

# Aplicação de came eletrônico para sincronizar os movimentos de um transportador de cabo de madeira.

1<sup>st</sup> Vinicius Galli Ferronato 2<sup>nd</sup> André Pacheco Meurer

TCC 2 - Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha  
Farroupilha, Brasil

**Resumo**—Este trabalho descreve o desenvolvimento e a aplicação de um came eletrônico para sincronizar os movimentos de um braço mecânico, utilizado no transporte de cabos de madeira em um processo industrial. O braço mecânico possui dois graus de liberdade, linear e rotativo, para transportar os cabos de um ponto a outro. Inicialmente, foram simulados os movimentos individuais dos eixos, determinando a duração do ciclo de movimentação e como proposta de melhoria, foi implementado o sistema de came eletrônico. Os resultados demonstraram que a aplicação da melhoria foi bem-sucedida, aumentando a produção em, aproximadamente, 28 %.

**Palavras-chave:** Servomotor, sincronismo, came eletrônico.

## I. INTRODUÇÃO

Durante a revolução industrial, a máquina de vapor de James Watt, patenteada em 1769, transformou profundamente a forma de conversão da energia em movimento útil, tornando-se uma das principais forças motrizes daquela época [1]. Muitas máquinas se baseavam em mecanismos puramente mecânicos e os engenheiros enfrentavam desafios significativos na tentativa de controlá-las. A engenharia do século XVIII encontrou soluções inovadoras e eficientes para resolver problemas que atualmente são facilmente resolvidos empregando sistemas eletrônicos. Alguns dos desafios incluíam: precisão, redução de desgastes e adaptações.

O controle de velocidade constante ou o controle exato da posição de um mecanismo eram aplicações difíceis de serem realizadas com componentes puramente mecânicos. O regulador centrífugo de Watt foi um grande avanço nesse sentido, mas ainda era limitado em sua capacidade de ajuste fino. Mecanismos como engrenagens e polias sofriam desgaste ao longo do tempo e perdiam eficiência. O ajuste constante e a manutenção eram frequentes e cada sistema mecânico precisava ser projetado sob medida para uma aplicação específica, tornando a adaptação complicada e demorada [2].

Atualmente, o maquinário industrial é cada vez mais exigido para alcançar maiores velocidades nas etapas de trabalho, a fim de reduzir o tempo de produção. Dentro desse contexto, o servoacionamento atua como uma tecnologia importante, oferecendo controle de posição, velocidade e torque em uma ampla gama de aplicações: robôs industriais, máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), máquinas de corte, laminadores, impressão [3]. A capacidade dos servomotores de responder rapidamente a mudanças e executar movimentos

complexos com alta precisão os torna indispensáveis para otimizar os mais variados processos industriais.

De acordo com [4], os cames são utilizados quando é necessário transmitir o movimento de um elemento mecânico líder para um elemento mecânico seguidor. Em uma abordagem mecânica, a peça mecânica líder gira constantemente em torno de um eixo, e seu contorno movimentado o seguidor, gerando movimentos lineares (avanços e recuos).

Nos cames mecânicos, o contato entre a superfície do came e o seguidor gera atrito, calor e desgaste. Além disso, existem limitações para o aumento da velocidade de giro devido às restrições mecânicas do sistema. Quando é necessário alterar o perfil de movimento (para diminuir ou aumentar o avanço do seguidor), o came requer usinagem ou a substituição física por outro [5]. A Fig. 1 ilustra um came mecânico e o seguidor.

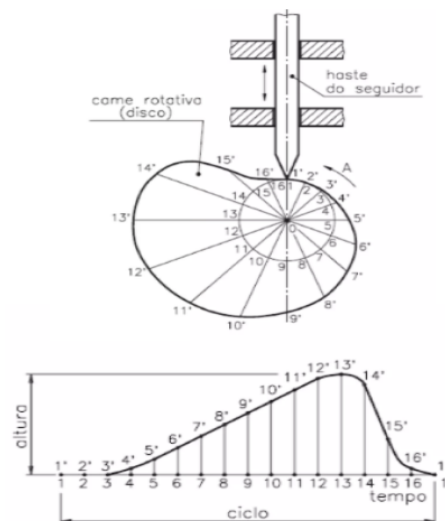


Figura 1. Exemplo de came mecânico e o perfil de movimento. Fonte: [4]

Os cames eletrônicos podem ser definidos como uma técnica de sincronização para aplicações que exigem sincronismo com relação variável ao longo das movimentações dos eixos [6]. As vantagens são inúmeras, incluindo a eliminação de peças mecânicas que exigem ajustes físicos, muitas vezes trabalhosos e improvisados, para obter melhorias ou mudanças. Outro

motivo é que as mudanças serão feitas a partir de valores ou parâmetros de programa, sem a necessidade de esforço braçal. Ao empregar servomotores no conceito líder/seguidor, é possível alcançar velocidades maiores e reduzir os problemas de atrito decorrentes de contato físico. Ao observar o gráfico, percebe-se que o aumento da numeração no eixo horizontal corresponde a diferentes pontos no eixo vertical, que juntos formam uma curva não linear. Na imagem acima do gráfico, existe o elemento mecânico líder (o came rotativo disco) e o elemento mecânico seguidor (a haste). No disco, os números de 1 a 16 representam os mesmos números de 1 a 16 na curva desenhada abaixo. Essa curva representa a movimentação do eixo seguidor no contorno do eixo líder, evidenciando o comportamento em curvas e a dinâmica de movimentação pelo formato do came.

O came eletrônico é uma evolução do came mecânico, realizando as mesmas funções, mas com uma abordagem eletrônica. Em relação ao came mecânico da Fig. 1, a abordagem eletrônica significa trocar o came rotativo disco por um software que armazena os pontos de 1 a 16 com valores de posição, formando segmentos de uma curva. Com esses pontos, é possível ilustrá-los em um plano bidimensional, onde o eixo horizontal é o eixo líder e o eixo vertical é o eixo seguidor.

#### A. Objetivo Geral

O objetivo geral da melhoria apresentada nessa proposta é reduzir o tempo de ciclo do transportador de cabos de madeira com a movimentação conjunta/sincronizada dos eixos rotativo e linear.

- 1) Desenvolver o came eletrônico de cada servomotor do transportador de cabos de madeira;
- 2) Realizar a simulação do ciclo de movimentação individual e coordenada dos eixos do transportador;
- 3) Comparar a duração de um ciclo de movimentação do braço mecânico para cada tipo de movimentação;
- 4) Validar a movimentação do sistema;
- 5) Analisar por meio gráfico o traçado dos movimentos e extrair o tempo de duração de cada ciclo de movimentação;
- 6) Comparar se a duração do ciclo de movimentação conjunta foi realmente menor que o ciclo individual, conforme indicado nas simulações.

O trabalho foi dividido em 10 seções. Na seção I, a introdução do trabalho é apresentada, na seção II, a revisão bibliográfica dos conteúdos abordados; a seção III trata da fundamentação teórica; a seção IV descreve o transportador de cabos de madeira; as seções V e VI descrevem os tipos de movimentações idealizadas e testadas, a seção VII aborda a comparação dos movimentos (das seções V e VI). Por fim, a seção VIII é a conclusão e as referências do trabalho.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em [6], o autor desenvolve uma interface gráfica para parametrizar e controlar um came eletrônico, utilizando motores de passo devido ao seu controle em malha aberta. Para

desenvolver a interface, ele utilizou o *MATLAB* como ambiente de programação e o sistema gráfico de interface, denominado GUI (*Graphical User Interface*), que oferece gráficos e menus prontos (como botões e sliders) para conectar o usuário ao sistema. Na interface gráfica, o autor a dividiu em duas partes: uma de parametrização do motor de passo e outra de monitoração dos movimentos realizados a partir do came eletrônico. No controle do motor de passo, é possível parametrizar o motor com as informações básicas e necessárias para as movimentações, incluindo os dados do came eletrônico, os parâmetros dos gráficos para plotagem e os parâmetros da transmissão mecânica, responsável por converter o giro do eixo em movimentos lineares.

Em [7], é apresentada a aplicação de um came eletrônico em uma máquina de embalagem. Nesses processos de embalagem, as máquinas embaladoras precisam sincronizar a velocidade de entrada do filme com a velocidade de corte. Para isso, o sistema requer uma relação de sincronismo variável para ajustar o comprimento, pois haverá momentos sincronizados e não sincronizados, dependendo da posição do produto. Sabendo disso, o trabalho focou no desenvolvimento de uma coordenação de todas as etapas da máquina, sendo elas: velocidade de abastecimento, transporte, filmagem, selagem e corte. Como a ideia do projeto era simplificar a estrutura mecânica, foi evitada a utilização de comes mecânicos e, dessa forma, optou-se por comes eletrônicos para conseguir realizar relações variáveis de sincronismo entre os eixos. O servomotor responsável por controlar a velocidade da esteira que transporta o produto a ser embalado foi designado como líder, e os demais como seguidores.

Em [8] o trabalho tem por objetivo desenvolver um came eletrônico para controlar um servomotor com CLP (Controlador Lógico Programável) da *Keyence* e, além disso, demonstrar as vantagens em utilizar a abordagem eletrônica do came em vez da abordagem mecânica. Para isso, o autor, além de desenvolver um algoritmo para criar o came eletrônico no CLP, utiliza a interpolação dos pontos para que sejam fornecidas ao servomotor seguidor as posições durante a movimentação de um eixo líder virtual, ou seja, o eixo seguidor acompanhará o eixo líder por meio de uma curva de função não linear. O autor desenvolveu uma função polinomial de quinta ordem, considerando-a adequada para comes de alta velocidade, com o objetivo de observar suas curvas de velocidade e aceleração, alcançando estabilidade de operação e prevenindo falhas. Por fim, o autor destaca algumas vantagens do came eletrônico: não sofre com as forças de deformação e impacto como o came mecânico, sua resposta é mais rápida e se adapta a dispositivos de transmissão de movimento em alta velocidade.

No trabalho de Quang-Vinh Tran [9], o autor propõe a aplicação do came eletrônico com a utilização de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para controle de velocidade de um servomotor de corrente alternada. Para desenvolver o controle, ele primeiro definiu a função do polinômio que descreve o ECAM (came eletrônico) para, posteriormente, aplicar em um controlador e interpolar os pontos definidos. Em seguida, definiu os pontos de posição do

eixo líder e do eixo seguidor e, com o auxílio de um software de simulação, criou um programa que aplica a interpolação linear e circular. Ao final, apresentou as diferenças do perfil de curva do ECAM entre ambas. O autor concluiu que, ao utilizar a interpolação circular, não ocorriam erros de posição, diferentemente da interpolação linear. Isso se deve às abruptas variações de velocidade causadas pela interpolação linear, que não apresentam variações na mudança do perfil da curva do ECAM. Conseqüentemente, com a mudança gradual da velocidade, o erro também diminui.

### III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Servoacionamentos, ou servomecanismos, são sistemas eletromecânicos responsáveis pelo controle do posicionamento de um servomotor. A Fig. 2 ilustra os componentes que compõem o servoacionamento: 1) CLP, 2) Servoconversor, 3) Servomotor.

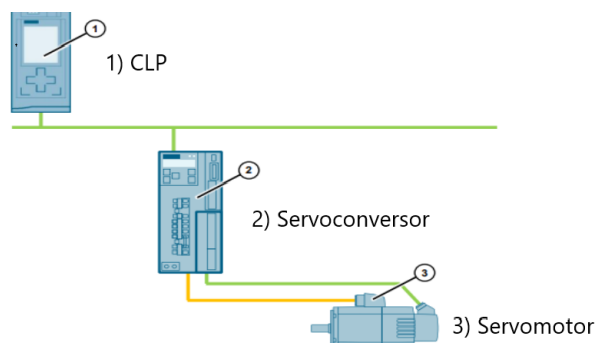


Figura 2. Constituição de um servoacionamento. Fonte: [10]

#### A. Controladores Lógicos Programáveis (CLP)

Controladores Lógicos Programáveis são dispositivos eletroeletrônicos programáveis para executar funções de controle [11]. Diferenciam-se dos computadores domésticos por sua robustez, adequada para ambientes industriais. A Fig. 3 ilustra a arquitetura de um CLP.

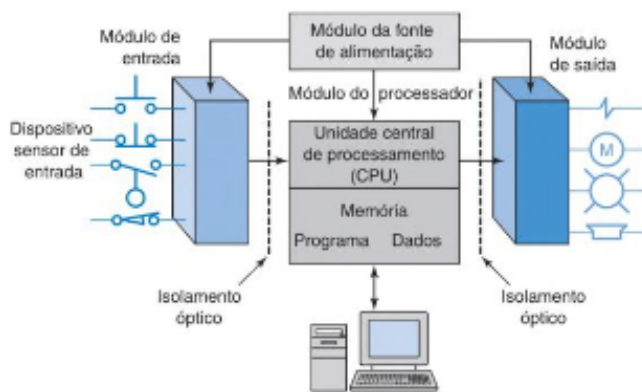


Figura 3. Arquitetura de um CLP. Fonte: [11]

Os módulos de entrada recebem os sinais externos do ambiente (originados de botões, sensores e relés de interface)

para serem utilizados na lógica do CLP. Normalmente, os sinais são transmitidos por fios elétricos e conectados no módulo de entrada em uma borneira de parafusos ou sistemas *plug-in*. Dentro do módulo, existem pequenos circuitos eletrônicos de proteção contra eventuais curtos-circuitos ou distúrbios elétricos provenientes dos dispositivos, protegendo os circuitos eletrônicos principais da CPU (Unidade Central de Processamento) [11].

A CPU, ou processador, é o cérebro do CLP e consiste em um microprocessador para implementar lógicas e os controles dos módulos de entradas e saídas. Para a implementação das lógicas, é necessária memória para armazenar resultados de operações lógicas e de parâmetros de usuário, guardando-os em endereços de memória. A fonte de alimentação alimenta o CLP e seus módulos.

Os módulos de saída do CLP enviam sinais para comandar dispositivos externos, por exemplo: o acionamento de uma contatora para um motor, o acionamento de um relé para uma lâmpada, sinaleiras, ou uma saída analógica representando a variação numérica de uma grandeza física. Normalmente, as saídas possuem um isolador óptico composto por um fototransistor. Quando o processador comanda a energização da saída, um LED (*Light Emitting Diode* ou Diodo Emissor de Luz) emite luz para o fototransistor do isolador óptico. Este, por sua vez, conduz e permite o acionamento de uma chave semicondutora (transistores, triacs), que fornece energia para a borneira da saída. Um fio elétrico conectado transmite essa energia do CLP ao dispositivo [11].

#### B. Servoconversores

Os servoconversores, ou drives, são equipamentos constituídos de um microcontrolador e circuitos eletrônicos responsáveis por transformar, filtrar e chavear a energia elétrica para o servomotor [12]. O microcontrolador recebe os parâmetros e leituras de entrada, processa-os e aplica-os na malha de controle, cuja função é controlar o giro do eixo do servomotor. A Fig.4 ilustra o circuito eletrônico presente nos servoconversores.

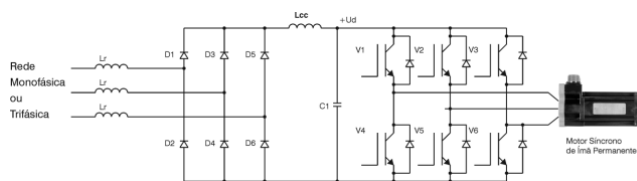


Figura 4. Circuito interno de um servoconversor. Fonte: [12]

Na parte esquerda da imagem, a rede elétrica alimenta uma ponte retificadora (representada por D1 a D6) com o objetivo de transformar a corrente alternada em corrente contínua. Após a conversão, a corrente passa por um processo de filtragem realizado por um filtro LC. O banco de capacitores alimenta o inversor, formado por chaves semicondutoras e diodos antiparalelo (representados por V1 a V6). A ponte inversora será responsável por modular a frequência e amplitude, necessárias para conseguir controlar com precisão a

velocidade do servomotor [12]. Normalmente, a comunicação entre servoconversores e CLP é feita por redes industriais, dos mais variados tipos: Serial (RS-485), DeviceNet (CanOpen), Ethernet (EthernetIP, EtherCat, PROFINET).

### C. Servomotores

Os servomotores se enquadram em motores especiais por exercerem diferentes funções nas mais variadas aplicações, entre elas: sistemas de posicionamento, robótica industrial, linhas de transporte, máquinas-ferramentas a comando manual e sistemas flexíveis de manufatura. Os primeiros servomotores a serem criados foram os de corrente contínua com escovas, apresentando-se como uma boa solução em precisão e controle. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, desenvolveram-se os servomotores de corrente alternada, empregando o conceito de ímãs permanentes, o que resultou em menor volume para uma mesma entrega de potência, menor manutenção e ganhos em precisão [13]. Os benefícios do uso de ímãs permanentes incluem baixa inércia (devido à ausência de rotor em gaiola), maior eficiência (pela ausência de perda de Joule no rotor e correntes de magnetização), o que demandava servoconversores de menor tamanho e peso [13].

Para desempenhar suas funções nas aplicações citadas, os servomotores utilizam sensores de deslocamento para localizar a posição do eixo do motor, monitorar a variação de deslocamento (velocidade) e controlar a variação da velocidade (aceleração). Para isso, o servomotor utiliza encoders ou resolvers. A diferença entre eles é que o encoder utiliza sinais elétricos discretos, enquanto o resolver utiliza sinais elétricos analógicos. A Fig. 5 ilustra os encoders e a Fig. 6 o resolver.

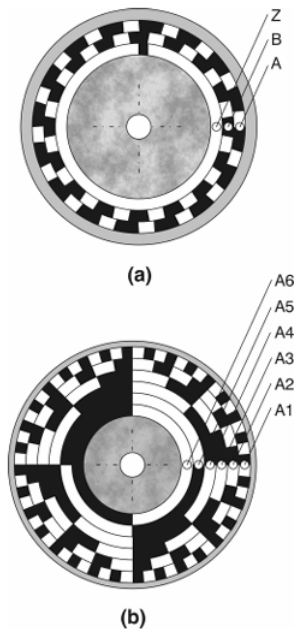


Figura 5. Ilustração do encoder incremental (a) e encoder absoluto (b). Fonte: [12]

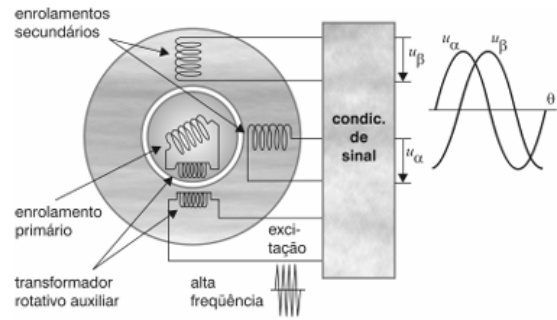


Figura 6. Ilustração de um resolver. Fonte: [12]

### D. Encoders e Resolvers

Os encoders incrementais possuem construção mais simples, o que se reflete no baixo custo associado. O monitoramento do deslocamento de um eixo é realizado pela geração de dois pontos (A e B), cada um localizado em uma circunferência menor que a outra. Um terceiro ponto (Z) serve para identificar o marco zero ou o fim de uma volta. Essas informações são coletadas por sensores ópticos no momento da variação da posição do eixo, onde o estado 0 (desacionado) ou 1 (acionado) permite a contagem de pulsos, e assim, a determinação da posição do eixo. Quando desligados, essa contagem é perdida e é necessário passar pelo marco zero (Z) novamente para localizar o eixo [12].

Os encoders absolutos possuem construção mais complexa e contam com sensores magnéticos ou ópticos para detectar a mudança de posição do eixo. Diferentemente do incremental, o absoluto possui um código para cada divisão de posição (A1, A2, A3, A4, A5, A6). Cada código binário informa ao servoconversor a posição do eixo e, além disso, a informação não é perdida na ausência de energia [12].

O resolver é formado por enrolamento primário e dois enrolamentos secundários em quadratura. Os enrolamentos operam com frequências de 5 a 10 kHz e, para monitorar as posições, as tensões induzidas no secundário pelo primário variam em função da mudança de posição. Um circuito condicionador interpreta as tensões induzidas no enrolamento secundário, fornecendo tensões proporcionais à posição [12].

### E. Sincronismo de eixos

O sincronismo é necessário quando os eixos devem se mover simultaneamente e a relação de movimentação entre eles é importante. Uma das técnicas ou métodos mais conhecidos na área de automação industrial para sincronismo de eixos é o *master/slave* ou líder/seguidor, do tipo *gearing* [3]. O eixo seguidor (*slave*) acompanhará os movimentos do eixo líder (*master*) por meio de uma relação linear do tipo (1:n) ou (n:1). Isso significa que, para cada uma volta do eixo líder, o eixo seguidor se move 'n' voltas (onde 'n' é um número inteiro maior que 1), ou para 'n' voltas do eixo líder, o eixo seguidor se move 1 volta, conforme observado na Fig. 8. Pode-se ter também relações de sincronismo não lineares, do tipo *camming*, em que a representação não se dá mais por uma

proporção (1:2, 2:1, 1:4) e sim por uma função, a qual pode, ou não, ser linear. Isso permite a reprodução de aplicações com movimentos projetados especificamente para a necessidade, eliminando a necessidade de utilizar um sincronismo do tipo *gearing* e evitando a troca frequente de sincronismo entre os movimentos.

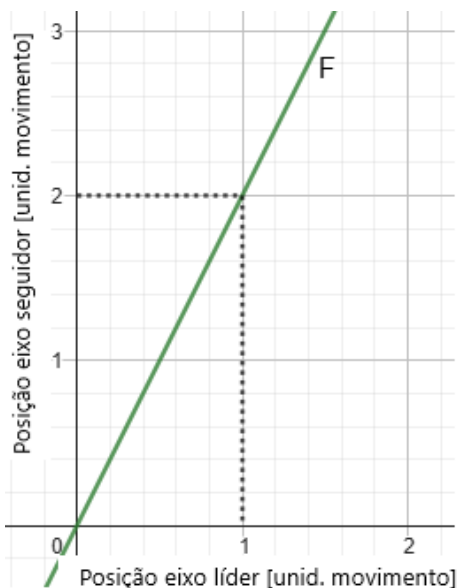


Figura 7. Exemplo de relação de sincronismo do tipo *gearing*. Fonte: Própria do autor.

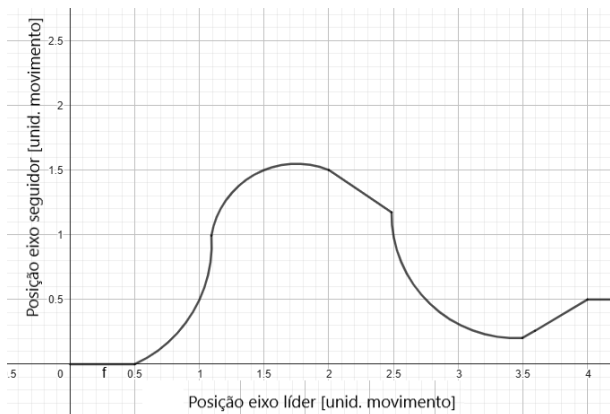


Figura 8. Exemplo de relação de sincronismo do tipo *camming*. Fonte: Própria do autor.

O eixo horizontal das Fig. 7 e Fig. 8 representa a unidade de movimentação medida pelo eixo líder e o eixo vertical representa a unidade de movimentação do eixo seguidor. Observa-se que na Fig.7, no *gearing*, a cada 1 unidade do eixo horizontal corresponde a 2 do eixo vertical, resultando em uma relação de (1:2). Na Fig. 8, no *camming*, não é possível estabelecer uma relação proporcional similar ao caso anterior.

## F. TIA PORTAL

O *TIA PORTAL* é um software desenvolvido pela empresa Siemens e é utilizado para desenvolvimento de sistemas de

automação industrial. A sigla *TIA (Totally Integrated Automation)* significa Automação Totalmente Integrada, uma plataforma para programar e estruturar todo um sistema de automação industrial em um único ambiente. A Fig. 9 ilustra um CLP conectado a servoconversores, podendo também ter IHM (Interface Homem-Máquina), inversores de frequência e fusíveis eletrônicos.

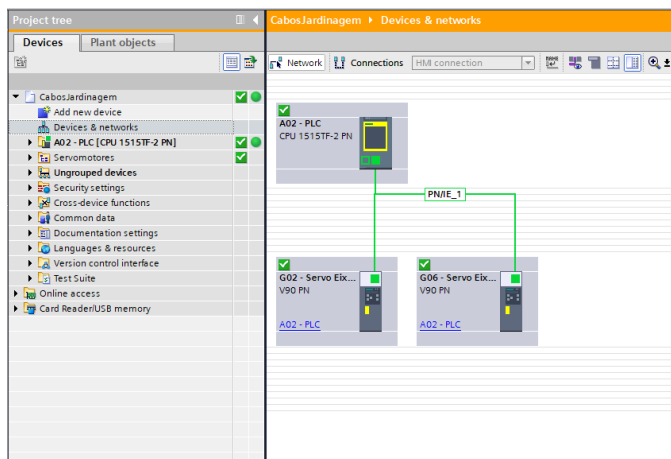


Figura 9. Ambiente de programação *TIA PORTAL*. Fonte: Próprio do autor

Para este trabalho, foram utilizados um CLP e servoconversores da Siemens, sendo o CLP da família S7-1500T e o servoconversor da família V90. As CPUs do CLP se dividem em modelos padrão e tecnológicos, que se diferenciam na capacidade de processamento para utilização de recursos avançados de automação industrial, como cames eletrônicos ou cinemáticas para controle de múltiplos eixos.

Para a utilização de cames eletrônicos, é necessária a configuração e programação dos servomotores para comandá-los, e para tal, são utilizados objetos tecnológicos. Objetos tecnológicos funcionam como uma interface entre o usuário e o servomotor, permitindo sua parametrização e comando a partir de lógicas organizadas no *TIA PORTAL*. Dentro do objeto tecnológico, o usuário encontra uma série de configurações iniciais importantes para a troca de dados, transmissões mecânicas, malha de controle e limites de movimentação [14], conforme ilustrado na Fig. 10 com o objeto tecnológico e alguns menus de configuração.

Para o comando do servomotor, são utilizados blocos específicos de *motion control* disponibilizados em bibliotecas internas do *TIA PORTAL*: *MC POWER*, para habilitá-lo, *MC STOP*, para pará-lo, *MC MOVEABSOLUTE*, para movê-lo no modo absoluto para uma posição. A transmissão de dados é realizada por rede industrial com um protocolo, utilizando telegramas para organizar os dados. Um telegrama é um quadro de dados padronizados para organizar o envio e o recebimento de dados entre CLP e servoconversor [10].

Para os parâmetros de posição e velocidade, é possível criar blocos de dados para armazenar variáveis de configuração e defini-los como retentivos, garantindo que sejam salvos ao reiniciar ou desligar o CLP. Além disso, é necessário

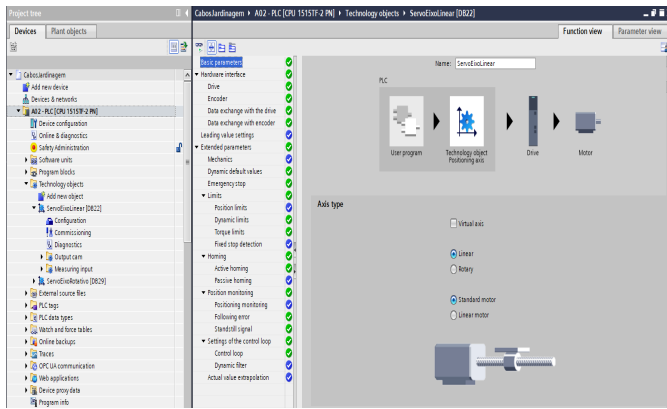


Figura 10. Ilustração da configuração do objeto tecnológico para eixos de posicionamento no TIA PORTAL. Fonte: Própria do autor.

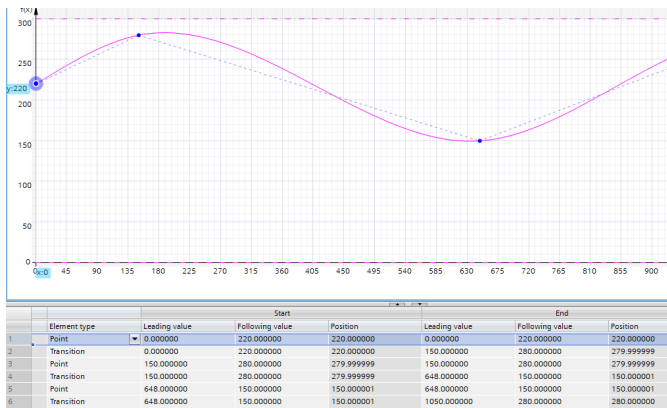


Figura 11. Ilustração do came eletrônico com a tabela dos pontos. Fonte: Própria do autor.

realizar uma rotina de programação cíclica (denominada OBs cíclicos ou *Organization Block*) para que, a cada ciclo de scan, os parâmetros de *setpoint* de posição e velocidade sejam atualizados no servomotor [10].

### G. Came eletrônico no TIA PORTAL

Para desenvolver e aplicar um came eletrônico no TIA PORTAL, é necessária a criação do objeto tecnológico específico e de blocos de *motion control*. Estes permitem que a CPU sincronize os eixos envolvidos, interpole os pontos da curva do ECAM e os envie como *setpoints* para o eixo líder coordenar os eixos seguidores. Primeiramente, o objeto tecnológico é responsável pela criação e edição do ECAM, sendo possível a predefinição da curva e visualização da dinâmica dos eixos seguidores em relação ao eixo líder. A Fig. 11 ilustra o editor de ECAM e a tabela para visualização dos pontos, que permitem definir a curva desejada [15].

O primeiro ponto em azul à esquerda, sobre o eixo vertical, indica o ponto de início da movimentação dos eixos: o eixo líder está na posição 0 unidades de movimento e o eixo seguidor em 220 unidades de movimento (0, 220). Os outros dois pontos em azul indicam outras posições correspondentes à aplicação e, para conectá-los e formar uma

curva de movimentação, é possível interpolá-los para formar as transições entre um ponto e outro, podendo ser do tipo linear ou circular.

A interpolação linear é a mais comum e é formada por funções lineares em seus intervalos. Em aplicações com servomotores, a interpolação linear apresenta variações de posição mais rápidas entre os pontos devido à ausência de ondulações na curva de transição, o que pode gerar acelerações e desacelerações abruptas.

As interpolações circulares possuem dois tipos possíveis de livre escolha do usuário: interpolação com *splines* cúbicos ou interpolação com *splines* de *Bézier*. A diferença entre ambas em termos de aplicação é que a interpolação por *splines* cúbicos pode resultar em altas dinâmicas, dependendo da definição do came, pois esse tipo de interpolação passa pelos pontos especificados. Já a de *Bézier* é apenas orientada pelos pontos, resultando em valores dinâmicos menores e obtendo uma curva interpolada mais suave e lenta, conforme observa-se na Fig. 11 que demonstra uma aplicação com interpolação circular *splines* de *Bézier*. [15]

Para orientar a criação e aplicação de comes eletrônicos, existe uma diretriz responsável por fornecer regras que podem ser utilizadas para calcular transições livres de solavancos e choques para uma aplicação de ECAM, denominada Diretriz VDI 2143 (*VDI Guideline 2143*). O objetivo é alcançar uma alta suavidade de operação e reduzir solavancos e choques devido a variações bruscas de velocidade inesperadas na trajetória do eixo [15]. Dependendo dos requisitos do came, pode-se selecionar e parametrizar uma lei de movimento apropriada. No objeto tecnológico, na seção de criação do ECAM, o editor oferece uma opção de otimização para que o usuário selecione essa diretriz. Automaticamente, na parte selecionada do ECAM, o editor aplica essas regras e reformula a curva para atender aos critérios propostos.

## IV. O TRANSPORTADOR DE CABOS DE MADEIRA

O transportador de cabos de madeira é um braço mecânico com a função de pegar um cabo de madeira em um lado e depositá-lo no lado oposto. A movimentação é realizada por dois eixos de servomotores: um para o movimento linear, que cria o avanço e recuo do braço, e outro para o movimento rotativo, que gera a rotação. O ambiente em que a aplicação do transporte de cabo de madeira se situa pode ser compreendido pela Fig. 12.

Há uma estrutura metálica para fixar os servomotores do transportador e outra acima para outras funções da máquina. O servomotor de eixo rotativo é responsável por girar o conjunto da garra pneumática de um lado para outro, em um ângulo entre 35 ° e 220 °. Esse servomotor é acoplado ao transportador por uma caixa de redução de 1 para 1 (1 giro do eixo para 1 giro da carga). O servomotor de eixo linear é responsável por movimentar a garra pneumática e é acoplado a um eixo de fuso de 1 para 1 de 10 mm (ou seja, 1 giro do eixo para 1 giro do fuso, que avança ou recua linearmente 10 mm).

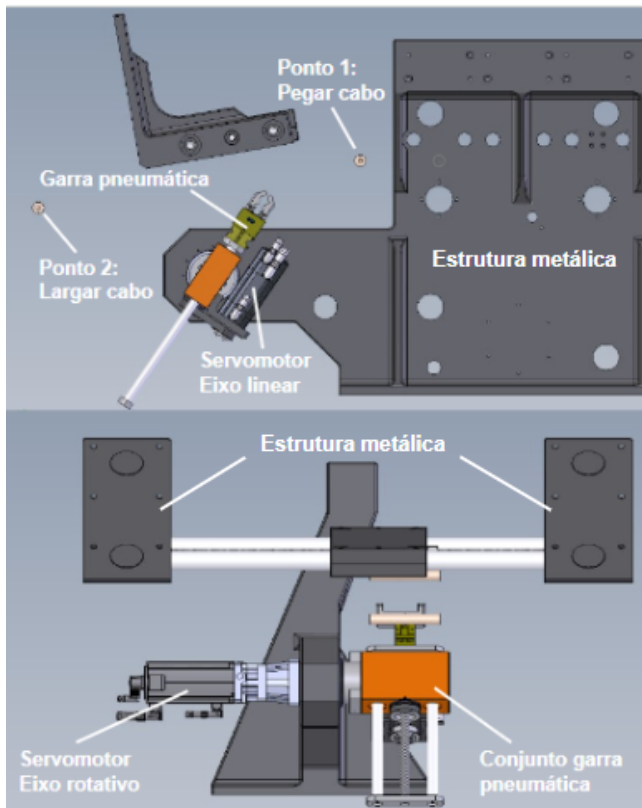


Figura 12. Escopo do transportador de madeira. Fonte: Própria do autor.

Ainda na Fig. 12, o Ponto 1 (Pegar cabo) representa a posição que a garra precisa alcançar para pegar o cabo de madeira e, para isso, o servomotor do eixo linear movimenta o fuso para avançar a garra até o ponto. O ponto 2 (Largar cabo) é a posição onde a garra libera o cabo para dar continuidade ao processo de usinagem. Para isso, é necessário o giro do conjunto do transportador pelo servomotor do eixo rotativo e o avanço da garra até o ponto de largar.

### V. MOVIMENTAÇÃO INDIVIDUAL

O funcionamento do ciclo de movimentos individuais do transportador de cabos é representado através do fluxograma da Fig.13, que ilustra as etapas necessárias para executar os movimentos de pegar e largar os cabos de madeira. Os parâmetros das Tabelas I e II informam as posições que cada eixo deve atingir em cada ciclo para pegar e largar o cabo. Com esses parâmetros, as Fig. 14 e Fig. 15 ilustram a movimentação dos eixos com os valores das posições de cada.

Para realizar movimentos como "Girar conjunto pegar cabo", definido como Etapa 1, foi utilizado um bloco de *motion control*, *MC MOVEABSOLUTE*, para comandar o servomotor a girar o conjunto da garra pneumática para o lado de pegar o cabo, ou seja, é uma posição absoluta distante de um ponto zero. A etapa 2 possui função de avançar garra (movimento de servomotor) e pegar cabo, que é o fechamento da garra pneumática, ou um acionamento de válvula pneumática, e não uma movimentação de servomotores.

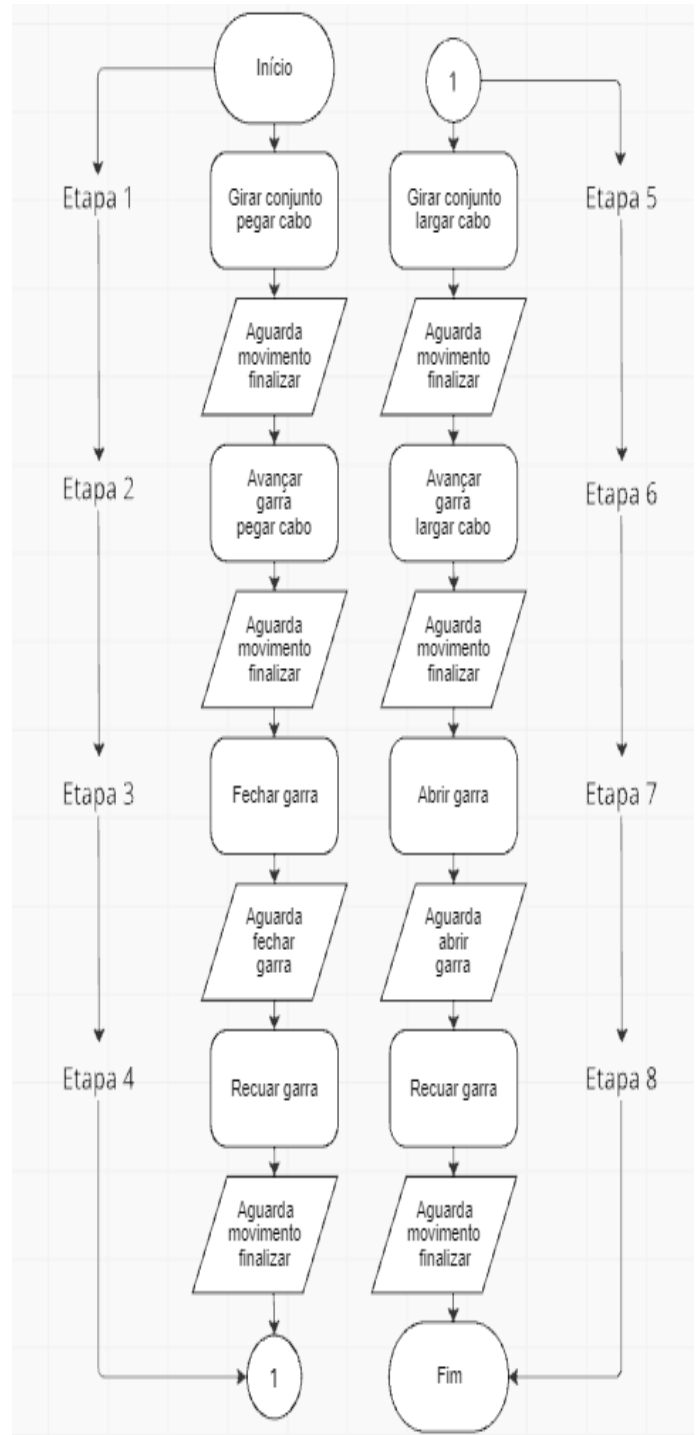


Figura 13. Fluxograma das etapas do transportador de cabo com movimentos individuais. Fonte: Própria do autor.

Tabela I  
POSIÇÕES EIXOS - PEGAR CABO

Ação	Eixo Linear	Eixo Rotativo
Etapa 1	150 mm	220 ° a 35 °
Etapa 2 e 3	260 mm	35 °
Etapa 4	150 mm	35 °

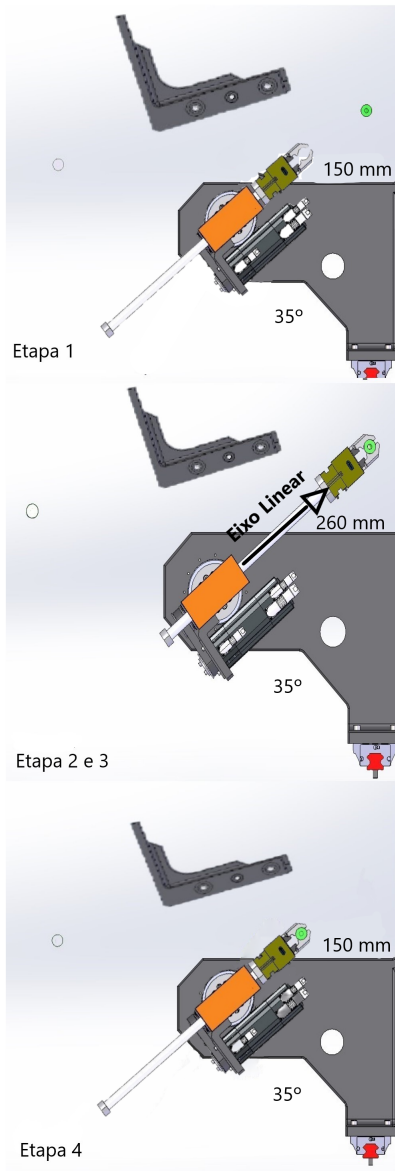


Figura 14. Representação da Etapa 1 ao 4. O ponto verde representa o cabo de madeira.

#### A. Simulação TIA PORTAL

Definidas as etapas, foi possível simular esses movimentos no TIA PORTAL. Com os parâmetros informados nas Tabelas I e II, o gráfico da Fig. 16 ilustra como ficaram as trajetórias dos eixos linear e rotativo para o ciclo de transporte de cabos.

Tabela II  
POSIÇÕES EIXOS - LARGAR CABO

Ação	Eixo Linear	Eixo Rotativo
Etapa 5	150 mm	220 °
Etapa 6 e 7	240 mm	220 °
Etapa 8	150 mm	220 °

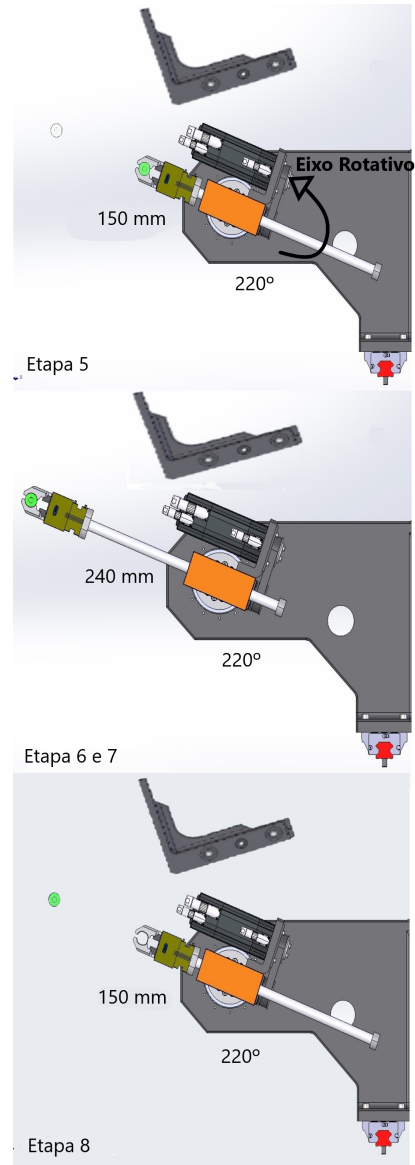


Figura 15. Representação da Etapa 5 ao 8. O ponto verde representa o cabo de madeira.

Na Fig. 16 (ilustra as etapas das Fig. 14 e 15), no início da movimentação (Etapa 1), o eixo linear permanece em 236 mm aproximadamente e o eixo rotativo permanece em 35 ° até o comando de iniciar o ciclo de movimentação. Observa-se que, após avançar até 260 mm e recuar com o cabo, o eixo linear permanece parado em 150 mm e o eixo rotativo gira para 220 °.

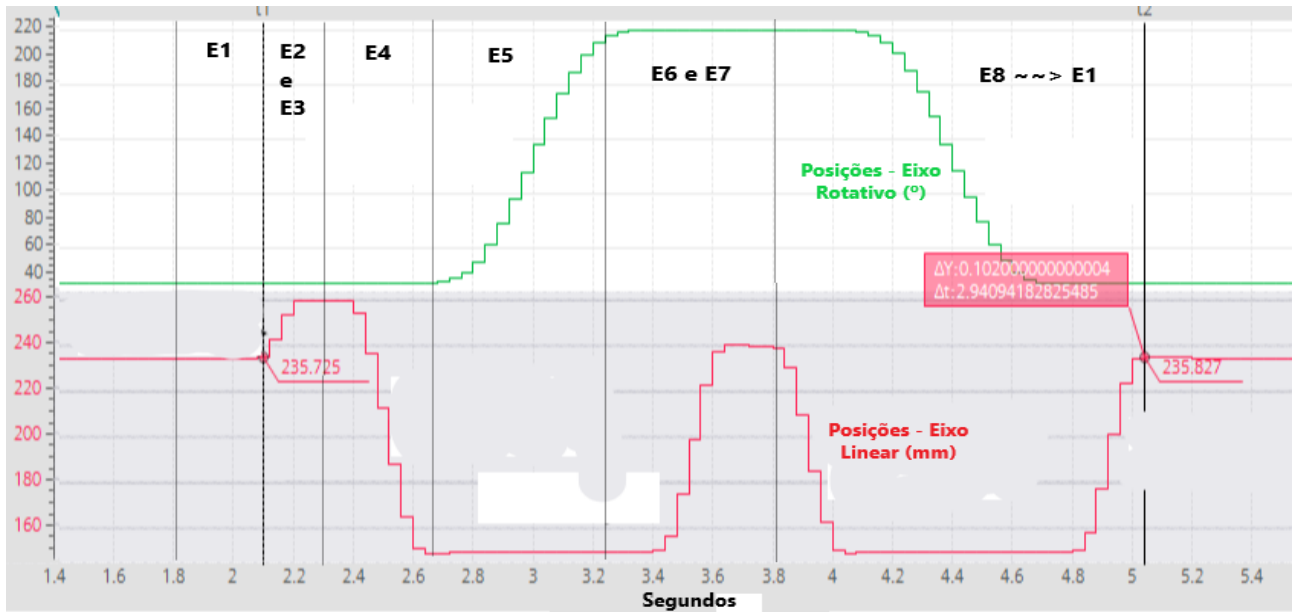


Figura 16. Gráfico dos movimentos sequenciais e individuais do eixo linear e rotativo. O eixo horizontal representa o tempo em segundos. O eixo vertical representa posições do eixo rotativo e do eixo linear, respectivamente. Fonte: Própria do autor.

Observa-se, nos topos dos gráficos de posição, uma linha reta, significando uma parada de movimento e um leve atraso para prosseguir com as etapas, pois a garra demora para fechar ou abrir (aproximadamente 150 ms) e é uma condição necessária para prosseguir com as etapas.

## VI. MOVIMENTAÇÃO CONJUNTA

Na movimentação individual, cada eixo (linear e rotativo) se movimenta de forma individual, ou seja, os eixos não executam um movimento conjunto que otimize o percurso, o movimento é uma série de segmentos lineares e angulares, que, embora levem o cabo do ponto inicial ao final, demandam um trajeto físico maior e um tempo de ciclo mais elevado. A Fig. 17 ilustra a trajetória do cabo que a abordagem do came eletrônico visa melhorar.

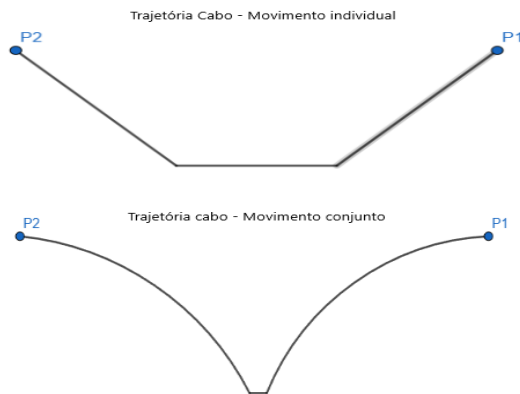


Figura 17. Ilustração da trajetória do cabo do Ponto 1 ao Ponto 2 e vice-versa, comparando-a entre a movimentação individual e conjunta do transportador. Fonte: Própria do autor.

Para a movimentação conjunta dos eixos, foi observada na Fig. 16 a trajetória da movimentação de cada eixo e foi criada uma curva de came eletrônico semelhante ao traçado do movimento de cada eixo no movimento individual. Esses comes eletrônicos representam o sincronismo de posição com relação variável entre o eixo horizontal e o vertical. As Fig. 18 e 19 ilustram como ficou o came eletrônico de cada eixo. O eixo horizontal representa o eixo virtual, e o eixo vertical representa o eixo linear em um came e o eixo rotativo no outro.

Um eixo virtual possui controle de movimento, mas, ao contrário dos eixos reais, não possui conexão com o acionamento e o encoder. As movimentações são processadas apenas dentro do controlador diante dos parâmetros configurados (relação de redução, transmissão, rampas), e nenhum acionamento real é controlado. A utilização do eixo virtual deve-se ao fato de que, em um came eletrônico, o eixo horizontal segue um movimento contínuo e em linha reta. Como os eixos reais (linear e rotativo) apresentam variações e curvas durante seu percurso, idealizou-se que o eixo virtual, abstratamente, realiza um movimento em linha reta entre o ponto 1 e o ponto 2 do escopo da máquina (Fig. 12), de 0 a 1080 unidades de movimento, sendo esse o comprimento total do came eletrônico das Fig. 18 e 19.

Na Fig. 18, no momento em que o eixo virtual está em 180 mm, o eixo linear deve estar em 258,8 mm aproximadamente. Da mesma forma na Fig. 19, no momento em que o eixo virtual está em 180 mm, o eixo rotativo deve estar em 35,88° aproximadamente. É dessa forma que a coordenação dos movimentos foi realizada entre o eixo virtual e os eixos reais.

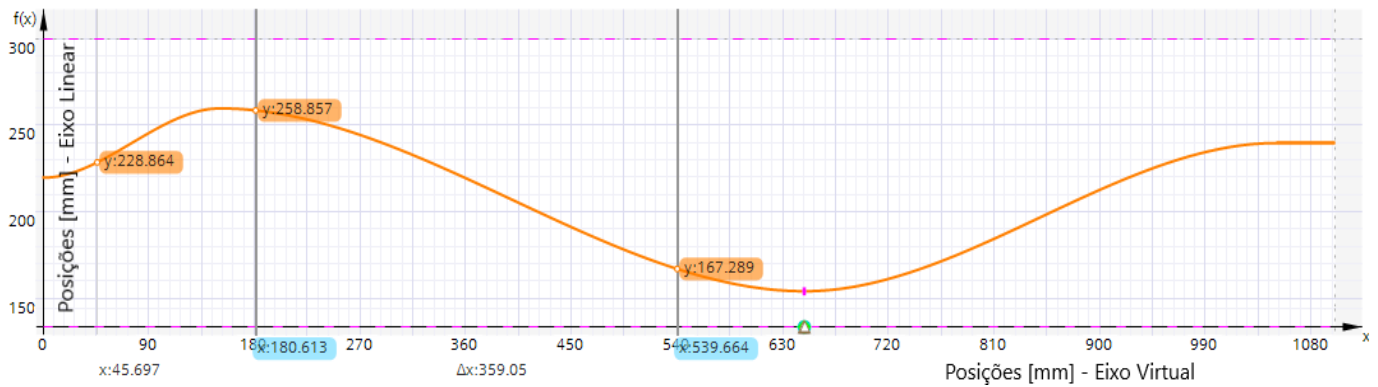


Figura 18. Came eletrônico do eixo linear. O eixo horizontal é o eixo virtual, representando suas posições em milímetros. O eixo vertical é o eixo seguidor (linear) e representa suas posições em milímetros. Fonte: Próprio do autor

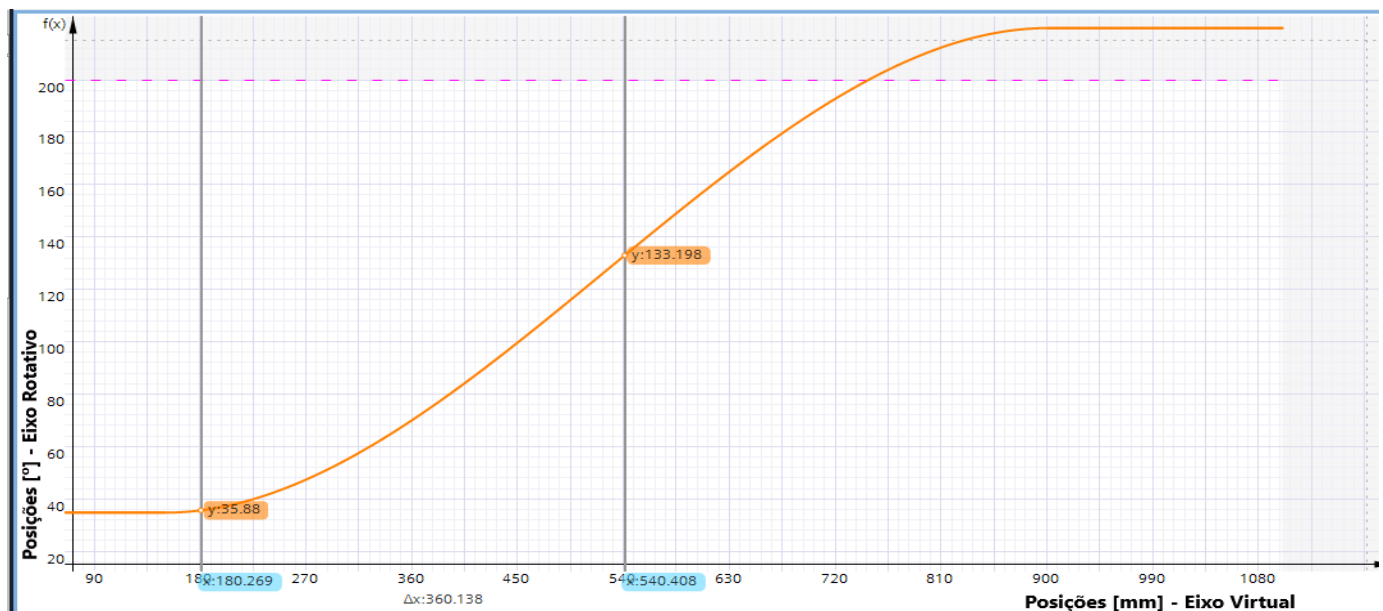


Figura 19. Came eletrônico do eixo rotativo. O eixo horizontal é o eixo virtual, representando suas posições em milímetros. O eixo vertical é o eixo seguidor (rotativo) e representa suas posições em graus. Fonte: Próprio do autor

### A. Simulação TIA PORTAL

A Fig. 20 mostra como o gráfico dos movimentos ficou com o sincronismo entre os eixos linear e rotativo. Para cada movimentação do eixo virtual (eixo horizontal), os eixos reais movimentam-se de acordo. Em verde, vermelho e preto, respectivamente, observam-se as variações de posição no tempo dos eixos rotativo, linear e virtual.

Para a realização da simulação da movimentação conjunta no ambiente *TIA PORTAL*, a coordenação dos eixos real e virtual é comandada por meio de blocos de *motion control* específicos. O bloco *MC CAMIN* é fundamental para o funcionamento do came eletrônico, responsável por sincronizar os eixos, interpolar os pontos da curva do ECAM e gerar os *setpoints* de posição para o eixo seguidor, garantindo que o eixo real acompanhe a trajetória suave definida pelo eixo virtual. Uma vez sincronizados, o comando para movimentar o eixo virtual automaticamente movimenta os eixos reais

sincronizados.

Nota-se que existem os momentos de parada de movimentação para pegar e largar o cabo. Também há mudança no traçado gráfico devido ao eixo virtual, observada na etapa 2 e 3 no eixo rotativo, com uma concavidade voltada para baixo. Isso se deve ao fato de que, após executar um ciclo completo, os eixos se movem em direção ao ponto de pegar o cabo, mas permanecem aguardando em uma posição próxima, ou seja, o eixo rotativo deve estar em  $35^\circ$  e ele aguarda aproximadamente em  $58^\circ$ . Dessa forma, o eixo virtual também está na posição de aguardo, no caso 300 mm. Quando o cabo está disponível, o eixo virtual move-se para aproximadamente 160 mm, e ambos os eixos reais o seguem conforme o came eletrônico. As Tabelas III e IV, abaixo da Fig. 20, são as posições que os eixos reais devem alcançar conforme as posições do eixo virtual.

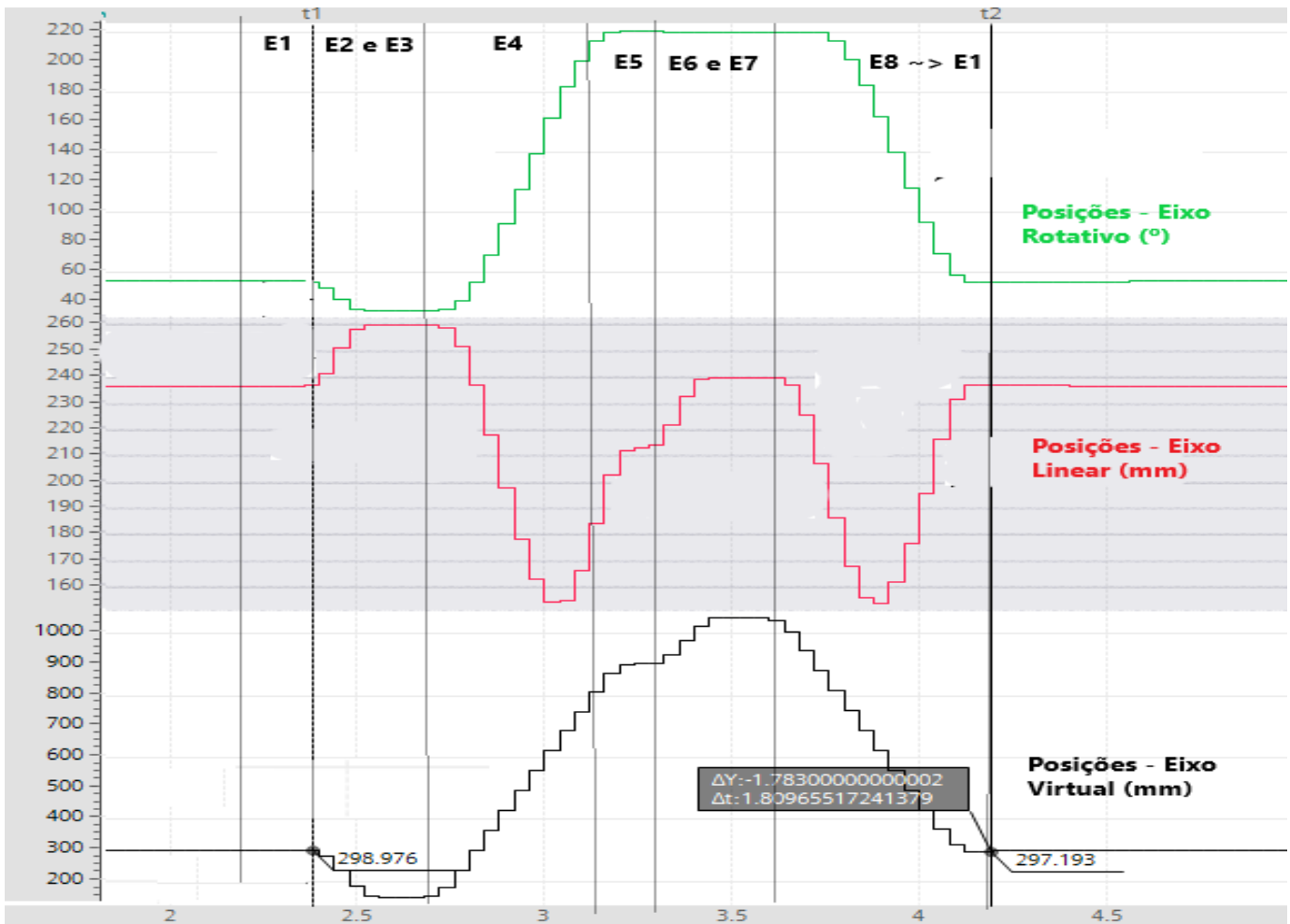


Figura 20. Gráfico dos movimentos sincronizados do eixo linear e rotativo com o eixo virtual. O eixo horizontal representa o tempo em segundos. O eixo vertical representa as posições de cada eixo. Fonte: Própria do autor.

Tabela III  
POSIÇÕES EIXOS - PEGAR CABO

Ação	Eixo Rotativo	Eixo Linear	Eixo Virtual
Etapa 1	50 °	160 a 235 mm	298 mm
Etapa 2 e 3	50 a 35 °	235 a 260 mm	298 a 180 mm
Etapa 4	35 a 220 °	260 a 160 mm	180 a 900 mm

Tabela IV  
POSIÇÕES EIXOS - LARGAR CABO

Ação	Eixo Rotativo	Eixo Linear	Eixo Virtual
Etapa 5	35 a 220 °	160 a 210 mm	900 mm
Etapa 6 e 7	220 °	210 a 240 mm	900 a 1080 mm
Etapa 8	220 a 50°	240 a 160 mm	1080 a 298 mm

## VII. COMPARAÇÃO DOS MOVIMENTOS

### A. Resultados das simulações

O ciclo de uma movimentação individual, ilustrado na Fig. 16, ocorreu em 2,9 segundos entre as etapas 1 a 8, representando o tempo de um cabo de madeira transportado. A produtividade é normalmente medida em peças por hora; portanto, com 2,9 segundos, obtém-se aproximadamente 1241 cabos em uma hora.

Com a utilização do came eletrônico para sincronizar os movimentos, o tempo de um ciclo de movimentação foi de

1,9 segundos entre as etapas 1 a 8 (ilustrado na Fig. 20), o que representa uma redução de quase 1 segundo em relação ao ciclo de transporte com movimentos individuais. Esse intervalo de tempo representa a possibilidade de transportar aproximadamente 1894 cabos de madeira, representando um aumento de 52,6 %.

### B. Resultados experimentais

Após a montagem e instalação elétrica, foi necessário ajustar os pontos tabelados na simulação (Tabelas I e II). Isso ocorreu porque, sendo simulações, algumas mudanças foram

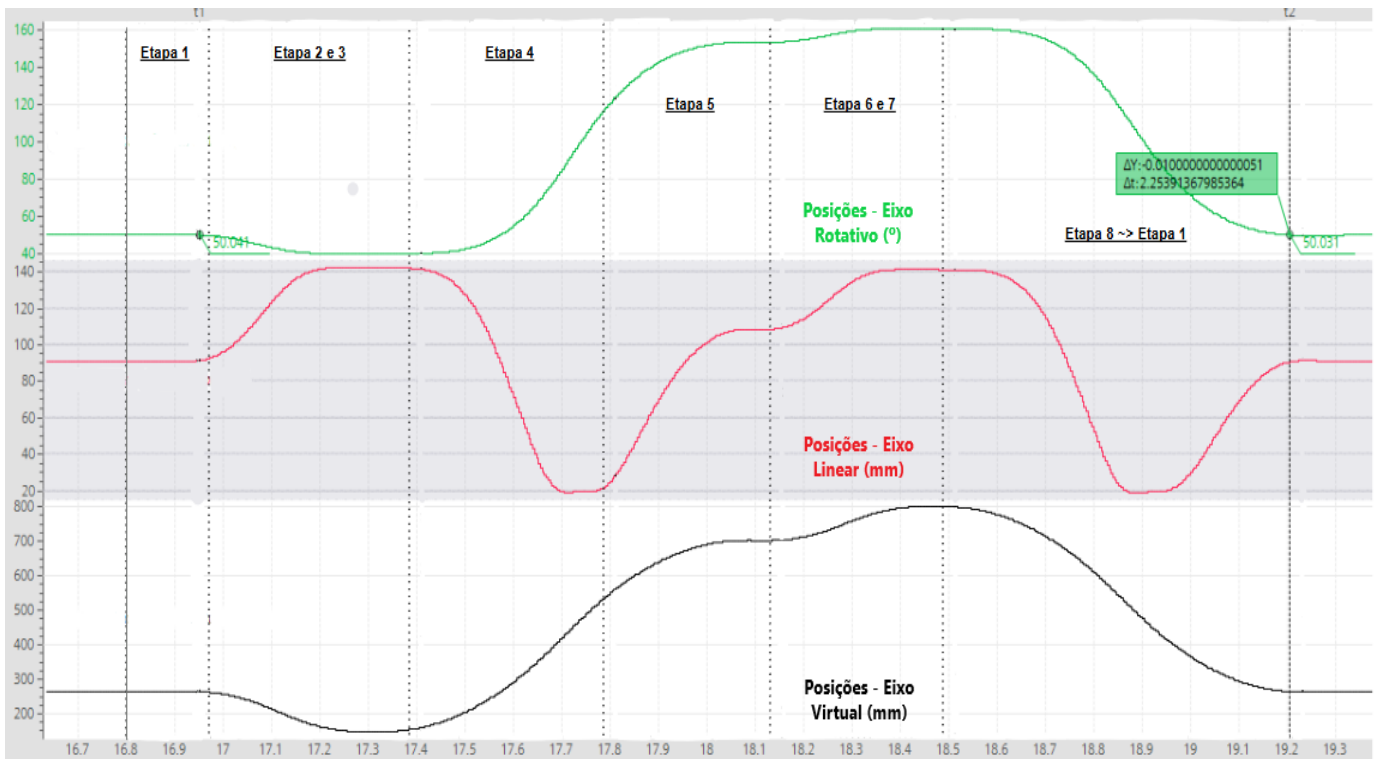


Figura 21. Gráfico dos movimentos sincronizados do eixo linear e rotativo com o eixo virtual. O eixo horizontal representa o tempo em segundos. O eixo vertical representa as posições de cada eixo. Fonte: Própria do autor.

Tabela V  
POSIÇÕES EIXOS - PEGAR CABO

Ação	Eixo Rotativo	Eixo Linear	Eixo Virtual
Etapa 1	50 °	19,5 a 91 mm	265 mm
Etapa 2 e 3	50 a 40 °	91 a 143 mm	265 a 150 mm
Etapa 4	40 a 153 °	143 a 19,5 mm	150 a 700 mm

Tabela VI  
POSIÇÕES EIXOS - LARGAR CABO

Ação	Eixo Rotativo	Eixo Linear	Eixo Virtual
Etapa 5	40 a 153 °	19,5 a 108 mm	700 mm
Etapa 6 e 7	153 a 160 °	108 a 141 mm	700 a 800 mm
Etapa 8	160 a 50 °	141 a 19,5 mm	800 a 265 mm

realizadas durante a construção, impactando nas posições que o transportador realizará entre os pontos 1 e 2 (pegar e largar o cabo). Para cada eixo, foi necessário encontrar as posições equivalentes às condições físicas, por exemplo, na simulação, o eixo linear na etapa 1 da Tabela I era de 150 milímetros, mas fisicamente foram necessários 91 milímetros. Nas etapas 2 e 3, momento em que o cabo de madeira é tracionado pela garra, foi necessário avançar apenas até a posição de 143 milímetros. Em contrapartida, na simulação, eram 260 milímetros e isso aconteceu devido a alterações de projeto por parte da engenharia. Por essa razão, a curva do came de cada eixo real, que sincroniza ambos, foi alterada. A Fig. 21 ilustra as trajetórias de cada eixo e as Tabelas V e VI mostram as posições definidas no experimento.

Com os parâmetros definidos, foi sendo incrementada a velocidade do sincronismo (Eixo virtual) para verificar se os eixos seguidores (Eixo rotativo e linear) conseguiam acompanhar. Após a validação dos parâmetros para a aplicação, foram

visualizados os gráficos das posições de cada eixo durante o sincronismo, conforme observado na Fig. 21. Analisando o tempo de vários ciclos, a duração média registrada foi de 2,35 segundos. A tentativa dessa aplicação foi de reproduzir os resultados registrados na simulação da movimentação conjunta porém, aconteceram mudanças estruturais do projeto que alteraram as distâncias de deslocamento de cada eixo. As distâncias de movimentação em algumas etapas ficaram mais curtas do que estipulado na simulação porém, por existir condições de aguardo para iniciar e continuar as etapas, o ciclo de movimentação ficou com uma duração maior que o esperado, observando na Fig. 21 alguns momentos que o movimento cessa, como por exemplo nas etapas 2 e 3, 5, 6 e 7.

## VIII. CONCLUSÃO

Com a utilização de um recurso avançado para sincronismo de movimento de eixos, foi possível desenvolver uma melhoria

na parte de transporte de cabos da máquina de usinagem apresentada. O came eletrônico mostrou-se eficaz, flexível e simples de utilizar para o sincronismo de eixos, e os ajustes finos para alterar as movimentações serão mais simples de testar na prática. Na simulação, o movimento em conjunto foi de 1,9 segundos, enquanto o resultado experimental de movimentos em conjunto foi de 2,35. O movimento conjunto experimental conseguiu transportar 1600 cabos/hora, com 28 % mais cabos transportados em relação ao resultado do movimento individual, de 1241 cabos/hora.

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. Sakurai and J. D. Zuchi, “Revoluções industriais até a indústria 4.0,” *Revista Interface Tecnológica*, vol. 15, pp. 480–491, 12 2018.
- [2] J. M. Rosário, *Automação industrial*, 1st ed., L. Barauna, Ed., 2009, vol. 1.
- [3] M. R. Rocha, O. na Gislotica, and E. R. M. F. da Silva, “Sincronismo de eixos com o plc siemens s7-1500,” 2018.
- [4] R. Norton, *Cinemática e dinâmica dos movimentos*, 1st ed., A. Affonso and M. Gomes, Eds. AMGH Editora Ltda., 2010, vol. 1.
- [5] T. Borges, “GeraÇÃO de perfis de movimento através de um came eletrônico.”
- [6] A. Altintaş, “Electronic cam motion generation by using stepper motors and pinion gears,” pp. 197–201, 2009. [Online]. Available: [www.gujs.org](http://www.gujs.org)
- [7] S. Wei, C. Ronghu, and Y. Lei, *Synchronizing Servo Motion and Iterative Learning Control for Automatic High Speed Horizontal Flow Wrapper*. IEEE, 2012.
- [8] S. Wang, D. You, Y. Lei, X. Zhang, Y. Zeng, and X. Ai, “Curve fitting and software realization of electronic cam.” Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 252–257.
- [9] Q.-V. Tran, W.-H. Kim, J.-H. Shin, and W.-B. Baek, “Ecam control system based on auto-tuning pid velocity controller with disturbance observer and velocity compensator,” *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 10, pp. 113–118, 2010.
- [10] Siemens, “Sematic s7-1500 - all about motion control,” 2022. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/industrialsecurity>.
- [11] F. Petruzella, *Controladores Lógicos Programáveis*, 4th ed., A. E. Ltda, Ed., 2014, vol. 1.
- [12] WEG, “Guia de aplicação de servoacionamentos.” [Online]. Available: [www.weg.com.br](http://www.weg.com.br)
- [13] N. Matos, “Análise do funcionamento de um servomotor de corrente alternada com ímãs permanentes,” 2021.
- [14] Siemens, “The technology objects (to) of simatic s7-1500.” [Online]. Available: <https://www.siemens.com/industrialsecurity>.
- [15] —, “Working with the cam editor.” [Online]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/109749820>