 -
Referências .....	- 63 -
Anexos .....	- 67 -

## Índice de Figuras

Figura 1 soldador em 1930 [4] .....	8 -
Figura 2 Fotografia de uma trabalhadora nos primórdios da soldadura [7] .....	9 -
Figura 3 Processo soldadura MIG/MAG [9] .....	12 -
Figura 4 Equipamento MIG/MAG e seus componentes [10].....	14 -
Figura 5 Exposição a fumos de soldadura [14] .....	18 -
Figura 6 Gama de dimensões das partículas [15] .....	19 -
Figura 7 Exemplificação dos fatores responsáveis pela formação de fumo [15] .....	19 -
Figura 8 Extrator local de fumos de soldadura [19] .....	21 -
Figura 9 Extrator local portátil para extração de fumos [20] .....	21 -
Figura 10 Oficina equipada com extrator de fumos [21].....	21 -
Figura 11 Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO <sub>2</sub> [25] .....	23 -
Figura 12 Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [25].....	24 -
Figura 13 Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerossol, árgon [25].....	24 -
Figura 14 Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda [25] .....	25 -
Figura 15 Primeira linguagem de programação de máquinas [30].....	26 -
Figura 16 Outro exemplo da primeira linguagem de programação de máquinas [31]-	27 -
Figura 17 Nova máquina CNC de 6 lados [32] .....	27 -
Figura 18 Interface do software CNC PlanetCNC TNG V2 [34].....	28 -
Figura 19 Programas enviados diretamente através da rede [36] .....	29 -
Figura 20 Parte eletrônica da CNC feita nos laboratórios da ESTIG após a otimização ..	30 -
Figura 21 Interface do software BobCad CAM, para gerar o G-code [38].....	31 -

Figura 22 Interface do software BobCad CAM, simulação e conversão do arquivo [39] -	
32 -	
Figura 23 Exemplo de configuração de uma CNC [40] .....	- 32 -
Figura 24 Operação da CNC presente nos laboratórios de mecânica da ESTIG após a	
otimização.....	- 33 -
Figura 25 Exemplo de possíveis peças a serem fabricadas em máquinas CNC industriais	
[41].....	- 34 -
Figura 26 Algumas ferramentas que fazem parte de uma CNC [43].....	- 35 -
Figura 27 CNC industrial [44].....	- 36 -
Figura 28 Exemplificação de como tirar os zeros na CNC [45].....	- 37 -
Figura 29 Os sentidos dos eixos determinados pela regra da mão direita [46] .....	- 38 -
Figura 30 Referencias de posicionamento da CNC [47] .....	- 39 -
Figura 31 Exemplificação de transferências de código [48] .....	- 40 -
Figura 32 Exemplo do G-code usado no presente trabalho.....	- 42 -
Figura 33 BreadBoad, responsável pelo funcionamento autónomo da tocha, após a	
otimização.....	- 44 -
Figura 34 Parte do processo de substituição e otimização dos componentes elétricos-	45
-	
Figura 35 Estrutura da CNC [58] .....	- 46 -
Figura 36 Demonstração como conceder ângulo à tocha da CNC .....	- 46 -
Figura 37 Ângulo usado para os testes experimentais da CNC.....	- 47 -
Figura 38 Esquema das ligações eletrônicas da CNC [55].....	- 48 -
Figura 39 Esquema da ligação à tocha .....	- 48 -
Figura 40 Interface Universal Gcode Platform.....	- 49 -
Figura 41 Demonstração do código no software .....	- 50 -
Figura 42 Parâmetros da máquina de solda MIG/MAG .....	- 51 -
Figura 43 Chapa com os primeiros ensaios experimentais.....	- 52 -

Figura 44 Primeira solda 3D (4 camadas) .....	- 53 -
Figura 45 Primeira solda 3D (6 camadas) .....	- 53 -
Figura 46 Vista em plano frontal da soldadura 3D .....	- 54 -
Figura 47 Vista lateral da soldadura 3D .....	- 54 -
Figura 48 resultado da primeira experiência de soldadura em 3D (7 camadas).....	- 55 -
Figura 49 Segunda tentativa após otimização do processo .....	- 55 -
Figura 50 Verificação da deformação da chapa.....	- 56 -
Figura 51 Resultado da terceira tentativa de otimizar o processo .....	- 56 -
Figura 52 Verificação, embora que menor, da deformação da chapa de trabalho .....	- 57 -
Figura 53 Experimento de executar uma circunferência para o trabalho final.....	- 58 -
Figura 54 Base escolhida para o trabalho final, na posição de trabalho.....	- 58 -
Figura 55 Começo do trabalho (4 camadas).....	- 58 -
Figura 56 Resultado após 8 camadas.....	- 59 -
Figura 57 resultado após 25 camadas .....	- 59 -
Figura 58 Resultado final (30 camadas ou 3cm de soldadura em camadas) .....	- 59 -
Figura 59 Vista do resultado obtido após todas as otimizações .....	- 60 -

## Índice de tabelas

Tabela 1 Tabela de programas ..... - 5 -

Tabela 2 Processos de soldadura e suas aplicações [1]..... - 7 -

# 1. Introdução

O advento da automação tem revolucionado diversas áreas industriais, proporcionando maior eficiência, precisão e versatilidade nas operações. Nesse contexto, as Máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) desempenham um papel crucial, tornando-se essenciais para a fabricação de peças complexas e a execução de processos de solda avançados.

Este trabalho propõe-se a explorar e aprimorar uma CNC, focalizando sua aplicação específica na soldadura 3D. A soldadura 3D, uma técnica inovadora que permite a criação tridimensional de estruturas metálicas, tem ganhado destaque devido à sua versatilidade e aplicabilidade em diversos setores industriais. A otimização de uma máquina CNC para esse fim não apenas amplia as capacidades de produção, mas também abre portas para uma gama diversificada de estudos e experimentações.

A escolha deste tema não apenas atende a uma atribuição específica, mas também reflete a necessidade de desenvolver uma máquina robusta e funcional capaz de realizar solda 3D de forma eficiente. O processo de otimização desta máquina inicialmente inoperante envolveu uma abordagem multidisciplinar, combinando conhecimentos de eletrônica, programação e mecânica para superar desafios específicos.

Ao longo desta dissertação, será detalhado o processo de otimização da CNC, desde a identificação dos problemas iniciais até à conquista bem-sucedida da capacidade de solda em 3D. Este trabalho não apenas contribui para a eficácia operacional da máquina, mas também estabelece as bases para pesquisas futuras e experimentações no campo da automação industrial, destacando a importância da otimização em um contexto de avanço tecnológico contínuo.

## **1.1. objetivos**

Com base nos conhecimentos de engenharia adquiridos ao longo dos anos de estudo, o principal objetivo consiste em aprimorar, otimizar e corrigir possíveis falhas em um sistema automático de soldadura previamente desenvolvido e construído na ESTIG. Esse processo será conduzido por meio de uma sequência de fases, iniciando-se pela avaliação dos materiais para o caso de estudo, seguida de uma revisão bibliográfica. Em etapas subsequentes, serão realizadas a substituição e montagem de elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos. Ensaios experimentais serão conduzidos para assegurar o controle de qualidade das alterações implementadas, seguidos pela recolha e análise de resultados, culminando na redação do relatório.

O resultado esperado é a obtenção de um sistema mais robusto e preciso, visando garantir soldaduras de qualidade por meio do processo MIG/MAG. Ao longo deste trabalho, serão realizados uma série de testes experimentais para alcançar a otimização desejada

## 1.2. Organização do trabalho

A seguinte dissertação organiza-se de forma a abranger alguns tópicos importantes para o funcionamento da CNC de soldadura projetada. Nos parágrafos seguintes será descrito alguns desses pontos.

Iremos começar por uma apresentação ao projeto mecânico, onde será descrito o início da otimização do trabalho e de algumas escolhas iniciais feitas para conseguir melhorar o rendimento e aproveitamento do tempo.

De seguida o trabalho segue-se por uma fundamentação de conhecimentos tanto em soldadura e seus processos, aprofundando na soldadura MIG/MAG que é um dos nossos principais tópicos de estudo, como em os riscos para a saúde. Descrevendo os parâmetros de soldadura e variáveis deste processo.

Após, iremos fazer uma contextualização do tópico referente à CNC (*computer numerical control*) descrevendo os seus princípios de funcionamento, as etapas de maquinagem e os passos para atividade da mesma. Ainda abrangendo este tema falaremos um pouco da linguagem *Gcode* e a sua contextualização.

Por fim, explicitaremos todo o funcionamento experimental da máquina de soldar otimizada, explicando passo a passo tudo o que foi efetuado para obter sucesso. Fazendo referência ao trabalho executado na máquina e descrevendo o software escolhido. Acabamos este capítulo com os procedimentos experimentais, ou seja, os resultados de soldadura que obtivemos ao colocar a nossa máquina em laboração e vendo todo o potencial que a mesma demonstra.

Terminaremos assim com a conclusão do trabalho e em anexo irá um manual de utilizador realizado, para que numa próxima execução laboral, a máquina após umas pequenas calibrações esteja apta a trabalhar.

## 2. Fundamentação teórica

Neste ponto serão abordados todos os temas que englobam o seguimento deste trabalho, entendendo o projeto mecânico e todos os componentes que ao mesmo dizem respeito.

### 2.1. Introdução ao projeto mecânico

Inicialmente, a abordagem ao projeto envolveu uma análise aprofundada do funcionamento da máquina CNC, visando compreender a interação entre os seus componentes e a dinâmica do conjunto. Observou-se que a máquina opera em três eixos, impulsionados por motores passo a passo independentes. O movimento do eixo X é facilitado por uma correia que conecta dois parafusos sem fim, enquanto os motores dos eixos Y e Z estão diretamente acoplados a esses parafusos. Guias de fixação e rolamentos foram incorporados para garantir estabilidade e suavidade nos movimentos.

Na vertente eletrônica, a máquina é controlada por um *Arduino*, responsável por enviar instruções aos três drivers independentes que controlam os motores nos diferentes eixos. Além disso, uma *breadboard* gerencia a tocha de soldadura, e uma fonte de alimentação está conectada à corrente na parte traseira da máquina.

O próximo passo abrangeu a seleção de um programa adequado para operar a CNC, sendo consideradas opções como *X-loader*, *GRBL Controler*, *Gcode Sender* e *EASEL*, todos de código aberto. A preferência por softwares de código aberto foi motivada pela evitação de licenças anuais pagas, como no caso do *Mach4*. A instalação da biblioteca GRBL 1.1 no *Arduino* facilitou a comunicação entre a máquina e o computador, proporcionando uma base sólida para a implementação dos próximos passos.

Após pesquisa, testes e avaliação, o programa escolhido foi o *Gcode Sender 2.0.15*, destacando-se por sua completude e facilidade de uso. Utilizando Java, apresenta uma interface personalizável e a capacidade de interação por linha de código, proporcionando uma solução abrangente. A máquina foi ajustada e revisada, superando as limitações iniciais de movimento nos eixos X, Y e Z.

Contudo, desafios surgiram quando a parte responsável pelo comando da tocha não respondeu conforme esperado. A ausência de corrente na *breadboard*, mesmo após as ordens do programa, representou um obstáculo inicial, sendo necessário abordar esse problema nas próximas etapas do projeto.

Tabela 1 Tabela de programas

<b>Crêterios</b>	<b>X-loader</b>	<b>GRBL Controler</b>	<b>Gcode Sender</b>	<b>EASEL</b>	<b>Mach4</b>
<b>Código aberto</b>	sim	sim	sim	sim	não
<b>Fun�o principal</b>	Programa�o de placas Arduino	Controle preciso de máquinas CNC	Envio de comandos G-code para máquinas CNC	Design e controle de máquinas CNC da Inventables	Controle de máquinas CN
<b>Aplica�o Específica</b>	Programa�o de dispositivos eletrônicos	Controle de máquinas CNC	Controle de máquinas CNC	Controle de máquinas CNC da Inventables	Controle avançado de máquinas CNC
<b>Interface do Usuário</b>	Simple e direta	Pode ser complexa para iniciantes	� muito intuitiva para iniciantes, simples e direto com várias ferramentas de apoio	Interface simplificada para design e controle	Interface intuitiva para controle CNC avançado
<b>Suporte G-code</b>	Limitado	sim	sim	sim	sim
<b>Flexibilidade</b>	Específico para programa�o de Arduino	Flexível para diferentes configura�es CNC	Versatilidade para várias máquinas CNC	Limitado, mas fácil de usar	Altamente flexível, suporte avançado de CNC
<b>Aplicabilidade</b>	Programa�o de placas Arduino	Controle de máquinas CNC	Controle de máquinas CNC	Design e controle de máquinas CNC	Controle avançado de máquinas CNC

## 2.1.2 Descrição dos programas

- X-loader:

O X-loader é uma ferramenta usada para carregar *firmware* nas placas *Arduino*. O ecossistema *Arduino* é mantido pela *Arduino LLC*, uma empresa fundada por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, e David Mellis.

- GRBL Controller:

O firmware GRBL (*Grbl - An open-source, embedded, high-performance g-code-parser and CNC milling controller written in optimized C that will run on a straight Arduino*) foi criado por Simen Svale Skogsrud. O GRBL Controller, como uma interface gráfica para controlar máquinas CNC com GRBL, pode ter vários contribuidores, mas a criação está relacionada ao projeto GRBL.

- Gcode Sender:

Vários programas são chamados de "Gcode Sender", e são projetos de código aberto desenvolvidos por diferentes colaboradores da comunidade CNC. O criador específico pode variar dependendo da versão específica ou implementação.

- EASEL:

EASEL foi desenvolvido pela Inventables, uma empresa sediada em Chicago, fundada por Zach Kaplan. A Inventables é conhecida por suas máquinas CNC, como a X-Carve, e oferece o EASEL como parte de sua solução integrada para design e controle de CNC.

- Mach4:

Mach4 é desenvolvido pela Artsoft, uma empresa especializada em software de controle CNC. A Artsoft foi fundada por Scott L. Pigg em 2002, Mach4 é uma versão mais recente do software de controle CNC, sucedendo o Mach3.

## 2.2. Processos de soldadura

Existem diferentes procedimentos para soldar materiais. No âmbito dos processos de soldadura, podemos distinguir três grupos principais, soldadura por fusão, tanto o metal de base como o metal de enchimento são fundidos e é gerado um cordão de soldadura, soldadura em estado sólido, a ligação ocorre entre o metal de base e o metal de enchimento no estado sólido e a brasagem e soldadura comum, o metal de base permanece em estado sólido, enquanto o de enchimento é fundido para formar a junta [1].

Para uma classificação mais detalhada destes processos, são utilizados os seguintes critérios:

- Tipo de energia: Eletrônica, mecânica, química e radiação.
- Fonte de energia: arco elétrico, resistência, indução, laser, ultrassom...
- Com ou sem tensão mecânica.
- Tipo de proteção: gás de proteção, fluxo, vácuo.

Há muitos processos de soldadura diferentes, dependendo da peça a soldar, a tabela 1 mostra alguns dos mais importantes processos de soldadura por fusão:

Tabela 2 Processos de soldadura e suas aplicações [1]

SOLDADURA POR FUSÃO				
Tipo de energia	Fonte de energia	Tensão mecânica	Tipo de proteção	Processo
Elétrica	Arco elétrico		Gás	GMAW-MIG (gás inerte) -MAG, (gás ativo) TIG, (elétrodo de tungsténio) Plasma (PAW)
			Fluxo	Elétrodo revestido (SMAW) Arco submerso (SAW) Arame tubular (FCAW)
	Resistência	Pressão		Soldadura por pontos
Química	Chama		Fluxo	Soldadura oxiacetilénica
Radiação	Luz		Gás	Soldadura por laser
	Partículas eletromagnéticas		Vácuo	Soldadura por feixe de eletrões

### 2.3. Soldadura e o seu englobamento

Após a descoberta do arco elétrico em 1800 por Humphry Davy, houve pouco desenvolvimento em solda eletrônica até 1880 quando os russos Nikolay Benardos e Stanislav Olszewsky, trabalhando num laboratório francês, terem desenvolvido um processo de soldadura baseado num arco elétrico estabelecido entre um elétrodo de carvão e a peça a ser soldada. Com seus esforços obtiveram a patente britânica em 1885 e norte-americana em 1887. Este foi o início de soldadura de arco de carbono se tornando popular durante a década de 1890 e 1900 [2][3].

Em 1888, o russo Nikolay Slavyanov e o americano Charles L. Coffin desenvolveram, independentemente, a soldadura com elétrodo metálico. Mais tarde, em 1890, Coffin recebeu a patente americana 428459 pelo seu método de soldadura utilizando o elétrodo metálico.[2]

Durante os anos seguintes, a soldadura por arco foi realizada com elétrodos, que eram consumidos na poça de fusão e tornavam-se parte do metal de solda, como demonstrado na figura 1. As soldas eram de baixa qualidade devido ao azoto e ao oxigénio na atmosfera formando óxidos e nitretos prejudiciais no metal de solda [3].



*Figura 1 soldador em 1930 [4]*

Até ao século XIX, o único processo de soldadura existente era usado pelos ferreiros, visualizado na figura 2, no qual concentrava calor na zona que se pretendia conectar provocando a sua fundição. A soldadura por fusão só se tornou uma realidade após a invenção do arco elétrico. Na atualidade, a soldadura por fusão é uma tecnologia na qual se utilizam fontes de calor capazes de elevar a temperatura do metal localmente. É um método de ligação de metais de elevada eficiência, económico e flexível, que permite novas possibilidades na utilização de materiais [5,6].

Desde a invenção do arco elétrico, a soldadura sofreu uma grande evolução. Esta começou pela utilização do calor gerado por um arco estabelecido entre um eléctrodo de carvão e a peça. Alguns anos mais tarde o eléctrodo de carvão foi substituído por um fio metálico e o processo de aquecimento passou a ser acompanhado da deposição da peça de metal fundido proveniente do fio [5].



*Figura 2 Fotografia de uma trabalhadora nos primórdios da soldadura [7]*

Nos anos 30 foram iniciadas experiências no sentido de proteger o arco elétrico da contaminação atmosférica utilizando um gás inerte. O primeiro processo de soldadura com proteção gasosa utilizava um eléctrodo não consumível de tungsténio e uma proteção de gás inerte. Este processo é conhecido como o processo TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTA (Gas Tungsten Arc). Uns anos mais tarde foi desenvolvido um novo processo de soldadura com proteção gasosa, no qual o eléctrodo de tungsténio foi substituído por um eléctrodo de alimentação contínua, em que se utilizava uma proteção gasosa de argon ou hélio para a soldadura de alumínio e outras ligas não ferrosas. Trata-se do processo MIG (Metal Inert Gas) ou GMA (Gas Metal Arc). A utilização deste processo no aço só ocorreu, no entanto, aquando do desenvolvimento dos fios de eléctrodo especiais com baixo teor em carbono e adições de elementos desintoxicantes, para evitar a ocorrência de porosidade na soldadura.

O desenvolvimento que se seguiu consistiu na utilização de um gás mais corrente que o argon e o hélio. A escolha incidiu sobre o dióxido de carbono, mas existiam, à partida, dificuldades que necessitavam de ser ultrapassadas. Em primeiro lugar, a transferência do metal no fio elétrico para o banho de fusão através do arco era instável, e, em segundo lugar, o cordão de soldadura apresentava porosidade resultante da reação do carbono com o oxigénio dissociado no banho de fusão [5,6].

Estes problemas foram largamente ultrapassados com a descoberta da transferência por curto-circuito, que consiste na utilização de um arco curto com o eletrodo consumível, o qual deposita o material fundido através de curtos-circuitos, durante os quais o arco se extingue. Para se conseguir este tipo de transferência foi necessário um desenvolvimento significativo das máquinas de soldar. Sendo assim, as máquinas de soldadura vieram a evoluir, ainda por muitos anos, com o objetivo de melhorar as características do processo. Mais recentemente, com a introdução da eletrônica e dos microprocessadores nos equipamentos, é possível a utilização de vários modos de transferência. A solução para o problema da porosidade foi a utilização de fios consumíveis com adições significativas de silício, manganês e de outros desoxidantes como o alumínio, o titânio e o zircónio.

Com a utilização do dióxido de carbono, como gás de proteção, tornou-se usual a soldadura de  $CO_2$  e a designação MAG (Metal Active Gas) como modificação do termo MIG. Enquanto se desenvolvia a soldadura de  $CO_2$ , ocorria, paralelamente, a evolução da soldadura MIG para os metais não ferrosos com a proteção de argon. Os produtores de gás foram encorajados a produzir argon nas fábricas de oxigénio o que resultou num significativo desenvolvimento da disponibilidade deste gás. Atualmente, o argon é utilizado com adição de dióxido de carbono, ou oxigénio, em determinadas percentagens para soldar diferentes tipos de aço. A adição de argon ou hélio na proteção origina um arco suave e reduz os salpicos, aspetos, estes que são particularmente importantes em soldadura robotizada [5,6].

## **2.4. Caracterização do Processo de Soldadura MAG**

O conceito inicial do processo de soldadura MIG/MAG remonta aos anos 20, como já referido anteriormente, no entanto, a sua implementação em termos industriais só aconteceu no final dos anos 40, em que se usou pela primeira vez uma alimentação contínua de um eletrodo de alumínio protegido por um gás constituído por 100% de argon. Só em 1951 foi

possível soldar aços com a introdução de oxigênio misturado com argônio e, posteriormente, com a introdução de  $CO_2$  puro ou em mistura [5]. Mas foi há cerca de 20 anos que este processo começou a dominar a indústria da soldadura.

Desde a sua aparição, até aos dias de hoje, este processo tem sofrido melhorias constantes com o objetivo do aumento da produtividade do processo e a segurança do soldador. Estas melhorias constantes levaram a que este processo seja, atualmente, o que apresenta maior flexibilidade, permitindo soldar uma vasta gama de materiais e espessuras.

O processo Gas Metal Arc Welding (GMAW), também designado como Metal Inert Gas ou Metal Active Gas (MIG/MAG), sigla derivada dos gases de proteção utilizados neste processo (respetivamente gás inerte ou gás ativo), é um processo de soldura de metais, onde, através de um arco elétrico, estes são aquecidos até ao ponto de fusão e unidos.

Como já referido, o processo de soldadura MAG é um processo de soldadura com gases de proteção gasosa à base de  $CO_2$  ou misturas com outros gases como Ar ou Hélio. A transferência do material fundido, do eletrodo, pode ser realizada de vários modos. No entanto, os modos principais são: transferência globular, curto-circuito e spray. Este processo tem uma alimentação contínua de um fio sólido e de um gás de proteção pela tocha de soldadura. A velocidade de alimentação pode ser regulada no equipamento tal como o caudal de gás. Existe um componente na tocha tipo “gatilho” com que o soldador controla a alimentação do eletrodo. Neste tipo de situação a soldadura é semiautomática [12]. A figura 3 representa o princípio de funcionamento deste processo, o qual se encontra ilustrado pelos principais componentes intervenientes na soldadura MIG/MAG.

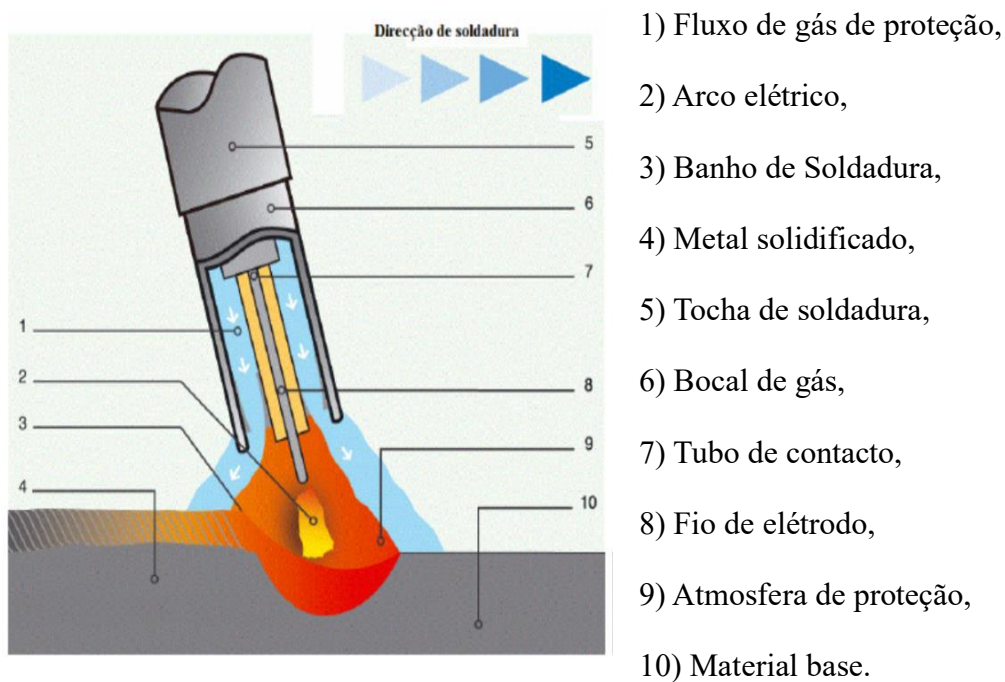


Figura 3 Processo soldadura MIG/MAG [9]

Aquando da utilização do processo de soldadura MAG é necessário ter em consideração os parâmetros operatórios do processo, pois estes influenciam o desempenho do processo, quer em termos de rendimento quer na emissão de partículas.

Principais parâmetros operatórios do Processo MAG [8, 12]:

- Intensidade de corrente: tem influência na taxa de depósito, na profundidade de penetração e no volume de metal fundido;
- Tensão do arco (comprimento do arco): tem influência na largura do cordão, na sua convexidade e melhora a resistência à porosidade (óleos e humidade);
- Velocidade de soldadura: influencia a morfologia do cordão;
- Extensão do eléctrodo: tem influência no cordão e na taxa de deposição;
- Consumíveis: relativamente a este parâmetro consideram-se os gases de protecção e o fio sólido, a escolha do tipo de consumível depende do material a soldar e da espessura a soldar;
- Diâmetro do eléctrodo: quando se aumenta o diâmetro do fio, diminui-se a densidade de energia no arco eléctrico, o que diminui a profundidade de penetração, aumenta a largura do cordão e diminui a taxa de deposição. Quando

se diminui o diâmetro do fio origina os efeitos opostos, aos referidos anteriormente.

Este processo tem como principais vantagens [12]:

- Soldar todos os metais;
- Controlo da Penetração Razoável;
- Usar corrente DC (+) /AC;
- Soldar em Todas as Posições;
- Fator de Marcha de 60%;
- Automatização, Eléctrodo Contínuo;
- Baixos Níveis de Hidrogénio;
- Sem escória, exceto com fluxo.

A soldadura MIG / MAG, apesar de ser um dos processos mais utilizados pelas indústrias de fabricação modernas, apresenta algumas desvantagens [12]:

- Acessibilidade e Mobilidade;
- Falta de Fusão/Colagens;
- Risco de Inclusões com  $CO_2$ ;
- Boas Competências do Soldador;
- Grande sensibilidade às correntes de ar;
- Custos dos Gases de Proteção;
- Existência de muitos respingos.

### 2.4.1. Equipamentos Utilizados

Na Figura 4 apresenta-se um esquema representativo do equipamento para o processo de soldadura MAG:

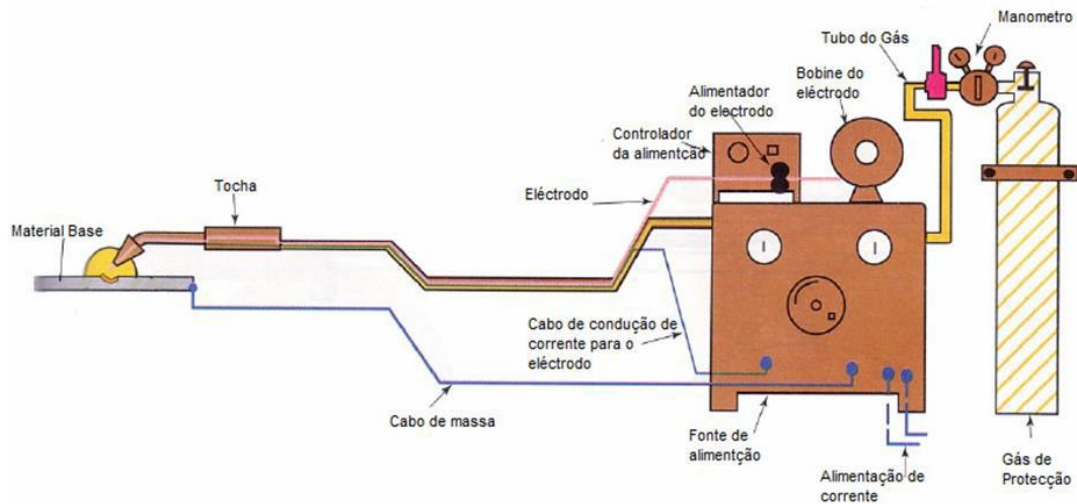


Figura 4 Equipamento MIG/MAG e seus componentes [10]

Dos elementos ilustrados na Figura 4 é importante destacar:

- A fonte de alimentação é, como em muitos outros equipamentos de soldadura por arco elétrico, uma fonte retificadora/inversora que possibilita a utilização de corrente contínua ou alternada.
- O alimentador do eletrodo, que pode ser de velocidade constante ou variável com a tensão. O alimentador a velocidade constante funciona com uma fonte de alimentação que fornece tensão constante e a velocidade é previamente selecionada no equipamento. O segundo é alimentado, diretamente pela tensão do arco elétrico, e adapta a velocidade de acordo com as mudanças de tensão.
- A tocha de soldadura por onde é alimentado o fio consumível e o gás de proteção.

## 2.5. Gases de Proteção do processo de soldadura MAG

Os gases utilizados são gases ativos, usualmente, misturas gasosas de argon e dióxido de carbono, argon e oxigênio ou misturas ternárias de argon, dióxido de carbono e oxigênio. As percentagens, de cada constituinte, variam conforme o poder de oxidação pretendido, no entanto, na grande maioria das misturas, o elemento argon é o que está presente em maior quantidade [10].

Os gases de proteção utilizados neste processo são classificados de acordo com a norma EN ISO 14175 [11]:

- I – Inertes: Não Ferrosos, Reativos e Inox;
- M1; M2; M3 e C – Misturas Ativas e só ativa ( $CO_2 + O_2 + Ar$  /  $O_2 + Ar$ ;  $CO_2 + Ar$  /  $CO_2 + H_2 + Ar$ ; C –  $CO_2$  ou  $CO_2 + O_2$ ): Ferrosos e Inox;
- Chapa fina:  $CO_2 + O_2 + Ar$  ou  $CO_2 + H_2 + Ar$ ;
- Inox:  $CO_2 + Ar$  ou  $O_2 + Ar$ .

A principal função dos gases é a de evitar o contacto do ar atmosférico com o banho de fusão. Tal é necessário porque, a maior parte dos metais em estado líquido, quando em contacto com o ar, tem uma grande tendência para formar óxidos. A escolha dos gases de proteção depende das matérias e dos processos envolvidos. Para além de proteger o eléctrodo e o banho de fusão, os gases de proteção também influenciam importantes características do processo MIG/MAG: características do arco, modo de transferência do metal, penetração e perfil de soldadura.

Tal como referido anteriormente, os principais gases utilizados neste processo são: argon, hélio, oxigênio e o dióxido de carbono [13]. Para estes gases, em seus compartimentos de armazenamento, existem diferentes cores para os distinguir, cor verde para o argon, castanho para o hélio e cinza para o dióxido de carbono.

### **2.5.1. Árgon**

É o gás de proteção mais utilizado na soldadura MIG/MAG devido a vários fatores: baixa energia de ionização que promove uma voltagem de arco baixa, facilitando o escorvamento e a estabilidade do arco, gerando, por isso, um arco com uma energia de sinal positivo, o que resulta numa menor energia transferida para o banho de fusão, e o seu preço reduzido quando comparado com outros gases de proteção.

O árgon, como é um gás inerte quando no estado puro, tem uma utilização limitada à soldadura de metais não ferrosos, tais como o alumínio e ligas de titânio que apresentam um comportamento reativo devido à camada de óxidos refratários existentes na superfície do metal. Já para a soldadura de aços de carbono deve juntar-se ao árgon um gás oxidante ( $O_2$  ou  $CO_2$ ), o que torna o arco mais estável reduzindo os salpicos. O arco elétrico criado por este gás faz com que a zona exterior diminua a densidade energética em relação ao centro do arco, o que vai provocar uma soldadura com uma penetração em forma de “dedo”. Este tipo de penetração nem sempre é desejável, pois, para casos em que o alinhamento seja mais crítico (juntas em “T”), poderá ocorrer porosidade e falta de fusão na origem do cordão [12].

### **2.5.2. Hélio**

Têm uma energia de ionização alta, resultando numa maior voltagem do arco e também numa maior entrega térmica. Esta maior entrega térmica resulta numa maior penetração, mais uniforme, quando comparada com o árgon. Por este gás ser relativamente mais caro é utilizado preferencialmente em percentagens mais pequenas, em misturas com árgon, em que este é dominante [12].

### **2.5.3. Oxigénio**

É usado como componente secundário, juntamente com o árgon, por causa do seu efeito estabilizador no arco. Ao fornecer propriedades oxidantes ao árgon, este promove a

formação de óxidos sobre o banho de fusão e na ponta do eletrodo, o que vai diminuir a tensão superficial e, deste modo, facilitar a transferência do metal [12].

#### **2.5.4. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Na soldadura por arco elétrico o dióxido de carbono vai-se dissociar em monóxido de carbono e oxigénio livre. Durante o arco elétrico o oxigénio livre gerado é insuficiente para que se possa formar um plasma, sendo por isso muito difícil obter transferência por spray. O que leva à formação de elevadas emissões de salpicos, devido à instabilidade na transferência de metal.

A natureza oxidante deste gás permite lidar com superfícies contaminadas com tinta ou ferrugem. A sua elevada entrega térmica produz um perfil de soldadura mais uniforme [12].

### **2.6. Emissões de Nanopartículas nos Processos de Soldadura**

A soldadura, por si só, é um processo com diferentes implicações, e variados riscos para a saúde humana. Uma delas, que irá ser aprofundada neste ponto, é a emissão de nanopartículas nos processos de soldadura. Uma das principais fontes de emissões de nanopartículas na soldadura é através da emissão de fumos durante a execução das soldaduras.

Este processo é realizado tanto em ambientes interiores como exteriores. No entanto, este fator não limita as emissões de fumos de soldadura para o ambiente aquando da realização de trabalhos no exterior. Sempre que se executam processos de soldadura, há emissão de partículas sobre a forma de pó, como fumos em que são libertados gases poluentes para o ambiente no meio envolvente ao processo, como visualizado na figura 5, que são potencialmente perigosos para a saúde do trabalhador [13].



*Figura 5 Exposição a fumos de soldadura [14]*

Os fumos de soldadura no corpo humano tem efeitos diferentes, dependendo da sua composição. Algumas dessas composições têm efeitos a curto prazo, tais como a febre de soldadura, inicialmente, os sintomas incluem fraqueza, salivação excessiva e tosse, evoluindo para sudorese intensa, náuseas, dificuldade respiratória, taquicardia e dores generalizadas. Esta síndrome resulta da inalação de substâncias tóxicas presentes nos fumos. A prevenção, com o uso adequado de equipamentos de proteção e ambientes bem ventilados, é crucial. Caso persistam sintomas, é essencial procurar avaliação médica para diagnóstico e tratamento adequados. Contudo, os fumos de soldadura podem provocar efeitos de longo prazo tais como, por exemplo, a presença de manganês pode originar o desenvolvimento da doença de Parkinson [8].

As partículas que constituem os fumos de soldadura têm uma vasta gama de tamanhos, como se apresenta na Figura 6, a seguir. O tamanho é uma propriedade importante, pois determina a profundidade a que as partículas vão penetrar no sistema respiratório: existem aquelas que entram nos pulmões e que depois saem novamente; outras que nem sequer chegam a entrar porque são grandes demais e são retidas antes de entrarem nos pulmões, e, ainda, aquelas que entram nos pulmões, mas não saem, ficando depositadas no sistema respiratório com os perigos/efeitos daí inerentes. A gama de dimensões típicas dessas partículas pode ser observada na figura seguinte na faixa realçada a azul [15].

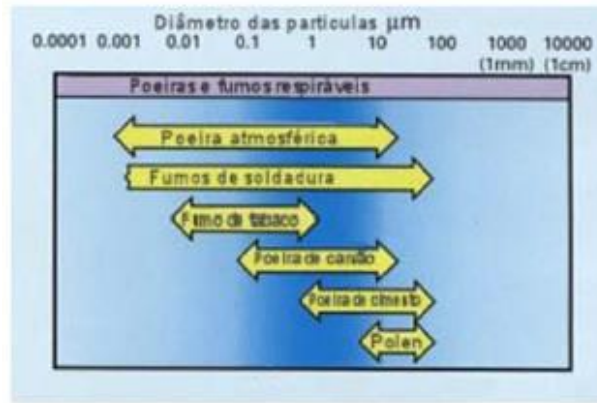


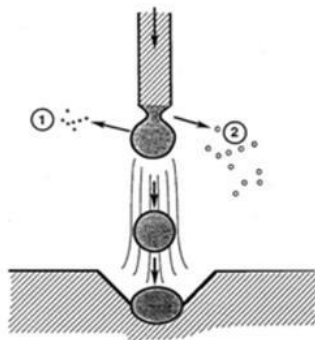
Figura 6 Gama de dimensões das partículas [15]

É importante referir que uma correta manipulação dos parâmetros de soldadura permite, por si só, um controlo da quantidade de fumos gerados. No entanto, libertam-se sempre fumos e partículas que podem atingir dimensões inferiores a 100 nm [10].

### 2.6.1. Fumos Resultantes do Processo de Soldadura MIG/MAG

Os fumos resultantes do processo MIG/MAG têm sido alvo de estudos desde 1975, nomeadamente sobre a sua natureza e os fatores que controlam a sua taxa de formação, assim como soluções para a sua resolução [16,18].

Dos estudos existentes para processos de proteção gasosa, conclui-se que os fumos resultantes da soldadura são formados, principalmente, a partir de gotas de soldadura [15], demonstrado na figura 7, a seguir.



- 1) evaporação na ponta do eletrodo ou da gota;
- 2) salpicos incandescentes e também de alguma evaporação resultante da explosão do fio.

Figura 7 Exemplificação dos fatores responsáveis pela formação de fumo [15]

Assim, pode concluir-se que, no processo de soldadura MAG, a taxa de formação de fumos aumenta com o aumento da temperatura e instabilidade do arco elétrico, com o componente ativo da mistura gasosa, com a condutividade térmica da mistura gasosa e com o aumento do volume das gotas de material. A quantidade de fumos libertada durante a soldadura é maior para misturas com dióxido de carbono comparativamente com misturas com oxigénio que tenham a mesma capacidade de oxidação [6,17]. Este tipo de características depende/varia consoante o modo de transferência de metal utilizado.

### **2.6.2. Formas de reduzir a emissão de fumos**

No processo MIG/MAG uma forma de redução dos fumos, pode ser, controlar os fatores que influenciam a formação de fumos referidos anteriormente, a saber:

- Temperatura da gota;
- Composição do eletrodo;
- Composição do gás de proteção.

Assim, para que haja uma redução da gota na taxa de formação de fumos, a dimensão da gota e a sua temperatura terão de diminuir. Tais condições só aparecem no modo de transferência por spray ou numa zona de transição para spray. Contudo, na maioria dos casos tal não é possível, pois este tipo de transferência apresenta uma grande entrega térmica e nem todas as ligações requerem tais condições de soldadura [17]. Uma solução para melhorar a situação anterior será explorar outro tipo diferente de corrente, como por exemplo a corrente pulsada. Quando não é possível a redução de fumos na fonte, há que apostar em sistemas alternativos para reduzir a quantidade de fumos no local de trabalho, como, por exemplo, a utilização de sistemas de extração de fumos [18], como podemos ver alguns exemplos nas figuras 8, 9 e 10.

De um modo geral, até ao momento, para a minimização dos fumos de soldadura pelo processo MIG/MAG são as seguintes [17]:

- Quanto maior for a estabilidade de transferência por curto-circuito, maior a penetração, e melhor acabamento dos grânulos, menor será a emissão de salpicos. Ou seja, uma maior estabilidade de transferência resulta numa menor quantidade de fumos libertados;

- Aquando da realização do processo é importante manter fixos os seguintes fatores: velocidade de alimentação do fio, a velocidade de soldadura e a tensão do fio;



*Figura 8 Extrator local de fumos de soldadura [19]*



*Figura 9 Extrator local portátil para extração de fumos [20]*



*Figura 10 Oficina equipada com extrator de fumos [21]*

### **2.6.3. Variáveis de soldadura MIG/MAG**

O processo MIG/MAG é composto por uma série de critérios e a correta seleção afeta diretamente no resultado. Os parâmetros como tensão e corrente determinam, respetivamente, a altura e a penetração do cordão de solda, assim como, a velocidade de alimentação do arame elétrodo é proporcional à quantidade de metal que é depositado na solda.

Outros parâmetros como extensão do elétrodo (*stick-out*), velocidade de soldadura, posicionamento e deslocamento da tocha, fluxo e tipo de gás, diâmetro do elétrodo também afetam na geometria final do cordão.

De acordo com Corrêa [22] citando Modenesi e Bracarense [23] e Jones et al [24], as variáveis ou parâmetros de soldadura a arco elétrico podem ser divididas em quatro grupos:

- Variáveis pré-determinadas: representam o tipo e espessura do metal de base e as propriedades as quais se procura no metal de solda e na região afetada pelo calor;
- Variáveis de fundo: nelas encontram-se informações relacionadas ao processo de soldadura, tipos de equipamentos, técnicas a utilizar na soldadura, projeto da junta a ser soldada, tipo de elétrodo, gás e fluxo aplicado e diâmetro de elétrodo;
- Variáveis primárias: velocidade de soldadura, tipo de corrente e seu respetivo valor e, então, a tensão;
- Variáveis secundárias: posicionamento, deslocamento e ângulo de ataque da tocha e comprimento do elétrodo (*stick-out*).

Portanto, cada variável deve ser selecionada de modo que se obtenha o resultado de soldadura esperado, bem como, a disponibilidade dos materiais e equipamentos.

## **2.7. Influência dos parâmetros de soldadura**

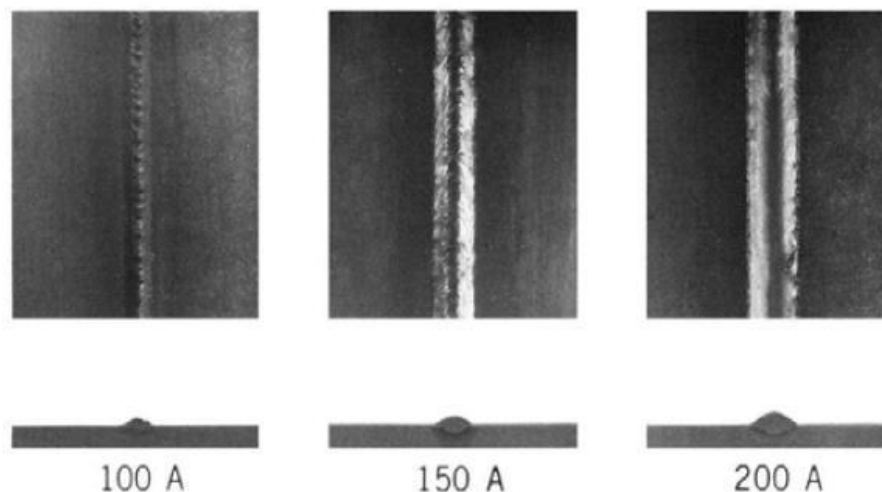
A correta seleção das variáveis envolvidas no processo afeta o resultado da soldadura, bem como, reduzem a ocorrência de alguns tipos de defeitos como, mordeduras, trincas e poros. O benefício é que estas variáveis podem ser controladas mesmo que separadamente, porém,

todas estão interligadas de forma que o efeito causado por uma afeta diretamente a outra [25].

Dos parâmetros que possuem maior influência destacam-se a tensão, a corrente, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a velocidade de soldadura, a velocidade de alimentação do arame, a proteção gasosa e a inclinação ou posição de ataque da tocha [26].

A corrente, figura 11, é comumente associada com a penetração, ou seja, ela é diretamente proporcional ao quanto metal de solda penetra no metal de base e isso permite estabelecer um certo controle durante o processo [25].

A tensão é a responsável pelo comprimento do arco elétrico, assim como a corrente é um dos parâmetros de geometria do cordão de solda pois a partir da sua variação é possível modificar tanto a altura quanto o diâmetro do arco. Na figura 12 vemos que com o aumento da tensão, haverá um aumento na área em que será aquecida e, conseqüentemente, um aumento na poça de fusão [25].



*Figura 11 Efeito da corrente de soldadura na penetração da solda – aço carbono, curto-circuito, Ar-25%CO<sub>2</sub> [25]*

Por isso, para altas tensões espera-se a formação de cordões de soldadura mais largos, mais baixos e com menor penetração, como ilustrado na Figura 12. Porém, para cada situação é possível obter um valor ótimo de tensão que é capaz de providenciar uma maior penetração associado a um cordão relativamente mais largo.

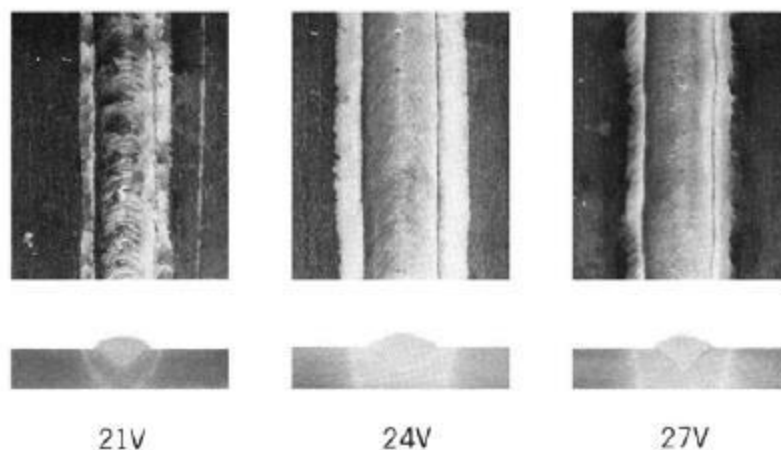


Figura 12 Efeito da tensão de soldadura na penetração da solda [25]

A velocidade de soldadura ou velocidade de avanço da tocha é o parâmetro que possui influência parecida com o parâmetro de tensão. Dependendo do valor utilizado, obtém-se um cordão de solda com máxima penetração, porém, ao variar os valores de velocidade isso muda de forma que baixas velocidades geram alta deposição de metal de solda e maior transferência de calor para peça, o que causa um efeito de amortecer o metal de base e, por consequência, um cordão maior com penetração média. Para valores elevados de velocidade, o processo de fusão não ocorre devidamente a ponto de gerar pouca penetração no metal de base, no entanto, é verificada menor transferência de calor para a peça. A seguir na Figura 13 encontram-se cordões de soldadura para diferentes valores de avanço [27].

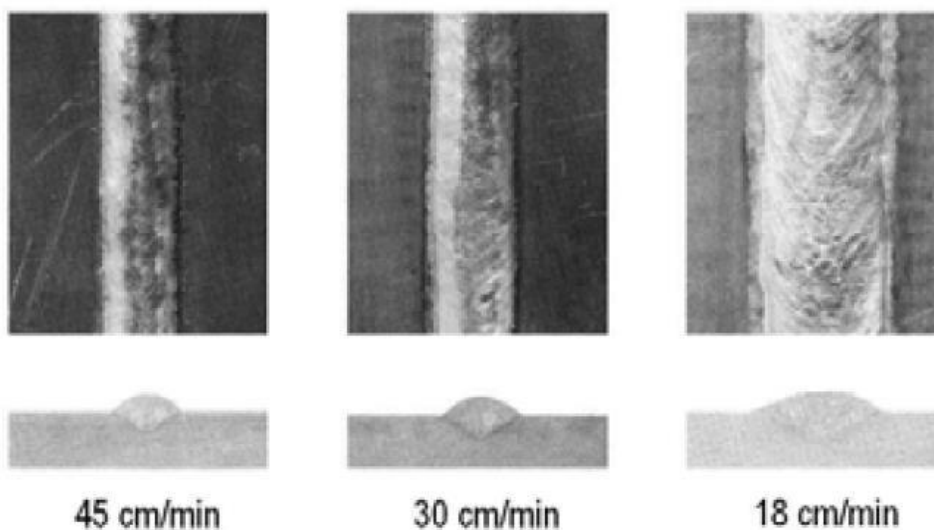


Figura 13 Efeito da velocidade de soldadura na penetração da solda – alumínio, aerosol, argon [25]

Outro fator que também apresenta influência sobre a geometria final do cordão de solda é o ângulo no qual a tocha está inclinada em relação à vertical e o sentido do movimento, figura 14. O procedimento de soldadura pode ser realizado com a tocha no sentido arrastando, o que gera maior penetração, menos respingos, cordão de solda mais estreito e arco mais estável. No caso da soldadura, a inclinação aconselhada é de  $25^\circ$  [25].

O diâmetro do arame elétrodo também é outro fator de influência no cordão de solda. Arames de diâmetros grandes tendem a necessitar de uma corrente de operação maior, portanto, obtém-se cordões de alta penetração, devido ao alto nível de corrente, e largos por depositarem maior quantidade de metal de adição [25].

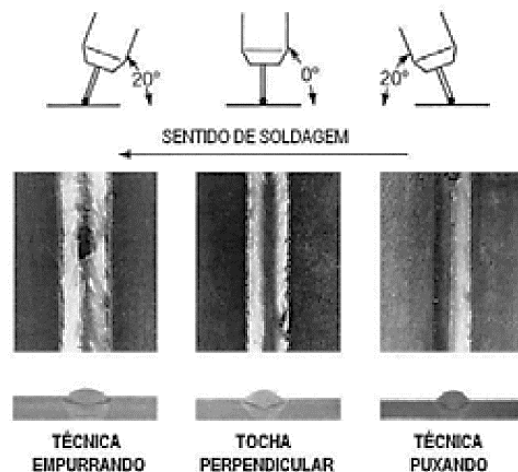


Figura 14 Efeito da posição longitudinal da tocha na penetração da solda [25]

Conforme Wainer [28], para um processo de soldadura submetido às mesmas condições de operação, alterando-se apenas o diâmetro do arame elétrodo, os arames de maiores diâmetros fornecerão maior penetração e taxa de deposição. A espessura da peça de base onde será realizada a soldadura também tem certa influência, de maneira que maiores espessuras necessitam arames de maior diâmetro.

O caudal e o tipo de gás de proteção utilizados no procedimento possuem influência direta quando a respeito aos possíveis defeitos do cordão de solda. A função do gás é proteger a região soldada dos gases atmosféricos e assim impedir a formação de óxidos prejudiciais ao resultado [29].

O gás mais utilizado é o argon e as suas misturas, devido à grande disponibilidade e baixo potencial de ionização, o argon fornece um arco mais estável com baixa quantidade de respingos, como já visto anteriormente [29].

## 2.8. Contextualização CNC

Os primeiros esforços para a aplicação de comando numérico em máquinas tiveram início em 1949, no Laboratório de Servo Mecanismo do Instituto de Tecnologia de Massachussets (M.I.T), associado a U.S. Air Force e Parsons Corporation of Traverse City, de Michigan.

A primeira linguagem de programação de máquinas foi o APT (Automatically Programed Tool) pelo MIT em 1956, podemos ver um exemplo fotográfico desta linguagem nas figuras 15 e 16. Já no final de 1962, todos os maiores fabricantes de máquinas ferramentas estavam empenhados na fabricação de máquinas com comando numérico.

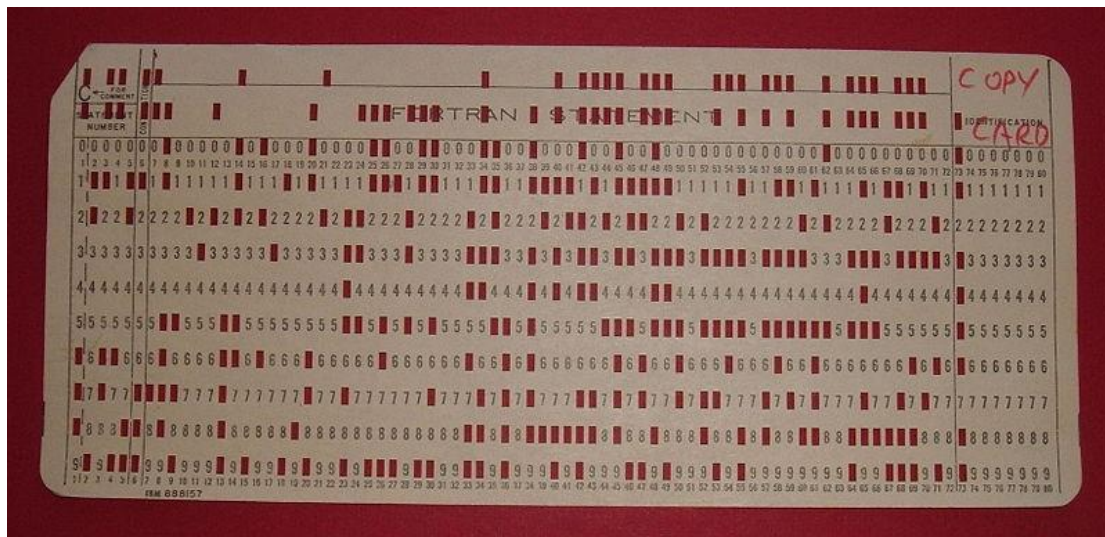


Figura 15 Primeira linguagem de programação de máquinas [30]



Figura 16 Outro exemplo da primeira linguagem de programação de máquinas [31]

O desenvolvimento na indústria mecânica é determinado pela busca de processos de fabricação mais rápidos e automáticos, onde a produção possa ser feita com a melhor relação entre custo e qualidade. Para a execução das tarefas são desenvolvidas máquinas e formas de controle, como por exemplo, o CNC, bem como metodologias de trabalho que diminuam a intervenção do homem, facilitando o trabalho e garantindo a repetibilidade do produto [32]. A evolução tecnologia desafia o trabalho atual a todos os níveis como podemos ver na imagem a seguir, figura 17.

A automação desenvolve-se com a aplicação de sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais na operação e controle da produção. Os sistemas de produção automatizados são projetados para executar o processamento, montagem, manuseio de materiais e atividades de inspeção com pequena senão nenhuma participação humana.



Figura 17 Nova máquina CNC de 6 lados [32]

O comando numérico é um equipamento eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina, de modo que esta, sem a intervenção do operador, realize as operações na sequência programada.

O comando numérico computadorizado é também um equipamento eletrônico que traduz informações para as máquinas. A diferença é que esta tradução é feita através de um microcomputador interno [33].

As informações do perfil da peça, ou das operações de maquinagem são programadas através de um arquivo de programa. Devido à sua capacidade de processamento, os CNC podem controlar máquinas mais complexas, com diversos tipos de ferramentas.

Alguns CNC dispõem de interfaces gráficas para testes de programa, como visualizado na figura 18. Em máquinas com este tipo de recurso é possível fazer a programação num computador comum, depois transmitir o programa para a máquina, executar o teste para verificar o percurso da ferramenta antes da maquinagem. Isto evita erros de sintaxe na programação, erros de posicionamento de ferramentas, entre outros.[33]

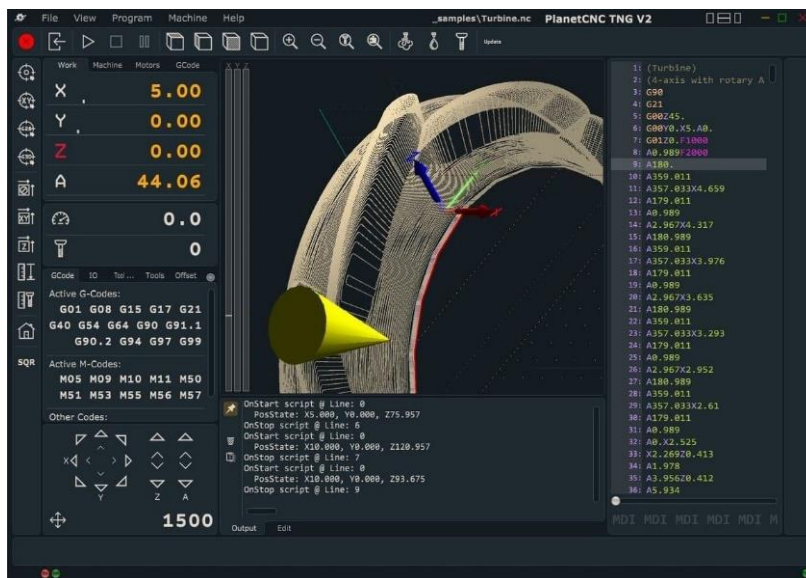


Figura 18 Interface do software CNC PlanetCNC TNG V2 [34]

No comando numérico computadorizado (CNC), várias funções da máquina passam a ser flexíveis graças à introdução de um computador na unidade de comando graças à estrutura lógica da unidade de comando, que pode ser modificada sem alterar o sistema físico dos circuitos eletrônicos (hardware). Também é possível executar programas de diagnóstico,

com objetivo de controlar componentes da máquina, evitando falhas e reduzindo o tempo de reparo.

Por fim, falando do comando numérico distribuído, este é um computador central armazena os programas CNC, e gerência o fluxo de informações para várias máquinas CNC, conforme a necessidade. Os programas podem ser enviados automaticamente, conforme a solicitação do CNC, ou pelo operador da máquina através de um meio de comunicação.

Existem vários níveis de sistemas, que podem variar desde o simples armazenamento de dados, até o controle total de um conjunto de máquinas. Em sistemas bem estruturados, é possível que as máquinas funcionem independentemente do computador central, aumentando a flexibilidade em casos de falhas.

Este tipo de comando dispensa o uso de equipamentos locais de leitura de dados, pois os programas são enviados diretamente através da rede, esquema demonstrado na figura 19. A estrutura permite ao operador maior rapidez e facilidade de acesso aos programas CNC, e permite ao programador fazer a programação off-line. [35]

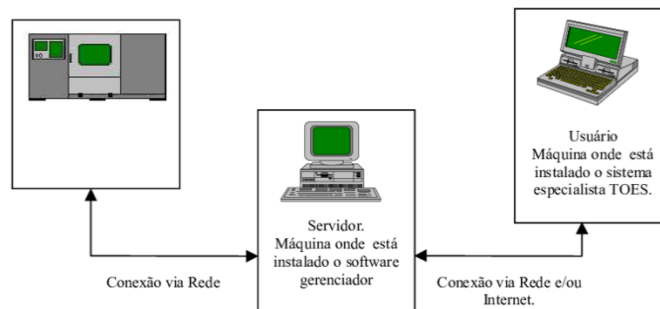


Figura 19 Programas enviados diretamente através da rede [36]

Como os programas CNC são armazenados em um computador da rede DNC, isto é, no servidor, o procedimento de cópia de segurança (backup) pode ser feito automaticamente, evitando a perda de dados.

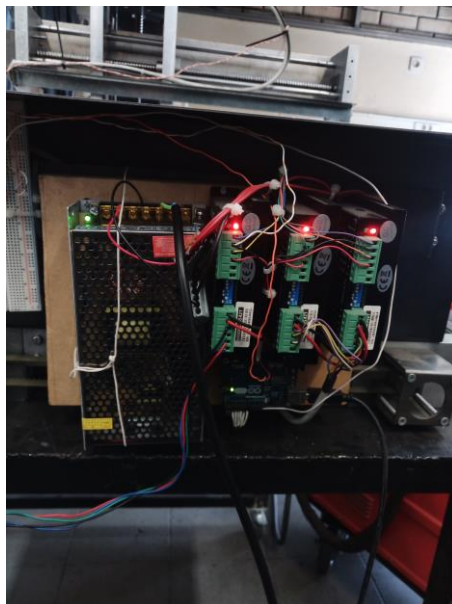
## 2.9. Princípio de funcionamento de um CNC

Na composição eletrônica, definida como unidade de comando, são introduzidos os dados da peça e do processo de fabricação, que determinam as tarefas dos acionamentos, enquanto

os sinais dos transdutores constituem os dados de controle dos elementos acionados. Assim, pode-se afirmar que o CNC funciona em circuito fechado de malha de controle.

Ou seja, o CNC dispara ordens de acionamento e recebe o sinal de resposta dos elementos acionados. Isto constitui o comando. Pode-se dizer que é numérico devido ao facto de que toda instrução de processo vem sempre acompanhada de seu respetivo valor numérico. E o facto de ser computadorizado é porque que todo processamento ocorre em uma unidade de comando independente da máquina.

Num sistema CNC, os microcomputadores são usados para executar todas as funções básicas com base no programa que é carregado na unidade de controle da máquina, no nosso caso podemos ver esse exemplo na figura 20, que pode enviar comandos para o servo drive para alcançar uma variedade de funções, como ligar/desligar os motores, troca de ferramentas, entre outras. Todas as operações dos CNC são monitorizadas continuamente por dispositivos de feedback, como sensores de proximidade, sensores de pressão, e assim por diante. Então, se houver algum erro, o sistema geraria uma “Mensagem de Falha” para alertar o operador [37].



*Figura 20 Parte eletrônica da CNC feita nos laboratórios da ESTIG após a otimização*

## 2.10. As várias etapas de maquinação CNC

### 2.10.1. Passo 1: Projeto de modelo CAD

Na primeira etapa, é necessário projetar um modelo CAD 2D ou 3D, como demonstra a figura 21, que, geralmente, é feito com um software de desenho assistido por computador, e as informações como dimensões e geometrias do produto seriam incluídas no arquivo CAD [37].

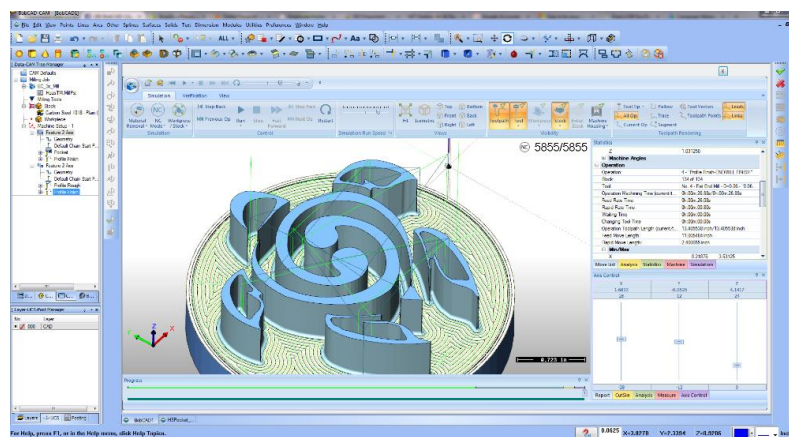


Figura 21 Interface do software BobCad CAM, para germinar o G-code [38]

### 2.10.2. Passo 2: Conversão de arquivo

Na segunda etapa, converte-se o arquivo CAD para um formato de arquivo compatível com CNC, geralmente, é o "código G", para que a máquina CNC possa fazer a leitura. Neste passo, usa-se a fabricação assistida por computador (CAM), um software para executar este tipo de arquivo, figura 22, que geraria o código de programação digital para controlar estas máquinas.[37]

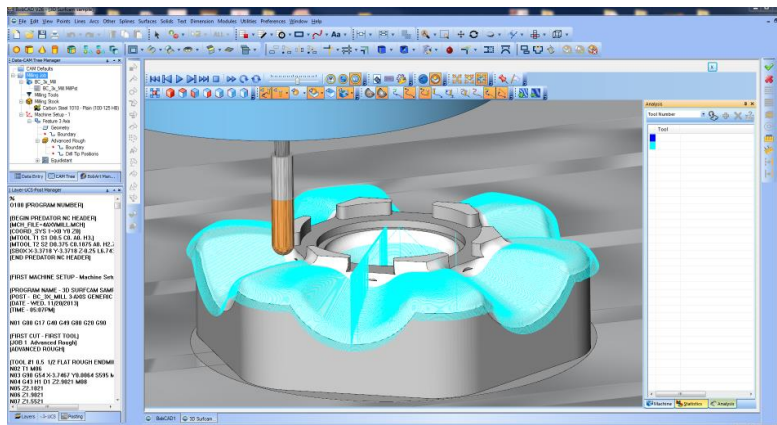


Figura 22 Interface do software BobCad CAM, simulação e conversão do arquivo [39]

### 2.10.3. Passo 3: Configuração da máquina

É aconselhável configurar as máquinas antes que elas comecem a funcionar. Por exemplo, precisamos testar a velocidade e o posicionamento, certificando que o seu desempenho é o esperado, podemos ver um exemplo na figura 23. É um passo muito importante, pois configurações erradas danificariam máquinas e peças também.[37]



Figura 23 Exemplo de configuração de uma CNC [40]

### 2.10.4. Passo 4: Execução de Operação de Maquinagem

Na última etapa, Máquinas CNC passam a funcionar de acordo com os comandos enviados pelo programa, a figura 24 demonstra o funcionamento da nossa CNC, e cada movimento de máquina e ferramentas cumprirá rigorosamente o programa. Assim, os produtos finais feitos por maquinagem CNC seriam exatamente os mesmos do projeto original.[37]



*Figura 24 Operação da CNC presente nos laboratórios de mecânica da ESTIG após a otimização*

## **2.11. As vantagens do CNC**

As máquinas CNC podem realizar uma série de ações automaticamente, o que será preciso fazer é programar e configurar a máquina. Estas máquinas podem trabalhar 24h/365d/ano sem descanso, somente se houver falha da máquina. Assim sendo, é possível melhorar a eficiência da produção.

As máquinas CNC são controladas por computadores que ajudam a eliminar erros e a precisão e consistência dos produtos em diferentes lotes. Portanto, é adequado para projetos que possuem altas exigências sobre a qualidade e confiabilidade dos produtos.

Embora os custos iniciais para máquinas CNC sejam elevados, sua alta produtividade e menor taxa de erros de fabricação tornam os numa escolha económica para maioria dos fabricantes, além do que, há menos trabalho humano necessário durante o processo, um operador hábil pode operar várias máquinas ao mesmo tempo. Esta tecnologia torna-se cada vez mais usual, o que também pode resultar na redução do custo destas máquinas.

A CNC pode fabricar peças com diferentes formas, como visualizado na imagem a seguir, figura 25, de simples a complicadas, com alta precisão. Por outro lado, podemos reprogramar as máquinas CNC para fabricar uma peça completamente nova com um tempo de resposta curto [37].



*Figura 25 Exemplo de possíveis peças a serem fabricadas em máquinas CNC industriais [41]*

## **2.12. Componentes de uma máquina CNC**

As máquinas controladas por CNC seguem, basicamente, a mesma concepção de projeto mecânico das máquinas de controle convencional em relação aos processos de maquinagem. Porém, são necessários alguns cuidados na sua construção que estão relacionados [42]:

- Uso de guias temperadas e associação de materiais que assegurem o mínimo desgaste. A produção é aumentada várias vezes pelo uso do CNC, o que implica em maior número de movimentos e maior desgaste.
- Posicionamento e forma adequados do barramento (principalmente nos tornos) de forma a evitar que os cavacos, carregando grande quantidade de calor, fiquem acumulados sobre as guias o que provocaria deformações alterando a precisão da máquina.
- A redução do atrito para melhorar o rendimento e reduzir aquecimento, com emprego de guias com roletes, guias com esferas, guias hidrostáticas, fusos com esferas circulantes, guias com revestimento para redução do atrito.
- Maior rigidez estática e dinâmica da máquina para assegurar precisão de execução e grande capacidade de remoção de material.
- Estudo das condições de trabalho de sistemas servo-comandados, análise dos efeitos de folga e deformação elástica. O Servo Driver converte os sinais eletrônicos emitidos pelo comando da máquina em impulsos elétricos que acionam o servo motor. O papel do Servo Motor é de velocidade variável, responsável pelo movimento da mesa da máquina. Para

tornos, o servo motor aciona os eixos de movimento da ferramenta. Por fim o tacômetro é o instrumento de medição responsável pelo monitoramento dos valores de avanço e rotação dos eixos da máquina. O tacômetro fornece informação para o conversor ou o servo driver da necessidade ou não de realimentação dos seus respectivos motores.

- Utilização de um sistema de medição dos deslocamentos normalmente electro indutivo ou ótico, robustos e de alta precisão, capaz de resistir ao ambiente industrial e às vibrações. Sensores de posição lineares Similares ao que se pode ver na figura ao lado.
- As maiores velocidades de deslocamento das partes móveis exigem um estudo criterioso dos momentos e das forças de inércia, com cuidado especial na redução do peso das massas móveis.
- Motor de acionamento da árvore principal de elevada potência e capacidade de variação contínua de velocidade.
- Previsão de local para colocação da esteira para remoção automática de cavacos que saem em grande quantidade. Para a ajuda deste desempenho temos o Conversor que transforma os impulsos eletrônicos emitidos pelo comando em impulsos elétricos que acionam o motor principal da máquina, e o Encoder que é responsável pela medição de posição dos eixos.
- Existência de um utensílio para trocar automaticamente de ferramentas e estrados porta-peça para alcançar maior produtividade com a redução dos tempos improdutivos de troca, tanto das peças como das ferramentas, além de reduzir o tempo de preparação da máquina.
- Sistema de medição das ferramentas (pre-setting). Este tipo de sistema auxilia na medição da ferramenta na própria máquina CNC.
- Possibilidade de acoplar várias ferramentas, como demonstra a figura 26.



*Figura 26 Algumas ferramentas que fazem parte de uma CNC [43]*

## 2.13. Informações ao funcionamento da CNC

A introdução das informações de comando para o CNC ocorre através de uma interface de entrada de dados. Como o CNC é um equipamento destinado à produção, figura 27, torna-se necessário o armazenamento destas informações, seja no próprio comando ou em cópias de segurança para posterior aplicação. Para o seu correto funcionamento, o CNC armazena dados tecnológicos sobre o processo de fabricação, formas geométricas, pontos de referência, dimensões de ferramentas, entre outros que possibilitem a execução do produto de forma automatizada [42].

A programação CNC é baseada na norma ISO 6983 de 1982, sendo cada que função da máquina é associada a um código específico. Também conhecida como “código G”, esta norma estabelece um relacionamento de texto entre os códigos de comando e as funções da máquina [42].



*Figura 27 CNC industrial [44]*

## 2.14. Pontos de referência usados em CNC

Para programar uma máquina CNC é necessário estabelecer sistemas de referência nos quais possam ser descritas posições relativas entre as ferramentas de fabricação e as peças a serem fabricadas.

A referência da máquina também pode ser chamada de ponto zero. A referência da peça pode ser chamada de ponto zero-peça, e a posição é escolhida pelo programador CNC.

O ponto zero-peça é a origem do sistema de coordenadas da peça e servirá como referência para a maquinagem e programação, como podemos verificar na figura 28. A partir deste ponto é que serão programados os caminhos e posicionamentos das ferramentas e todas as funções de maquinagem. A distância entre o zero-máquina e o zero-peça é determinada diretamente na máquina pelo operador.

O propósito destes sistemas de referência é o de prover um meio de localização da ferramenta em relação à peça. Considerando o ponto zero ferramenta o CNC consegue aplicar determinados conjuntos de ferramentas para confecção da peça de acordo com as especificações do projeto, atendendo a qualidade necessária para o produto [33].

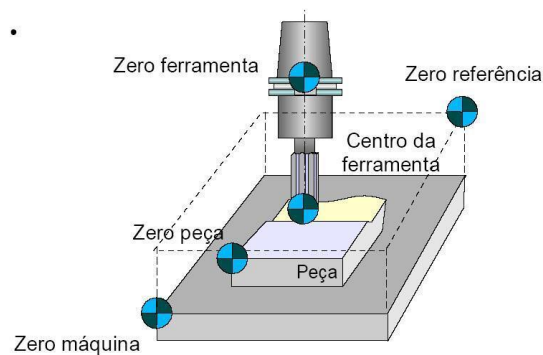


Figura 28 Exemplificação de como tirar os zeros na CNC [45]

### 2.14.1. Eixos

Eixo é uma direção segundo a qual podem ser programados os movimentos relativos entre a ferramenta e a peça de forma contínua e controlada.

Os eixos principais determinam um sistema de coordenadas retangulares, de rotação à direita. Neste sistema de coordenadas são programados movimentos da ferramenta.

Na programação CNC, os eixos principais são classificados como eixos geométricos [33].

Para cada eixo cartesiano, foi associado um eixo de rotação, a saber:

- Eixo A Rotação em torno do eixo X;

- Eixo B Rotação em torno do eixo Y;
- Eixo C Rotação em torno do eixo Z;

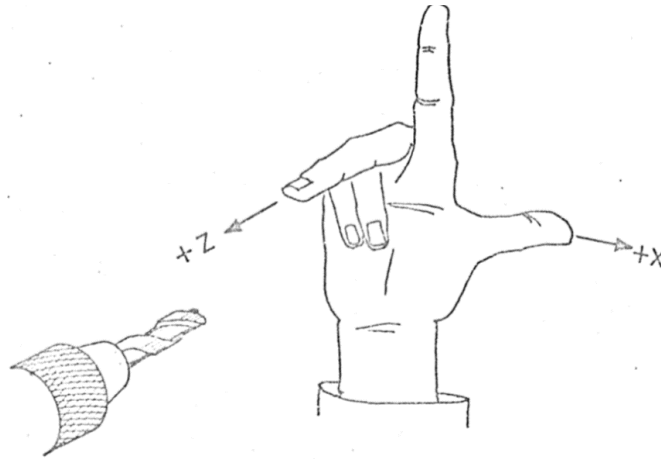


Figura 29 Os sentidos dos eixos determinados pela regra da mão direita [46]

Os eixos de movimento coincidem com os eixos dos sistemas de coordenadas cartesianas (X, Y e Z), sendo que os sentidos dos eixos são determinados pela regra da mão direita, figura 29.

Foi adotada internacionalmente a convenção de orientar o eixo "Z" em sentido paralelo ao eixo -árvore da máquina, contendo o movimento principal de corte. O sentido positivo do eixo "Z" é aquele na qual a ferramenta se afasta da peça.

Para fresadoras, aplicam-se os eixos geométricos X, Y e Z.

Para máquinas mais complexas, podem ser controlados até mais de cinco eixos de movimento. Cada um associado a um elemento da máquina. Existem máquinas com eixos paralelos aos eixos X, Y e Z. Neste caso suas denominações passam a ser U, V e W, respectivamente.[33]

### 2.14.2. Zero da peça

Uma prática comum na programação CNC é a de estabelecer a origem do eixo Z na face da peça, como referido anteriormente. Desta forma, para maquinar a peça será necessário trabalhar no programa com valores negativos de coordenadas, sendo que as coordenadas positivas indicarão que a ferramenta não está "dentro" da peça. É importante que o ponto

zero peça seja de fácil localização para operador, exemplo figura 30, pois este precisará informar para a máquina sua posição relativa ao sistema de coordenadas da máquina.

Também é interessante fazer comentários dentro do programa CNC sobre a localização do ponto zero peça. Estes comentários serão utilizados pelo operador da máquina CNC para determinar a posição do ponto zero peça [33].

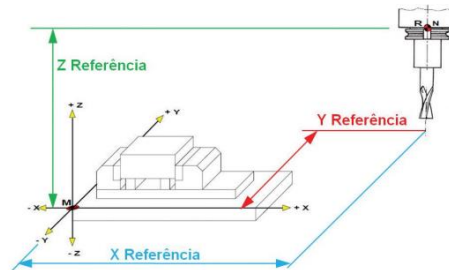


Figura 30 Referências de posicionamento da CNC [47]

## 2.15. Transferência de dados para a CNC

Antigamente, a transferência de dados era realizada através de fitas perfuradas com as instruções dos dados da peça, como vimos anteriormente, e condições de maquinagem, definidas pelo programador. Estas fitas podiam ser criadas tanto pelo sistema manual como através do auxílio do computador. Uma ótica acoplada na máquina fazia a leitura da fita e passava a instrução de comando à máquina.

A programação manual também podia, e em boa parte das máquinas atuais ainda pode, ser feita através de teclados alfanuméricos presentes ou conectados as máquinas de comando numérico, principalmente onde a simplicidade do trabalho a ser feito e a natureza da operação, não justificam gastos com sofisticados métodos de programação.

Por outro lado, a programação feita com auxílio do computador, proporciona, além da rapidez, maior segurança contra erros, figura 31. Já nos anos 70 foram introduzidas as máquinas CNC que passaram a depender menos da parte de “hardware”, essencial nos circuitos das anteriores dos anos 60, e ter seu funcionamento baseado muito mais no “software”.

Os avanços substituíram a entrada manual de dados e as fitas perfuradas por armazenamento em disquete dos programas ou comunicação remota.

Em casos de programas longos, é possível particionar o programa, reduzindo a capacidade de memória da máquina. Além disso, é possível fazer o controle dos tempos de fabricação, tempos de maquinagem, tempos de preparação, permitindo a avaliação do desempenho da máquina. Atualmente, é possível inserir dados na máquina a partir de uma grande variedade de programas e linguagens [33].

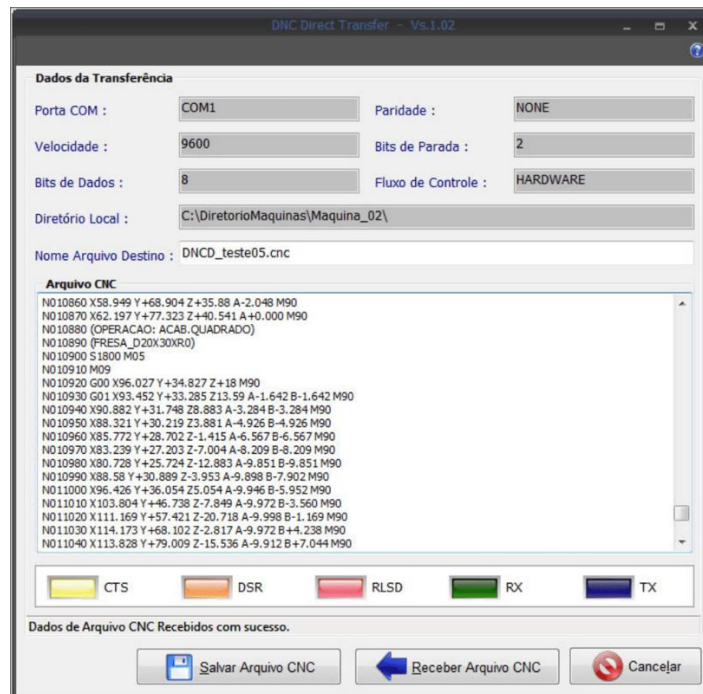


Figura 31 Exemplificação de transferências de código [48]

## 2.16. Código G-code

Os códigos G são usados para comandar movimentos específicos de uma máquina. O formato de um código G é a letra G seguida de dois a três dígitos; por exemplo, G01. Os códigos G diferem:

[G00 Posicionamento de movimento rápido]

[G01 Movimento de Interpolação Linear]

[G02 Interpolação Circular Sentido Movimento-Horário]

[G03 Interpolação Circular Movimento Contra-Sentido Horário]

## [G10 Compensações de Conjuntos (Grupo 00) Mill]

G-code (também RS-274) é a linguagem de programação de impressão 3D e controle numérico computacional (CNC) mais utilizada. É empregue, principalmente, na fabricação auxiliada por computador para controlar máquinas-ferramentas automatizadas, bem como para aplicações de segmentação de dados de impressoras 3D. O G significa geometria. Ainda a saber que o código G tem muitas variantes.

As instruções do código G são fornecidas a um controlador de máquina (computador industrial) que diz aos motores onde se mover, quão rápido e qual caminho seguir. As duas situações mais comuns são que, dentro de uma máquina-ferramenta, como um torno ou moinho, uma ferramenta de corte é movida de acordo com essas instruções através de um caminho, cortando o material para deixar apenas a peça acabada e/ou uma peça de trabalho inacabada é precisamente posicionada em qualquer um dos até nove eixos em torno das três dimensões relativas a um caminho e, um ou ambos podem mover se um em relação ao outro. O mesmo conceito também se estende a ferramentas não cortantes, como ferramentas de conformação ou polimento, foto plotagem, métodos aditivos, como impressão 3D, e instrumentos de medição [49].

### **2.16.1 Contextualização**

A primeira implementação de uma linguagem de programação de controle numérico foi desenvolvida no Laboratório de Servomecanismos do MIT na década de 1950. Nas décadas que se seguiram, muitas implementações foram desenvolvidas por inúmeras organizações, tanto comerciais quanto não comerciais. Elementos do código G foram, frequentemente, usados nessas implementações. A primeira versão padronizada do código G usada nos Estados Unidos, RS-274, foi publicada em 1963 pela Electronic Industries Alliance (EIA; então conhecida como Electronic Industries Association) [50]. Em 1974, a EIA aprovou o RS-274-C, que fundiu o RS-273 (bloco variável para posicionamento e corte reto) e o RS-274-B (bloco variável para contorno e contorno/posicionamento). Uma revisão final da RS-274 foi aprovada em 1979, como RS-274-D [51] [52]. Em outros países, a norma ISO 6983 (finalizada em 1982) é, frequentemente, usada, mas muitos países europeus usam outras normas. Por exemplo, o DIN 66025 é utilizado na Alemanha, e o PN-73M-55256 e o PN-93/M-55251 eram anteriormente utilizados na Polónia [53].

Durante as décadas de 1970 a 1990, muitos fabricantes de máquinas-ferramentas CNC tentaram superar as dificuldades de compatibilidade padronizando os controladores de máquinas-ferramentas construídos pela FANUC. A FANUC é um grupo japonês de empresas que fornecem produtos e serviços de automação, como robótica e sistemas sem fio de controle numérico computadorizado [54]. A Siemens foi outra dominadora de mercado em controles CNC, especialmente, na Europa. Na década de 2010, as diferenças e incompatibilidade do controlador já não eram tão problemáticas porque as operações de maquinagem, geralmente, são desenvolvidas com aplicativos CAD/CAM que podem produzir o código G, exemplo disso é o código usado no numa das experiências efetuadas neste trabalho, figura 32, apropriado para uma máquina específica por meio de uma ferramenta de software chamada pós-processador.

```
N100 G1 Z10. x0 y0 F500.  
N130 X7.864 Y29.446 F200.  
N160 Z0.  
N165 m3s1  
N170 X21.992  
N180 X23.15 Y29.52  
N190 X24.259 Y29.671  
N200 X25.323 Y29.897  
N210 X26.347 Y30.195  
N220 X27.334 Y30.565  
N230 G3 X29.193 Y31.512 I-5.594 J13.273  
N240 G1 X30.131 Y32.123  
N250 X31.024 Y32.799  
N260 X31.875 Y33.544  
N270 X32.685 Y34.36  
N280 G3 X34.075 Y36.06 I-13.351 J12.333  
N290 G1 X34.767 Y37.085  
N300 X35.394 Y38.157  
N310 X35.957 Y39.278  
N320 G3 X37.103 Y42.371 I-19.19 J8.863  
N330 G1 X37.432 Y43.668  
N340 X37.683 Y44.979  
N350 X37.856 Y46.308  
N360 G3 X37.969 Y48.594 I-23.025 J2.286  
N370 G1 Y48.602  
N380 X37.929 Y50.012  
N390 X37.81 Y51.386  
N400 X37.614 Y52.727  
N410 X37.342 Y54.038  
N420 X36.994 Y55.32  
N430 G3 X36.053 Y57.829 I-19.941 J-6.046  
N440 G1 X35.507 Y58.938  
N450 X34.9 Y59.989  
N460 X34.233 Y60.986  
N470 G3 X33.002 Y62.515 I-14.924 J-10.756  
N480 G1 X32.156 Y63.399  
N490 X31.265 Y64.216  
N500 X30.326 Y64.967  
N510 G3 X28.491 Y66.173 I-10.933 J-14.64  
N520 X26.822 Y66.981 I-6.505 J-11.314  
N530 G1 X25.858 Y67.322  
N540 X24.858 Y67.591  
N550 X23.821 Y67.787  
N560 G3 X21.992 Y67.948 I-2.263 J-15.178  
N570 G1 X7.864  
N580 Y29.446  
N585 m5  
N590 Z10
```

Figura 32 Exemplo do G-code usado no presente trabalho

## 3. Metodologia

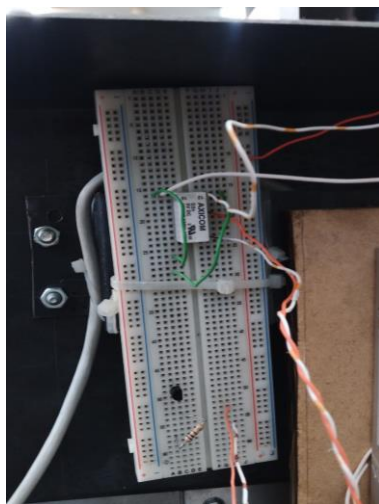
### 3.1. Funcionamento experimental

No início o proposto foi a reabilitação de uma CNC que se encontrava fora de operação, apresentando uma variedade de problemas tanto em termos de movimento quanto em componentes eletrônicos. Era evidente a presença de fios soltos e desligados, comprometendo significativamente o seu funcionamento. Diante desse desafio, foi feito um plano abrangente para a resolução dos problemas.

A máquina em questão opera com 3 graus de liberdade, movimentando-se nos eixos X, Y e Z, representando, respetivamente, os movimentos esquerda/direita, frente/trás e cima/baixo. Esses movimentos são acionados por motores passo a passo ligados a componentes como correias, fusos trapezoidais e rolamentos. Três drivers distintos alimentam esses motores, ligados a uma fonte de alimentação e à placa Arduino, que, por sua vez, liga-se ao computador via USB. Na parte de solda, a máquina possui um sistema elétrico independente que liga diretamente o Arduino à *breadboard*, que se encontra conectado a um relé que controla a tocha, figura 33.

Inicialmente inoperante, a máquina apresentava problemas como a fonte de alimentação não acionava os drivers, fios soltos e a ausência de documentação. A substituição da fonte de alimentação e a revisão das ligações entre fonte, drivers e *Arduino*, seguindo as portas descritas no código, resolveram problemas elétricos. A revisão e lubrificação da máquina corrigiram falhas nos movimentos.

Entretanto, ao testar com o programa Gcode Sender, identificamos erros e interrupções inesperadas durante o processo. A revisão e lubrificação geral da máquina solucionaram problemas de locomoção, mas a parte de solda não respondia aos comandos do software. Após identificar falhas eletrônicas, simplificamos o esquema de ligações, recriamos o circuito e ajustamos a porta de saída do *Arduino* no código. Esse processo, exigiu a realização de pesquisa e melhoria de conhecimentos mecânicos e eletrônicos, foi demorado, mas resultou no sucesso da máquina ao responder aos comandos e acionar a tocha conforme previsto.



*Figura 33 BreadBoad, responsável pelo funcionamento autónomo da tocha, após a otimização*

## **3.2. Otimização**

Como mencionado anteriormente, o funcionamento da máquina baseia-se em 3 graus de liberdade correspondentes às coordenadas X, Y e Z, fundamentais para posicionar o software e a máquina na mesa de trabalho. A linguagem de comunicação utilizada é o G-code, amplamente adotado na indústria devido à sua simplicidade e eficácia, embora exija estudo para a sua compreensão.

O maior desafio deste projeto foi, sem dúvida, reconfigurar toda a parte eletrônica e estabelecer a comunicação eficaz entre o software e a máquina. O primeiro obstáculo foi a fonte de alimentação, figura 34, que foi substituída por estar inoperacional. Concluído esse passo, o trabalho significativo envolveu a reestruturação das ligações entre a fonte de alimentação e os drivers, os drivers e os motores passo a passo, a integração do Arduino com os drivers e, por fim, a complexa ligação da tocha de soldar para garantir seu funcionamento.

O último ponto mencionado foi particularmente demorado, exigindo tempo e várias tentativas para encontrar uma solução. A abordagem final envolveu a ligação do Arduino (porta 13) à breadboard, transmitindo os sinais de ligar/desligar para a entrada do relé AXICOM D2n 5V DC, alimentado com 5 volts para atração. O relé também estava ligado a um driver, se necessário, e suas saídas eram ligadas diretamente à tocha. Essa simplificação otimizou o processo e, mais importante, tornou-o operacional.

Destaca-se, também, a reconfiguração das ligações entre a fonte de alimentação e os drivers, utilizando conectores compactos WAGO série 222. Isso permitiu a transferência eficiente de energia dos drivers para os motores passo a passo, garantindo que todas as ligações fossem estabelecidas corretamente. Como resultado, quando uma ordem é emitida através do computador, a máquina responde com sucesso.

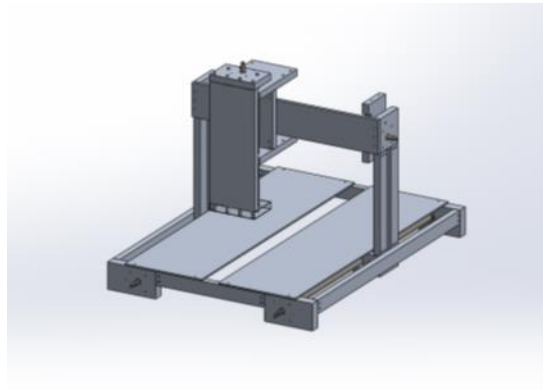
Para uma compreensão mais aprofundada do funcionamento da máquina, detalhes adicionais estão disponíveis no manual do utilizador anexo a este documento.



*Figura 34 Parte do processo de substituição e otimização dos componentes elétricos*

### **3.3. Mecanismos e projeto**

No que diz respeito à estrutura, nosso projeto é composto por diversos componentes. A construção foi efetuada a partir de dois materiais distintos: aço e alumínio. O objetivo é proporcionar suporte aos três eixos, garantindo, simultaneamente, que permaneçam ortogonais entre si. A Figura 35 apresenta, de maneira elucidativa, o projeto CAD da estrutura. A mesa, destinada a sustentar o processo de soldadura, é uma superfície plana de alta rigidez, projetada para suportar o peso das peças a serem soldadas. Notavelmente, ela possui um espaçamento central para a realização das soldas, visando estender a vida útil da mesa. Para isso, utilizamos duas chapas de aço, cada uma com 4 mm de espessura e espaçamento de 50 mm entre elas, fixadas à estrutura por parafusos M4x20 mm.



*Figura 35 Estrutura da CNC [58]*

Para viabilizar o deslocamento da CNC nos três eixos, observamos a presença de guias lineares, rolamentos lineares, fusos, casquilhos de bronze e rolamentos de esferas e rolos. Neste sistema, a mesa permanece estática, enquanto os três eixos se movem de maneira perpendicular entre si. A regulação da tocha é realizada manualmente, como demonstra a figura 36, fixando seu ajuste na parte traseira. Na figura 37 é demonstrado o ângulo ideal para os nossos ensaios.



*Figura 36 Demonstração como conceder ângulo à tocha da CNC*

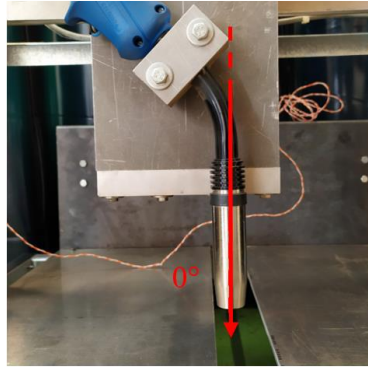


Figura 37 Ângulo usado para os testes experimentais da CNC

Abordando os componentes, as guias lineares desempenham o papel crucial de manter os movimentos da máquina em trajetórias retas, garantindo a linearidade do percurso. Em cada eixo, duas guias de doze milímetros de diâmetro são empregues para assegurar essa linearidade.

Para reduzir o atrito nas guias lineares e possibilitar um movimento suave, optou-se por casquilhos de bronze nos eixos das ordenadas e das abcissas. Nos eixos das ordenadas, também foram incorporados rolamentos lineares LBBR 16-2LS.

Os movimentos dos eixos são facilitados pelos fusos trapezoidais e suas respectivas roscas. Ao receber a ordem do software, os motores passo a passo emitem impulsos que resultam na rotação dos fusos. Esse movimento controlado é viabilizado pela interação entre os motores de passo e os fusos, intermediados por acopladores.

Para suportar cargas axiais e prevenir empenamento das guias lineares, implementou-se um suporte com rolamentos. Foram utilizados quatro rolamentos 608-RSH, dois em cada suporte.

Quanto ao controle das movimentações, um software no computador e uma biblioteca no *Arduino* gerem as operações da CNC. Após receber uma ordem do computador, a máquina envia um sinal para a placa *Arduino*. Esta, por sua vez, emite impulsos para os drivers correspondentes, os quais acionam os motores de passo NEMA23, induzindo a movimentação desejada na estrutura. A figura 38, ilustra as ligações presentes neste trabalho.

No sistema elétrico, os componentes incluem uma fonte de alimentação DC12V 5A para suprir o sistema, uma placa *Arduino* UNO, três drivers M542T e três motores de passo NEMA23.

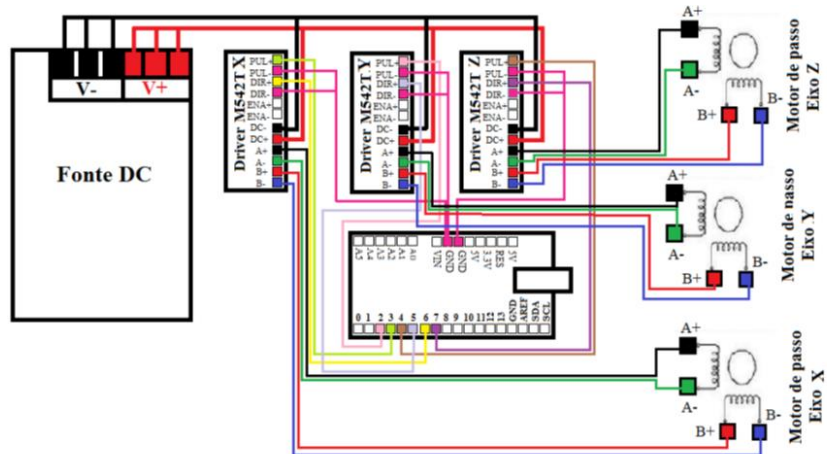


Figura 38 Esquema das ligações eletrônicas da CNC [55]

Podemos ainda verificar que o botão da tocha foi substituído por um sistema artesanal automatizado, assim sendo, o mesmo é acionado através do software em vez de operação manual, na figura 39 podemos verificar o esquema.

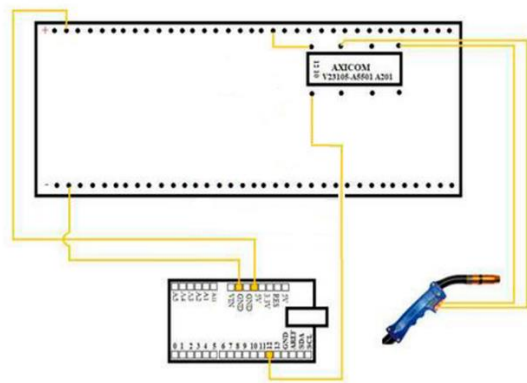


Figura 39 Esquema da ligação à tocha

### 3.4. Software Gcode Platform

A Plataforma UGS representa a próxima geração do Universal Gcode Sender, construída sobre a base sólida da Plataforma Netbeans. A estrutura modular permite a integração fácil de diversos recursos sem comprometer a qualidade do código. Para operar este software, é necessário ter o Java instalado no computador, e para a comunicação entre o UGS e a nossa CNC, é essencial adicionar a biblioteca GRBL ao Arduino, sendo que, no nosso caso, optamos pela biblioteca GRBL 1.1.

Este programa destaca-se como uma plataforma gcode completa, desenvolvida com uma interface com controladores CNC avançados, tais como GRBL, TinyG, g2core e Smoothieware. O Universal Gcode Sender é compatível com a maioria dos sistemas operacionais, incluindo Windows, Mac e Linux.

Os benefícios desta plataforma incluem um sistema de janelas dinâmicas pronto para uso, permitindo a organização eficiente da interface do utilizador, Figura 40. Na Figura 41, é possível visualizar o software executando o código, ilustrando os posicionamentos dos eixos da máquina.

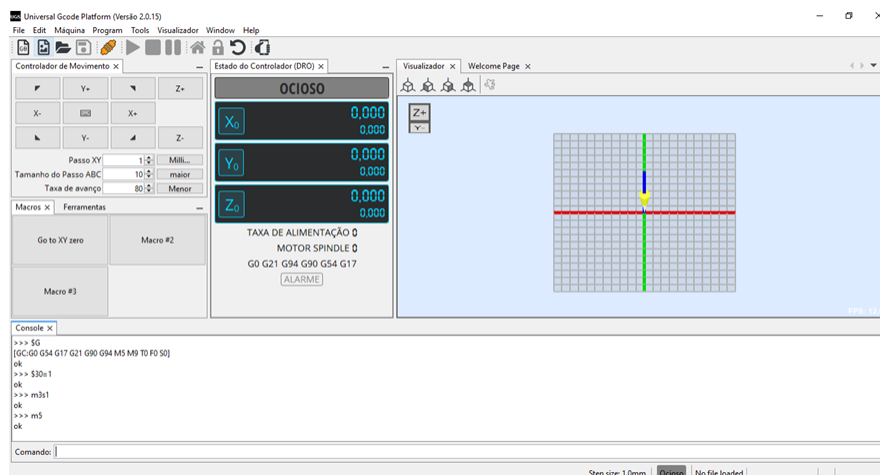


Figura 40 Interface Universal Gcode Platform

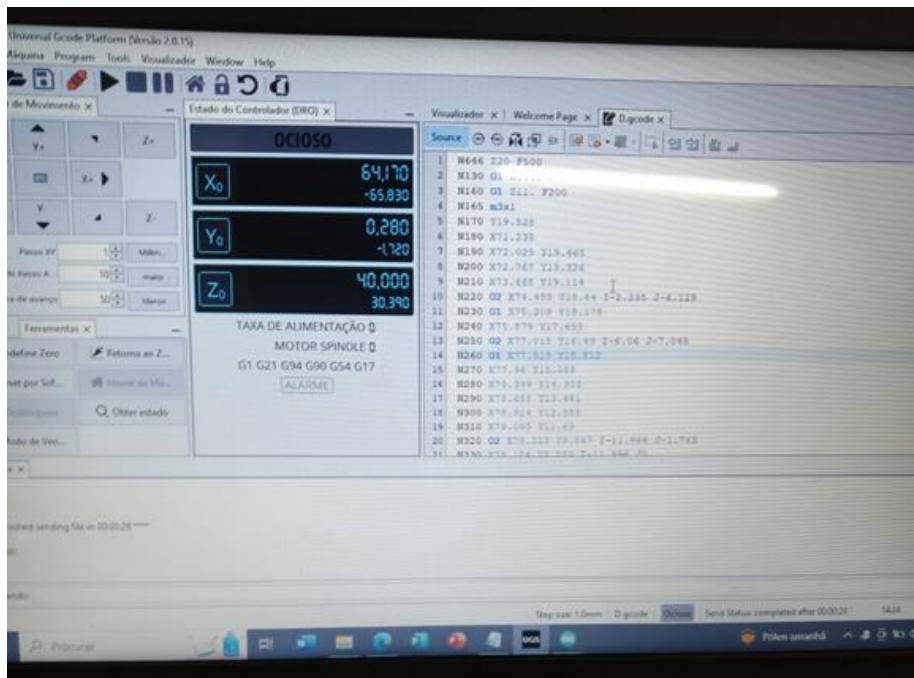


Figura 41 Demonstração do código no software

## 4. Resultados e análise

### 4.1. Procedimentos experimentais

O passo experimental inicial consistiu em verificar a funcionalidade das ligações e a interligação com o software G-code SENDER, focalizando no movimento dos eixos da CNC. Nesta fase, confirmou-se que a máquina se comportava conforme o previsto, movendo-se para o ponto designado após a emissão da ordem no programa. Para avaliar a confiabilidade dos movimentos, foram executadas trajetórias em diversas direções, incluindo círculos, assegurando que, uma vez ligada à máquina MIG/MAG, o movimento não falharia durante o processo de soldadura.

Após a verificação bem-sucedida da etapa anterior, prosseguiu-se com o trabalho experimental para determinar se a máquina com controle CNC conseguia soldar pequenas linhas retas, avaliando o seu desempenho. Para isso, foi posicionada uma chapa na mesa de trabalho, e a máquina MIG/MAG foi ligada à CNC. Os parâmetros experimentais incluíram manter a primeira alavanca no número 1, a segunda alavanca na letra A, que é equivalente a 18 volts, e a velocidade do fio ajustada para o número 3. Os demais parâmetros permaneceram inalterados, conforme demonstrado na Figura 42. Estes parâmetros revelaram-se adequados para alcançar o resultado desejado.



Figura 42 Parâmetros da máquina de solda MIG/MAG

Foram realizadas experiências nas quais os parâmetros, especificamente os números e letras das alavancas, foram alterados. Contudo, essas variações resultaram em pouco sucesso, uma vez que a soldadura apresentava muitos respingos e defeitos, indicando um aumento da intensidade aplicada na solda. A conclusão alcançada foi que, para manter uma soldadura de qualidade com a CNC, seria necessário manter os parâmetros da máquina MIG/MAG no mínimo, 18 volts.

O próximo passo consistiu em realizar soldas de pequenas letras, Figura 43, conforme demonstrado na imagem abaixo. Os resultados foram bastante satisfatórios, evidenciando todo o potencial da máquina. Inicialmente, foi executado uma experiência sem a máquina MIG/MAG ativa para verificar se a CNC seguia o percurso previsto, isto é, se ligava e desligava nos momentos adequados. No que diz respeito à tocha, confirmou-se que ela baixava, levantava e se deslocava nos eixos conforme o pretendido. Após a verificação de todo o processo e código, a MIG/MAG foi ativada, e demos início à nossa experiência de soldadura.



*Figura 43 Chapa com os primeiros ensaios experimentais*

Posteriormente, a meta que foi estabelecida consistia em verificar se a máquina seria capaz de realizar uma soldadura em 3D, ou seja, diversas soldas nos mesmos pontos, camada

por camada, semelhante ao processo de impressão 3D. Nesta fase do procedimento, optou-se por criar uma pequena letra, como ilustrado nas Figuras 44, 45 ,46 e 47.



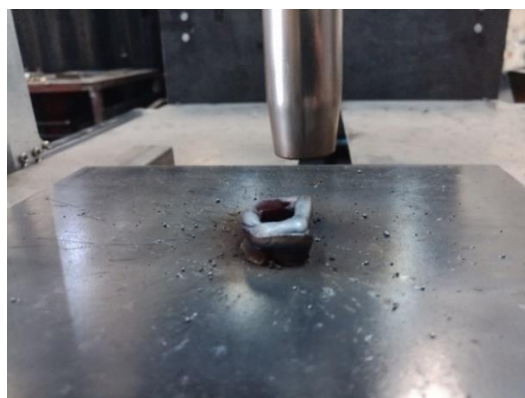
*Figura 44 Primeira solda 3D (4 camadas)*



*Figura 45 Primeira solda 3D (6 camadas)*

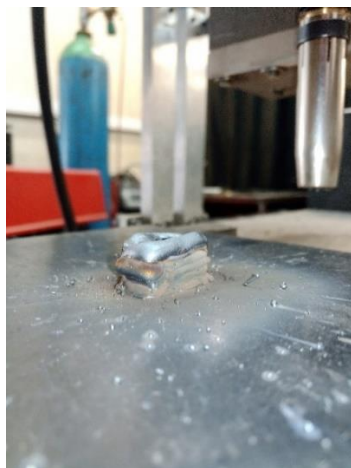


*Figura 46 Vista em plano frontal da soldadura 3D*



*Figura 47 Vista lateral da soldadura 3D*

O resultado alcançado após sete camadas de soldadura, Figura 48, indicou que a máquina possui o potencial para realizar essa etapa com sucesso. No entanto, é necessário otimizar o procedimento, pois, devido ao tamanho reduzido da letra, a falta de tempo de espera entre as camadas e a velocidade de soldadura um pouco elevada, o produto final resultou numa solda imperfeita, com considerável presença de respingos. Durante o processo, observou-se um aumento significativo na temperatura, comprometendo o resultado.



*Figura 48 resultado da primeira experiência de soldadura em 3D (7 camadas)*

Numa etapa subsequente, realizou-se a tentativa de criar duas letras de tamanhos diferentes, ampliando-as em comparação com a primeira experiência. Assim como descrito anteriormente, o processo foi conduzido em camadas, mas desta vez otimizado para reduzir a velocidade e a aceleração. Essa otimização foi alcançada por meio de ajustes nos códigos do software, conforme detalhado no manual do utilizador, em anexo. Os códigos relacionados à aceleração, ou seja, \$120, \$121, \$122, foram alterados de 10 para 5, enquanto os relacionados com a velocidade, \$100, \$101, \$102, foram ajustados de 250 para 200. Detalhando ainda mais, os parâmetros de aceleração foram reduzidos de 10 para 5, e a velocidade foi ajustada de 250 para 200. Foram realizados dois testes até encontrar o ponto que resultasse num melhor desempenho.

No primeiro teste, os parâmetros de aceleração foram ajustados para o número 2, e a velocidade foi configurada para 150.



*Figura 49 Segunda tentativa após otimização do processo*



*Figura 50 Verificação da deformação da chapa*

No decorrer deste teste, observamos que, após apenas cinco camadas, Figura 49, ocorreu uma considerável deformação na chapa de 3[mm], Figura 50. Isso resultou do aquecimento excessivo, pois a tocha avançou em uma velocidade muito lenta, resultando em excesso de solda no mesmo local em um curto período. Isso provocou um significativo aumento de temperatura e um resultado defeituoso, conforme evidenciado nas imagens acima.

Após análise e ajuste dos valores de aceleração para cinco e velocidade para duzentos, o resultado para este novo ensaio de seis camadas foi o mais satisfatório obtido até este momento, como é demonstrado na Figura 51.



*Figura 51 Resultado da terceira tentativa de otimizar o processo*



*Figura 52 Verificação, embora que menor, da deformação da chapa de trabalho*

Após este ensaio, foi possível constatar uma melhoria no acabamento da soldadura, com menos respingos. No entanto, mesmo com uma deformação ligeira na extremidade da chapa, como evidenciado na Figura 52, o resultado ainda apresentou melhorias. Vários fatores podem ter contribuído para esse resultado, sendo os mais prováveis o aumento do tamanho das letras, que auxiliou na melhoria do resultado, e a alteração dos parâmetros.

Numa etapa experimental final, foi proposto elevar o desafio, criando uma peça semelhante a um "copo". Isso implicou a realização de muitas camadas para avaliar o comportamento da máquina CNC. O objetivo era verificar se o mecanismo CNC poderia superar as expectativas, criando peças ou letras com o dobro das camadas em comparação com os testes realizados até ao momento.

Para esta experiência, escolheu-se uma placa retangular de metal com 135 mm de comprimento, 100 mm de largura e 16 mm de espessura, que serviria como base. Devido à sua espessura, o risco de distorção seria mínimo. Optou-se também por criar círculos com dimensões específicas, que seriam a base para a nossa peça final, Figura 53.

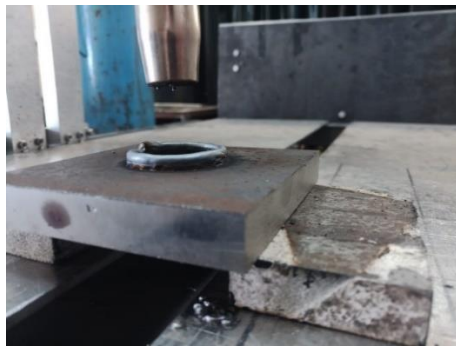


*Figura 53 Experimento de executar uma circunferência para o trabalho final*

Conforme ilustrado na Figura 53, o primeiro teste foi realizado para verificar se o tamanho e todos os outros parâmetros estavam operacionais para a realização final pretendida.



*Figura 54 Base escolhida para o trabalho final, na posição de trabalho*



*Figura 55 Começo do trabalho (4 camadas)*



*Figura 56 Resultado após 8 camadas*



*Figura 57 resultado após 25 camadas*



*Figura 58 Resultado final (30 camadas ou 3cm de soldadura em camadas)*



*Figura 59 Vista do resultado obtido após todas as otimizações*

O resultado final alcançado foi extremamente gratificante. Após trinta camadas, Figuras 58 e 59, obtivemos um resultado bastante satisfatório, com acabamentos notáveis, evidenciando, assim, todo o potencial da CNC. Nesta etapa, foram melhorados todos os parâmetros para garantir um efeito positivo. Isso incluiu desde a aceleração e velocidade até a escolha de uma base mais espessa, capaz de suportar a elevada temperatura sem distorção significativa. Além disso, ajustamos o tempo de espera entre camadas (entre um e dois minutos) e introduzimos água dentro e ao redor do nosso círculo para arrefecer a peça. Conforme ilustrado na Figura 58, alcançamos uma altura de 30 mm após trinta camadas, representando o nosso melhor resultado e concluindo, assim, o objetivo proposto.

Ao analisar os resultados obtidos ao longo do processo, Figuras 54, 55, 56 e 57, observamos um progresso positivo à medida que avançávamos. Podemos afirmar que a máquina foi concluída e otimizada com sucesso, estando agora pronta para ser aplicada em futuros estudos e aplicações.

## **5. Conclusões**

### **5.1. conclusão do trabalho**

Este trabalho teve como principal objetivo a melhoria e funcionalidade aprimorada de um equipamento experimental do tipo CNC aplicado para processos de soldadura. Ao atingir os objetivos e fases propostos, obtivemos resultados bastante satisfatórios, destacando-se a capacidade aprimorada da máquina para produzir peças, figuras ou até mesmo letras em soldadura 3D, assemelhando-se ao funcionamento de uma impressora 3D.

A essência deste trabalho era, não apenas colocar a máquina em funcionamento, mas também melhorar de forma a tornar-se totalmente autônoma em futuros estudos, com um mínimo de esforço necessário para reiniciar suas operações. Anexamos um manual de utilizador abrangente, elaborado do zero, que guia passo a passo o processo de colocá-la em funcionamento.

Ressaltamos que uma das principais áreas de melhoria concentrou-se na revisão completa da parte eletrônica da CNC, juntamente com a aplicação e instalação de um software capaz de atender plenamente às necessidades do utilizador.

Além de cumprir esses objetivos práticos, este trabalho proporcionou uma compreensão mais profunda de todos os aspetos envolvidos na máquina, abrangendo desde a história e conhecimento do método de soldadura até a compreensão da linguagem e códigos CNC, bem como, o conhecimento intrínseco da CNC em si. Não podemos deixar de mencionar a dedicação à conscientização sobre os riscos à saúde associados à soldadura, ressaltando a importância de um extrator de fumos no local de soldadura.

Concluimos, portanto, com êxito todos os tópicos propostos, destacando a qualidade dos resultados obtidos e o potencial expressivo que a máquina apresenta.

## 5.2. Trabalhos futuros

A presente máquina é capaz de executar alguns trabalhos relacionados com a soldadura, embora seja um protótipo, o mesmo apresenta um grande potencial para a obtenção de bons resultados. O equipamento desenvolvido pode, ainda, ter alguma melhoria, uma das quais que proponho seria a criação de u sistema de fixação para manter a peça sempre no mesmo sítio sem haver deslocação da mesma caso seja preciso uma intervenção, outra dupla aplicação é o evitar a distorção da chapa, que é sujeita a uma soldadura, devido ao aumento da temperatura.

Outra sugestão era a projetar e construir um sistema de proteção para toda a cabelagem e parte eletrônica, pois a máquina apresenta um défice de proteção nesse aspeto. Falando na estrutura, outra proposta seria que o grau da tocha fosse automatizado, ou seja, a tocha iria ter um angulo dependendo do que lhe fosse inserido no software. Por fim, poderiam acrescentar-se sensores no final de cada eixo para, assim, não haver problema nenhum com o final de curso, pois a máquina pararia automaticamente.

## Referências

- [1] Sociedade Portuguesa do Ar Líquido,(2023)  
<https://pt.airliquide.com/solucoes/soldadura-industrial/processos-de-soldadura>
- [2] Fortes, Cleber; Vaz, Cláudio (2007, julho). “Elérodos Revestidos OK”, ESAB.
- [3] “History of Welding”, Welding.com.
- [4] Weld Vision, (2023, setembro), <https://www.weldvision.com/blog/uma-breve-historia-da-soldagem/>
- [5] R. L. O'Brien, 1991, “Welding Handbook Volume 2: Welding Processes”, American Welding Society.
- [6] Pires I., Quintino L., Miranda R., and Gomes J. P., 2006, "Fume emissions during gas metal arc welding,", Toxicological & Environmental Chemistry.
- [7] historia de las máquinas de soldar, (2023, agosto),  
<https://soldadorasinverter.com/historia-maquinas-soldar/>
- [8] Santos J., e Quintino L., 1999, “Processos de Soldadura”.
- [9] Principio de funcionamento processo MAG, (2023,julho),  
<https://www.google.pt/search?hl=pt-PT&site=imghp&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=643&q=principio+de+funcionamento+-+processo+MAG>
- [10] Guerreiro, Carlos Leonel Farinha, 2012, “Avaliação da emissão de nanopartículas de processo de soldadura por fusão”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, FCT-UNL, Caparica.
- [11] “SER ISQ.pdf”; “MAG ISQ.pdf” e “TIG ISQ.pdf”: <http://www.isq.pt>, acedido a 14/07/2023
- [12] Boehme D., 1990, “Welding gases – physical proprieties, the basis for development and optimum application of shielding gases and gas mixtures”.
- [13] Yeo S.H. e Neo K.G., 1997, “Inclusion of environmental performance for decision making of welding processes”, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University Singapore.

- [14] Exposição a fumos de soldadura (2023, agosto),  
<https://www.apopartner.pt/exposicao-a-fumos-de-soldadura/>
- [15] Rosado, Tobias Manuel Vilas - Boas, 2008, “Inovação do Processo MIG/MAG - Análise de produtividade e emissão de fumos”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Lisboa.
- [16] “Chemical Analysis”: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/index.htm>.
- [17] “GMAW Welding Guide”, Lincoln Electric, 2006: <http://www.lincolnelectric.com/en-us/Pages/default.aspx>
- [18] Leatham-Jones, B., 1986, Introduction to computer numerical control, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Sistema extração de fumos (2023, setembro),  
<https://images.app.goo.gl/p93Be6BuhUDMZxAx5>
- [20] Welding fume extractor for machine shop, (2023, setembro),  
<https://www.sentryair.com/blog/industry-applications/welding/testimonial-welding-fume-extractor-for-machine-shop/>
- [21] Welding fume extractor systems, (2023, setembro),  
<https://www.ventaire.com/products/welding-fume-extraction-systems>
- [22] J. B. C. Corrêa, 2018 “Modelação Numérica de Processos de Soldadura MIG em Ligas de Alumínio Al 6082-T6”, Instituto Politécnico de Bragança.
- [23] P. J. Modenesi e A. Q. Bracarense, 2012, “Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais”. Belo Horizonte.
- [24] S. B. Jones, 1977, “An Approach to Procedure Selection in Arc Welding”, Welding Journal.
- [25] ESAB, C. Fortes, e C. T. Vaz, 2005, “Soldagem MIG / MAG”, Soldagem MIG/MAG.
- [26] S. V. Sapakal e M. T. Telsang, 2012, “Parametric Optimization of MIG Welding using Taguchi Design Method”, Internation Journal of Advanced Engeneering Research and Studies.
- [27] P. V. Marques, P. J. Modenesi, e A. Q. Bracarense, Soldagem: Fundamentos e Tecnologia, 3 ed. Editora UFMG, 2011.

- [28] E. Wainer, S. D. Brandi, e F. D. H. Mello, 1992, Soldagem: Processos e Metalurgia, (1ª Ed.) São Paulo.
- [29] J. H. Nixon e J. Norrish, 1992, “Determination of pulsed MIG process parameters. Synergic MIG Supplement”, in Welding & Metal Fabrication.
- [30] A primeira linguagem de programação, (2023, junho), <https://pt.stackoverflow.com/questions/156521/a-primeira-linguagem-de-programação>
- [31] Conceitos usados no aprendizado de programação, (2023, junho), <https://www.treinaweb.com.br/blog/conceitos-usados-no-aprendizado-de-programacao>
- [32] 2023 nova máquina de perfuração CNC de seis lados, (2023, junho), <https://www.cncrouter-shop.com/pt/pro/six-side-cnc-drilling-machine/>
- [33] Prof. Claudimir Rebeyka, M.Sc., (Agosto de 2008) CNC Comando Numérico Computadorizado.
- [34] PlanetCNC, (2023, julho), <https://planet-cnc.com/planetcnc-tng-software-overview-and-performance-guidelines/>
- [35] Leatham-Jones, B., 1986, Introduction to computer numerical control, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [36] Esquema de conexão entre TOES e CNC, (2023, julho), [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Esquema-de-conexao-entre-TOES-e-CNC\\_fig1\\_239278468](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Esquema-de-conexao-entre-TOES-e-CNC_fig1_239278468)
- [37] Sistema CNC. <https://www.mokotechnology.com/pt/what-is-cnc/>.
- [38] What is the best CAD-CAM software, (2023, setembro), <https://bobcad.com/cad-cam-software-is-best-for-cnc-machining-success/>.
- [39] CAD CAM software improves CNC machine productivity in 2014, (2023, setembro), <https://bobcad.com/cad-cam-software-improves-cnc-machine-productivity-in-2014/>
- [40] OTC blog, (2023, setembro), <https://blog.orangetechcollege.net/how-to-prepare-for-a-career-as-a-cnc-production-specialist/>
- [41] DEK, (2023, setembro) <https://www.dekmake.com/pt/maquinagem-médica/>

- [42] Kip Hanson, (1999, junho): <https://www.ctemag.com/news/articles/ready-preset-go>  
Ready, Preset, Go.
- [43] ferramentas CNC, (2023, julho), <https://www.millscnc.co.uk/cnc-machines/machining-centres/vertical-5-axis-machining-centres/>
- [44] CNC industrial, (2023, setembro),  
<https://shop14920.aminjumberi.com/category?name=zero%20maquina%20cnc>
- [45] Zeros na CNC, (2023, agosto), <https://images.app.goo.gl/Dvr4yygYfTDoYHSt9>
- [46] Regra mão direita para os eixos CNC, (2023, agosto),  
<https://www.jorgestreet.com.br/offline/3CN/TMF%20III%203.pdf>
- [47] Posicionamento CNC, (2023, agosto), <https://dncd-transfer.softonic.com.br>
- [48] Transferência de dados (2023, setembro)  
<https://images.app.goo.gl/s8i3B2n4Qr4CUnqt5>
- [49] Karlo Apro (2008). Secrets of 5-Axis Machining. Industrial Press Inc. ISBN 0-8311-3375-9.
- [50] Evans, John M., Jr. (1976). National Bureau of Standards Information Report, Standards for Computer Aided Manufacturing (PDF). National Bureau of Standards.
- [51] Schenck, John P. (January 1, 1998). "Understanding common CNC protocols". Wood & Wood Products. Vance Publishing.  
<https://www.thefreelibrary.com/Understanding+common+CNC+protocols.-a020429590>.
- [52] EIA Standard RS-274-D Interchangeable Variable Block Data Format for Positioning, (1979, fevereiro), Contouring, and Contouring/Positioning Numerically Controlled Machines, Washington D.C. Electronic Industries Association.
- [53] Stark, J.; V. K. Nguyen (2009). "STEP-compliant CNC Systems, Present and Future Directions". Advanced Design and Manufacturing Based on STEP.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84882-739-4\\_10](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84882-739-4_10).
- [54] Baiocchi Andrea (2008, janeiro), La comunicazione è wireless [Communication is wireless].
- [55] Veiga João, Desenvolvimento de uma máquina de controlo numérico para soldadura automática, IPB-ESTG, (2017, agosto)

## Anexos



## MANUAL DO UTILIZADOR

# *Máquina de Soldadura Automática*

## Índice

<a href="#">Equipamentos Necessários</a> .....	- 70 -
<a href="#">Instruções de Segurança</a> .....	- 70 -
<a href="#">Preparação para Efetuar a Primeira Soldadura</a> .....	- 71 -
<a href="#">Funcionamento dos Drivers</a> .....	- 71 -
<a href="#">Cabo de Alimentação</a> .....	- 71 -
<a href="#">Luz dos Drives</a> .....	- 72 -
<a href="#">Softwares</a> .....	- 73 -
<a href="#">Universal Gcode Platform (UGS)</a> .....	- 74 -
<a href="#">Instalar o UGS Plataform</a> .....	- 74 -
<a href="#">Códigos</a> .....	- 79 -
<a href="#">Exemplos de Códigos</a> .....	- 79 -
<a href="#">Como Inserir Códigos</a> .....	- 80 -
<a href="#">Soldadura</a> .....	- 81 -

## Equipamentos Necessários

- Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática;
- Computador;
- Cabo Arduíno.

## Instruções de Segurança

Certifique-se que lê estas instruções para poder utilizar a máquina em segurança. Siga estas instruções para evitar ferimentos ou danos ao utilizador da máquina ou a terceiros.

- Mantenha a máquina afastado do alcance de crianças pequenas
- Utilize apenas as fontes de energias específicas neste manual de instruções para utilização com a máquina.
- Não toque no cabo de alimentação quando está ligado a uma tomada de parede durante trovoadas.
- Não coloque objetos pesados sobre o cabo de alimentação. Não danifique, parta o cabo de alimentação.
- Não coloque as mãos no raio de soldadura, quando esta estiver ligada ou em funcionamento.
- Siga todas as indicações para desligar a máquina na finalização do trabalho.

- Desligar o cabo de alimentação da ficha utilizada quando não estiver a utilizá-la.

## Fonte de Alimentação



Fonte de  
Alimentação

o

O presente manual tem como objetivo facilitar o uso e o trabalho com a **Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática**. Desta forma, pretende-se demonstrar o processo para colocar a máquina em ação, apresentando e explicando cada passo a ser seguido, a partir do funcionamento do software apresentado.



Antes de utilizar a máquina, é necessário ter em conta que o Controlo Numérico Computorizado (CNC) tem 3 motores que se movimentam em 3 eixos, o  $x$ , o  $y$  e o  $z$  ligados cada um a um driver distinto. E, encontram-se, conectados a uma fonte de alimentação e a uma placa Arduino uno que fornece toda a informação, e posteriormente, transmite informação para se concretizar qualquer ação.

A placa Arduino está também ligada a uma *breadboard* que é onde reside toda a ligação para a tocha funcionar (ligar/desligar) de maneira automatizada. A mesma esta montada como demonstra a seguinte imagem:



Em seguida, serão demonstrados todos os passos necessários para o funcionamento da máquina.

**NOTA:** Junto com o manual estará um pen drive com toda a documentação, programas, bibliotecas, imagens e vídeos de como é possível colocar em funcionamento tudo isto de maneira a facilitar a utilização do usuário.

## Funcionamento dos Drivers

### Cabo de Alimentação

1. Segure no cabo de alimentação e ligue a ficha numa tomada eletrônica.

## Luz dos Drives

**Aquando se liga a máquina à corrente é importante ter em atenção aos drives que são alimentados através de uma fonte de alimentação que por sua vez está ligada à corrente.**

2

1. Caso um ou mais, apresente uma **luz constante vermelha ou a piscar**, é necessário reiniciar o drive, ou seja, desligar o cabo de alimentação da corrente e voltar a ligar.



2. A máquina estará apta a funcionar, apenas quando, a luz dos três drivers se apresentar com **cor verde**.



h
activated when peak
activated when drive than 60VDC
by repowering it

### 3.4 LED Light Indication

There are two LED lights for DM542T(V4.0). The GREEN one is the power indicator which will be always on generally. The RED one is a protection indicator which will flash 1-2 times in a 3-second period, when protection enabled for a DM542T(V4.0). Different number of flashes indicates different protection type (read section 11 for detail).

## Softwares



Fonte de  
Alimentação



Placa



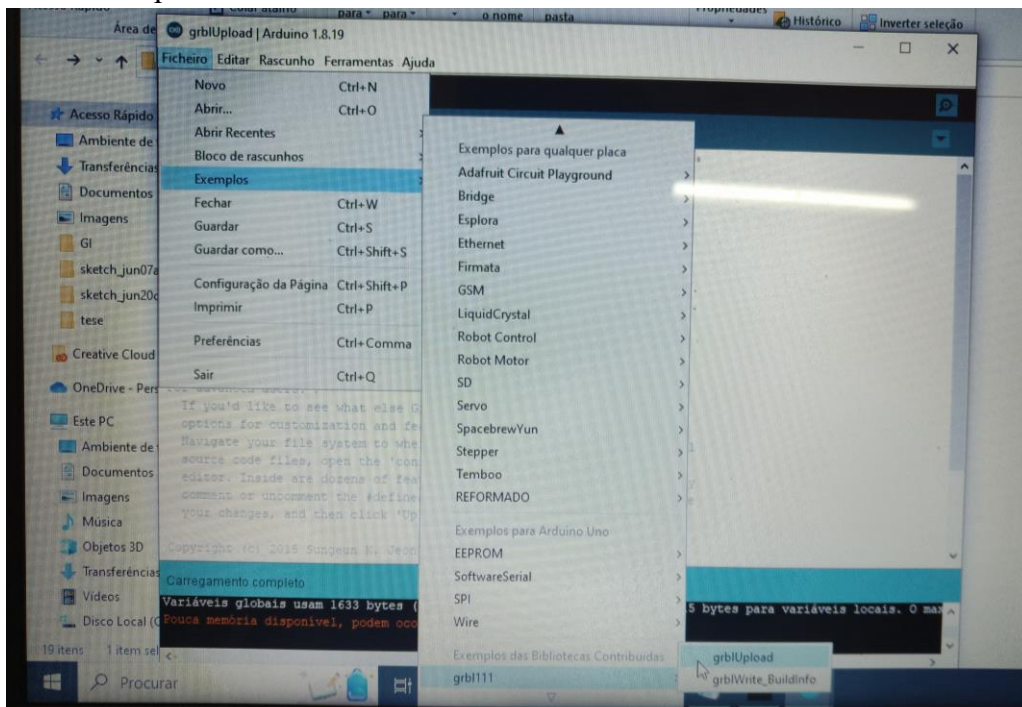
o

Depois de conectar a fonte de alimentação à corrente, é preciso conectar a placa Arduino uno ao computador através via USB. Para uma primeira utilização, deve-se ter em conta a instalação dos programas e bibliotecas (Arduino) para um bom funcionamento do equipamento.

1. Instalar “Java” no computador;
2. Instalar “Arduino”;

⚠ Na instalação do programa Arduino, deve -se ter em conta a versão, aconselhando a versão 1.8.19. Uma vez que, as versões mais recentes podem comprometer o bom funcionamento do software.

3. Adicionar a biblioteca GRBL 1.1 (encontra-se disponível na *pen drive*) ao Arduino;
4. Conectar via USB a placa Arduino uno ao computador é só incluir a biblioteca e compilar e enviar.



## Universal Gcode Platform (UGS)

O **Universal Gcode Platform (UGS Platform)** é um software *open source* que fornece uma grande gama de opções de trabalho, de maneira que a sua utilização, seja o mais simplificada possível.

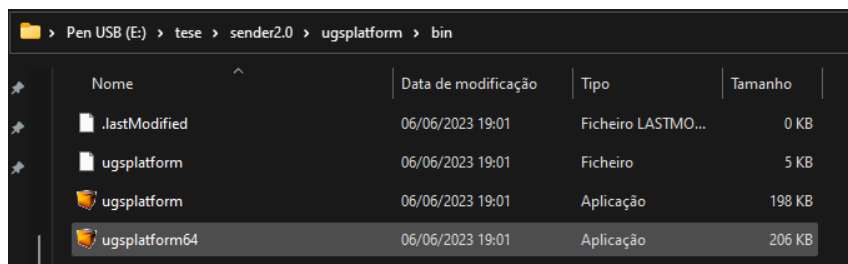
Desta forma, aconselha-se a investigar acerca do mesmo, bem como as suas funcionalidades, para que não se torne desconhecido, e na sua utilização já possuir um conhecimento prévio acerca das suas finalidades.

### Instalar o UGS Plataform

⚠ O presente programa encontra-se disponível na pen Drive.

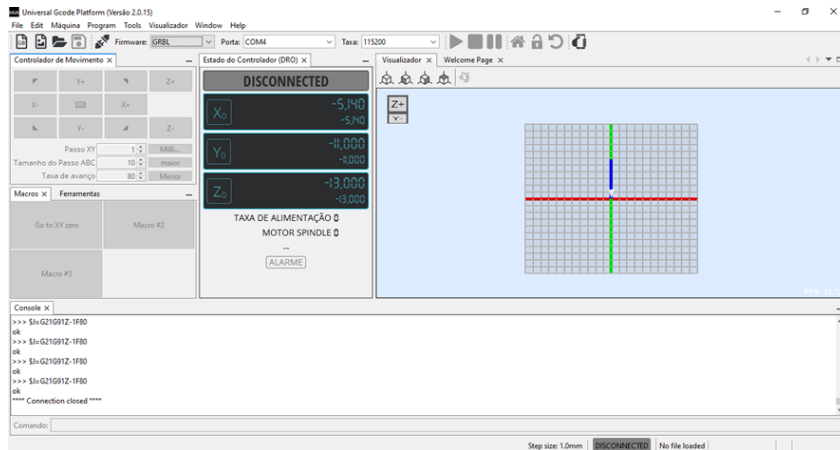
#### 1. Instalar UGS Plataform

ugsplatform-win<<<bin<<<ugsplatform.exe



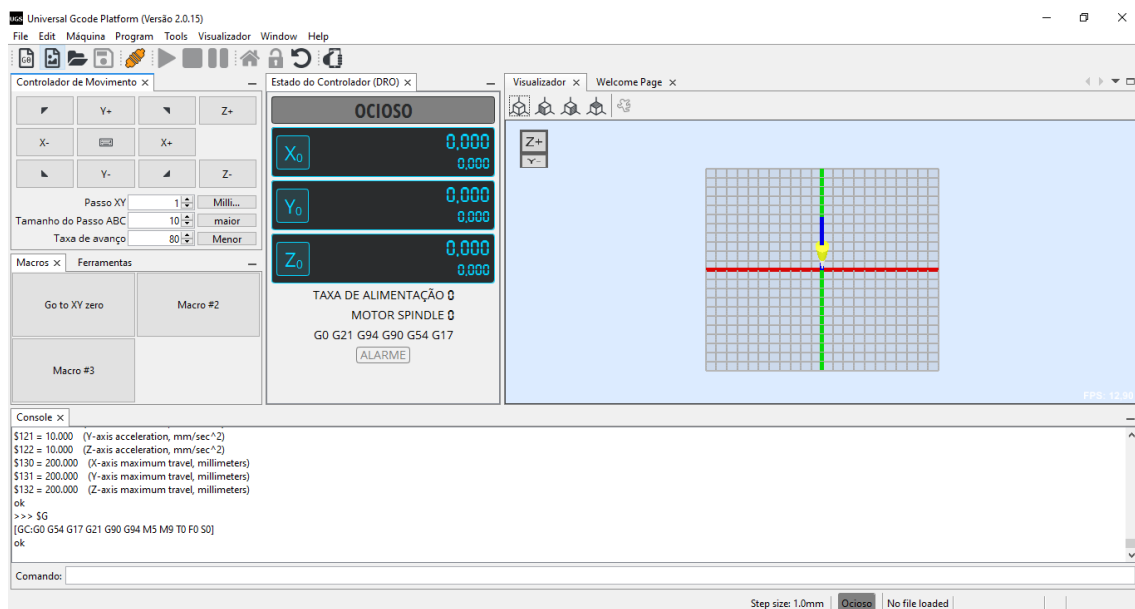
Nome	Data de modificação	Tipo	Tamanho
.lastModified	06/06/2023 19:01	Ficheiro LASTMO...	0 KB
ugsplatform	06/06/2023 19:01	Ficheiro	5 KB
ugsplatform	06/06/2023 19:01	Aplicação	198 KB
ugsplatform64	06/06/2023 19:01	Aplicação	206 KB

Porém, o **UGS Platform** só funcionará se anteriormente o **Java** se encontrar instalado.

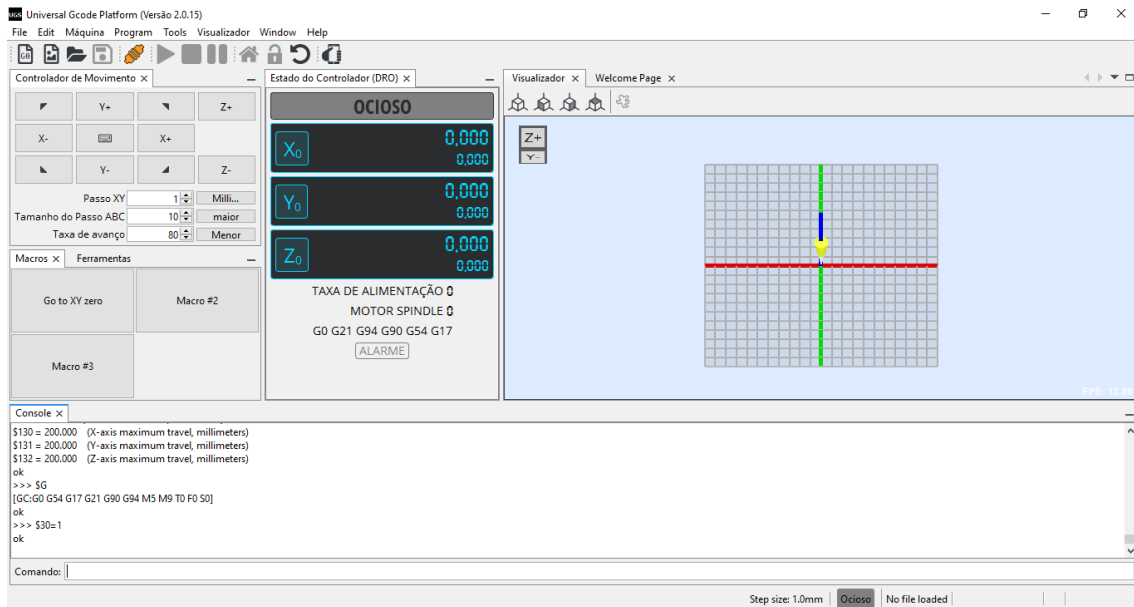


2. Conectar-se à **Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática**;
3. Verificar se a porta corresponde com a porta que esta ligada ao Arduino, exemplo COM4. Ter em atenção ao valor de taxa 115200.
4. Verificar se é possível colocar códigos e mexer no controle de movimentos.

⚠ Na ocasionalidade de o trabalho se estender até à extremidade da área do trabalho que a máquina apresenta, a cada nova utilização é crucial redefinir o valor do zero, para se testar as extremidades. O zero da máquina, é definido na opção “ferramentas”.

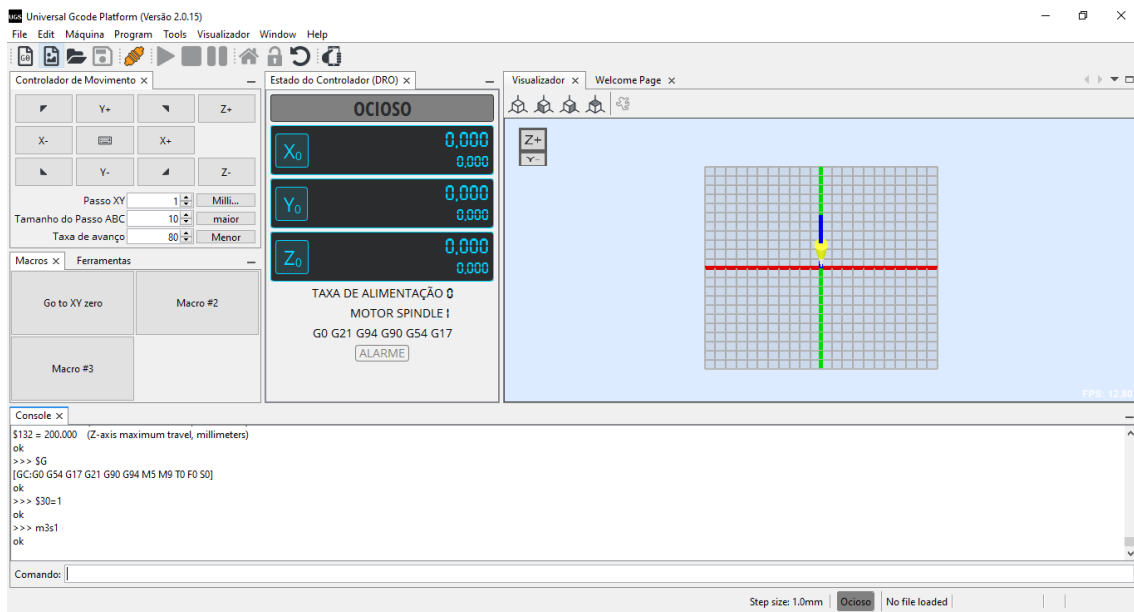


5. Adicionar o código na consola **\$30=1** para dar a informação ao programa que se irá proceder à ligação do motor *spindle*, ou seja, a tocha de soldadura.

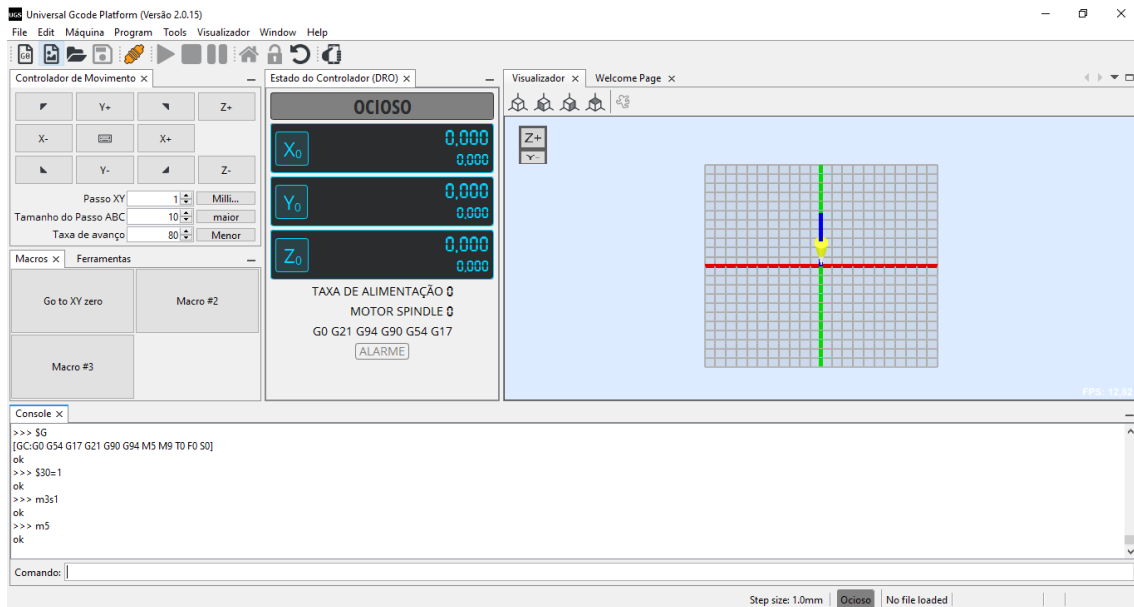


6. No caso de ligar e desligar, ou seja, começar a soldar e parar, usamos o código «m3s1» para *start* e «m5» para *end* na consola, no nosso código. Como demonstrado a seguir:

### M3s1 for start

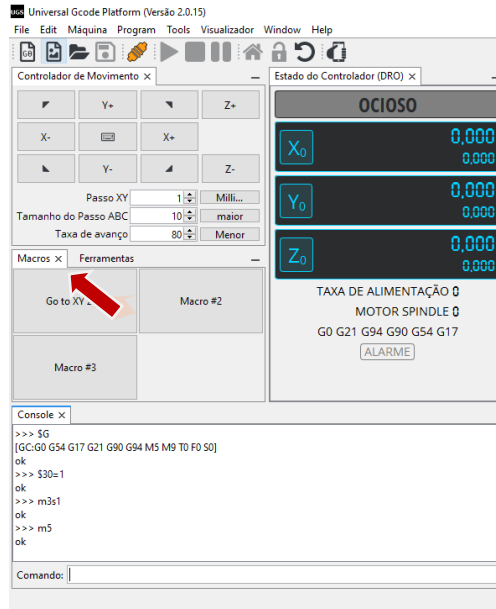


### M5 for end

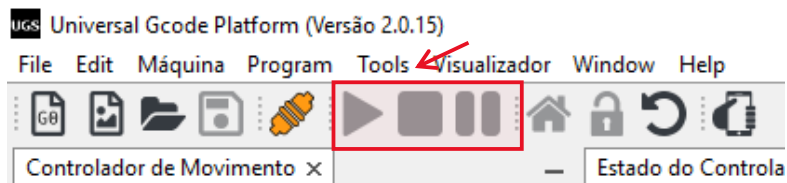


7. No caso de querer mexer com as velocidades da máquina ou ver o código de funcionamento e seus parâmetros, nomeadamente a velocidade e aceleração, é só escrever «**\$\$**» na consola.

Através deste programa podemos controlar toda a funcionalidade da máquina, é importante a cada nova ligação definir as fronteiras, pode-se fazer através dos macros adicionando novos dados.

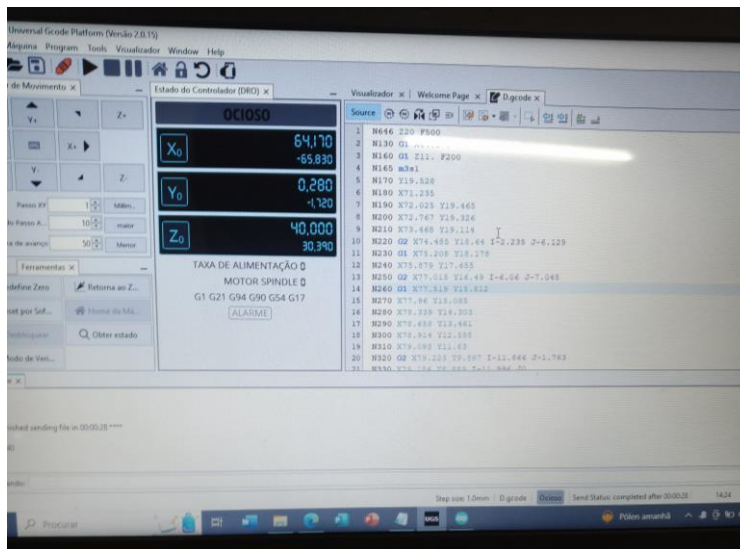


Se optarmos por fazer um código de solda podemos usar o play e o pause para o início e fim do programa que se encontra na parte superior do mesmo.



# Códigos

## Exemplos de Códigos



⚠ Nota importante, definir nas opções o F2 como botão de emergência que dará *shutdown* caso alguma coisa não corra como esperado durante o processo de soldadura.



```
N130 X7.864 Y29.446 F200.  
N160 Z0.  
N165 m3s1  
N170 X21.992  
N180 X23.15 Y29.52  
N190 X24.259 Y29.671  
N200 X25.323 Y29.897  
N210 X26.347 Y30.195  
N220 X27.334 Y30.565  
N230 G3 X29.193 Y31.512 I-5.594 J13.273  
N240 G1 X30.131 Y32.123  
N250 X31.024 Y32.799  
N260 X31.875 Y33.544  
N270 X32.685 Y34.36  
N280 G3 X34.075 Y36.06 I-13.351 J12.333  
N290 G1 X34.767 Y37.085  
N300 X35.394 Y38.157  
N310 X35.957 Y39.278  
N320 G3 X37.103 Y42.371 I-19.19 J8.863  
N330 G1 X37.432 Y43.668  
N340 X37.683 Y44.979  
N350 X37.856 Y46.308  
N360 G3 X37.969 Y48.594 I-23.025 J2.286  
N370 G1 Y48.602  
N380 X37.929 Y50.012  
N390 X37.81 Y51.386  
N400 X37.614 Y52.727  
N410 X37.342 Y54.038  
N420 X36.994 Y55.32  
N430 G3 X36.053 Y57.829 I-19.941 J-6.046  
N440 G1 X35.507 Y58.938  
N450 X34.9 Y59.989  
N460 X34.233 Y60.986  
N470 G3 X33.002 Y62.515 I-14.924 J-10.756  
N480 G1 X32.156 Y63.399  
N490 X31.265 Y64.216  
N500 X30.326 Y64.967  
N510 G3 X28.491 Y66.173 I-10.933 J-14.64  
N520 X26.822 Y66.981 I-6.505 J-11.314  
N530 G1 X25.858 Y67.322  
N540 X24.858 Y67.591  
N550 X23.821 Y67.787  
N560 G3 X21.992 Y67.948 I-2.263 J-15.178
```

## Como Inserir Códigos

1. Deve-se fazer uma, ou mais, tentativa(s) com a máquina *mig mag* desligada para ter e certeza de que a CNC realizará o trabalho/trajeto pretendido.
2. Durante este passo é importante também ter em atenção à aceleração e velocidade pretendida para um melhor resultado, tal como demonstrado no quadro 1 e 2.
3. Escrevendo na consola \$\$ podemos em seguida alterar estes parâmetros.

\$120=5	←→	aceleração x
\$121=5	←→	aceleração y
\$122=5	←→	aceleração z

Quadro 1

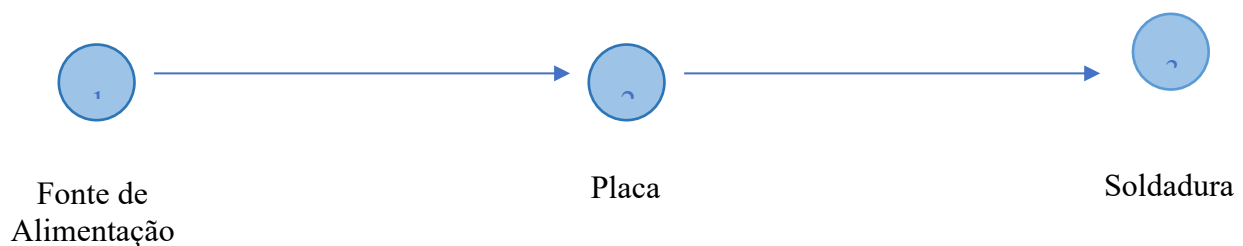
\$100=200	←→	velocidade x
\$101=200	←→	velocidade y

\$102=200 ↔ velocidade z

### Quadro 2

4. Depois de experimentar o código que foi feito e verificar que não há falhas, procede-se à ligação da máquina *mig mag* à Máquina de Controlo Numérico para Soldadura Automática CNC.
5. Dependendo da espessura da chapa ou do trabalho pretendido deve-se alterar os parâmetros na máquina *mig mag*, mas isso resulta como se fosse uma solda normal, ou seja, não robotizada, em que se deve ter em atenção a força da máquina e a velocidade do fio.
6. Depois de percorrer todos os passos e ter conferido potenciais causas de falhas é só começar o trabalho!

## Soldadura



Para iniciar o processo de soldadura, deve-se ter em atenção os valores mínimos das duas alavancas, em que a primeira alavanca deve estar no nº1 e a segunda alavanca na letra A. Quando à velocidade fio deve-se manter entre 3 e 3,5. O resto dos parâmetros devem-se manter idênticos aos apresentados seguidamente.



Porém, deve-se ter em conta também que durante o processo poderá ocorrer potenciais falhas. Por isso, é fundamental, estar sempre atento ao computador para carregar no parar ou carregar no F2 (paragem de emergência).

---

Mestrado em Engenharia Industrial | Discente: David Neves Nascimento | julho 2023

**MANUAL DO UTILIZADOR - MÁQUINA DE SOLDADURA AUTOMÁTICA**