

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM ROBÔ
CARTESIANO DE 3 GRAUS DE LIBERDADE**

Maycon Oliveira Fernandes

Brasília, Julho de 2016



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO DE 3 GRAUS DE LIBERDADE

Maycon Oliveira Fernandes

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

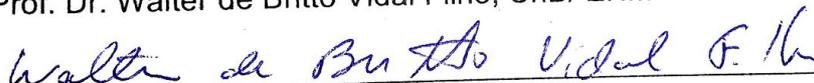
Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho, UnB/ ENM (Orientador)



Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos Quintero, UnB/ ENM



Prof. Dr. Walter de Brito Vidal Filho, UnB/ ENM



Brasília, Julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, MAYCON OLIVEIRA

- Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade,
- [Distrito Federal] 2016.
- xi, 85p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2016). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Robótica

2. Soldagem 3D

3. Robô Cartesiano

4. Projeto de Pannel Elétrico

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, M.O., (2016). Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº06, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Maycon Oliveira Fernandes.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Projeto de instalação de um robô cartesiano de 3 graus de liberdade.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Maycon Oliveira Fernandes

Brasília – DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais João e Sirlene pelo apoio incondicional à realização de todos sonhos/planos/projetos que tenho, incluindo o de me tornar engenheiro.

Agradeço também aos amigos que fiz durante a graduação que foram minha grande família em Brasília, e, essenciais nessa trajetória desafiadora de morar longe de casa. Em especial faço menção ao amigo e primo Isaac que me acompanhou do começo ao fim dessa graduação.

Por fim, agradeço ao meu professor orientador, Dr. Guilherme Caribé pela proposta de trabalho e a todos professores que foram efetivos em minha formação profissional, os quais fazem da Universidade de Brasília uma das melhores universidades da América Latina.

Maycon Oliveira Fernandes

RESUMO

O presente trabalho descreve o processo de instalação de um sistema robótico para Soldagem 3D nos aspectos mecânicos e elétricos. Isso envolveu aspectos de concepção, especificação e orçamento de partes adquiridas do robô cartesiano em fabricantes consagrados no mercado. Foram feitos cálculos de deflexão dos eixos do robô, projeto de uma base para o sistema e projeto de acoplamento da tocha de solda no efetuador terminal. Através de uma simulação da movimentação do robô no envelope de trabalho, foram evitadas colisões, verificados os posicionamentos das juntas do robô em tempo real e gerado código na linguagem Karel2 da trajetória percorrida. Por fim, o produto final será um robô funcional, apto a movimentar uma tocha de soldagem por um caminho previamente programado.

Palavras Chave: Robótica; Robô Cartesiano; Cálculo de deflexão; Instalação Elétrica; Soldagem 3D.

ABSTRACT

The current report describes the whole installation process of a cartesian robot system for a 3D Welding process. In other words, this project involves technical specification of parts to be bought and request for quote documents by top industries in the market. Also, designing and assembling either mechanical and electrical robot's parts as well as designing mechanical structure, deflection upon robots axis and an interface for attaching a welding torch on the robot's end effector were made. Furthermore, it is shown a simulation which detects collision, working envelope, checks in real time the robot's joint position and generates path programming code in Karel2 language. Overall, the expected final product is a working robot, able to move a welding torch by a path previously programmed.

Keywords: Robotics; Cartesian Robot; Deflection Calculus; Electrical Installation; 3D Welding.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	12
1.1 ASPECTOS GERAIS	12
1.2 OBJETIVO.....	13
1.3 METODOLOGIA.....	13
1.4 COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO	14
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 ROBÓTICA E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES	16
2.2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA COMO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	17
2.3 TECNOLOGIA DE CONTROLE.....	19
2.3.1 Controlador IndraMotion MTX - Bosch Rexroth	19
2.3.2 Controladores de movimentos Lexium 32 e Modicon LMC058LF42 – Schneider Electric.....	21
2.3.3 Controlador Kinetix – Rockwell Automation	22
2.3.4 Controlador Lógico XGT – LSIS Co. Ltda	22
2.3.5 Trio Motion Technology.....	23
2.4 ATUADORES	24
2.4.1 Bosch Rexroth	24
2.4.2 Schneider Electric	25
2.4.4 Rockwell Automation	26
2.5 SENSORES	27
2.6 DRIVES	30
2.7 NORMA PARA REPRESENTAÇÃO DE PAINÉIS ELÉTRICOS	31
CAPÍTULO 3 - PROJETO	32
3.1 ESTABELECIMENTO DE REQUISITOS	32
3.2 SELEÇÃO COM BASE EM SISTEMAS DISPONÍVEIS.....	32
3.3 DESENHO MECÂNICO	35
3.4 CÁLCULO DE DEFLEXÃO MÁXIMA SOBRE O EIXO Y.....	37

3.4.1	Cálculo Estático.....	37
3.5	SIMULAÇÃO CINEMÁTICA.....	44
3.6	PROJETO ESTRUTURAL DA BASE DO PÓRTICO.....	50
3.6.1	Cálculo de deflexão máxima.....	53
3.7	MONTAGEM MECÂNICA.....	59
3.7.1	Acoplamento Mecânico no efetuador terminal.....	60
3.8	INSTALAÇÃO ELÉTRICA.....	64
3.9	INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O SISTEMA E FLUXOGRAMA.....	74
CAPÍTULO 4 - PRINCIPAIS RESULTADOS.....		77
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		80
ANEXOS.....		82
Anexo I: Desenho Técnico do Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42.....		83
Anexo II: Guia de nomenclatura do robô Schneider Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42.....		84
Anexo III: Guia de nomenclatura dos atuadores utilizados.....		85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Categoria cinemática Cartesiana (PPP)	17
Figura 2.2. Principais etapas do processo de fatiamento	18
Figura 2.3. Linha IndraMotion MTX da Bosch Rexroth	19
Figura 2.4. Comunicação cruzada para controle sincronizado de eixos coordenados.....	20
Figura 2.5. Configurações de rede Ethernet/IP para controle do Lexium 32	21
Figura 2.6. Vistas lateral e frontal do motor IndraDyn S com cotas.....	25
Figura 2.7. Encoder incremental	28
Figura 2.8. Encoder absoluto	29
Figura 3.1. Primeira página do Lin-select da Schneider	33
Figura 3.2. Segunda página do Lin-select da Schneider	34
Figura 3.3. Terceira página do Lin-select da Schneider	34
Figura 3.4. Perspectiva Isométrica - Robô Cartesiano MAX33R (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012).....	35
Figura 3.5. Perspectiva Isométrica - Robô Cartesiano (BOSCH REXROTH, 2015).....	36
Figura 3.6. Vista lateral esquerda (BOSCH REXROTH, 2015)	36
Figura 3.7. Carregamento distribuído	38
Figura 3.8. Carregamento concentrado	39
3.9. Carregamento composto.....	39
3.10. Diagrama de esforços cortantes	40
Figura 3.11. Diagrama de Momento Fletor	41
Figura 3.12. Diagrama de deflexão.....	44
Figura 3.13. Modelo 3D criado no Workspace.....	45
Figura 3.14. Porta AND e tabela verdade	46
Figura 3.15. Definição dos TeachPoints (TPs)	48
Figura 3.16. Caminho percorrido pela tocha GMAW	49
Figura 3.17. Perspectiva Isométrica.....	52

Figura 3.18. Detalhe de junções por solda	52
Figura 3.19. Vistas: Frontal, lateral esquerda e superior	53
Figura 3.20. Perfil retangular em aço 1020.....	55
Figura 3.21. Carregamento concentrado de 250N e momento M_1	56
Figura 3.22. Diagrama de Esforços Cortantes em [N]	56
Figura 3.23. Diagrama de Momento de Inércia em [N.mm]	56
Figura 3.24. Diagrama de Deflexão Máxima [mm] na seção longa	56
Figura 3.25. Perfil retangular em aço 1020.....	57
Figura 3.26. Carregamento concentrado P_1 e Momento M_1	57
Figura 3.27. Diagrama de Esforços Cortantes [N]	58
Figura 3.28. Diagrama de Momento de Inércia [N.mm]	58
Figura 3.29. Diagrama de Deflexão Máxima [mm] na seção estreita	58
3.30. Mecanismos de transmissão de força nos eixos	59
Figura 3.31. Base da tocha e do efetuator terminal	60
Figura 3.32. Vistas e perspectiva do acoplamento	61
Figura 3.33. Montagem do sistema de acoplamento	62
Figura 3.34. Parafuso M5 cabeça cilíndrica, sextavado interno - rosca métrica.....	63
Figura 3.35. Parafuso M5 cabeça chata, sextavado interno – rosca métrica	64
Figura 3.36. Vista frontal (externa).....	65
Figura 3.37. Vista frontal (interna).....	65
Figura 3.38. Vista lateral esquerda	66
Figura 3.39. Vista superior	66
Figura 3.40. Perspectiva isométrica com transparência	67
Figura 3.41. Perspectiva isométrica com cotas	68
Figura 3.42. Vista frontal externa	69
Figura 3.43. Vista frontal interna	69
Figura 3.44. Diagrama elétrico unifilar de instalação do painel	74
Figura 3.45. Interconexões IHM.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Dados de eficiência dos motores IndraDyn S	24
Tabela 2.2. Dados dimensionais dos motores IndraDyn S	24
Tabela 2.3. Característica dos motores da Schneider	26
Tabela 2.4. Servo-motores de baixa inércia TL-séries da Rockwell Automation	27
Tabela 2.5. Gray code.....	29
Tabela 2.6. Especificações do Drive Schneider Lexium 32 Modular	31
Tabela 3.1 - Tabela de propriedades do eixo	43
Tabela 3.2. Dimensões parafuso M5 cabeça cilíndrica	63
Tabela 3.3. Dimensões parafuso M5 cabeça chata.....	64
Tabela 3.4. Lista de materiais - Painel Elétrico.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

T Temperatura [°C]

Símbolos Gregos

Σ Somatório

Subscritos

ext externo

in entrada

out saída

Siglas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ED Ensaio destrutivo

END Ensaio não destrutivo

GMAW *Gas Metal Arc Welding*

CP *Current Position (Workspace LT)*

ZP *Zero Position (Workspace LT)*

DOF *Degrees of Freedom*

c.q.d. Como queríamos demonstrar (matemática)

GRACO Grupo de Automação e Controle da Universidade de Brasília

IHM Interface Homem-Máquina

PC *Personal Computer*

CAD *Computer Aided Design*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Com vista em apresentar aspectos gerais deste trabalho bem como motivação, objetivos, metodologias adotadas, previsão de resultados e estrutura textual se compõe este capítulo.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Partindo do ponto que a Robótica é uma área que contempla as três grandes áreas as quais são base para Mecatrônica: Mecânica, Elétrica e Computação, a mesma apresenta relevância notável no meio industrial devido ao seu caráter de integração tecnológica. Isso se justifica na interdisciplinaridade presente em projetos envolvendo robótica e automação que os torna um tanto quanto dinâmicos em inovação e desenvolvimento de novas tecnologias.

O robô objeto deste trabalho destina-se a realização do processo de soldagem 3D. Este pode ser classificado como um processo de fabricação de sólidos metálicos de forma livre (*solid free form fabrication*) a partir da deposição de metal fundido em camadas formadas por cordões de solda. O caminho da deposição é previamente planejado a partir do fatiamento de um modelo sólido desenvolvido em um software de CAD (*Computer Aided Design*). Este processo se assemelha à Prototipagem Rápida, apresentando, entretanto, restrições nas geometrias possíveis de serem depositadas assim como nos tipos de caminhos a serem percorridos pela tocha de soldagem. Nos processos tradicionais de Prototipagem Rápida o fatiamento do sólido se dá em camadas paralelas entre si. No caso da soldagem 3D, devido à irregularidade da geometria do cordão de solda em seu início e em seu fim, indica-se que o fatiamento aconteça de modo a gerar um caminho contínuo de deposição, minimizando a necessidade de reabertura do arco de solda na mudança de camadas. Considerando que no processo de soldagem a posição plana é a mais favorável à deposição do metal, propõe-se a utilização de um sistema robótico de 5 graus de liberdade composto de um sistema cartesiano para movimentação da tocha, cuja orientação é fixada alinhada com o vetor gravidade (posição plana) e de uma mesa posicionadora de 2 graus de liberdade de orientação, na qual será fixada a base de deposição. A mesa será responsável por manter a orientação do ponto de deposição sempre paralela ao vetor gravidade de forma a manter sempre a condição mais favorável à deposição do metal de solda.

O foco deste trabalho é o projeto de instalação de um robô cartesiano com 3 graus de liberdade. Para isso, inicia-se com a especificação de partes e solicitação de orçamentos de duas das principais empresas do ramo: Schneider-Electric e Bosch Rexroth. Desde então percebe-se a interdisciplinaridade envolvida no projeto em termos de especificação de

partes, contato com fornecedor, contextualização na aplicação de soldagem, análise crítica de parâmetros da fabricação mecânica, análise de custos, verificação de viabilidade, estimativa da robustez necessária e possíveis modificações de projeto de forma que modelos comerciais atendam as especificações.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho trata do desenvolvimento do projeto de instalação de um robô cartesiano envolvendo aspectos de concepção e especificação das partes a serem adquiridas para a montagem do robô tanto mecânica quanto elétrica. Para fins de facilitar o controle do mesmo, uma interface homem-máquina será utilizada.

Em termos de fabricação mecânica, o robô cartesiano será responsável por posicionar a ferramenta localizada no efetuador terminal, nesse caso a tocha de soldagem, em um envelope cúbico. Com isso, pretende-se produzir peças via prototipagem rápida com uso da técnica de soldagem 3D. A escolha do robô cartesiano se deve ao processo de soldagem, em que a orientação da ferramenta deve se manter alinhada com a gravidade. É válido ressaltar que esse trabalho é parte de um projeto maior que inclui outro robô do tipo mesa posicionadora com dois graus de liberdade, sendo esses dois eixos rotacionais perpendiculares entre si. Esses eixos serão responsáveis por posicionar a base de deposição, onde a geometria da peça a ser fabricada será desenvolvida. Os aspectos construtivos desse robô de 2 DOF (*degrees of freedom*) não serão abordados nesse trabalho, embora será citado quando necessário para contextualização geral do sistema.

Como resultado, espera-se um robô funcional, apto a movimentar uma tocha de soldagem por um caminho previamente programado.

1.3 METODOLOGIA

Conforme a demanda de um trabalho mais prático, a metodologia se inicia no processo de especificação e compra do robô. A especificação foi feita com base em softwares de seleção de produto disponibilizado pelos fornecedores. Contudo, o conhecimento prévio das demandas de projeto bem como dimensões dos eixos e carga máxima suportada foram necessários para escolha. Como o processo de compra pode ser lento, no decorrer desse simulações e estruturação do projeto serão feitas com intuito de embasar a implementação, instalação e controle do robô. É consenso que um projeto de engenharia deve constar de simulações para levantar resultados prévios que corroborem com as especificações eletromecânicas. Assim, em caso de resultados de simulação que apresentem alguma divergência do fim especificado, modificações de projeto ou mesmo de estratégia podem ser feitas a tempo. A partir das matrizes de cinemática direta (convenção de Denavit-Hartenberg) descritas por (LOURENÇO, 2013) e um sólido representativo do robô cartesiano com 3

graus de liberdade, a simulação via software *Workspace LT* ilustrará tanto a dinâmica do processo de prototipagem bem como permitirá o acompanhamento das variáveis do sistema. Já o planejamento de trajetória poderá ser feito por meio do software *Matlab* utilizando estratégias como otimização de parâmetros, discretização espacial da trajetória a ser cursada pelo efetuador terminal e, por fim, a utilização de programação dinâmica considerando o contorno da peça a ser fabricada a fronteira, em que todo o exterior da peça contida no envelope de trabalho do robô seria considerado obstáculo onde não haverá deposição de material, apenas movimentação da ferramenta de solda. Outra opção é a utilização do software de fatiamento desenvolvido por (ANDRADE, 2013).

Em termos de etapas do projeto, (ULLMAN, 2010) sugere as seguintes etapas:

- Concepção geral;
- Preposição da ideia básica;
- Sistematização do projeto;
- Dimensionamento geral;
- Fabricação / Montagem / Teste / Monitoramento.

Tais etapas devem ser adaptadas às demandas do projeto, visto que, não haverá fabricação do robô. Esse terá partes especificadas, orçadas e será comprado com recurso específico para o projeto.

1.4 COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Com intuito de atingir os objetivos deste, descritos no item 1.2, o trabalho foi organizado da seguinte forma:

O capítulo 2 trata-se de um embasamento teórico acerca do estado da arte em termos de robôs cartesianos e suas aplicações em fabricação mecânica, uma contextualização histórica sobre robótica industrial e por fim o detalhamento de drives, motores, unidades de controle, sensores e uma breve descrição das normas regulamentadoras aplicáveis nas instalações elétricas do sistema.

O capítulo 3 evidencia as técnicas utilizadas no desenvolver do projeto, desde a caracterização de um robô que atendesse a demanda, seleção com base nos sistemas disponíveis no mercado, cálculos de deflexão sobre o eixo Y do robô, projeto mecânico de uma base para o robô, projeto de acoplamento do tocha como elemento efetuador terminal, dimensionamento de um painel elétrico para o sistema bem como sua instalação elétrica.

De maneira a evidenciar os principais resultados o capítulo 4 expõe e analisa os mesmos com uma perspectiva geral do trabalho.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas conclusões com ênfase nos principais resultados obtidos no decorrer dos capítulos anteriores deste trabalho e sugere a possibilidade de trabalhos futuros a partir deste.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROBÓTICA E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Desde o final do século XVIII com advento da primeira revolução industrial que ocorreu na Inglaterra, a utilização da máquina a vapor impulsionou a transformação de atividades artesanais para mecanizadas. Segundo (GROOVER, 2001), uma das primeiras utilizações de um robô industrial foi por volta de 1961 em uma operação descarregamento de peças fundidas de seu molde. Tal operação demandava muita força e resistência a altas temperaturas, constituindo assim uma atividade insalubre. Vapores e calor provenientes do processo de fundição podem ser extremamente prejudiciais a saúde humana. Com isso, a utilização de robôs tem sido crescente em indústrias dos mais diversos ramos. Além de evitar a exposição do homem a condições insalubres, a automação de processos é adequada em processos que exigem repetibilidade, dentre outros como ressaltados em (GROOVER, 2001): manipulação de peças pesadas e de difícil fixação, realização de tarefas simultâneas em células de produção e longos ciclos de produção. Apesar de ser intuitiva a substituição da mão-de-obra humana por robôs nos casos supra citados, a robotização de linhas de produção ainda é alvo de críticas no âmbito de gerar desemprego. Contudo isso pode ser visto como resistência a mudança, natural em vários campos da ciência e tecnologia.

Dentre vários tipos de robôs, o foco desse trabalho é o robô cartesiano. Também conhecido como robô XYZ, possui três graus de liberdade sendo todos lineares. Em outras palavras, o robô em questão possui 3 juntas prismáticas, como pode ser visto na Figura 2.1. A escolha desse tipo específico tem como motivos: características do processo, em que a orientação da soldagem deve ser paralela ao vetor gravidade, a facilidade de movimentação espacial e rigidez mecânica suficiente para aplicação. O conceito de rigidez mecânica está relacionado a estabilidade na movimentação em uma das três direções. Para aplicação na soldagem 3D, essa rigidez é uma característica fundamental visto que a qualidade da peça fabricada depende da precisão com que o robô que movimenta a tocha de solda dentro do envelope de trabalho. Além disso, com o robô cartesiano é possível manter torques e momentos de inércia constantes ao longo da operação.

O conceito de espaço ou volume de trabalho (*workspace* ou *volume space*) é a região pela qual o robô pode alterar as coordenadas, i.e., posição do efetuator terminal. Segundo (SANTOS, 2004), tal critério pode ser utilizado como de classificação quanto a estrutura cinemática, sendo as juntas principais utilizadas como referência. Assim, em geral os robôs podem ser subdivididos em 5 categorias cinemáticas:

- Cartesiana (PPP)

- Cilíndrica (RPP)
- Esférica (RRP)
- Articulado horizontal ou SCARA (RRP)
- Articulado vertical ou antropomórfico (RRR)

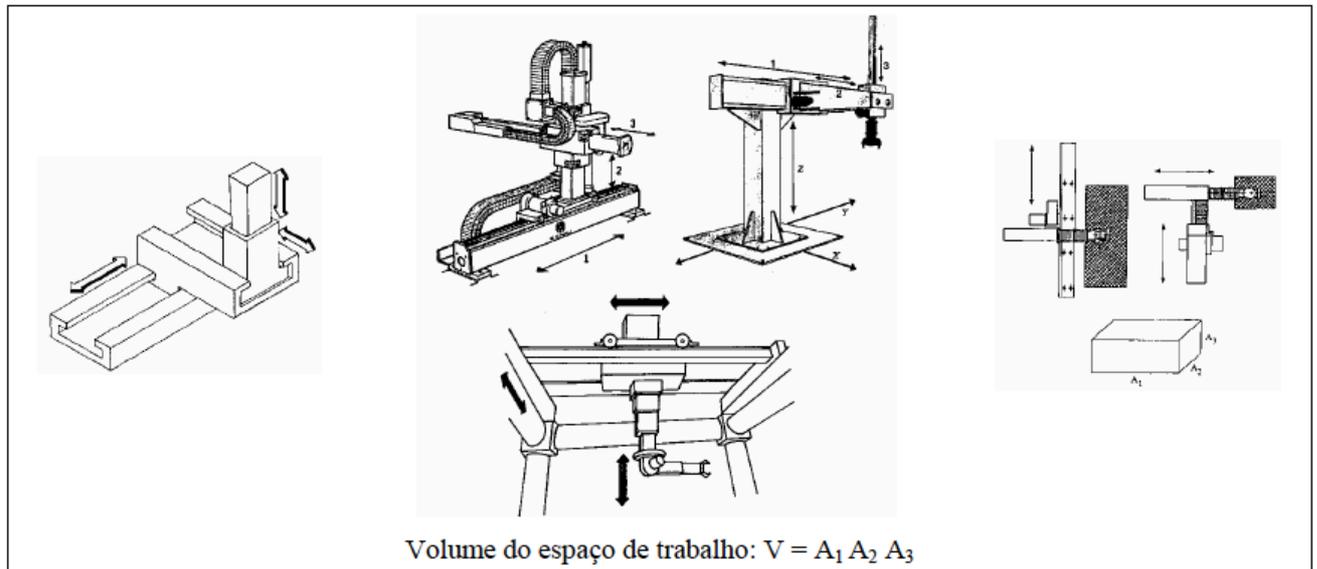


Figura 2.1. Categoria cinemática Cartesiana (PPP)

2.2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA COMO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Por efeitos decorrentes da intensificação da concorrência atrelados a necessidade de conformidade na produção, novas demandas de fabricação tem sido impostas. Além disso, o aumento da qualidade e competitividade dos produtos motivam o emprego de ferramentas computacionais para projeto, análise, simulação e otimização de um produto (VOLPATO, 2007). Nesse contexto, o processo de fabricação denominado Prototipagem Rápida se adequa bem para etapa inicial de projetos em engenharia, na concepção do protótipos, bem como sua análise de forma e testes funcionais que podem ou não envolver ensaios destrutivos (ED) e ensaios não destrutivos (END).

Segundo Volpato, a prototipagem rápida pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, i.e., baseado na manufatura por camada, ilustrado na Figura 2.2.

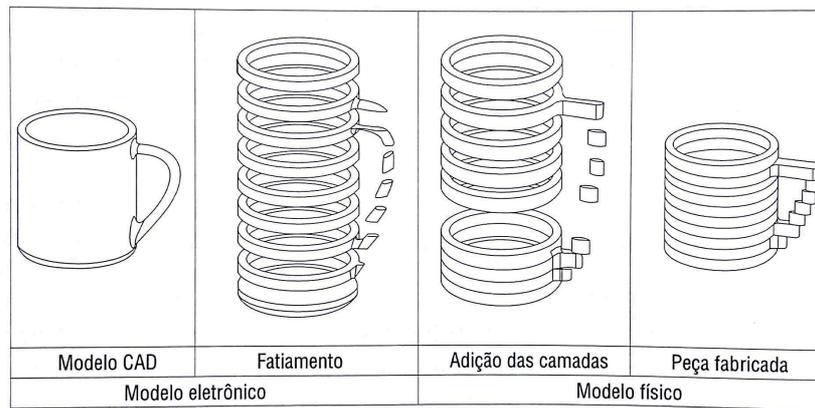


Figura 2.2. Principais etapas do processo de fatiamento

Conforme já discutido na seção anterior, o envelope cúbico de trabalho do robô cartesiano é bem adequado a processos de produção via deposição de camadas. A rigidez mecânica do robô cartesiano combinada ao seu envelope cúbico o tornam uma escolha viável para fabricação de modelos em 3 dimensões (3D). As informações geométricas do modelo, por sua vez, podem ser geradas e obtidas a partir sistemas CAD convencionais, o que torna o processo flexível e automatizado desde as etapas iniciais. Vopato ainda define as etapas do processo Prototipagem rápida via fatiamento na seguinte ordem:

1. Concepção geométrica do modelo 3D da peça no CAD;
2. Fatiamento do sólido via software, obtendo-se curvas de níveis 2D que definirão , em cada camada, onde o material será adicionado (pré-processamento das camadas);
3. Empilhamento (aderência) sequencial das camadas pré-processadas da base até o topo.

Para seguir as três etapas supracitadas, pode-se ter como referência outros dois trabalhos de graduação que são complementares a este trabalho, sendo assim etapas anteriores ao projeto de instalação do robô. Em termos de concepção geométrica e modelagem cinemática do robô a mesma é descrita por (LOURENÇO, 2013). Já o software de fatiamento para sólidos tipo casca e geração de trajetórias para fabricação de peças por deposição de metal em camadas sucessivas via processo GMAW foi desenvolvido por (ANDRADE, 2013). Entretanto, pode-se utilizar outros softwares para geração de trajetória (*path planning*) a partir dos pontos gerados pelo fatiamento do sólido como o Matlab® via interpolação dos pontos a serem percorridos. No Matlab, uma das estratégias que pode ser utilizada para planejamento de trajetória é a minimização de funções potenciais dada a posição inicial, *zero position* (ZP) e final. Com isso, para fins de simulação, os TeachPoints (TPs) podem ser importados por softwares convencionais de simulação de robótica como o Workspace LT® ou o Microsoft® Robotics Developer Studio.

Com o acoplamento de uma tocha GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) no efetuador terminal, a prototipagem rápida por deposição de camadas sucessivas de metal será a principal aplicação do robô estudado nesse trabalho.

Como pode ser visto na Figura 2.3, a linha IndraMotion MTX conta com além de controladores e seus respectivos softwares, sensores e atuadores para automação de sistemas. No entanto, como é desenvolvida com foco em operações de fabricação mecânica (via CNC – Comando Numérico Computadorizado) utiliza de encoders e servo-motores para sensoriamento e atuação.

Uma grande vantagem desse controlador quando comparado com dispositivos similares de outras marcas é a possibilidade de utilização do protocolo de rede SERCOS III (*serial real-time communication systems*). Tal protocolo é aberto (não é proprietário) o que segundo (CARVALHO, 2009) implica uma série de vantagens em termos de desenvolvimento. Com vista em aplicações de desenvolvimento tecnológico em instituições de ensino, o uso de softwares não proprietários facilita a evolução de projetos por permitir ao usuário acesso total ao código fonte, modificação/exclusão de parâmetros não desejados, redução de custos além de não tornar o andamento do projeto vinculado a processos de compra de pacotes adicionais que normalmente softwares de controle necessitam. No entanto, o sistema MTX também é compatível com os principais protocolos de comunicação disponíveis no mercado, como pode observado na Figura 2.4. Nessa figura, a estratégia de configuração de comunicação cruzada é evidenciada. Esse sistema controla de forma sincronizada o eixo X que é duplo. Para isso, a operação *master-slave* é utilizada em rede SERCOS, fazendo com que a dinâmica de movimentação ganhe robustez, uma vez que, a inércia de massa é distribuída entre os dois *drives* o que garante menor interferência de sinais de controle (canal separado) e impõe menos limitações de projeto (BOSCH REXROTH, 2013).

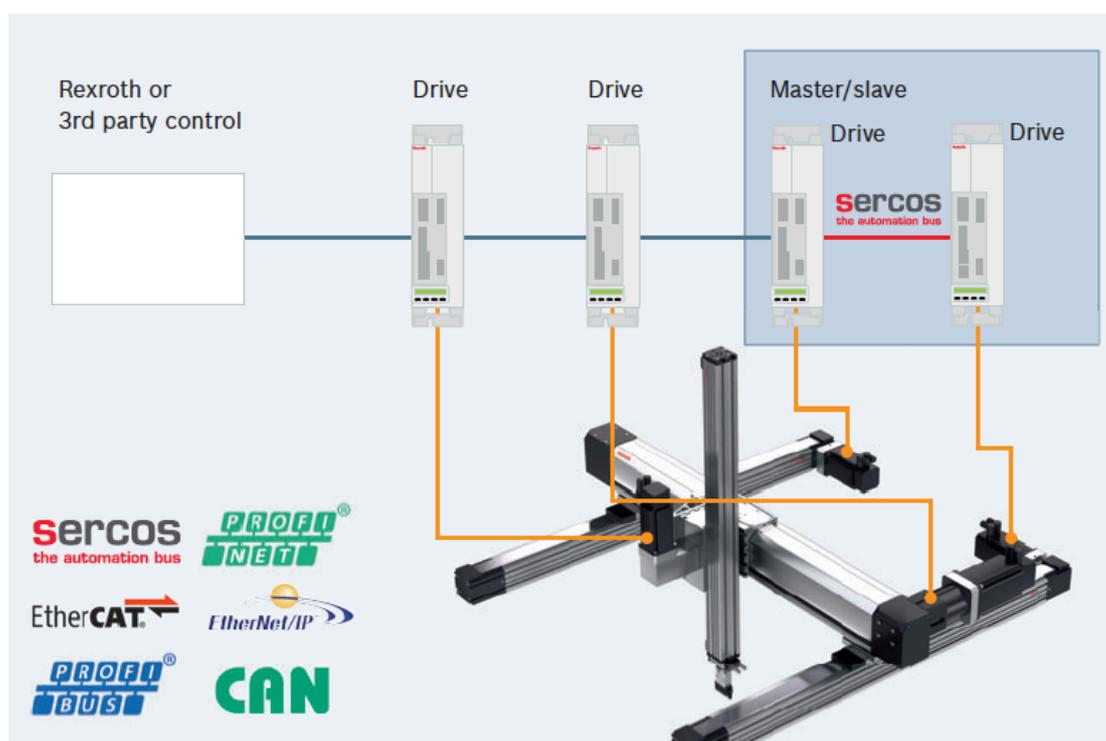


Figura 2.4. Comunicação cruzada para controle sincronizado de eixos coordenados

Além disso, o IndraMotion MTX apresenta características comuns a outros controladores do mercado como hardware flexível, modular e escalonável (BOSCH REXROTH, 2015). Por escalabilidade entende-se como o potencial do sistema manipular uma porção crescente de trabalho de forma uniforme (BONDI, 2000), em outras palavras, é a medida de quanto o sistema está preparado para expansões.

2.3.2 Controladores de movimentos Lexium 32 e Modicon LMC058LF42 – Schneider Electric

O controlador em questão é o Lexium 32 da Schneider Electric que pode ser utilizado no controle de 4 diferentes modelos de servo-drives associados a 2 famílias de servo-motores. Isso o torna desejável em aplicações que tenham demanda de alta performance em potência quanto simplicidade no controle de movimento. Portanto pode ser considerado versátil por atuar em uma gama de potência que varia de 0,15 a 11kW. Outra característica do Lexium 32 é transmissão de dados em 1600Hz o que é suficiente para aplicações industriais (SCHNEIDER ELECTRIC, 2014). Utiliza o software proprietário da Schneider SoMove para configurar/habilitar PC's na transmissão de configurações seja via transmissão cabeada ou via Bluetooth. Em termos de rede, uma das opções é um dos padrões de protocolo mais utilizados na indústria (SCHNEIDER ELECTRIC, 2014), o EtherNet/IP.

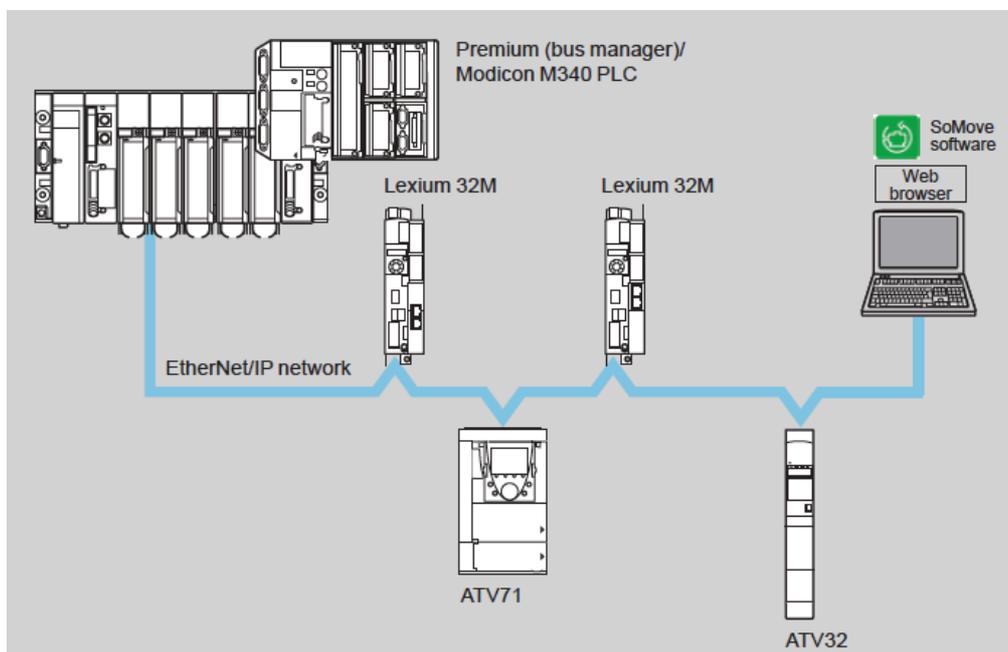


Figura 2.5. Configurações de rede Ethernet/IP para controle do Lexium 32

Contudo, o sistema robótico Lexium 32 também é compatível com outros protocolos de rede como Profibus, DeviceNet e EtherCAT - rede proprietária da Beckhoff, embora sua tecnologia seja domínio público (ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP, 2012), também amplamente utilizados no meio industrial. Isso retoma a discussão já explanada no item 2.1.1 sobre protocolos proprietários e abertos.

Já o Controlador de movimentos LMC058LF42 é um módulo mais compacto que conta com 42 entradas/saídas (E/S) discretas e é alimentado por 24Vcc. Esse controlador conta com 64MB de memória RAM e 128MB de memória flash. Em termos de taxa de transmissão, via protocolo CANopen, CANmotion ou SERCOS III, chega até 800kbps com cabo de 25m. Uma grande vantagem dos controladores da família Modicon LMC 058 é a possibilidade de trabalhar com 4 eixos sincronizados em 2ms em rede CANmotion. Adicionalmente, esse controlador possui resolução de 12 ou 16 bits para as E/S analógicas e utiliza o mesmo software para os CLPs, contando com blocos de função e bibliotecas de *Motion* para programação, comissionamento e diagnósticos.

2.3.3 Controlador Kinetix – Rockwell Automation

Kinetix Integrated Motion é produzido pela Rockwell Automation e é compatível com toda linha Logix5000™ de controladores Allen-Bradley®. Tal interface de controle permite integração com uma gama diversa de servo drives, motores e atuadores tanto para aplicações para um eixo quanto para múltiplos eixos, que é o caso desse projeto. Quando comparado com o controlador Lexium 32 da Schneider o controlador Kinetix possui uma faixa ainda maior de potência de saída do servo drive, que pode variar de 0,05~138kW. Isso é favorável no sentido de ampliar o leque dos dispositivos a serem conectados na rede controlada. Além de protocolos não determinísticos como Ethernet/IP, a tecnologia SERCOS também é pode ser utilizada no Kinetix Integrated Motion com vantagens além de ser um protocolo aberto, utiliza cabeamento de fibra ótica com tecnologia anti-ruído. Vale ressaltar que um único anel de fibra ótica pode ser utilizado como única interface entre controle e drives, substituindo cabeamento de comando e retro-alimentação o que também reduz custos em cabos. Por fim, a interface SERCOS também tem diagnóstico avançado do funcionamento do sistema controlado bem como produz relatório do processo. Em termos de controlabilidade, o Kinetix opera um amplo leque de motores com torques baixos desde 0,10N.m até o mais alto 955N.m. Para atuadores lineares, oferece força máxima de 14679N. O software utilizado nesse controlador pode ser o RSLogix 5000 ou Studio 5000® ambos softwares proprietários da Rockwell.

2.3.4 Controlador Lógico XGT – LSIS Co. Ltda

O controlador lógico em questão é da linha neXt Generation Technology da empresa coreana LSIS Co. Ltda distribuído no Brasil pela Shape Solutions sediada em São Paulo. As características desse Controlador Lógico Programável (CLP) são basicamente:

- Velocidade de processamento do CPU: 28ns/passos;
- 131072 entradas/saídas – I/O (máx) suficientes para controle de sistemas de médio e grande porte;

- Memória de 25MB (7MB programa, 2MB dados e 16MB flash);
- Compatível com os principais programas da empresa LSIS: XG5000, XG-PD, XG-PM e XG-TCON;
- Suporta protocolos de rede abertos como: Ethernet/IP, Profibus-DP, DeviceNet e MODBUS;
- Conector USB para upload/download de programa
- Capacidade estendida com os registradores especiais: Registrador de arquivo (R), registrador analógico (U) e registrador de índice (Z);

2.3.5 Trio Motion Technology

Considerando a linha de controladores da Trio Motion Technology há duas opções que atendem à demanda de controlar o robô cartesiano de 3 graus de liberdade: o controlador MC405 e o MC4N-RTEX.

Partindo do MC405 na configuração P827, esse permite controlar até 4 eixos via malha fechada (MF) e 5 eixos via Trem de Pulso, estratégia que será explanada posteriormente. Além disso, conta com ferramentas de interpolação linear, circular, helicoidal e esférica e é compatível com os protocolos de comunicação Ethernet-IP, Modbus TCP/IP, DeviceNet, Hostlink e CANopen. Quanto à taxa de atualização do comando dos servos, varia de 125~2000 μ s e conta com o processador ARM11 de 64 bits com VFP (*Vector Floating Point*). A tecnologia VFP é nada mais que um coprocessador FPU (Floating Point Unit) que é uma extensão da arquitetura ARM (ARM, 2011). Características adicionais como leitura/escrita de arquivos de texto em caso de planejamento de trajetória, transformações básicas em robótica, leitor de cartões Micro SD e display LCD também são inclusas.

Já o MC4N-RTEX além das funcionalidades descritas anteriormente apresenta alguns avanços. Pode controlar desde de 2 até 32 eixos simultaneamente. Utiliza a tecnologia MC4N-ECAT de controle remoto e dedicado de servo drives da Panasonic RTEX – Real Time Express Automation Bus. Também utiliza o ARM11 de 64 bits com processamento de 532MHz com VFP3. É recomendável pelo fabricante para aplicações onde o número de eixos controláveis pode aumentar com o aumento da planta além de atender bem demandas no controle de robôs.

Em termos de programação, ambos utilizam o software padrão da Trio Motion, TRIO Basic além de outros como IEC61131 Runtime, código G, HPGL, DXF import com a opção de uso do Kinematic Runtime.

O controle via Trem de Pulso mencionado no início desta seção é também conhecido como modulação por ciclo integral. Nesse tipo de modulação o controle da potencia é feita

limitando o número de ciclos da rede aplicados a carga, funcionando como um controle liga-desliga.

2.4 ATUADORES

Em termos de atuação, o sistema robótico conta basicamente com três servo-motores que, serão comparados dentre os principais fornecedores nessa seção.

2.4.1 Bosch Rexroth

Quando se trata da escolha de atuadores, a Bosch Rexroth fornece uma linha completa de possibilidades chamada IndraDyn S. A depender da demanda de projeto pode-se escolher desde servo-motores de baixo torque até os mais potentes. Motores da linha IP54 vem com encoder absoluto acoplado além da possibilidade de motores com sistema de frenagem. Podem ser conectados via unidades de potência IndraDrive Cs com alimentação de 110V~230 V (AC).

Dados de eficiência:

Tipo	Potência	Torque-continuo	Torque máx	Velocidade máx	Momento de Inércia
	[W]	[N.m]	[N.m]	(1/min)	[kgm ²]
MSM019B	100	0,32	0,95	5000	0,0000025
MSM031B	200	0,64	1,91	5000	0,0000051
MSM031C	400	1.3	3.8	5000	0,000014
MSM041B	750	2,4	7,1	4500	0,000087

Tabela 2.1. Dados de eficiência dos motores IndraDyn S

Dados dimensionais

Tipo	A (mm)	B (mm)*	C (mm)	Ø D (mm)	Ø E (mm)	Ø F (mm)	Ø G (mm)	H (mm)	Peso (kg)*
MSM019B	38	92 / 122	25	8	30	45	3,4	51	0,47 / 0,68
MSM031B	60	79 / 115,5	30	11	50	70	4,5	73	0,82 / 1,3
MSM031C	60	98,5 / 135	30	14	50	70	4,5	73	1,2 / 1,7
MSM041B	80	112 / 149	35	19	70	90	6	93	2,3 / 3,1

Tabela 2.2. Dados dimensionais dos motores IndraDyn S

*medições com sistema de frenagem / sem sistema de frenagem

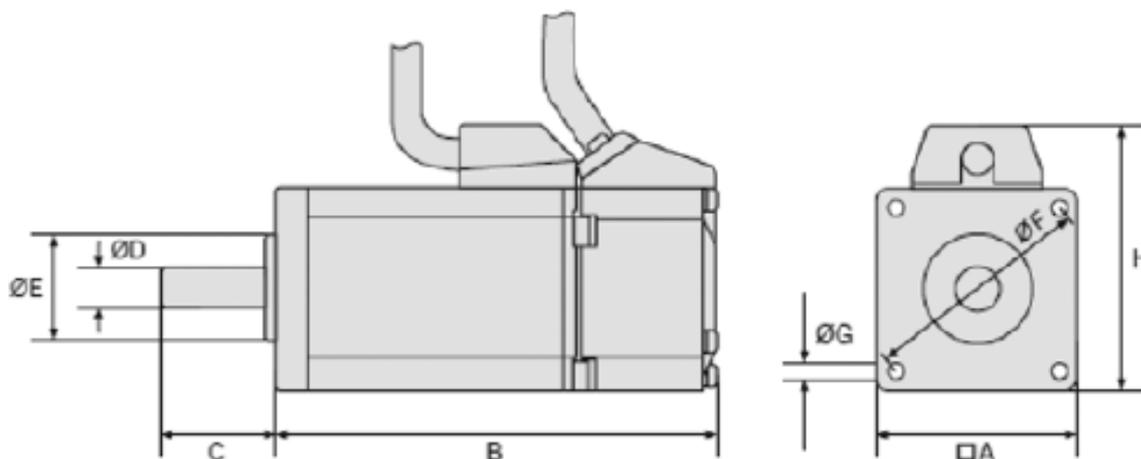


Figura 2.6. Vistas lateral e frontal do motor IndraDyn S com cotas

Os três servo-motores necessários para os eixos XYZ têm a mesma especificação, com exceção do motor do eixo Z que possui um sistema de frenagem acoplado.

2.4.2 Schneider Electric

Na configuração para atuação do robô MAX33R da Schneider Electric, usa-se um motor BMH0702P06A2A para acionamento do eixo X, um motor BMH0701P06A2A e um motor BMH0701P06F2A, que são um servo-motores corrente alternada e sem escovas. Via de regra, a nomenclatura indica diferenças técnicas entre os dispositivos de atuação. Nesse caso, os servo-motores dos eixos X e Y se diferenciam apenas em termos de torque de saída, sendo a carga a ser movida em X maior, obviamente o motor deve fornecer maior torque final. Já o motor de acionamento do eixo Z, se assemelha em termos de torque do atuador do eixo Y, contudo apresenta sistema de frenagem (não necessário para os eixos X e Y). O motivo que justifica o sistema de frenagem somente no eixo Z, está relacionado a sustentação de cargas no efetuator terminal, principalmente para aplicações de *pick and place*. Tais aplicações exigem travamento do rotor em certas posições que, sob condições de carga em movimento e suas inércias demandam um sistema de frenagem que seja mais preciso do que a simples inversão de sentido de rotação dos motores. Mais características podem ser observadas conforme as especificações que seguem na Tabela 2.3.

	BMH0702P06A2A	BMH0701P06A2A	BMH0701P06F2A
Família	BMH	BMH	BMH
Torque máximo [Nm]	7,4	4,2	4,2
Torque nominal [Nm]	2,2	1,4	1,4
Velocidade máxima [rpm]	8000	8000	8000

Tamanho da flange [mm]	70	70	70
Grau de proteção	IP65/IP65	IP65/IP65	IP65/IP65
Corrente máxima [Arms]	9,7	5,97	5,97
Sistema de frenagem	Não	Não	Sim
Tipo de encoder	ABS giro único, período 128 sen/cos		
Torque constante [Nm/A]	0,84	0,79	0,79
Potência de saída [W]	700	700	700
Tipo de realimentação	Giro único com Hiperface Sen/cos		
Massa sem o freio [kg]	2,3	1,6	2,6

Tabela 2.3. Característica dos motores da Schneider

2.4.4 Rockwell Automation

Dentre os atuadores fabricados pela Rockwell Automation, para esse projeto a linha que mais se adequa é a de servo-motores de baixa inércia, TL-séries (ROCKWELL AUTOMATION, 2014). As especificações de desempenho corroboram a utilização para atuação no sistema robótico em questão por apresentar torques máximos na faixa desejável como pode ser visto na Tabela 2.4.

Funções do motor	Motores de TL-Series (cód. cat. TL e TLY)
Características principais	<ul style="list-style-type: none"> • Tamanho compacto, alta densidade de torque • Tamanhos de carcaça métrica e NEMA • Tecnologia de motor inteligente • Inércia de rotor baixa
Funções	<ul style="list-style-type: none"> • Enrolamentos de 230 V • Ímãs de terras raras de alta energia • Extensões de cabo, 1 m (3,2 pés) • Comunicação serial de 17 bits
Tipo de motor	Servo-motores síncronos CA sem escovas
Classificação ambiental	IP65 com selo de eixo opcional
Torque contínuo	0,086 a 5,42 N•m (0,76 a 48 lb•pol)
Torque de pico	0,22 a 13 N•m (1,94 a 115 lb•pol)
Velocidade	4.500, 5.000 e 6.000 rpm
Saída classificada de motor	0,037 a 2,0 kW

Opções de realimentação	<ul style="list-style-type: none"> • Posição absoluta multivoltas, de alta resolução (energia de apoio por bateria) • Adicionais (contagem 2000)
Opções de motor	<ul style="list-style-type: none"> • Freio de 24 Vcc • Kit de selo de eixo
Inversores compatíveis (1)	<ul style="list-style-type: none"> • Kinetix 6000 (c.d. cat. TLY) • Kinetix 300/350 (c.d. cat. TLY) • Kinetix 3 (c.d. cat. TL e TLY) • Kinetix 2000 (c.d. cat. TLY) • Ultra3000 (c.d. cat. TLY)
Aplicações típicas	<ul style="list-style-type: none"> • Robótica • Manuseio de materiais • Tabelas X-Y • Máquinas especializadas • Produção de semicondutores • Equipamento médico/de laboratório • Máquinas de embalagem leves • Máquinas de escritório

Tabela 2.4. Servo-motores de baixa inércia TL-séries da Rockwell Automation

Nesse ponto pode-se dizer que para os servo-motores que se adequam a tarefa de acionamento do robô cartesiano apresentam características similares como de torque máximo aproximado e uma características intrínsecas aos seus aspectos construtivos que são servo-motores síncronos e sem escovas. Motores síncronos tem sua velocidade de rotação proporcional à frequência da sua alimentação. Já a ausência de escovas (utilizadas para fazer inversão de polaridade do eletroímã do rotor) se justifica em uma inovação, em que os ímãs permanentes são colocados no rotor e os eletroímãs transferidos para o estator. Assim, transistores de potência conectados ao sistema de controle são responsáveis por energizar os eletroímãs enquanto o eixo gira. Com esse tipo de motor, o controle de velocidade é mais preciso, além de não haver desgaste de escovas sequer ruídos elétricos (resultantes do chaveamento), dentre outras vantagens (A. E. FITZGERALD, 1992).

2.5 SENSORES

No sistema cartesiano XYZ, ou seja, com três graus de liberdade (3DOF – *Degree of freedom*), o sensoriamento é feito por encoders. Esses, por sua vez, são dispositivos que fornecem uma saída digital resultante de um deslocamento angular (BOLTON, 1999). São divididos em duas categorias, encoders incrementais e absolutos.

Tanto para o sistema da Bosch Rexroth quanto da Schneider Electric, os encoders propostos são absolutos, acoplados no eixo-árvore do servo-motor.

No eixo do motor da Rockwell Automation, o encoder pode ser tanto de posição absoluta multivoltas, de alta resolução com energia de apoio por baterias (TL-Axxxx-B) ou opções de encoder incremental (TLY-Axxxx-H).

Os encoders os incrementais detectam mudanças na posição a partir de uma posição de referência (datum). Para isso, seus aspectos construtivos englobam uma fonte de luz, um detector de luz que podem ser respectivamente um LED (*Light-emitting diode*) e um fotodiodo, semicondutor que converte luz em corrente elétrica. Entre esses dois dispositivos, usa-se um disco perfurado ou com fendas o qual com o giro do motor interrompe e permite a passagem de luz no sentido emissor-receptor, conforme a Figura 2.7. Isso resulta em uma contagem incremental de pulsos que, é por si só, o critério de posicionamento do sistema. É válido ressaltar que há uma relação proporcional entre o número de pulsos contados com o ângulo de rotação do eixo.

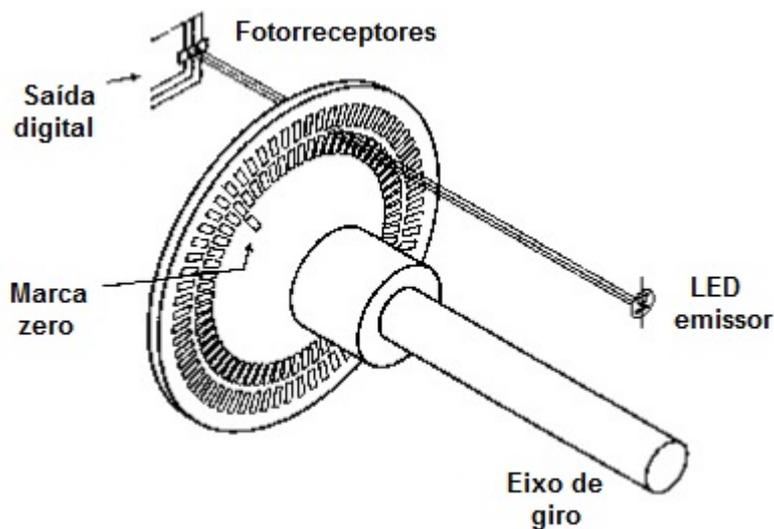


Figura 2.7. Encoder incremental

Além disso, o princípio de funcionamento parte de um disco com n faixas concêntricas utilizadas com n pares de LED/fotodiodo. A faixa mais próxima do centro, é basicamente um único furo, utilizado para localizar o “ponto zero” do disco. Para cada uma das outras duas faixas mais externas há furos equipolentes e igualmente espaçados com certa defasagem entre si. Isso permite detectar o sentido de rotação. A resolução desse tipo de encoder é determinada a partir do número de fendas contidos em uma revolução (BOLTON, 1999). Assim, para um encoder hipotético com 6 fendas, o cálculo seria:

$$resolução_{inc} = 360^\circ \div 6 = 60^\circ$$

Já os encoders absolutos fornecem a posição angular atual. Se diferenciam dos incrementais pois geram código único para cada posição do eixo. Assim, a saída do detector (fotodiodo) é na forma de número binário. Na Figura 2.8 pode-se perceber quatro círculos

concêntricos de ranhuras igualmente espaçadas e quatro detectores de luz: S1, S2, S3 e S4.

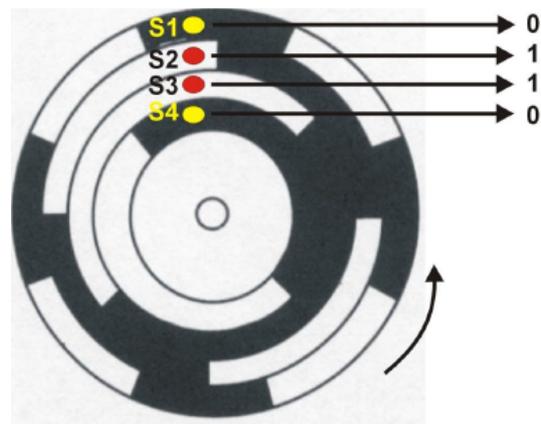


Figura 2.8. Encoder absoluto

É intuitivo perceber que cada posição fornece diferentes números binários como saída. Tipicamente, encoders absolutos possuem de 10~12 faixas que correspondem ao número de bits do trem de bits de saída. No entanto, para calcular a resolução basta calcular o número de posições diferentes que podem ser detectadas em uma volta. Supondo um encoder de 10 faixas, temos:

$$resolução_{abs} = 360^\circ \div 2^{10} = 0,35^\circ$$

Contudo, há um problema associado ao uso de números binários como base. Desde que na mudança de um número binário para outro pode haver mais de uma mudança de bit, conseqüentemente a resolução seria diminuída. Para resolver esse problema, a transformação de binários para o chamado *Gray code* é efetiva. Na Tabela 2.5 é mostrado o *Gray Code* para um encoder absoluto de 4 faixas (BOLTON, 1999).

Decimal	Binário	Gray code
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100

Tabela 2.5. Gray code

2.6 DRIVES

Quando se utiliza sensores e atuadores em um sistema qualquer, se faz necessário o uso de interfaces que possam gerir os sinais de entrada e saída. Assim, os drives são interfaces específicas para manejo de sinais de motores. Partindo do princípio de funcionamento desses, pode-se dizer também que são interfaces de potência, uma vez que, o sinal de atuação proveniente de um computador/controlador chega digitalmente e é convertido em sinal analógico que no motor se traduz em torque no eixo-árvore. A recíproca desse processo, conversão analógica-digital também é feita no drive que, por possuir entradas e saídas é também interface do sensor (nesse caso um encoder absoluto) e do computador. Em termos de entradas e saídas, dados discretos podem ser processados por um computador/controlador sem a necessidade de procedimentos de conversão aplicáveis tipicamente em sinais contínuos/analógicos. Segundo (GROOVER, 2008), tais dados discretos podem ser divididos em três categorias: dados binários, dados discretos não binários e dados do tipo pulso. As duas primeiras categorias são consideradas de comunicação entre o processo e o computador por I/O (*input/output*) interfaces. Já os dados do tipo pulso são trafegados do computador e para o computador através de contadores e geradores de pulso. Nessa nomenclatura adotada por Groover, os termos entradas e saídas são em referência ao computador. Para o acionamento dos três servo-motores do sistema cartesiano adquirido (Schneider-Electric), dois drives LXM32MU90M2 e um LXM32MD18M2 são utilizados. Os detalhes técnicos desses *drives* são descritos na Tabela 2.6.

Especificações	LXM32MU90M2, AC SERVO DRIVE	LXM32MD18M2, AC SERVO DRIVE
Família	Lexium 32 Modular	Lexium 32 Modular
Alimentação	110 -15%...120 +10% or 200 -15% ...240 +10% single-phase	110 -15%...120 +10% or 200 -15% ...240 +10% single-phase
Saída de corrente contínua (rms)	3	6
Corrente de saída de pico (rms)	6 / 9	10 / 18
Potência Nominal (HP / KW)	373 / 0.5	746 / 1
Potência Nominal em 110V (HP / KW)	0.40 / 0.3	0.67 / 0.5
Potência Nominal em 230V (HP / KW)	0.67 / 0.5	1.34 / 1.0

Tensão de Controle	24 V (-15 / +20 %)	24 V (-15 / +20 %)
Entradas Analógicas	NA	NA
Grau de Proteção	IP20	IP20
Temperatura de trabalho (°F / °C)	32... 122 / 0 ...+50	32... 122 / 0 ...+50
UL	Sim	Sim
Entradas Lógicas	4	4
Saídas Lógicas	3	3
CSA	Sim	Sim
RoHS	Sim	Sim
Massa (lb / kg)	4 / 1.8	4.2 / 1.9

Tabela 2.6. Especificações do Drive Schneider Lexium 32 Modular

2.7 NORMA PARA REPRESENTAÇÃO DE PAINÉIS ELÉTRICOS

Nesse item, serão apresentadas as normas que regulamentam a representação e instalação de painéis elétricos. Em 2014, de forma a complementar a ABNT NBR IEC 60439 (2003) para painéis elétricos, a ABNT publicou em 2014 duas normas baseadas na série IEC 61439 de 2011 que são a ABNT NBR IEC 61439 que trata de regras gerais para o seguimento e a ABNT NBR IEC 61439 que é específica para montagem de conjuntos de manobra e controle. A predecessora ABNT NBR IEC 60439 traz orientações técnicas para painéis TTA/PTTA, barramentos blindados e painéis de uso geral. Essa traz a seguinte definição: “Conjunto de manobra e comando de baixa tensão é a combinação de equipamentos de manobra, controle, medição, sinalização, proteção, regulação, etc, em baixa tensão, completamente montados, com todas as interconexões internas elétricas e estrutura mecânica.”

De forma complementar, a Norma ABNT NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão constitui um guia normativo para os dimensionamentos de condutores, da proteção contra sobrecorrentes e sobretensões, de circuitos e instalações de motores. Com isso, o projeto de instalação elétrica do robô segue cada item especificado nessa norma.

Em termos de representação gráfica dos condutores e dos dispositivos de proteção o projeto obedece a NBR 5444 (fev. de 1989) que defini a simbologia para instalações elétricas.

CAPÍTULO 3 - PROJETO

Este capítulo descreve o projeto propriamente dito. Para isso o capítulo foi dividido em seções nas quais é dada ênfase em cada aspecto do projeto desde a concepção, planejamento, concepção, estudo de viabilidade e montagem.

3.1 ESTABELECIMENTO DE REQUISITOS

Quando se trata de desenvolvimento de tecnologia, requisitos básicos para o funcionamento do dispositivo ou sistema a ser implantado devem ser considerados. No caso do robô cartesiano, o mesmo possui características satisfatórias para movimentação da tocha de soldagem quando a mesma atua na produção de peças por deposição, processo conhecido como soldagem 3D. Com base na planta descrita por (LOURENÇO, 2013) e nas dimensões e massa da tocha de solda GMAW – *Gas Metal Arc Welding* conhecidos na indústria como (MIG – *Metal Inert Gas* / MAG – *Metal Active Gas*), bem como a massa dos cabos, atuadores, drives e do próprio eixo, um robô cartesiano com estrutura rígida para movimentação de uma carga de 15kg acoplada no efetuador terminal com dimensões $X*Y*Z=800x800x500\text{mm}$ seria suficientemente robusto para produção de peças por soldagem 3D. Isso considerando a escala de produção didática de um laboratório de pesquisa, nesse caso, o GRACO. Descrições nos catálogos da Bosch Rexroth, linha EasyHandling (BOSCH REXROTH, 2015) e Schneider Electric (SCHNEIDER ELECTRIC, 2015), linha Lexium Linear Motion, foram essenciais na escolha do robô para compra. O passo a passo da escolha será detalhada no item que segue.

3.2 SELEÇÃO COM BASE EM SISTEMAS DISPONÍVEIS

Partindo de uma pesquisa feita em dois dos principais fornecedores do seguimento de robótica e automação industrial foi possível escolher sistemas que se enquadrassem tanto nas demandas de projeto quanto no orçamento disponível para aquisição. Os requisitos de projeto, provindos do processo de soldagem foram levantados a partir dos dados de operação do robô tipo manipulador IRB2000 instalado no GRACO, conforme a Tabela 3.1.

Resolução mínima	0,2mm
Aceleração máxima	2m/s^2
Velocidade máxima (durante a deposição)	1m/min
Velocidade máxima de deslocamento	2m/s

Tabela 3.1. Requisitos do processo de soldagem

Considerando que existem várias formas de se projetar um sistema robótico, desde as mais clássicas que partem dos cálculos iterativos de esforço sobre os eixos com base nas cargas estática e dinâmicas geradas pelas massas do efetuator terminal e dos outros eixos do sistema.

Contudo, foi utilizada uma abordagem mais prática, que utiliza softwares de dimensionamento conforme será detalhado a seguir. Primeiramente, na Figura 3.1, são dadas opções de robôs com diferentes números de eixos, no caso da linha Lexium da Schneider Electric. O escolhido foi MAXR-3 que possui 3 eixos com 3 juntas prismáticas que resulta em 3 graus de liberdade e um envelope de trabalho cúbico. Em seguida, na Figura 3.2 as dimensões de cada eixo bem como a carga suportada pelo efetuator terminal são configuradas. Além disso, nessa etapa é possível inserir detalhes das condições de aplicação como, por exemplo, se há vibração externa influenciando os eixos, se há carregamentos repentinos provindos de dispositivos pneumáticos e qual exigência de rigidez mecânica é demandada pelo sistema. Com essas informações é possível escolher encoders absolutos e atuadores mais precisos e com sensibilidade ajustada para a aplicação.

Lin-Select

5th revision: April 2014

Language
en/pt
All fields in Selecting an other language will reset the whole project!

Schneider Electric online
Linear Motion online

reset
how to use
Info

Office
Schneider Electric
Date
07/07/15

Phone
Salesmen

Select Your basic mechanical system for Your application
load project

drive element
payload
stroke length

	Axes	description		payload	stroke length
Portal axes		PAS - Axes Axes for handling and positioning with belt or ballscrew drive		up to 100kg	up to 5500mm even longer on demand
		TAS - Linear Tables Linear Table for precise positioning and with high rigidity because of ballscrew drive and double guiding		up to 150kg	up to 1500mm
		MAXH - double axes one axis driven Axes for handling and positioning with high stiffness because of double guiding		up to 250kg	up to 5500mm even longer on demand
		MAXS - double axes both axes driven Axes for handling and positioning with high stiffness because of double guiding and mechanical synchronisation of both axes.		up to 300kg	up to 5500mm even longer on demand
Cantilever axes		CAS3 and CAS4 cantilever axes Axes for pick and place (mainly vertical) motor and motor-block is fix, cantilever (AL-profile body or round-bars are moving)		up to 50kg	up to 1200mm even longer on demand
		CAS2 telescopic axes Axes for long strokes and small over-all size motor and motor-block is fix, telescopic cantilever is moving		up to 35kg	up to 2400mm
	system	description	drive	payload	stroke length
MAXP		MAXP Linear Positioner typical system for pick-and-place handling in 2 dimensions X and Z		up to 50kg	up to 5500mm even longer on demand
MAXR-2		MAXR-2 Portal Robot 2 axes XY portal-robot for movements in flat area X and Y		up to 130kg	up to 5500mm even longer on demand
MAXR-3		MAXR-3 Portal Robot 3 axes XYZ handling system X, Y and Z for all kind of pick-and-place-solutions, assembly, palletizing and many other systems			up to 5500mm even longer on demand

Figura 3.1. Primeira página do Lin-select da Schneider

payload		description	
	kg	the payload, that is adapted to the interface of the axis	15 kg
stroke length		description	
	effective stroke length of each axis	X =	800 mm
		Y =	800 mm
		Z =	500 mm
application conditions			
are there shock loads to the axis (e.g. Pneumatic-cylinders) ?		<input checked="" type="checkbox"/>	No (standard) all guide types allowed
or is there vibration influencing the axis (from machine-process, from vibration-feeders etc.) ?		<input checked="" type="checkbox"/>	YES no roller guides allowed
what rigidity of the system is expected ?		<input checked="" type="checkbox"/>	normal rigidity (pick an place - handling)
		<input checked="" type="checkbox"/>	high rigidity (precise assembly, measurement etc.)

Figura 3.2. Segunda página do Lin-select da Schneider

Por fim, na Figura 3.3 são sugeridos três modelos os quais atendem à especificação, sendo que são sugeridos em ordem crescente de acordo com coeficiente de performance, como pode ser observado no campo *Performance indicator*. Assim, com o aumento da robustez, há também um aumento de preço de 20% e 48%, como pode ser visto no campo *Price tendency system*.

Lin-Select		5th revision: April 2014		Schneider Electric										
multi-axes-system			dimensions			application data								
						stroke [mm]	X	Y	Z					
						max. speed [m/s]	1,27	1,27	1					
						max. accel. [m/s²]	7,03	7,03	8					
						payload kg	15							
possible systems			mechanical safety factors			forces, moments, life-time								
<input checked="" type="checkbox"/> show selected axes system														
Select system and press button ▲ or select system by double-click ▼														
system name	safety-factor load	worst case safety-factor drive-torque	worst case safety-factor Moments	eff.life-time X-axis [km]	eff.life-time Y-axis [km]	eff.life-time Z-axis [km]	total length X (dimension L)	total length Y (dimension W)	total length Z (dimension H)	total weight [kg]	axes too weak	axes fit perfect	axes too big	price tendency system
MAXR23R-S42BB-H42BB-C42BB	1,0	1,5	2,9	>100.000	60000 km	>100.000	1506 mm	1320 mm	856 mm	95 kg	←	↑	→	reference price
MAXR33R-S43BB-H43BB-C43BB	1,7	1,6	3,5	>100.000	>100.000	>100.000	1614 mm	1421 mm	944 mm	171 kg	←	↑	→	1,20
MAXR43R-S44BB-H44BB-C44BB	3,3	2,3	3,4	>100.000	87000 km	>100.000	1822 mm	1618 mm	1100 mm	332 kg	←	↑	→	1,48
Show all axes-systems, that are performing														
back		Check here, why some relevant systems don't fit to application											back to basic selection	

Figura 3.3. Terceira página do Lin-select da Schneider

Para fins de comparação, um procedimento de seleção similar foi feito via software da Bosch Rexroth, *Linear Motion Designer 2*. A partir dos parâmetros críticos de entrada *stroke* 800x800x500mm e *payload* de 15Kg o software recomendou um sistema cartesiano de 3 eixos com capacidade de *payload* de 20Kg (MCV81030000) que combinado ao conjunto de servo acionamento e aplicação de controle numérico (MCV11000205) totalizaram R\$61.541,91. Enquanto o modelo similar da Schneider Electric, MAXR23-S42-H42-C42, teve recomendação mais enxuta, para *payload* de 15Kg com melhor custo benefício e valor final de R\$54.992,73. Os valores supracitados se referem a todo o sistema. Por melhor se adequar ao orçamento disponível e oferecer boa relação custo/benefício dentre todos os sistemas estudados na seção de revisão bibliográfica incluindo drives, controladores de

movimento, servo-motores e encoders, os itens comprados foram da Schneider Electric. Contudo, em uma versão ainda mais econômica que não incluiu esteira porta cabos e sensores fim de curso de forma a adequar o orçamento aos recursos disponíveis. Uma grande vantagem de se utilizar todo o sistema de um mesmo fabricante é a compatibilidade entre os mecanismos e sistemas.

3.3 DESENHO MECÂNICO

Essa seção objetiva evidenciar as semelhanças entre os dois robôs cartesianos cotados: Bosch Rexroth MCV81030000 (Figura 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8) e o comprado da Schneider Electric MAXR23-S42-H42-C42 (Figura 3.4).

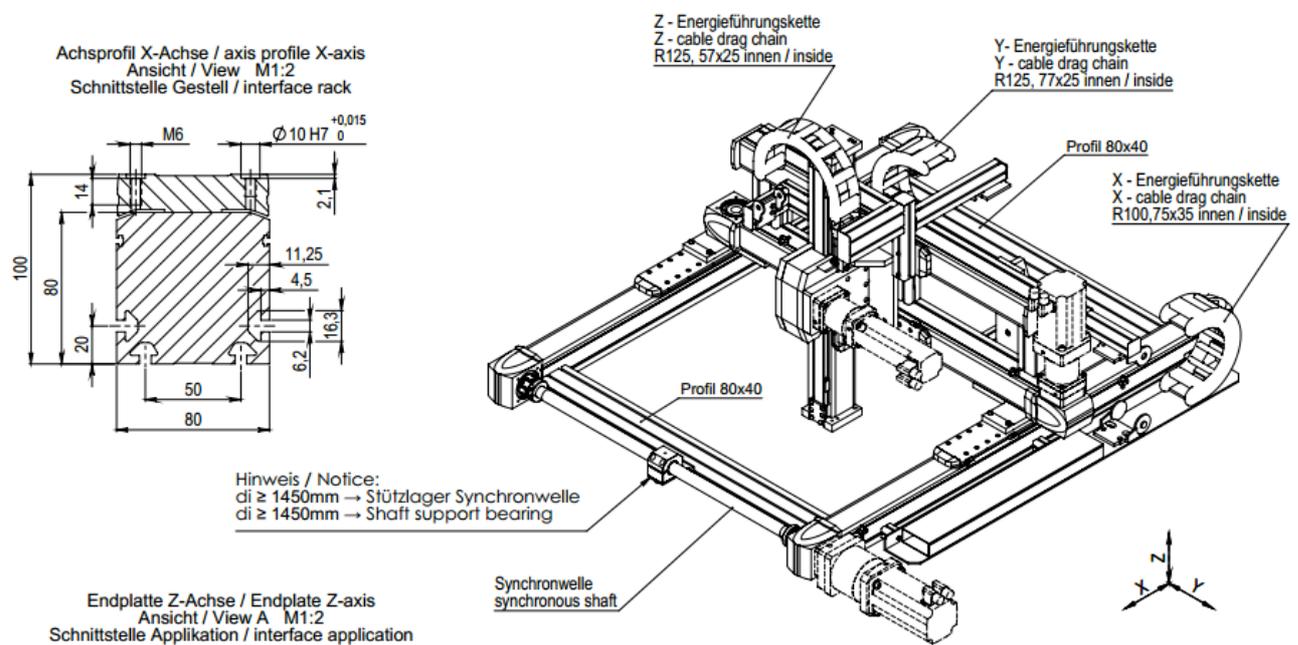


Figura 3.4. Perspectiva Isométrica - Robô Cartesiano MAX33R (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012)

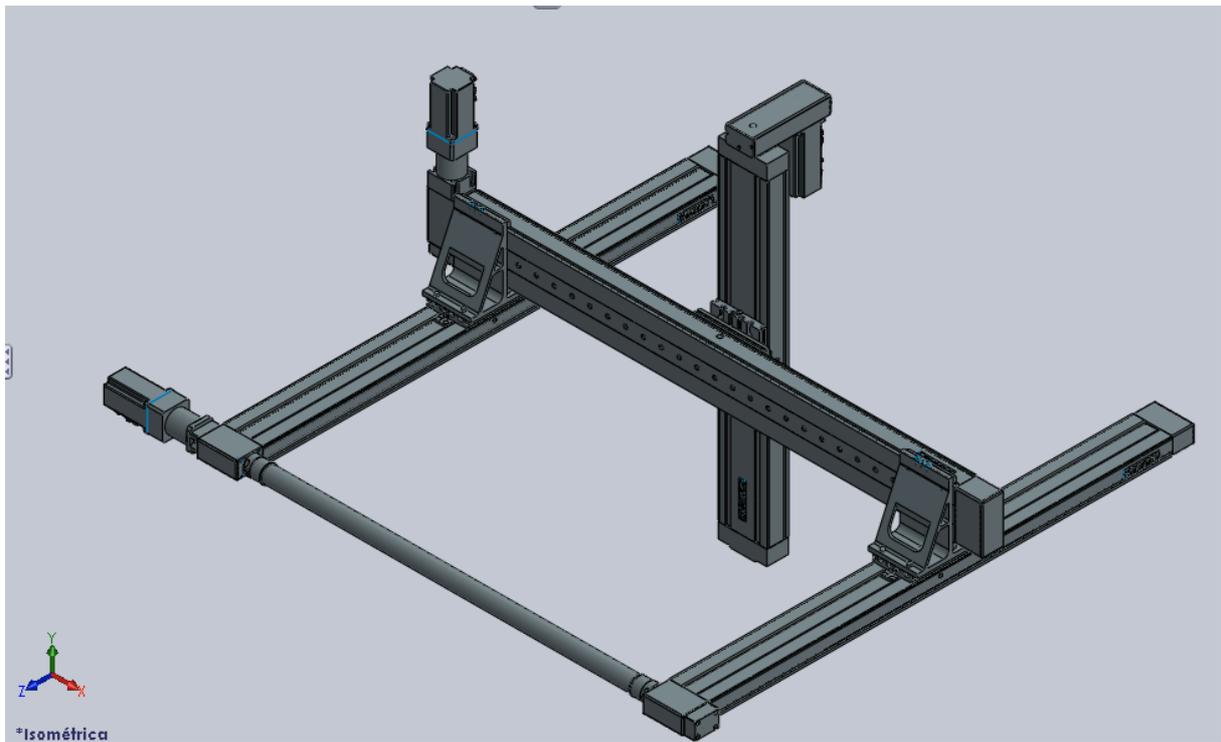


Figura 3.5. Perspectiva Isométrica - Robô Cartesiano (BOSCH REXROTH, 2015)

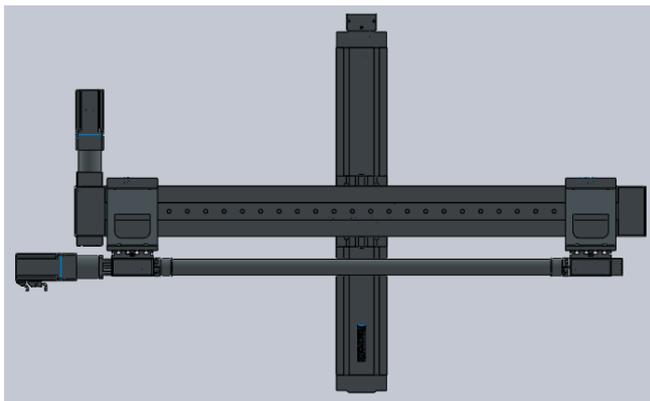


Figura 3.6. Vista frontal (BOSCH REXROTH, 2015)

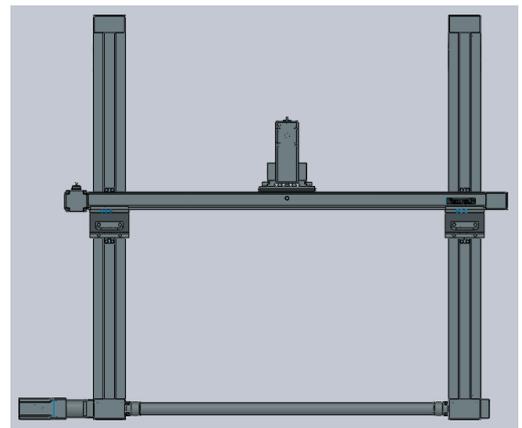


Figura 3.7. Vista superior (BOSCH REXROTH, 2015)

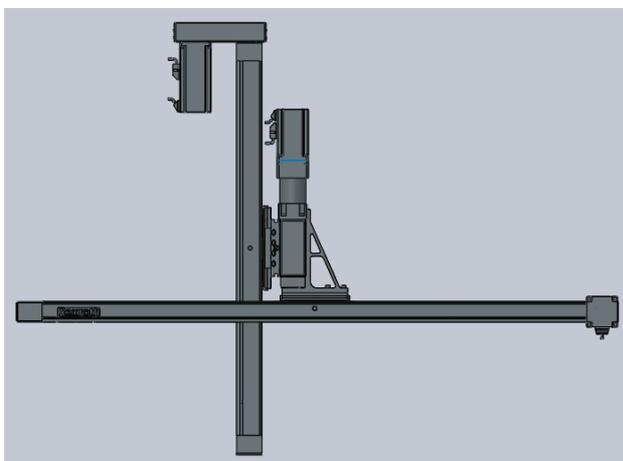


Figura 3.6. Vista lateral esquerda (BOSCH REXROTH, 2015)

Dentre as semelhanças, destacam-se os servo-motores e respectivos torque máximos, sistema de transmissão de força por correia dentada e base dos eixos em alumínio estrutural.

3.4 CÁLCULO DE DEFLEXÃO MÁXIMA SOBRE O EIXO Y

A presente seção visa subsidiar via cálculo de deflexão máxima estática sobre o eixo Y do robô cartesiano, a escolha dos perfis que compõem o mesmo. Vale ressaltar que as velocidades baixas do processo e suas respectivas baixas taxas de mudança no tempo ($dv(t)/dt$), geram por sua vez acelerações também baixas. Isso resulta em esforços dinâmicos de ordem inferior aos estáticos, sendo assim desconsiderados para o sistema robótico em questão. É importante observar que esses cálculos são feitos apenas para o eixo Y, pois esse se encontra na condição de bi-apoiado, com momentos fletores máximos e respectivas deflexões máximas. Já para o eixo X, esses cálculos não se aplicam pois as guias de movimento em X serão instaladas de forma totalmente apoiada.

3.4.1 Cálculo Estático

A princípio, com base na folha de dados da página 10 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012), é possível estimar a massa do próprio eixo Y, pois há 11Kg/m, com 1177mm (155+stroke+222), tem-se uma massa total de 12,947Kg. Com a equação da segunda Lei de Newton, $F = m.a$, para força Peso (P), obtém-se:

$$P = 12,947 \times 9,81$$

$$P \cong 127N \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Com isso, temos o valor do carregamento distribuído sobre o eixo Y, devido ao seu próprio peso, como pode ser visto na Figura 3.7 (utilização do software MDSolids® para validação dos cálculos).

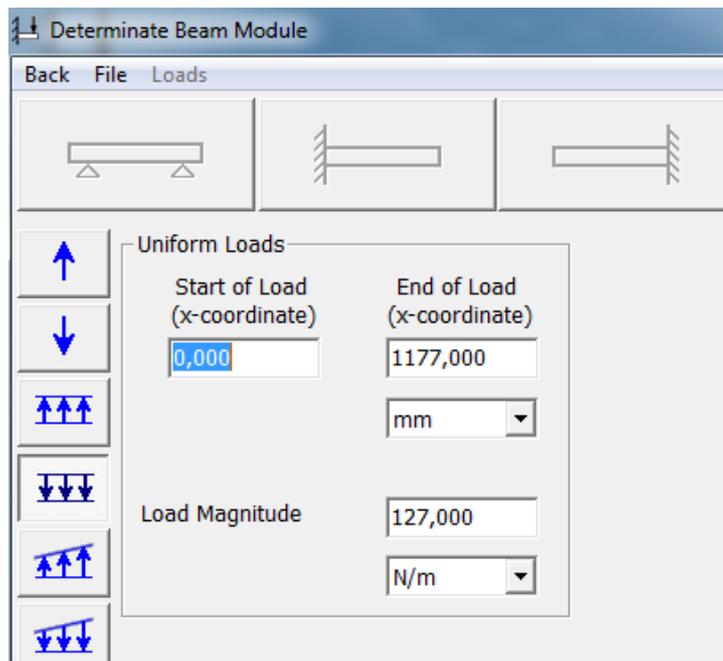


Figura 3.7. Carregamento distribuído

Em sequência, deve-se considerar também o carregamento concentrado, devido ao somatório das massas discriminadas a seguir:

- Massa do eixo Z (incluindo acoplamentos) $\cong 10\text{Kg}$;
- Massa do servo-motor $\cong 1,8\text{Kg}$;
- Massa da tocha de solda + cabos + acoplamentos (equivalente ao payload) $\cong 15\text{Kg}$;

Como resultado, tem-se:

$$Massa_{total\ carreg.concentrado} \cong 26,8\text{Kg} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Novamente, aplicando a 2ª lei de Newton, com força gravitacional $g = 9,81\text{m/s}^2$, tem-se:

$$P = 26,8 \times 9,81$$

$$P \cong 268\text{N} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Considera-se então o pior caso de carregamento concentrado, no qual toda carga considerada acima, fica centrada no eixo Y (sobre a forma de barra bi-apoiada), como pode ser visto a seguir, na Figura 3.8.

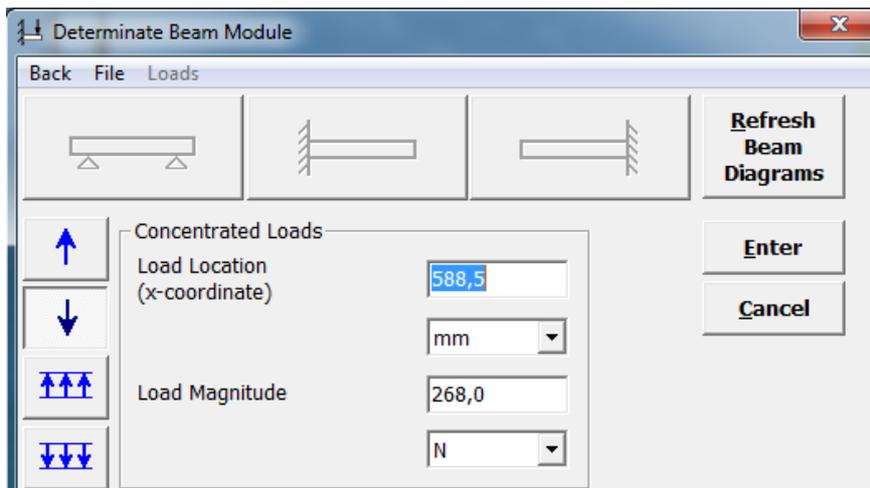
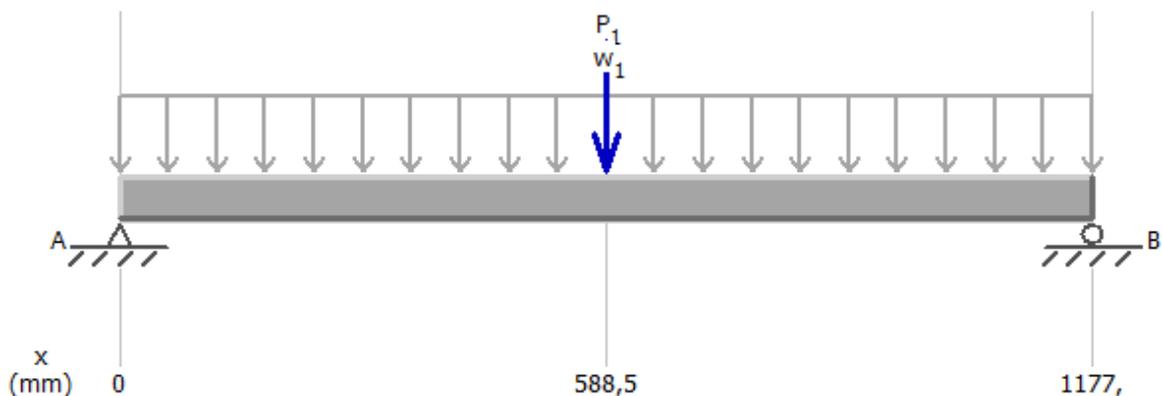


Figura 3.8. Carregamento concentrado

Após essas considerações, tem-se o carregamento composto (distribuído + concentrado) que pode ser observado na 3.9, na qual,

$$P_1 = 268N \text{ (carregamento concentrado)}$$

$$w_1 = 127N.m \text{ (carregamento distribuído)}$$



3.9. Carregamento composto

Reações de apoio:

Convenção: + sentido horário

$$\sum \mathcal{M}_A = 0$$

$$268x(0,5885) + (127x1,177x0,5885) - V_Bx1,177 = 0 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$V_B = 208,7395N$$

Vale ressaltar que, a força equivalente (F_{eq}), provinda do carregamento distribuído (w_1) é:

$$F_{eq} = 127x1,177 = 149,479N \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Convenção: + para cima

$$V_A - 268 - 149,479 + V_B = 0$$

$$V_A + V_B = 417,479 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$V_A = 208,7395N$$

Convenção: + para direita

$$\sum F_X = 0$$

$$H_B = 0$$

Esforços Cortantes:

1. Ponto A – no ponto 0m

$$a = 0N$$

$$\alpha = V_A = 208,7395N \quad (\text{Eq. 3.7})$$

2. Ponto Central (C) – no ponto 588,5mm ou 0,5885m

$$a = 208,7395 - 127x(0,5885) = 134N$$

$$\alpha = 134 - 268 \quad (\text{Eq. 3.8})$$

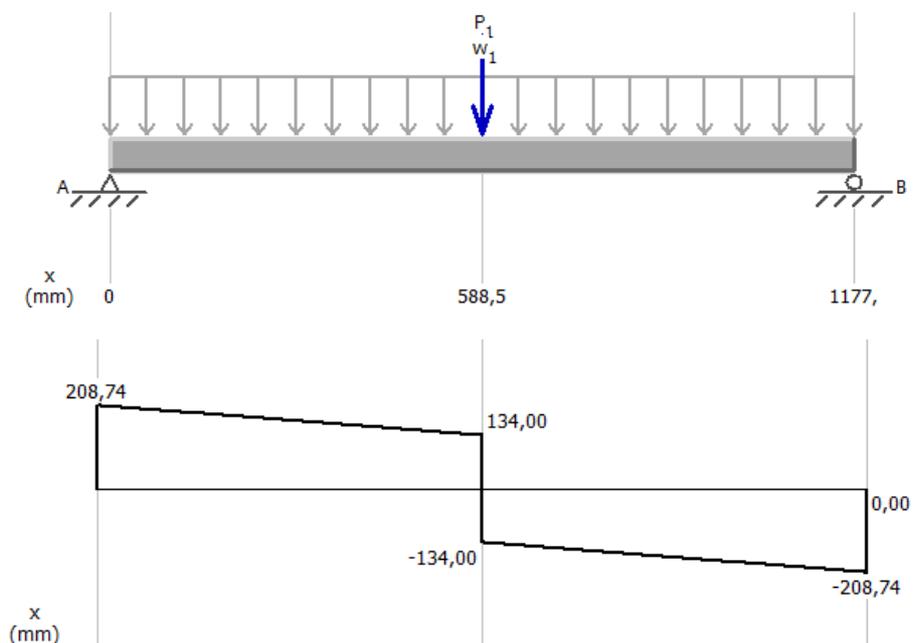
$$\alpha = -134N$$

3. Ponto B – no ponto 1177mm ou 1,177m

$$a = -134 - 127x(0,5885)$$

$$a = -208,7395 \quad (\text{Eq. 3.9})$$

$$\alpha = -283,497 + V_B = 0N$$



3.10. Diagrama de esforços cortantes

Momento Fletor:

$$\mathcal{M}_A = 0$$

$$\mathcal{M}_C = V_A \cdot (0,5885) - \left(127 \times 0,5885 \times \left(\frac{1,177}{4} \right) \right) \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Com o valor de $V_A = 208,7395N$, obtido em passos anteriores, tem-se:

$$\mathcal{M}_C = 100,8511N \cdot m$$

$$\mathcal{M}_B = V_A \cdot (1,177) - \left(127 \times 0,5885 \times \left(\frac{1,177}{4} \right) \right) - (268 \times 0,5885) - \left(127 \times 0,5885 \times \left(\frac{1,177}{4} \right) \right)$$

$$\mathcal{M}_B = 0 \text{ c. q. d.} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

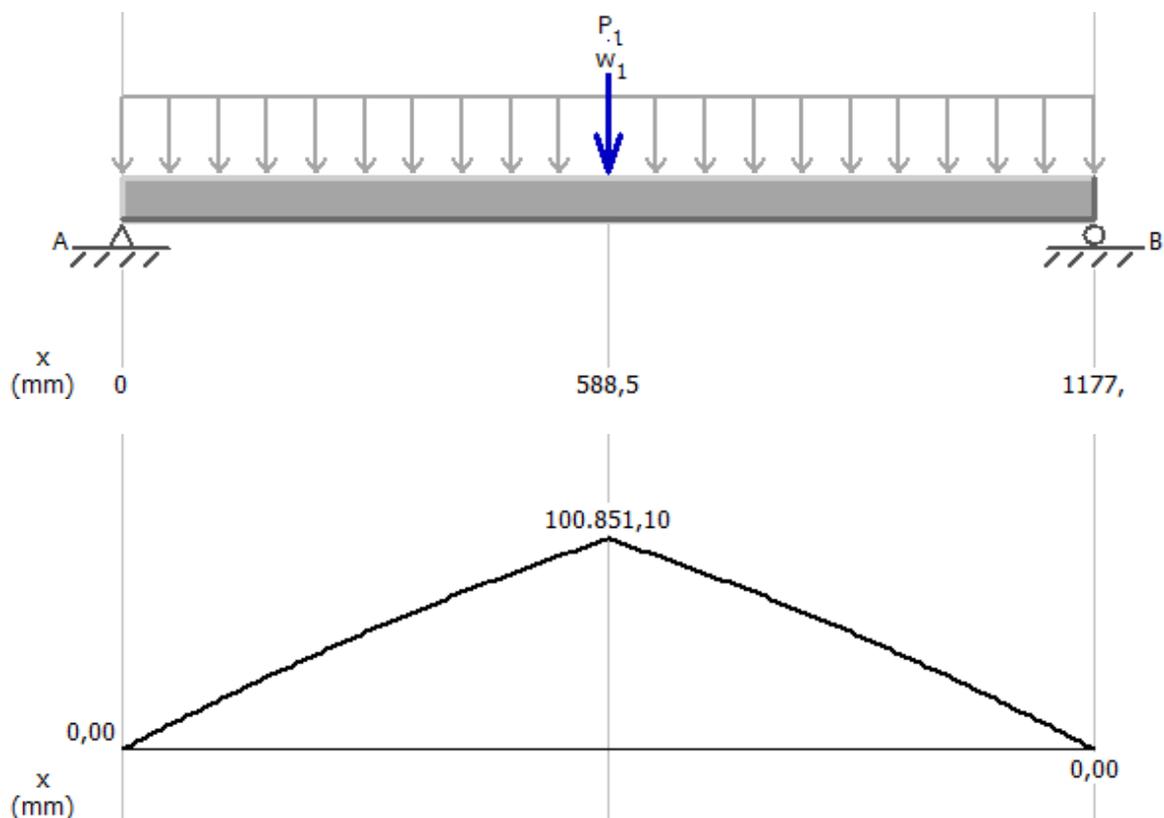


Figura 3.11. Diagrama de Momento Fletor

Cálculo da Tensão normal máxima σ_M :

$$\sigma_M = \frac{6 \cdot \mathcal{M}}{(b \cdot h^2)}$$

$$\sigma_M = \frac{6 \times 100,851,1}{60 \times 60^2} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$\sigma_M = 2,8014 \text{ MPa} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Cálculo da Tensão de cisalhamento máxima \mathcal{T}_M :

$$\mathcal{T}_M = \frac{3.V}{2.A}$$

$$\mathcal{T}_M = \frac{3 \times 208,74}{2 \times (60 \times 60)} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

$$\mathcal{T}_M = 0,0869 \text{MPa}$$

Conhecendo as tensões máximas calculadas acima, e, os dados de projeto contidos na página 10 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012) temos:

Módulo de elasticidade do alumínio:

$$E = 72000 \text{N/mm}^2$$

Momento de inércia da seção transversal:

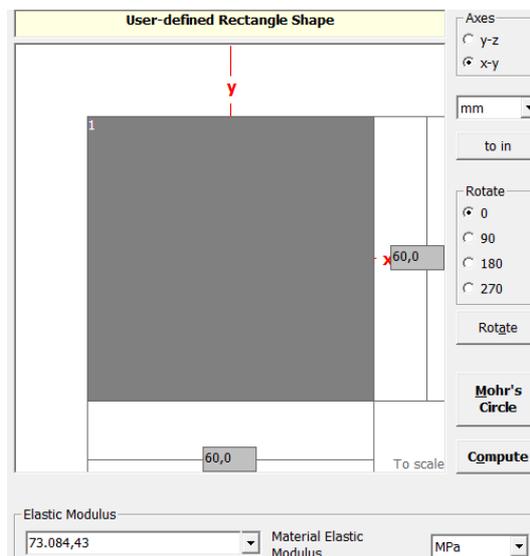
$$I_x = \frac{b.h^3}{12} = 435390 \text{mm}^4 \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$$I_y = \frac{b.h^3}{12} = 651610 \text{mm}^4 \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Para cálculo da deformação da linha média (BEER e JOHNSTON JR., 1992), temos a equação:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{M(x)}{E.I} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Simulando tais tensões máximas no software MDSolids®, tem-se:



X Axis Properties

From bottom to centroid	y (bot)	30	mm
From centroid to top	y (top)	30	mm
Area of shape	A	3600	mm ²
Moment of Inertia	I _x	1080000	mm ⁴
Section Modulus	S _x	36000	mm ³

Section Modulus (bottom)	S (bot)	36000	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	36000	mm ³
Radius of Gyration	rx	17.32050808	mm
Plastic Modulus	Zx	54000	mm ³
Shape Factor		1.5	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	30	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	30	mm

Y Axis Properties

From left to centroid	x (left)	30	mm
From centroid to right	x (right)	30	mm
Area of shape	A	3600	mm ²
Moment of Inertia	Iy	1080000	mm ⁴
Section Modulus	Sy	36000	mm ³
Section Modulus (left)	S (left)	36000	mm ³
Section Modulus (right)	S (right)	36000	mm ³
Radius of Gyration	ry	17.32050808	mm
Plastic Modulus	Zy	54000	mm ³
Shape Factor		1.5	
From left to plastic n.a.	xp (left)	30	mm
From plastic n.a. to right	xp (right)	30	mm

Other Properties

Elastic Modulus	E	73084.43	MPa
Polar Moment of Inertia	J	2160000	mm ⁴
Product of Inertia	Ixy	0	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	Imax	1080000	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	Imin	1080000	mm ⁴
Angle from x axis to Imax axis	β	0	degrees Clockwise
Angle from y axis to Imax axis	β	90	degrees Counterclockwise

Tabela 3.2 - Tabela de propriedades do eixo

Com isso, tem-se seguintes diagramas de deflexão (Z), na Figura 3.12.

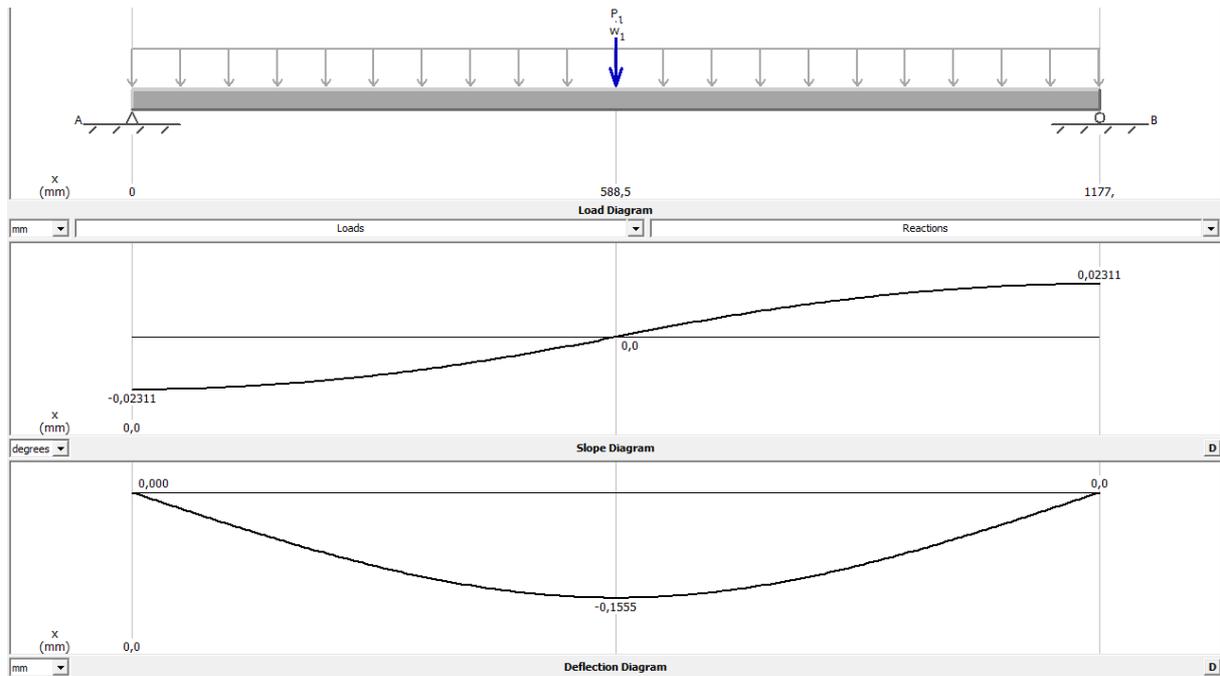


Figura 3.12. Diagrama de deflexão

Por fim, obtém-se que a deflexão máxima ($Z_{máx}$) é:

$$Z_{máx} = Z(x) \Big|_{x = \frac{L}{2}} = 0,1555 \text{ mm (para baixo)} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Tal valor de $Z_{máx}$ pode ser considerado aceitável, pois 15 centésimos de milímetro estão dentro de uma faixa de deflexão que não prejudica o processo de prototipagem rápida, conforme o critério que segue. Como critério de corte, considera-se que a deflexão máxima deve ser $D_{máx} \leq \sqrt{[(0,1^2) + (0,1^2) + (0,1^2)]} = 0,1732 \text{ mm}$. Assim, comparando os valores, tem-se que $Z_{máx} \leq D_{máx}$, ou seja, atende os requisitos do projeto.

Os esforços dinâmicos podem ser desprezados devido a baixas variações das velocidades de trabalho e de movimentação/aproximação que por si, geram baixas acelerações e consequentemente baixos esforços dinâmicos no eixo em questão. Para exemplificar, em termos numéricos têm-se, a velocidade de trabalho ($V_T \cong 10 \text{ mm/s}$) e velocidade de movimentação ($V_M \cong 25 \text{ mm/s}$).

3.5 SIMULAÇÃO CINEMÁTICA

Essa simulação tem como objetivo descrever os movimentos do efetuador terminal do robô cartesiano. O software utilizado para isso é o Workspace LT® que possibilita importar desenhos e/ou modelos sólidos tanto do AutoCad® quanto do SolidWorks®. O simulador permite um estudo detalhado das movimentações de cada entidade geométrica pertencente ao modelo do robô cartesiano. A posteriori os valores obtidos do simulador poderão ser comparados com valores reais medidos no robô.

Uma breve introdução do software de simulação Workspace LT® se faz necessária antes da exposição dos resultados obtidos em termos movimentação do robô na produção de peças por deposição de solda. A ideia é utilizar o ambiente de simulação do Workspace LT® de modo a confirmar se a estratégia de movimentação atende os requisitos de fabricação mecânica. Com isso, é possível monitorar e ajustar velocidades e acelerações máximas em cada uma das 3 juntas do robô. Outra possibilidade é de verificar visualmente se a estratégia de movimentação bem como a trajetória corroboram à obtenção da geometria da peça a ser fabricada. Nessa etapa, pode-se detectar colisões além de obter o envelope de trabalho do sistema robótico.

Para proceder a simulação, a princípio utilizou-se o desenho no formato genérico .IGES e .DXF fornecidos pelo próprio fabricante. Contudo, quando se importa um sólido a partir desses formatos genéricos se perdem as conexões entre elos e juntas do modelo, bem como entre os travamentos entre partes e fins de curso. O resultado da importação de montagens mecânicas de alta complexidade geométrica seja em .IGES ou .DXF pelo Workspace LT® torna-se inviável. Isso pois apenas os contornos, sem limites de movimentação ou mesmo sem relações entre as juntas do robô não fazem sentido em uma simulação, para qual, a montagem e relações de fixação entre as diversas partes e mecanismos são essenciais.

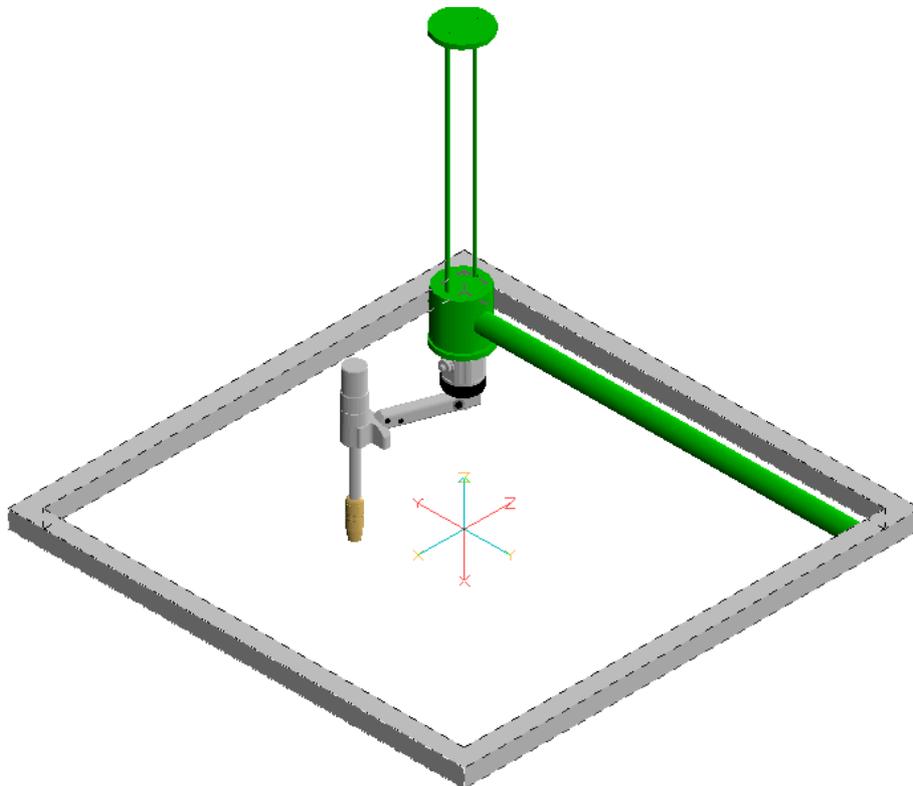


Figura 3.13. Modelo 3D criado no Workspace

Por isso, a modelagem mecânica, i.e., obtenção de um sólido 3D que representasse o robô no ambiente de simulação envolveu basicamente a utilização de formas cúbicas e cilíndricas

extrudadas de maneira que, conectados, possam representar os elos (*links*) e as as 3 juntas prismáticas (*joints*) do pórtico do tipo PPP ou 3P.

Para proceder a simulação os seguinte passos foram necessários:

1ª parte: Criando geometrias e definindo posicionamentos

1º passo:

Criação da geometria que represente o robô cartesiano de 3 graus de liberdade com o mesmo envelope de trabalho (*working area*) do robô Schneider-Electric adquirido;

Via ferramentas CAD temos um robô com stroke 800x800x500, conforme o esperado, vide Figura 3.13. Além disso, por se tratar de um robô cartesiano, temos que todas 3 juntas são prismáticas, 3P ou PPP. Na face inferior do 3º elo (*link3*) do robô foi anexado uma tocha de soldagem do tipo *Tregaskiss Weld Gun*, AC180, disponível na biblioteca do software de simulação.

2º passo:

O robô foi criado a partir dos seguintes posicionamentos:

- CP (*current position*) = (0,0,0), que equivale ao centro geométrico do robô;
- ZP (*zero position*) = (-400,-400,0), que é a posição de início de trabalho. Vale ressaltar que para essa simulação, as coordenadas de X e Y (-400,-400) são provenientes do zero padrão do sistema de origem (*Home Position*) do sólido que representa o robô. A partir de então, os posicionamentos *Home* e *Zero Position* são convencionados como mesmo ponto, sendo ambos a origem do sistema desenergizado (0,0,0). Isso facilita o referenciamento, visto que as chaves fim de curso dos três eixos (A,B,C) estão com acionadas nessa posição. Com uma lógica simples de uma porta AND de três entradas (A,B,C) (vide Figura 3.14) pode-se definir que o sistema começa qualquer trajetória da posição *zero/home*, i.e., quando a saída lógica da porta AND estiver em nível alto (saída=1). Portas AND com três entradas são facilmente encontradas, como por exemplo, no CI TTL7411.

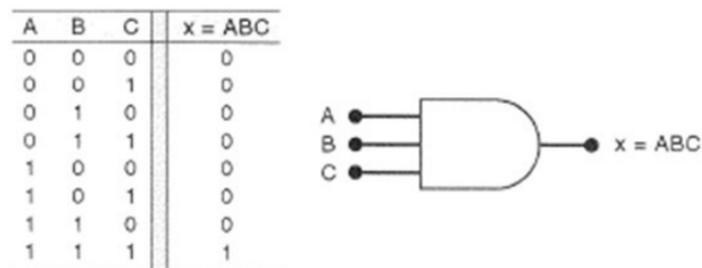


Figura 3.14. Porta AND e tabela verdade

3º passo:

- Criação de um cubo (base da soldagem) a partir do CP (0,0,-1000)
- Dimensões do cubo (azul): (400,400,200)

4º passo:

Criação de outro cubo (menor), que será a outra parte a ser soldada pelo robô.

- CP(0,0,-800)

- Dimensões do 2º cubo (vermelho): (200,200,100)

2ª parte: Programação do Robô

Nessa etapa, a partir da criação de *Teach Points* (TPs) o robô será programado para soldar ao longo do contorno que une os quatro vértices superiores do bloco vermelho criado na etapa anterior.

1º passo:

Criação de um *New blank robot track* onde o programa será gravado:

Ativando a faixa de gravação dos TPs:

- Na guia *Simulation*, sub guia *Robots*, base *xy*, *Tracks*, clique com o botão direito e clique em “*Add new track*”;
- Confirme o nome da faixa e a linguagem desejada, nesse caso, trabalharemos com a KAREL 02;
- Com clique de botão direito sobre *Track01*, ative a faixa, pois isso habilita sua execução quando *WorkSpace* está no modo *run*.
- Para definir os TPs, serão usados as guias de controle manual, *Pendant* e *Turn CP*.

2º passo:

Definição do *Toolframe*, que nesse caso é a ponta da tocha de solda. Essa etapa fixa a posição e orientação do efetuador terminal. Assim, os TPs orientam o posicionamento do *Toolframe*, que é o arame de solda, ao invés de ser a face da extremidade (robot's end plate face) do acoplamento do robô. Para isso, deve-se:

- Posicionar o CP (*placetool*) na extremidade do arame de solda;
- Clicar no botão CP, que define essa CP como *Toolframe*;
- Para manter o ângulo de soldagem/deposição de 90º constante durante o processo, precisa-se orientar o CP de modo que o arame de solda esteja ortogonal à superfície soldada. Para isso, usa-se a janela *TurnCP* e a ferramenta *Approach Vector Down*.

3º passo:

Definir os TPs:

- Clique no vértice superior do cubo menor (vermelho) e pressione a tecla "v" para ajustar o posicionamento do vértice;
- Agora, para posicionar o robô nesse ponto, clique em CP (*movetool*);
- No controle de posição, *Pendant*, clique em *Learn TP*;
- Esse passo é repetido para os 4 vértices superiores do cubo menor, conforme as TPs indicadas na Figura 3.15.

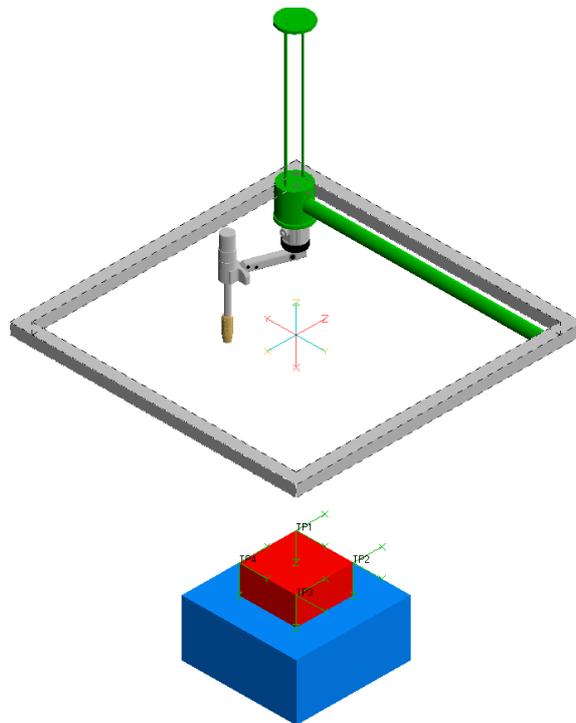


Figura 3.15. Definição dos TeachPoints (TPs)

4º passo:

Gravar os TPs:

- i. Com clique no botão direito sobre Track01, em seguida clique em *Record Track*;
- ii. Na janela *Action*, clique em *Begin*;
- iii. Repita o 2º passo i;
- iv. Na janela *Action*, clique em *Robot Move Commands*, em seguida em *Move Home*;
- v. Repita o 2º passo i;
- vi. Clique em *Action*, *Move TP* e escolha TP01;
- vii. Na guia *Action*, *Tool Actions*, ative a tocha de solda em *ArcWeldOn*;
- viii. Em seguida usa-se a sequência que define a trajetória do efetuador terminal: *Move TP -> TP02 -> TP03 -> TP04 -> TP01*
- ix. Na guia *Action*, *Tool Actions*, desative a tocha de solda em *ArcWeldOff*
- x. Por fim, volte para origem do sistema com o comando *MoveHome* e finalize a simulação clicando em *End*.

Depois de ter gravada a trajetória em track01, obtém-se de uma simulação gráfica (animação) que permite visualizar as movimentações e detectar possíveis colisões automaticamente. Outra vantagem é ter acesso aos TPs e ao código que define essa trajetória em várias linguagens usuais em robótica como Arla e Karel. Esse código pode ser utilizado na planta real já que não houve quaisquer colisões. Nessa simulação, se tem acesso e controle de variáveis do processo como ativar ou desativar o arco voltaico para soldagem, velocidades e acelerações de cada eixo nas movimentações. A sequência da simulação pode ser observada na Figura 3.16.

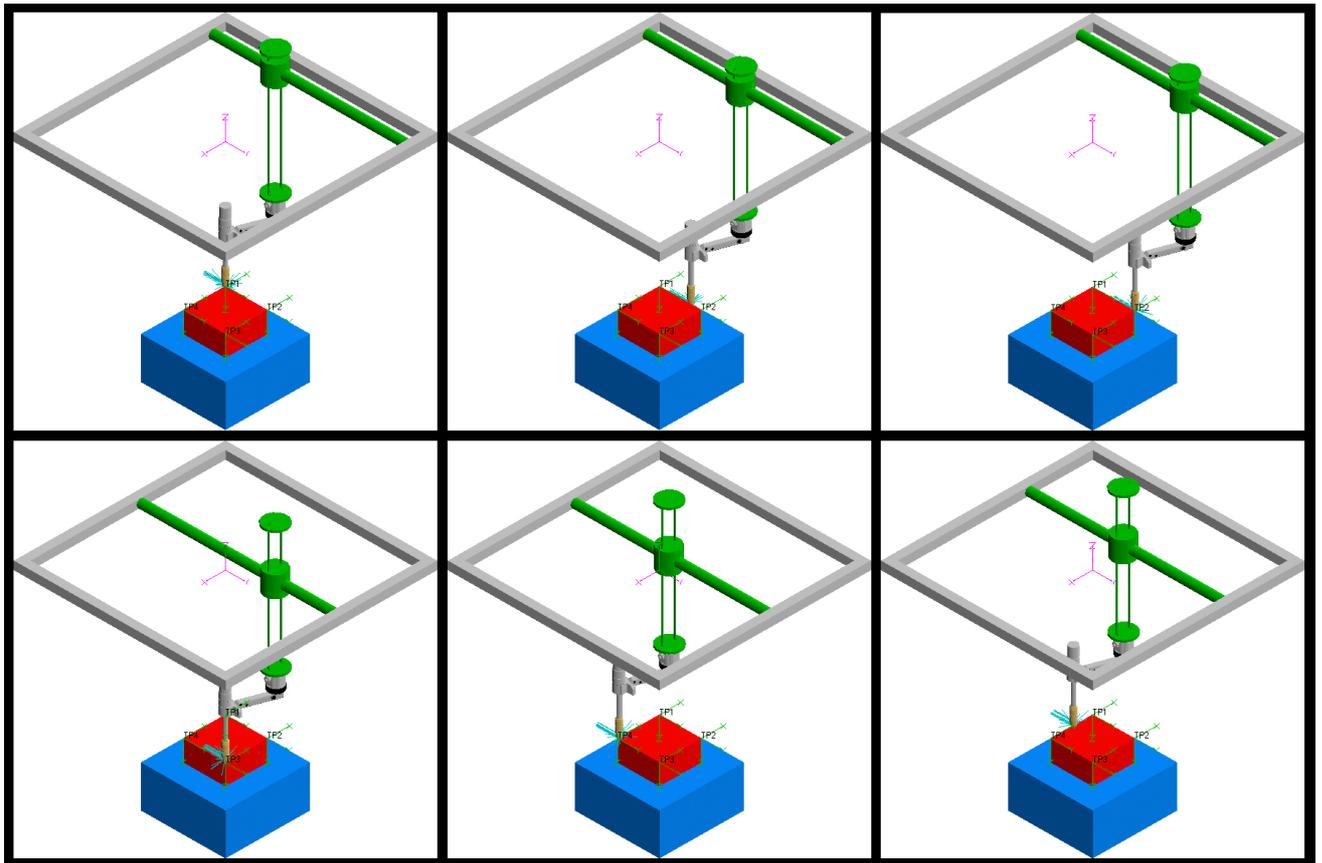


Figura 3.16. Caminho percorrido pela tocha GMAW

TPs geradas:

TP1 = POS(700,100,100,179.7964,44.9998,179.856,')')

TP2 = POS(700,-100,100,179.7964,44.9998,179.856,')')

TP3 = POS(700,-100,-100,179.7964,44.9998,179.856,')')

TP4 = POS(700,100,-100,179.7964,44.9998,179.856,')')

Código que descreve o processo de soldagem robotizada na linguagem Karel2:

PROGRAM Track01

-- Workspace LT KAREL 2 Program for base xy Robot

-- TEACHPOINT DECLARATIONS

VAR

TP1 : POSITION

TP2 : POSITION

TP3 : POSITION

TP4 : POSITION

BEGIN

\$USEMAXACCEL=TRUE

%INCLUDE Track01#

```

$UTOOL=POS(-26.0306,0.0395,-300.0026,180,-45,179.712,')
WITH $MOTYPE=JOINT
    MOVE TO $HOME:$UTOOL
MOVE TO TP1
-- ! ARCWELDON 100,25
MOVE TO TP2
MOVE TO TP3
MOVE TO TP4
MOVE TO TP1
-- ! ARCWELDOFF
WITH $MOTYPE=JOINT
    MOVE TO $HOME:$UTOOL
END Track01

```

3.6 PROJETO ESTRUTURAL DA BASE DO PÓRTICO

Com intuito de detalhar o projeto e o processo de fabricação de uma base para o robô MAXR23-S42-H42-C42 da Schneider-Electric que será montado/instalado no GRACO, essa subseção foi criada.

A base deve permitir a movimentação do robô no envelope cúbico definido pelas dimensões 800x800x500mm, bem como possuir rigidez mecânica suficiente para suportar as tensões máximas geradas por um conjunto de massa de aproximadamente 90Kg. Vale ressaltar que esse conjunto pode atingir velocidades de 5m/s em cada um dos eixos XYZ simultaneamente, e, acelerações máximas de 20m/s^2 , a depender da distância entre eixos e carga suportada (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012). Para fins de projeto, as acelerações máximas (de movimentação do efetuator terminal, i.e., tocha de solda acoplada) podem ser consideradas 10m/s^2 e o eixo X será considerado estático. Isso pois o processo de prototipagem rápida, demanda baixas velocidades de movimentação e velocidades constantes para deposição de metal, ou seja acelerações baixas ou até nulas (no caso de velocidade constante). Já o eixo X pode ser considerado estático devido a sua utilidade de ser apenas base para rolagem do eixo Y, que fica bi-apoiado em X1 e X2 (como pode ser visto na seção 3.4 CÁLCULO DE DEFLEXÃO MÁXIMA SOBRE O EIXO Y).

Para proceder com o projeto da base do pórtico foi utilizado o software de desenho assistido por computador SolidWorks® 2014. A princípio, com base na Figura A. 1, foram definidas as dimensões dos perfis em X e Y de modo a permitir a fixação robô de forma adequada. Por fixação adequada entende-se uma fixação sem quaisquer folgas que possam interferir na precisão de trabalho no processo de prototipagem rápida. Sabe-se também que interferências mecânicas entre a base e as partes móveis do robô são indesejadas, visto

que podem prejudicar a movimentação do robô, diminuindo seu envelope de trabalho. Adicionalmente, a fixação deve considerar área de contato entre a superfície de ambas partes em junção, além de esforços mecânicos transmitidos entre o conjunto robô/base. Com isso, a escolha de parafusos que resistam aos esforços cisalhantes e a disposição geométrica desses parafusos torna-se também um fator importante.

Para calcular os comprimentos das seções X e Y, tanto a definição de área de trabalho (*working area*) quanto as cotas presentes na vista superior da Figura A. 1 foram essenciais. Já para definir a dimensão vertical da estrutura de suporte do robô, considera-se que a base de deposição na mesa posicionadora estará a uma altura de 1,2m do piso. Levando em conta a distância de movimentação do eixo vertical do robô, fixada em 500mm, e a dimensão da tocha de soldagem, estimada em 300mm, tem-se uma altura total de 2000mm (Eq. 3.20). Observa-se que a altura da base de deposição foi selecionada considerando que o operador deverá trabalhar na posição em pé.

- Cálculo do comprimento em X:

$$L_X = (252,5 - 80 - 60) + 800 + (323,5 - 80 - 60)$$

$$L_X = 112,5 + 800 + 183,5 \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$L_X = 1096\text{mm}$$

- Cálculo do comprimento em Y:

$$L_Y = (155 - 60) + 800 + (222 - 60)$$

$$L_Y = 95 + 800 + 160 \quad (\text{Eq. 3.19})$$

$$L_Y = 1055\text{mm}$$

- Cálculo do comprimento em Z (altura):

$$L_Z = 1200 \text{ (dist. do solo)} + 300 \text{ (tocha de solda)} + 500 \text{ (alcance em Z)}$$

$$L_Z = 2000\text{mm} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Vale a ressalva que em X e em Y deve-se somar 100mm ao comprimento, que são oriundos da seção horizontal do tubo retangular utilizado (2x50mm) como pode ser visto na Figura 3.19. Outro detalhe é que o arranjo mecânico dos tubos foi projetado em uma disposição em que todas as seções horizontais, que são submetidas ao carregamento, fiquem biapoiadas. Assim, pode-se afirmar que a carga total fica distribuída de forma equivalente em cada uma das seções verticais. Em relação a altura da base, denominada L_Z , nota-se que 2000mm (coluna engastada) submetida a um esforço horizontal geraria um momento muito elevado, na ordem de $250\text{N} \times 2000\text{mm} = 500\text{Nm}$. Para diminuir esse momento, a base vertical foi dividida em duas seções menores (de 1000mm cada) além de ser reforçada ao longo de sua

estrutura com suportes do tipo mão francêsã soldados em 45°, como pode ser visto na Figura 3.17.

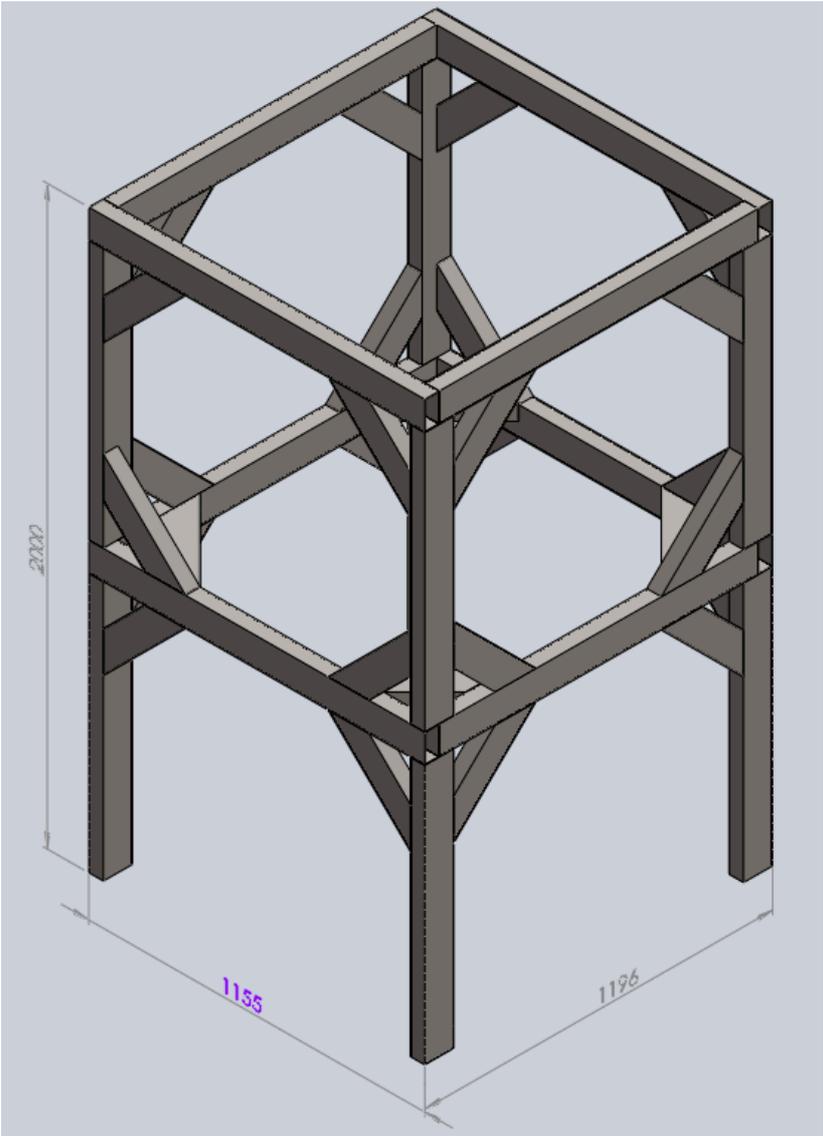


Figura 3.17. Perspectiva Isométrica

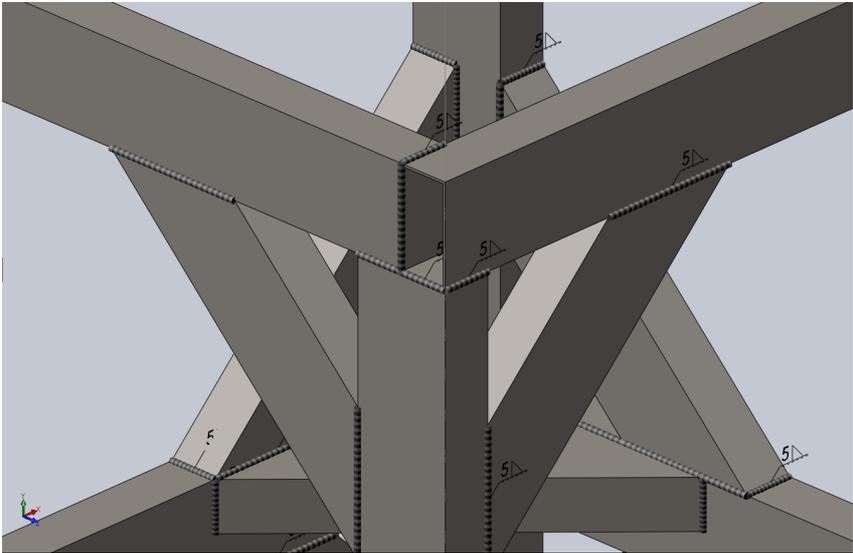


Figura 3.18. Detalhe de junções por solda

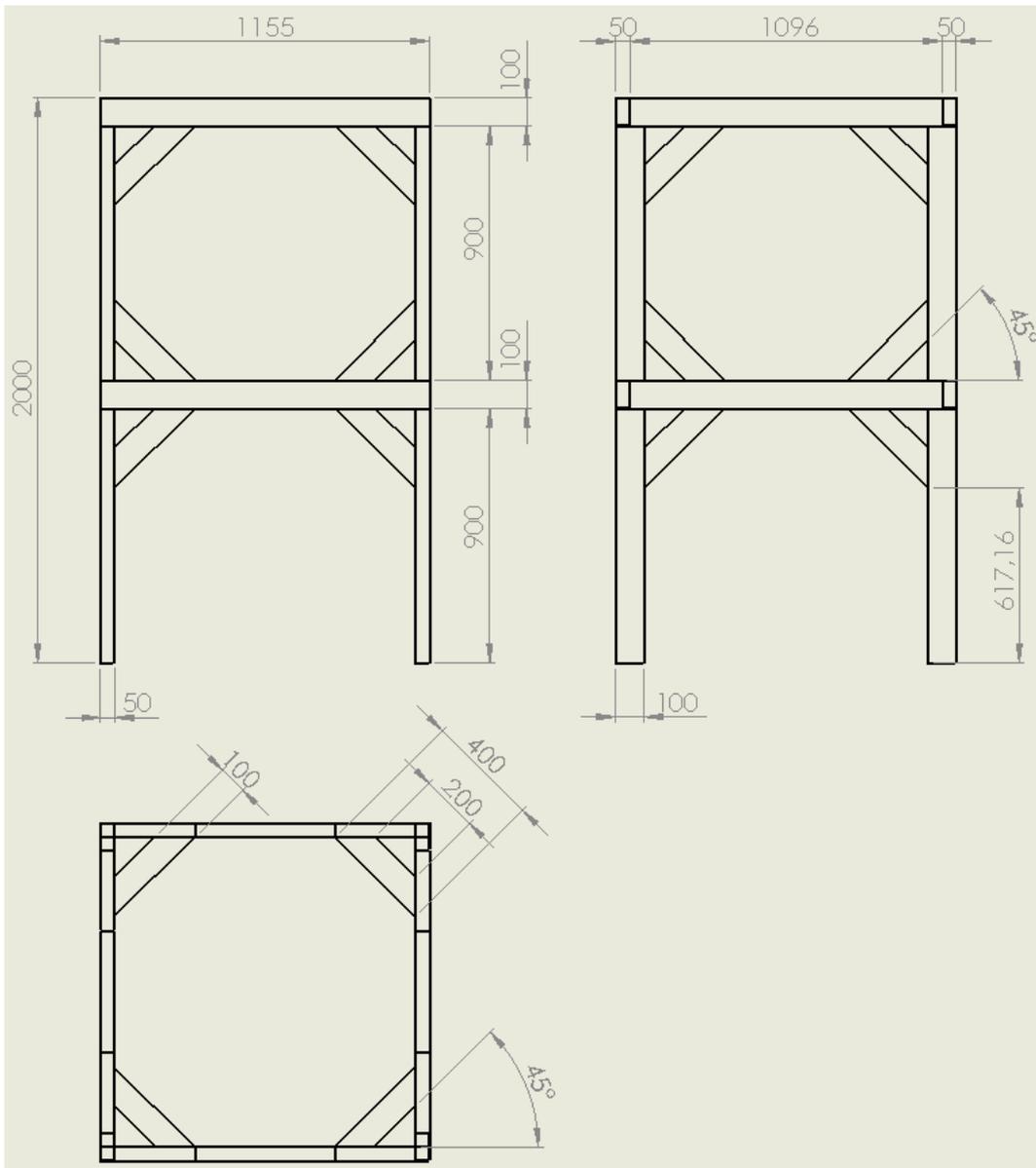


Figura 3.19. Vistas: Frontal, lateral esquerda e superior

3.6.1 Cálculo de deflexão máxima

Esse cálculo visa demonstrar que a deflexão máxima da base em questão é menor que a repetibilidade do robô cartesiano que é de $\pm 0,1\text{mm}$ em cada um dos eixos X, Y e Z.

Considerando o somatório das massas que compõem o sistema, temos:

- Massa dos eixos (X, Y, Z) + servo-motores + encoders (vide nota fiscal) $\cong 74,595\text{Kg}$
- Massa da tocha de solda + cabos+ esteira porta cabos + acoplamentos (equivalente ao payload) $\cong 15\text{Kg}$;
- Fator de segurança adicional para acessórios não considerados = 10Kg;
- Massa total considerada = 100Kg

Com isso, a carga distribuída em cada uma das quatro estruturas verticais é:

- $100 \div 4 = 25\text{Kg}$

Sabe-se que o robô adquirido Lexium MAXR23-S42-H42-C42 pode ter acelerações de até 20m/s (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012) dependendo da carga e comprimento dos eixos síncronos. Contudo, com base nos sistemas de prototipagem via deposição de solda robotizados presentes no Grupo de Robótica, Automação e Controle – GRACO da Universidade de Brasília – UnB, pode-se assumir que as acelerações máximas para o processo de fabricação em questão, não ultrapassam 10m/s².

Assim, considerando as premissas acima assumidas, temos a partir da 2ª lei de Newton, Princípio Fundamental da Dinâmica:

$$F = m \cdot a$$

$$F = 25 \times 10 \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$F = 250N$$

Sendo $F = 250N$ força resultante horizontal localizada na extremidade de cada uma das estruturas de sustentação verticais, que para efeito de cálculo, serão consideradas colunas engastadas.

Quando se transfere uma força em estruturas com reforços do tipo treliça, além da força deslocada para o ponto a ser considerado também devemos adicionar o momento de reação causado pela haste da treliça. Assim, o momento M_1 pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_1 = \text{Momento de reação} = -M$$

$$M = 250 \cdot \cos(45^\circ) \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$M_1 = -250 \cdot \cos(45^\circ) \cdot \text{linha média}$$

A linha média é o linha na qual a componente ortogonal da força F atua na treliça. Como a treliça (tubo retangular 100x50) tem comprimento maior $L = 400mm$ e comprimento menor $l = 200mm$ e ângulos das seções transversais em ambas extremidades de 45°, pode-se obter intuitivamente o comprimento da linha média $l' = 300mm$. Assim, temos:

$$M_1 = -250 \cdot \cos(45^\circ) \cdot 300$$

$$M_1 = -53033,008N \cdot mm \text{ (sentido horário)} \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Como o momento M , tem sentido anti-horário, o seu momento de reação M_1 , tem sentido contrário, ou seja horário, na Figura 3.21. Tais convenções estão de acordo com as teorias da estática, visto que, o somatório dos momentos que atuam em uma viga são nulos.

$$\sum M = 0$$

$$M + M_1 = 0$$

$$M = -M_1 \text{ c. q. d.} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

O perfil utilizado é de aço 1020 com dimensões 100x50 [mm] e parede de 2,25mm. Sabe-se também que o módulo de elasticidade (E), do aço 1020 é de aproximadamente 206GPa (vide Figura 3.20).

Caso 1: Simulação com esforços direcionados no sentido da seção mais longa (100mm):

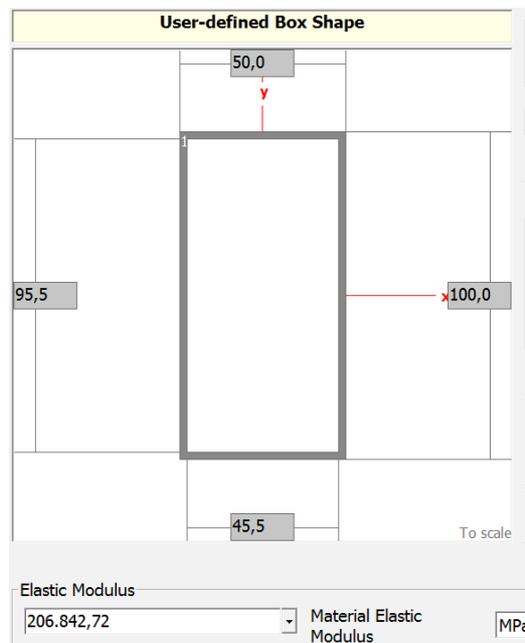


Figura 3.20. Perfil retangular em aço 1020

O detalhamento dos cálculos e esforços cortantes, momento fletor e deflexão máxima serão omitidos nessa seção por já terem sido demonstrados na seção 3.4 CÁLCULO DE DEFLEXÃO MÁXIMA SOBRE O EIXO Y. Contudo, os resultados simulados com auxílio do software MDSolids® serão apresentados e discutidos em seguida.

Como pode ser visto na Figura 3.19, a maior seção vertical da base possui 617,16mm de comprimento. Com isso, se considerarmos a transmissão de forças na estrutura em que $F=250\text{N}$ (para cima) supra calculada atua na extremidade superior dessa viga somada ao momento devido a treliça $M_1 = 53033,01\text{N}\cdot\text{mm}$ (no sentido horário) teremos:



Figura 3.21. Carregamento concentrado de 250N e momento M_1

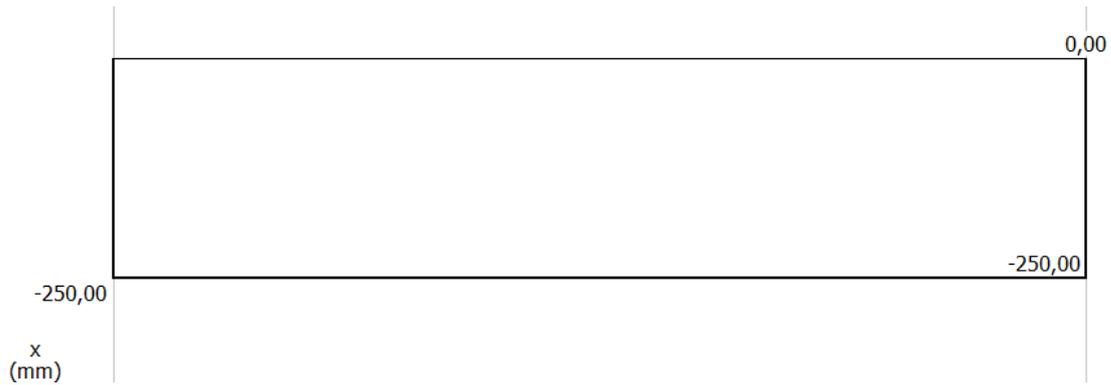


Figura 3.22. Diagrama de Esforços Cortantes em [N]

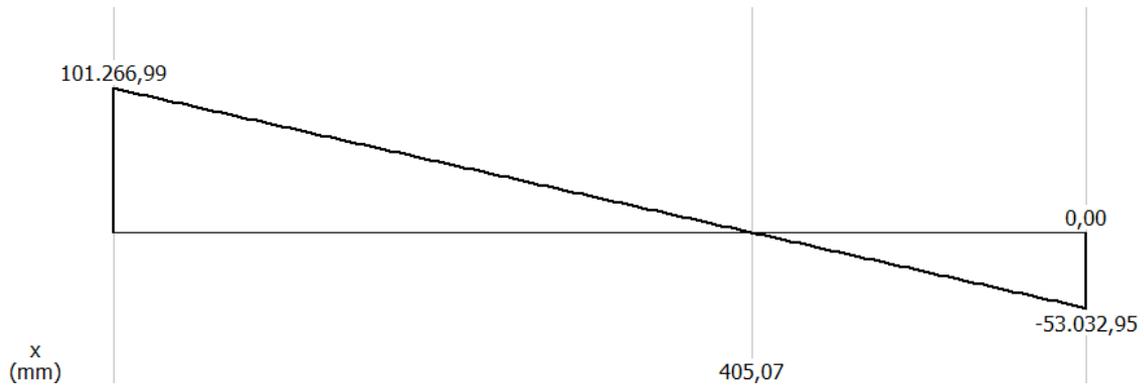


Figura 3.23. Diagrama de Momento de Inércia em [N.mm]

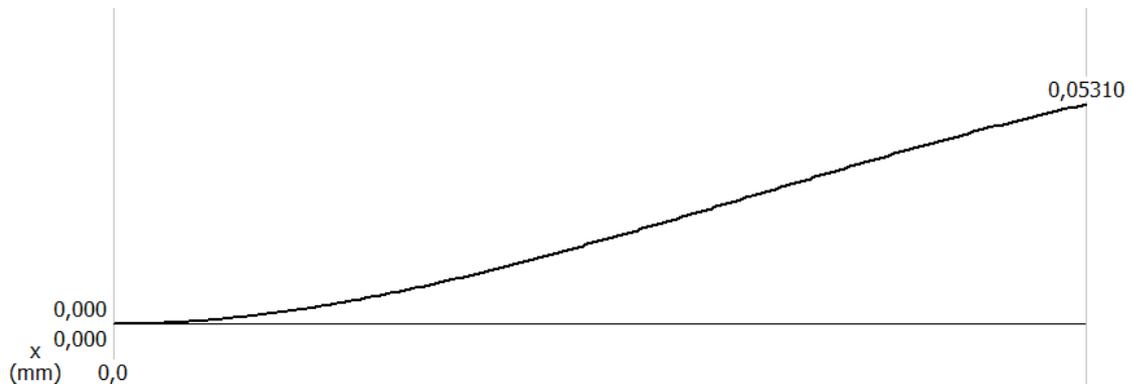


Figura 3.24. Diagrama de Deflexão Máxima [mm] na seção longa

Como pode ser observado na Figura 3.24, a deflexão máxima seria de 0,05310mm, o que atende a especificação de projeto: Deflexão máxima no sistema $\leq \sqrt{[(0,1^2) + (0,1^2) + (0,1^2)]} = 0,1732mm$.

Caso 2: Simulação com esforços direcionados no sentido da seção mais estreita (50mm):

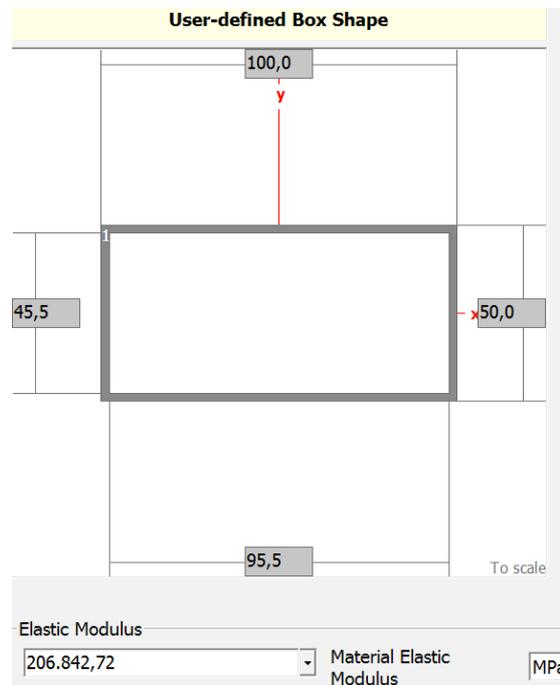


Figura 3.25. Perfil retangular em aço 1020

Para simulação na seção transversal mais estreita, em outras palavras, seção que possui menor rigidez mecânica a esforços axiais, mantemos os valores calculados para o primeiro caso de $F=250N$ (para cima) que atua na extremidade superior dessa viga somada ao momento devido a treliça $M_1 = 53033,01N.mm$ (no sentido horário) teremos os seguintes resultados:



Figura 3.26. Carregamento concentrado P_1 e Momento M_1

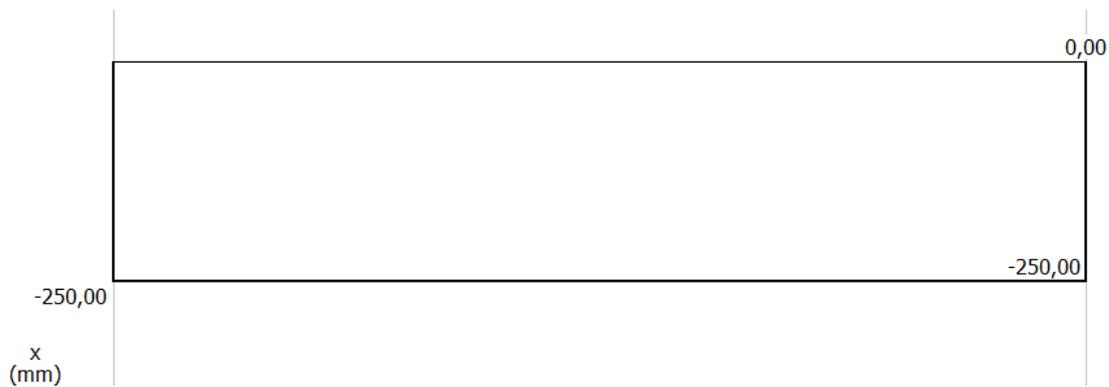


Figura 3.27. Diagrama de Esforços Cortantes [N]

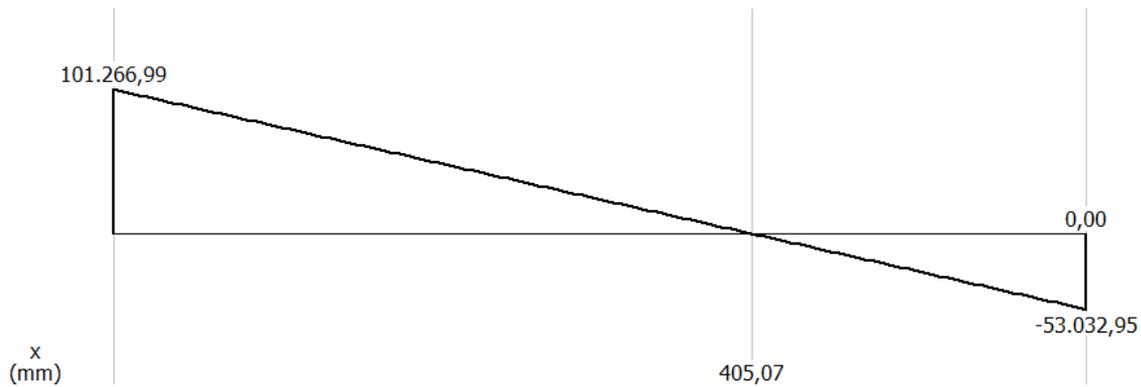


Figura 3.28. Diagrama de Momento de Inércia [N.mm]

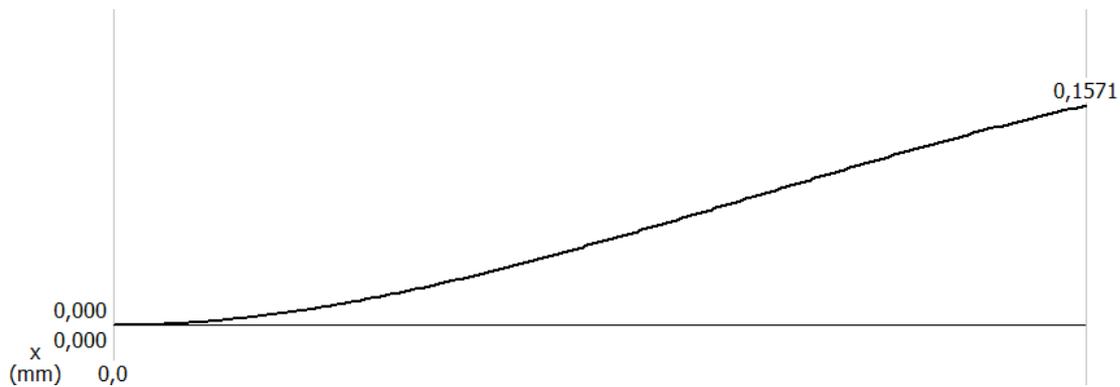


Figura 3.29. Diagrama de Deflexão Máxima [mm] na seção estreita

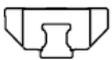
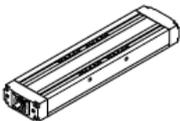
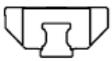
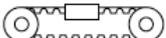
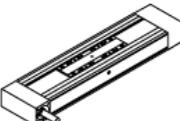
Como pode ser observado na Figura 3.29, a deflexão máxima seria de 0,1571mm, o que atende a especificação de projeto: Deflexão máxima no sistema $\leq \sqrt{[(0,1^2) + (0,1^2) + (0,1^2)]} = 0,1732mm$.

Para fins de comparação e tentativa de otimização do projeto, foram feitas simulações do mesmo perfil contudo com parede mais fina, de 2mm. O resultado foi uma deflexão máxima de 0,0632mm e 0,1745 na seção transversal longa e estreita, respectivamente. Como o valor obtido para seção estreita, ultrapassa o limite de projeto $0,1745mm > \sqrt{[(0,1^2) + (0,1^2) + (0,1^2)]} = 0,1732mm$ o perfil utilizado será 100x50x2,25mm

de modo a não ter deflexões na base que prejudiquem a repetibilidade do processo de prototipagem rápida via deposição de metal com a tocha de solda GMAW.

3.7 MONTAGEM MECÂNICA

Em termos de montagem mecânica, deve-se considerar os módulos responsáveis para converter movimento rotacional em linear, uma vez que, o deslocamento do robô cartesiano acontece de forma linear sobre os eixos coordenados. Outro aspecto importante a ser considerado sobre essa conexão do eixo-árvore do motor com o módulo que contém a caixa de redução, é a transmissão de movimento ao longo do eixo de referência (eixo com mudança de posição ativa). Essa pode ser feita pelo deslocamento de uma rosca de transmissão do sistema porca e fuso (*ball screw drive*) ou por correia dentada (*toothed belt drive*) na qual a parte móvel da estrutura se move sobre trilhos guia com rolamentos (*guideway*) segundo catálogo do fabricante (BOSH REXROTH CORPORATION, 2012). No caso específico do robô Schneider adquirido, a movimentação nos três eixos é feita via correia dentada. Basicamente, as correias dentadas transferem o movimento de uma polia dentada para outra. A partir das velocidades rotacionais máximas dos servo-motores e seus respectivos torques máximos (considerando a razão da caixa de redução), pode-se obter facilmente a velocidade linear máxima do conjunto via equações como $v = \omega \cdot R$, em que v é a velocidade linear, ω velocidade angular e R o raio da polia dentada (saída da caixa de redução). Outras equações que relacionem velocidade linear e redução (para obter rotação de saída) e a equação da polia plana também podem auxiliar tais cálculos. Contudo, os manuais do robô adquirido (SCHNEIDER ELECTRIC, 2012) já fornecem os valores de velocidade máxima = 5m/s e torque máximo = 30Nm no eixo X e de 20Nm no eixo Y. Tais valores atendem perfeitamente o processo de prototipagem rápida via deposição de solda, que, demanda velocidades baixas na ordem de 0,015m/s (90cm/min) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991) e por consequência acelerações também baixas.

Type	Guideway	Drive unit	Compact Module
CKK	 <p>Ball rail system</p>	 <p>Ball screw drive</p>	
CKR	 <p>Ball rail system</p>	 <p>Toothed belt drive</p>	

3.30. Mecanismos de transmissão de força nos eixos

Quanto as vantagens de se utilizar correias dentadas como elemento de transmissão de força estão baixo preço, simplicidade mecânica, baixa manutenção, leveza, baixo índice de ruído e a não necessidade de lubrificação. Contudo, há limitação de capacidade de carga e aquecimento para transmissões em velocidades elevadas (não é o caso dessa aplicação). Essa tecnologia pode ser comparada com fusos de esferas recirculantes, que tem maior complexidade mecânica, preço mais elevado, necessita de lubrificação e conta com limitação de movimento por ser um sistema rígido. Em contrapartida, confere ao sistema altíssima rigidez e capacidade de carga bem elevada e com boa precisão (SANTOS, 2004). Por fim, para aplicação de prototipagem rápida robotizada, em que a carga no efetuator terminal é constante (tocha GMAW) e as velocidades de trabalho são baixas; por simples análise de custo benefício as transmissões via correia dentada são mais viáveis e, por isso são utilizadas nos três eixos, X, Y e Z.

3.7.1 Acoplamento Mecânico no efetuator terminal

O acoplamento em questão se trata de uma interface mecânica fabricada em alumínio que serve de conexão entre a tocha de solda e o efetuator terminal do robô. Tal interface se faz necessária devido aos diferentes posicionamentos dos furos de cada parte a ser unida. A partir de medições realizadas com paquímetro de resolução 0,02mm, foram obtidas as dimensões das duas partes a serem acopladas (tocha e robô, vide Figura 3.31). Conforme recomenda-se em Metrologia, foram feitas várias medições de modo a eliminar a chance de erros de paralaxe. Na Figura A.1, no detalhe denominado *Endplate Z-axis* podem ser observadas algumas dessas cotas. Vale a ressalve de que as distâncias entre furos, tipo de parafuso e espessuras das partes, são os dados mais importantes para obtenção da placa de interface mecânica. Em seguida, com auxílio do software de desenho assistido por computador SolidWorks® 2014, foi projetada a interface, que pode ser visto na Figura 3.32.



Figura 3.31. Base da tocha e do efetuator terminal

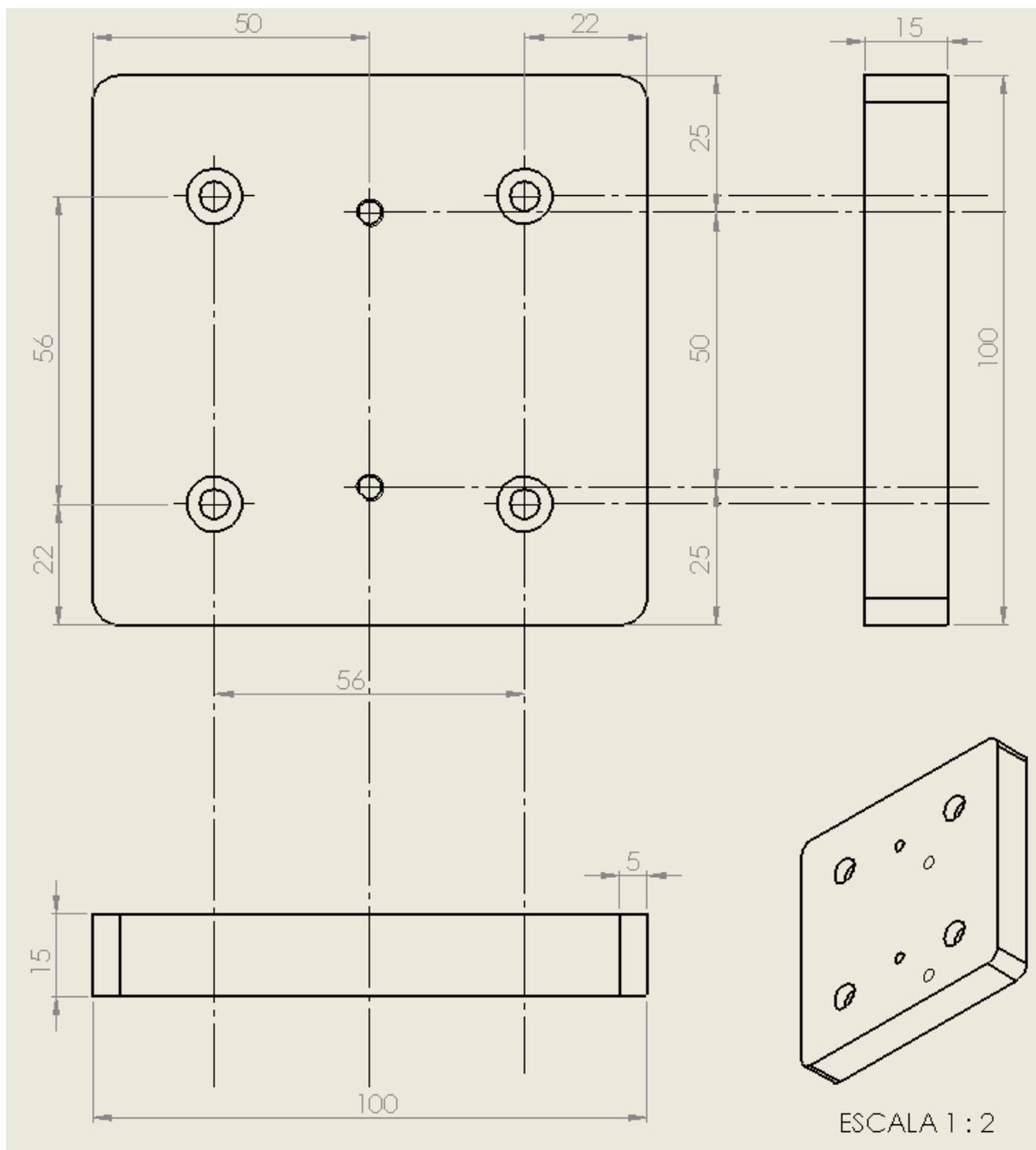


Figura 3.32. Vistas e perspectiva do acoplamento

Com relação aos dois furos centrados longitudinalmente (a 50mm das laterais), os mesmos são furos no padrão Ansi Métrico, do tipo Tarraxa reta/Furo roscado, condição final rosca cega de 13mm, com tamanho M5x0,8, sendo essa última dimensão o passo da rosca. Na peça que é base da tocha de solda (vide Figura 3.33), os dois furos são do padrão Ansi Métrico, do tipo com rebaixo, com rosca para parafusos Allen – Ansi B18.3M (cabeça cilíndrica sextavado interno), tamanho M5, ajuste justo, condição final passante. Já os quatro furos equidistantes, são do padrão Ansi Métrico, do tipo escareado, com rosca para parafusos Allen – DIN 7991/Ansi (cabeça chata sextavado interno), tamanho M5, ajuste justo, condição final passante.

Tais tipos de furo podem ser observados a seguir:



Quantidade: 2 furos; Tipo: Furo com rebaixo – passante (suporte da tocha GMAW, item 2, Figura 3.33).



Quantidade: 2 furos; Tipo: Tarraxa reta/Furo roscado - com rosca cega (interface, item 1, Figura 3.33).



Quantidade: 4 furos; Tipo: Furo escareado – passante (interface, item 1, Figura 3.33).

Uma montagem composta pela base da tocha, item 2 (representação aproximada em modelo CAD) e a placa de interface, item 1, pode ser vista na Figura 3.33.

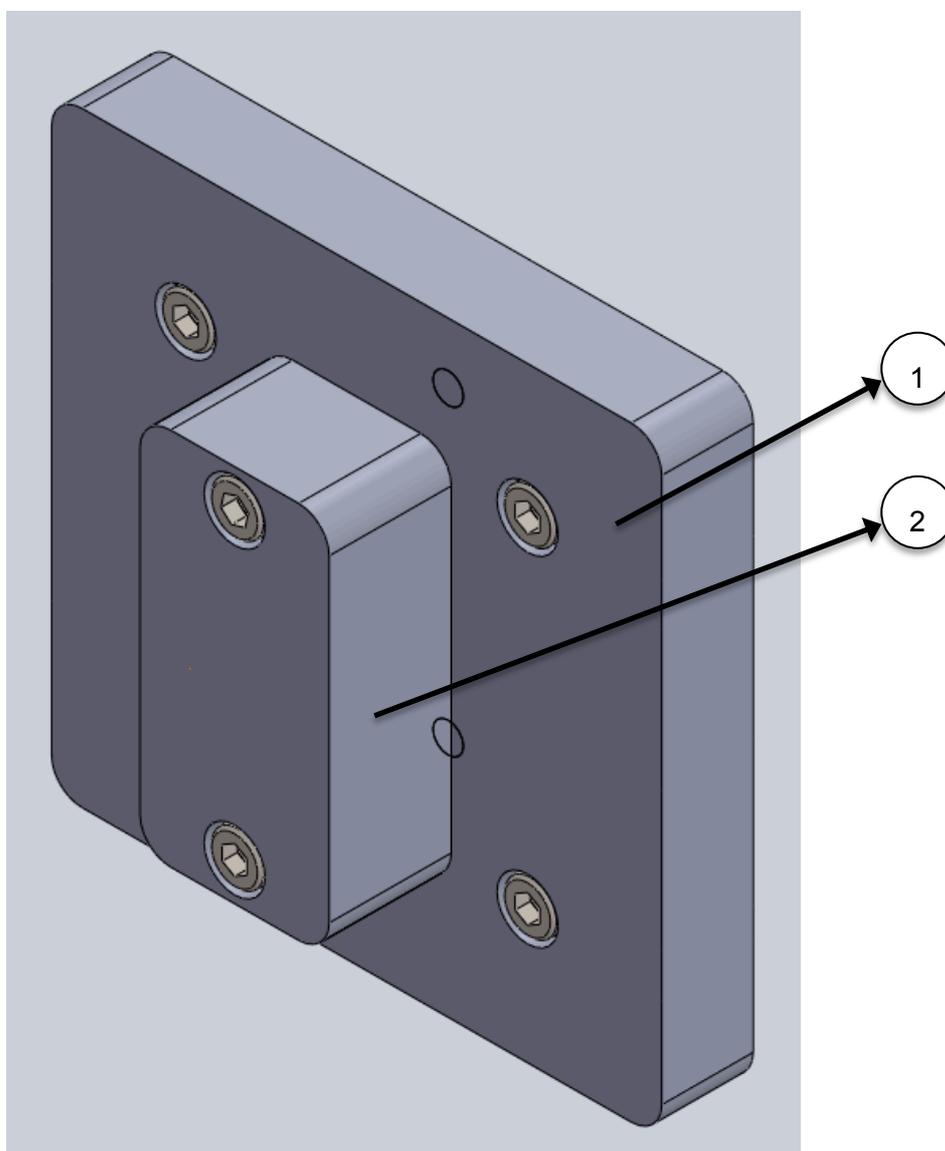


Figura 3.33. Montagem do sistema de acoplamento

Os parafusos utilizados na fixação suporte da tocha GMAW com placa de interface são do tipo M5x0,8 de rosca métrica, i.e., o ângulo entre os fios de rocas é de 60°. Uma vantagem desse padrão de rosca é de ter boa resistência a tração devido ao ângulo considerado grande entre os fios, que confere maior tensão máxima de cisalhamento.

O processo de fabricação da placa de interface parte da usinagem de uma chapa de 1" via fresamento até atingir a espessura de 15 mm bem como as outras dimensões especificadas. De maneira a obter precisão máxima na distância entre os furos para que aconteça acoplamento ideal, utilizar-se-a uma furadeira de coordenadas bem como uma broca de centro (possui uma ponta guia), presente nas instalações do centro de usinagem do SG-11 – do Departamento de Engenharia Mecânica.

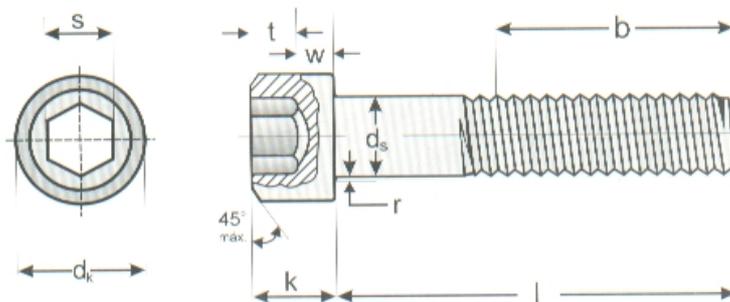


Figura 3.34. Parafuso M5 cabeça cilíndrica, sextavado interno - rosca métrica

M5	Passo normal	d_k (máx/mín)	d_s	t	k(máx/mín)	l(máx/mín)	b*	RT*	s(máx/mín)
[mm]	0,8	8,72 / 8,28	5	2,5	5,0 / 4,84	8 / 90	22	25	4,07 / 4,02

Tabela 3.3. Dimensões parafuso M5 cabeça cilíndrica

*Parafusos com comprimento "l" até "RT" devem ter rosca total. Acima de "RT" o comprimento da rosca será igual a b.

Para proceder a fixação, utiliza-se de 2 parafusos com l=30mm e 4 parafusos com l=25mm, como pode ser visto na figura Figura 3.33.

Já os parafusos utilizados na fixação da interface com o *endplate* do eixo Z do robô são do tipo cabeça chata (Figura 3.35) de modo a reduzir o erro de posicionamento relativo entre as partes, devido à características auto centrante do parafuso cabeça chata.

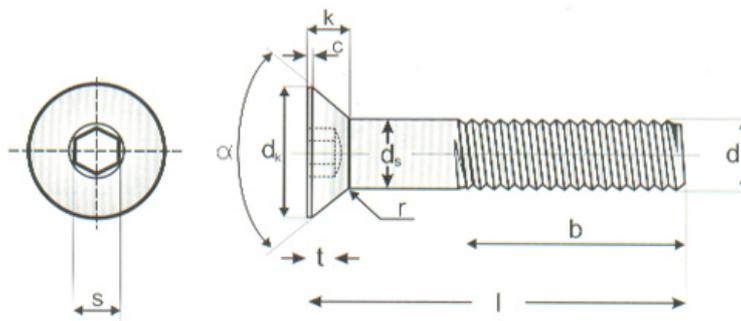


Figura 3.35. Parafuso M5 cabeça chata, sextavado interno – rosca métrica

M5	Passo normal	$d_k(\text{máx/mín})$	d_s	t	$k(\text{máx/mín})$	$l(\text{máx/mín})$	b^*	RT*	α	$s(\text{máx/mín})$
[mm]	0,8	9,2 / 10	5	2,5	5,0 / 4,84	8 / 90	22	25	90°	4,07 / 4,02

Tabela 3.4. Dimensões parafuso M5 cabeça chata

A diferença entre os dois tipos de elementos de fixação, parafuso de cabeça cilíndrica e de cabeça chata é que no primeiro é utilizado em uma fixação não intercambiável, i.e., a tocha GMAW está sempre fixa na sua base. Isso demanda uma união mais rígida mecanicamente. Já a fixação via parafuso de cabeça chata, nesse caso é utilizada em um acoplamento intercambiável, i.e., a depender do processo/aplicação, o efetuador terminal do robô pode possuir diferentes ferramentas acopladas. Além disso, com furo escareado é possível ter um melhor ajuste entre os dois elementos fixados e é indicado para montagens que não sofrem grandes esforços.

3.8 INSTALAÇÃO ELÉTRICA

O projeto de instalação elétrica do sistema robótico foi subdividido em duas etapas. A primeira se trata da disposição espacial dos dispositivos no painel elétrico (arranjo elétrico), bem como dimensionamento do painel, placa de fixação, trilhos DIN, passa cabos, botoeiras, chave liga/desliga, sinaleiro luminoso (ligado/desligado) e sistema de ventilação. Para isso, foi utilizado o SolidWorks para montagem como pode ser visto nas Figuras 3.36 a 3.41.

Já a segunda etapa trata da representação das ligações elétricas desde a rede (alimentação) até as ligações internas do painel. Essa parte foi desenvolvida no ambiente gráfico do software Microsoft® Visio 2016 com referência às normas da NBR 5410 e NBR5444.

Como pode ser visto na Figura 3.36, a porta do painel em questão é também base de fixação de dispositivos tais como: Interface Homem-Máquina, Chave liga/desliga, Botão de emergência, sistema de refrigeração com filtro e sinaleiros luminosos (para indicar estado ligado/desligado). Para proceder a fixação desses, cortes devem ser feitos na porta com

geometrias variadas, considerando as dimensões de cada dispositivo segundo seus *datasheets* e conforme o posicionamento mostrado na Figura 3.42.

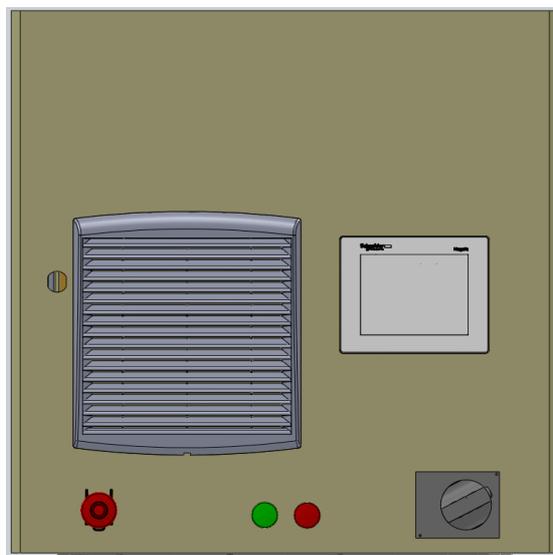


Figura 3.36. Vista frontal (externa)

É importante observar que a disposição de cada um dos itens fixados na porta foi planejada de modo a permitir ergonomia durante a utilização, e, no caso específico do sistema de circulação de ar, o posicionamento é estratégico sobre os três *Drives* do sistema de acionamento dos motores. Como esses dispositivos desempenham papel de interface de potência no sistema, o calor gerado deve ser dissipado, e, seguindo as recomendações do fabricante o grau de proteção deve respeitar o padrão IP 54. Segundo a norma DIN 40050, IP designa *International Protection*, o dígito 5 se refere a proteção contra o depósito de poeira e completa proteção contra contato, e, por fim, o dígito 4 se refere a proteção contra jatos de água direcionados ao painel, sendo ambas restrições que devem ser respeitadas.

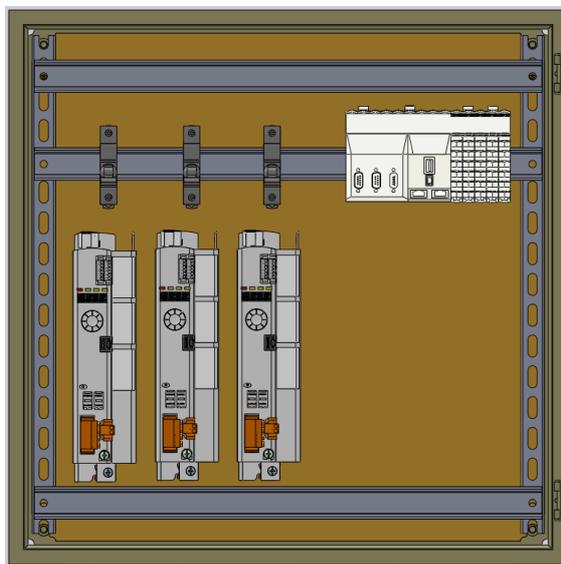


Figura 3.37. Vista frontal (interna)

Com isso, o sistema de ventilação é responsável por manter a temperatura do painel dentro da faixa de operação dos drives ($T_{m\acute{a}x} = 60^{\circ}$) além de prevenir (via filtro) o ingresso de corpos sólidos no painel.

Para melhor fixação dos dispositivos sem a necessidade de furar o próprio painel, utiliza-se uma placa de fixação (*mounting plate*). Essa é rebitada no painel e possui um espaçamento em relação a parte posterior do painel. Sobre a placa de fixação pode ser observado na Figura 3.37 um chassi de trilhos DIN com capacidade para 6 trilhos equidistantes. Entretanto, para o arranjo em questão 3 trilhos foram retirados de modo a permitir fixação adequada dos três *drives*.

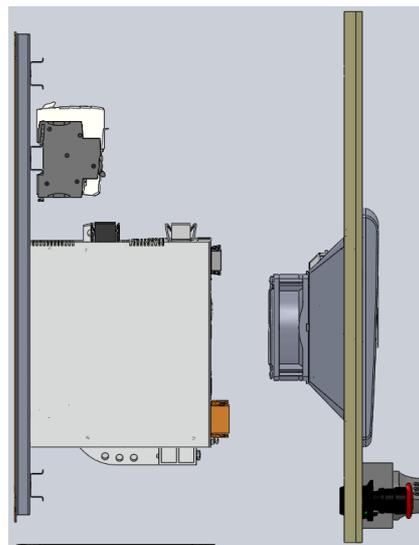


Figura 3.38. Vista lateral esquerda

Com intuito de possibilitar a visualização da disposição interna dos drives bem como a atuação do conjunto de ventilação sobre esses, utilizou-se uma ferramenta de ocultar partes no SolidWorks®, em que a carcaça o painel torna-se invisível. Isso pode ser observado na Figura 3.38 e Figura 3.39.

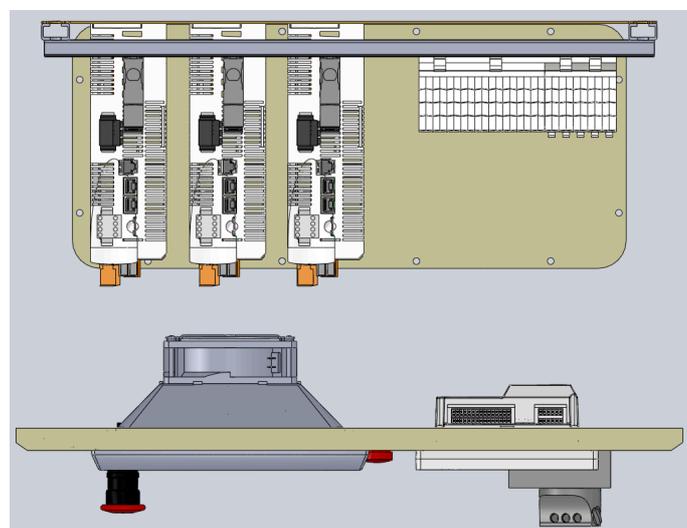


Figura 3.39. Vista superior

A Interface Homem-Máquina também foi posicionada de modo a ser de fácil acesso externo para visualização e entrada de parâmetros e de forma a não sofrer colisão com nenhum outro dispositivo ao fechar a porta do painel elétrico.

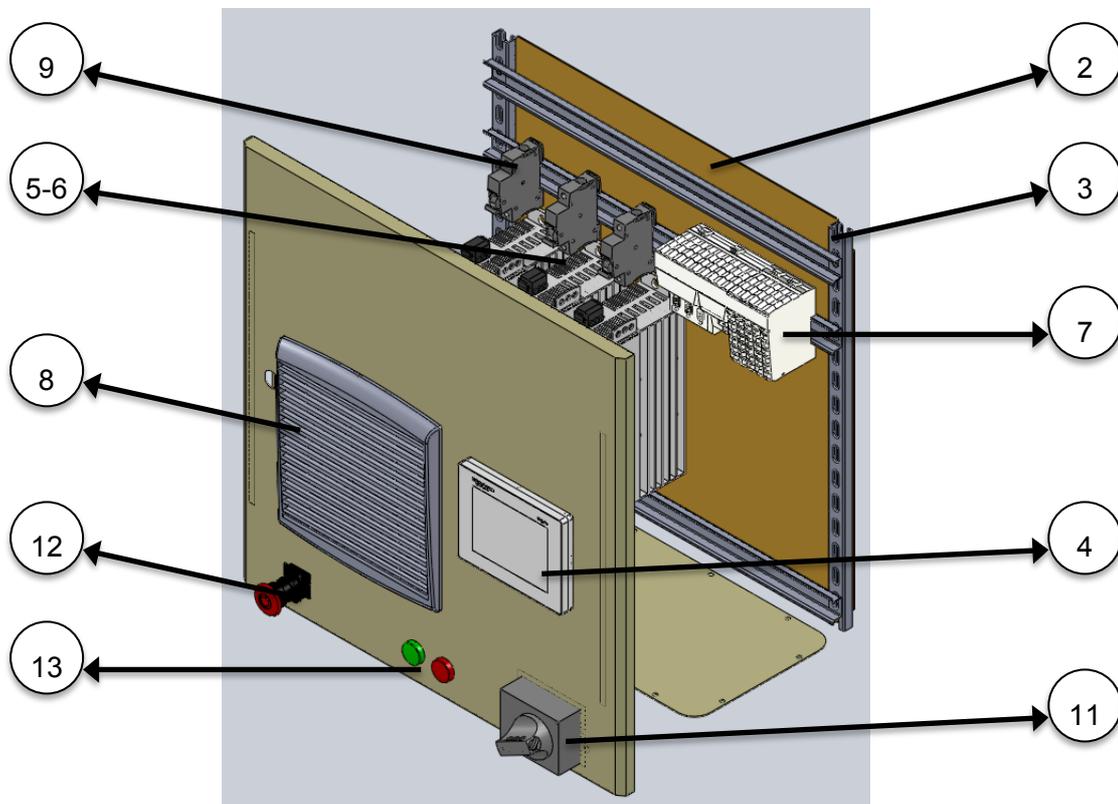


Figura 3.40. Perspectiva isométrica com transparência

Espaçamentos foram deixados propositalmente entre os dispositivos respeitando as recomendações de instalação do fabricante. Além disso, como pode ser visto na Figura 3.40, espaçamentos considerando os cabamentos e passa-cabos também foram considerados nas orientações verticais e horizontais.

Por fim, na Figura 3.41, nota-se as dimensões em altura, largura e profundidade (600x600x400mm) do painel projetado que contemplam a demanda de instalação elétrica do sistema robótico.

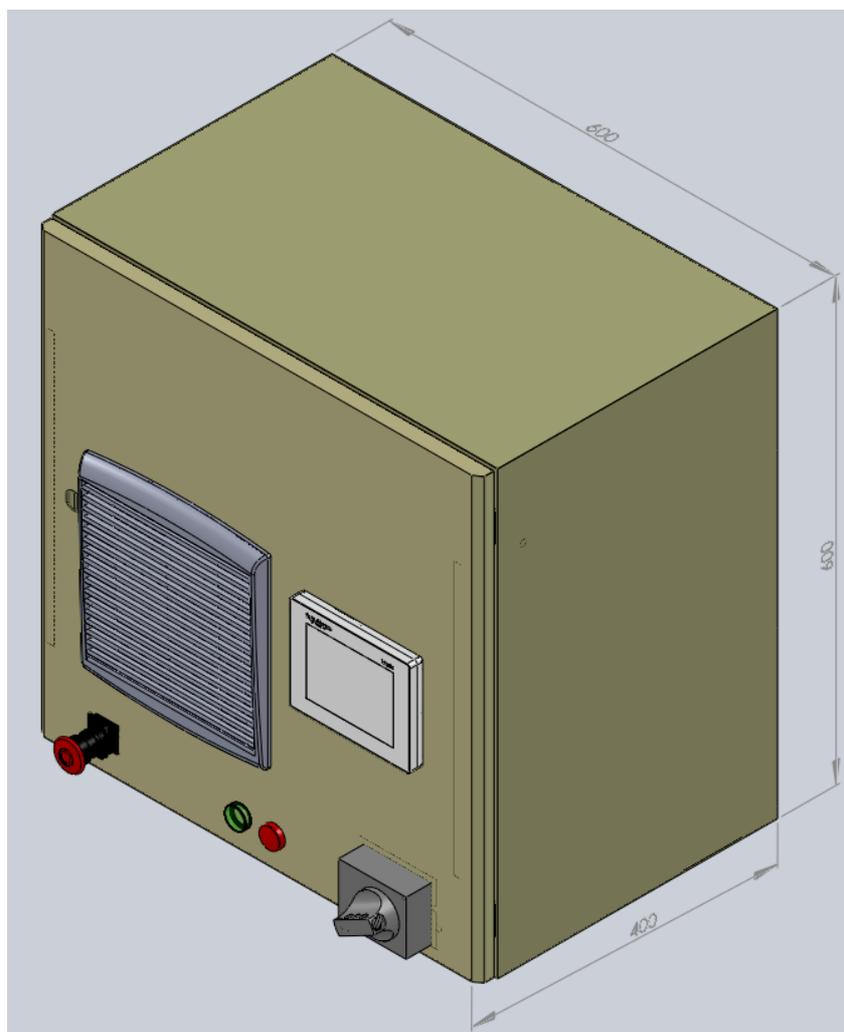


Figura 3.41. Perspectiva isométrica com cotas

Com intuito de facilitar a montagem do Painel Elétrico bem como o posicionamento dos dispositivos instalados, as Figura 3.42 e Figura 3.43 mostram as principais cotas das vistas frontal externa e frontal interna.

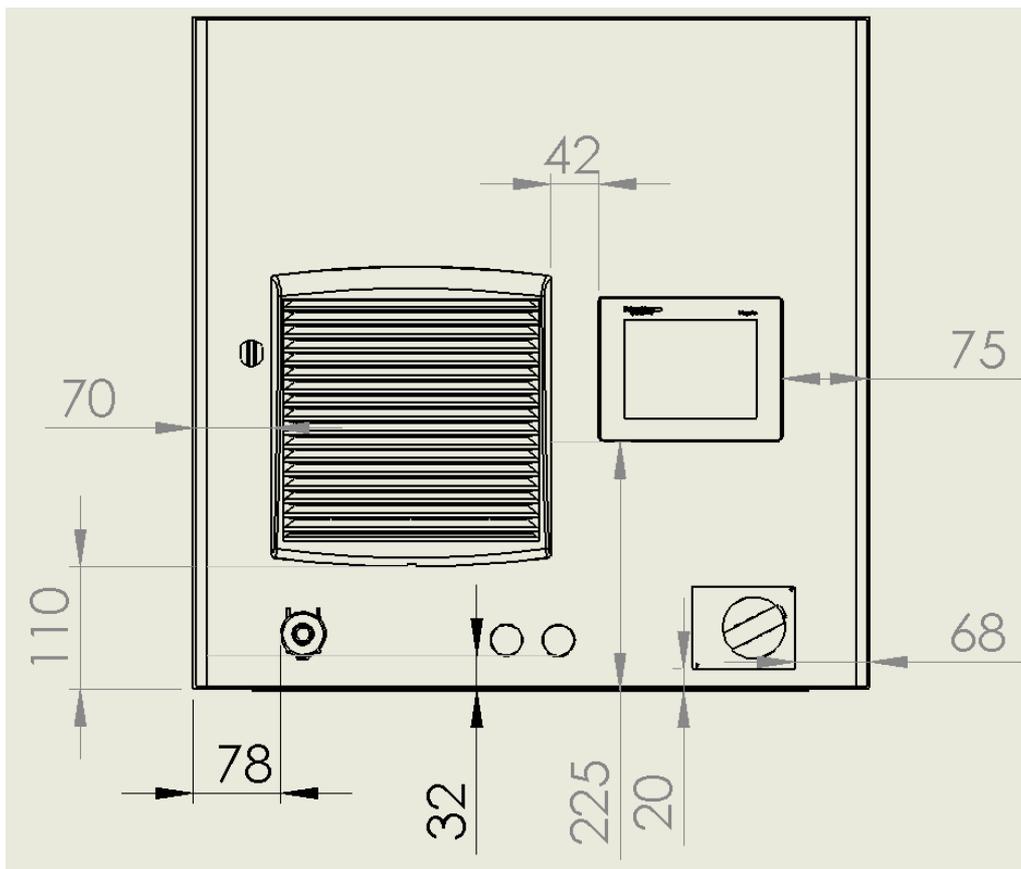


Figura 3.42. Vista frontal externa

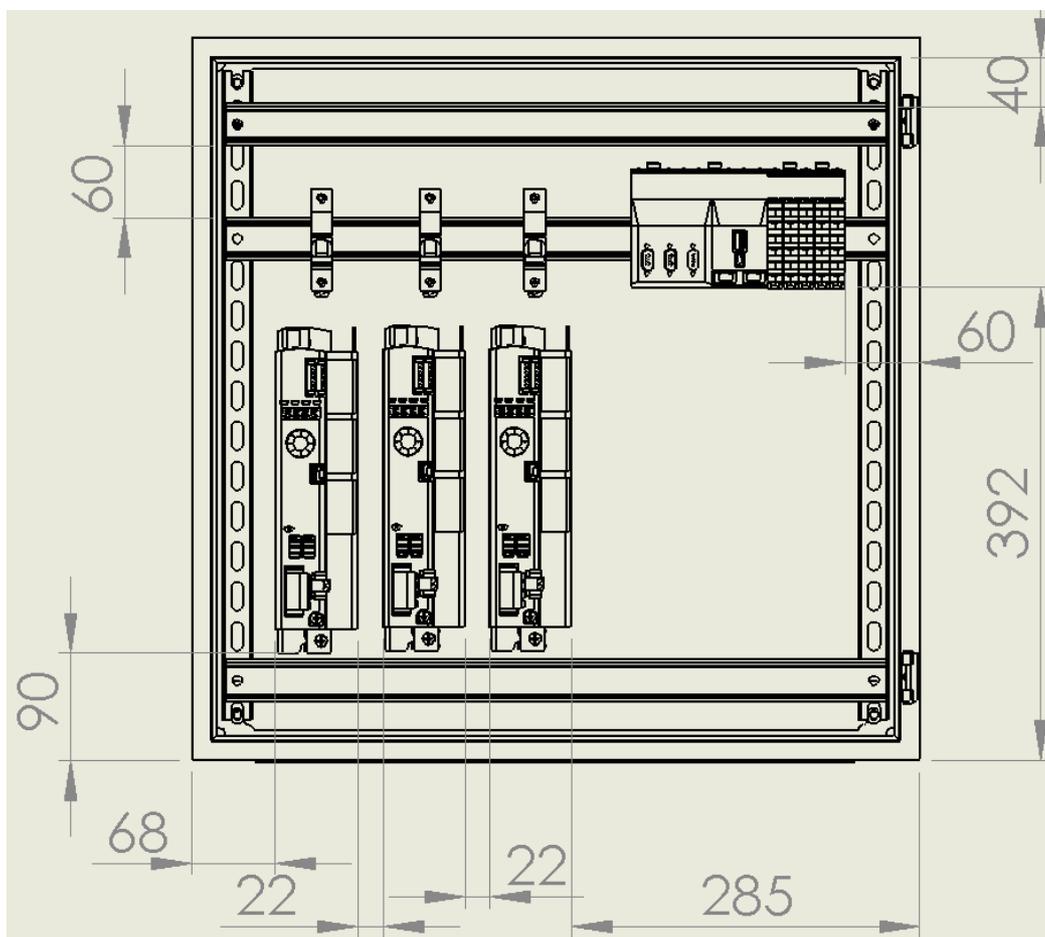


Figura 3.43. Vista frontal interna

Lista de materiais (*Board of materials* – BOM):

Item	Código	Descrição	Quantidade
1	NSYS3D6640PD1	Painel de aço 600x600x400 – <i>Schneider Steel Wall Mounting Enclosure</i>	1
2	NSYMD66	Placa de fixação – <i>Schneider Silkscreened Mounting Plate 600x600</i>	1
3	NSYMS66	Chassi com 6 trilhos DIN – <i>DIN Schneider Symetrical chasis H600xW600 6P</i>	1
4	HMISTU855	Interface Homem-Máquina – <i>Schneider HMI</i>	1
5	LXM32MU90M2	Drive de acionamento – <i>Schneider AC Servo Drive</i>	2
6	LXM32MD18M2	Drive de acionamento – <i>Schneider AC Servo Drive</i>	1
7	MODICON LMC058LF42S0	Controlador de Movimentos – <i>Schneider Motion Controller</i>	1
8	NSYCVF165M115PF	Cooler com filtro – <i>Schneider Filter Fan</i>	1
9		Disjuntores - <i>Schneider Circuit breaker 6A</i>	2
10		Disjuntor - <i>Schneider Circuit breaker 10A</i>	1
11		Disjuntor - <i>Schneider Circuit breaker 20A</i>	1
12	LV429337	Chave liga/desliga – <i>Schneider On/Off Switch</i>	1
13	XB4 BT42	Botão de emergência – <i>Schneider Signaling unit harmony style 4</i>	1
14	ZB5 AV013	luzes indicadoras de estado (1 – verde, 1 - vermelha) – <i>Schneider Signaling unit harmony stlyle 5</i>	2

Tabela 3.5. Lista de materiais - Painel Elétrico

Para ligação dos itens 4, 7, 8 e 14 referidos na Tabela 3.5 recomenda-se uma fonte DIN AC/DC 24V, do fabricante LRI Mean Well com as seguintes especificações:

- Entrada universal AC com faixa: 85~264V_{AC}, 47~63Hz;
- Proteções inclusas de curto-circuito, sobrecarga, sobretensão e superaquecimento;
- Limitador de corrente de saída;

O modelo encontrado com essas características é o DR-4524. A escolha pelo fabricante Mean Well se deve ao fato de que oferecem características desejadas em uma fonte compacta que são: fixação DIN, circuitos de proteção inclusos, tensão de saída 24V_{DC} e 8 conectores de saída, conveniente para o sistema em questão.

Em seguida, a segunda parte do projeto elétrico, com as instalações elétricas desde a rede até as interconexões internas do painel.

Diagrama unifilar, dimensionamento de condutores e de circuito de proteção:

O diagrama em questão foi feito com base na NBR 5444 (descrita na seção 2.7 da revisão bibliográfica) norma que estabelece os símbolos gráficos referentes às instalações elétricas de baixa tensão.

A princípio foram levantadas as demandas do projeto, que são:

- Demanda da rede = 230V_{AC};
- 1 fonte DC 24V conectada na rede para HMI, Controlador, Cooler e sinaleiros luminosos (24V);
- 1 Disjuntor geral, i.e., um circuito de proteção para todo o sistema que suporte a soma das correntes máximas requisitadas (18A+9A+9A = 36A)
- 3 Disjuntores (um para cada Drive);

Dimensionamento dos condutores:

Com base nas tabelas de dimensionamento do fornecedor de cabos Prysmian Cables and Systems que segue os critérios definidos pela NBR5410/2004 e consulta nos *datasheets* dos dispositivos instalados (vide Tabela 3.5) pode-se estimar a bitola dos condutores e valores dos dispositivos de proteção, nesse caso, disjuntores.

Alimentação Rede - Painel: Via critério de capacidade máxima de condução de corrente

Cálculo A - Considerando as correntes de pico de saída drive output, (Imax=18A+9A+9A):

Escolha: B1

Eletroduto (3 cond carregados: fase+neutro+terra)

Escolhido ($\geq 36A$) = Imax=36A -> seção do fio = 6mm²

Cálculo B - Considerando correntes nominais de entrada de drive eixo X, drive eixo Y, drive eixo Z e fonte de alimentação AC/DC respectivamente temos: $I_{m\acute{a}x} = 6A + 3A + 3A + 1,5A = 13,5A$

Escolha: B1

Eletroduto (3 cond carregados: fase+neutro+terra)

Escolhido ($\geq 13,5A$) = Imax=15,5A -> bitola do condutor = 1,5mm²

Considerando que se escolhido um condutor de $1,5\text{mm}^2$ o coeficiente de segurança de $15,5/13,5$ que equivale a aproximadamente 15% é abaixo do recomendável para instalações que podem ser ampliadas. Nesse contexto, a regra da seção mínima se aplica, e, o condutor escolhido será para $I_{\text{max}}=21\text{A}$, com bitola de $2,5\text{mm}^2$. Isso garante um coeficiente de segurança de 55,5% para os condutores entre a rede e o painel. Assim, evita-se superaquecimento dos condutores e possibilita-se economia de energia por se diminuir perdas por efeito joule.

Cálculo A - 2 Drives (eixo X e Y), considerando peak output 9A:

mais próximo 10A via tabela bitola= $0,75\text{mm}^2$, se a carga instalada não fosse fixa (como no caso de tomadas em instalações prediais) via regra da seção min. bitola dos cabos de força deveriam ser no mínimo $2,5\text{mm}^2$. Contudo, para a demanda fixa dos drives, a bitola escolhida será de $1,0\text{mm}^2$, com suporte para $I_{\text{max}}=12\text{A}$, o que garante um coeficiente de segurança de $12/9 = 33,33\%$

Cálculo B - 2 Drives (eixo X e Y), considerando continuous current 3A:

mais próximo=8A -> $0,5\text{mm}^2$

Conforme recomenda a NBR5410, deve-se considerar a maior seção dentre as calculadas. Com isso, a escolha corresponde ao cálculo A.

Cálculo A - Drive (eixo XX), considerando peak output 18A:

mais próximo=21A -> $2,5\text{mm}^2$

Cálculo B - Drive (eixo XX), considerando continuous current 6A:

mais próximo=8A -> $0,5\text{mm}^2$

Nesse caso, a recomendação da norma não se aplica diretamente por se conhecer a potência máxima do equipamento e a alimentação, via fórmula de potência:

$$P = V \cdot I$$

Pode-se estimar a corrente máxima de entrada, dados valores de $P=1\text{KW}$ e $V=230$, temos $I_{IN} = \frac{1000}{230} = 4,35\text{A}$, o que permite a escolha de condutor com seção de 1mm^2 , com capacidade de condução de 12A.

Dimensionamento de Disjuntores: (monopolar: a fase passa pelos disjuntores)

A NBR5410 define uma regra prática para dimensionamento de disjuntores. Com isso, temos basta escolher valores de corrente que sejam maiores que a corrente máxima do dispositivo

($I_{m\acute{a}x}$) e menores que a corrente máxima que o condutor escolhido pode conduzir. Para essa aplicação, recomenda-se disjuntores monopolares com curva tipo C (pico de corrente entre 5 e 10 vezes a corrente nominal). Considerando um disjuntor hipotético X, temos a seguinte expressão que resume o método de seleção:

$$I_{m\acute{a}x}(\text{projeto}) < X < I_{m\acute{a}x} \text{ de condução do cabo [Equação 1]}$$

Seção da linha (rede) com bitola de 2,5mm² , $I_{max} = 21A$

Aplicando a Equação 1, temos:

$$13,5A < X < 21A$$

Disjuntores comerciais 16A ou 20A

Escolhido: 20A

2 Disjuntores Drive 9A

Aplicando a Equação 1, temos: $9A < X < 12A$

escolhido: 10A (comercial)

ou se considerar $I_{in} = 3A$:

2 disjuntores: $3A < \text{Disjuntor} < 12A$

menor comercial encontrado: escolhido: 6A

Disjuntor Drive 18A = 20A -> $18A < \text{Disjuntor} < 21A$ -> escolhido: 20A (comercial)

ou se considerar $I_{in} = 6A$:

1 disjuntor: $6A < \text{Disjuntor} < 12A$ -> dimensionado: 10A

comercial encontrado: escolhido: 10A

Com os cálculos concluídos, tem-se o dimensionamento completo para condutores de cobre isolado e disjuntores monopolares. Com intuito de ilustrar o dimensionamento, um diagrama unifilar foi feito via software Microsoft Visio® 2016, respeitando as normas regulamentadoras referidas, como pode ser visto na Figura 3.44.

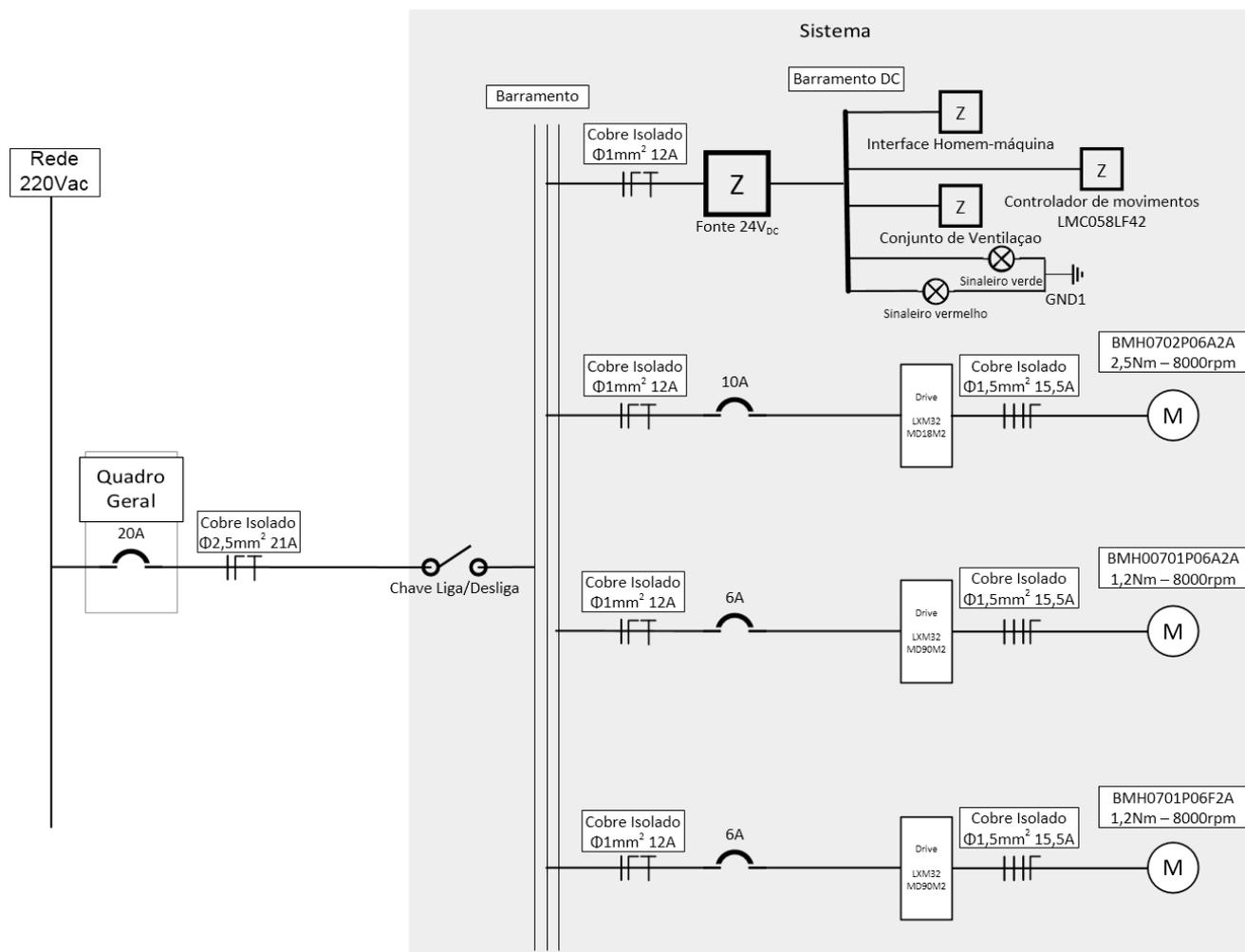


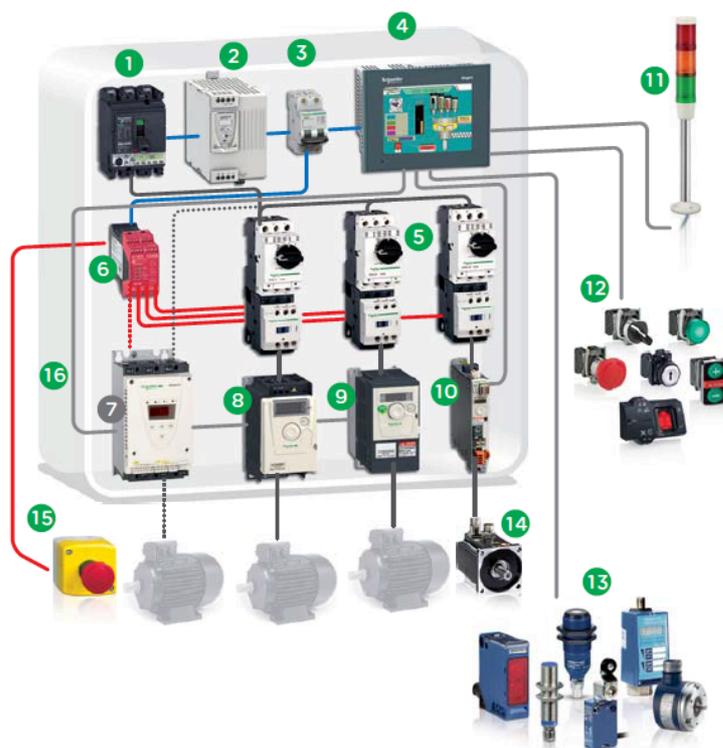
Figura 3.44. Diagrama elétrico unifilar de instalação do painel

3.9 INFORMAÇÕES ADICIONAIS SOBRE O SISTEMA E FLUXOGRAMA

A priori, o controle de trajetória poderá ser feito a partir da implementação via linguagem gráfica Ladder, que está entre as cinco linguagens de programação de CLPs suportadas pelo software proprietário da Schneider SoMachine V.4. Tais linguagens, definidas pela IEC 61131-3 são: FBD (*Function Block Diagram*), LD (*Ladder diagram*), ST (*Structured text*), IL (*Instruction list*) e SFC (*Sequential function chart*). Quanto ao protocolo de rede a ser utilizado, entre o computador, Controlador de movimentos (LMC058), drivers (LXM32M (U90M2/D18M2)) e Interface Homem-máquina (HMISTU855) poderá ser CANopen ou CANmotion (SCHNEIDER ELECTRIC, 2014).

A interface homem-máquina utilizada no sistema é também da Schneider-Electric, HMISTU855 com tecnologia *touch screen* 5"7 colorida. Alimentada por 24Vcc, a IHM tem processador ARM9 e sistema operacional Magelis. O processador embarcado na IHM permite que comandos sejam dados pelo operador e processados localmente, bem como modificação de rotinas sejam feitas e verificadas em seguida com acionamento dos servo-

motores e respectivas movimentações. A interconexão dos dispositivos instalados na rede e conectados a IHM podem ser vistos na Figura 3.45



- | | |
|---|--|
| 1 Disjuntor Compact NSX... | 11 Unidade de sinalização Harmony XVM... |
| 2 Fonte chaveada Phaseo ABL 8... | 12 Botões e comutadores Harmony XB4/5... |
| 3 Disjuntor modular Compact Multi 9 | 13 Detecção Osisense XC/XS/XU/XM/XX... |
| 4 IHM com controlador Magelis XBT GC... | 14 Servomotor BMH |
| 5 Partida direta de motor TeSys GV2 + TeSys K/D | 15 Parada de emergência Harmony XALK... |
| 6 Módulos de segurança Preventa XPS... | 16 Armário Spacial 3D |
| 7 Soft starter Altistart ATS 22... (opcional) | |
| 8 Inversor de frequência Altivar ATV 12... | |
| 9 Inversor de frequência Altivar ATV 312... | |
| 10 Servoacionamento Lexium 32... | |

Figura 3.45. Interconexões IHM

O fluxograma da Figura 3.46 visa ilustrar a sequência na qual os dispositivos instalados recebem e enviam sinais de controle, atuação e realimentação. Com software SoMachine v4.0 instalado no computador (PC), os programas que descrevem trajetória do efetuator terminal geram a entrada do controlador de movimentos. Este, por sua vez, envia sinais de controle para o drives, que são responsáveis por acionar os motores, servindo como interface de potência. Por fim, a partir da movimentação do eixo dos servo-motores, 3 encoders do modelo SEK37 fazem a realimentação do sistema, com o valor da posição de cada junta prismática. A partir desse sistema em malha fechada, com o valor de referência e a realimentação do encoder pode-se estimar o erro de posição.

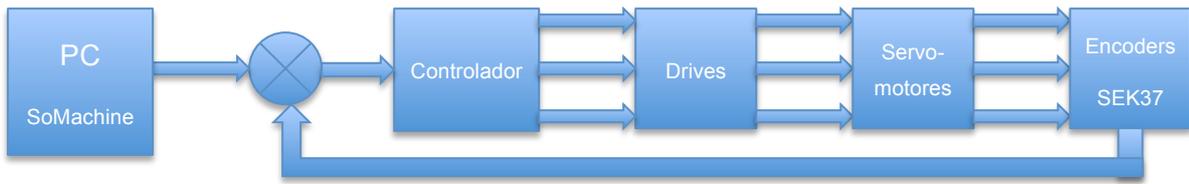


Figura 3.46. Fluxograma do sistema em Malha Fechada

CAPÍTULO 4 - PRINCIPAIS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados atingidos nesse trabalho de graduação.

Desde, estimação da carga útil de trabalho no efetador terminal, cálculo da deflexão nos seus eixos durante operações com carga, dimensionamento dos comprimentos em X, Y e Z adequados para o processo de fabricação

A definição do tipo de robô que atendesse a demanda para prototipagem rápida foi a primeira motivação para o estudo de viabilidade da aquisição de um robô cartesiano. Para escolha de um modelo comercial, parâmetros como carga útil no efetador terminal (*payload*) e comprimentos dos eixos X, Y e Z eram essenciais. Com isso, a partir dos dados da tocha de soldagem GMAW e do porte das peças a serem fabricadas foi possível obter tais dados.

O segundo passo do projeto foi verificar se a deflexão máxima de cada eixo do robô não prejudicaria a exatidão do processo de fabricação. Conforme esperado, as especificações recomendadas pelos fabricantes atenderam os requisitos mínimos com perfil de alumínio estrutural de 60x60mm. A partir desse ponto, orçamentos foram solicitados de algumas empresas do ramo. As duas com melhores propostas considerando custo/benefício foram Schneider Electric e Bosch Rexroth (como pode ser visto nos orçamentos em anexo). Os valores eram bem próximos, com pequena vantagem para Schneider, que foi o fornecedor escolhido. Como o processo de compra e entrega poderia se delongar devidos aos trâmites para aquisição de bens com verba pública, nesse ponto, o projeto partiu para um caráter de instalação do robô no laboratório.

Para isso, uma base em aço 1020 para o robô foi projetada no ambiente CAD do SolidWorks® e teve as etapas de dimensionamento de partes e cálculos de deflexão descritas na seção 3.6. Etapas seguintes relacionadas a montagem mecânica envolveram o projeto de uma placa de interface entre a tocha de soldagem GMAW e o efetador terminal, também via software SolidWorks®.

Com intuito de obter uma representação do robô adquirido e simular suas movimentações, foi feito um projeto no simulador Workspace LT® em que com um sólido estrudado definiu-se elos com as mesmas dimensões do robô real e mesmo tipo de juntas (PPP). Percebeu-se grandes limitações das ferramentas CAD do simulador quando comparado com softwares dedicados a modelagem como Solidworks e AutoCad. Contudo, ao importar modelos desenhados em outros softwares definições de relação entre as partes de uma montagem se perdiam. Isso fez com que o Workspace fosse também utilizado para modelagem CAD, mesmo com suas limitações de ferramentas de desenho. O ambiente de simulação desse

software permitiu a verificação de colisões, geração de animações 3D e monitoração das velocidades de cada junta. Além disso, as simulações possibilitaram obtenção de código em Karel2 para uma movimentação definida por *Teach Points* (TPs). A posteriori esse código poderá ser implementado na planta e comparações de movimentação da simulação e planta poderão ser úteis na validação de diversas trajetórias e estratégias de movimentação para o processo de prototipagem rápida.

Por fim, o projeto de instalação elétrica que incluiu projeto de um painel elétrico, dimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção baseado nas normas regulamentadoras também foi essencial para o fechamento do projeto de instalação do robô no GRACO.

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desse trabalho, foi possível ter contato direto com projeto de engenharia e suas metodologias. O caráter multidisciplinar deste permitiu integração de tecnologias e dos conhecimentos adquiridos em diversas disciplinas do curso.

Com o objetivo de especificar, comparar, orçar e comprar um robô cartesiano comercial o projeto se iniciou com contato aos principais fornecedores do mercado, levantamento da demanda e análise de viabilidade, dado um recurso limitado para investimento. Enquanto o processo de compra e entrega acontecia, o projeto de instalação do robô ficou em evidência. O projeto de uma base para o robô em aço 1020, incluindo análise de rigidez mecânica foi o primeiro passo para instalação. Em seguida o projeto de acoplamento da tocha GMAW no efetuador terminal produziu uma interface entre essas partes, fabricada em alumínio. Simulações computacionais com um modelo 3D representativo do robô foram úteis na obtenção de software de trajetória a partir de *Teach Points* (TPs), detecção de colisões, geração de animação 3D do processo bem como monitoramento de velocidade e posição das 3 juntas em tempo real. Por fim, foi feito o projeto de um painel elétrico com observância as normas regulamentadoras, incluindo cálculo de condutores e disjuntores que foram representados em um diagrama unifilar de instalação elétrica.

Sugere-se trabalhos futuros como a comparação do processo de prototipagem rápida em termos de acabamento superficial e resistência mecânica das peças produzidas pelo sistema cartesiano descrito nesse trabalho com peças produzidas pelo manipulador 6 DOF ABB instalado no GRACO. Tais comparações podem indicar maior eficiência na fabricação via robô cartesiano devido a facilidade de se manter o ângulo de 90° entre a tocha de solda e a parte soldada sem que seja necessário o travamento de várias juntas, como no caso do robô do tipo manipulador 6 DOF. Aspectos construtivos do robô cartesiano o tornam mais rígido mecanicamente, conforme explicitado na revisão bibliográfica, assim, pode-se inferir que é ideal para aplicações que exigem tal rigidez como operações de *pick and place* e soldagem mantendo a repetibilidade exigida por esses processos. Para proceder tais testes, uma estratégia de movimentação deverá ser definida assim como rotinas de levantamento de erros de posicionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ULLMAN, D. G. **THE MECHANICAL DESIGN PROCESS**. 4ª edição. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN ISBN 978-0-07-297574-1.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida**. 1ª edição. ed. São Paulo: Edgard Blucher, v. único, 2007. 244 p. ISBN ISBN 85-212-0388-8.

A. E. FITZGERALD, C. K. S. D. U. **Máquinas Elétricas - com introdução à eletrônica de potência**. [S.l.]: Bookman, v. 6º, 1992. 604 p.

ANDRADE, R. C. D. **Desenvolvimento de software de fatiamento de sólidos tipo casca e geração de trajetórias para fabricação de peças por deposição de metal em camadas sucessivas utilizando o processo GMAW**. UnB. Brasília, p. 82. 2013.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 8ª. ed. Miami: [s.n.], v. v1 e v2, 1991.

ARM. ARM Compiler Toolchain: Using the Assembler version 5.0. **Arm. The Architecture for the Digital World**, 2011. Disponível em: <<http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dui0473e/CHDHAGGE.html>>. Acesso em: 23 agosto 2015.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. **Mechanics of Materials**. 2ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill College, 1992. ISBN 9780078373404.

BOLTON, W. **Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical Engineering**. Ann Arbor: Addison Wesley Longman, 1999. 543 p. ISBN 0582357055.

BONDI, A. B. Characteristics of scalability and their impact on performance. Ottawa: [s.n.], 2000. p. 195 - 203. ISBN ISBN 1-58113-195-X. Proceedings of the 2nd international workshop on Software and performance.

BOSCH REXROTH. **Easy Handling Catalog**. Lohr. 2013. (R999000045).

BOSCH REXROTH. Multi axis systems handling systems. **www.boschrexroth.com**, 2015. Disponível em: <<http://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/linear-motion-technology/multi-axis-systems-handling-systems/easyhandling/easyhandling-start>>. Acesso em: 8 julho 2015.

BOSH REXROTH CORPORATION. Compact Modules Catalog, South Lakes Drive Charlotte, p. 104, agosto 2012. ISSN R310A. Disponível em: <<https://www13.boschrexroth-us.com/catalogs/order/index.asp?division=LT>>. Acesso em: 14 setembro 2015.

CARVALHO, F. M. Introdução a redes de Comunicação: Protocolos de transmissão em ambientes industriais. **http://www.artigonal.com/**, 05 agosto 2009. Disponível em: <<http://www.artigonal.com/tecnologias-artigos/introducao-a-redes-de-comunicacao-protocolos-de-transmissao-em-ambientes-industriais-1100278.html>>. Acesso em: 15 julho 2015.

ETHERCAT TECHNOLOGY GROUP. **www.ethercat.org**, novembro 2012. Disponível em: <<https://www.ethercat.org/en/downloads.html>>. Acesso em: 01 junho 2015.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing**. 3ª. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 222-223 p.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing**. 3ª edição. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2008. 815 p. ISBN 0132393212.

LOURENÇO, T. S. **Concepção Geométrica e Modelagem Cinemática de um Robô Cartesiano com Cinco Graus de Liberdade**. UnB. Brasília, p. 52. 2013.

SANTOS, V. M. F. **Robótica Industrial**. Aveiro: Universidade de Aveiro, v. 1, 2004. 166 p.

SCHNEIDER ELECTRIC. MAX Multi axes Lexium Linear Motion Product Manual, fev. 2012. Disponível em: <www.schneider-electric.com/manuals>. Acesso em: 15 jan. 2016.

SCHNEIDER ELECTRIC. Lexium 32 Motion Control, Rueil Malmaison, junho 2014. ISSN DIA7ED2140501EN.

SCHNEIDER ELECTRIC. Modicon LMC058 Motion Controller - Programming Guide, abril 2014. ISSN EIO0000000408. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com/manuals>>. Acesso em: 10 abril 2016.

SCHNEIDER ELECTRIC. Cartesian and delta robots. **Schneider-electric**, 2015. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com/products/ww/en/2900-motion-drives/2915-cartesian-and-delta-robots/2922-lexium-max/>>. Acesso em: 3 junho 2015.

ROCKWELL AUTOMATION. Guia de seleção - Controle de movimento Kinetix. **http://ab.rockwellautomation.com**, Milwaukee, junho 2014. ISSN GMC-SG001X-PT-P. Disponível em: <<http://ab.rockwellautomation.com/Motion-Control/Kinetix-VP-Low-Inertia-Servo-Motors#documentation>>. Acesso em: 01 ago. 2015.

ANEXOS

Anexo I: Desenho Técnico do Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42

Anexo II: Guia de nomenclatura do Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42

Anexo III: Guia de nomenclatura dos atuadores utilizados

Anexo I: Desenho Técnico do Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42

Multi axes systems MAX

Portal robot 3 axes MAXR23-S42-H42-C42

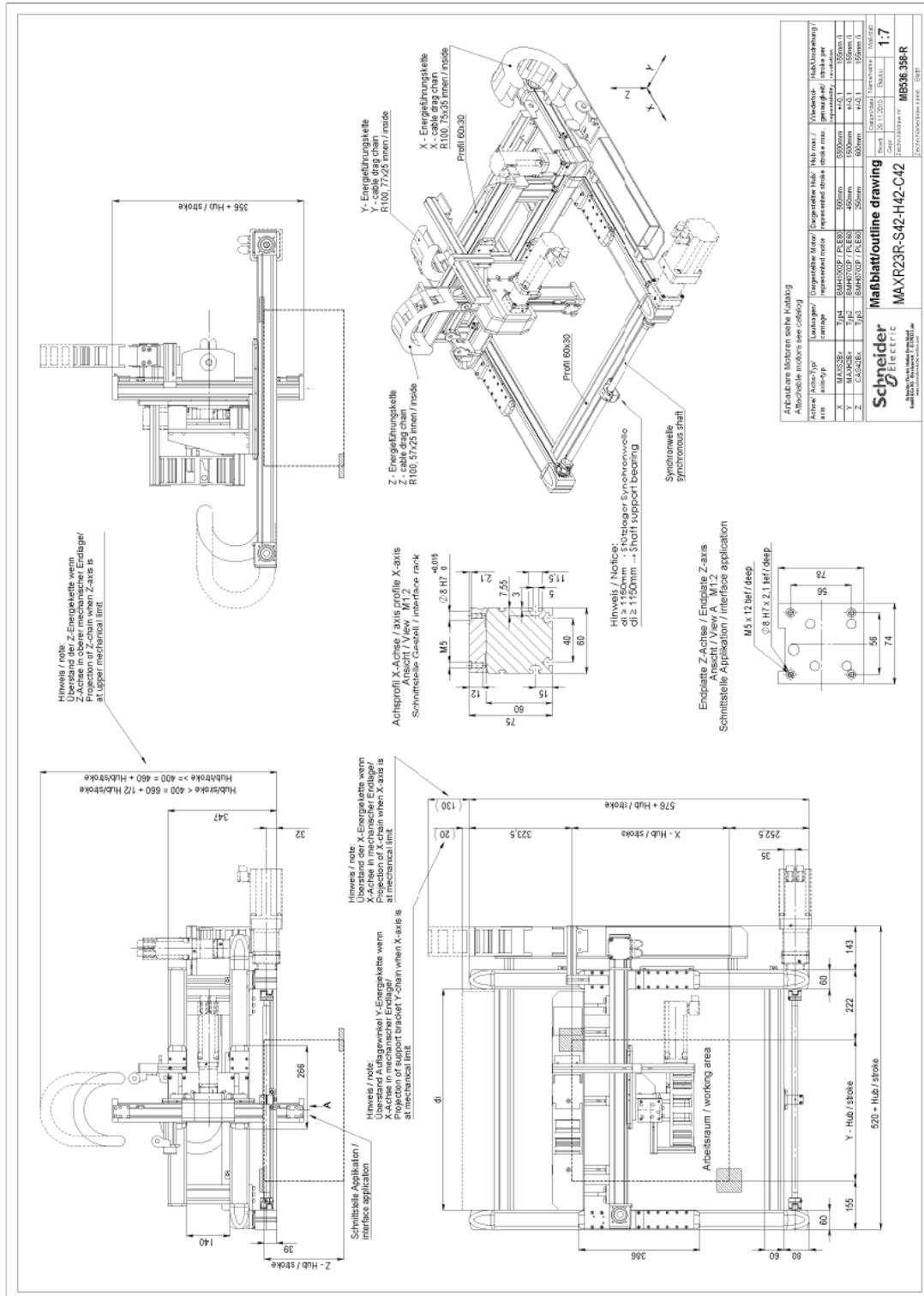
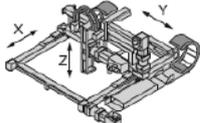
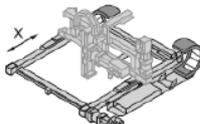
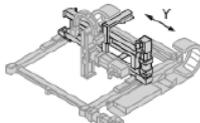
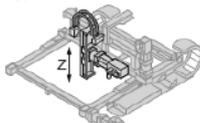


Figura A. 1. Vistas e Perspectiva Isométrica do Robô Schneider-Electric

Anexo II: Guia de nomenclatura do robô Schneider Robô Schneider-Electric MAXR23-S42-H42-C42

References (1)	
To order a MAX R●3 portal robot, complete each reference by replacing the "●" :	
Example: MAX R 1 3 R – S41 B R 3000 – H41 B R 1200 – C31 B C 1200 MAX R ● 3 ● ●●● B ● ●●●● – ●●● B ● ●●●● – ●●● B ● ●●●●	
+ PLE60 3:1 + BMH 0702P01A2A (for the X axis) + ...	
+ PLE60 3:1 + BMH 0702P01A2A (for the Y axis) + ...	
+ PLE60 3:1 + BMH 0702P01A2A (for the Z axis) + ...	
Size of X axis (profile cross-section)	40 (40 x 40 mm cross-section) 1
	60 (60 x 60 mm cross-section) 2
	80 (80 x 80 mm cross-section) 3
	110 (110 x 110 mm cross-section) 4
	
Number of axes	3 independent axes: 1 X axis, 1 Y axis, 1 Z axis 3
Interface for the drive element (3)	Drive element fixed on right-hand side R
	Drive element fixed on left-hand side L
Type of X axis	MAX S41 (for MAX R13) (2) S41
	MAX S42 (for MAX R23) (2) S42
	MAX S43 (for MAX R33) (2) S43
	MAX S44 (for MAX R43) (2) S44
	
Type of drive	Toothed belt B
Type of guide	Roller (for MAX R●3● – S41/S42/S43) R
	Ball (for MAX R●3● – S42/S43/S44) B
Stroke	State the length in mm (see the maximum possible length depending on the model on page 61531/3) ●●●●
Type of Y axis	MAX H41 (for MAX R13) (2) H41
	MAX H42 (for MAX R23) (2) H42
	MAX H43 (for MAX R33) (2) H43
	MAX H44 (for MAX R43) (2) H44
	
Type of drive	Toothed belt B
Type of guide	Roller (for MAX R●3● – S4●B●●●●● – H41/H42/H43) R
	Ball (for MAX R●3● – S4●B●●●●● – H42/H43/H44) B
Stroke	State the length in mm (see the maximum possible length depending on the model on page 61531/3) ●●●●
Type of Z axis	CAS 41 (for MAX R13) (2) C41
	CAS 42 (for MAX R23) (2) C42
	CAS 43 (for MAX R33) (2) C43
	CAS 44 (for MAX R43) (2) C44
	CAS 31 (for MAX R13) (2) C31
	CAS 32 (for MAX R23) (2) C32
	CAS 34 (for MAX R33) (2) C34
	
Type of drive	Toothed belt B
Type of guide	Roller (for MAX R●3● – S4●B●●●●● – H4●B●●●●● – C41/C42/C43) R
	Ball (for MAX R●3● – S4●B●●●●● – H4●B●●●●● – C42/C43/C44) B
	Ball (for MAX R●3● – S4●B●●●●● – H4●B●●●●● – C3●) C
Stroke	State the length in mm (see the maximum possible length depending on the model on page 61531/3) ●●●●
Planetary gearbox gear ratio + motor reference	State the planetary gearbox gear ratio and the complete motor reference at the end of the reference, in plain text, selected for the X axis, the Y axis and the Z axis. Example: PLE60 3:1 + BMH 0702P01A2A for each axis + ... + ... + ...

(1) All technical data (characteristics, dimensions, etc.) for Lexium MAX R●3 portal robots is available on our website www.schneider-electric.com and on the documentation CD-ROM supplied with this catalogue.

(2) Each axis is supplied with 2 PNP output sensors, NC contact, with a 0.1 m cable equipped with an M8 connector.

(3) Types of interface for the drive element:

MAX R●3R – ... MAX R●3L – ...

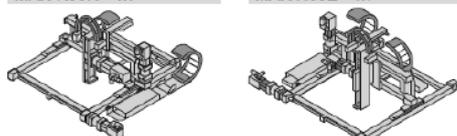


Figura A. 2 Nomenclatura dos robôs cartesianos Schneider

Anexo III: Guia de nomenclatura dos atuadores utilizados

	BMH	070	1	P	0	1	A	1	A
Product family BMH: Synchronous motor - medium moment of inertia									
Size (housing) 070 = 70 mm flange 100 = 100 mm flange 140 = 140 mm flange 190 = 190 mm flange 205 = 205 mm flange									
Length 1 = 1 stack 2 = 2 stacks 3 = 3 stacks 4 = 4 stacks									
Winding P = Optimized in terms of torque and speed of rotation T = Optimized in terms of high speed of rotation									
Shaft and degree of protection 0 = Smooth shaft; degree of protection: shaft IP54 ¹⁾ , housing IP65 1 = Parallel key; degree of protection: shaft IP 54 ¹⁾ , housing IP 65 2 = Smooth shaft; degree of protection: shaft and housing IP65 ^{1) 2)} 3 = Parallel key; degree of protection: shaft and housing IP 65 ^{1) 2)}									
Encoder system 1 = Absolute singleturn 128 Sin/Cos periods per revolution (SKS36) 2 = Absolute multiturn 128 Sin/Cos periods per revolution (SKM36) 6 = Absolute singleturn 16 Sin/Cos periods per revolution (SEK37) 7 = Absolute multiturn 16 Sin/Cos periods per revolution (SEL37)									
Holding brake A = Without holding brake F = With holding brake									
Connection version 1 = Straight connector 2 = Angular connector 90°, can be rotated									
Mechanical interface - mounting A = International IEC Standard B = International IEC standard and fan cooling									

- 1) In the case of mounting position IM V3 (drive shaft vertical, shaft end up), the motor only has degree of protection IP50.
- 2) The maximum permissible speed of rotation is limited to 6000 rpm by the shaft sealing ring. Separate accessories allow you to obtain degree of protection IP67. See chapter "6 Accessories and spare parts".

Figura A. 3. Guia de nomenclatura dos atuadores utilizados