

DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE PARA FURADEIRA CNC

Adamir Rodrigues Westphal Júnior¹

Cleber Lourenço Izidoro²

Resumo: Este trabalho apresenta o projeto de desenvolvimento de hardware de uma furadeira CNC para indústria moveleira, com o objetivo de aprimorar seu desempenho, reduzir os custos de produção e aumentar a flexibilidade de engenharia. O hardware foi submetido a testes, nos quais foram avaliadas suas características e funcionalidades. Uma das principais motivações desse projeto foi a redução dos custos de produção, uma vez que a importação de componentes de um fornecedor europeu encarecia o processo. A nacionalização do hardware buscou eliminar essa dependência, resultando na redução significativa dos custos. Ao desenvolver internamente o hardware, a equipe teve a capacidade de adaptar e personalizar a furadeira CNC para atender às necessidades específicas dos clientes, tornando-a uma solução adaptável. Nesse contexto, este trabalho busca apresentar o desenvolvimento do hardware de uma furadeira CNC, abordando as etapas realizadas e análises de melhoria aplicadas. Através dessas ações, foi obtido um hardware de qualidade, com desempenho aprimorado, custos reduzidos e maior adaptabilidade, atendendo às demandas do mercado.

Palavras-chave: Furadeira CNC. Desenvolvimento de hardware. Indústria moveleira. Nacionalização.

1 INTRODUÇÃO

O mundo moderno traz consigo mudanças que afetam diretamente o estilo de vida da humanidade. Tais mudanças são bem expressivas no meio profissional, onde processos estão cada vez mais automatizados, surgindo a necessidade de se adaptar a novos formatos de trabalho. Em um mercado global altamente competitivo para bens de consumo industriais, os avanços nos processos de fabricação são fundamentais para as empresas se manterem competitivas. (DOYLE et al., 1978; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Uma forma de se destacar na competitividade do mercado atual é na utilização de máquinas tecnológicas que aprimoram os processos produtivos e

¹ Graduando em Engenharia de Mecatrônica. Ano 2023-1. E-mail: adamir.westphal@gmail.com

² Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: cleber.izidoro@satc.edu.br

destacam-se em sua capacidade de precisão e ganho de tempo em operações rotineiras.

Neste artigo tem-se o objetivo de desenvolver um protótipo funcional de um comando de *hardware* para uma furadeira automática. Tal comando utilizará a plataforma CNC (Controle Numérico Computadorizado) e uma eletrônica embarcada desenvolvida para tal finalidade. Nesta sequência será apresentado resultados reais de uma aplicação deste protótipo em uma máquina industrial, simulando situações reais de uso em um ambiente industrial. Além destes testes em campo será também apresentado um comparativo entre uma máquina com um *hardware* mal dimensionado de um fornecedor terceirizado com o atual, possibilitando a visualização das vantagens de um bom projeto de hardware que tem efeitos imediatos no cenário fabril.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As máquinas CNC são amplamente utilizadas na indústria moderna para automatizar processos de produção. Essas máquinas são capazes de produzir peças precisas e complexas com alta eficiência e qualidade, tornando-se uma ferramenta fundamental para diversos setores, como aeroespacial, automotivo, eletrônico, médico, entre outros. Nesta seção serão abordados termos relevantes ao tema de pesquisa sobre as máquinas CNC, incluindo suas características, funcionamento, tipos e aplicações em diferentes setores da indústria. Além dos avanços em tecnologias de *software*, o desenvolvimento de *hardware* também é um ponto crucial para o aprimoramento das máquinas CNC. O *hardware* utilizado em uma máquina CNC pode incluir motores, controladores, sensores, atuadores e outros componentes eletrônicos e mecânicos. O desenvolvimento de *hardware* tem permitido a criação de máquinas mais precisas, rápidas e eficientes, bem como a integração de novas funcionalidades, como sensores de temperatura e força, que permitem um controle mais preciso do processo de usinagem.

2.1 MÁQUINA CNC

As máquinas CNC têm um papel fundamental na indústria moderna, possibilitando a fabricação de peças precisas e complexas com rapidez e eficiência. De acordo com Chuah et al. (2018), o controle numérico computadorizado é a espinha dorsal da tecnologia moderna de fabricação, permitindo que as máquinas CNC produzam peças altamente precisas e complexas com facilidade. Essas máquinas são altamente personalizáveis e podem ser adaptadas às necessidades específicas de cada aplicação de usinagem (Radhakrishnan, 2018).

As máquinas CNC são capazes de executar tarefas repetitivas com alta precisão e rapidez, proporcionando economia de tempo e recursos na produção industrial (Lazzeroni, 2019). Além disso, essas máquinas são frequentemente usadas na fabricação de peças metálicas, mas também podem ser usadas para trabalhar com materiais como plástico, madeira e espuma (Kumar et al., 2017).

Uma das principais vantagens das máquinas CNC é a capacidade de criar geometrias complexas que seriam muito difíceis de produzir manualmente ou com outras técnicas de usinagem (Hosseini et al., 2019). Essa capacidade permite que as empresas fabricantes de peças personalizadas e únicas possam ter um processo mais eficiente e preciso.

Os principais componentes de uma máquina CNC podem ser divididos em 6 partes (ARTSOFT EUA, 2008), conforme mostra a Fig. 1.

1. Um programa em linguagem de programação que a máquina CNC é capaz de ler. O programa pode ser feito com o auxílio dos sistemas *CAD/CAM* ou através da programação manual.

2. Um meio de transferir o arquivo de programação da peça que se deseja fabricar para o controlador da máquina.

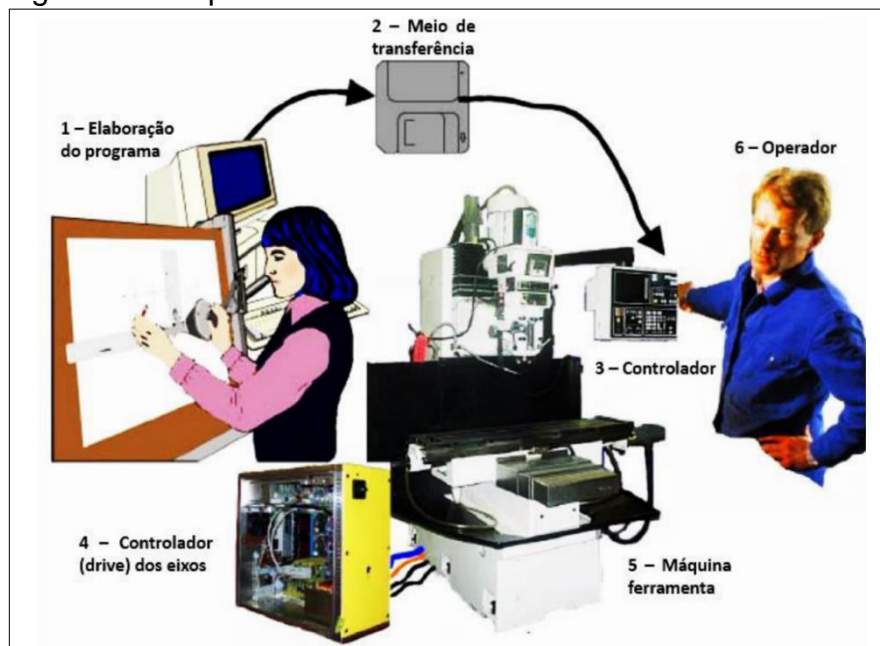
3. Um controlador da máquina que é responsável pela leitura e interpretação do programa da peça que se deseja fabricar.

4. Os controladores que são responsáveis por receber os sinais e transformá-los em movimentos através dos motores.

5. A própria máquina ferramenta que é controlada pelos servos motores gerando o movimento.

6. O Operador controlando a operação podendo ligar e desligar o motor do *Spindle*, controlar sua velocidade, ligar e desligar o líquido refrigerante e principalmente garantir o bom funcionamento do sistema, verificando se o programa não está tentando mover algum eixo além do limite da máquina (ARTSOFT EUA, 2008).

Figura 1: Componentes de um sistema CNC.



Fonte: ArtSoft EUA (2008)

2.2 FURADEIRAS AUTOMÁTICAS

As furadeiras automáticas são equipamentos amplamente utilizados em setores industriais como metalurgia e movelaria. Essas máquinas são capazes de realizar furos com alta precisão e rapidez, tornando-se essenciais em processos produtivos que exigem elevados padrões de qualidade e produtividade.

Segundo Silva (2012), as furadeiras automáticas são equipamentos de usinagem que podem ser programados para realizar furos em materiais diversos, como metais, plásticos e madeira, entre outros. Elas são capazes de realizar furos de diferentes diâmetros e profundidades, além de poderem ser equipadas com diversas brocas para diferentes tipos de materiais e aplicações.

As furadeiras automáticas podem ser classificadas em diferentes tipos, como furadeiras de coluna, furadeiras de bancada e furadeiras CNC. As furadeiras de

coluna são indicadas para furos mais profundos e em materiais densos, enquanto as furadeiras de bancada são ideais para furos em materiais menos densos e em pequenas produções. Já as furadeiras CNC são altamente precisas e podem ser programadas para realizar furos em diferentes posições e ângulos, sendo utilizadas principalmente em processos produtivos automatizados (Canbaz et al., 2018).

Além disso, as furadeiras automáticas podem ser equipadas com diversos acessórios, como cabeçotes múltiplos, mesas giratórias e dispositivos de fixação, entre outros. Esses acessórios permitem a realização de furos em diferentes posições e ângulos, aumentando a flexibilidade e a eficiência do processo produtivo.

No entanto, para garantir a segurança e a eficiência no uso de furadeiras automáticas, é fundamental que os operadores recebam treinamento adequado e sigam as normas de segurança estabelecidas pelas empresas e órgãos reguladores. Conforme Cunha (2018), as furadeiras automáticas apresentam riscos de acidentes, como cortes, esmagamentos e perfurações, e devem ser operadas por profissionais qualificados e conscientes dos procedimentos de segurança.

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS

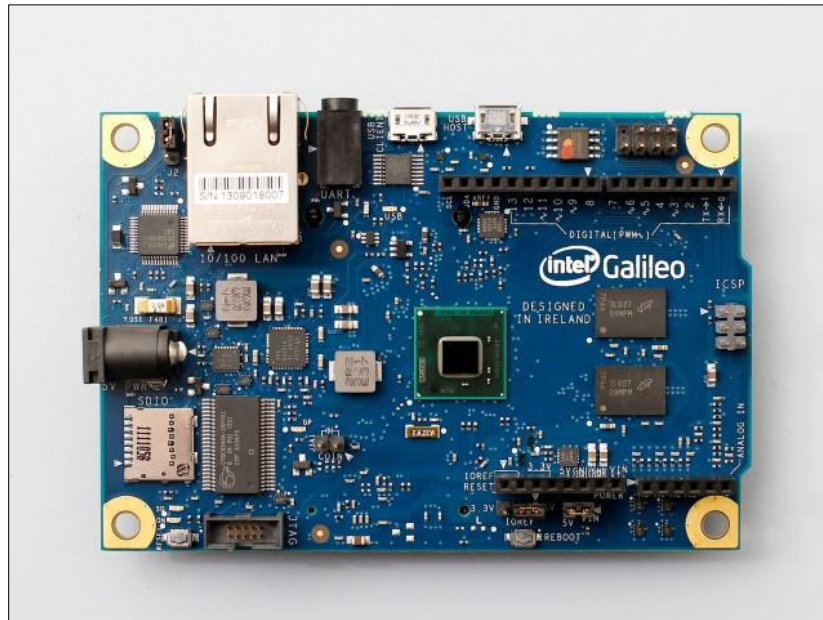
Sistemas embarcados são sistemas computacionais dedicados a uma função específica, integrados a um dispositivo eletrônico que os controla. Esses sistemas podem ser encontrados em uma variedade de dispositivos, como carros, aviões, smartphones e aparelhos médicos, entre outros. Eles são projetados para realizar tarefas específicas com alta eficiência e confiabilidade.

Segundo Santos (2013), sistemas embarcados são usados para controlar processos industriais, como a fabricação de produtos, a automação de linhas de produção e o controle de sistemas de segurança. Além disso, eles são usados em aplicações automotivas, como sistemas de freios ABS, airbags e sistemas de navegação.

Os sistemas embarcados têm um papel fundamental na automação de máquinas industriais, garantindo alta eficiência e confiabilidade no processo produtivo. Segundo Freitas e Silva (2015), esses sistemas são compostos por um ou mais microcontroladores, que são responsáveis por gerenciar o sistema e controlar o

hardware associado, como sensores, atuadores e interfaces de usuário. Na Fig. 2 é encontrado um exemplo de um sistema embarcado.

Figura 2: Sistema Embarcado da Intel



Fonte: BR-Linux.org (2013)

Os sistemas embarcados são amplamente utilizados em máquinas industriais, como robôs, máquinas de embalagem, sistemas de controle de processo, sistemas de monitoramento de qualidade, entre outros (Liu et al., 2015). Eles são projetados para garantir o funcionamento contínuo e seguro dessas máquinas, minimizando o risco de falhas e reduzindo os custos de manutenção.

De acordo com Zavala et al. (2019), a utilização de sistemas embarcados em máquinas industriais pode trazer diversos benefícios, como a redução do tempo de ciclo, a melhoria da qualidade do produto, a redução do consumo de energia e a melhoria da segurança do trabalho. Além disso, eles permitem o monitoramento em tempo real do processo produtivo, facilitando a tomada de decisões e a identificação de possíveis problemas.

Os sistemas embarcados também desempenham um papel importante na conectividade das máquinas industriais, permitindo a comunicação e a troca de informações entre elas e com outros sistemas de gerenciamento (Wu et al., 2020). Isso pode facilitar a integração da produção com outros sistemas, como sistemas de gerenciamento de estoque e sistemas de gerenciamento de qualidade.

2.4 PARAMETRIZAÇÃO DE SISTEMA EMBARCADO

Em muitos casos, para operações que demandam sequências extensas de movimentos é utilizado uma padronização de código para otimizar o funcionamento de um sistema embarcado. Essa padronização é conhecida como código G, sendo utilizado para controle de máquinas que operam com movimentações precisas.

O código G é uma linguagem de programação utilizada em sistemas CNC para controlar o movimento e a operação de máquinas-ferramenta. Segundo Rong et al. (2019), o código G é um conjunto de comandos pré-definidos que permite que as máquinas CNC executem tarefas complexas de usinagem com alta precisão e eficiência.

A combinação de código G e sistemas embarcados tem sido utilizada na indústria de manufatura para controlar máquinas CNC. De acordo com Liu et al. (2021), os sistemas embarcados são utilizados em conjunto com o código G para executar tarefas de usinagem complexas, como fresamento e torneamento.

2.5 PROJETO DE HARDWARE

O projeto de *hardware* voltado para máquinas industriais é uma área fundamental para o desenvolvimento de sistemas automatizados em diversos setores industriais. Segundo Chen et al. (2019), o *hardware* é a base física para a implementação de sistemas em máquinas industriais, envolvendo componentes eletrônicos, sensores, atuadores e controladores que permitem a interação entre o sistema e o ambiente.

Para garantir a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de *hardware* em máquinas industriais, é necessário seguir uma série de etapas que envolvem desde a concepção do projeto até a implementação e teste do *hardware*. De acordo com Zhang et al. (2020), a concepção do projeto envolve a definição dos requisitos de *hardware*, a seleção dos componentes, a definição da arquitetura e o desenvolvimento do esquema elétrico.

Após a concepção do projeto, é necessário realizar a implementação do *hardware*, envolvendo a montagem dos componentes eletrônicos, a programação dos controladores e a integração com outros sistemas de automação. Durante essa etapa,

é importante garantir a compatibilidade entre os componentes e a funcionalidade do *hardware* em relação aos requisitos definidos na fase de concepção (Chen et al., 2019).

Por fim, é necessário realizar o teste do *hardware* para verificar se ele atende aos requisitos de funcionamento em condições normais e adversas. Essa etapa envolve testes de resistência elétrica, testes de repetibilidade e testes de campo, que visam verificar a confiabilidade e a eficiência do *hardware* em diferentes cenários de uso (Zhang et al., 2020).

O projeto de *hardware* para máquinas industriais pode trazer vantagens, como a redução dos custos de manutenção, o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade dos produtos. Além disso, ele permite a automatização de processos repetitivos e perigosos, garantindo a segurança dos trabalhadores (Chen et al., 2019).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Na indústria moveleira existem diversas soluções para realização de furos e usinagens em madeira. Este projeto foi elaborado tendo em vista um modelo de máquina para esta finalidade. Este modelo é conhecido como furadeira CNC ou furadeira ponto a ponto. Neste capítulo serão apontados os métodos utilizados e quais procedimentos foram executados para que fosse criado uma solução de *hardware* para uma furadeira CNC. A partir de uma máquina modelo, já existente, desenvolveu-se uma eletrônica embarcada que atendesse os requisitos de funcionamento desta mesma.

3.1 FURADEIRA IF-8500

O equipamento de modelo para exemplificar este projeto será a máquina furadeira ponto a ponto IF-8500, fabricada pela Inmes Industrial, conforme mostra a Fig. 3. Sua principal função é executar comandos CNC gerados a partir de um *software* de planejamento *CAM* (*Computer-Aided Manufacturing*) que acompanha a máquina. Através de uma tela *touchscreen* com sistema Android, o usuário seleciona o código CNC gerado. A partir deste, a máquina realiza movimentações em 3 eixos (X, Y, Z) com troca de ferramentas programadas. Com estes recursos possibilita a

execução de furos, rasgos e diversos outros detalhamentos numa chapa de madeira. Por tais características viabiliza o planejamento de móveis com encaixes, oferecendo diferentes alternativas para soluções em móveis planejados.

Figura 3: Máquina IF-8500.



Fonte: Inmes Industrial (2023)

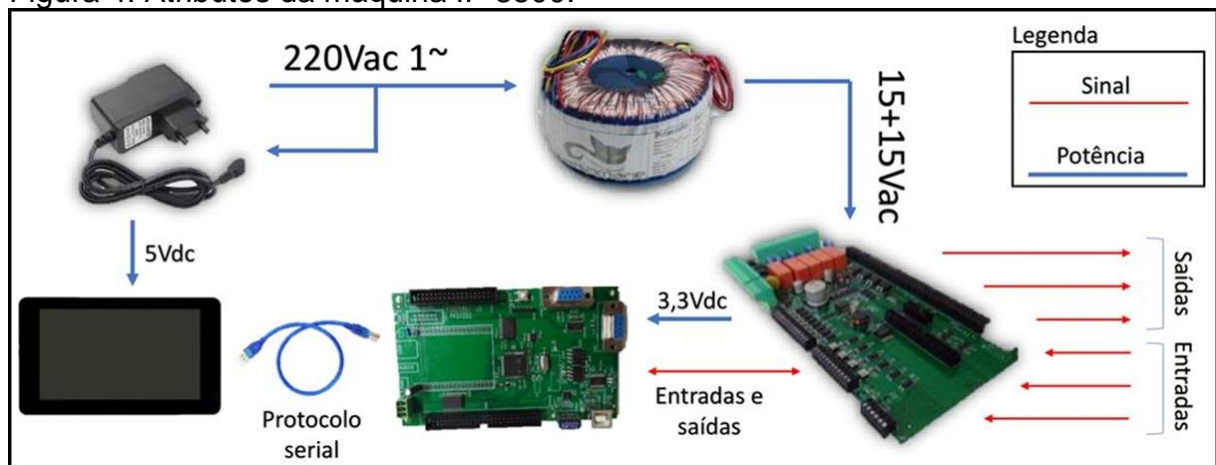
No primeiro momento a IF-8500 pôde ser considerada uma máquina com tecnologia europeia. Em exceção de alguns itens mecânicos, a maior parte das peças eram importadas diretamente de um fornecedor europeu, incluindo sistemas mecânicos, controle de *hardware* e licença de *software* para utilização. Assim, todo recurso tecnológico era fornecido exclusivamente por um único fornecedor em específico. Por conseguinte, não era possível atender demandas de melhorias e implementação de novos recursos para os clientes da empresa, já que havia uma padronização de projeto limitando a utilização de todo potencial disponível em máquina. Outra desvantagem também neste cenário era o pagamento de *royalties* para o proprietário do projeto da máquina, correspondendo a quase 30% do valor total dos itens importados, enquanto estivessem comercializando-a.

3.2 NACIONALIZAÇÃO DO PROJETO

Inicialmente foi definido entre os gerentes de engenharia da empresa a ação de nacionalizar os itens de fabricação da furadeira IF-8500. Esta decisão foi tomada exclusivamente pela possibilidade de flexibilização, podendo ter liberdade de atualizações e melhorias de acordo com a demanda do mercado, além da redução de investimento.

A IF-8500 desde então era equipada com 4 motores de passo e encoders para cada um deles. Uma eletrônica embarcada era responsável de controlar os motores através de uma programação CNC. Nesta eletrônica possuía os seguintes atributos principais: entradas e saídas digitais, alimentação de entrada 15VAC, saídas de pulso e direção para 4 motores de passo e entradas para encoders de quadratura. Na Fig. 4 é apresentado um esquema simplificado sobre os atributos da máquina antes da nacionalização.

Figura 4: Atributos da máquina IF-8500.



Fonte: Inmes Industrial (2023)

Posteriormente concluiu-se que o item mais crítico para essa atividade era o desenvolvimento do hardware, por seu grau de complexidade e tempo de projeto. Segundo os gestores, o *hardware* das máquinas Inmes são itens estratégicos que entregam um diferencial comparado a de outros fabricantes. A maioria dos produtos da empresa possuem tecnologia desenvolvida internamente por este motivo.

Tendo em vista esse pré-requisito de funcionamento, desejava-se realizar o projeto de nacionalização desenvolvendo uma eletrônica embarcada, de modo que substituísse a antiga pelo sistema atual sem perder os requisitos de funcionamento.

3.3 DEFINIÇÃO DE HARDWARE

Com o intuito de encontrar um resultado prático, foram obedecidas algumas predefinições estipuladas pelas características de funcionalidade da máquina. Estas predefinições afetaram diretamente a concepção do *hardware*. A seguir, na tabela 1 segue os principais recursos utilizado em máquina.

Tabela 1: Recursos da IF-8500

Quantidade	Descrição
1x	Terminais de alimentação com aterramento
1x	Conector para comunicação com IHM (RS485 ou RS232)
4x	Entradas para <i>home</i> – interrupção
4x	Entradas para fim de curso de início
4x	Entradas para fim de curso final
1x	Entrada para apalpador – interrupção;
1x	Entrada para botão de iniciar ciclo;
1x	Entrada para pressostato
1x	Entrada para sensor da trava do cabeçote
1x	Entrada <i>safety</i>
1x	Entrada para sinal da porta
1x	Entrada para <i>probe</i>
1x	Entrada para estado de falha inversor
4x	Entradas para estado de falha dos drives
12x	Saídas a relés (válvulas, relés, trava da porta, saídas para inversores)
3x	Saídas para LED 12V (para fita de LED RGB)
4x	Saídas de pulso e direção – saídas rápidas
4x	Entradas para encoder com quadratura – entrada específicas para quadratura
1x	Saída analógica (PWM ou DAC 10 bits) para controle de velocidade do inversor
1x	entrada para MGP (manivela geradora de pulsos)
1x	Saída preparada para expansão de I/Os (ex. troca de ferramenta)

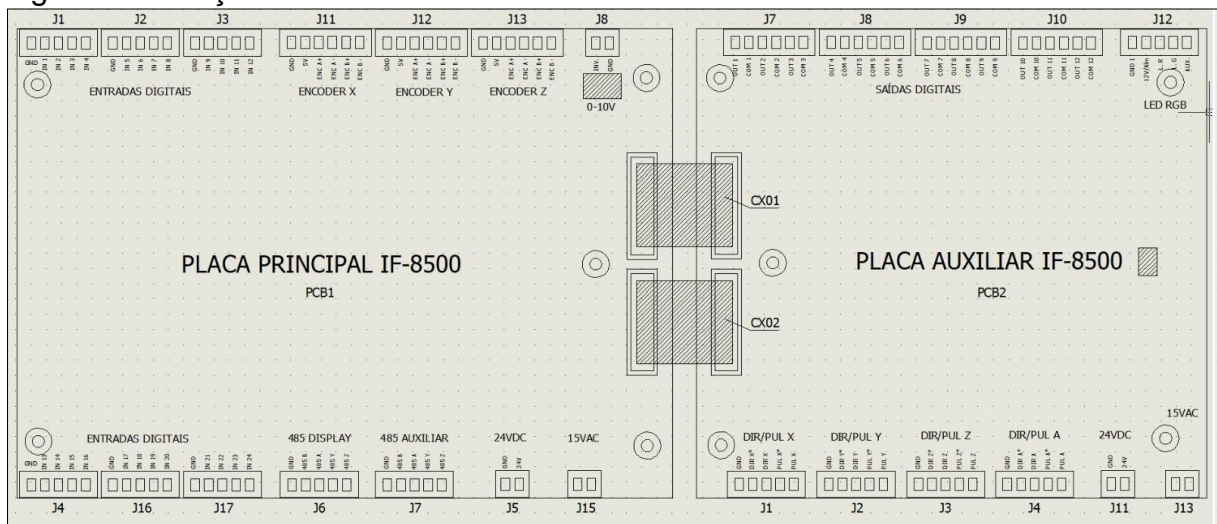
Fonte: Inmes Industrial (2023)

Para todos esses recursos serem funcionais ao projeto, teve-se a obrigatoriedade de selecionar um microcontrolador que atendesse todos estes requisitos, levando em conta a quantidade de pinos e o tipo de dados a serem processados. Em resposta disto foi escolhido utilizar apenas um único microcontrolador da linha PIC, do fabricante Microchip. Esta linha também foi escolhida devido a semelhança de outros projetos eletrônicos desenvolvidos anteriormente pela engenharia da Inmes. Dessa forma chegou-se a um modelo

específico de microcontrolador de arquitetura de 32 bits, que se alinhou a necessidade do projeto.

Através desta definição foi elaborado um esboço, na Fig. 5, para avaliar os posicionamentos das conexões de entradas e saídas físicas, de acordo com a distribuição dos itens do painel elétrico da máquina. Neste momento também decidiu-se modularizar a eletrônica em duas placas: placa principal e placa auxiliar. A placa principal ficou responsável por todas entradas digitais, encoders e comunicações. Já na placa auxiliar restou os módulos de saída para os motores e o acionamento dos demais periféricos de saída.

Figura 5: Esboço do *hardware*.



Fonte: Do autor (2023)

Nesta etapa também foi possível definir os tipos de conectores a serem utilizados, de acordo com o formato de ligações elétricas da máquina. Para facilitar o manuseio entre os fios ligados à placa, optou-se em utilizar conectores do tipo destacável. Dessa forma tornou-se simples executar a manobra de instalar e desinstalar as placas ao painel elétrico da IF-8500. Outro ponto importante neste momento foi determinar o meio de comunicação entre as duas placas: principal e auxiliar. A proposta é de que ambas trabalhassem em conjunto e ao mesmo tempo houvesse possibilidade de desconectar uma da outra para uma possível manutenção ou substituição. Para este meio de comunicação foi designado a conexão através de dois cabos *flat* (cabos de fita) de 16 vias cada, garantindo a ligação física entre os dispositivos.

3.3 FUNCIONAMENTO DO HARDWARE

A partir dos requisitos estabelecidos, foi possível mapear as funcionalidades das placas por blocos de funções. A organização destes blocos ofereceu condição de ordenar posteriormente o esquemático dos circuitos e dos *layouts* de ambas as placas. Em resumo considera-se que a placa auxiliar é o complemento da placa principal. Sendo assim, depende obrigatoriamente da placa principal para executar comandos.

Outra característica deste projeto, foi centralizar toda unidade de processamento ao microcontrolador PIC. Desta forma com apenas uma programação de *firmware* é possível gerenciar e controlar todos os módulos de funções de ambas as placas. Este mesmo microcontrolador irá iniciar seu processo através de uma comunicação externa. Esta foi definida como do tipo RS485, por possuir robustez suficiente para estar inserida à um painel elétrico com possíveis interferências de outros componentes.

Tendo a comunicação estabelecida, através de uma tela *touchscreen*, será enviado um pacote de dados que estabelecem como será executado as movimentações dos motores. Esta tela é responsável de interpretar o código G planejado conforme define o usuário. Sendo assim, o *hardware* em questão apenas aguarda o recebimento de informações providos da tela para assim assumir a operação do restante da máquina.

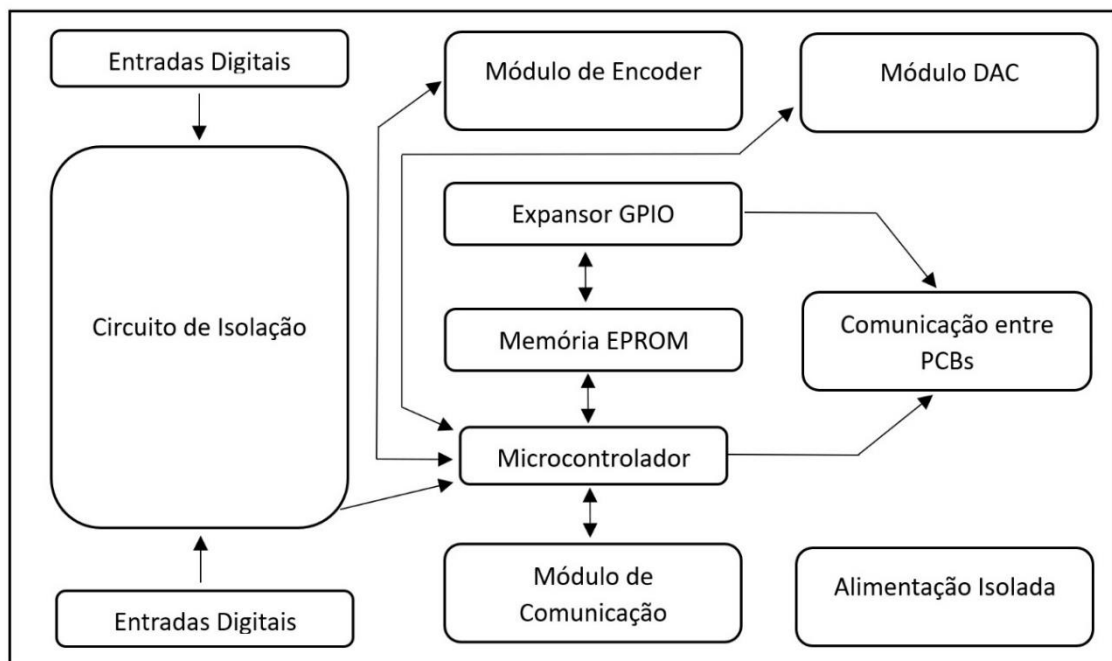
Para esta execução ser concebida, um *firmware* será desenvolvido posteriormente assegurando esta comunicação entre tela e *hardware*, além da integração simultânea entre as outras funcionalidades da máquina como: referenciamento dos eixos, leitura de um pressostato, status de abertura e fechamento da porta da máquina, controle por botões externos e sistema de segurança.

Em vista disso alinhou-se os blocos de funções do *hardware* de acordo com o formato de execução. Dessa forma deu-se condições de criar os circuitos eletrônicos para cada destinação. Nos capítulos seguintes segue um diagrama de blocos de cada placa, juntamente com suas propriedades.

3.3.1 PLACA PRINCIPAL

A placa principal é destinada em receber, interpretar e direcionar sinais de entrada da máquina. Tais sinais provenientes de sensores discretos, botões, encoders e dispositivos de segurança. Na Fig. 6 segue o diagrama de funcionamento da placa principal.

Figura 6: Diagrama de funcionamento da placa principal.



Fonte: Do autor (2023)

A alimentação isolada desta placa foi desenvolvida com 24VDC e 15AC. Esta configuração se repetiu neste projeto de nacionalização devido a permanência dos mesmos componentes elétricos da máquina. Deste modo possuímos isoladamente um nível de tensão que alimenta a parte lógica do circuito e outra exclusivamente para as entradas digitais.

Nas entradas digitais, optou-se em utilizar um circuito de isolamento com acopladores ópticos para garantir uma isolação entre o processamento do sinal de entrada e o meio físico. No módulo de encoder configurou-se um circuito que pudesse captar um tipo de sinal diferencial. Dessa forma habilita utilizar certos tipos de encoders de forma que seu sinal seja imune à ruídos. Para a possibilidade de um controle externo de um inversor, também foi elaborado um módulo *DAC* (*Digital-to-*

Analog Converter). Este é um circuito que garante uma saída analógica de 0 à 10V a partir de um pino.

No módulo de comunicação, como mencionado anteriormente, foi decidido utilizar o protocolo RS485. Assim elaborou-se um circuito com devidas proteções à ligação com o meio físico ao mesmo tempo que converte sinais para o microcontrolador. Neste módulo de comunicação uma porta ficou exclusivamente dedicada à comunicação com a tela da máquina e uma segunda porta disponível para uma futura integração de um periférico.

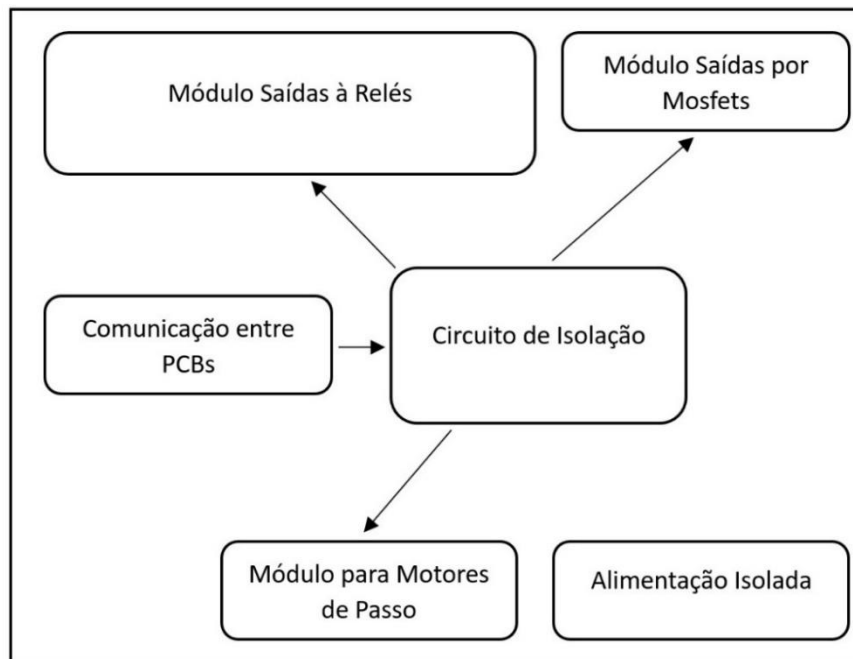
Para expandir a capacidade de controle do microcontrolador implementou-se dois blocos complementares. Um deles foi uma memória do tipo *EEPROM* (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*), nela será armazenada parâmetros de calibração da máquina como: pulsos por revolução dos motores de passo, velocidade máxima, posição e direção de referenciamento de cada eixo, direção de operação de cada eixo, aceleração e resolução de cada eixo. Além da memória, adicionou-se também um expensor de *GPIO* (*General Purpose Input/Output*) para que atendesse a necessidade de saídas do projeto.

Todas as informações processadas pelo microcontrolador e os dispositivos completos estarão distribuídas ao longo do bloco de comunicação entre as placas. Neste bloco é disponibilizado um barramento que se interliga aos pinos de alimentação, aos pinos do microcontrolador e do expensor de *GPIO*. Logo, através de dois conectores de 16 vias cada, é possível transmitir estes sinais à placa auxiliar utilizando dois cabos *flat*.

3.3.2 PLACA AUXILIAR

A placa auxiliar complementa a placa principal, adicionando recursos de saídas. Nela é possível controlar saídas digitais por meios de relés e *mosfets*, além de realizar o controle de pulso e direção dos motores de passo. Na Fig. 7 segue o diagrama de funcionamento da placa auxiliar.

Figura 7: Diagrama de funcionamento da placa auxiliar



Fonte: Do autor (2023)

Através do bloco de comunicação entre as placas, os sinais de controle enviados da placa principal chegam até ao circuito de isolamento através dos cabos *flat*. Apesar de ambas as placas estarem interligadas também está presente na placa auxiliar a alimentação isolada de 24VDC e 15AC.

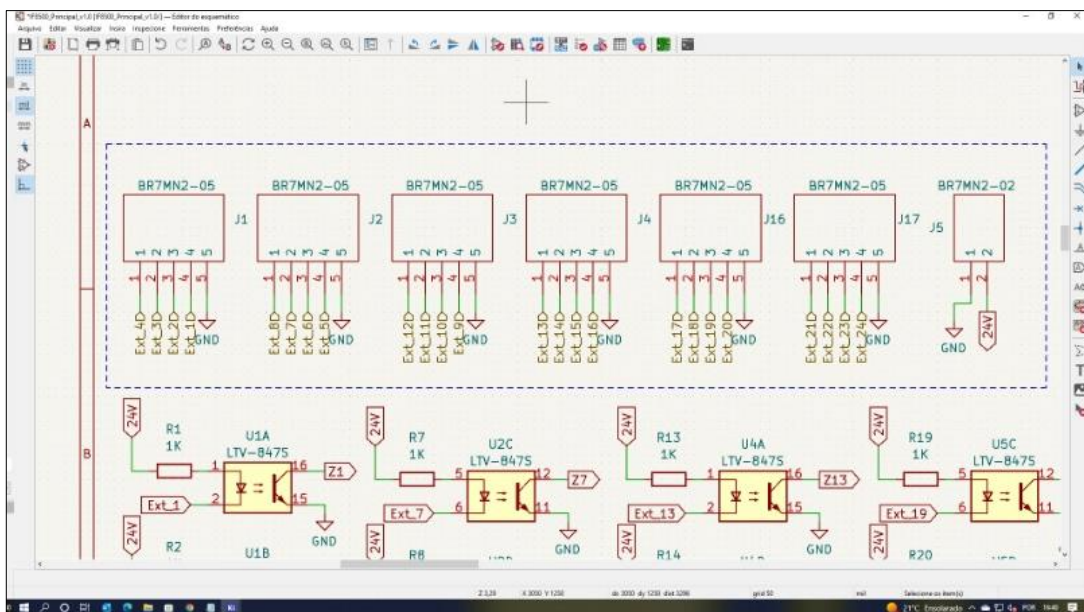
Ao passar os sinais pelo circuito isolador, estes serão direcionados para os módulos de saídas a relés, *mosfets* e motores de passo. O módulo de saída à relés ficou designado para o acionamento de cargas com pouca repetibilidade. Neste caso estão os componentes de acionamento eletropneumático e outros auxiliares, como exemplo, a trava magnética da porta da máquina. Já nas saídas por *mosfets*, foi desenvolvido um circuito especialmente para o controle de indicação luminosa da máquina.

No módulo para motores de passo foi desenvolvido um circuito que pudesse gerar saídas de pulso e direção amplificando os sinais vindos do microcontrolador. Portanto possibilita interligar módulos externos de potência diretamente à placa auxiliar. Nesta ligação optou-se por utilizar saídas do tipo diferencial. Assim cada sinal de pulso ou direção pode ser ligado utilizando cabeamento do tipo par trançado, conseqüentemente aumentando a imunidade aos ruídos externos providos do restante da máquina.

3.4 RECURSOS PARA DESENVOLVIMENTO

Para a elaboração e construção do projeto das *PCBs (Printed Circuit Board)* foi utilizado um software de licença gratuita chamado *KiCad*. Utilizando esta ferramenta, foi desenhado um esquemático, conforme mostra a Fig. 8, levando em consideração todos os blocos de funcionalidades mencionados no capítulo anterior. Nesta etapa foi definido os tipos de componentes eletrônicos a serem utilizados juntamente com os cálculos e avaliação da folha de dados de cada um deles. Além disso, também foi preenchido um formulário contendo nomenclatura, código de fabricante e código de distribuição de cada componente.

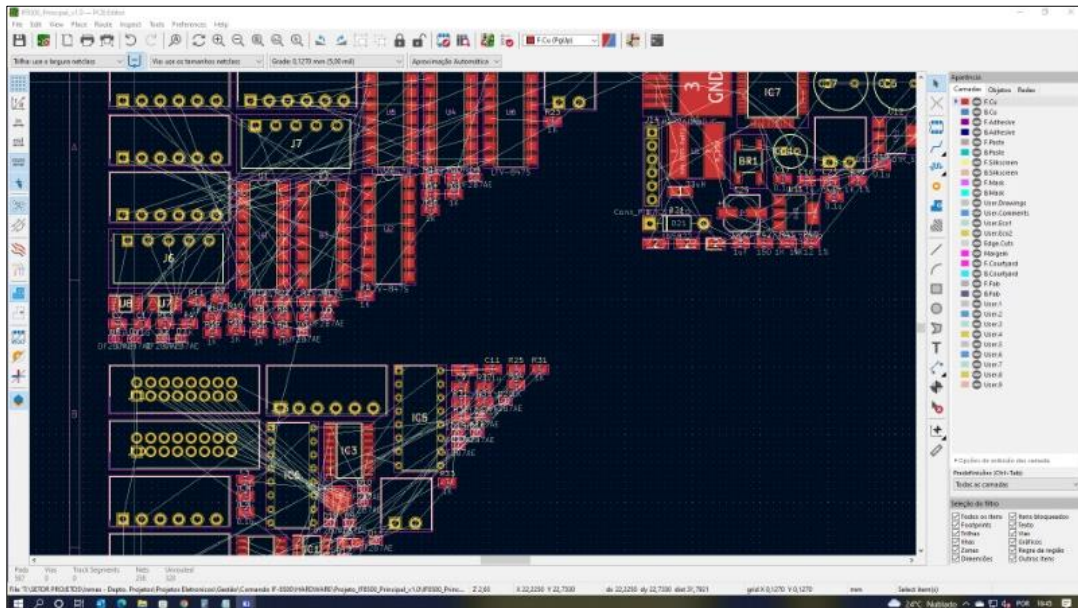
Figura 8: Esquemático sendo desenvolvido no *software KiCad*.



Fonte: Do autor (2023)

Com o esquemático finalizado, na mesma ferramenta foi dada sequência na criação do *layout* das placas. Previamente foi posicionado os componentes ao longo de um tamanho pré-determinado, observado na Fig. 9. Nesse estágio a intenção era organizar os componentes eletrônicos de forma que respeitasse os limites de borda da placa, furações de fixação e a locação de cada bloco de funcionalidade.

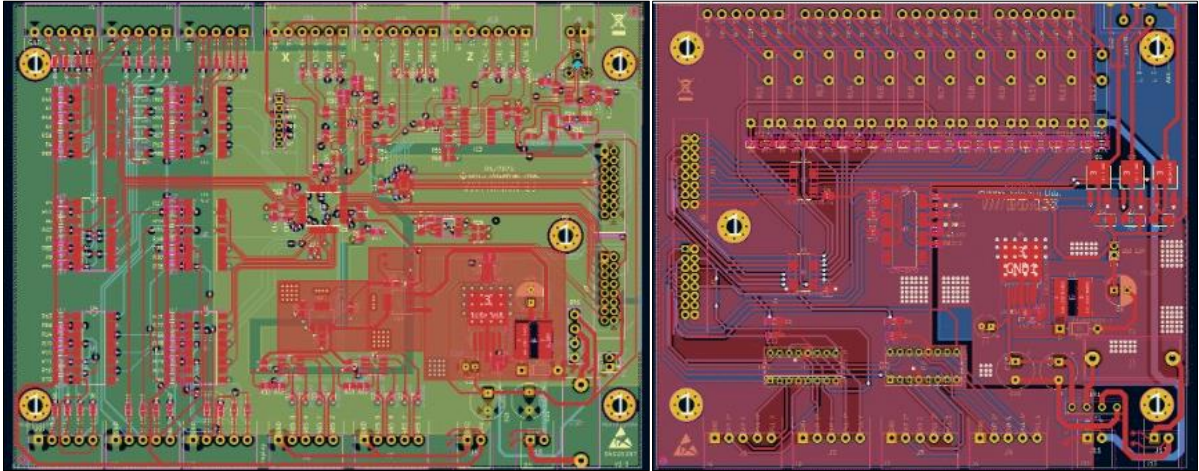
Figura 9: Posicionamento dos componentes no software KiCad.



Fonte: Do autor (2023)

Com as posições dos componentes já definidas avança-se para etapa de desenhar manualmente as trilhas em concordância às ligações do esquemático. Esta parte é uma das mais desafiadoras do projeto, já que necessita uma atenção redobrada para que não ocorra erros ou falhas na ligação das trilhas. Ao mesmo tempo também foi impreterível respeitar limites de potência, interferências de sinais entre as trilhas e a geometria de sustentação dos componentes a serem soldados na placa. Para todo este processo foi decidido utilizar o perfil de quatro camadas de cobre para placa principal e duas para placa auxiliar. Na Fig. 10 é apresentado o *layout* com as trilhas da placa principal e auxiliar, respectivamente.

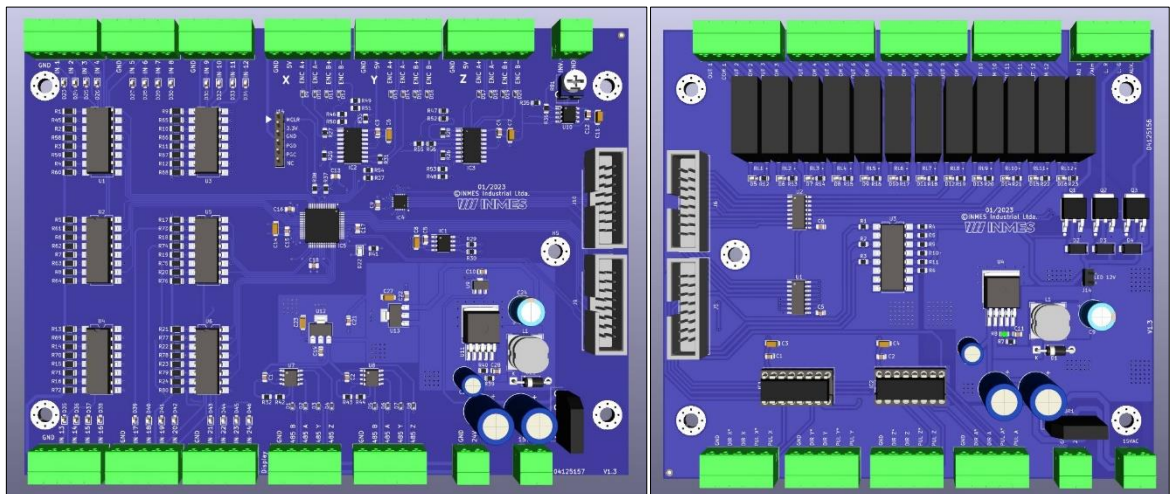
Figura 10: *Layout* das placas principal e auxiliar no *software* KiCad.



Fonte: Do autor (2023)

Após o *layout* finalizado, o *software* permite fazer uma visualização 3D, conforme a Fig. 11, podendo assim avaliar o resultado de se esperar na montagem da placa. Logo, para dar continuidade à montagem do projeto, efetuou-se a compra dos componentes eletrônicos pertencentes ao projeto e terceirizado a fabricação das placas de circuito impresso.

Figura 11: Renderização das placas principal e auxiliar no *software* KiCad.

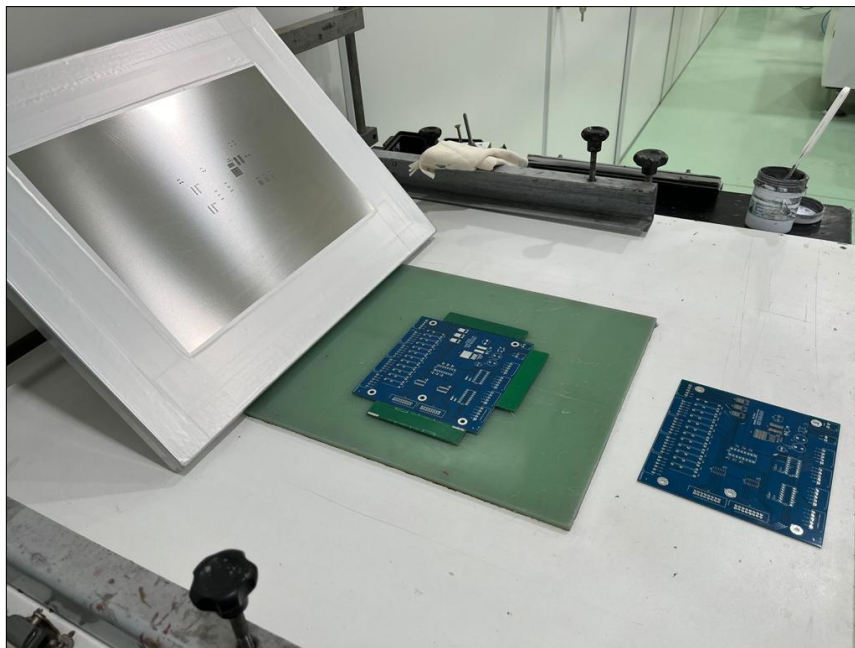


Fonte: Do autor (2023)

3.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Após o recebimento dos itens comprados conduziu-se a montagem das placas. Na fabricação terceirizada das placas de circuito impresso, foi solicitado também a compra da máscara de *SMD* (*Surface Mounted Device*), conhecida como *stencil*, correspondente de cada placa. Esta peça é utilizada como um gabarito no processo de aplicação de pasta de solda. Através deste dirigiu-se o primeiro passo da montagem. Com uma ferramenta de aplicação foi depositado uniformemente pasta de solda nos *pads* dos componentes de montagem de superfície, conforme visto na Fig. 12 a seguir.

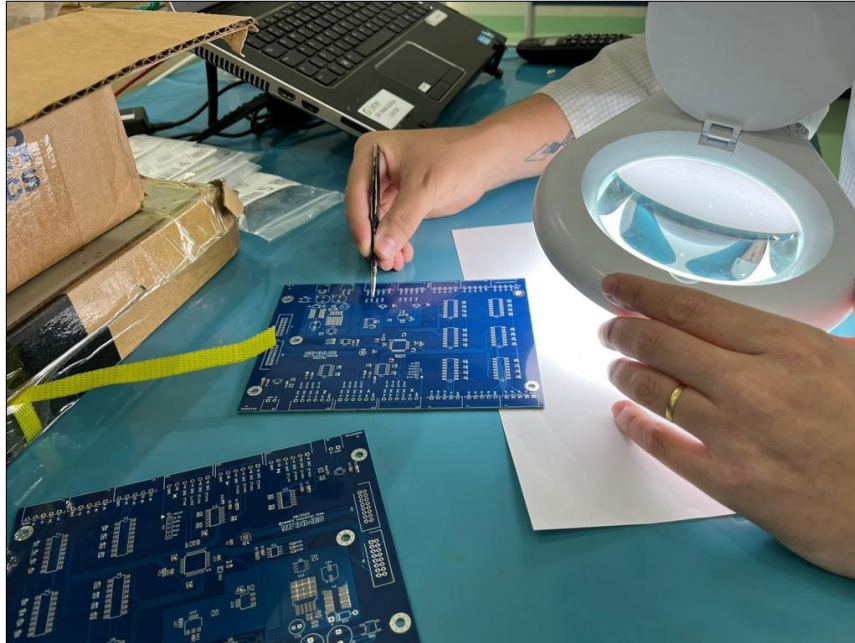
Figura 12: Aplicação de pasta de solda utilizando *stencil*.



Fonte: Do autor (2023)

Posteriormente a pasta de solda ser depositada corretamente à superfície da placa, foi posicionado manualmente todos os componentes *SMD* pertinentes ao projeto, conforme a Fig. 13.

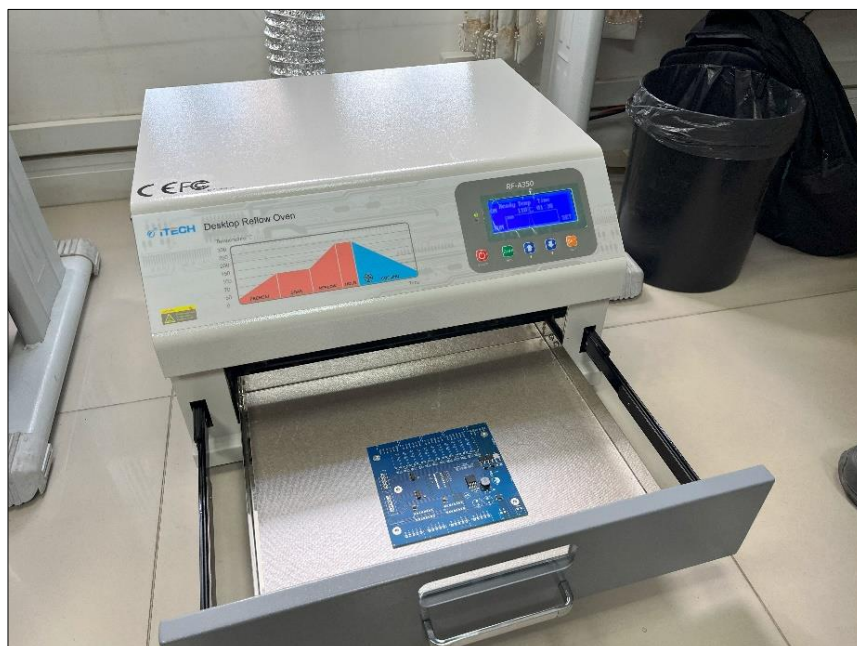
Figura 13: Posicionamento dos componentes SMD.



Fonte: Do autor (2023)

Em seguida estas placas foram levadas até à um pequeno forno com controle de temperatura mostrado na Fig. 14. Neste processo é configurado uma rampa de aquecimento de modo que os componentes sejam soldados à placa conforme recomendações de fabricação e tolerâncias térmicas dos componentes.

Figura 14: Placa auxiliar sendo inserida no forno para soldagem.



Fonte: Do autor (2023)

Finalizado a etapa de soldagem no forno, finaliza-se o processo de montagem das placas soldando manualmente o restante dos componentes do tipo *PTH (Pin Through Hole)*, utilizando uma estação de soldagem e estanho em bobina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, discutiremos os resultados do *hardware* desenvolvido. Inclui testes funcionais, testes de compatibilidade e como o projeto foi implantado na máquina posteriormente. Além desses testes, também será realizada uma comparação de preços entre fornecedores anteriores e a produção atual para realizar uma análise de viabilidade.

4.1 TESTES ELÉTRICOS DE COMPATIBILIDADE

Após a montagem completa das placas principal e auxiliar, iniciou-se o teste elétrico do *hardware*. Uma inspeção visual direta foi realizada para garantir que os conjuntos de componentes foram colocados corretamente. A soldagem e possíveis defeitos de contato foram então verificados utilizando um equipamento de continuidade, garantindo resultados satisfatórios de conexões de acordo com o *layout* projetado.

Logo após a primeira energização do circuito, verificou-se os valores dos barramentos de tensão disponíveis. Logo certificou-se que o circuito de alimentação isolada foi atendido conforme planejado ligando também o um led que indica circuito energizado.

Asseguram-se das condições ideais para o funcionamento do *hardware*, uma equipe de desenvolvimento inseriu ao microcontrolador um *firmware* contento configurações básicas da arquitetura, testando individualmente cada bloco de função. Neste teste validou-se as entradas digitais, comunicação RS485, leitura de encoder, saídas digitais, saída analógica, leitura e escrita de dados na memória externa. Estes testes básicos garantiram a segurança fundamental para assim iniciar o desenvolvimento do *firmware* referente a todo funcionamento da máquina, incrementando todas as funcionalidades conforme as orientações previstas para o projeto.

Ainda nesta etapa deparou-se com um comportamento anormal de temperatura de certos componentes da placa principal durante a realização dos testes. Através de uma câmera termográfica, de acordo com a Fig. 15, foi possível identificar o aumento de temperatura em determinadas regiões do circuito. Neste caso foi verificado os cálculos de dimensionamento dos componentes em questão, comparando os dados com as informações técnicas do fabricante. Logo concluiu-se que o encapsulamento de certos componentes do circuito não tolerava os valores para a aplicação. Apesar do comportamento da placa não estar em condições ideais de execução foi possível dar sequência aos testes adotando medidas de operação para que garantisse a segurança e precisão desejada.

Figura 15: Imagem de câmera termográfica da placa principal



Fonte: Do autor (2023)

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO HARDWARE EM MÁQUINA

Seguidamente dos testes em bancada, durante um período foi desenvolvido um *firmware* de teste por uma equipe de programadores. Neste *firmware* continha instruções para que o *hardware* controlasse a máquina executando movimentações pré-programadas. Nesta circunstância previu-se a prática de

simulações de execuções críticas como: falhas em dispositivos, eventos inesperados ao processo e práticas divergentes do procedimento de operação convencional da máquina.

Mais tarde organizou-se com uma equipe de desenvolvimento que este *hardware* fosse montado diretamente em máquina. Nisto foi incluído cabeamentos e todos os dispositivos pertencentes ao projeto, conforme mostrado na Fig. 16.

Figura 16: *Hardware* montado no painel elétrico da máquina



Fonte: Do autor (2023)

Neste momento então tinha-se uma máquina inteiramente montada para execução dos testes de funcionamento. Através de testes de movimentações de eixos, execução de código G, repetibilidade de movimentos, ações de segurança, averiguou-se o comportamento e eficiência do *hardware* diretamente em sua aplicação destinada.

4.3 CONSTATAÇÕES DA APLICAÇÃO

Após a realização de testes em máquinas utilizando o *hardware* desenvolvido, os resultados obtidos foram satisfatórios. O desempenho alcançado superou as expectativas iniciais, mostrando-se bastante promissor. A máquina executou tarefas complexas com precisão e agilidade, demonstrando-se eficiente. Os

testes de repetibilidade de movimentações e execução de programa CNC realizados evidenciaram a capacidade do *hardware* lidar com a necessidade exigida pelo projeto.

Um processo de análise foi aplicado para avaliar e mitigar possíveis falhas e riscos associados ao funcionamento do *hardware*, conhecido como *DFMEA* (*Design Failure Mode and Effects Analysis*). Esta ferramenta é amplamente reconhecida e utilizada na indústria como uma ferramenta essencial para a checagem de funcionamento de produtos. Na empresa, esse método é aplicado em diversas máquinas e sistemas para identificar e mitigar possíveis falhas e riscos associados ao seu desempenho. No caso específico do *hardware* em questão, o *DFMEA* foi direcionado com o objetivo de avaliar seu funcionamento e detectar potenciais problemas que podem comprometer sua eficiência e confiabilidade.

Através da análise deste método foram identificados alguns pontos, como por exemplo: o aumento de temperatura da placa anteriormente mencionado, possibilidade do incorreto manuseio do equipamento, possível falhas de componentes eletrônicos que afetam o funcionamento do circuito. Estes e outros detalhes foram documentados para posteriormente serem corrigidos, desta forma atribuindo robustez ao *hardware* desenvolvido. Além disso, durante este processo, foram identificados novos recursos e funcionalidades que podem ser implementados para aprimoramento. Essas descobertas foram resultado de uma compreensão mais aprofundada dos requisitos e necessidades dos usuários, bem como das tendências do mercado.

Com as informações coletadas por meio do *DFMEA* e os testes realizados em máquina, a equipe de desenvolvimento está trabalhando em uma nova revisão de projeto e atualização do *hardware*. Essa revisão visa corrigir as deficiências encontradas durante os testes e melhorar ainda mais o desempenho, confiabilidade e eficiência.

4.4 AVALIAÇÃO DO RESULTADO DO PROJETO

O desenvolvimento deste projeto possibilitou algumas vantagens em comparação ao método anterior à nacionalização. Estas vantagens estão relacionadas à redução de custos, flexibilidade do projeto e aumento de desempenho da máquina. De início, foi possível reduzir o custo a um terço do valor para se produzir todo *hardware* da máquina, de acordo com orçamentos previstos para o projeto e

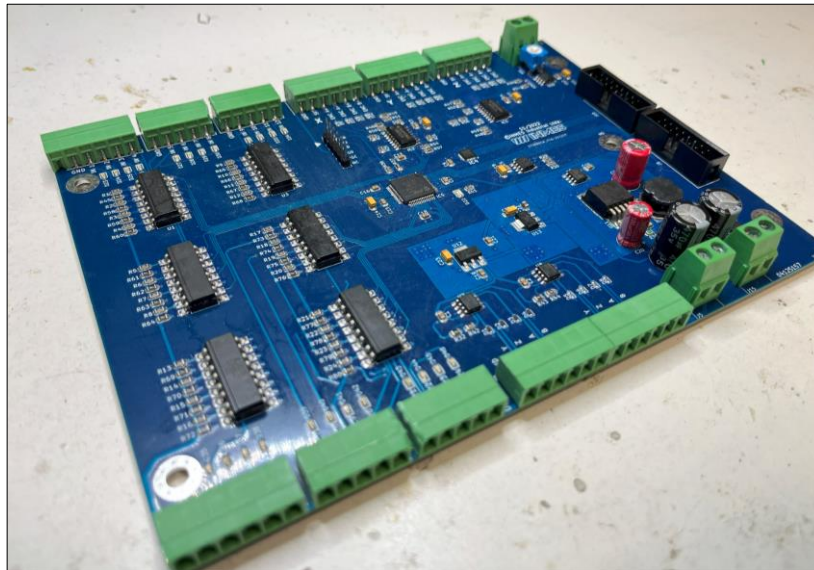
revisões futuras. Isso se deu devido a nacionalização do projeto, utilizando fornecedores locais e conseqüentemente diminuindo custos. Na sequência, a equipe de desenvolvimento identificou que a máquina entrega uma velocidade superior nas movimentações de até 50% em relação a versão anterior, devido ao hardware possibilitar o controle de movimentações mais rápidas. Também por este motivo foi identificado a redução do tempo de ciclo de operação em 30%, reduzindo o tempo final na execução de um código G. Essas melhorias no desempenho permitiram aumentar a eficiência da máquina, proporcionando ganhos significativos aos clientes.

Outra vantagem importante é a ausência do pagamento de *royalties*. Anteriormente, havia a necessidade de pagamento a um fornecedor europeu pelo uso de sua tecnologia, correspondendo a quase 30% do valor dos custos totais. Com o desenvolvimento interno do *hardware*, essa obrigação foi eliminada.

Como resultado de todo esse processo, o projeto de nacionalizar a máquina trouxe uma enorme flexibilização relacionada ao desenvolvimento de engenharia interna. As equipes puderam adaptar e personalizar a máquina de acordo com as necessidades específicas dos clientes, o que não seria possível quando dependiam exclusivamente de um fornecedor externo. Além disso, a utilização de fornecedores locais fortaleceu a economia local e garantiu um maior controle sobre a cadeia de suprimentos.

Finalmente, a nacionalização do projeto também contribuiu para a diminuição significativa no tempo de entrega. Agora, a equipe de engenharia pode responder rapidamente às demandas dos clientes, evitando os atrasos associados à importação de componentes. Isso proporcionou uma experiência mais ágil e satisfatória para os clientes, além de fortalecer a competitividade da empresa no mercado. A seguir, na Fig. 17 é apresentado o resultado da placa principal desenvolvida e funcional conforme os testes realizados.

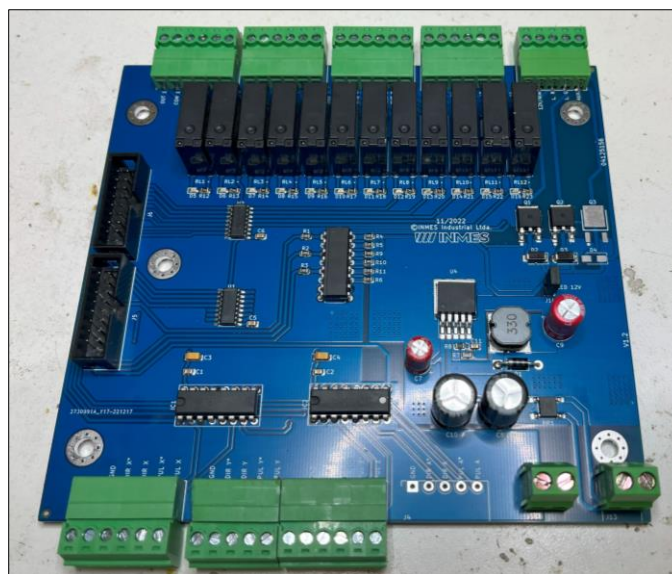
Figura 17: Placa principal finalizada



Fonte: Do autor (2023)

Na sequência, na Fig. 18 é apresentado também o resultado da placa auxiliar.

Figura 18: Placa auxiliar finalizada.



Fonte: Do autor (2023)

Ao concluir esta etapa, fica evidente a complementaridade das duas imagens apresentadas, que oferecem uma visão abrangente do resultado final deste trabalho. Essas duas imagens, juntas, consolidam os resultados alcançados e fornecem uma base para as conclusões a serem discutidas no próximo capítulo.

5 CONCLUSÕES

Em conclusão, o desenvolvimento deste *hardware* resultou em uma resposta satisfatória após os testes de funcionamento realizados em máquina. Os resultados obtidos superaram as expectativas iniciais, demonstrando um desempenho promissor e abrindo novas possibilidades para sua aplicação em diversos setores.

Uma das principais vantagens desse projeto é a redução significativa nos custos de produção em comparação com o método anterior, no qual os itens eram importados de um fornecedor europeu. Essa mudança para a nacionalização do *hardware* eliminou os altos custos associados à importação, tornando-o mais acessível e competitivo no mercado. Além disso, a ausência do pagamento de *royalties* também contribuiu para essa redução de custos, aumentando ainda mais a atratividade do produto.

Além das vantagens financeiras, o projeto de nacionalizar a máquina trouxe benefícios adicionais. A capacidade de desenvolver internamente a engenharia do *hardware* proporcionou uma maior flexibilização, permitindo que a equipe adaptasse e personalizasse a máquina de acordo com as necessidades específicas dos clientes. Isso resultou em uma solução mais versátil e adaptável, capaz de atender às demandas variadas do mercado.

Em resumo, o projeto de desenvolvimento do *hardware* nacionalizado apresentou resultados satisfatórios, abrindo caminho para melhorias contínuas por meio de análises e revisões. Com essas conquistas, se estabelece como uma solução confiável, eficiente e adaptável, capaz de atender às necessidades dos clientes e impulsionar o crescimento da empresa no mercado competitivo.

REFERÊNCIAS

- ARTSOFT EUA. Mach3 controle de CNC: a instalação do software e configuração. Tradução de Maurício Dias. Versão 3. 2008.
- CANBAZ, Ibrahim; BAYRAKTAR, Emre; AYDIN, Tuncay. A comparative study of drilling performance of different types of drills in drilling of AISI 1040 steel. *Measurement*, v. 128, p. 91-99, 2018.
- CHEN, Y. et al. Design of hardware system for industrial automation. In: *International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR)*, 2019.
- CHUAH, K. H., et al. *Precision CNC machining technology*. Elsevier, 2018.
- CUNHA, João. *Riscos e prevenção de acidentes com furadeiras*. São Paulo: SENAI-SP, 2018.
- FREITAS, J. C.; SILVA, R. R. Conceitos de sistemas embarcados em automação industrial. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 7, n. 2, p. 52-62, 2015.
- HOSSEINI, S. A., et al. "CNC Milling Process: A Review." *Procedia Manufacturing*, vol. 37, 2019, pp. 827-834.
- KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, S. R. *Manufacturing engineering and technology*. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2009. p. 1-6; 553-674; 1049-1092.
- KUMAR, R., et al. "A Review on CNC Machines." *International Journal of Engineering Science and Computing*, vol. 7, no. 3, 2017, pp. 15109-15112.
- LAZZERONI, M. "How CNC Machines Work: The Basics." *Engineering.com*, 29 jan. 2019, www.engineering.com/story/how-cnc-machines-work-the-basics.
- LIU, X., et al. "Design of a CNC Machining System Based on Embedded Technology." *Advances in Manufacturing*, vol. 9, no. 3, 2021, pp. 341-352.
- LIU, Y. et al. Design and implementation of embedded system in intelligent manufacturing. In: *International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 2015.
- RADHAKRISHNAN, T. K. *Manufacturing technology: metal cutting and machine tools*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2018.
- RONG, Y., et al. "Research on Intelligent CNC Machining Technology Based on Industrial Internet of Things." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 5-8, 2019, pp. 1905-1917.
- SANTOS, Francisco. *Sistemas embarcados*. Rio de Janeiro: Brasport, 2013.
- SILVA, João. *Furadeiras e fresadoras*. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SILVA, Lindomar Andrades da; ZANIN, Maicon Jair. MONTAGEM DE FRESA CNC. 2011. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnólogo em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

WU, L. et al. An IoT-based intelligent maintenance system for industrial robots. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 107, n. 5-8, p. 2521-2531, 2020.

ZAVALA, J. et al. Internet of things, Industry 4.0 and smart factories: A review of advanced manufacturing based on sensor network. Sensors, v. 19, n. 9, p. 1992, 2019.

ZHANG, Y. et al. Hardware design of intelligent agricultural equipment based on Internet of things technology. In: International Conference on Agricultural Engineering and Food Security (AEFS), 2020.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por permitir que este momento acontecesse e a minha família que sempre esteve presente em todos os momentos importantes. Faço um agradecimento especial à empresa Inmes Industrial, por disponibilizar recursos e auxílio dos colaboradores para que este projeto se concretizasse com sucesso.