



PROJETO DO ACIONAMENTO MECATRÔNICO DE UMA MÁQUINA SECCIONADORA DE CHAPAS DE MDF COM MOVIMENTAÇÃO POR PINÇAS

Zaqueu Dacoregio Heinzen¹

João Mota Neto²

Marcos Antonio Jeremias Coelho³

Gabriela Rocha Roque⁴

Fernando Guessi Plácido⁵

Resumo: O projeto mecatrônico da Máquina Seccionadora de Chapas de MDF com Movimentação por Pinças (IM-2900 V30 Automatic) foi desenvolvido internamente pela INMES Industrial com o objetivo de criar uma solução de alto desempenho a custo competitivo. Para evitar o uso de soluções tradicionais mais onerosas (como CLPs ou kits de servoacionamentos), a empresa optou pelo desenvolvimento customizado de hardware e software. A seccionadora foi projetada para ter alta precisão dimensional e rapidez no posicionamento. O sistema de acionamento das pinças utiliza um Motor de Indução Trifásico (ACIM) acoplado a um inversor de frequência com realimentação por encoder para garantir o movimento de precisão. A arquitetura de controle é baseada em uma PCB que integra um microcontrolador PIC16 (para funções discretas) e um DSC dsPIC33 (para controle das pinças), comunicando-se por meio de protocolos como I²C, SPI e RS-485. O projeto inclui o sistema Smart Assist — um auxílio visual que usa fita de LEDs para orientar o operador e reduzir o desperdício de material — além de funcionalidades como regulagem eletrônica de altura de corte e cortes em ângulo. Os testes funcionais validaram a precisão exigida, atingindo $\pm 0,2$ mm em cortes retos, e uma velocidade de retorno das pinças de até 25 m/min sem carga. O lançamento em 2022 demonstrou eficiência superior em comparação com máquinas manuais e semiautomáticas. O sucesso comercial, com mais de 200 máquinas comercializadas, comprovou que o desenvolvimento mecatrônico interno otimizou os custos sem comprometer a performance, atendendo integralmente aos requisitos de precisão e velocidade.

Palavras-chave: Seccionadora de pinças. Sistema embarcado. Controle de posição.

¹ Graduando em Engenharia Mecatrônica. Ano 2025-2. E-mail: zaqueu.heinzen@gmail.com

² Docente do curso de Engenharia Mecatrônica, UNISATC. E-mail: joao.neto@satc.edu.br

³ Docente do curso de Engenharia Mecatrônica, UNISATC. E-mail: marcos.coelho@satc.edu.br

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecatrônica, UNISATC. E-mail: gabriela.roque@satc.edu.br

⁵ Docente do curso de Engenharia Mecatrônica, UNISATC. E-mail: fernando.placido@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

A INMES Industrial é uma indústria fabricante de máquinas localizada em Braço do Norte, Santa Catarina, focada no segmento de máquinas para processamento de madeira e materiais similares, que adotou um modelo de negócio Business-to-Business (B2B) focado em vendas que fornecem a marceneiros de micro, pequeno e médio porte. Para manter um custo de produto competitivo e se destacar nesse mercado, a empresa optou pelo desenvolvimento e fabricação interna de hardware e software customizados, em contraste com o uso de soluções tradicionais como CLPs ou kits de servoacionamentos.

No setor moveleiro, as seccionadoras de chapas de MDF com movimentação por pinças são equipamentos cruciais, exigindo alta precisão dimensional e rapidez no posicionamento. Embora esses requisitos sejam tradicionalmente atendidos com o uso de motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) e soluções comerciais, a INMES Industrial definiu um desenvolvimento mecatrônico interno para o projeto de uma nova seccionadora.

As principais definições foram: utilização de um Motor de Indução Trifásico (ACIM) acoplado a um inversor de frequência com realimentação por encoder para o movimento de precisão das pinças, um Módulo de Cristal Líquido Inteligente (LCM) como interface do operador, e funcionalidades de regulação eletrônica de altura de corte, cortes em ângulo distintos de 90 graus e uma interface visual para auxiliar no posicionamento do material visando reduzir o desperdício proveniente de erros operacionais.

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar o desenvolvimento e os resultados deste projeto mecatrônico de uma seccionadora de pinças utilizando hardware e software dedicados, descrevendo o processo de desenvolvimento do sistema de acionamento e avaliando os resultados obtidos na entrega final.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

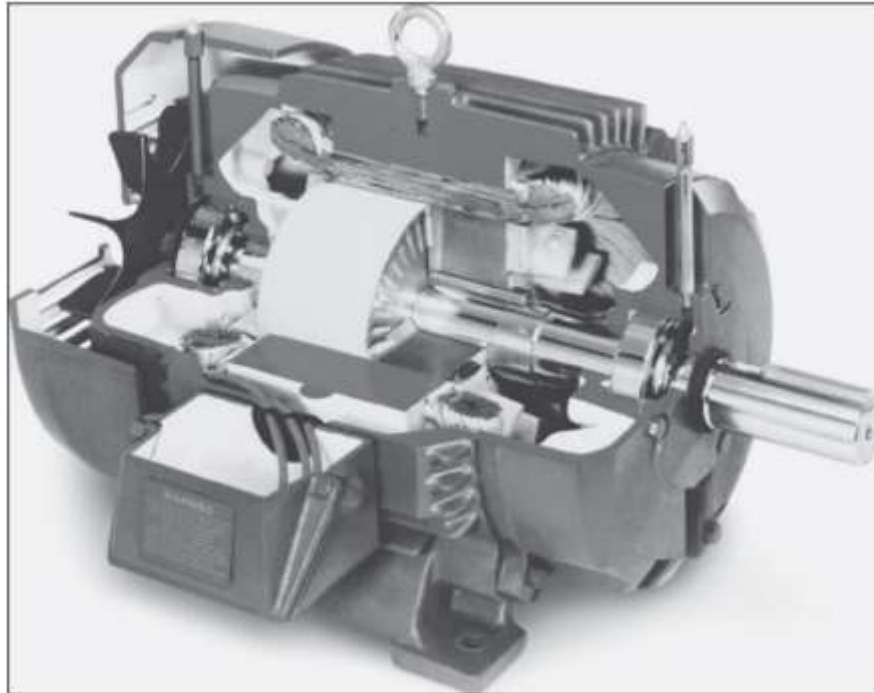
2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (ACIM)

Os motores elétricos são máquinas que convertem potência elétrica em potência mecânica. Nos motores de indução trifásicos o rotor recebe a corrente elétrica por indução, como um transformador, por meio da corrente elétrica aplicada diretamente no estator. Partindo-se do pressuposto de que uma tensão alternada polifásica equilibrada é a fonte de excitação do motor, um campo magnético é produzido no entreferro girando em velocidade síncrona. O número de polos do motor e a frequência da fonte de alimentação definem a velocidade síncrona do ACIM. No entanto, um aspecto fundamental deste tipo de máquina elétrica é que, para que haja torque no rotor, deve necessariamente haver uma diferença entre a velocidade síncrona (n_s), em rpm, e a velocidade do rotor (n), em rpm, que é definido como o escorregamento (s), de acordo com a equação 1:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

O rotor de um ACIM pode ser do tipo rotor bobinado ou do tipo rotor de gaiola de esquilo. No rotor bobinado, os terminais do enrolamento do motor são conectados a anéis deslizantes isolados montados sobre o eixo, e escovas de carvão apoiadas sobre esses anéis permitem que os terminais do rotor se tornem disponíveis externamente ao motor, o que possibilita o controle de velocidade mediante reostatos externos. No rotor de gaiola de esquilo, o enrolamento consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores, o que faz com que a construção deste tipo de motor seja muito robusta e simples. Os aspectos construtivos básicos de um ACIM com rotor do tipo gaiola de esquilos, que é o tipo de ACIM mais utilizado (Umans, 2014, p. 344), podem ser observados na Fig. 1.

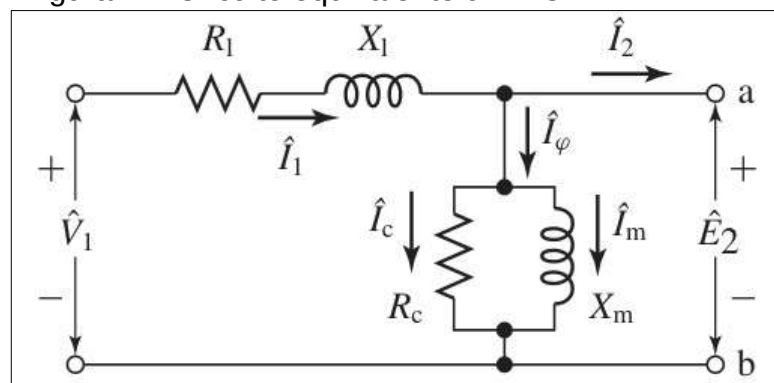
Figura 1 – Vista longitudinal de um motor trifásico do tipo gaiola de esquilo



Fonte: Umans (2014, p. 345)

O circuito equivalente do estator do ACIM, que pode ser visto na Fig. 2, é composto por uma parcela correspondente à impedância de dispersão do estator ($Z_1 = R_1 + jX_1$), e à uma parcela de terminal do estator, após a queda de tensão causada pela impedância de dispersão. Na parcela de terminal de estator, há uma corrente de excitação ($\hat{I}_\phi$), constituída por uma corrente magnetizante ($\hat{I}_m$) e uma corrente de perdas no núcleo ($\hat{I}_c$), e a corrente de carga ($\hat{I}_2$), que gera a força magnetomotriz (FMM) que corresponde à FMM da corrente de rotor (Umans, 2014, p. 329).

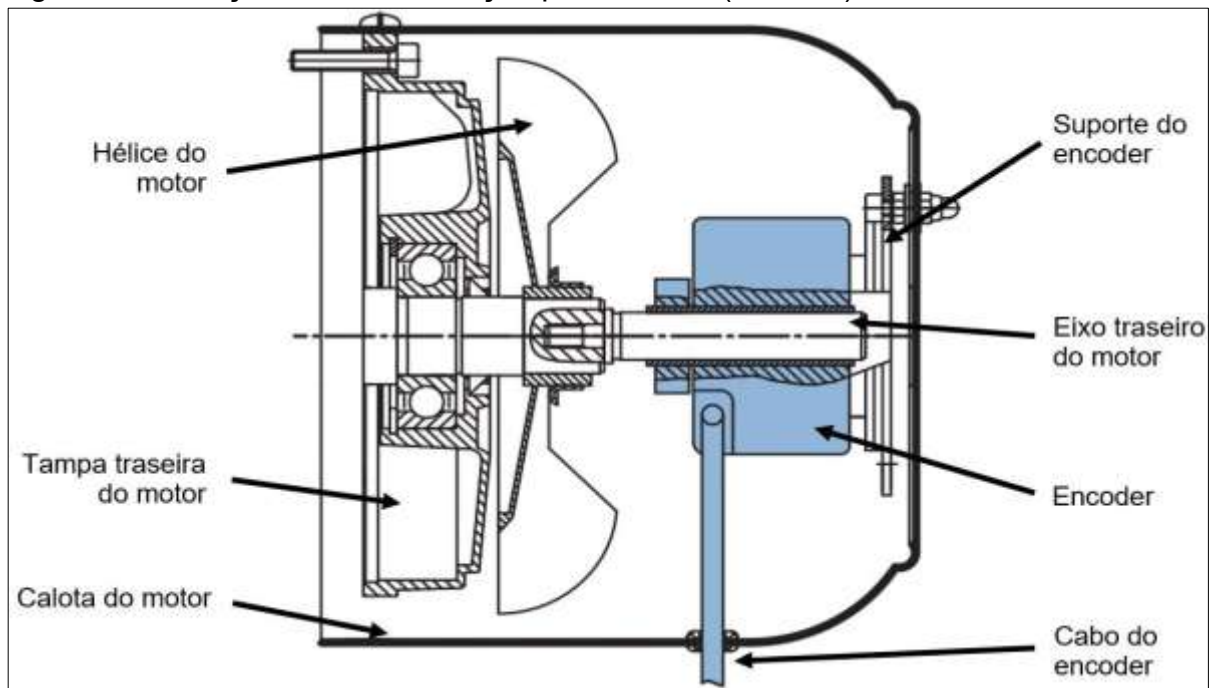
Figura 2 – Circuito equivalente um ACIM



Fonte: Umans (2014, p. 351)

De forma a possibilitar o controle de posição, estes motores podem ser fornecidos com algum sensor de ângulo mecânico do eixo, sendo os mais comuns em motores industriais os *resolvers* e *encoders* incrementais ou absolutos (Ozgenel; Bal; Uygun, 2016). A Fig. 3 demonstra um ACIM com realimentação por encoder, localizado na parte traseira do eixo.

Figura 3: Ilustração da realimentação por encoder (em azul) de um ACIM

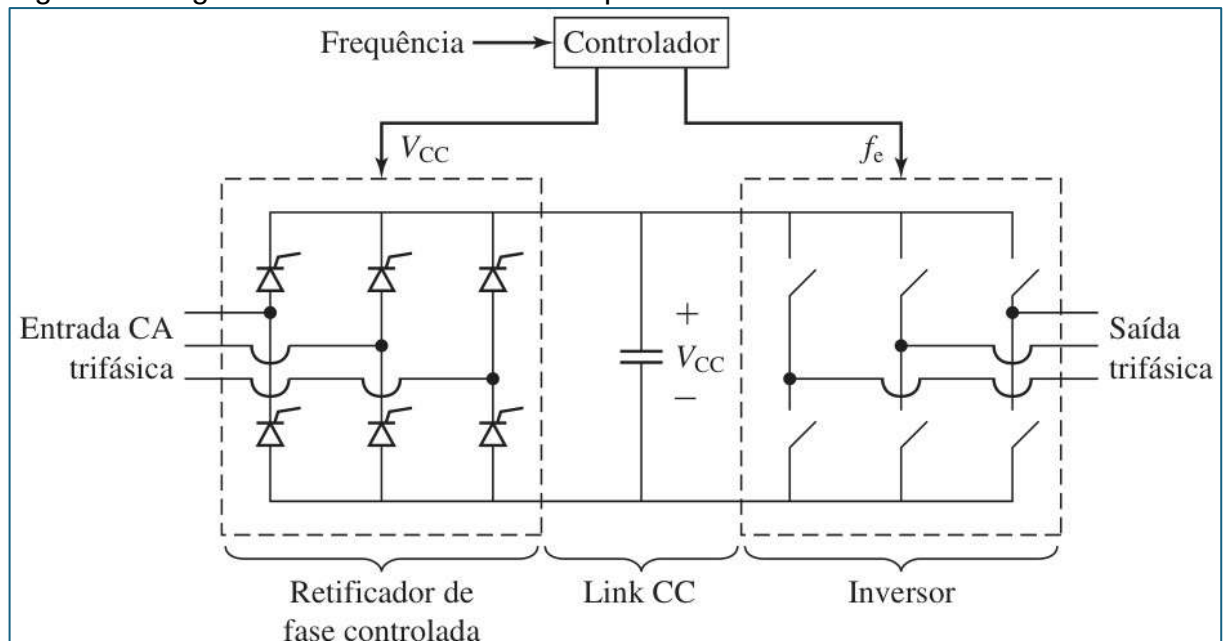


Fonte: Adaptado de Nord Drivesystems (2025)

2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico destinado à geração de uma corrente senoidal de armadura em máquinas elétricas, com o uso do controle da tensão de saída com frequência variável. O bloco de retificação produz uma tensão contínua V_{cc} no capacitor do “link CC” e, controlando a sequência de acionamento das chaves do bloco inversor, é possível produzir formas de onda de tensão de amplitude variável por meio da modulação por largura de pulso (PWM). A Fig. 4 demonstra um diagrama simplificado de um inversor de frequência trifásico.

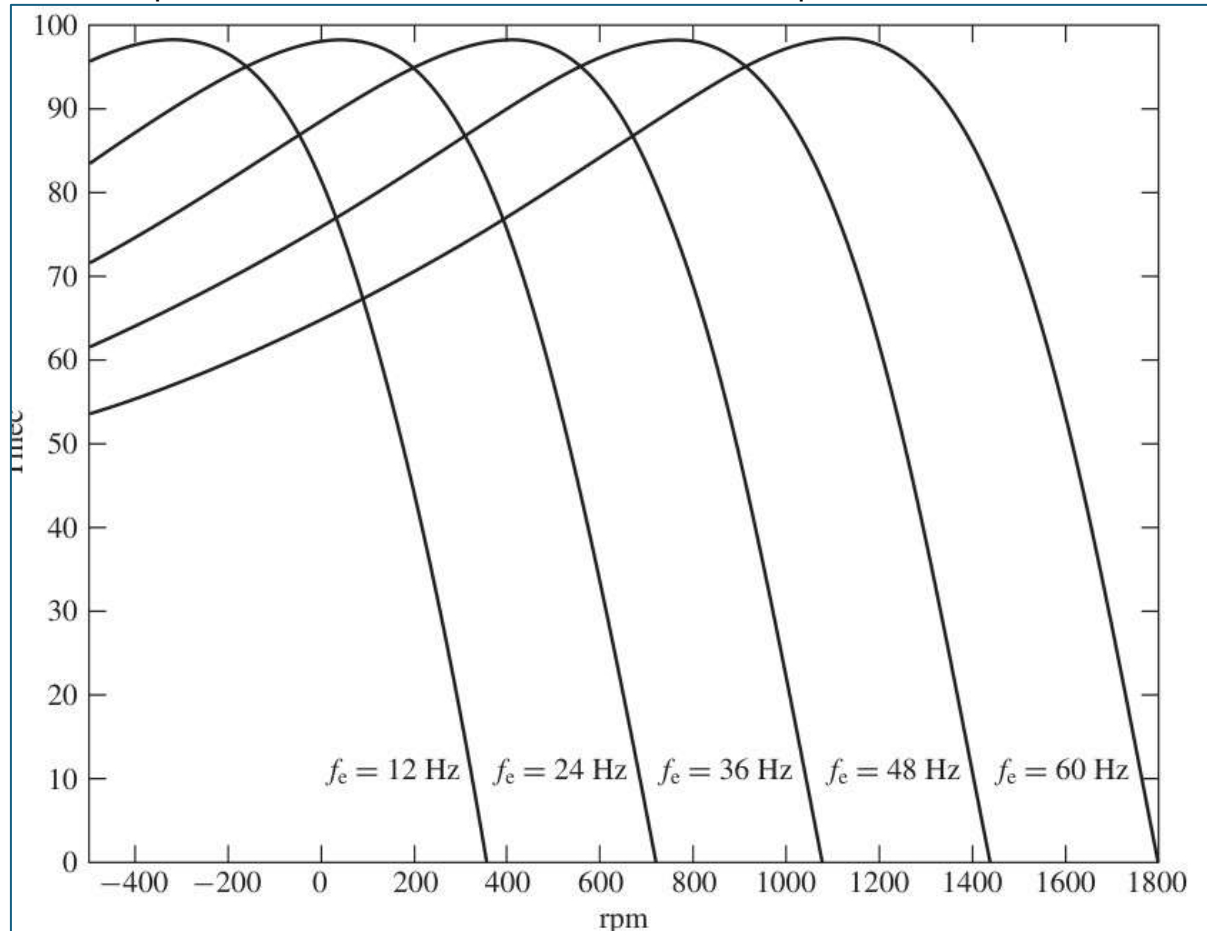
Figura 4: Diagrama de um inversor de frequência trifásico



Fonte: Umans (2014, p. 573)

O controle escalar pode ser aplicado ao ACIM quando não há exigências de resposta dinâmica e precisão de velocidade e posicionamento, por exemplo, no acionamento de bombas e ventiladores (Stulrajter; Hrabovcová; Franko, 2007). Para o controle onde a resposta dinâmica não é uma exigência de projeto, pode-se utilizar o algoritmo escalar em conjunto com a realimentação por encoder. Neste caso, espera-se uma performance diminuída em baixas rotações do ACIM, que devem ser compensadas no projeto de outras maneiras. O algoritmo escalar pressupõe uma razão de tensão e frequência constante de forma a manter o pico de conjugado do motor sem variações relativas à frequência aplicada. A Fig. 5 demonstra uma família de curvas de conjugado (T_{mec}) vs rotação nominal do motor (rpm) para cada frequência aplicada à armadura, típicas para o controle escalar.

Figura 5: Curvas de conjugado versus rotação nominal para frequências de entrada variáveis quando mantida constante a razão tensão/frequência

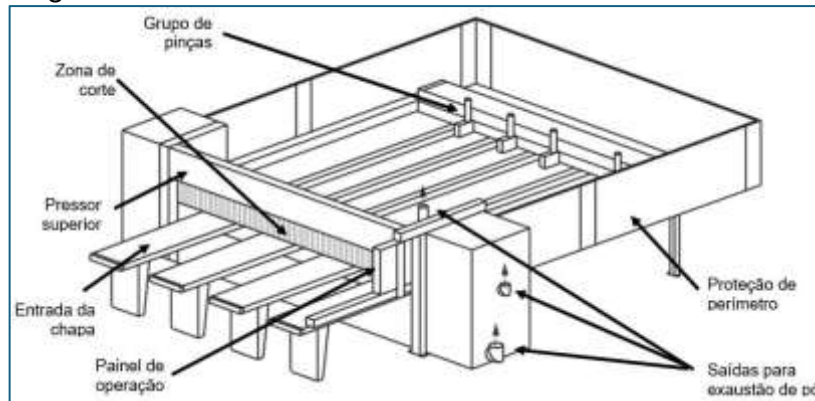


Fonte: Umans (2014, p. 601)

2.3 SECCIONADORAS COM MOVIMENTAÇÃO POR PINÇAS

As seccionadoras horizontais são definidas como máquinas de serra circular com mesa horizontal, que são projetadas para corte de painéis, e são equipadas com um carro de deslocamento por uma linha de corte que incorpora uma ou mais lâminas de serra circulares (ABNT NBR ISO 19085-2, 2019). A movimentação dos painéis que serão cortados na seccionadora pode ser feita de modo manual ou automática. Em modo automático, dada a geometria da peça de trabalho, a movimentação do painel é realizada por pinças que carregam o material para o interior da máquina e realizam um movimento de retorno, em direção ao operador, seccionando horizontalmente o material durante o ciclo do carro de corte. A Fig. 6 ilustra uma seccionadora horizontal de pinças.

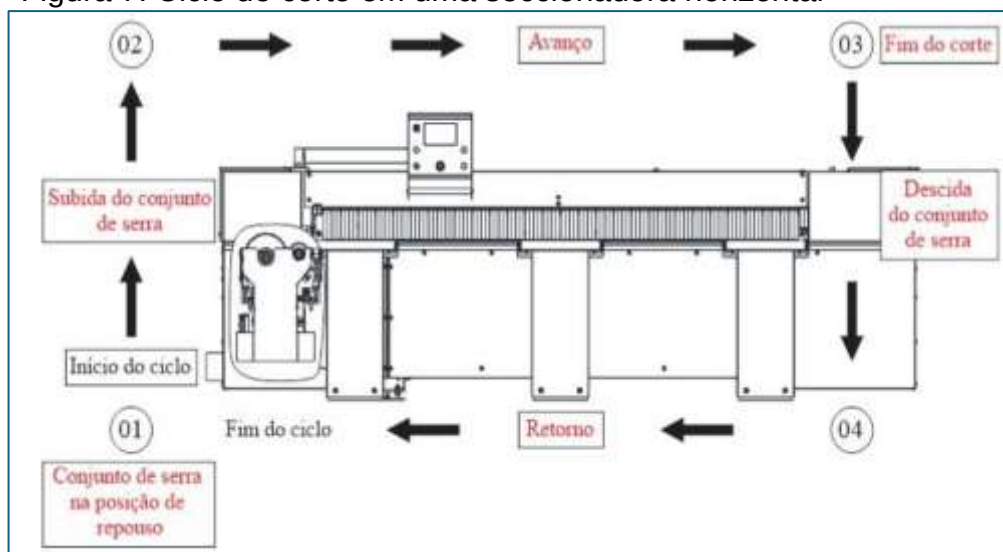
Figura 6: Seccionadora horizontal



Fonte: Adaptado de ABNT (2019)

O ciclo de corte pode ser efetuado de um ponto inicial fixo até o comprimento final do corte somado a uma distância que garanta que a lâmina de serra transpassou totalmente o material, bem como pode ser efetuado de um ponto inicial variável que corresponde ao comprimento do material somado a uma distância que garante que a lâmina transpassou totalmente o material. A Fig. 7 ilustra um ciclo de corte com ponto inicial fixo. Como o grupo de corte deste tipo de máquina é enclausurado, a operação é muito segura, principalmente quando comparada com máquinas do tipo serra circular ou esquadrejadeira de precisão, onde a lâmina de serra possui posição fixa e o operador movimenta manualmente a chapa que está sendo cortada.

Figura 7: Ciclo de corte em uma seccionadora horizontal



Fonte: INMES Industrial (2025)

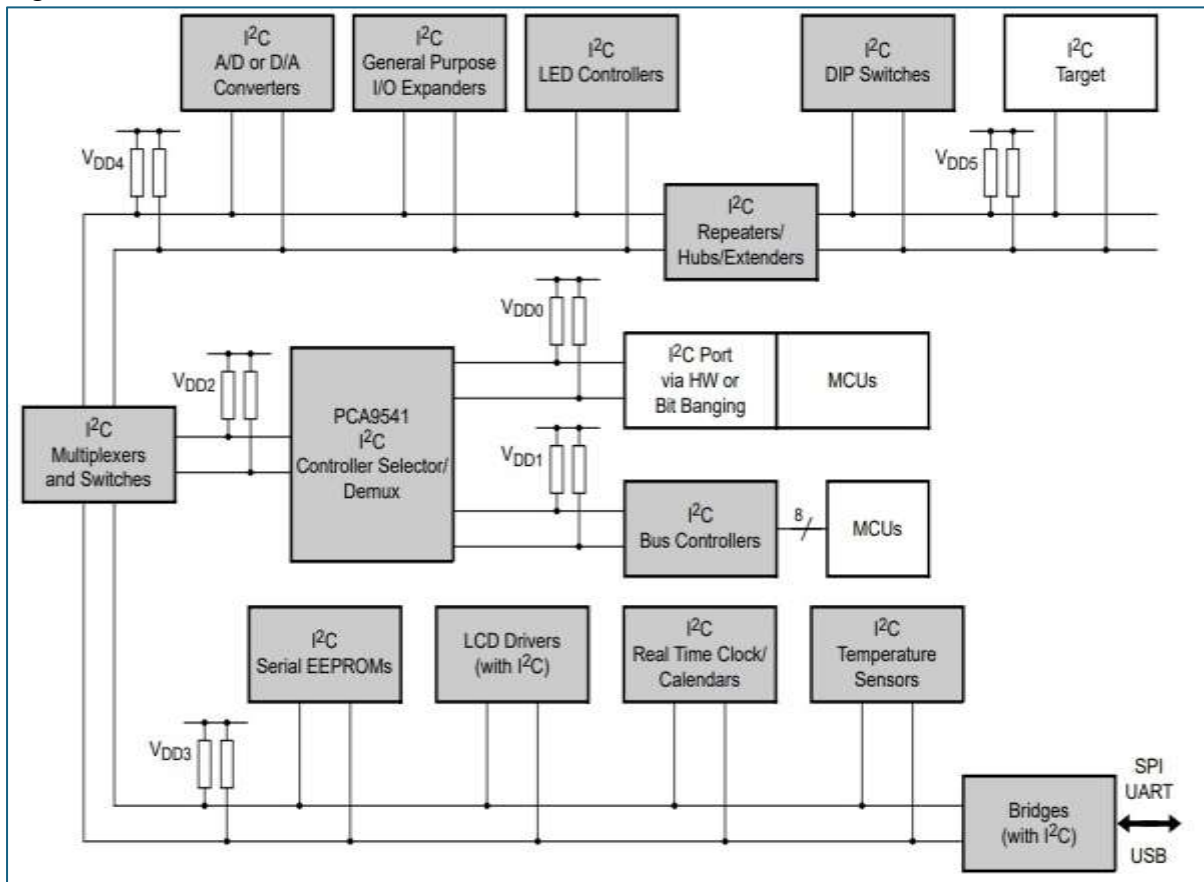
2.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS EMBARCADOS

De forma a realizar a comunicação entre dispositivos de diversos fabricantes em projetos de sistemas embarcados, alguns protocolos de comunicação foram desenvolvidos por fabricantes e associações de fabricantes de circuitos integrados. Alguns destes protocolos são abertos e livres para uso, e suas especificações são amplamente divulgadas. Em outros casos, os fabricantes podem cobrar pelo uso do protocolo e exigir *compliance* com especificações rígidas. Os tópicos abaixo descrevem os protocolos utilizados no desenvolvimento do presente projeto.

2.4.1 Inter Integrated Circuit (I²C)

O protocolo de comunicação I²C foi desenvolvido pela Philips Semiconductor em 1982 para conectar circuitos integrados diversos em um barramento *serial* com possibilidade de comunicação mestre-escravo ou multi-mestre com apenas duas linhas de barramento: uma linha de dados (SDA) e uma linha de *clock* (SCL). O protocolo utiliza um endereçamento único por dispositivo no barramento e técnicas para detecção de erros de transmissão ou recepção, bem como detecção de colisão e arbitragem em caso de mais de um dispositivo mestre no barramento. Um exemplo de barramento I²C pode ser visualizado na Fig. 8.

O protocolo I²C, desde 2006, é considerado de uso livre e é amplamente utilizado em projetos de sistemas embarcados onde há necessidade de comunicação segura e padronizada entre os diversos circuitos integrados. Todos os principais fabricantes de microcontroladores e processadores digitais de sinais (DSPs) disponibilizam bibliotecas prontas para o uso do protocolo I²C para os seus dispositivos, o que o torna uma opção segura e versátil de comunicação entre circuitos integrados em placas eletrônicas.

Figura 8: Barramento I²C

Fonte: NXP Semiconductors (2021)

2.4.2 Differential Inter Integrated Circuit (dI²C)

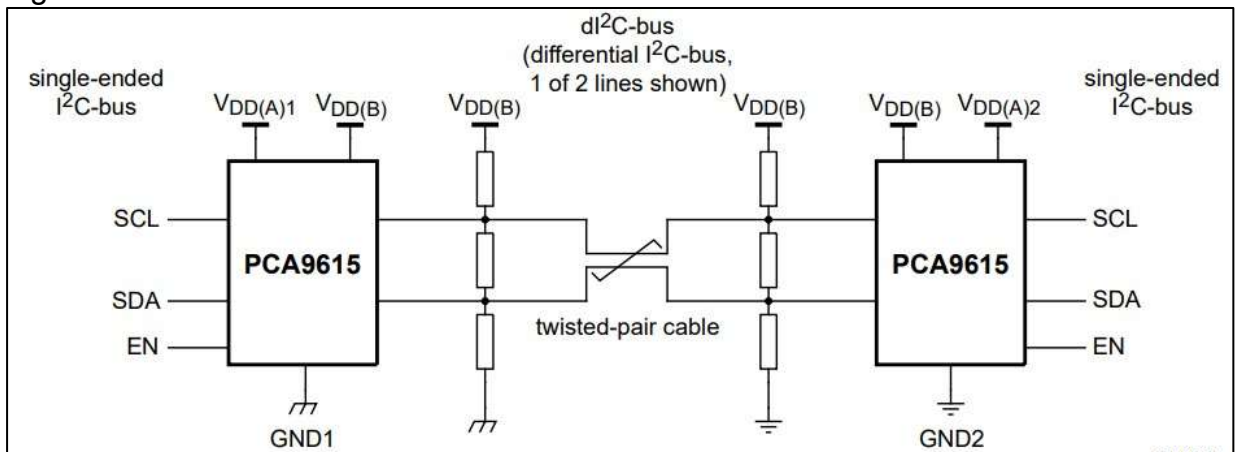
Por ser um protocolo baseado em sinais de tensão, a capacitância do barramento influencia na velocidade de subida e de descida dos bits transferência de dados. Por este motivo, o protocolo I²C possui um limite de componentes, bem como um limite no comprimento físico de barramento que é dependente da geometria da placa de circuito impresso, o que na prática limita o comprimento das trilhas do barramento.

Dada esta limitação, não é habitual o uso do protocolo de comunicação I²C para realizar a comunicação entre placas de circuito impressos em locais distintos. Para eliminar esta limitação, alguns circuitos integrados possuem a função de tornar as linhas de clock e dados *diferenciais*, eliminando o ruído em modo comum e

estabelecendo um meio físico para comunicação a médias distâncias mantendo o protocolo I²C.

Este meio físico é conhecido como *Differential Inter Integrated Circuit* (dI²C) e a sua vantagem é evidente em casos de limitação dos canais de comunicação no microcontrolador ou DSP escolhido no projeto e deseja-se estender o barramento I²C de uma placa eletrônica para realizar a comunicação, no mesmo barramento, com placas eletrônicas localizadas a distâncias maiores sem comprometer os níveis de sinal que garantem a estabilidade da comunicação. Um exemplo de circuito integrado que possibilita este tipo de meio físico é o PCA9615, fabricado pela NXP Semiconductor. Um exemplo de barramento dI²C pode ser visualizado na Fig. 9, onde verifica-se um dos dois pares diferenciais do meio físico.

Figura 9: Barramento dI²C



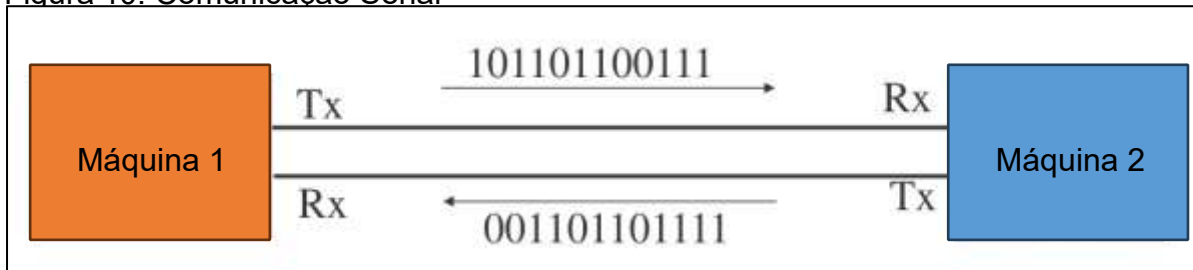
Fonte: NXP Semiconductors (2021)

2.5 COMUNICAÇÃO SERIAL

A comunicação Serial possui como premissa básica a transmissão de dados por um ou dois fios, submetendo apenas um *bit* da mensagem por vez, conforme demonstrado na Fig. 10, em contraste com a comunicação Paralela, onde vários *bits* são transmitidos simultaneamente. A desvantagem da limitação de velocidade da comunicação Serial é superada pela vantagem econômica da baixa quantidade de fios necessária para estabelecer a comunicação entre dispositivos eletrônicos, principalmente quando a distância entre os dispositivos é elevada. O

próximo tópico descreve uma interface de comunicação Serial comumente encontrada em microcontroladores e DSPs.

Figura 10: Comunicação Serial



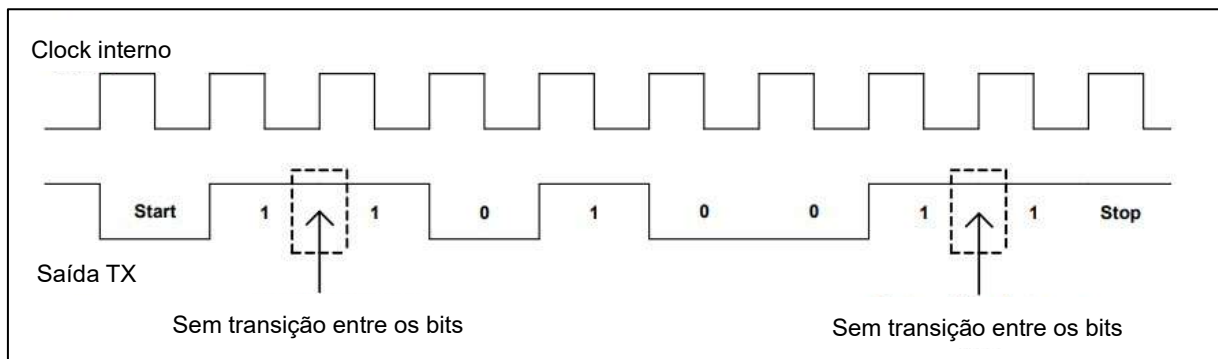
Fonte: Adaptado de Conrad, 2012

2.5.1 Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Uart)

O módulo UART é um periférico de comunicação Serial que contém gerador de *clock*, registradores de deslocamento e *buffers* de dados necessários para realizar a transmissão e/ou recepção de dados de maneira independente da execução do programa. Por não necessitar “carregar” a execução do programa durante o tempo em que a comunicação está ocorrendo, este módulo é amplamente difundido em microcontroladores e DSPs. Por ser assíncrona, não há uma linha de *clock* para estabelecer o sincronismo de transmissão entre dispositivos, que é garantido pela padronização da frequência de *clock* do barramento.

Um módulo UART permite normalmente a definição de pinos de transmissão (Tx) e recepção (Rx) no dispositivo, a configuração da frequência de *clock*, a habilitação de paridade e *bit* de erro, a configuração entre 7 ou 8 *bits* de dados e o controle de fluxo. É comum ainda a disponibilidade de tratamento de interrupção de transmissão e envio de dados nos módulos UART. Por padrão, um módulo UART utiliza o formato *Non-Return to Zero* (NRZ), onde dois bits consecutivos não precisam retornar para o nível elétrico neutro, conforme pode ser visualizado na Fig. 11.

Figura 11: Transmissão de dados por um módulo UART (nota: apenas o pino TX é um sinal externo da transmissão, o *clock* é gerado internamente pelo módulo e não é transmitido externamente)



Fonte: Adaptado de Microchip, 2018

Em um módulo UART, cabe ao projetista do sistema embarcado definir as configurações citadas anteriormente de acordo com o escopo do projeto, habilitar o módulo e carregar os dados a serem transmitidos ou ler os dados recebidos em registradores específicos do dispositivo, que se encarrega do processo de recepção e transmissão.

2.5.2 Padrão De Interface EIA-485-A (RS-485)

O módulo UART é um periférico importante que pode ser utilizado para a comunicação entre circuitos integrados em um sistema embarcado. Porém, para a comunicação entre diversos dispositivos a longa distância, os níveis de sinal elétrico podem sofrer interferência por ruído em modo comum e modo diferencial, o que exige um meio físico que possibilite a supressão deste tipo de interferência.

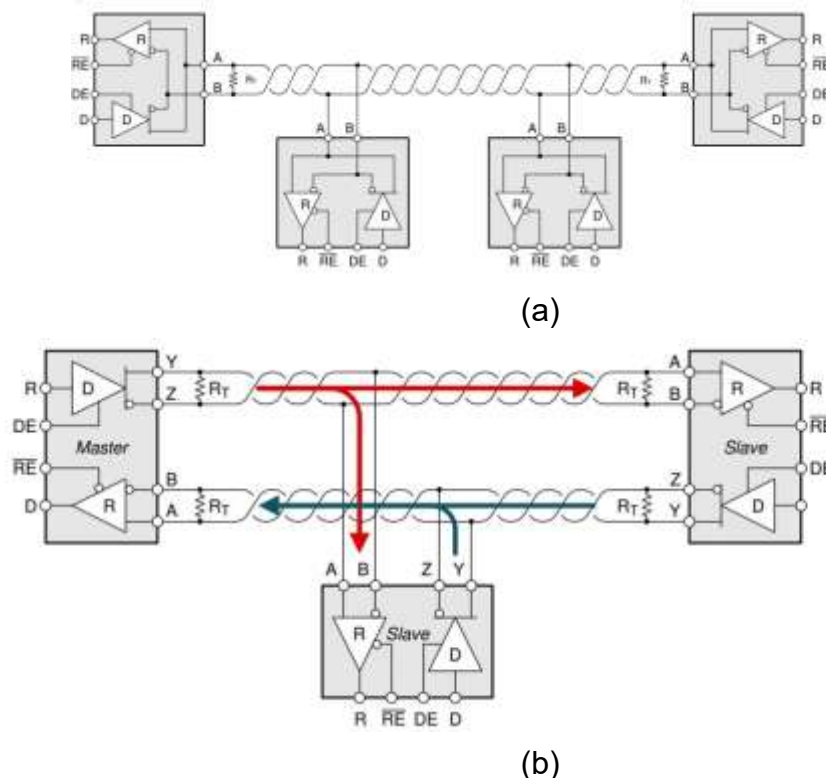
O padrão de interface EIA-485-A, comumente conhecido como RS-485, foi definido em 1983 e se tornou o padrão preferido para muitas aplicações de redes de comunicação industrial. RS-485 é um padrão de transmissão de dados balanceado para comunicação Serial que permite transmissão robusta em taxas de comunicação moderadas em longas distâncias em aplicações multi-ponto. O padrão especifica apenas as características elétricas dos *drivers* e dos *buffers*, e não um protocolo. Por sua robustez, muitas interfaces industriais como ModBus e ProfiBus optam pelo meio físico RS-485 (Wang; Liu, 2021).

Como demonstrado na Fig. 12, uma rede RS-485 consiste em um ou múltiplos nós conectados em um barramento em paralelo, tanto em modo *half-duplex* (dois fios), que exige a transmissão e recepção em tempos distintos, como

em modo *full-duplex* (quatro fios), que possibilita a transmissão e recepção independente de dados no barramento. São utilizados resistores de terminação, geralmente de 120 Ohms, para garantir o casamento de impedância das linhas do barramento de acordo com o tipo de cabo utilizado. Este valor não é obrigatório, mas é recomendado pela especificação do padrão RS-485. Os cabos de par trançado para uso neste meio físico costumam possuir uma impedância característica dos mesmos 120 Ohms.

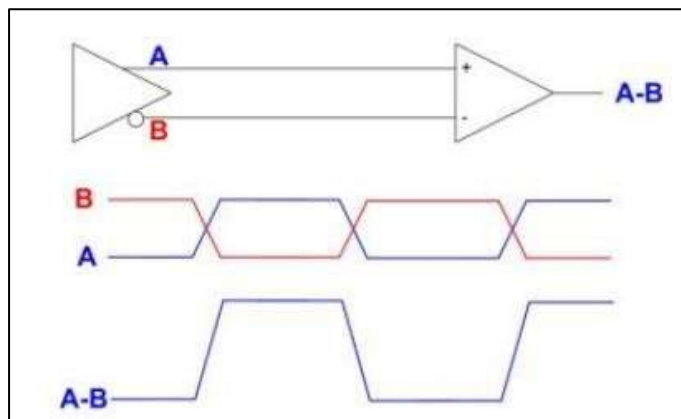
Por ser um barramento diferencial, não há uma linha neutra (ou *zero-volts*) de referência nos pinos de transmissão e recepção. O sinal é transmitido e recebido por meio de um par de condutores com níveis lógicos opostos e a diferença de tensão entre estes dois pares caracteriza o nível alto (ou baixo) do bit. A Fig. 13 ilustra este conceito.

Figura 12: Barramento RS-485 em modo *half-duplex* (a) e em modo *fullduplex* (B).



Fonte: Wang; Liu (2021)

Figura 13: Representação de um sinal diferencial digital



Fonte: LaMeres (2025)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental apresentado neste capítulo descreve a elaboração conceitual e prática do projeto do controle da máquina. Iniciou-se um esboço *top-down* onde a arquitetura geral foi elaborada e a partir do qual os tópicos específicos foram desenvolvidos e integrados. O autor participou ativamente do desenvolvimento de todas as etapas do projeto, particularmente no projeto das placas de circuito impresso (PCBs) e na integração da máquina com softwares de projetos de móveis, bem como contribuiu no desenvolvimento *back-end* do aplicativo de interface pelo desenvolvimento das máquinas de estado e da elaboração e implementação em código dos algoritmos de controle e comunicação com as PCBs. Foi definido como Smart Assist (INMES, 2025) o nome comercial para o sistema de auxílio visual para que o operador pudesse posicionar corretamente o material a ser cortado.

3.1 VISÃO GERAL DO PROJETO

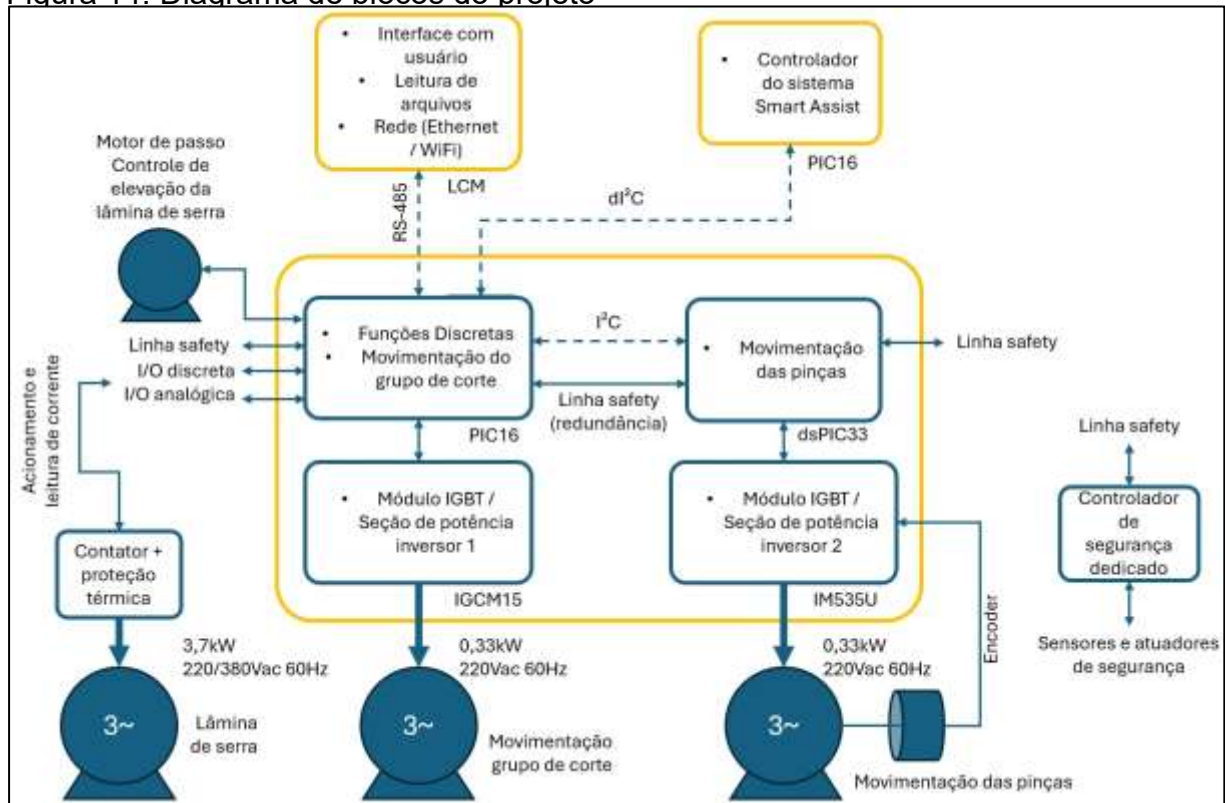
A organização da arquitetura do projeto foi definida com base nos requisitos de comunicação e controle independente das funções da máquina. Considerou-se a topologia utilizada em máquinas similares e adaptando para o conceito do desenvolvimento do *hardware* e *software* dedicados. Foram definidos os seguintes blocos do projeto:



- Leitura de arquivos, interação com usuário e controle da máquina de estados da execução dos planos de corte por meio do módulo LCM;
- Controle das funções discretas da máquina (acionamento do motor trifásico da lâmina de serra, subida e descida do grupo de corte, subida e descida do pressor do material etc.) e lógica de acionamento do módulo IGBT do inversor de frequência do motorreductor que movimenta o carro de serras durante o ciclo de corte realizado por meio de um microcontrolador;
- Lógica de acionamento do módulo IGBT do inversor de frequência, leitura do encoder e realimentação para o controlador proporcional de movimentação das pinças utilizando-se de um controlador digital de sinais (DSC);
- Lógica de acionamento do sistema de indicação visual da posição do material (Smart Assist) com o uso de um microcontrolador;
- Barramento de comunicação I²C dedicado para a comunicação entre o controlador das funções discretas / grupo de corte e o DSC que controla as pinças;
- Barramento de comunicação com interface RS-485 entre o controlador das funções discretas / grupo de corte e o módulo LCM;
- Barramento de comunicação dI²C para a comunicação entre o controlador das funções discretas / grupo de corte e o controlador do Smart Assist;
- O DSC e o controlador das funções discretas / grupo de corte fazem parte da mesma PCB, por questões de redução de custo e padronização;
- Um controlador de segurança dedicado para atingir os requisitos da norma ANBT NBR 19085-2 e NR-12 (controle e parada de emergência) é utilizado em separado da eletrônica da máquina, enviando um único sinal para os controladores que realizam as paradas funcionais e alertam o usuário;
- O acionamento do motor da lâmina de serra é realizado por meio de partida direta por contator, com proteção térmica à parte da eletrônica, e com monitoramento da corrente por um transformador de corrente (TC);
- O controle da elevação da lâmina de serra é realizado por um dispositivo limitador controlado por um motor de passo bipolar.

Um diagrama de blocos do projeto pode ser visualizado na Fig. 14.

Figura 14: Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Do autor (2025)

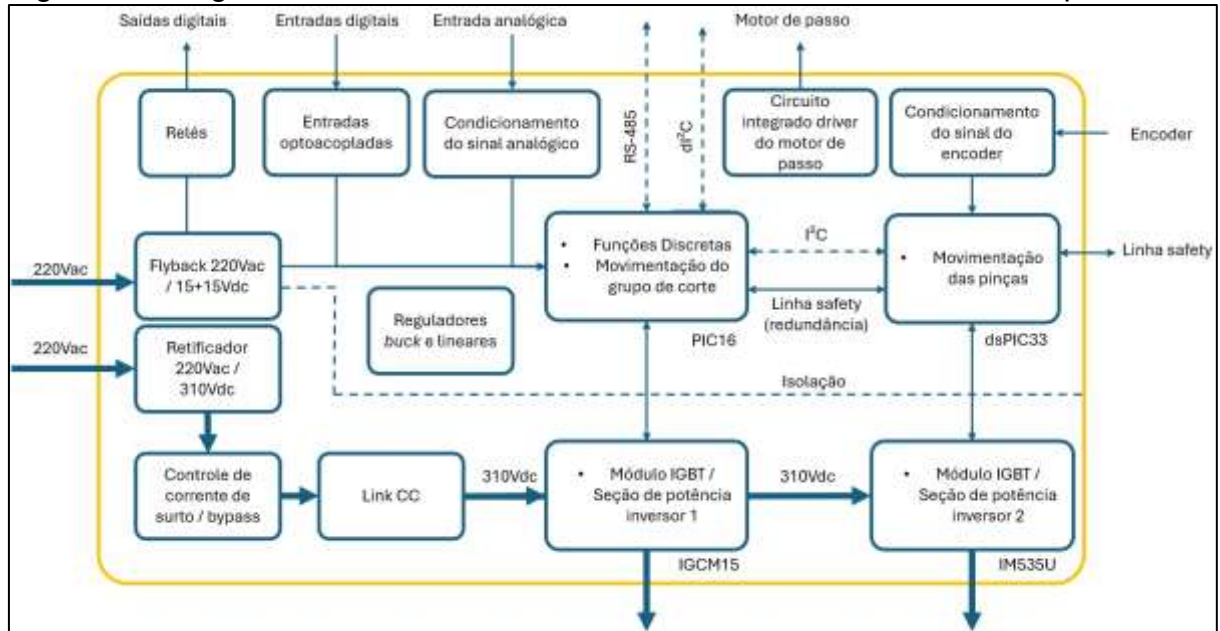
3.2 PCB CONTROLADOR E INVERSORES DE FREQUÊNCIA

A PCB que agrupa o controlador principal da máquina e os dois inversores de frequência é o componente complexo do presente projeto. Além das funções descritas no diagrama geral do projeto, se encontram nesta PCB as fontes de alimentação da seção de potência dos inversores, que operam em 310Vdc (nominal) e as fontes de alimentação da própria PCB, mediante um conversor *flyback* com saída dupla (15Vdc + 15Vdc) e reguladores de tensão chaveados e lineares para os níveis de tensão necessários para os relés (12Vdc) e circuitos integrados (5Vdc e 3,3Vdc).

A seção de controle é totalmente isolada da seção de potência dos inversores de frequência por isoladores digitais de alta frequência. Para evitar o surto de corrente elétrica de carga inicial dos capacitores do *link CC*, foi utilizado um dispositivo NTC dedicado para limitar a corrente elétrica, e um relé para fazer o *bypass* após a carga dos capacitores evitando o superaquecimento do NTC e limitação da corrente de saída.

Um diagrama de blocos da PCB do controlador e inversores de frequência pode ser observado na Fig. 15.

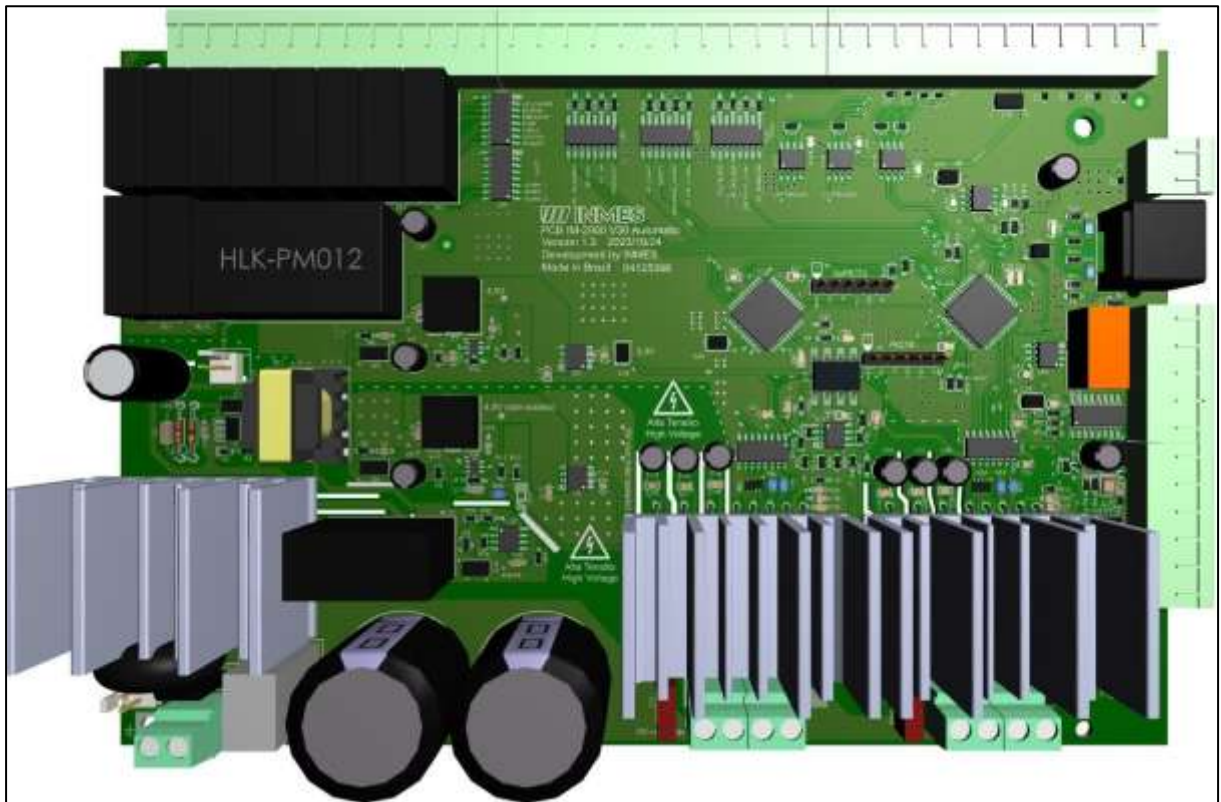
Figura 15: Diagrama de blocos da PCB do controlador e inversores de frequência



Fonte: Do autor (2025)

Foram fabricadas cinco versões de protótipo para atingir a versão de produção (versão 1.0) em dezembro de 2021. Esta PCB teve duas atualizações posteriores ao lançamento do projeto e encontra-se na versão 1.3 (versão disponibilizada em janeiro de 2024). A Fig. 16 ilustra a PCB em sua versão de produção atual.

Figura 16: PCB do Controlador e Inversores de Frequência



Fonte: Do autor (2025)

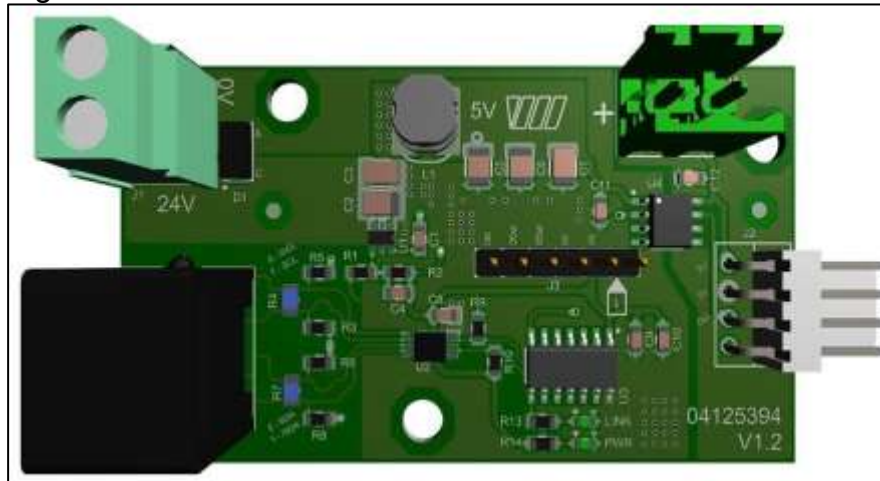
3.3 PCB PARA CONTROLE DO INDICADOR VISUAL DE POSICIONAMENTO DO MATERIAL (SMART ASSIST)

Para realizar o controle do módulo Smart Assist, um microcontrolador de oito bits foi utilizado. A função deste controlador é receber as informações da placa principal via I²C e transformar as informações em uma sequência de *bits* que serão então enviadas para uma fita de LEDs com módulo WS2812B, para acionamento individual dos LEDs de forma a ilustrar a posição adequada do material da máquina, bem como indicar visualmente o estado da máquina (em operação / aguardando / em falha). Esta PCB encontra-se na sua terceira versão de produção (versão 1.2), onde ao longo do tempo foram incorporadas pequenas correções no layout e melhorias de fabricação, bem como foi implementada a isolamento digital dos sinais que são enviados para a fita de LEDs para evitar interferências destrutivas em caso de curto-circuito elétrico externo.

Também faz parte do sistema Smart Assist uma fonte de 5Vdc dedicada para a fita de LEDs, de forma que não haja interferência na alimentação dos demais

sistemas da máquina. A Fig. 17 demonstra a PCB do controlador do sistema Smart Assist em sua versão atual.

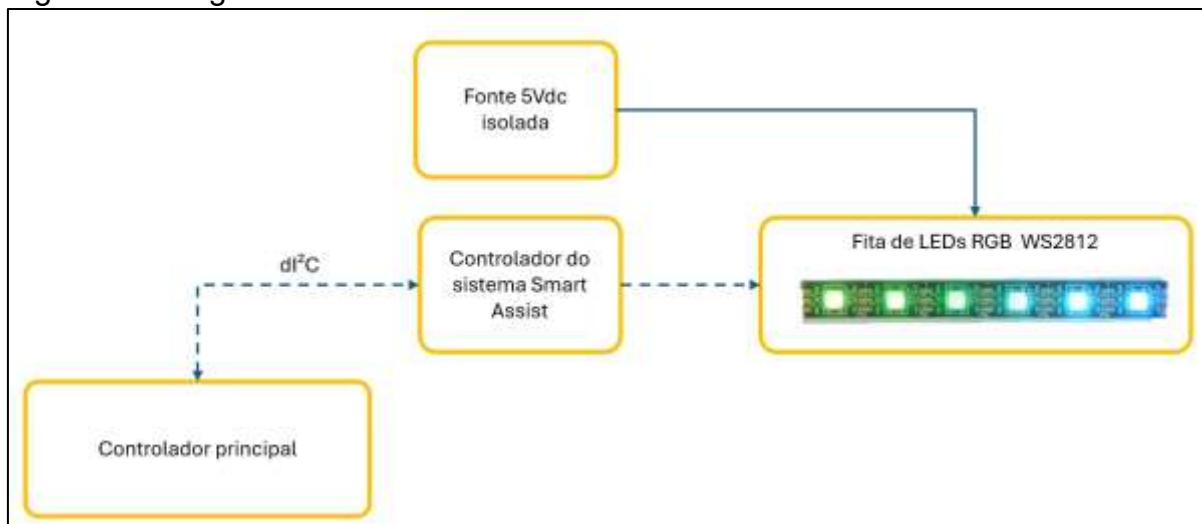
Figura 17: PCB do Controlador do sistema Smart Assist



Fonte: Do autor (2025)

Um diagrama de blocos do sistema Smart Assist, incluindo a fonte de alimentação separada para a fita de LEDs, pode ser visto na Fig. 18.

Figura 18: Diagrama de blocos do sistema Smart Assist



Fonte: Do autor (2025)

Na Fig. 19 é possível visualizar, na máquina, como o sistema Smart Assist auxiliar o operador a identificar a posição e orientação adequadas do material, evitando o desperdício de material por erros de operação.

Figura 19: Sistema Smart Assist



Fonte: INMES Industrial (2025)

3.4 APLICATIVO DE INTERFACE

Para realizar a interface com o usuário e a interpretação e execução dos arquivos de plano de corte, um aplicativo para o sistema operacional Android foi desenvolvido. Como havia necessidade de acesso a dispositivos de *hardware* do LCM, foi utilizada linguagem Java em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Android Studio. A máquina possui a capacidade de imprimir etiquetas com informações das peças quando integrado com *softwares* de projetos de móveis. Para que isso fosse possível, um *driver* de comunicação com as impressoras Argox OS2130 e Zebra ZD-220 foi desenvolvido, já que não há suporte nativo a estas impressoras pelo sistema operacional Android. As seguintes operações são possíveis pelo aplicativo:

- Controle manual das funções de corte e posicionamento, para situações em que o operador não deseja executar um plano de corte completo, e sim apenas operações de corte similares a uma seccionadora manual;

- Criação de planos de corte em casos em que o operador não possui softwares dedicados para projetos de móveis, mas não deseja realizar cortes de forma manual;
- Leitura de arquivos de planos de corte advindos de softwares de projetos de móveis (ver o tópico 4.5 para mais detalhes);
- Interação com *wizards* (funções passo-a-passo) para operações de corte onde a altura da lâmina deve ser controlada;
- Execução de cortes em ângulo, onde a própria máquina calcula o posicionamento resultante de acordo com as medidas angulares fornecidas pelo usuário;
- Identificação do *status* da máquina, falhas, diagnósticos e mensagens ao usuário;
- Controle manual dos dispositivos discretos (cilindros pneumáticos, motores) em caráter de diagnóstico técnico.

A Fig. 20 ilustra a interface principal do aplicativo desenvolvido.

Figura 20: Aplicativo de interface



Fonte: Do autor (2025)

A Fig. 21 ilustra o resultado obtido por meio de uma das funções passo-a-passo da interface, que auxilia o operador a realizar uma operação com altura de lâmina de serra controlada, resultando em uma sequência de cortes que permite ao

operador curvar o material após a operação de acordo com o raio determinado como parâmetro do próprio passo-a-passo, que calcula o distanciamento, altura da lâmina e quantidade de cortes necessários para que a peça possa ser curvada posteriormente.

Figura 21: Peça obtida por meio do sistema de controle de altura da lâmina

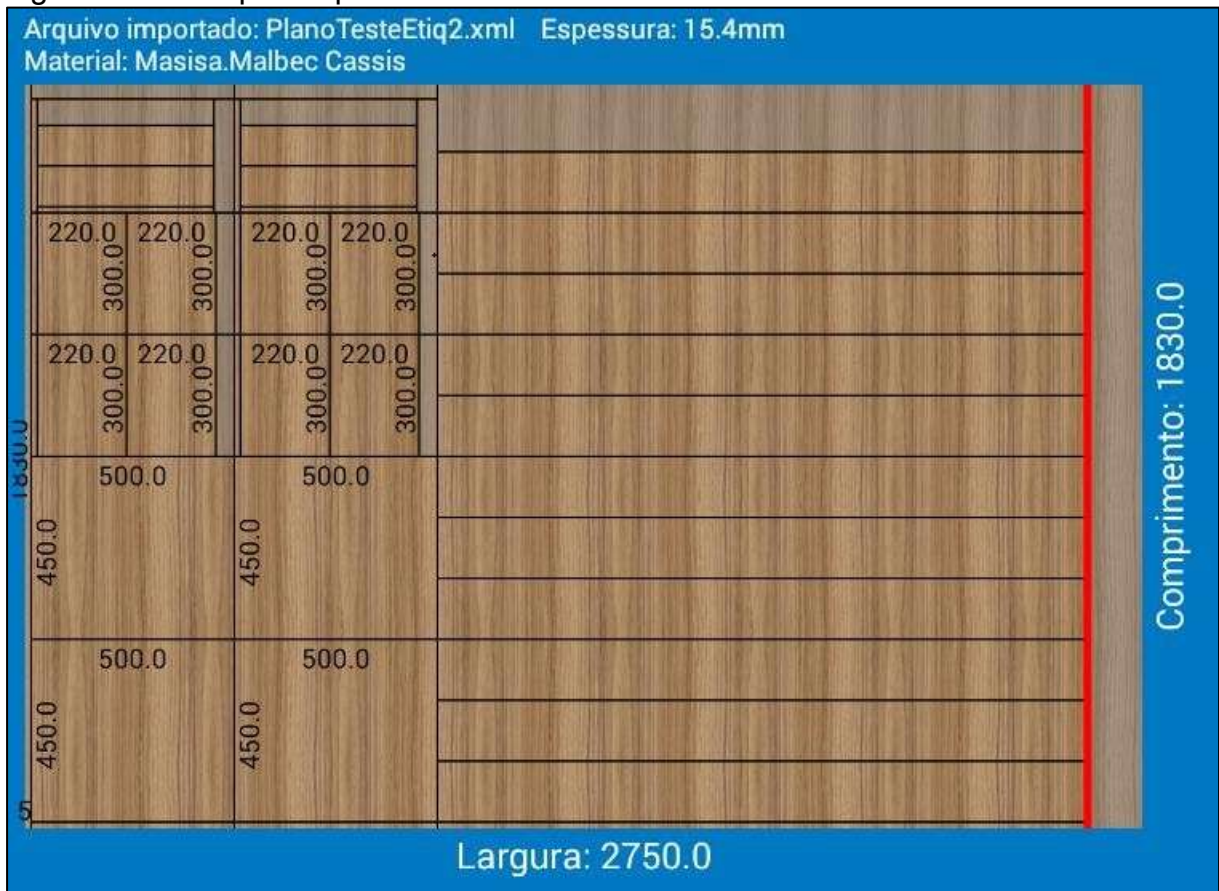


Fonte: INMES Industrial (2025)

3.5 INTEGRAÇÃO COM SOFTWARES DE PROJETOS DE MÓVEIS

Os *softwares* para projetos de móveis disponibilizam *plug-ins* para exportação de arquivos de fabricação para que o processo produtivo seja muito menos dependente da mão-de-obra operacional. A vantagem é ainda mais evidente nos casos em que os marceneiros trabalham com móveis planejados, onde cada projeto é único e a automação do processo elimina erros de interpretação do projeto por parte dos operadores das máquinas. No caso das seccionadoras de chapas, o meio comum para integração entre o *software* e a máquina são arquivos de planos de corte, que informam para a máquina a sequência de cortes, as medidas e a orientação do material, de forma que o operador se dedica a carregar o material na máquina e liberar o processo de corte, que é gerenciado pela máquina de acordo com as instruções do arquivo recebido. Um exemplo de plano de corte pode ser visualizado na Fig. 22.

Figura 22: Exemplo de plano de corte executado na seccionadora



Fonte: Do autor (2025)

Na seccionadora IM-2900 V30 Automatic, o formato padrão de arquivo possui extensão XML (*Extensible Markup Language*). Sendo um arquivo XML um arquivo de texto genérico, para padronizar a interpretação dos arquivos a INMES Industrial disponibiliza um protocolo que identifica todas as *tags* do documento e a forma e sequência que os mesmos devem ser dispostos no arquivo.

Desta forma, a máquina consegue interpretar todas as informações para a correta execução dos planos de corte. Além das informações relacionadas ao corte das peças (medidas e sequência dos cortes), há uma seção dedicada para informações das peças e do projeto / cliente ao qual a peça pertence, que serão impressas mediante uma impressora de etiquetas na própria máquina. A máquina gerencia o momento adequado da impressão para que o operador cole a etiqueta na

peça que acabou de ser cortada. Um fluxograma deste processo pode ser visualizado na Fig. 23.

Figura 23: Fluxo de integração da máquina com softwares de projetos de móveis



Fonte: Do autor (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

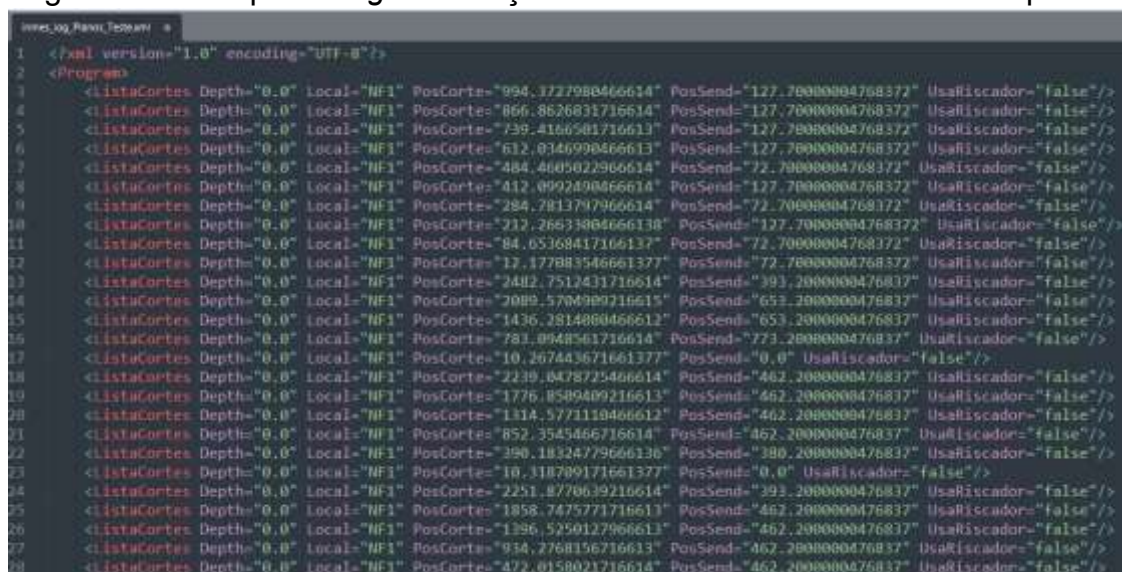
De forma a validar o desempenho do equipamento, foi construído um protótipo, desenvolvido com a premissa de que, ao final dos ciclos de iteração, fosse idêntico à versão comercial do produto. Após a validação dos testes mecânicos, do qual o autor foi coadjuvante, foram realizados sob responsabilidade direta do autor deste projeto os testes funcionais e comparativos para homologar as principais características exigidas pelo projeto:

- Precisão de posicionamento de $\pm 0,2$ mm em cortes retos;
- Velocidade de retorno das pinças de até 25 m/min (a depender da carga);

Para identificar os possíveis efeitos contribuintes para a precisão da máquina, foi desenvolvido um gerador de *log* interno no aplicativo da máquina

registrou a posição lida pelo encoder antes de iniciar cada corte. Desta forma, caso o valor registrado pelo encoder estivesse dentro da tolerância estipulada, seria possível atribuir eventuais divergências de medida à construção mecânica da máquina. Um exemplo de arquivo de *log* gerado pode ser visualizado na Fig. 24. A interpretação numérica de parte dos resultados obtidos neste mesmo *log* pode ser visualizada na tabela 1, junto com a medida real obtida na peça. Este processo foi repetido inúmeras vezes durante a prototipagem, validando o desempenho neste critério.

Figura 24: Exemplo de *log* de medições realizadas durante os testes de precisão



```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <Programa>
3   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="994.3727980466614" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
4   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="866.8626831716614" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
5   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="739.4166501716613" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
6   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="612.0346990466613" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
7   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="484.4605022966614" PosSend="72.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
8   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="412.0992490466614" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
9   <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="284.2813797966614" PosSend="72.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
10  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="212.26633084666138" PosSend="127.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
11  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="84.05368417166137" PosSend="72.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
12  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="17.177883546661377" PosSend="72.70000004768372" UsaRiscador="false"/>
13  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="2482.7512431716614" PosSend="393.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
14  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="2089.5700989216615" PosSend="653.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
15  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="1436.2814880466612" PosSend="653.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
16  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="781.0948561716614" PosSend="773.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
17  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="10.267443671661377" PosSend="0.0" UsaRiscador="false"/>
18  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="2239.0478725466614" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
19  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="1776.8509409216613" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
20  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="1314.5721110466612" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
21  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="852.3545466716614" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
22  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="390.18324779666136" PosSend="380.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
23  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="10.110709171661377" PosSend="0.0" UsaRiscador="false"/>
24  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="2251.8770639216614" PosSend="393.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
25  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="1858.7475771716613" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
26  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="1396.5250127966613" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
27  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="934.2768156716613" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>
28  <listaCortes Depth="0.0" Local="NF1" PosCorte="472.0158021716614" PosSend="462.2000000476837" UsaRiscador="false"/>

```

Fonte: Do autor (2025)

Tabela 1: Avaliação da precisão do grupo de pinças

Posição desejada (mm)	Posição lida (mm)	Erro (mm)	Medição da peça (mm)
2128,61	2128,67	0,07	Posição inicial
1422,47	1422,43	-0,05	703,05
716,23	716,33	0,11	702,89
10,13	10,22	0,09	702,91

Fonte: Do autor (2025)

Para a medição da velocidade, foi utilizada uma funcionalidade do módulo de leitura de *encoder* do microcontrolador utilizado no projeto, que informa a taxa de pulsos por segundo do *encoder*. Sendo conhecida a razão de distância (em milímetros) percorrida a cada volta, uma conversão algébrica simples foi utilizada para

demonstrar na interface da própria máquina a velocidade do sistema de pinças durante o retorno das peças, onde, sem carga, era esperada uma velocidade de 25 m/min. Os testes realizados no protótipo demonstraram atendimento satisfatório quanto à velocidade requerida, conforme pode-se observar na tabela 2.

Tabela 2: Avaliação da velocidade de retorno do grupo de pinças

Velocidade desejada (m/min)	Velocidade lida (m/min)	Erro (m/min)
25	24,9	0,1
20	19,9	0,1
15	14,7	0,3
10	9,7	0,3
5	4,4	0,6

Fonte: Do autor (2025)

Como o algoritmo escalar desenvolvido para o sistema de movimentação de pinças possui um *boost* de corrente elevado em baixas frequências (de até cinco vezes a potência nominal do motorreductor por alguns segundos), durante os ciclos de teste da máquina foram realizadas medições de temperatura no sistema. Os registros indicaram que tanto o motorreductor quanto o módulo IGBT do inversor de frequência operaram em condições satisfatórias. Na Fig. 25 é possível observar as medições de temperatura efetuadas no motorreductor (a) após um ciclo de três horas em carga nominal, admitido como suficiente para a estabilização térmica do equipamento, e no dissipador do circuito de potência do inversor de frequência (b) do protótipo em um teste de carga máxima (cinco vezes a potência nominal por um período de três horas).

Figura 25: Medição de temperatura no motorreductor (a) e no dissipador do inversor de frequência (b)



(a)

(b)

Fonte: Do autor (2025)

Por fim, para validar funcionalmente a diferença prática na execução de planos de corte quando comparado com uma seccionadora de chapas manual e semiautomática, os mesmos planos foram executados pelo mesmo operador em máquinas distintas, obtendo os resultados que podem ser visualizados na tabela 3. Os resultados comprovam a eficiência superior do projeto desenvolvido quando comparado com os demais modelos.

Tabela 3: Medições de tempo de execução dos planos de corte para diferentes modelos de máquinas

	Tempo de execução		
	Seccionadora manual	Seccionadora semi-automática	Seccionadora INMES IM-2900 V30 Automatic
Plano de corte 1	00h32min	00h25min	00h14min
Plano de corte 2	00h44min	00h34min	00h20min
Plano de corte 3	00h26min	00h20min	00h12min
Plano de corte 4	00h28min	00h19min	00h15min

Fonte: Do autor (2025)

5 CONCLUSÃO



O desenvolvimento da nova seccionadora de chapas de MDF - batizada de IM-2900 V30 Automatic - foi integralmente concluído, resultando no lançamento bem-sucedido do produto no ano de 2022. Os resultados alcançados demonstram que a estratégia de desenvolvimento interno supriu os requisitos de precisão e velocidade de posicionamento exigidos, características tipicamente associadas a soluções mais caras baseadas em motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) e servodrivres comerciais. Os módulos eletrônicos de acionamento e controle entregaram a *performance* necessária para a alta produtividade do equipamento. A implementação do Smart Assist e de funcionalidades como a regulação eletrônica de altura de corte e a capacidade de cortes em ângulo foram bem recebidas, provendo diferenciais operacionais importantes para os usuários de micro, pequeno e médio porte. Desde o lançamento, a INMES Industrial comercializou mais de 200 máquinas deste modelo.

Este volume de vendas substancial e rápido no nicho B2B da empresa é uma métrica de sucesso que transcende a validação técnica, comprovando a aceitação do mercado e a eficácia da proposta de valor. Este sucesso é reflexo direto da inovação tecnológica aliada ao custo competitivo proporcionado pelo desenvolvimento mecatrônico interno. Ao customizar o *hardware* e o *software*, a empresa conseguiu otimizar o custo do produto de forma significativa, tornando-o acessível para o público-alvo sem comprometer a precisão e a funcionalidade. Essa diferenciação de preço e a inclusão de recursos estabeleceram um diferencial importante para a INMES Industrial em um mercado tipicamente dominado por soluções mais onerosas. A execução deste projeto, desde o conceito até a validação final, foi um exercício prático na aplicação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Mecatrônica. A interdisciplinaridade do projeto, que exigiu domínio em eletrônica de potência, controle digital, desenvolvimento de *firmware* e *software* e mecânica de precisão, demonstrou o valor integral da formação mecatrônica. A capacidade de integrar sistemas complexos, gerenciando *trade-offs* entre custo e performance, foi fundamental para o bom desempenho e sucesso comercial do projeto, evidenciado pelo alto volume de vendas e que atesta a relevância do curso de Engenharia Mecatrônica na formação de profissionais aptos a desenvolver soluções tecnológicas competitivas e inovadoras para a indústria nacional.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ANBR NBR ISO 19085-2.** Parte 2: Máquinas de serra circular com mesa horizontal (seccionadoras horizontais).

CONRAD, James M. **Embedded Systems: Serial Communications.** Electrical and Computer Engineering Department, University of North Carolina at Charlotte. Disponível em: <https://webpages.charlotte.edu/~jmconrad/ECGR4101-201208/notes/UNCC-EmbeddedSystems-Serial_Communications.pdf> Acesso em 11 de outubro de 2025.

INMES Industrial. **Seccionadora IM-2900 V30 Automatic.** Disponível em: <<https://inmes.com.br/produtos/seccionadora-im-2900-v30-automatic/>> Acesso em 06 de setembro de 2025.

LAMERES, Brock J. **Digital System Design: Lecture Notes.** Disponível em: <https://www.montana.edu/blameres/courses/eele461/lecture_notes/eele461_module_06.pdf> Acesso em 11 de outubro de 2025.

MICROCHIP TECHNOLOGY Inc. **Basic Operation of UART with Protocol Support.** Application Note TB3208. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ApplicationNotes/ApplicationNotes/TB3208-Basic-Operation-of-UART-with-Protocol-Support90003208A.pdf>> Acesso em 06 de setembro de 2025.

NORD DRIVESYSTEMS. **Motores BR7000.** Disponível em: <https://www.nord.com/media/documents/bw/m7000_6000621_br_1-2.pdf> Acesso em 11 de outubro de 2025.

NXP SEMICONDUCTORS. **3-phase Sensorless Single-Shunt Current-Sensing PMSM Motor Control Kit with MagniV MC9S12ZVM.** Application Note 5327. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN5327.pdf>> Acesso em 02 de outubro de 2021.

NXP SEMICONDUCTORS. **I2C-bus specification and user manual.** Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>> Acesso em 10 de outubro de 2025.

NXP SEMICONDUCTORS. **PCA 9615: 2-channel multipoint Fast-mode Plus differential I2C-bus buffer with hot-swap logic.** Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9615.pdf>> Acesso em 10 de outubro de 2025.

OZGENEL, Mehmet Cihat; BAL, Gungor; UYGUN, Durmus. **Low-Resolution and**



Low-Cost Position Sensor Implementation for Permanent Magnet Synchronous Motor Driver. 2016. Lituânia: ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, vol 22.

Disponível

em:

<<https://pdfs.semanticscholar.org/85c5/29e0bf0b30caf6bbce3f9664f09f0784b169.pdf>> Acesso em 02 de outubro de 2021.

ROSS, Dave; THEYS, John. **Using the dsPIC30F for Vector Control of an ACIM.** 2004. Microchip Technology Inc. Application Note 908. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/jp/AppNotes/ACIM%20Vector%20Control%200908a.pdf>> Acesso em 02 de outubro de 2021.

STULRAJTER, Marek; HRABOVCOVA, Valéria; FRANKO, Marek. **Permanent Magnet Synchronous Motor Control Theory.** Journal of Electrical Engineering, 58(2):79–84, 2007. Disponível em: <http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/2_10703.pdf> Acesso em 03 de outubro de 2021.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley / Stephen D. Umans.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708p. ISBN 9788580553734.