

Mateus Mombelli Mussio

**PROJETO ELÉTRICO E DE AUTOMAÇÃO DE UMA
MÁQUINA DE GRAVAÇÃO A LASER**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Eletrônica
Orientador: Prof. Marcelo De Lellis
Costa de Oliveira

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

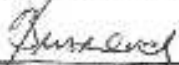
Mussio, Mateus Mombelli PROJETO ELÉTRICO E DE AUTOMAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE GRAVAÇÃO A LASER / Mateus Mombelli Mussio ; orientador, Marcelo de Lellis Costa de Oliveira, 2019. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica, Florianópolis, 2019. Inclui referências. 1. Engenharia Eletrônica. 2. Gravação a Laser. 3. Projeto Elétrico. 4. Automação. I. de Lellis Costa de Oliveira, Marcelo . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Eletrônica. III. Título.

Mateus Mombelli Mussio

PROJETO ELÉTRICO E DE AUTOMAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE GRAVAÇÃO A LASER

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora

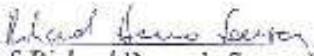
Florianópolis, 12 de julho de 2019.


Prof. Jefferson Luiz Brum Marques, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:


Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Felipe Gomes de Oliveira Cabral, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Richard Demo de Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Nadir e Mirian, por sempre terem dado seu máximo na minha criação, me apoiarem incondicionalmente, pelos ensinamentos ao longo dos anos e por, além de tudo, me ensinarem a procurar sempre melhorar como pessoa e que o caráter, a honestidade e o respeito são peças fundamentais por toda a vida.

Ao meu irmão Giovani, gostaria de agradecer a amizade e por ter me mostrado o caminho, ainda que tortuoso, da engenharia.

À minha namorada, Lizandra, por me inspirar a ser um homem melhor todos os dias, pela parceria e por estar sempre comigo em todos os momentos.

Ao professor Marcelo, meu orientador, por todos os ensinamentos, dicas e pela paciência comigo.

Por último, mas não menos importante, à Automatisa, por me conceder a oportunidade de aplicar o projeto e confiar no meu trabalho.

RESUMO

O projeto de uma máquina automatizada de gravação a laser foi feito, com análise dos requisitos feitos pelo cliente e respeitando as normas regulamentadoras para projetos elétricos. A automação da máquina foi possível através da integração da parte elétrica, da programação e dos sensores utilizados. Todo o projeto foi feito respeitando os requisitos básicos das normas regulamentadoras de segurança elétrica e também do cliente.

Palavras-chave: Gravação a laser. Automação de máquinas.

ABSTRACT

The design of an automated laser engraving machine was made, analyzing the requirements of the customer and also respecting the regulatory norms for electrical projects. The automation of the machine was possible through the integration of the electrical part, the programming and the sensors used. The entire project was done in compliance with the basic requirements of the electrical safety regulatory standards and also of the customer.

Keywords: Laser engraving, Machine automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma representando as operações da máquina.....	14
Figura 2 - Princípio básico de funcionamento do laser.....	16
Figura 3 - Esquemático de uma fibra óptica.....	17
Figura 4 - Diagrama de um laser a fibra óptica.....	19
Figura 5 - Esquema elétrico das entradas digitais do CLP.....	20
Figura 6 - Esquema elétrico de saídas digitais em CLP.....	22
Figura 7 - Arquitetura de um CLP.....	24
Figura 8 - GRAFCET mostrando os passos de análise do CLP.....	29
Figura 9 - Diagrama dos principais componentes elétricos da máquina	32
Figura 10 - Cortina de luz.....	33
Figura 11 - Exemplo de encoder.....	34
Figura 12 - Sensor Indutivo.....	36
Figura 13 - Esquema de um relé de segurança.....	37
Figura 14 - Relé de estado sólido.....	38
Figura 15 - Relé acoplador.....	39
Figura 16 - Esquema elétrico de componentes como fontes e filtros de linha.....	40
Figura 17 - Esquema elétrico de segurança NR-12.....	41
Figura 18 - Conexão elétrica do driver e de sensores.....	42
Figura 19 - Relés usados nas portas do CLP.....	44
Figura 20 - Cabeamento e botões do painel.....	45
Figura 21 - Outros cabos da máquina.....	46
Figura 22 - Programa utilizado para o código.....	47
Figura 23 - Botões de entrada e servo motor utilizado.....	51
Figura 24 - Relés na saída para testes do software.....	52
Figura 25 - Máquina em posição de homing.....	54
Figura 26 - Cabeçote do laser e área de gravação.....	55
Figura 27 - Máquina em posição de segurança.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre pinos, seu número e a função no circuito....	43
-----------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CD - Compact Disc(Disco Compacto)

DVD - Digital Video Disc (Disco de vídeo digital)

Laser - Light amplification by stimulated emission of radiation(amplificação de luz por emissão estimulada de radiação)

CLP - Controlador Lógico-Programável

E-CAD - Electrical-Computer Aided Design (Projeto elétrico auxiliado por computador)
EPI - Equipamento de Proteção Individual
NR - Norma Regulamentadora
CPU - Central Processing Unit(Unidade de processamento central)
DC - Direct Current (Corrente contínua)
AC - AlternatingCurrent (Corrente Alternada)
NA- Normalmente Aberto
NF - Normalmente Fechado
FSM - FiniteStateMachine (Máquina de estados finita)
SSR –Solid-StateRelay (Relé de estado sólido)
LED – Light Emitting Diode(Diodo emissor de luz)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos	13

2 DESENVOLVIMENTO	14
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1.1 Laser (corte e gravação).....	14
2.1.2 CLP	17
2.1.3 Máquinas de Estado.....	21
2.1.4 GRAFCET	21
2.2 METODOLOGIA	24
2.2.1 Software Elétrico	24
2.2.2 Programação	25
2.3 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO.....	25
2.3.1 Normas regulamentadoras	25
2.3.2 Requisitos Básicos	27
2.3.3 Diagrama de funcionamento	28
2.3.4. Estrutura eletromecânica da máquina	30
2.3.5. Projeto Elétrico	39
2.4 PROGRAMAÇÃO.....	46
3 RESULTADOS.....	51
4 CONCLUSÃO	59

1INTRODUÇÃO

As máquinas a laser são uma realidade no mundo industrial, seja para gravação, corte microusinagem ou uso médico. Elas permitem um grau altíssimo de precisão e confiabilidade intrínseco ao seu funcionamento. De fato a gravação a laser não é novidade, sendo muito mais comum do que se imagina. Aparelhos de CD e DVD utilizam laser

para salvar e ler os dados de forma digital. Além disso, a gravação a laser pode ser utilizada para organização e classificação, como é o caso dos QR-codes em placas veiculares. Nos últimos anos as máquinas a laser têm se tornado mais rápidas e eficientes, obrigando a indústria a manter seus equipamentos atualizados e competitivos.

O laser pode ser feito através de diferentes meios ativos, podendo ser um gás, como no caso do CO₂, por meios sólidos como cristais ou vidros ou por fibra óptica. Suas aplicações são das mais variadas e abrangem processamento de materiais, telecomunicações, espectroscopia, etc.

Os lasers a fibra óptica já são considerados o futuro do mercado, por serem muito mais velozes e terem mais capacidade que os de CO₂. O desafio atual está mais focado na automação da máquina, de forma que ela seja capaz de acompanhar a agilidade do laser, do que na aplicação do feixe em si. Retirar e colocar material são um processo crítico em qualquer utilização industrial de máquinas desse tipo, e com o laser ainda mais veloz para terminar um ciclo de gravação, a máquina deve ser reprojeta para acompanhar essa rapidez. Atualmente o laser a fibra óptica também é usado para cirurgias em tecidos moles, nos olhos e para redução de cálculos renais.

O uso do laser, como pode ser verificado pelos exemplos citados, é bastante amplo, e o seu futuro é ainda mais promissor, pois as máquinas tendem a ficar mais potentes, eficientes e de custo menor, abrindo possibilidades para cortes de chapas metálicas mais grossas, gravações mais profundas e cortes de outros materiais. O laser será cada vez mais comum em nichos ainda pouco explorados, como arte, moda, eletrônica e no ramo da arquitetura, cada um com suas aplicações específicas, como construção de modelos arquiteturais e soldagem de componentes em placas eletrônicas.

Com o avanço da indústria 4.0, as empresas abrem leques ainda maiores para coordenação de operações simultâneas, como operação de múltiplas máquinas paralelamente, controle dos equipamentos pela internet através de transmissão de dados para análise de desempenho e funcionamento dos dispositivos conectados.

Segundo Moraes e Castrucci (2015), “a automação foi um conceito criado pelo marketing da indústria de equipamentos na década de 1960”. Os autores argumentam que a automação é um conceito complexo envolvendo questões financeiras, a redução de custos operacionais (sejam eles humanos ou não), aumento na qualidade dos produtos, especificações numéricas e mais precisas de tolerância, e um aumento de segurança, entre outras questões. Os sistemas

informatizados permitem, atualmente, um controle ainda maior do sistema e/ou equipamento que alguém deseja fazer, especialmente pela alta integração das áreas da engenharia. Muitos equipamentos possuem um número altíssimo de sensores para monitorar a sua condição de operação, a um custo cada vez menor.

A revolução da indústria 4.0 traz uma série de desafios às empresas que desejam se manter atualizadas e competitivas. Com a facilidade e necessidade da rápida troca de informações, as máquinas criadas devem ser capazes de enviar e receber dados instantaneamente. Esse nível de desempenho é possível porque, hoje, no mercado, existem várias soluções tecnológicas capazes de auxiliar e melhorar os processos e produtos de uma companhia.

Todavia, para que tudo funcione corretamente, é necessário que o projeto seja pensado minuciosamente, pois, tratando-se de automação e controle, qualquer sensor ou atuador mal especificado pode ocasionar problemas no funcionamento geral da máquina. Por isso, a utilização de dispositivos capazes de capitalizar esse tipo de cuidado é fundamental, já que estes fornecem aos projetistas a oportunidade de garantir e testar, de maneira segura, a correta operação.

A Automatisa Laser Solutions S.A. é uma empresa fundada em 2001 no Ecossistema de Inovação de Florianópolis, sendo referência em máquinas de gravação e corte a laser. Seu portfólio inclui equipamentos capazes de cortar acrílico, chapas não-metálicas, couro e metal. As gravações podem ser feitas, também, em diferentes materiais, como metal e plástico. A empresa possui mais de 100 máquinas em uso ao redor do mundo, com maior concentração no Brasil e na América do Sul. Foi a primeira empresa na América Latina a criar máquinas de corte, gravação e microusinagem a laser. Recebeu premiação da FINEP em 2007 de inovação, assim como o prêmio do SEBRAE de melhor empresa incubada do ano. A missão da empresa é “desenvolver, fabricar e comercializar soluções industriais para corte e gravação a laser, gerando competências e gerando valores para os clientes, acionistas, colaboradores, fornecedores e sociedade, de modo sustentável.” [23]

1.1OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo projetar eletricamente e automatizar uma máquina de gravação a laser para diferentes materiais, assegurando a funcionalidade desejada para o equipamento. A máquina deve atender às normas regulamentadoras de segurança em instalações elétricas, às demandas do cliente, e deve ter o melhor custo-benefício possível. Deve também estar dentro dos altos padrões de qualidade e confiabilidade da empresa.

1.1.1 Objetivo Geral

Por meio do uso de dispositivos programáveis e de softwares de E-CAD, pretende-se projetar a automação de uma máquina de gravação a laser.

O diferencial almejado do equipamento projetado é a competitividade do preço e a já consolidada confiabilidade e garantia de qualidade verificada nos demais equipamentos vendidos pela Automatisa. Além disso, por ser um equipamento completamente novo ao portfólio da empresa, pretende-se expandir ainda mais a atuação da empresa dentro do mercado, alcançando novos clientes.

1.1.2 Objetivos específicos

Por meio da execução deste projeto também se busca aplicar os conhecimentos adquiridos pelo aluno durante o curso e o período empregado no desenvolvimento do equipamento, alinhando as realidades do mercado e do trabalho aos conhecimentos teóricos. O desenvolvimento da monografia traz novos desafios ao autor, já que a máquina aqui proposta é completamente nova e o projeto elétrico inteiro é de autoria própria. Além disso, o uso de CLP permite uma entrada mais forte da empresa no mercado, já que se trata de uma tecnologia amplamente utilizada no meio industrial e que assim deve se manter por muito tempo.

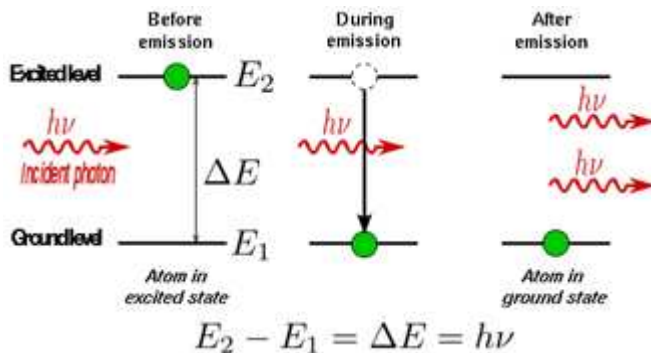
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 Laser (corte e gravação)

O uso de equipamentos a laser acrônimo “para amplificação de luz por emissão estimulada de radiação” (em inglês, light amplification by stimulated emission of radiation) é bastante amplo. Desde impressoras até máquinas de corte de tecido, o laser, já é uma tecnologia recorrente no mundo industrial e até mesmo doméstico. O laser é criado quando elétrons entram em estado de excitação através de absorção de energia, seja através de uma corrente elétrica, seja de outro laser. Quando os elétrons estão nesse estado, movem-se para uma próxima órbita de maior energia, emitindo fótons, que são nada mais que partículas de luz [Adaptação e tradução própria de [1]]. Essas partículas possuem o mesmo comprimento de onda e são coerentes, ou seja, estão em fase umas com as outras. Na Figura 1 apresenta-se uma breve explicação do funcionamento do laser.

Figura 1 - Princípio básico de funcionamento do laser



Fonte: [2]

A teoria dos lasers é relativamente antiga, desenvolvida inicialmente nos anos 60 com um laser pulsado de rubi que emitia no comprimento de onda de vermelho de aproximadamente 694,3 nm. Logo após a sua descoberta não se vislumbrou aplicação imediata do laser, mas, ao passar dos anos, a sua aplicabilidade foi sendo descoberta. Para o correto funcionamento do equipamento, o laser é emitido em um

meio no qual possui um espelho quase que totalmente reflexivo de um lado e um parcialmente transmissivo do outro. Dessa forma, quando o meio permite a passagem da luz, é gerado um feixe de laser. Os espelhos definem, portanto, a cavidade ressonante óptica, garantindo a emissão contínua de fótons. Como visto acima, os fótons estimulados geram ainda mais fótons estimulados, deslocando-se continuamente pela cavidade.

As fibras ópticas se tornaram possíveis com a compreensão prática da lei de Snell-Descartes, também conhecida como a segunda lei da refração, que pode ser expressa por meio da equação 1:

Equação 1 - Lei de Snell-Descartes

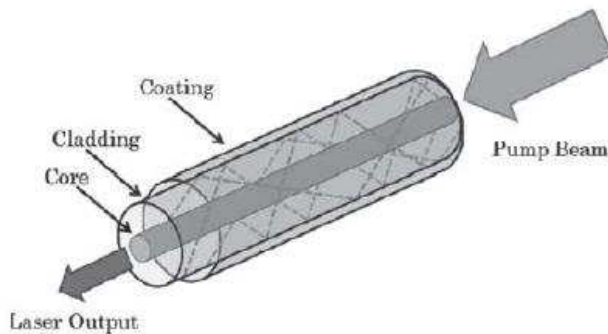
$$n_1 \operatorname{sen} i = n_2 \operatorname{sen} r$$

Fonte [24]

Nesse caso, o índice de refração, que é a razão entre a velocidade da luz e a velocidade que ela atravessa o meio em que se encontra, é representado pela letra n e o meio é mostrado pelo número de índice em n . O i é o ângulo de entrada da luz com a interface no meio 1 e r é análogo a i , porém, do meio 2. As fibras ópticas podem ser de modo único ou de modo múltiplo. As de modo único têm núcleo de pequeno diâmetro, para carregar informações a longas distâncias com baixa atenuação, tendo alta capacidade de transmitir dados. As fibras de modo múltiplo têm núcleo com diâmetro significativamente maior, sendo mais usada por centrais de dados.

O laser a fibra óptica, usado na máquina aqui projetada, é aquele em que o meio ativo é uma fibra dopada com metais lantanídeos, geralmente Itérbio (Yb) e Érbio (Er), sendo bombeado por diodos a laser. O material escolhido no diodo, assim como na fibra em si, influencia o comprimento de onda final do feixe. A fibra possui uma estrutura básica conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquemático de uma fibra óptica

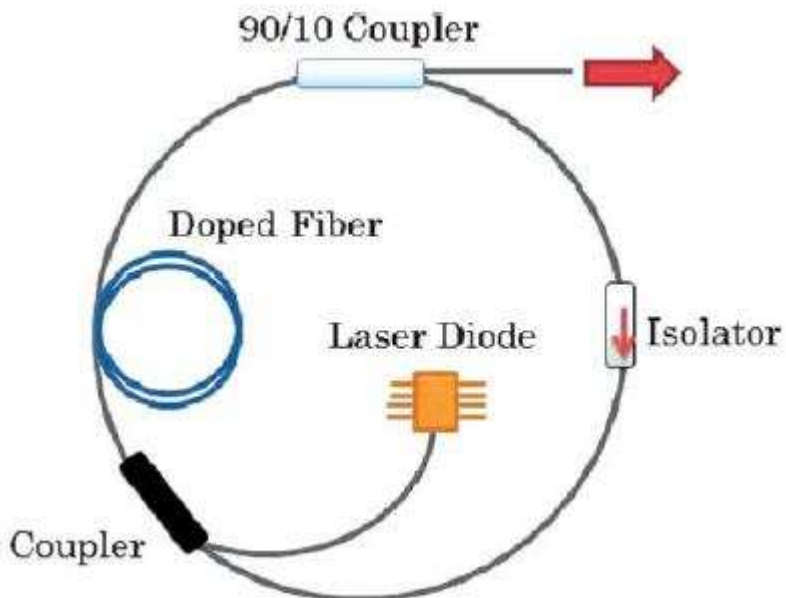


Fonte - [23]

O núcleo, material com alto índice de refração, é revestido por uma camada chamada cladding (revestimento) de material com baixo índice de refração, o que faz com que os fótons presos na fibra sejam direcionados para o núcleo devido à reflexão interna. O núcleo é geralmente feito de vidro pelo seu alto nível de pureza. Ele é dopado com o metal lantanídeo desejado, estimulando os fótons absorvidos pelo núcleo a liberarem energia. O coating (camada protetora) é feito de um material mais resistente, que protege as partes internas do dispositivo, sendo geralmente produzido de um polímero. Para que seja possível criar laser a fibra óptica, é necessário criar grades ao longo da fibra, responsáveis por refletir a luz de vários comprimentos de onda para dentro do núcleo. Essas grades são chamadas de grades de fibra de Bragg.

Na Figura 3 é apresentado um exemplo de um laser a fibra óptica. O acoplador (acoplador) conecta uma ou mais fibras para permitir a transmissão de luz para um ou vários caminhos. O isolador (isolador) é um dispositivo que só permite um caminho de transmissão de luz. O diodo a laser emite luz e, ao passar pela fibra dopada, essa luz já está em forma de fóton. Alguns fótons já formam um feixe de luz saindo do acoplador 90/10, enquanto outros seguem o outro caminho, passam pelo acoplador do início e o ciclo continua.

Figura 3 - Diagrama de um laser a fibra óptica



Fonte - [23]

2.1.2 CLP

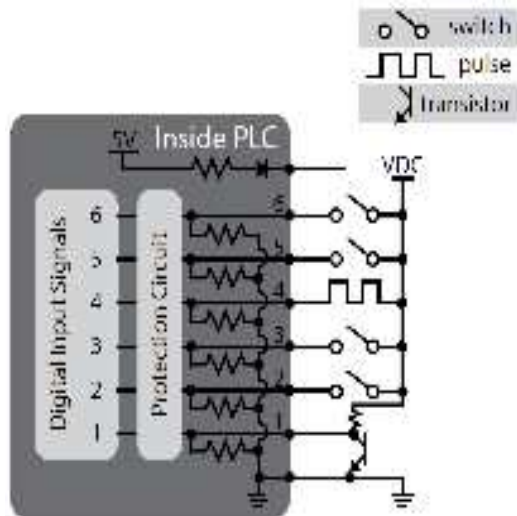
Os CLPs são dispositivos programáveis muito utilizados pela indústria. Segundo GOMES (2011), “a estrutura física do CLP é um conjunto de circuitos eletrônicos interligados formados por processadores, memórias, barramentos, dispositivos de entrada e saída, fonte de alimentação e terminal de programação.” O controlador é basicamente um computador com foco total em questões industriais, sendo bastante robusto, possuindo linguagem programável bastante instintiva e com alto controle lógico. “Um Controlador Lógico Programável automatiza uma grande quantidade de ações com precisão, confiabilidade, rapidez e pouco investimento. Informações de entrada são analisadas, decisões são tomadas, comandos são transmitidos, tudo concomitantemente com o desenrolar do processo.”[18]

Os sensores usados têm como sinal de saída uma corrente, e não uma tensão. Isso é uma ótima característica segundo Moraes e Petrucci (2015) já que os ruídos eletromagnéticos são consideravelmente

reduzidos. Além disso, um dispositivo controlado por corrente permite uma menor queda de tensão ao longo de sua saída. Os que são de dois fios são chamados de contato seco, no qual um dos fios vai na alimentação e o outro na referência. Aqueles que são de três fios são transistorizados, podendo ser junção NPN ou PNP, podendo assumir montagem tipo sourcing, com transistor interno sendo PNP, ou tipo sinking, com transistor interno sendo NPN. Nesse caso, o sensor PNP, quando acionado, terá sinal de nível lógico alto. Para o sensor NPN, quando acionado, o sinal será baixo.

Para que o controlador funcione como se deseja, deve-se, em um primeiro momento, programá-lo através de software especializado e as entradas e saídas devem respeitar a configuração especificada pelo fabricante. Nas Figuras 4 e 5, é mostrado um exemplo de como o fornecedor sugere que as ligações sejam feitas.

Figura 4 - Esquema elétrico das entradas digitais do CLP

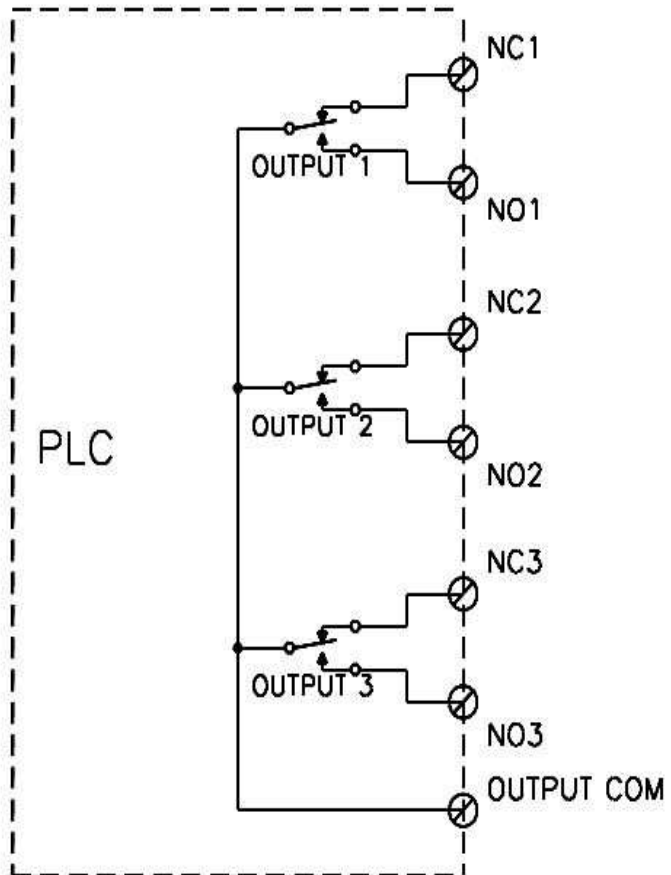


Fonte : [27]

O esquema elétrico das entradas do controlador usado seriamente representado pelas entradas 6, 5, 3 e 2. Assim sendo, as entradas são usadas como chaves, recebendo sinal quando a chave ou botão é pressionado. Como o uso das entradas pode ser representado como chaves, esse esquema foi seguido completamente. Existe uma porta

comum ao conector inteiro, podendo ser polarizada com 0 V ou 24 V. No caso do projeto feito, ela foi usada como referência em 0 V.

Figura 5 - Esquema elétrico de saídas digitais em CLP



Fonte:[26]

Os relés usados na saída auxiliaram no controle da tensão de saída, pois, no caso da placa de comando do laser, a tensão aceita nas portas de entrada é de apenas 5 V, sem necessitar fazer alterações físicas na placa.

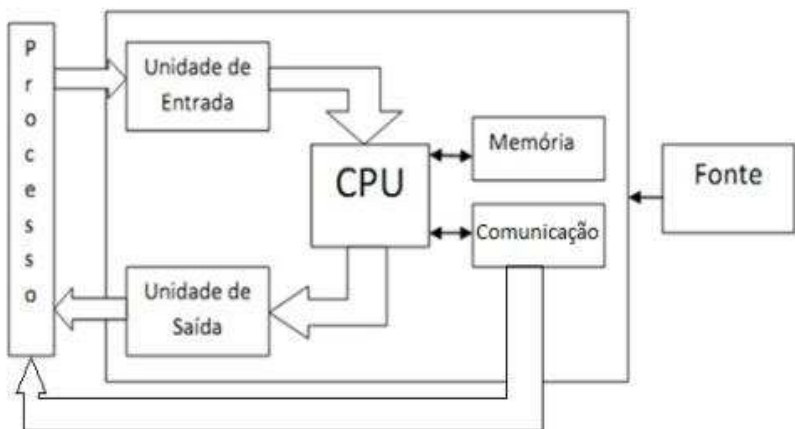
O CLP utilizado possui 9 entradas (sendo 7 utilizáveis sem nenhuma intervenção física no motor) e 4 saídas digitais, capazes de atender o projeto. A linguagem utilizada pelo controlador interno do driver é bastante parecida com C, ou seja, segundo a norma IEC 61131-

3, ela faz parte de um texto estruturado e, de acordo com [10], “esta linguagem de programação é geralmente usada para blocos de função, que são usados em outros programas com outras linguagens como Ladder ou diagrama de blocos.” Ou seja, quando as programações em bloco acabam se tornando muito mais difíceis em programas mais complexos, os programadores recorrem ao texto estruturado. Isso será bastante explorado, já que existem alguns casos específicos que, dessa forma, podem ser mais bem resolvidos, como no caso de paradas de emergência.

O texto estruturado segue basicamente todas as regras de uma linguagem de programação como o C, possuindo declaração de variáveis, estruturas, loops, while, for, case, switch, etc. No caso do CLP utilizado, a linguagem é chamada de PDL – Process Description Language (Linguagem descritiva de processo) e é própria da empresa que o construiu. O seu funcionamento é baseado em tasks, que nada mais são que rotinas de códigos podendo rodar quatro simultaneamente, tornando o dispositivo muito mais dinâmico.

A estrutura básica de funcionamento do controlador é bastante simples e é explicada na Figura 6. Como é possível ver, o dispositivo basicamente opera através da leitura das entradas que devem ser processadas de modo a se definir as saídas, de acordo com a lógica de controle implementada.

Figura 6 - Arquitetura de um CLP



Fonte: [5]

Os CLPs também possuem extensa aplicação em sistemas da indústria 4.0, já que os dispositivos modernos possuem suporte à internet. Pode ser um controlador central de várias máquinas ou individual, permitindo um alto grau de controle. Também se pode comunicar de diversas maneiras, como comunicação serial ou USB.

2.1.3 Máquinas de Estado

Os circuitos sequenciais, que são circuitos lógicos nos quais os valores de entrada dependem do valor presente e passado de entradas, podem ser assíncronos (não dependem do relógio) e síncronos (dependem do relógio). Os circuitos síncronos terão os dados conectados a esse relógio para sincronizar todas as mudanças de estados.

As máquinas de estado finitas (FSM) são um modelo matemático usado para representar programas de computadores ou circuitos lógicos. A máquina sempre está em um estado por vez chamado de estado atual [16]. Elas fazem parte dos circuitos sequenciais e representam os estados possíveis de uma máquina e suas ações para transitar entre os estados. Tais transições ocorrem em tempo de clock e devem avaliar as variações nas entradas do sistema e ir ou manter o estado que a possível variação demanda. Um exemplo de uma FSM é mostrado na Figura 1.

As FSMs possuem duas classificações: máquinas de Moore e máquinas de Mealy. No caso da máquina de Moore, a dependência vem apenas das entradas. Já na máquina de Mealy, a dependência é das entradas e dos estados, o que faz a máquina de estados ser menor, mas mais complexa. No caso desta tese, a máquina de estados projetada é uma máquina de Moore, já que as transições só ocorrerão através das entradas mostradas na Figura 1.

2.1.4 GRAFCET

GRAFCET é um acrônimo para Graphe Fonctionnel de Commande, Étapes Transitions (Gráfico de Controle Funcional, Etapas de Transições) e é um método gráfico que permite representar sistemas automatizados industriais através do modelo de estados, sendo bastante parecido com as máquinas de estados finitas. É possível simular, descrever e gerar automaticamente a partir do modelo de sistemas complexos o programa desejado. Seu funcionamento pode ser dividido em quatro partes: etapa, transição, ação e receptividade. A etapa é a

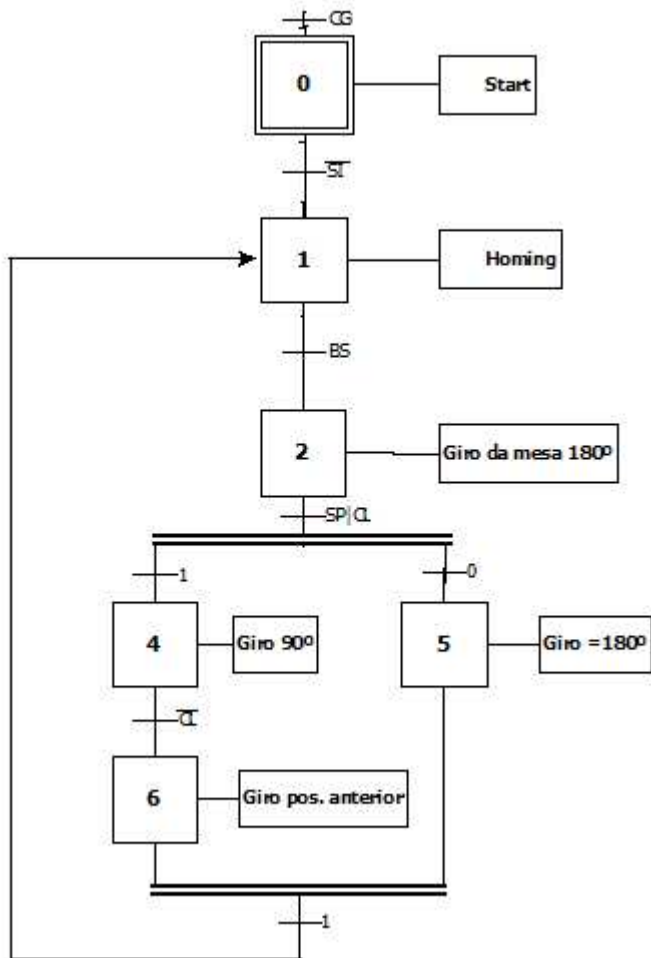
representação de um estado do sistema. A transição é uma possível evolução entre um estado e outro. A ação é a representação de uma variação de uma entrada. A última parte, denominada receptividade, é uma condição associada a uma transição. Duas etapas jamais poderão estar ligadas diretamente, devendo estar separadas por uma transição e vice-versa.

As regras de evolução do GRAFCET determinam a evolução do conjunto de etapas em determinado instante, sendo divididas em cinco:

- Inicialização
- Validação
- Disparo
- Disparos Simultâneos
- Ativação/Desativação Simultânea

Na Figura 7, o modelo do sistema aqui montado é mostrado.

Figura 7 - GRAFCET mostrando os passos de análise do CLP



Fonte: Autoria Própria

Nesse caso, CL representa a Cortina de Luz, SP o sinal enviado pela placa de gravação para o CLP, BS é o botão de Start e SI é o Sensor Indutivo. O GRAFCET ilustra todas as ações que o controlador pode realizar sobre a planta, ou seja, tudo que ele pode fazer em relação ao servo e ao sistema como um todo. Por exemplo, no diagrama da Figura 8 - não existe o giro de mesa para a posição de segurança de 90°

quando a cortina de luz está acionada. Todavia, na Figura 8 acima, a emergência não é citada, por não estar presente na comunicação com o CLP.

2.2 METODOLOGIA

Para que o projeto tivesse boa fluidez, a equipe em que esse aluno se encontrava se reuniu para discutir os principais pontos do equipamento, para que as áreas elétrica, de software e mecânica estivessem alinhadas e os objetivos fossem alcançados. Assim sendo, decidiu-se que a montagem seria dividida em etapas para que, após as mesmas estivessem completas e validadas, a montagem fosse mais correta e a preocupação única fosse a integração. Dessa forma, o projeto foi dividido nos seguintes módulos:

- Diagrama mecânico: a estrutura física da máquina em si, feita pelos engenheiros. Alguns itens, como o sistema de exaustão, são responsabilidade deles.
- Diagrama elétrico: especificado de acordo com os requisitos do cliente após a proposta inicial de funcionamento, deve cumprir também as normas regulamentadoras (NRs).
- Programação do CLP: trata-se da parte vital do projeto segundo a qual todo o controle do equipamento é feito.

2.2.1 Software Elétrico

Usou-se um programa que permite projetar diagramas elétricos, utilizando um banco de dados próprio e sendo possível acrescentar os componentes que o usuário julgar necessário. Dentro dele, existem diversas funcionalidades importantes, como endereçamento de fios, apontando em que página e quadrante a continuidade do fio está, criação de listas (materiais, cabos, bornes), layout, entre outros. Os diagramas podem ser feitos em diversos modelos, o que permite ao projetista adequar os seus esquemas de acordo com a necessidade. A criação de cabos e fios dá maior organização para o montador e o projetista, já que os mesmos contêm informações como comprimento, cor e local de conexão dos mesmos. As listagens permitem facilitar um orçamento final, já que são geradas automaticamente de acordo com os componentes incluídos no projeto. O layout mostra como os componentes serão alocados no quadro elétrico, facilitando ainda mais o trabalho para o montador.

Por permitir gerar uma lista de materiais automaticamente, o processo de incluir no sistema interno da empresa as compras necessárias para o projeto se torna mais simples. Essa etapa, portanto, foi a primeira a ser concluída, já que alguns dos componentes necessários podem levar certo tempo para serem comprados e atrasarem o prazo estipulado.

2.2.2 Programação

Como o CLP utilizado é integrado ao driver de movimento da mesa giratória, foram usados os manuais disponíveis como base. Os códigos feitos são escritos em software próprio do driver, usado também para configuração do mesmo, sendo possível controlar quase todos os aspectos de movimento do servo motor e do CLP embutido.

2.3 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

A máquina automatizada está inserida no meio industrial, o que gerou uma série de medidas de precaução a serem tomadas. Há naturalmente um cuidado especial com a segurança do operador, de forma a protegê-lo de eventuais descargas elétricas. Para isso, existe uma gama de dispositivos de proteção como: disjuntor residual, o qual desliga o equipamento com qualquer fuga de corrente (que ocorre quando o operador sofre um choque elétrico, por exemplo); chaves gerais, que garantem o desligamento e desenergização do equipamento; e disjuntores gerais, que podem e devem ser desligados antes de qualquer reparo. Logicamente, esses dispositivos também auxiliam na proteção do próximo equipamento, já que muitos deles são capazes de suportar surtos elétricos e proteger o restante do circuito de tal evento. Outros dispositivos que também serão utilizados são: relés, relés de segurança, relés de estado sólido e contadores.

2.3.1 Normas regulamentadoras

A padronização na segurança em instalações elétricas foi criada através das normas regulamentadoras. Essas normas estabelecem as condições mínimas de operação aos trabalhadores que possam vir a interagir com instalações e serviços tanto em alta tensão quanto em baixa (120 V/DC ou 50 V/AC). Tais normas regulamentadoras são bastante abrangentes e englobam desde as questões do projeto até os procedimentos de emergência.

A segurança em equipamentos elétricos possui uma importância ímpar, já que os componentes envolvidos dão proteção ao próprio equipamento e às pessoas em contato com o mesmo. Ambas as normas, tanto a 10 quanto a 12, possuem itens explicitando questões como aterramento, isolamento de fios, equipamentos, EPIs e até mesmo treinamento.

Para a máquina aqui descrita, os itens da NR-10[6] a serem destacados são o 10.6 e 10.8, ambos visando a segurança e habilitação dos trabalhadores. No 10.6 há um cuidado com as especificações de alimentação do equipamento, como citado em 10.6.1: “as intervenções em instalações elétricas com tensão igual ou superior a 50 Volts em corrente alternada ou superior a 120 Volts em corrente contínua somente podem ser realizadas por trabalhadores que atendam ao que estabelece o item 10.8 desta Norma.”. O item 10.8 é responsável por mostrar quais seriam, os trabalhadores capacitados a estar em contato com a parte elétrica da máquina, apontando que devem ter cursos, capacitação e sempre fazer uma renovação de curso a cada dois anos.

A NR-12 é mais específica para o equipamento desenvolvido, pois cita os equipamentos de segurança a serem aplicados (como um botão, por exemplo) ou a forma como a máquina deve ser acionada ou parada. Em 12.24, é notável que a norma diz que os sistemas de paradas devem estar em local acessível a todos, que não pode ocorrer acionamento involuntário e que não pode ser burlado. Além disso, essa norma requer que a máquina possua um sistema de rearme, sendo que para este, como citado em 12.40, a norma exige um reset manual. Esse rearme funciona, no caso da máquina aqui apresentada, em conjunto com um relé de segurança que só volta a ser armado quando o sistema está seguro para funcionar novamente, ou seja, não há nenhum sinal que o impeça. Além disso, o botão de emergência também é encontrado no painel frontal da máquina, desarmando o relé de segurança responsável por controlar a alimentação do circuito. Muitos dispositivos são desligados quando o botão de emergência é pressionado, o que torna o trabalho mais seguro e em sintonia com as normas.

Em 12.42, cita-se o uso de dispositivos de segurança, que, no caso, seriam os relés de segurança e o próprio CLP, que devem controlar quaisquer problemas que o sistema possa apresentar eletricamente. Esse item também cita a cortina de luz, que, conforme explicado deve impedir ou interromper uma função perigosa. Conforme citado, a cortina, ao ser acionada, enviará um sinal para o controlador, que reduzirá bastante a velocidade da mesa até que ela chegue à posição de

segurança. Caso não haja mais nada na zona de atuação, a velocidade é restaurada, já que não existe mais perigo ao operador.

O movimento de segurança da mesa quando nela há um objeto também protege o operador de um choque físico forte do acrílico com uma parte do corpo, ou até mesmo um aprisionamento entre a mesa e o restante da estrutura.

O aterramento é extremamente importante para o funcionamento do projeto. Ele, além de garantir um caminho de fuga para a corrente em situações de sobre corrente, também dá uma referência em condições de operação. Essa estabilização de tensão se mostra ainda mais importante quando se trabalha com tensões baixas como no caso da placa de comando do laser, que opera com 5 V. Conforme [20] explica, o aterramento limita surtos de tensão providos da rede, assim como facilita a operação de outros componentes de proteção existentes no circuito.

2.3.2 Requisitos Básicos

A máquina proposta deve ser precisa ao gravar as informações, usando o menor tempo possível para tal atividade, além de respeitar todas as características de segurança impostas a ela. Como o feixe de laser, se olhado diretamente, é prejudicial à visão, além do EPI do operador (nesse caso, óculos), deve-se prever uma placa de acrílico verde para proteger a visão. A cortina de luz é responsável por controlar a mesa de forma a evitar choques físicos severos e garantir que a mesa não gire enquanto o feixe de luz da cortina estiver sendo interceptado de alguma forma (pela mão do operador, por exemplo).

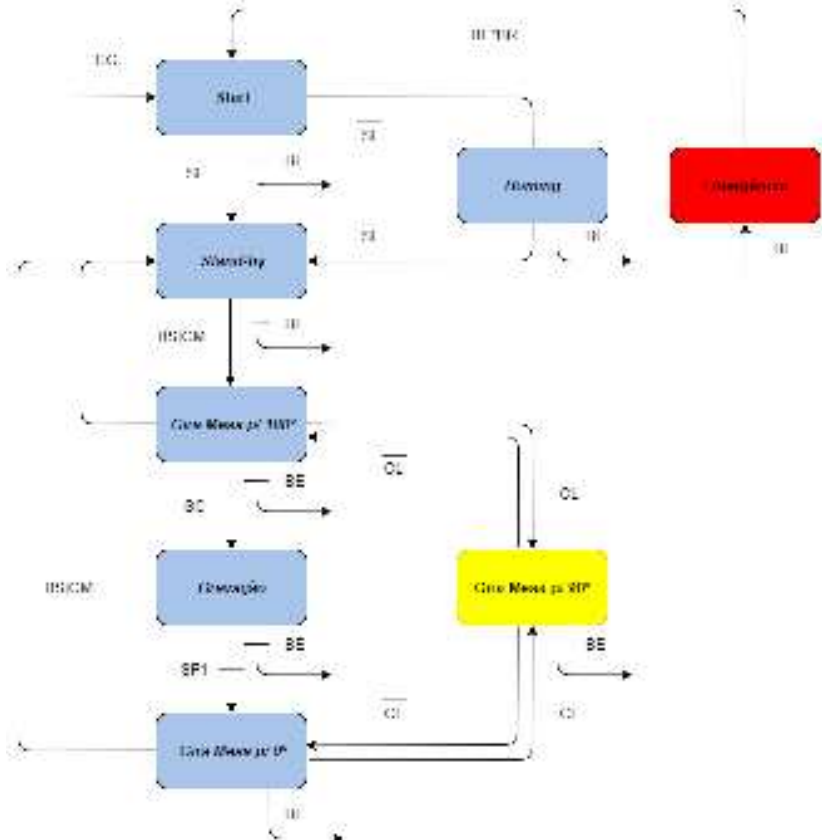
A maioria dos equipamentos que servem para desenergizar o sistema de maneira correta são conectados em um dos dois relés de segurança, que estão interconectados de maneira a proteger ainda mais o operador e o equipamento. Esses relés são amplamente utilizados como equipamentos de segurança por serem extremamente confiáveis e possuírem funções como rearme/desarme.

Conforme Moraes e Castrucci (2015), “o engenheiro-projetista de sistemas de controles de eventos discretos precisa, antes de tudo, garantir consequências bem definidas, seguras em presença de eventos externos, sejam eles raros ou frequentes,...”. Essa preocupação norteou o projeto de automação da máquina, juntamente com a busca pelo desenvolvimento de um produto de alta qualidade que ofereça vantagens sobre os produtos similares de outros fabricantes.

2.3.3 Diagrama de funcionamento

Para melhor explicar o funcionamento da máquina e os casos de uso, o fluxograma na Figura 8 abaixo foi gerado.

Figura 8 - Fluxograma representando as operações da máquina



Fonte: Autoria Própria

Nesse caso, as transições são:

- CG: Chave Geral;
- SI: Sensor Indutivo;
- BS: Botão de Start;
- GM: Giro Manual;
- SC: Sinal CLP;
- SP1: Sinal da placa de comando do laser;

- CL: Cortina de Luz;
- BE: Botão de Emergência;

A máquina deve ser capaz de responder a uma série de comandos. Estes comandos podem se originar tanto de sensores e botões como do próprio software, o qual é capaz de comandar uma pausa ou um stop. A lógica de automação da máquina, refletida no fluxograma da Fig. 1, foi projetada em conformidade com os seguintes requisitos funcionais:

- **Inicialização:** trata-se do primeiro passo no funcionamento da máquina. Após ela ter sido ligada, é feita uma leitura do sensor indutivo, que serve como referência de home para o servomotor. Caso o sensor esteja em nível lógico baixo, o motor continua girando até encontrar home. Se a máquina já estiver em home, o processo de homing é pulado.
- **Funcionamento normal:** o operador alimenta o sistema, aciona o botão Start e, com o sistema armado, a mesa gira, colocando os itens sob o laser. A partir do momento em que a mesa para, a marcação (gravação) começa. O LED do botão se desliga até que a gravação termine, sendo ligado novamente. A configuração do laser e de seu cabeçote é feita em software próprio, ajustando características como potência, frequência e altura do item. Nesse caso, o CLP aguarda que a placa responsável pelo controle do laser envie um sinal de término de marcação, permitindo o retorno dos itens gravados para retirada do operador.
- **Procedimento de emergência:** o botão de emergência é único e estará no painel. Deve ser usado, por exemplo, no caso de ocorrência de alguma falha elétrica/mecânica. Ele é usado como último recurso e só em casos excepcionais. O botão é responsável por desligar boa parte do quadro elétrico através da ligação com o relé de segurança e o relé de estado sólido. O que fica ligado, basicamente, é o sistema de exaustão, a alimentação do relé de segurança, o painel da máquina e o computador.
- **Retorno Manual:** em caso de emergência, o retorno (remoção) da peça a ser gravada é feito por um botão manual que comanda a mesa a girar 180°. É um botão de retenção e só funciona quando o servomotor não está se movendo e não está ocorrendo gravação. Após o rearme, o operador precisa girar a mesa sem que ocorra gravação para retirar os itens. O rearme é

caracterizado por permitir a reenergização dos componentes desligados no procedimento de emergência.

- Sistema de proteção: a máquina é composta por um botão de emergência, cortina de luz, relé de segurança, relé de estado sólido e disjuntores, todos com a finalidade de proteger o operário de choques físicos e elétricos. A cortina de luz será responsável por monitorar a passagem de objetos através dela. O CLP recebe um sinal booleano da cortina de luz e decide se deve ou não girar a mesa para uma posição de segurança e a mantiver até que o objeto que está imerso na cortina seja retirado. Os relés de segurança são responsáveis por trabalharem em conjunto com a cortina de luz e o botão de emergência para desenergização do circuito através do relé do estado sólido. O sistema só pode ser rearmado através do botão de rearme, também localizado no painel.

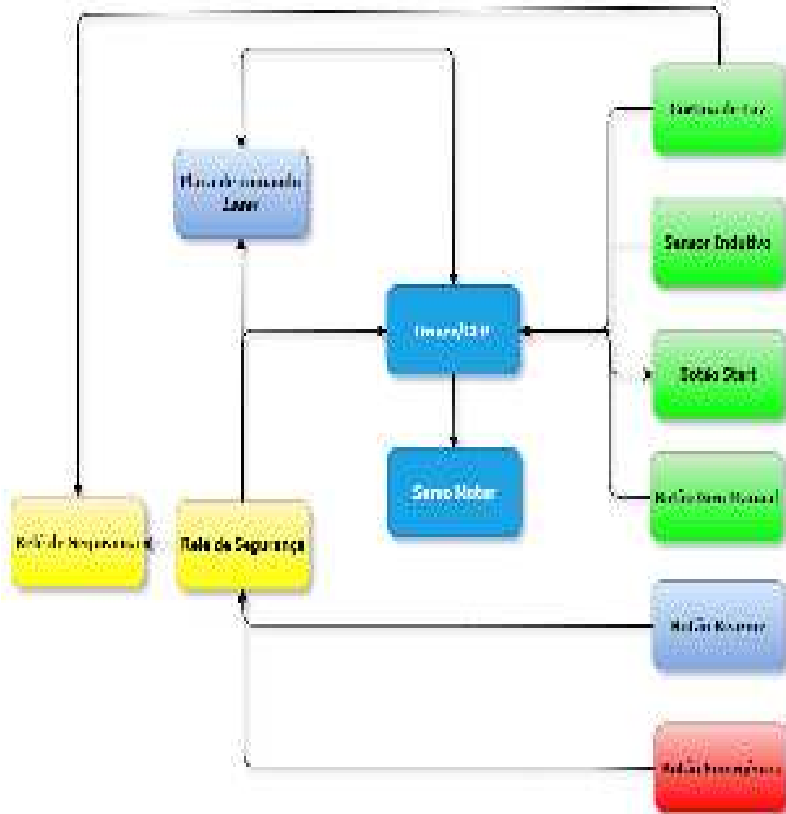
- Software: o programa é capaz de comandar parte da operação. Ele receberá em uma entrada geral o comando para início da gravação do CLP, assim como enviará o sinal para o controlador ao terminar. O programa também é responsável pelo ajuste de altura, conforme necessidade do item alimentado. Com a lente usada, o foco está a 275 mm da mesma. Caso não seja possível alcançar o foco, ou seja, a altura seja incompatível com o sistema, o operador pode tentar gravar mesmo assim, mas não é o recomendado. Nesse caso, considera-se que o item não deve ser gravado.

Todas essas funcionalidades serão integradas através de placas específicas, sensores diversos (chaves fim-de-curso, sensores de presença, indutivos, cortina de luz) e dispositivos de controle. Também haverá sistema de segurança de forma a respeitar as normas que regem esse tipo de equipamento.

2.3.4. Estrutura eletromecânica da máquina

A análise do sistema implementado, com os principais elementos elétricos, é mostrada na Figura 9. Esse diagrama permite visualizar melhor as conexões entre os dispositivos de maior relevância para a automação e segurança do equipamento. Para o correto funcionamento da máquina e atendimento tanto às normas regulamentadoras quanto aos pedidos do cliente, outros componentes também foram adicionados.

Figura 9 - Diagrama dos principais componentes elétricos da máquina



Fonte - Autoria própria

Os botões em verde são as entradas do CLP, coordenando as principais ações do controlador. A placa de comando de laser é uma entrada e uma saída do controlador, sendo assim representada por uma seta bidirecional entre os dois blocos, da mesma forma que o botão Start. O botão de emergência, mostrado em vermelho, quando acionado, abre o circuito do relé de segurança, que através de um relé ligado na porta de normalmente fechado, tira a alimentação de um relé de estado

sólido que desenergiza não só o driver e a placa de comando como fontes e borneiras. Após o botão de emergência ter voltado para a posição, o rearme deve ser pressionado para que a alimentação volte ao sistema. Existem dois relés de segurança, sendo um para a cortina de luz e outro para a emergência. Os relés estão ligados de forma que, no momento que um deles desarma, o outro também o faz. Assim, quando o rearme é acionado, ambos voltam a ser energizados.

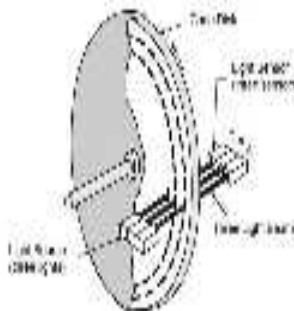
A cortina de luz de segurança é um sensor optoeletrônico o qual monitora se há um objeto em sua área de operação. A área é definida entre dois pontos nos quais de um lado encontra-se o emissor e, no outro, o receptor. A emissão da luz (não-visível) é feita por vários pequenos emissores de luz, com feixe em direção a múltiplos sensores (criando assim um feixe entre emissor e receptor). Enquanto não houver nada no caminho na recepção da iluminação, o sensor mantém o estado atual. Quando passar a existir algum bloqueio, o transdutor gera uma variação na tensão, o que possibilita a leitura da mudança por outro componente e emite um sinal.

Figura 10 - Cortina de Luz



O servomotor é um componente eletromecânico capaz de converter um sinal elétrico em torque, rotacionando de acordo com a carga recebida [7]. Esse tipo de componente é comandado por um driver, capaz de também receber sinais de comando da forma como a movimentação deve ser feita, ou seja, o número de steps que o motor deve dar. O driver também tem a função de alimentar o motor com a corrente necessária, já que muitas vezes o motor não receberá tal carga da placa controladora [8]. O servo usado foi conectado a um redutor mecânico devido à carga da mesa. Dentro do servo motor utilizado, existe um equipamento chamado encoder que, segundo Moraes e Castrucci (2015), dispõe de “um método direto para medição da posição ou deslocamento angular em eixos”. Os encoders podem ser incrementais ou absolutos. No caso dos incrementais, os autores os classificam como “aqueles que requerem um sistema de contagem de incrementos gerados por um disco girante”. Nesse caso, o disco seria o servo motor. Esse dispositivo é muito importante para o funcionamento do equipamento final, por permitir que a mesa pare nas posições desejadas. Ele também é capaz de analisar o sentido em que os incrementos estão ocorrendo, além da velocidade, aceleração e desaceleração com que o motor está operando, já que todos esses parâmetros foram usados em incrementos. Na Figura 11, há um exemplo de encoder, mostrando como os sensores são utilizados para informar se o sentido é horário ou anti-horário e a posição em que o codificador se encontra.

Figura 11 - Exemplo de encoder rotativo



Fonte [33]

Uma placa de comando de movimento dos motores também existe, a qual se comunica com o driver esperando sinais. A placa possui software próprio, permitindo ao usuário controlar diversos parâmetros como potência, comprimento de onda do laser, se o sinal de saída será alto ou baixo, controle das entradas e saídas usados e onde os desenhos de gravação são salvos com suas configurações. Essa placa também controlará o cabeçote de onde sai o laser, adaptando a altura para que o foco esteja correto.

O sensor indutivo, responsável pela verificação da posição da mesa giratória do equipamento em conjunto com o encoder do servo motor, é um dispositivo capaz de reagir à proximidade de objetos metálicos, por conseguir analisar a variação do campo magnético gerado pela mudança na indução magnética. O sensor absorve esse campo magnético e gera um sinal de saída de acordo com o preestabelecido, podendo ser a variação de uma chave NA/NF ou mudança de AC para DC e vice-versa. Há uma chapa metálica na parte inferior da mesa, de forma a encontrar o Home (posição de referência inicial, o “zero”). Na Figura 12 é apresentado um exemplo de um sensor indutivo.

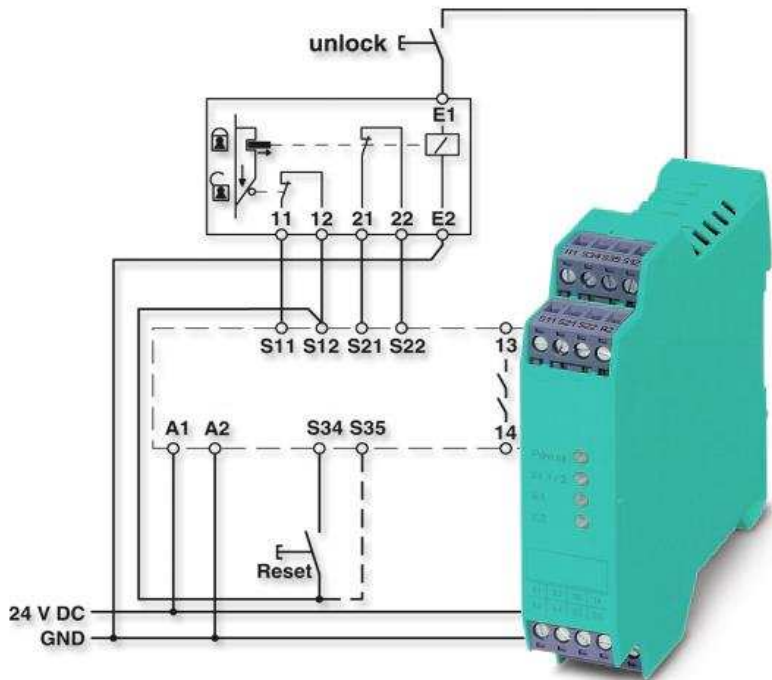
Figura 12 - Sensor Indutivo



Fonte [28]

Segundo Silveira (2014), “o relé de segurança é um dispositivo responsável por monitorar uma função de segurança como parada de emergência, porta de proteção, cortina de luz, proteção de perímetro ou controle com duas mãos. Em caso de perigo, o relé de segurança trabalhará para reduzir o risco a um nível aceitável e quando ocorrer um erro, o relé de segurança iniciará uma resposta segura e confiável. Cada relé de segurança monitora uma função específica e podemos obter o monitoramento total de uma máquina ou planta ao conectá-lo a outros relés de segurança.” O relé é, portanto, uma peça fundamental que auxilia e facilita o cumprimento de todos os itens das normas regulamentadoras, já que ele protege o equipamento através das ligações com outros dispositivos. Na Figura 13 é apresentado um esquema de um relé de segurança.

Figura 13 - Esquema de um relé de segurança



Fonte: [30]

O relé de estado sólido (SSR) é equivalente a um relé eletromecânico comum, sendo, porém, muito mais veloz e seguro e não possuindo contatos mecânicos, o que aumenta a vida útil do produto. Além disso, ele é capaz de desligar uma carga em corrente alternada para zero, o que permite o desligamento praticamente automático da alimentação de equipamentos até que o relé seja novamente alimentado. Geralmente, essa entrada é um sinal DC que controla uma saída AC. No caso do equipamento aqui desenvolvido, o SSR usado possui alimentação de 24 V através da saída do relé de segurança.

Figura 14 - Relé de estado sólido



Fonte: [37]

O relé acoplador é bastante comum em aplicações industriais, por permitir o controle de tensões que não sejam as de alimentação (geralmente 24V). Seu funcionamento é relativamente parecido com o de um relé comum, mas devido à possibilidade de comandar outros equipamentos, seu uso é mais abrangente e útil a máquinas automatizadas. Muitos desses relés possuem dois contatos para NP e dois para NA. Nesse trabalho, relés acopladores foram usados para o controle da alimentação do sistema de exaustão e também nas saídas do CLP, devido à necessidade de operação das saídas do controlador, assim como a necessidade de trabalhar tensões maiores que a de 24 V. Na Figura 15, um relé de interface.

Figura 15 - Relé acoplador



Fonte: [34]

Outros dispositivos de segurança abrangem componentes como contatores e disjuntores. Os contatores são equipamentos industriais que permitem comando de acionamento de cargas maiores, sendo semelhantes aos relés. No caso da máquina aqui descrita, ele é usado logo à entrada, comandando sua energização. Os relés são, juntamente com os disjuntores, provavelmente os dispositivos de segurança mais difundidos. O relé permite, através do acionamento por uma bobina, que uma das portas seja fechada ou aberta. Geralmente são classificados como NA ou NF sendo esse o estado em que o relé se encontra quando inativo.

Os disjuntores são a primeira linha de proteção ao sistema ao fornecerem um limite de sobrecarga imposta ao equipamento. Através de uma chave de liga/desliga, é possível controlar a passagem de corrente ao circuito e, quando ocorre uma sobrecarga, a bobina interna de controle do mesmo é acionada e interrompe a alimentação.

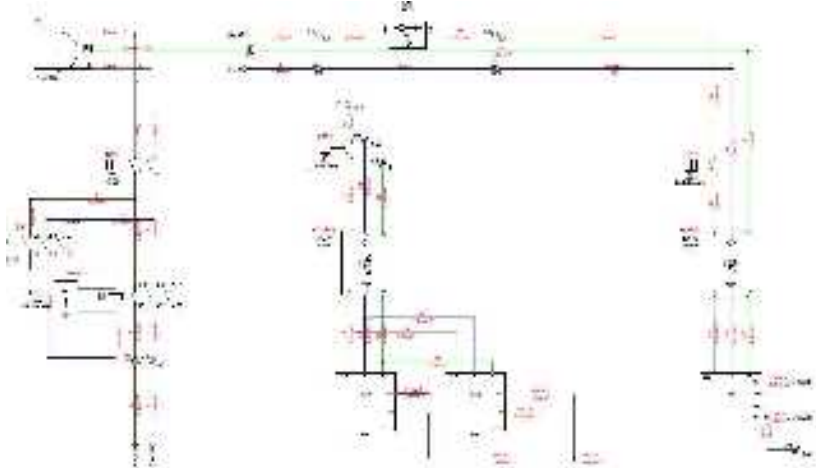
O sistema de proteção da máquina é uma parte bastante importante da sua automação, já que ele permitirá cumprir todos os requisitos necessários de segurança para um equipamento desse porte. Para isso, além de um bom projeto elétrico, a programação do controlador deve ser feita para que integre toda a montagem corretamente.

2.3.5. Projeto Elétrico

A montagem física foi acompanhada pelos operadores da linha de produção, sempre conferindo se havia alguma dúvida ou melhoria que poderia ser feita. Nessa etapa, o driver ainda não fora inserido, pois isso só foi feito após estar quase completamente programado, ou seja, quando todas as etapas foram integradas e os testes finais ocorreram. Nessa etapa, algumas mudanças no projeto foram feitas visando à melhor configuração possível para a máquina.

A primeira parte da montagem envolvia a inserção dos componentes de proteção contra surtos de tensão e corrente, como os disjuntores. O aterramento também é logo feito para garantir que a máquina tivesse um caminho para a corrente percorrer diretamente para o aterramento. Na Figura 16 é apresentado um exemplo do modelo de esquema elétrico implementado.

Figura 16 - Esquema elétrico de componentes como fontes e filtros de linha



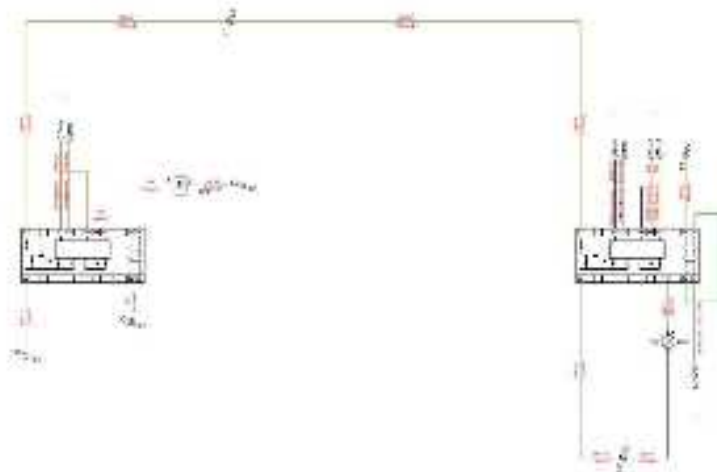
Fonte - Autoria própria

Na posição A2 é possível visualizar a tomada geral, que é conectada a uma contadora, esperando o acionamento da chave geral, representada por SW, para alimentar o restante do circuito. Um filtro passa-baixa, composto por um resistor e capacitor em série, está em paralelo com o chaveamento, feito pelo contator, para prevenção de

surtos de frequência. Também é possível visualizar as fontes, com símbolo DC, os filtros de linha, disjuntores mono polares e bipolares e as entradas um e dois de um relé de estado sólido. Mais à frente a utilização desse relé será explicada.

O circuito apresentado na Figura 17 é o dos relés de segurança. Sua alimentação é de 24 V em A1, na parte superior. O ponto de ligação mais abaixo é 0 V e se chama A2. Para que o sistema esteja armado, as entradas S12 e S22 devem estar mandando sinal. A porta S11 é a porta comum às duas. Portanto, se pensarmos no caso de um botão normalmente fechado, quando ele é acionado e abre o circuito, o sistema desarma. Portanto, nas portas S12 e S22 entra o sinal do botão de emergência. Quando o botão é pressionado, o relé desarma e a saída 13 é desenergizada, fazendo com o que o SSR desligue tudo que estiver conectado à entrada AC 220 V. Para que o sistema seja armado novamente, o botão de rearme nas portas X1 e X2 deve ser acionado quando o sinal de emergência já estiver novamente em seu estado normalmente fechado. No segundo relé de segurança, tanto o emissor quanto o receptor da cortina de luz estão ligados, de forma que, cada vez que houver um bloqueio na área de segurança, o sistema fecha os contatos normalmente abertos e um sinal de nível lógico alto é enviado para o CLP. A montagem desse item de maneira correta foi um problema, pois, além da demora em se descobrir a necessidade de conectá-lo a um relé para conseguir realmente avaliar o sinal da cortina de maneira correta, foi necessário colocar um tempo de setup no código para que o sinal ficasse estável.

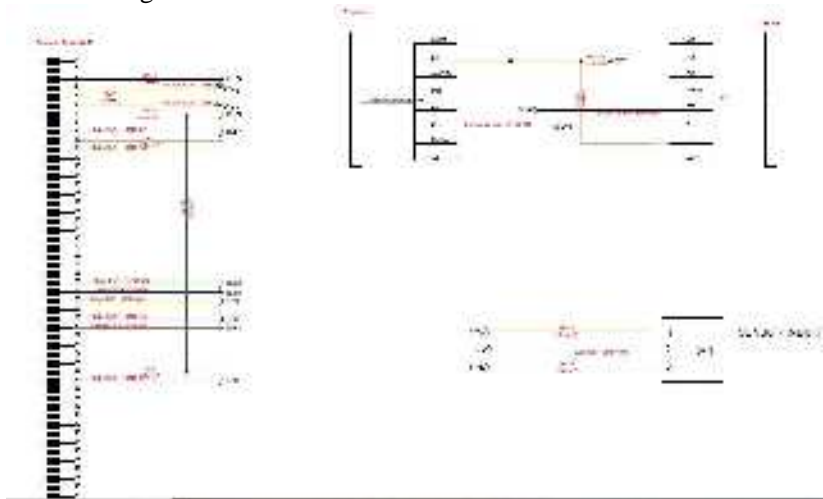
Figura 17 - Esquema elétrico de segurança NR-12



Fonte - Autoria própria

Na Figura 18, mostra-se o esquema elétrico do conector do CLP, assim como o da cortina de luz e do sensor indutivo. Em um primeiro momento, a ligação dos sensores foi feita sem o uso dos relés, o que não permitiu uma leitura correta de seu acionamento. O sensor indutivo, por exemplo, não parava o motor ao fazer homing e o sensor indutivo muitas vezes não era acionado. O acionamento era analisado através do software do controlador, que possuía uma aba com todas as entradas e, sempre que uma delas era ativada, um LED se acendia. Após a inserção dos respectivos relés, as entradas funcionaram corretamente.

Figura 18 - Conexão elétrica do driver e de sensores



Fonte - Autoria própria

No conector do driver, à esquerda, a porta 7 representa um sinal comum, podendo ser 24 ou 0 V. Acima desse conector, estão os pulsos necessários para o motor girar em sentido horário ou anti-horário. Na Tabela 1, estão os pinos utilizados para a programação do controlador e suas funções. Os negativos das saídas foram conectados ao pino comum, de forma a garantir que todos estivessem com a mesma referência. Também se fez com que a placa de comando de laser estivesse com o mesmo 0 V, pois sem isso foi impossível fazer a comunicação entre os dois dispositivos. Em um primeiro momento, conectou-se a saída da placa de comando, que informa quando a gravação finalizou a um relé, por se pressupor que a tensão não seria suficiente para o CLP reconhecer o estímulo. Porém, em testes posteriores, isso se mostrou desnecessário e uma ligação direta bastou para o funcionamento do equipamento.

Tabela 1 - Relação entre pinos, seu número e a função no circuito

Número	Pino	Função
30	I2	Sensor Indutivo
27	I4	Cortina de Luz
28	I5	Emergência
29	I6	Sinal Placa
32	I7	Retorno Manual
31	I8	Sensor Magnético
9	I9	Botão Start
37	O2+	Início de gravação
36	O2-	Comum
39	O3+	Desliga relé de segurança
38	O3-	Comum
11	O4+	desliga LED do botão start
10	O4-	Comum

Fonte - Autoria Própria

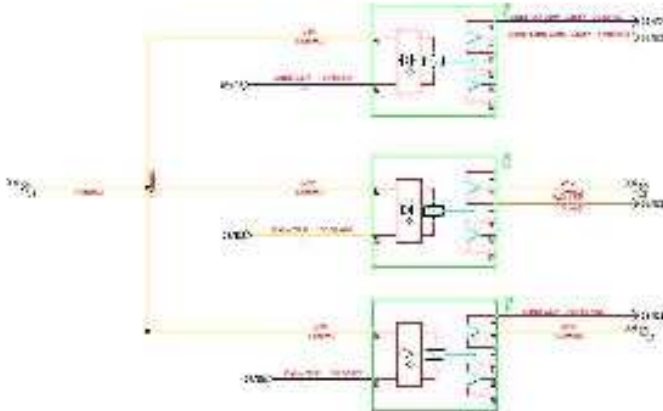
Na Figura 19, consta o esquema elétrico para as duas portas de saída utilizadas e o relé de controle do sensor indutivo. À esquerda, são mostradas as interfaces de alimentação dos relés, as quais controlam o chaveamento do dispositivo. O relé mais acima representa a saída O2, que comanda o sinal de início de marcação. Ele está como referência de alimentação para que, quando o sinal seja enviado pelo controlador, o contato vá de normalmente aberto para fechado e, assim, o 0V colocado na porta 13 de sua interface vá para a porta de entrada da placa de comando. O processo poderia ter sido feito usando 5 V, mas isso era mais complicado fisicamente devido à distância da borneira dessa tensão até o relé. Como há espaço limitado, ajustou-se através do software uma entrada de nível lógico invertido, o que garantiu que quando o CLP acionasse a saída, o laser iniciaria a marcação.

O relé do meio usa a saída O4+ para controlar a iluminação do botão start. Da mesma forma, assim que acionado, o relé comuta o estado. Todavia, nesse caso, o LED é desligado, pois estava no contato NF e não no NA.

O último relé representa o controle do sensor indutivo. Como o mesmo é NPN, seu sinal ficou conectado na porta A2 para que, quando ele acione, o relé comute seu estado para aberto e o cabo de entrada do

controlador receba 24 V, o qual estava na porta comum do dispositivo. Isso permitiu leitura em nível lógico alto no programa, não sendo necessária a inversão do sinal em todo o código.

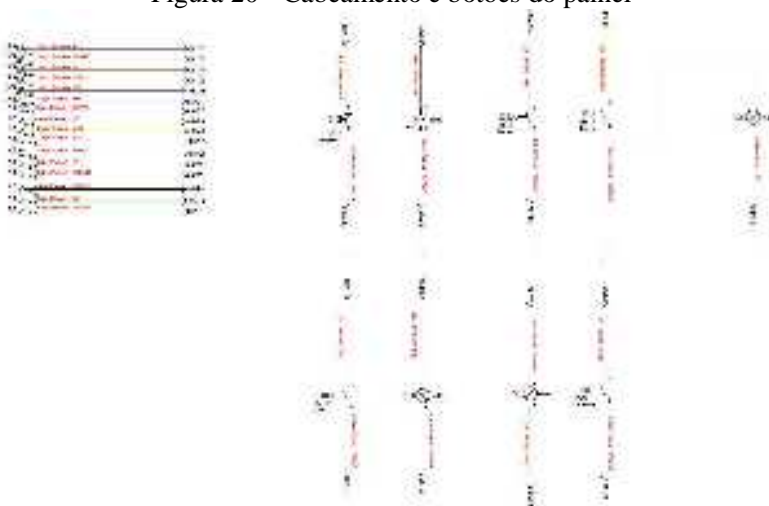
Figura 19 - Relés usados nas portas do CLP



Fonte - Autoria própria

Na Figura 20 são apresentados, os cabos e os botões do painel. À esquerda, as borneiras de sinal auxiliam no entendimento do restante das conexões. As borneiras de sinal usadas eram de dois condutores, enquanto as de alimentação eram de quatro condutores. Essas borneiras são representadas por um símbolo circular com o número da régua, o borne, qual condutor e, em caso de mais de dois condutores, o andar. A Figura 19 fortemente relacionada à Figura 20, que mostra o outro lado da borneira, apontando para onde os cabos estão indo. As borneiras são utilizadas para, além de permitir uma economia no número de cabos ao se alimentar os condutores com a mesma tensão, favorecer uma melhor organização do cabeamento da máquina.

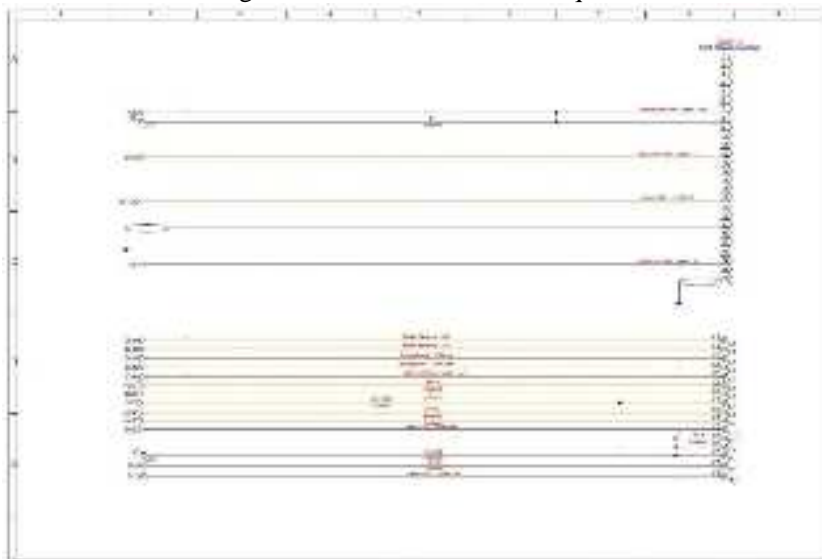
Figura 20 - Cabeamento e botões do painel



Fonte - Autoria Própria

Na Figura 21, mostra-se o cabo de inputs/outputs da placa de comando do laser. Além deles, os pinos 7 e 8 são polarizados com 0V. Além disso, existe um aterramento do próprio conector, para garantir uma referência de qualidade.

Figura 21 - Outros cabos da máquina



Fonte - Autoria Própria

2.4 PROGRAMAÇÃO

Alguns itens foram editados na versão final por sigilo empresarial. Por exemplo, o código usado não aparece nesta versão.

Com os testes sendo feitos fora da máquina, foi possível organizar melhor cada parte do código para deixá-los corretos. O diagrama de estados mostrado na Figura 1 envolve situações físicas que não estão presentes no projeto final, mas que, em um primeiro momento, foram simuladas, como a situação de emergência com controle pelo CLP. Na Figura 22 ilustra-se uma parte do código dentro do software.

Figura 22 –Exemplo de programação do CLP



```

user.pl:
=====
#define SenoIn0 I2 //Sensor indutivo na porta I2
#define Cortuz I4 //Cortina de Luz na porta I4
#define BotEmer I5 //Botao Emergencia na porta I5
#define SinalJG2 I6 //Sinal da placa jog na porta I6;
#define GiroManual I8 //Retorno Manual na porta I7;
#define Start I9 // Sinal de start do painel na porta I9;
#define Safe O3 // Sinal de saída para desligar rule de segurança
#define Laser O2 //Sinal de saída que manda o laser iniciar gravacao
#define LedBotao O4 // Led do botao start
%float _X_vel // Variavel para setar a velocidade do motor
%float _X_vel_seg // Variavel para setar a velocidade do motor com velocidade menor
%float _H_C90 //Define numero de pulsos para giro de 90 da eesa
%float _H_G180 //Define numero de pulsos para giro de 180 da eesa
%float PosAtual // Variavel comparadora
%short _Sentido_M // =1 Sentido Horário / =0 Sentido Antihorario
%short Pos_Gravacao // =1 Posicao de gravacao

#task/1: // estabelece a serie de tarefas como task 1

```

Fonte - Autoria própria

Um estudo do manual do driver e do CLP interno foi feito para analisar o seu funcionamento. Várias funções que precisaram ser usadas eram internas do próprio componente. Isso abriu as possibilidades de utilização do controlador, já que existia mais de se implementar a programação para o projeto.

Primeiramente, foram definidas as variáveis e os nomes das portas de entrada e saída utilizadas para melhor visualização durante o decorrer do código. As portas I2 a I8 são os sinais de entrada do CLP. Esse código é o primeiro, não representando o código final na máquina, mas serviu como base para o projeto. Ele pode ser visto na Figura 22 logo acima. Em tese, a ideia era só mudar o necessário, ou seja, os valores das variáveis iniciadas, pois as mesmas representam números counts que inerentemente variam devido ao uso de um redutor acoplado ao servo motor.

Após a inicialização das variáveis, em definição de parâmetros iniciais, o programa realmente inicializa na label `_Principal`. Um comando de aguardo de tempo é dado em ambos os casos, pois há um tempo de compilação em que o programa já é inicializado e isso era indesejado devido à função de homing logo em seguida. O tempo está em milissegundos. A função de homing é configurável através do software. Para isso, usou-se a porta como um valor de proximidade do index do servo motor. Quando o motor atinge home ele zera o valor de counts no encoder. Apesar de o valor não ficar permanentemente em zero, devido à função de ganho automático do servo, com a qual ele mede a carga aplicada, é possível deixar o valor bastante próximo, com variação máxima observada de 20 counts, o que, após muitos usos, desapareceu. O valor estava constantemente próximo de 0. Após um

tempo, percebeu-se que o redutor não estava bem apertado, o que dava variação na posição. Arrumou-se e, assim, a posição se tornou mais precisa.

Como duas posições são muito importantes, foram criadas variáveis das mesmas: N_G90 e N_G180 - que representam o número de counts para se atingir um giro de 90 e 180 graus, respectivamente.

No laço principal foi programada a situação de operação normal da máquina. Nesse caso, o operador será capaz de, após configurar a peça em software, alimentar a mesa, girá-la, colocar outros itens na segunda posição de gravação, e, ao término, retirar os itens gravados. O processo pode ser repetido quantas vezes desejar, desde que sejam respeitadas as normas de segurança impostas. Para garantir que não houvesse nenhuma interrupção da cortina de luz enquanto o motor estava girando, criou-se uma flag capaz de reconhecer tal execução. Como nesse caso não ocorreu tal problema, o programa vai funcionar normalmente e o ciclo pode ser repetido.

A função de homing é responsável por garantir que o servo motor pare na posição correta de início, ou seja, encontre seu zero. Após conseguir, o sistema está pronto para continuar sua operação normal. Caso não consiga, uma flag interna é levantada. O processo é feito até que home seja encontrado. Esse passo é extremamente importante, pois o correto funcionamento do programa depende muito da posição do encoder que, como já citado, é zerada quando o home é atingido.

A rotina GiraMesa180, conforme o nome deixa explícito, deve girar a mesa em 180°. Ela lê a posição atual do encoder e decide se deve ir para 0 ou 5300 counts. O número 100 é um valor de segurança que permite uma tolerância alta ao controlador de análise à posição que se encontra o encoder. Como essa rotina só é chamada após o motor estar parado, quando a mesa estiver em zero, ou muito próxima dele, esse valor sempre irá para o lugar certo. O mesmo pode ser dito de quando a mesa se encontrar em 5300, pois é um valor muito maior que 100, garantindo que a mesa gire para o local correto. Nesse caso, o movimento de 180° será intercaladamente em sentido horário e anti-horário.

A rotina ChecaPosição se mostrou necessária devido às possíveis interrupções, conforme citado anteriormente. Novamente o valor de 100 counts foi usado para avaliar uma faixa pequena, na qual se o encoder não estiver na posição da faixa, mostra que houve uma interrupção no meio da operação normal, sinalizando que a mesa deve retornar à posição que se encontrava antes de iniciar o movimento. Os valores usados foram um e zero, pois não é possível usar true e false para essa

linguagem. Portanto, quando o valor não está na faixa, ocorrerá uma punição de um ciclo, obrigando o operador a girar a mesa em 180° novamente para iniciar o processo corretamente.

Quando o código alcança `_Gravar`, o motor já parou de funcionar e, conseqüentemente, já está em posição para iniciar a marcação. Um sinal do CLP é enviado para a placa de comando e, logo em seguida, o LED existente no botão de start no painel se apaga. O sistema aguarda por um sinal vindo da placa, representado no programa por I60 qual, através do estado lógico negado, avisa que terminou a gravação. Assim o LED do botão é novamente acionado e o operador pode acioná-lo para girar a mesa.

Assim, a tarefa 1 volta ao seu laço inicial. O multitasking desse controlador permite um paralelismo entre quatro tarefas, o que auxilia muito na previsão de tomadas de decisão.

A tarefa 2 consiste na leitura dos sensores, esperando pelos casos já antecipados. Isso é mostrado na rotina `_LeSensores`. A cortina de luz, por exemplo, só tem seu sinal considerado quando o motor está se mexendo, ou seja, se a cortina for acionada com o motor parado, seu sinal será ignorado, conforme desejado, já que enquanto ocorre a gravação de um lado, do outro ele coloca os próximos itens a serem gravados, desde que com a mesma configuração. Portanto, caso o operador os tenha colocado no gabarito erroneamente ou eram os produtos incorretos, e ele acabar por tentar mexê-los após o início do movimento do motor, o motor vai até a posição de segurança de 90° em velocidade menor do que a usual e lá fica até que o que estiver obstruindo a cortina de luz seja retirado. Assim, a mesa retornará a girar para no sentido ao qual anteriormente estava indo. Ao chegar em 90°, a mesa poderá voltar a andar na velocidade de quando o equipamento está operando normalmente. Essa análise pode ser vista na rotina `_GiraMesa90` e logo após dela, com as implementações de `till`, que aguarda o sinal chegar no estado em parênteses.

Como é possível ver, se fez necessário zerar a variável de posição para que o programa consiga movimentar a mesa corretamente após a interrupção.

Quando o botão de emergência é acionado, ele desliga a saída O3, conectada a um relé de interface que desarma o sistema. O botão de retorno manual serve para que o operador o pressione, caso a emergência tenha sido acionada na posição de homing e os itens estejam presos na área de gravação ou caso o operador deseje arrumá-los logo antes de o laser iniciar a marcação. Para seu funcionamento, portanto, o motor não pode estar rodando e a gravação não pode ter se iniciado.

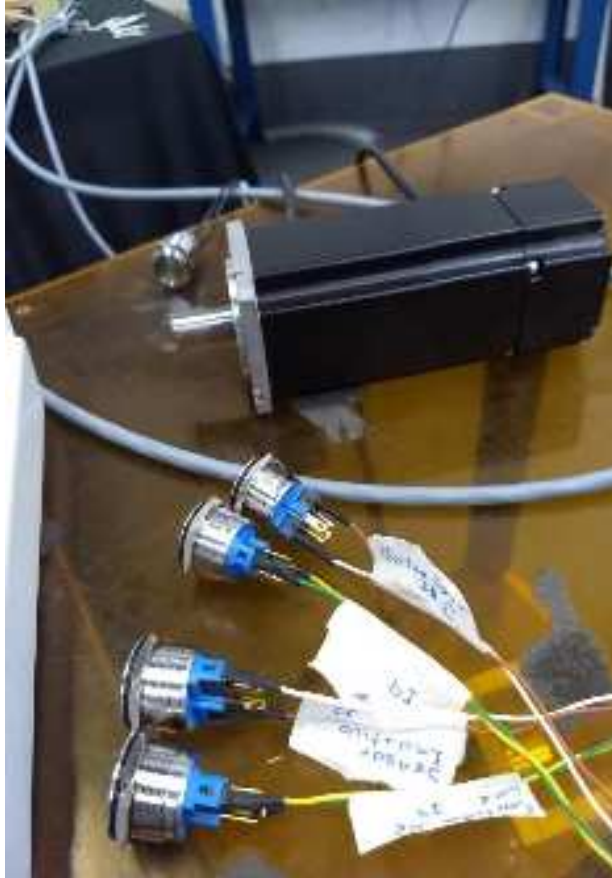
Os resultados acima são todos fora da máquina. Em máquina, os testes serão todos refeitos e apresentados aqui.

3RESULTADOS

Primeiramente, fez-se uma análise da lógica do programa a ser desenvolvido. Devido às características do driver, a máquina de estados serviu como base para alguns estados previstos, mas nem todos eram responsabilidade do CLP.

Os testes desta parte foram feitos em laboratório com o driver e o servo motor já conectados, prevendo as situações citadas anteriormente. Alguns sensores foram substituídos por botões para acionamento de nível lógico nas portas. Os botões usados eram de retenção, podendo ou não manter o estado lógico sem estarem pressionados. Nas Figuras 23 e 24 são apresentadas, as imagens de como os testes foram feitos.

Figura 23 - Botões de entrada e servo motor utilizado

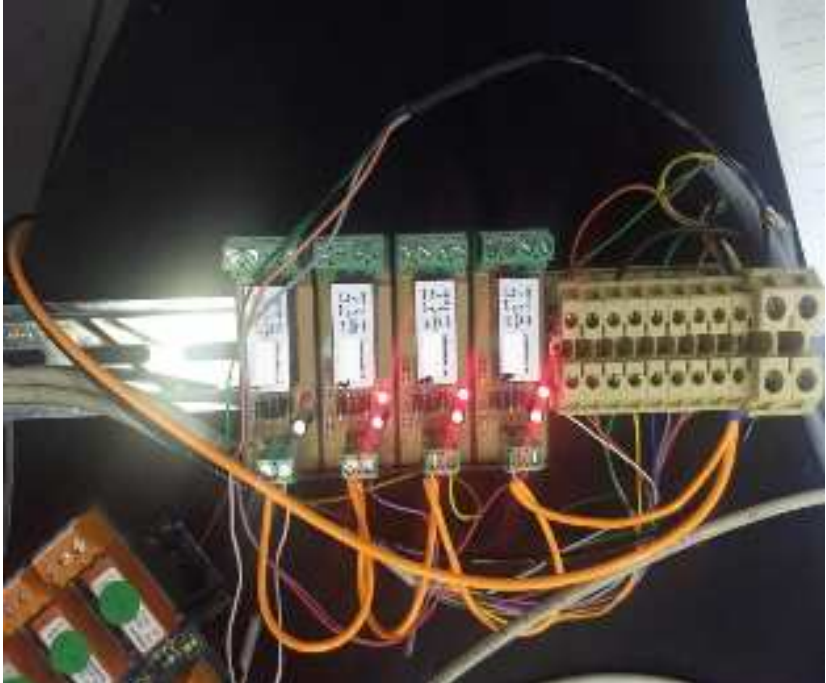


Fonte - Autoria própria

Os botões acima simulavam o trabalho do sensor indutivo, da cortina de luz, do botão start, do sinal enviado pela placa de comando do laser e pelo botão de giro de mesa. Cada um foi sendo testado separadamente. Após garantir que todos funcionavam individualmente, as funções mais complexas que envolviam mais de um acionamento foram acontecendo. Por exemplo, após iniciar o giro para 180 graus, apertava-se o botão da cortina de luz para garantir que o motor iria para a posição correta. Em um primeiro momento, tentou-se zerar a posição do encoder para que o motor girasse sempre na mesma direção, sendo em direção contrária somente no homing e quando devia voltar para a

posição de segurança. Porém, isso tornou o código muito mais complexo, pois sempre que se buscou colocar a posição em zero fora de home o motor acabou fazendo movimentos inesperados.

Figura 24 - Relés na saída para testes do software



Fonte: Autoria Própria

Nesse caso, foram utilizadas todas as saídas para, durante os testes, melhor visualizar os locais de possíveis problemas e corrigi-los mais rapidamente. Por exemplo, algumas rotinas foram feitas usando as saídas ligadas, o que facilitou entender como o programa estava se comportando. Esses testes foram apagados no código final por não possuírem nenhuma funcionalidade prática. Porém, com os testes, uma mudança no plano inicial foi feita, usando a saída do CLP para controlar o LED do botão de start, não previsto no início do processo.

Alguns códigos foram baseados nos próprios manuais que acompanham o aparelho, como o de Homing, adaptando o necessário para o correto funcionamento do projeto. Como a máquina possui uma série de estados possíveis, o programa foi sendo montado aos poucos,

analisando o funcionamento de cada rotina, laço e ideia colocada no software. Isso permitiu já corrigir erros como direção de movimento e velocidade do motor.

Após esse processo, com o funcionamento completo, fizeram-se testes in loco na máquina, passando o cabeamento pela máquina e testando cada botão por vez, mas ainda com o motor fora da mesa. Ao término dos testes e com o funcionamento de acordo com o esperado, os relés foram instalados na máquina. Finalmente, os testes foram feitos, com a máquina respondendo positivamente. Esse procedimento era um pouco mais lento, mas garantiu que ao final da montagem todos os botões fossem operacionais.

Na Figura 25, a máquina é mostrada em posição de homing.

Figura 25 - Máquina em posição de homing



Fonte - Autoria Própria

No painel, no canto direito superior, o botão aceso é o de start. O botão logo à esquerda é o de giro manual, abaixo do qual está o botão de rearme. O botão vermelho é o de emergência e o seu imediato superior é o de iluminação da máquina. Por fim, no canto inferior direito, está o botão de exaustão.

A máquina nessa posição está pronta para funcionar. Onde estão a chapa metálica e a chapa laranja encontram-se os gabaritos onde os itens serão colocados. O laser fica acima de onde a chapa plástica se encontra. Na Figura 26 é apresentado, o cabeçote com o laser.

Figura 26 - Cabeçote do laser e área de gravação



Fonte - Autoria Própria

Existem duas chapas laterais: uma por onde se acessou para tirar a foto, e a outra é visível na imagem, que vão em conjunto com a máquina. Essas chapas são fechadas à chave para evitar possíveis quedas ou que alguém abra a máquina acidentalmente.

Na Figura 27, é apresentada a máquina em posição de segurança.

Figura 27 - Máquina em posição de segurança



O LED do botão start, conforme esperado, está desligado, pois o programa não está pronto para gravar. Além disso, com a mão no caminho da cortina de luz, a máquina fica parada nesse estado até que o operador a retire. A máquina, então, voltará à posição em que se encontrava. Por exemplo, se a chapa laranja estava sob o laser, ela retorna a essa posição. Caso a interrupção não tivesse ocorrido, ela estaria à frente do operador.

Iniciou-se, então, um período de estresse e de tentar burlar a máquina. Os primeiros passos foram pressionar os botões ao mesmo tempo. Quando alguém tenta pressionar o giro manual e o botão de início ao mesmo tempo, não há como prever qual estado será assumido. Porém, com os testes, viu-se que muito raramente os dois são pressionados exatamente ao mesmo tempo e, assim sendo, o equipamento vai para o que é apertado primeiro. Também não se ocupou muito tempo com uma situação que muito provavelmente não ocorrerá, sendo então ignorada. Outros testes, como o múltiplo acionamento da cortina de luz, permitiram validar o funcionamento da máquina.

As fontes primeiramente solicitadas não forneciam as correntes necessárias ao circuito e preferiu-se utilizar materiais já em estoque. Como essas correntes eram fornecidas nas duas fontes de 24 V, essa configuração foi feita. A fonte de 36 V alimenta o driver do motor que comanda a altura do laser. A fonte do laser é exclusiva e vem no conjunto do mesmo, requerendo só um teste simples feito pelos operadores para garantir o seu funcionamento.

4 CONCLUSÃO

A automação industrial é um segmento que vem apresentando mais e melhores ferramentas para incrementar sistemas e aparelhos, sendo uma área da engenharia bastante dinâmica e com uma infinidade de possibilidades. Isso permite às empresas serem criativas, gerarem novas soluções e se manterem atuais com seus clientes. A máquina aqui apresentada se mostrou confiável e pode competir com os outros produtos da mesma linha existentes no mercado a um preço aceitável.

O projeto elétrico funcionou corretamente sem apresentar quaisquer problemas para ser desligado ou ligado quando necessário. Isso mostra que a lógica do programa foi bem integrada aos componentes para que a máquina operasse como esperado.

O projeto realizado cumpriu os objetivos apresentados ao início da tese, além de algumas especificações adicionais, como o acionamento do LED do botão de início e o uso de relés de interface para garantir a operação do equipamento. Um detalhe observado é que a cortina de luz não desarma o sistema, como se previa inicialmente. Isso porque ela será constantemente acionada, como explicado durante os ciclos de funcionamento. O operador sempre colocará novos itens a serem gravados. Caso ela desarmasse o relé de segurança sempre que acionada, o tempo de uso seria extremamente alongado, o que não se deseja.

Para conseguir manter o prazo, os testes apresentados aqui deveriam ter ocorrido mais cedo, pois sem os mesmos foi impossível perceber como o CLP opera. Além disso, uma das melhoras seria uma melhor análise de custos da máquina, que acaba possuindo itens de valor acima de mercado, como o controlador. Por exemplo, poder-se-ia comprar um controlador separado do driver e usar um driver mais barato. O kit de servo motor possui um preço elevado. Além disso, o tempo perdido com os testes foi muito alto por desconhecimento do software de configuração do driver, o que poderia ser evitado usando os itens separados.

O programa feito acaba girando tanto para 180° quanto para -180° o que não era a ideia inicial. Pensava-se em girar sempre para o mesmo lado e, somente quando fosse necessário, ir para a posição de segurança que ele giraria em outro sentido. Isso não foi possível por não saber-se zerar o encoder do servo motor. Uma solução mais elegante seria não perder o ciclo após esse acionamento, como quando já ocorre. O operador, por exemplo, poderia receber uma pergunta selecionável no computador na qual ele informaria se desejava que as peças fossem

gravadas ou não. Isso poderia ser feito através de uma entrada, mas seriam necessárias mudanças físicas no servo e no driver que são desconhecidas ao autor para liberar as duas inputs que são utilizadas pelo sistema para garantir seu correto funcionamento.

Um maior conhecimento de equipamentos de automação industrial permitiria, além de economia nos custos operacionais, uma implementação mais fácil, assim como melhoraria ainda mais a máquina. Poder-se-ia, por exemplo, usar outro sensor para trabalhar em conjunto com o sensor indutivo e o processo de homing seria mais veloz, desde que fosse criada uma nova rotina desse processo.

A integração do produto à rede (internet), com um controlador mais completo, também permitiria em tempo real, desde que com o aval do cliente, uma leitura das atividades do equipamento, analisando seu desempenho, observando possíveis falhas e programando eventuais manutenções. Um CLP mais avançado também permitiria o uso de uma interface homem- máquina, podendo até mesmo comandar a máquina a longa distância. Todas essas melhorias são possíveis, porém seu desenvolvimento requer bastante tempo.

REFERÊNCIAS

- [1] How Lasers work. Disponível em: https://lasers.llnl.gov/education/how_lasers_work Acesso em 10 março de 2019
- [2] GOULD, Gordon.. "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation".Pasadena ; Sands R.H. (eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, Universidade de Michigan. p. 128.
- [3] NR10|Segurança e Eletricidade. Disponível em: <http://falandodeprotecao.com.br/nr10-seguranca-e-eletricidade/> Acesso em 4 abril de 2019
- [4] Cortina de Luz de Segurança. Disponível em: <http://www.decibel.com.br/seguranca-eletronica/cortina-luz-seguranca.php> Acesso em 4 abril de 2019
- [5] Arquitetura do CLP. SILVA, Rafael Rodrigues da. Arquitetura do CLP.2012. Disponível em: <https://profrafaelrs.wordpress.com/2012/11/27/arquitetura-do-clp/> Acesso em abril de 2019
- [6] Norma regulamentadora NR-10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10.htm> Acesso em 4 abril de 2019.
- [7] Motores de passo: Definição e características. Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/definicao-de-motor-de-passo/> Acesso em 4 abril de 2019
- [8] Controlando Motores: Motor de passo. Disponível em: <https://www.robocore.net/tutoriais/97.html> Acesso em 4 abril de 2019
- [9] “*Motor Encoder Overview*”. Disponível em: https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/motor_encoders/ Acesso 4 em abril de 2019
- [10] ROCKWELL, Automation. Logix5000 Controllers Structured Text. Wisconsin: Allen-Bradley, 2012.

[11]Lasers: Fundamentos. Disponível em:
http://www.fis.uc.pt/fa/discs/wc.show_doc.php?id_disc=195&id_turma=&id_typ=19&id_typedoc=2&id_doc=22203&anolect=20092010
Acesso em 4 abril de 2019

[12]DUARTE, Felipe. Contatores: O que são e para que servem.
Disponível em:<https://www.bluelux.com.br/contatores-o-que-sao-e-para-que-servem/> Acesso em 4 abril de 2019

[13]MARCONDES. José Sérgio. O que é relé?Como funciona um relé?
Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-rele-como-funciona-um-rele/> Acesso em 4 abril de 2019

[14]Sensores de abertura ou magnéticos: Definição e funcionamento.
Disponível em: <https://gestaodesegurancaprivada.com.br/sensores-de-abertura-ou-magneticos/> Acesso em 4 abril de 2019

[15]WAGNER, F.StateWORKS: Moore or Mealy model?.2005.
Disponível em: <http://www.stateworks.com/technology/TN10-Moore-Or-Mealy-Model/> Acesso em 10 maio de 2019

[16]TIWARI, A.Formal Semantics and Analysis Methods for Simulink Stateflow Models. No Prelo.

[17]GRAF CET. 2016. Disponível em:
<https://www.conhecimentogeral.inf.br/grafcet/> Acesso em 10 maio de 2019

[18]MORAES, Cícero. Engenharia de Automação Industrial. 2ª edição.Rio de Janeiro:Gen, 2015.

[19] LEE, Edward A.Introduction to embedded systems: a cyber-physical systems approach. 2ª Ed. Cambridge : MIT Press, 2017.

[20] Relé de Segurança. Disponível em:
<https://www.schmersal.com.br/seguranca/produto/rele-de-seguranca/>
Acesso em 6 junho de 2019

[21]NURFERN, Corporation. How Fiber Laser Works.2014.(13m20s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ofEqFlqkiS0>
Acesso em: 6 junho de 2019

[22] R. Sen et al., “High power fiber lasers: fundamentals to applications,”2016.9f. Artigo – Kolkata, 2015. P. 319-326.

[23]<http://www.automatisa.com.br/quem-somos.html>. Acesso em junho de 2019

[24]SILVA, Domiciano Correa Marques da. "Lei de Snell-Descartes"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/lei-snell-descartes.html>. Acesso em 28 de junho de 2019.

[25]PASCHOTTA, R. FiberCouplers. Disponível em: https://www.rp-photonics.com/fiber_couplers.html Acesso em 28 de junho de 2019

[26] PLC Output Types. Disponível em: <https://instrumentationtools.com/plc-output-types/> Acesso em 28 de junho de 2019

[27]Digital Inputs – HowtoWire Digital Inputs of ACE PLC.Disponível em: <https://aceautomation.eu/digital-inputs-how-to-wire-digital-inputs-of-ace-plc/> Acesso em 28 de junho de 2019

[28]<https://riocontrol.com.br/produto/sensor-indutivo-faceado-lm12-3002nc-fab-jng/> Acesso em 28 de junho de 2019

[29]SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. Relé de Segurança: Atendendo a NR-12. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/rele-de-seguranca/> Acesso em 28 de junho de 2019

[30] Safety Relays- Where and how they work. Disponível em: <https://www.galco.com/comp/prod/saftrela.htm>. Acesso em 28 de junho de 2019

[31] Cortina de Luz. Disponível em: <http://www.tritec.com.br/produtos/product/cortina-de-luz/>. Acesso em 28 de junho de 2019

[32]SolidStateRelay.Disponível em: <https://www.electronicstutorials.ws/power/solid-state-relay.html> Acesso em 28 de junho de 2019

[33] Incremental Encoder – TTL.Disponível em: <https://www.a-m-c.com/experience/technologies/encoder-feedback/incremental-encoder-ttl/> Acesso em 28 junho de 2019

[34]Relés de interface o que é e para que serve. Disponível em: <https://eadensinandoeletrica.com.br/reles-de-interface-o-que-e-e-para-que-serve/> Acesso em 28 de junho de 2019