



Felipe Arantes Lobo



**Modelando um robô comercial de 6 GDL
usando o V-REP (*Virtual Robot
Experimentation Platform*)**

Goiânia
2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Monografia** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Monografia:

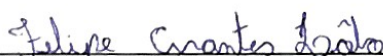
Nome completo do autor: Felipe Arantes Lobo

Título do trabalho: Modelando um robô comercial de 6 GDL usando o V-REP (Virtual Experimentation Platform)


3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 20 / 12 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Versão atualizada em setembro de 2017.

² A assinatura deve ser escaneada.

Felipe Arantes Lobo

**Modelando um robô comercial de 6 GDL usando o
V-REP (*Virtual Robot Experimentation Platform*)**

Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás para a disciplina de Projeto Final de Curso.

Universidade Federal de Goiás

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Orientador: Prof.Dr. João Paulo da Silva Fonseca

Goiânia

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Arantes Lobo, Felipe

Modelando um robô comercial de 6 GDL usando o V-REP (Virtual Experimentation Platform) [manuscrito] / Felipe Arantes Lobo. - 2019.
f.: il.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo da Silva Fonseca .
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2019.

Bibliografia. Anexos.

Inclui abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Robótica. 2. Planejamento de trajetória. 3. Simulação. 4. Soldagem.
I. , João Paulo da Silva Fonseca, orient. II. Título.

CDU 621

Felipe Arantes Lobo

Modelando um robô comercial de 6 GDL usando o V-REP (*Virtual Robot Experimentation Platform*)

Monografia apresentada à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás para a disciplina de Projeto Final de Curso.

Trabalho aprovado. Goiânia, 12 de dezembro de 2019:

João Paulo da Silva Fonseca

Prof.Dr. João Paulo da Silva Fonseca
Orientador

Demostenes Ferreira Filho

Prof.Dr. Demostenes Ferreira Filho
Convidado 1

Marco Antonio Assfalk de Oliveira

Prof.Dr. Marco Antonio Assfalk de Oliveira
Convidado 2

Goiânia
2019

Dedico este trabalho a minha família e amigos, em especial ao meu pai, minha mãe e meu irmão pelo apoio e incentivo durante toda a minha vida como estudante.

Agradecimentos

Aos professores, técnicos e todos os colaboradores que asseguraram o excelente funcionamento da universidade durante meus anos como discente.

Ao professor e orientador João Paulo da Silva Fonseca, o qual foi de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

"Pensando em fazer
Pensando em fazer
Se passaram vinte anos...
Não consegui
Não consegui
Se passaram vinte anos...
Ai porque não fiz
Ai porque não fiz
Se passaram vinte anos...
Assim, se passaram sessenta anos
Essa é a biografia de uma vida vazia."

(Provérbio Tibetano)

Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação de um manipulador robótico comercial amplamente aplicado no meio industrial (o *Yaskawa Motoman HP20D*) com 6 graus de liberdade (GDL) usando o *Virtual Robot Experimentation Platform (V-REP)*, uma plataforma de simulação bem reconhecida e disponível de forma gratuita para fins acadêmicos. O método utilizado constitui em importação e simplificação do modelo 3D, criação do modelo visual, criação do modelo dinâmico, criação das juntas e da hierarquia dos elos. Após a criação do modelo de simulação, planejou-se a trajetória e movimento do manipulador robótico através de uma programação offline utilizando um *plugin*, o OMPL (*The Open Motion Planning Library*). Em seguida, elaborou-se cenas em que o manipulador robótico simula operações de soldagem. Nas cenas, adiciona-se voxels através do octree, representando o cordão de solda. A primeira cena é a soldagem de duas chapas de 1/4 pol com junta de topo e chanfro em V na posição 1G. Este processo foi realizado com três passes e usando técnicas afim de evitar possíveis distorções geradas na soldagem. A segunda cena é a soldagem da alma nas abas de um perfil em I nas posições 2F e 4F. Analisou-se a velocidade da tocha nos processos de soldagem e constatou-se que o método implementado apresenta flutuações na velocidade de soldagem. Concluí-se que o software é bastante versátil e permite diversas possibilidades de simulação de automação e devido a complexidade do método, este se torna viável para casos com alta produção ou para fins acadêmicos.

Palavras-chave: Robótica. Planejamento de trajetória. Simulação. Soldagem.

Abstract

This paper describes the development of a simulation model of a commercial robot manipulator widely applied in the industrial field (the Yaskawa Motoman HP20D) with 6 degree of freedom using the Virtual Robot Experimentation Platform (V-REP), an widely used simulation platform which has a educational version for academics purpose. The method used consist of: import and simplification of the 3D model, development of a visual model and of a dynamic model, creation of joints and hierarchy of the links. After the development of the simulation model, it has planned trajectories and movements of the robot manipulator through offline programming using a plugin, the OMPL (The Open Motion Planning Library). Two welding example scenes were created, where octree voxels were added representing the weld bead. The first scene is the welding of two flat quarter inch plates in butt joint with V chamfer at 1G position. This process was made in three steps and using techniques to avoid distortion generated by the weld. The second scene is the welding of the flanges in the web of I-profile at 2F and 4F positions. An analysis of the torch welding process velocities revealed that the implemented method presents welding velocities fluctuations. We concluded that the software is quite versatile and allows many simulation possibilities of automation and due the complexity of the method, it becomes feasible only for high volume or academic purposes.

Keywords: Robotic. Trajectory planning. Simulation. Welding.

Lista de ilustrações

Figura 1 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão. (b) Macrografia de uma junta.	28
Figura 2 – Tipos de chanfros.	29
Figura 3 – Tipos de chanfros com diferentes tipos de juntas.	29
Figura 4 – Posições de soldagem convencionadas pela ASME para chapas.	30
Figura 5 – Posições de soldagem convencionadas pela ASME para tubos.	30
Figura 6 – Processo MIG/MAG.	31
Figura 7 – Geometria e diluição em uma junta a topo com penetração parcial.	31
Figura 8 – (a) Efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a penetração da solda (b) Efeitos dos parâmetros de soldagem sobre o reforço da solda.	32
Figura 9 – Solda com diversos passes.	32
Figura 10 – Distorção em soldagem: (a) contração transversal, (b) contração longitudinal, (c) distorção angular e (d) flexão em relação à linha neutra.	33
Figura 11 – Alguns tipos de tecimento usado na soldagem MIG/MAG. Os pontos na Figuras (a) e (b) simbolizam pequenas pausas.	33
Figura 12 – Custo de robôs comparados com o custo do trabalho humano na década de 90.	34
Figura 13 – Classificação de robôs.	35
Figura 14 – Tartilope de solda realizando o processo MIG/MAG: (a) Soldagem com duas tochas simultâneas (b) Soldagem de um vaso de pressão.	35
Figura 15 – Linha de produção de automóveis.	36
Figura 16 – Um manipulador com um sistema de coordenadas na base e outro no elemento terminal.	37
Figura 17 – Fábrica virtual.	38
Figura 18 – Hierarquia dos quadrees.	39
Figura 19 – Quadrees.	39
Figura 20 – <i>Motion Planning Demo 1</i>	40
Figura 21 – <i>Octree Generation Demo</i>	41
Figura 22 – <i>Motion Planning and Grasping Demo</i>	42
Figura 23 – Fotografia do sistema de teleoperação do manipulador robótico ABB IRB 120 e BarrettHand utilizando o dispositivo háptico Geomagic Touch X e ROS.	43
Figura 24 – Criação do modelo de simulação.	45
Figura 25 – Propriedades do objeto: (a) modelo dinâmico (b) Modelo visual.	47
Figura 26 – Modelo: (a) dinâmico (b) visual.	47
Figura 27 – Hierarquia e juntas do manipulador robótico.	48

Figura 28 – Parâmetros do IK <i>group</i>	49
Figura 29 – Alvo usado para determinar a localização e orientação de um determinado ponto no espaço.	51
Figura 30 – Fluxograma para movimentação do manipulador robótico.	51
Figura 31 – Representação de um cenário com o modelo de simulação do Manipulador robótico <i>Yaskawa Motoman</i> HP20D preparado para uma operação de soldagem com junta de topo na posição 1G Plana.	55
Figura 32 – Soldagem de Duas Chapas de 1/4 de pol com Junta de Topo e Chanfro em V na Posição 1G Plana: (a) Ponteamento (b) Primeiro passe de raiz (c) Segundo passe de raiz (d) Segundo passe de enchimento	56
Figura 33 – Solda em perfil I: (a) Solda de junta de ângulo na posição 2F (Horizontal) (b) Solda de junta de ângulo na posição 4F (sobrecabeça)	57
Figura 34 – Velocidade do elemento terminal no eixo das ordenadas, em m/s. Tempo da simulação no eixo das abcissas, em segundos.	58

Lista de tabelas

Tabela 1 – Funções usadas na programação do manipulador robótico	50
Tabela 2 – Dados do discente.	65
Tabela 3 – Semestre letivo de 2019/2.	66

Lista de abreviaturas e siglas

AOLP	Automated Offline Programming
API	<i>Application Programming Interface</i>
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
GDL	Graus de Liberdade
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
IK	<i>Inverse Kinematics</i>
LAMAF	Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
OBJ	<i>Wavefront 3D Object File</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Data</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
V-REP	<i>Virtual Experimentation Platform</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	25
1.2	Organização do Trabalho	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Automação da Manufatura	27
2.2	Soldagem	28
2.3	Robótica	34
2.3.1	Robótica Industrial	35
2.3.2	Simulação em Robótica	37
2.3.2.1	Voxel e Octree	38
2.4	V-REP (<i>Virtual Robot Experimentation Platform</i>)	39
2.4.1	<i>Motion Planning Demo 1</i>	40
2.4.2	<i>Octree Generation Demo</i>	40
2.4.3	<i>Motion Planning and Grasping Demo</i>	41
2.5	Trabalhos Semelhantes	42
3	METODOLOGIA	45
3.1	Criação do Modelo de Simulação	45
3.1.1	Importação do Modelo 3D	46
3.1.2	Simplificação do Modelo 3D	46
3.1.3	Criação do Modelo Visual e Dinâmico	46
3.1.4	Criação e Posicionamento das Juntas e Criação da Hierarquia	47
3.2	Cinemática Inversa	48
3.3	Programação do Manipulador Robótico	49
3.3.1	Planejamento de Trajetória e Movimento	49
3.3.2	Adição de Material	50
3.3.3	Exemplo Didático	52
4	RESULTADOS	55
4.1	Soldagem de Duas Chapas de 1/4 de pol com Junta de Topo e Chanfro em V na Posição 1G Plana	55
4.2	Soldagem de Perfil I na Posição 2F e 4F	56
4.3	Análise de Velocidade de Operação	57
5	CONCLUSÃO	59

5.1	Trabalhos Futuros	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	63
	APÊNDICE A – PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO	65
A.1	Resumo	65
A.2	Objetivos	65
A.3	Metodologia (Atividades a Serem Desenvolvidas).	65
A.4	Resultados Esperados	66
A.5	Cronograma de Atividades	66
	APÊNDICE B – FORMULÁRIO DE METADADOS PARA DISPO- NIBILIZAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BDTD/UFG	67

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico sempre foi motivado no intuito de ajudar e melhorar as atividades humanas, por exemplo, a invenção de ferramentas e máquinas as quais auxiliam o trabalho humano, o desenvolvimento de meios de transportes, meios de comunicação, entre outros. Dessa maneira, observa-se que a busca por novas tecnologias sempre foi objeto de interesse e de estudo da humanidade.

Na ficção científica, na literatura e no cinema, mostram o fascínio da humanidade pelos robôs. Os cinemas e os livros demonstram a expectativa para o futuro, em que os robôs estejam integrado no dia a dia das pessoas e não somente no ambiente profissional. Um grande exemplo disso é no livro “Eu, Robô” de Isaac Asimov, o qual ilustra uma sociedade em que a vida dos humanos é inviável sem a ajuda dos autômatos (SANTI, 2019). Isaac Asimov estabeleceu quatro leis para a robótica, as quais asseguram o convívio dos robôs com os humanos, estas leis são listadas a seguir (ASIMOV, 1950 apud ROSÁRIO, 2010, p. 28):

1. Um robô não pode ferir um ser humano, ou permanecer passivo deixando um ser humano exposto ao perigo.
2. Um robô deve obedecer às ordens dadas pelos seres humanos, exceto se tais ordens estiverem em contradição com a 1ª Lei.
3. Um robô deve proteger sua existência na medida em que essa proteção não estiver em contradição com a primeira e a 2ª Lei.
4. Um robô não pode causar mal à humanidade nem permitir que ela própria o faça. (Esta última lei foi escrita por Asimov somente em 1984).

A indústria 4.0 se baseia na integração das tecnologias físicas e digitais em todas as etapas de desenvolvimento de um produto. A indústria 4.0, apesar de ainda pouca utilizada pelas empresas no Brasil, aparece como uma alternativa para aumentar a competitividade por meio das tecnologias digitais (PEQUENAS EMPRESAS E GRANDES NEGÓCIOS, 2019).

Este trabalho foi motivado pela percepção da importância da indústria 4.0 e do estudo sobre o tema. Como a manufatura digital se baseia na integração das tecnologias físicas e digitais, baseado nesta ideia, anseia-se a integração de todos os equipamentos disponíveis no laboratório.

1.1 Objetivos

No laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF) da Universidade Federal de Goiás (UFG) há o manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20D. A mani-

pulação deste braço robótico é realizada a partir de um controlador de robô industrial, o DX100. Com o controle é possível criar trajetórias através do *teach pendant* selecionando pontos no espaço. O objetivo deste trabalho é criar um modelo de simulação do manipulador e o programar de forma online para que simule processos de fabricação. Os objetivos específicos do trabalho são:

- Criar um modelo de simulação do manipulador robótico usando o software V-REP (*Virtual Robot Experimentation Platform*).
- Elaborar cenários de simulação com planejamento de trajetória e movimento do manipulador robótico.
- Implementar cenários de aplicação em manufatura (soldagem de chapas).

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco seções. Esta seção, mostra algumas vantagens e aplicações da simulação na robótica e expõe os objetivos do trabalho. A segunda seção expõe conceitos gerais e conceitos específicos, sobre a área de estudo, importantes para a compreensão deste trabalho, e apresenta o *software* utilizado para simulação. A terceira seção descreve o método adotado na elaboração deste trabalho. A quarta seção apresenta os resultados obtidos com o modelo de simulação e descreve simulação de processos de fabricação desenvolvidos nas cenas contidas nas seções 4.1 e 4.2. A quinta seção sintetiza as conclusões obtidas no trabalho e aborda perspectivas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Automação da Manufatura

A palavra manufatura surgiu na língua inglesa, em torno de 1567 e se origina da combinação de duas palavras latinas, manus e factus, que significam mão e fazer, respectivamente. Sua combinação tem o sentido de fazer com as mãos (GROOVER, 2011). Esta definição na época era coerente, pois os métodos de produção eram todos artesanais. Com o desenvolvimento, houve a necessidade de peças de um maior nível de complexidade e maior produção, portanto a necessidade de aprimorar a manufatura, conseqüentemente originando as fábricas como nos dias atuais.

Atualmente, muitos dos processos são automatizados. Sistemas de produção automatizados são processos executados por uma máquina sem a participação direta de um trabalhador humano. Lista-se algumas razões mais comuns para o uso da automação (GROOVER, 2011):

- Aumentar a produtividade.
- Reduzir os custos de trabalho.
- Minimizar os efeitos da falta de trabalhadores.
- Reduzir ou eliminar as rotinas manuais e das tarefas administrativas.
- Aumentar a segurança do trabalhador.
- Melhorar a qualidade do produto.
- Diminuir o tempo de produção.
- Realizar processos que não podem ser executados normalmente.
- Evitar o alto custo da não automação (desvantagem competitiva em relação aos concorrentes automatizados no mercado).

Além disso, há amplo uso de computadores nos sistemas de produção, estes são conhecidos como manufatura assistida por computadores. Dividem-se o sistema de produção automatizados de uma fábrica em duas categorias: automação dos sistemas de produção da fábrica e controle computadorizado dos sistemas de apoio à produção (GROOVER, 2011). Nos sistemas modernos, estas categorias se sobrepõem em alguns momentos, pois os sistemas de produção são conectados com o sistema de apoio à produção.

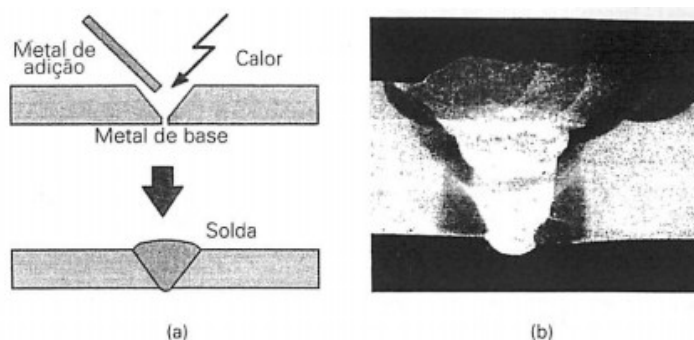
A manufatura flexível possibilita a produção de diferentes tipos de produtos ou podem se adaptar rapidamente quando se necessita de novos tipos de produtos. A manufatura flexível possui as seguintes características:

- Identificação de diferentes itens, pois cada item necessita de um tipo específico de operação.
- Instrução de mudança rápida de operação.
- Como os itens não são produzidos em lotes na manufatura flexível, tem que haver uma mudança na configuração física para não desperdiçar tempo entre a produção de diferentes itens.

2.2 Soldagem

Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2011, p.18) solda é definido como “processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos”. O processo é normalmente realizado com uma fonte de calor e metal de adição no metal de base (material da peça que está sendo soldado) realizando a união, como mostrado na Figura 1. A Figura 1 (a) ilustra de maneira generalizada os elementos necessário para o um processo de soldagem e o cordão de solda após o processo. Macrografia é um ensaio que consiste na verificação de uma superfície plana preparada através de lixamento e de uma substância que reaja quimicamente com a superfície revelando detalhes macrográficos da estrutura do material (INFOSOLDA, 2019). A Figura 1 (b) é uma macrografia de um cordão de solda, o qual é possível visualizar o cordão de solda e a zona termicamente afetada (ZTA).

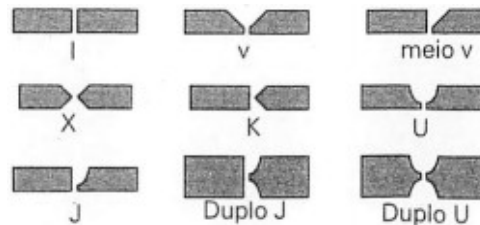
Figura 1 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão. (b) Macrografia de uma junta.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2011.

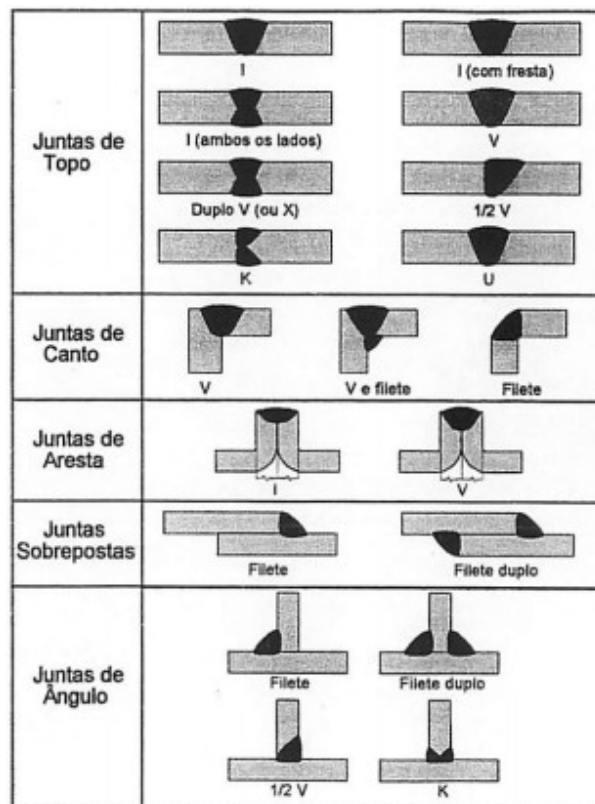
Na soldagem há diversos tipos de juntas (juntas são a região onde as peças serão unidas). Pode se fazer chanfros nas juntas, a Figura 2 mostra alguns tipos de juntas comumente usadas. A Figura 3 ilustra os tipos chanfros com diferentes tipos de juntas e suas nomenclaturas.

Figura 2 – Tipos de chanfros.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2011.

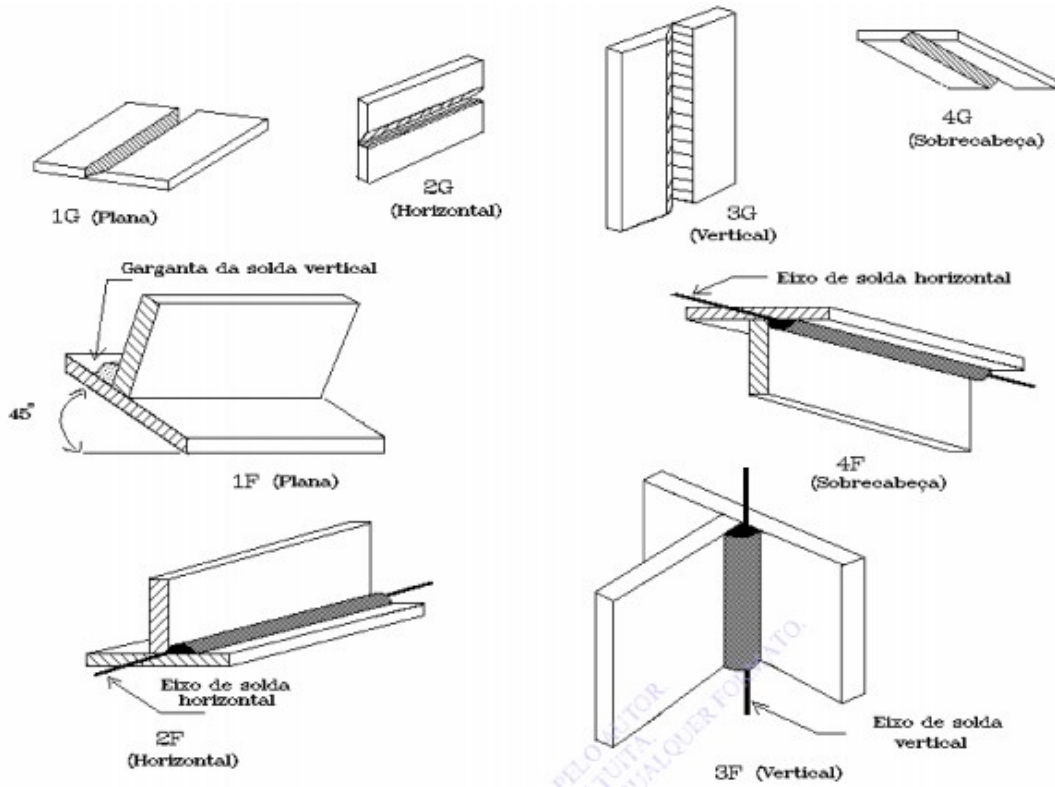
Figura 3 – Tipos de chanfros com diferentes tipos de juntas.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2011.

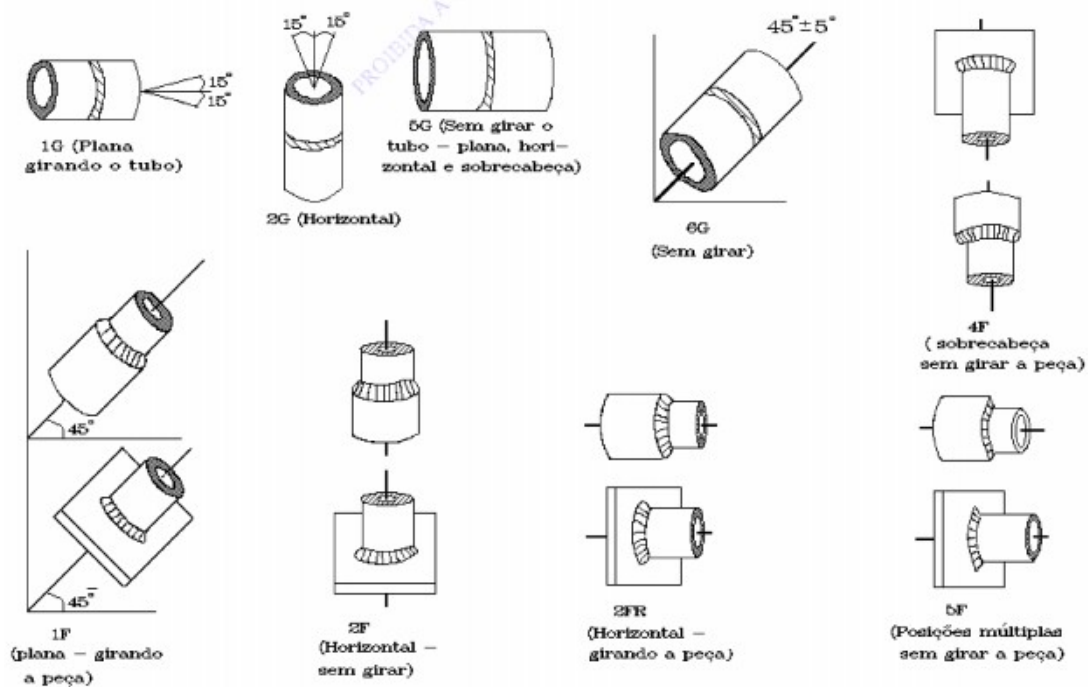
As Figuras 4 e 5 são uma representação de posições de soldagem e suas nomenclaturas definida pela ASME (*The American Society of Mechanical Engineers*) para chapas e tubos, respectivamente. Nota-se nas Figuras que “G” é usado para junta de topo e “F”, para junta de ângulo (filete) (MACHADO, 1996). Estas nomenclaturas são usadas pois o nível de realizar o processo em diferentes posições se altera. Além disso, soldadores são qualificados de acordo com o processo e a posição de soldagem.

Figura 4 – Posições de soldagem convencionadas pela ASME para chapas.



Fonte: Machado, 1996.

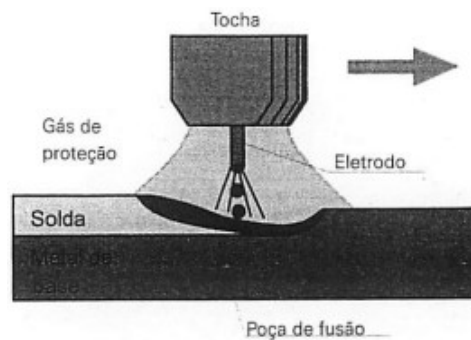
Figura 5 – Posições de soldagem convencionadas pela ASME para tubos.



Fonte: Machado, 1996.

Há diversos tipos de processos de soldagem, por exemplo, eletrodo revestido, MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), arco submerso, arame tubular, soldagem por resistência por pontos, entre outros. Uma representação do processo MIG/MAG é mostrado na Figura 6. Este é um processo em que o aquecimento é feito através de um arco elétrico (entre o arame eletrodo metálico e a peça) e possui uma proteção gasosa. Esta proteção gasosa contra contaminação pela atmosfera, pode ser feita através de um gás ativo ou inerte, ou seja, um gás que reage quimicamente com a poça de fusão ou não, respectivamente. O arame eletrodo é consumível e alimentado continuamente de forma automatizada.

Figura 6 – Processo MIG/MAG.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2011.

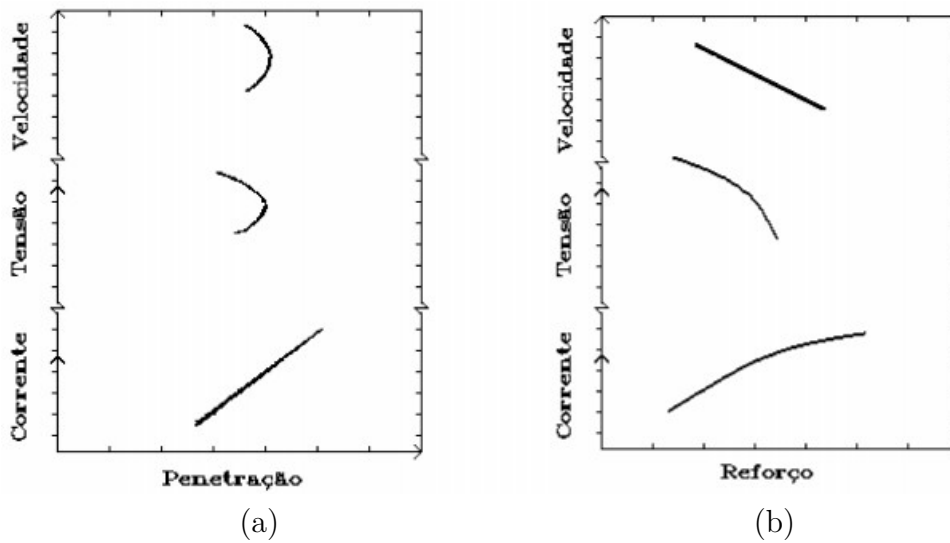
A Figura 7 é uma representação de uma junta a topo com penetração parcial. Nota-se nesta Figura que o reforço de solda é a altura máxima alcançado pelo metal adicionado. Nos processos de soldagem os quais o aquecimento é feito através de arco elétrico, a definição da tensão e a corrente de soldagem são parâmetros essenciais para uma solda de qualidade. A velocidade avanço de soldagem é outro fator que afeta o resultado da solda. Nas Figuras 8 (a) e 8 (b) mostra a influência da corrente, tensão e velocidade de soldagem na penetração e reforço da solda, respectivamente. A distância bico de contato-peça (DBCP), isto é, a distância da tocha e da peça a ser soldada, é um dos parâmetros relevantes a serem considerados na elaboração de um processo de soldagem.

Figura 7 – Geometria e diluição em uma junta a topo com penetração parcial.



Fonte: Machado, 1996.

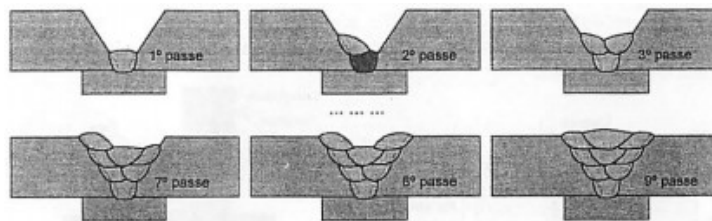
Figura 8 – (a) Efeitos dos parâmetros de soldagem sobre a penetração da solda (b) Efeitos dos parâmetros de soldagem sobre o reforço da solda.



Fonte: Machado, 1996.

Quando se realiza solda em peças muito espessas, é possível que não ocorra penetração total, isto é, o metal de adição não está presente em toda a junta. Para evitar que isto ocorra, é comum a realização de mais de um passe ou maior abertura de raiz (maior distância entre as peças). A Figura 9 ilustra um caso como esse, em que a solda foi realizado com 9 passes.

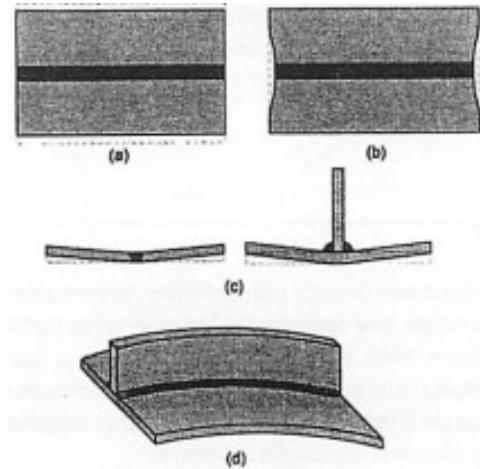
Figura 9 – Solda com diversos passes.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2011.

Um ponto importante a ser lembrado na soldagem são as distorções. A Figura 10 ilustra casos de distorções observados em processos de soldagem. Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2011, p.121) distorção são “desvios permanentes de forma e/ou dimensões resultantes das deformações plásticas que ocorrem devido às tensões transientes desenvolvidas durante a soldagem”. As tensões transientes são causadas pela dilatação e contração durante a soldagem, devido ao aquecimento e a contração, respectivamente. Há técnicas usadas durante a fabricação de uma peça para minimizar as distorções, como por exemplo, ponteamento antes da soldagem, usar sequências de deposição de solda que minimizem as distorções, entre outros (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2011).

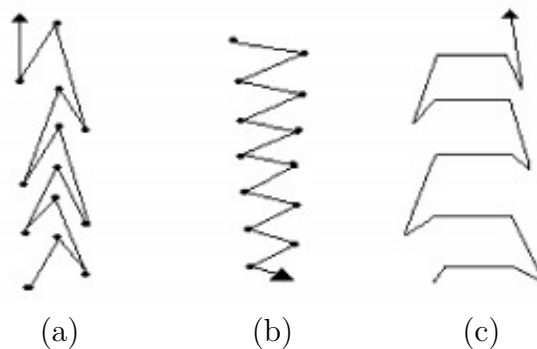
Figura 10 – Distorção em soldagem: (a) contração transversal, (b) contração longitudinal, (c) distorção angular e (d) flexão em relação à linha neutra.



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense, 2015.

O movimento da extremidade do eletrodo é definido como tecimento. Este depende do tipo e dimensões da junta, posição de soldagem, classe e bitola do eletrodo e em grande parte da preferência pessoal do soldador. O tecimento afeta a geometria do cordão de solda, a penetração e a ocorrência de defeitos nas juntas, além de influenciar parcialmente a velocidade de soldagem. A Figura 11 é uma representação dos métodos comumente usados de tecimento. O tecimento mostrado na Figura 11 (a) é recomendado para solda vertical-ascendente e passe de raiz e é denominada de “árvore de natal”. O tecimento mostrado na Figura 11 (b) é recomendado para solda vertical-descendente e é denominada de “zig-zag”. O tecimento mostrado na Figura 11 (c) é recomendado para os passes de enchimentos em geral (MACHADO, 1996).

Figura 11 – Alguns tipos de tecimento usado na soldagem MIG/MAG. Os pontos nas Figuras (a) e (b) simbolizam pequenas pausas.



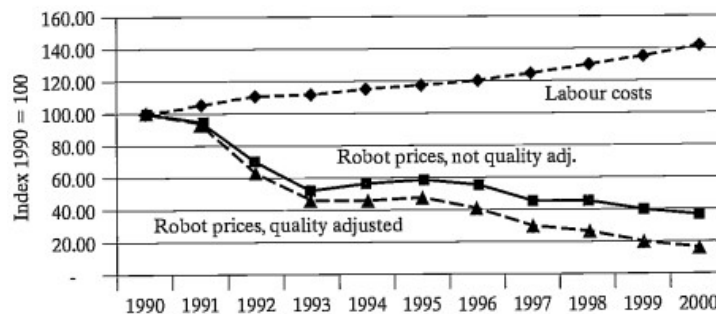
Fonte: Machado, 1996.

2.3 Robótica

O termo robô deriva da palavra *robota*, de origem eslava, que significa trabalho forçado, usado pela primeira vez em 1921, por um dramaturgo checo, Karen Capek, ao se referir a um autômato na peça teatral “Os Robôs Universais de Russum (R.U.R.)” (ROMANO, 2002).

Uma das razões para o aumento do uso de robôs é a diminuição do seu custo (CRAIG, 2005). A microeletrônica foi grande responsável por esta redução (foi possível colocar toda a capacidade do primeiro computador a válvula em uma pastilha de silício de menos de $0,5 \text{ cm}^2$) (ROSÁRIO, 2010). A Figura 12 mostra uma comparação entre o custo de robôs (nesta Figura “*Robot prices quality adjusted*” é o valor dos robôs corrigido pela inflação e “*Robot prices not quality adj.*” é o valor não corrigido pela inflação) e o custo de trabalho humano (“*labour costs*”), na década de 90. Mostra que o custo de robôs caíram, enquanto o custo do trabalho humano aumentou. Os robôs não só estão ficando mais baratos, como também estão ficando mais rápidos, precisos e flexíveis. Outros motivos para a sua popularização são sua capacidade de realizar tarefas que para humanos seriam perigosas ou com um alto nível de complexidade.

Figura 12 – Custo de robôs comparados com o custo do trabalho humano na década de 90.



Fonte: Craig, 2005.

A Figura 13 mostra e exemplifica alguns critérios usados para classificar robôs, tais como autonomia do sistema de controle, estrutura cinemática, graus de liberdade, geometria do espaço de trabalho, entre outros.

Aplicações nas quais a solda automatizada apresenta-se viável são em casos que o cordão de solda é muito extenso ou em posições difíceis para uma pessoa realizar o processo, por exemplo a soldagem de tubos. Nestes casos é comum o uso de um trator de solda, como mostrado na Figura 14. A Figura 14 (a) mostra a soldagem com duas tochas na posição 1G (plana). A Figura 14 (b) mostra a soldagem de vaso de pressão na posição 3G (horizontal). Em linhas de produção de automóveis os processos de soldagem e a movimentação dos automóveis são automatizados. A soldagem é feita através de manipuladores robóticos, semelhante ao objeto de estudo deste trabalho. Com isto há um aumento de produção e

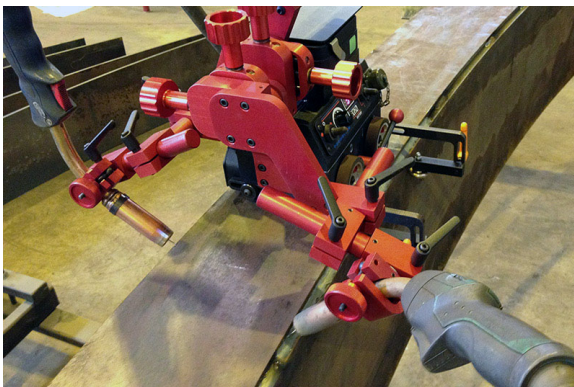
Figura 13 – Classificação de robôs.

Sistema de controle	Mobilidade da base	Estrutura Cinemática	Espaço de trabalho
Equipamentos teleoperados	Veículo teleoperado Manipulador telep.		
Robôs	Móveis	Aquáticos	Submarinos Marinos
		Aéreos Terrestres	Pernas Rodas
	Fixos	Paralelos	3 - 6 GdL
		Série	Cartesiano Cilíndrico Esférico Articulado SCARA

Fonte: Riascos, 2019.

redução de custo. A Figura 15 mostra uma linha de produção utilizando braços robóticos. Nesta Figura, nota-se que em um mesmo veículo, há manipuladores robóticos em operação. Com isto é possível imaginar o ganho de tempo de produção de um automóvel, se comparado com a produção manual, pois dificilmente poderá 5 operadores trabalhar, simultaneamente, no mesmo automóvel em segurança, com a mesma velocidade e precisão.

Figura 14 – Tartilope de solda realizando o processo MIG/MAG: (a) Soldagem com duas tochas simultâneas (b) Soldagem de um vaso de pressão.



(a)



(b)

Fonte: WELDTEC, 2019.

2.3.1 Robótica Industrial

A robótica tem duas principais aplicações na indústria: manipulação de materiais e fabricação. Das aplicações dos robôs nas indústrias brasileiras, 33% dos robôs da ABB (Asea Brown Boveri) são utilizados para soldagem por resistência por pontos, 25% para

Figura 15 – Linha de produção de automóveis.



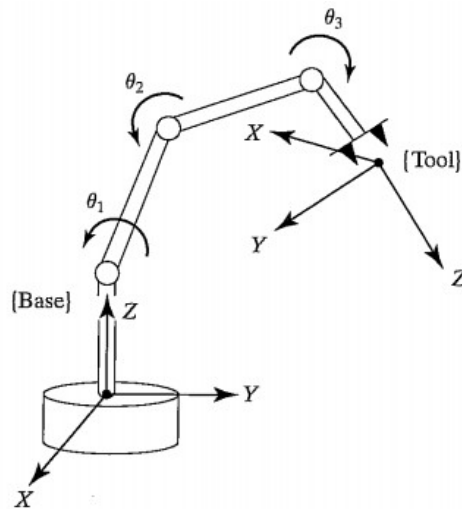
Fonte: ABB, 2015.

manipulação de materiais/paletização, 18% para soldagem por arco, 10% para pintura e 14% para outras aplicações como corte a jato de água, corte por gás, acabamento e montagem (ROSÁRIO, 2010).

No estudo da robótica, é de grande relevância a localização dos objetos em um espaço tridimensional. Os objetos em questão são os elos do manipulador, peças e ferramentas que o manipulador opera e todos os outros elementos presentes no ambiente. Com o intuito de saber a posição e orientação de um objeto no espaço, deve-se relacionar um sistema de coordenadas do objeto a um sistema de coordenadas de referências (CRAIG, 2005). A relação matemática desses sistemas de coordenadas é chamada de cinemática. A Figura 16 mostra um manipulador com um sistema de coordenadas de referência na base e outro sistema de coordenadas no elemento terminal.

Na robótica são usados dois tipos de cinemática, a direta e a inversa. A cinemática direta é o cálculo feito através dos ângulos das juntas para descobrir a posição e orientação do elemento terminal. Em muitas aplicações deseja-se saber o inverso, ou seja, saber quais ângulos as juntas devem assumir para uma determinada posição do elemento terminal. Essa é a cinemática inversa. Ela torna-se complexa para robôs com muitos graus de liberdade (GDL) (a quantidade varia de acordo com os tipos de juntas e a sua disposição no manipulador), pois para uma determinada posição do elemento terminal, há várias soluções possíveis.

Figura 16 – Um manipulador com um sistema de coordenadas na base e outro no elemento terminal.



Fonte: Craig, 2005.

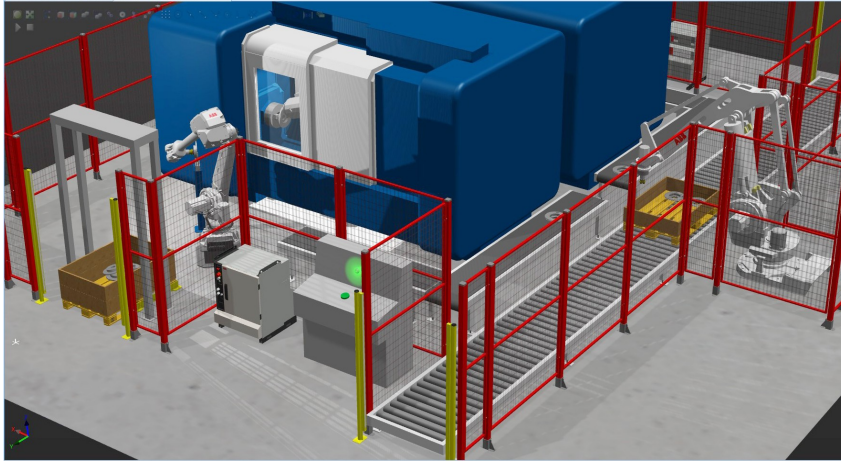
2.3.2 Simulação em Robótica

“Simulação é o processo de representar um modelo real ou teórico de um sistema físico, executar e analisar o resultado do modelo” (ZLAJPAH, 2008, p.880, tradução nossa). Simulação tem-se tornado uma importante ferramenta de pesquisa desde o início do século XX e teve seu uso fortemente impulsionado com o desenvolvimento dos computadores (ZLAJPAH, 2008).

Uma das desvantagens da programação textual de robôs, é que necessita que o robô seja retirado da produção para que uma nova programação seja feita. Um método de programação é a *off-line*, a qual permite que o programa seja elaborado em um terminal de computador distante e em seguida seja feito o *download* para o controlador do robô sem interromper a produção (GROOVER, 2011). O uso de simulação gráfica é pertinente para validação dos programas elaborados.

Além da possibilidade de controle de robôs virtuais, tem-se a modelagem do ambiente virtual, possibilitando a representação gráfica completa de uma linha de produção. Isto permite um estudo de planejamento de *layout* de fábrica, planejamento de movimento de robôs, equipamentos, dispositivos, considerando possibilidades de segurança e detecção de colisão (ROSÁRIO, 2010). A Figura 17 mostra um exemplo de uma fábrica virtual, a qual é possível notar a presença de um centro de usinagem, dois manipuladores robóticos, esteira transportadores, um painel de controle dos equipamentos e o cercado de segurança.

Figura 17 – Fábrica virtual.



Fonte: ABB, 2019.

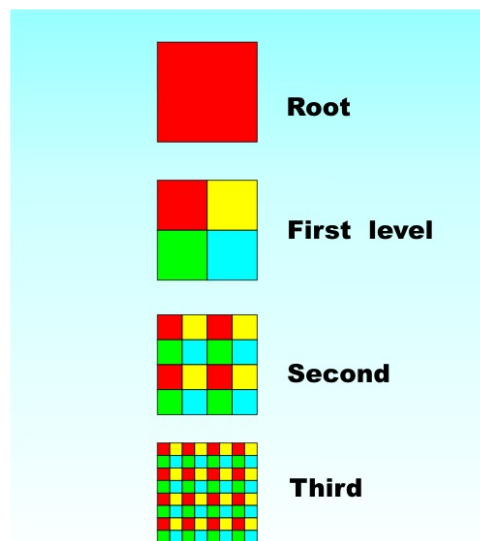
2.3.2.1 Voxel e Octree

Uma imagem em um monitor é composta por vários pixels, ou seja, um pixel é o menor elemento de uma imagem. Analogamente, o voxel é o menor elemento de uma representação em 3D. O nome voxel se origina da mistura de duas palavras, volume e pixel (COLLINS, 2019).

Quadtrees e Octrees são uma forma hierárquica de representar dados no espaço (HARLEY, 1998). Os quadtrees são usados em um espaço bidimensional e os octrees, tridimensionais. Os quadtrees, partem da premissa de dividir um quadrado chamado de raiz em quatro menores quadrados, os quais são nós filhos do quadrado raiz, no primeiro nível. De cada um desses nós, originam-se mais quatro nós, no segundo nível, ou seja, mais quatro quadrados menores, e assim sucessivamente. A Figura 18 ilustra esta divisão e a hierarquia, mostrando como se dá os níveis (JAMES, 2018). Os octrees se diferenciam dos quadtrees porque é usado em um espaço tridimensional e um cubo maior divide-se em oito cubos menores.

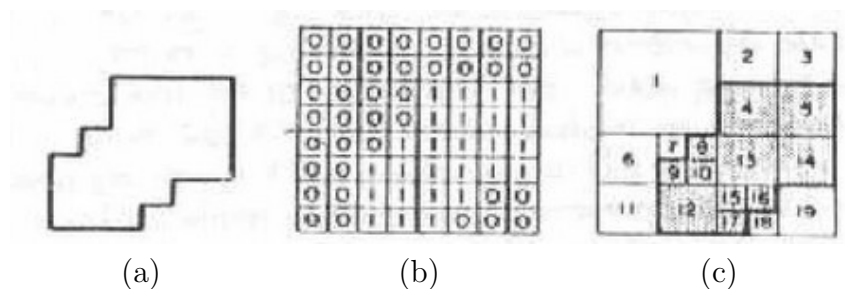
Esta forma de se representar dados se torna interessante pelo fato de necessitar mais níveis somente onde há relevância, como mostrado na Figura 19. Nesta Figura, tenta-se representar via dados a imagem mostrada na Figura 19 (a). Nota-se na Figura 19 (b), todos os nós no terceiro nível. Na Figura 19 (c), nota-se que utilizou-se o terceiro nível somente em algumas regiões onde se houve necessidade, ou seja, ele elimina os nós de maiores níveis onde não há variação entre os quadrantes.

Figura 18 – Hierarquia dos quadrees.



Fonte: James, 2018.

Figura 19 – Quadrees.



Fonte: Harley, 1998.

2.4 V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform)

O V-REP é um software de simulação na área de robótica, com versão livre para fins educacionais. É baseado em um arquitetura de controle distribuída, em que cada elemento pode ser controlado através de um *script* incorporado, um *plugin* ROS (*Robot Operating System*), uma API (*Application Programming Interface*) remota ou uma solução customizada. Os diversos meios de controle faz com que o V-REP seja ideal para aplicações com muitos robôs. Os *scripts* podem ser escritos em C/C++, Python, Java, Lua, Matlab ou Octave. Este trabalho foi realizado usando a linguagem Lua, esta é a linguagem nativa do V-REP.

Os *scripts* do V-REP é o “terminal” onde se realiza a programação no *software*. O V-REP possui, normalmente, um *main script* e *child scripts*. Toda cena possui um *main script*, o qual contém os códigos básicos que permitem a simulação. O V-REP possibilita um número ilimitado de *child scripts* por cena. Cada *child script* possibilita

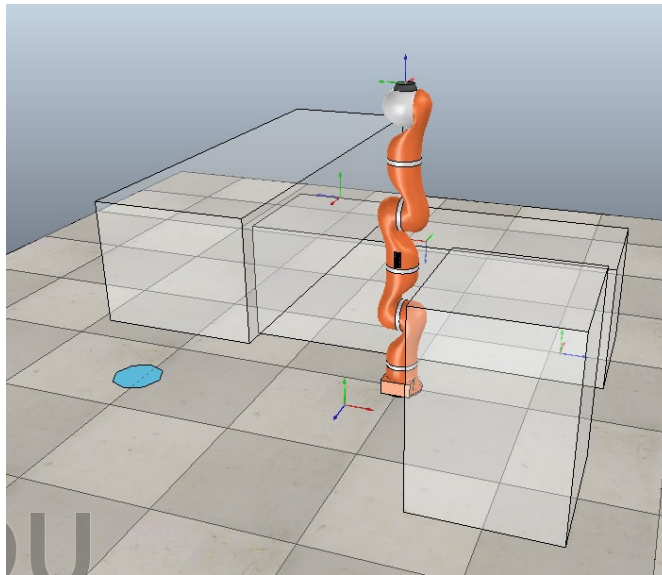
gerar comportamento ativo a cada agente do cenário.

Ao fazer a instalação do software, há diversos exemplos demonstrando o seu potencial. Três exemplos foram profundamente estudados e servido de inspiração para a elaboração deste trabalho e serão expostos nas seções seguintes.

2.4.1 *Motion Planning Demo 1*

A cena do exemplo *Motion Planning Demo 1*¹ é mostrado na Figura 20 (COPPELIA ROBOTICS, 2019). Na cena há 4 alvos, numerados de 1 a 4. O elemento terminal do manipulador robótico toca estes 4 alvos de forma cíclica, ou seja, do alvo de número 1 ao alvo de número 4, e repete esta trajetória indefinidamente.

Figura 20 – *Motion Planning Demo 1*.



Fonte: Coppelia Robotics, 2019.

2.4.2 *Octree Generation Demo*

A Figura 21, mostra a cena do exemplo *Octree Generation Demo*² (COPPELIA ROBOTICS, 2019). Nesta cena há a presença de dois robôs, o manipulador robótico e o *Bubble Rob*, um robô móvel que se move evitando colisão. Nesta cena, o manipulador robótico cria um ambiente no qual o *Bubble Rob* movimentará evitando colisão em seu interior.

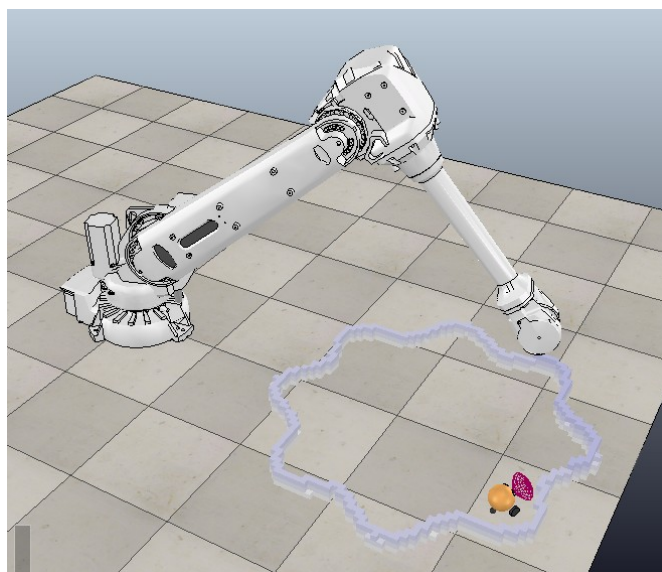
No V-REP, há a possibilidade de adicionar e remover material sólido. Esta cena, exemplifica a capacidade de adição de material. A remoção de material é interessante para

¹ Para melhor visualização, o vídeo da cena *Motion Planning Demo 1* está disponível no canal da *Coppelia Robotics* no *youtube*: <www.youtube.com/watch?v=cZdtytbGM08>

² Para melhor visualização, o vídeo da cena *Octree Generation Demo* está disponível no canal da *Coppelia Robotics* no *youtube*: <www.youtube.com/watch?v=SkhImo4BnjA>

um robô que realiza usinagem (usinar é modificar a geometria de uma peça retirando material). Adicionar material é interessante no caso de um impressora 3D ou soldagem (soldagem é um dos objetivos deste trabalho, o qual será detalhado mais adiante). Por exemplo, a simulação de uma fresadora, usando a função de adição de material é possível visualizar o resultado da fabricação de uma peça.

Figura 21 – *Octree Generation Demo.*



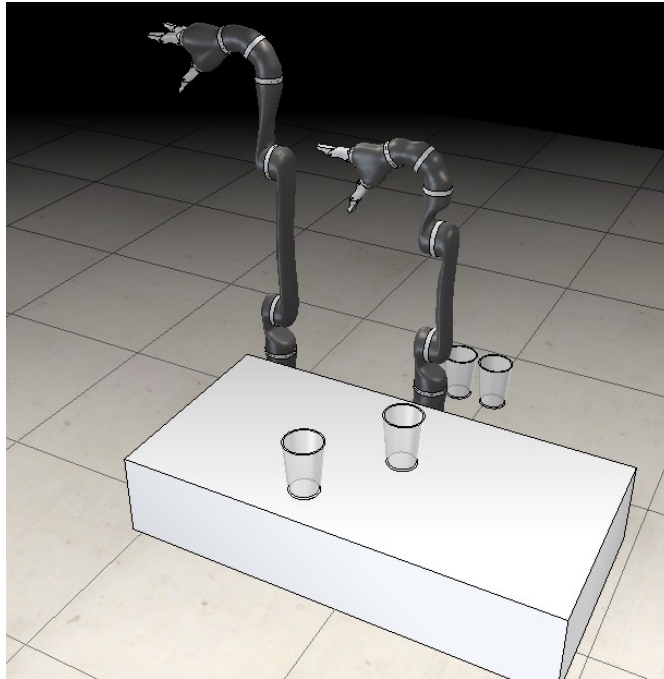
Fonte: Coppelia Robotics, 2019.

2.4.3 *Motion Planning and Grasping Demo*

A Figura 22, mostra a cena do exemplo *Motion Planning and Grasping Demo*³ (COPPELIA ROBOTICS, 2019). Nesta cena há a presença de dois manipuladores robóticos, os quais se movimentam evitando colisão entre si e com outros objetos da cena. O braço robótico da esquerda, pega o copo na bancada, que contém algumas esferas, transfere as esferas para o outro copo e então retorna para a posição e orientação inicial. O segundo braço robótico coloca as esferas novamente do primeiro copo e em seguida, pega um dos copos ao fundo, o coloca sobre o outro e então retorna para a posição e orientação inicial.

Nesta cena, percebemos a capacidade do V-REP em operar dois robôs simultaneamente e sem ocorrer colisão, salvar trajetórias e manipular objetos da cena, pois os manipuladores robóticos desta cena possuem garras, as quais permitem pegar objetos e movimentá-los na cena.

³ Para melhor visualização, o vídeo da cena *Motion Planning and Grasping Demo* está disponível no canal da *Coppelia Robotics* no *youtube*: <www.youtube.com/watch?v=Zech1Y2CdRo>

Figura 22 – *Motion Planning and Grasping Demo.*

Fonte: Coppelia Robotics, 2019.

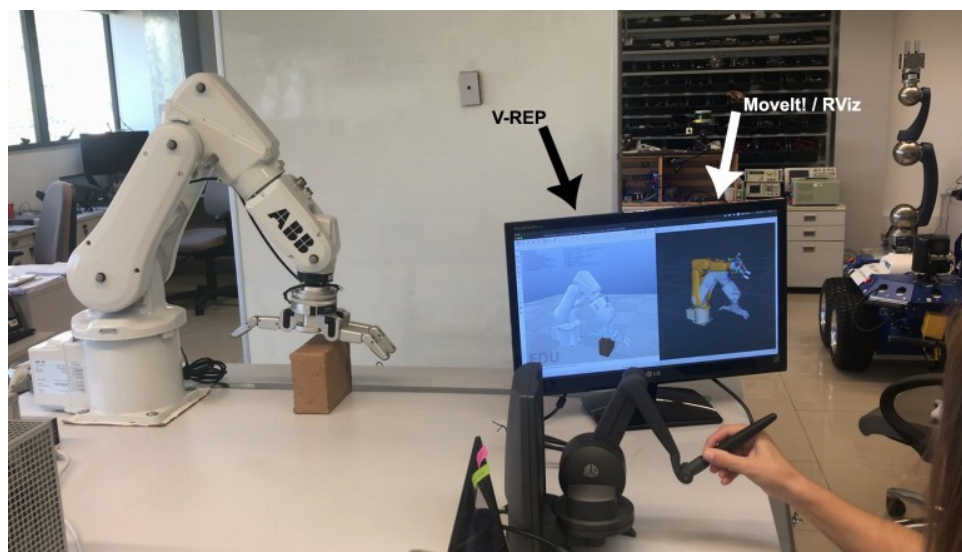
2.5 Trabalhos Semelhantes

Zlajpah (2008) em seu trabalho “*Simulation in Robotics*” mostra uma visão geral da simulação em robótica. O escopo do trabalho é expor o papel da simulação, em diferentes campos da robótica, integrando o ambiente para uma simulação dinâmica com manipuladores robóticos.

Rohmer, Singh e Freese (2013) em seu trabalho “*V-REP: a Versatil e and Scalable Robot Simulation Framework*” discute as vantagens e aplicações do V-REP. conclui que o software permite diversas aplicações, incluindo um rápido desenvolvimento de algoritmos, verificação dos sistemas, rápida prototipagem e desenvolvimento de casos como segurança e monitoramento remoto, treinamento e educação, controle de hardware e simulação de automação de fábrica.

O trabalho de Lima et al. (2019) consiste no desenvolvimento de um sistema de teleoperação com háptica do conjunto manipulador robótico industrial ABB IRB 120 e mão robótica BarrettHand BH8-282, utilizando o dispositivo háptico Geomagic Touch X e o Robot Operating System (ROS). Este sistema é mostrado na Figura 23. Além disso, foi realizado a realimentação de força dos dispositivo háptico (o qual conclui-se que melhora a percepção sobre a manipulação de objetos), realizou-se testes em laboratório para a validação do sistema e avaliou a interface de controle e o sistema em geral por meio de testes com usuários e aplicação de questionário.

Figura 23 – Fotografia do sistema de teleoperação do manipulador robótico ABB IRB 120 e BarrettHand utilizando o dispositivo háptico Geomagic Touch X e ROS.



Fonte: Lima et al., 2018.

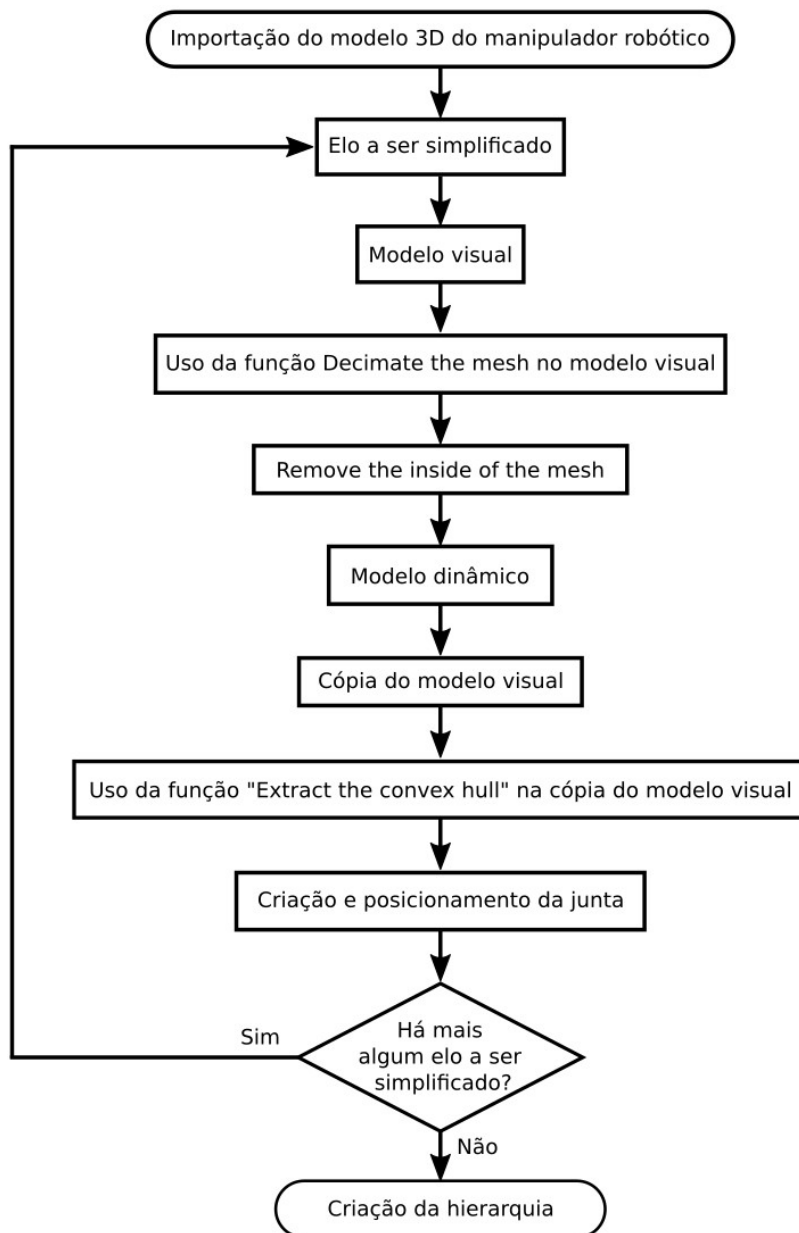
O trabalho “*Automated Offline Programming for Robotic Welding System with High Degree of Freedoms*” de Pan et al. reconhece que uma das grandes dificuldades da robótica baseada automação flexível é a complexidade da programação. Exemplifica-se esta dificuldade na produção de um veículo blindado, o qual é feita com um manipulador robótico com 13 GDL. O método de programação usado é o manual e online, o qual necessita de aproximadamente 6 meses para concluir a programação e são 16 horas para o manipulador robótico realizar o processo de soldagem. Com o intuito de sanar esta dificuldade, o trabalho apresenta o método usando o *Automated Offline Programming (AOLP)*, que é um software que planeja e programa um processo de soldagem de um manipulador robótico.

3 METODOLOGIA

3.1 Criação do Modelo de Simulação

O primeiro passo a ser realizado é a criação do modelo de simulação. A Figura 24 ilustra o método usado para a criação deste modelo e será detalhado mais adiante nesta seção.

Figura 24 – Criação do modelo de simulação.



Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Importação do Modelo 3D

No V-REP há alguns modelos de robôs em sua biblioteca, inclusive alguns modelos comerciais. Contudo, não há o Yaskawa Motoman HP20D, o manipulador robótico usado neste trabalho. Há no site do fabricante o modelo 3D arquivos em extensão STEP (*Standard for the Exchange of Product Data*) e IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) (YASKAWA, 2019), contudo nenhum deste formatos é compatível com o V-REP. Usou-se o FreeCAD (um modelador open source CAD paramétrico em 3D) para converter o modelo 3D para o formato OBJ (*Wavefront 3D Object File*), formato compatível com o V-REP. Além de OBJ, é possível importar objetos nas extensões DXF (*AutoCAD file format (Autodesk)*), em STL (ASCII or binary), COLLADA ou URDF.

3.1.2 Simplificação do Modelo 3D

Uma cena no V-REP pode conter diversos objetos e robôs. Quanto mais complexa a cena, maior será o esforço computacional gerado. Para reduzir este esforço, é indicado que os elementos usados, sejam simplificados. Os elementos nas cenas, são “vistos” pelo V-REP como uma malha de triângulos. A complexidade de cada elemento pode ser percebida pela sua quantidade de triângulos. Elementos com muitos triângulos podem tornar a simulação muito lenta, sendo assim, é preferível menores quantidades de triângulos. É recomendado um máximo de 20000 triângulos para cada elemento, podendo assumir valores maiores em caso de uma cena com poucos elementos (ROBOTICS, 2019a).

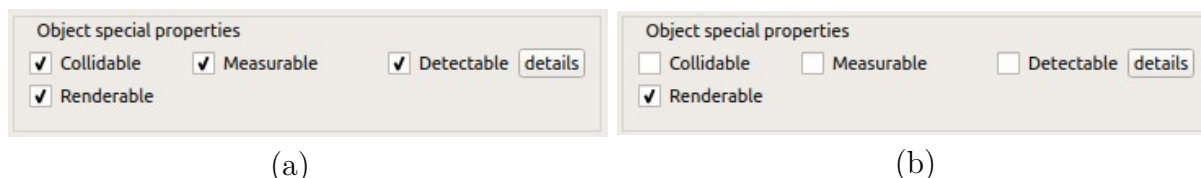
Os elementos do modelo 3D, usado neste trabalho, já estava separado por elos. Um elo pode ser composto por diversas peças. Em alguns casos, o modelo 3D pode não estar separado por elo, mas sim por peças (parafusos, elementos estruturais, elemento motriz, entre outros) do manipulador. Nestes casos, deve-se unir as peças pertencentes a cada elo. O V-REP tem funções para simplificar do modelo. A função *Decimate the mesh* reduz o número de triângulos mudando a geometria. Grandes reduções fará com que o objeto se torne irreconhecível. A função *Remove the inside of the mesh* permite a simplificação removendo o seu interior. A função *Extract the convex hull* transforma geometria em convexa, usada para criar o modelo dinâmico.

3.1.3 Criação do Modelo Visual e Dinâmico

Na criação de um modelo, há o modelo visual e o modelo dinâmico (ROBOTICS, 2019a). O modelo após a simplificação é o modelo visual. Em suas propriedades, este é somente renderizável, como mostrado na Figura 25 b. Neste modelo, usa-se a função *Extract the convex hull*, citada anteriormente, a qual transforma o objeto em geometria convexa com uma quantidade bem menor de triângulos. Apesar de visualmente ser bem diferente do modelo, este atende as necessidades da simulação com menor esforço computacional. As

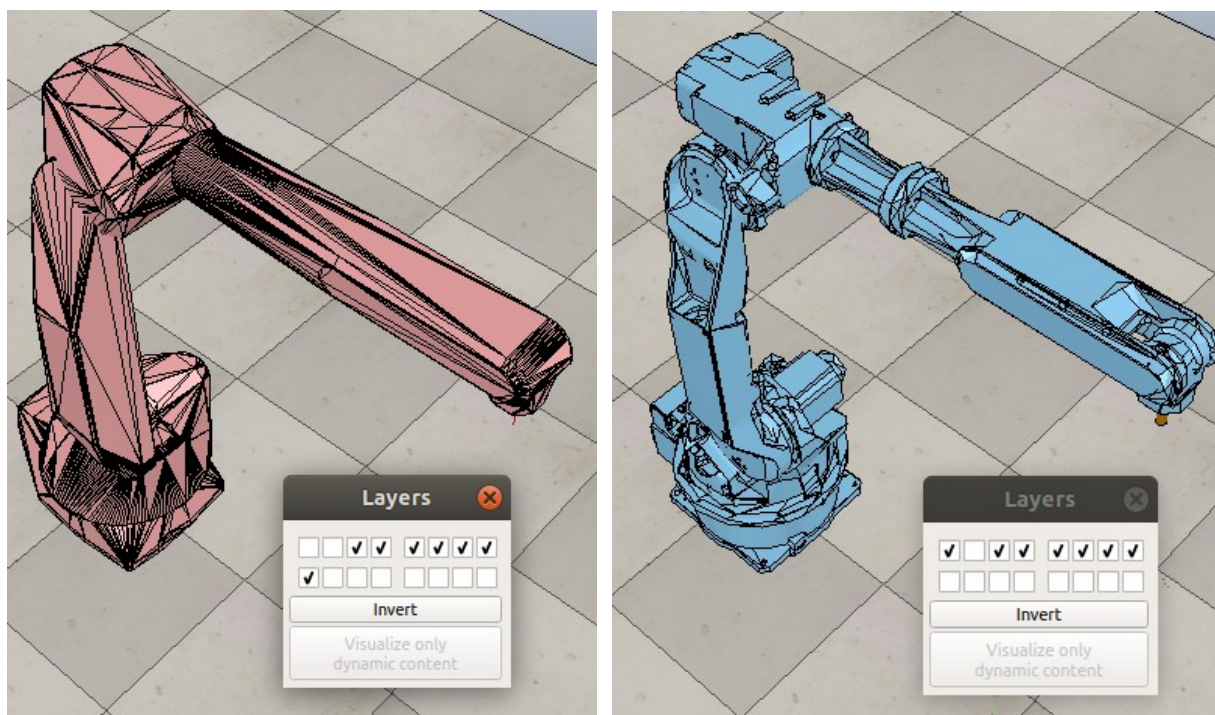
propriedades do modelo dinâmico podem ser vistas na Figura 25 a. Os modelos dinâmico e visual são mostrados nas Figuras 25 a e b, respectivamente. Os modelos ficam em camadas distintas (*layers*, no V-REP), sendo que, na simulação o modelo dinâmico não é visível.

Figura 25 – Propriedades do objeto: (a) modelo dinâmico (b) Modelo visual.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

Figura 26 – Modelo: (a) dinâmico (b) visual.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

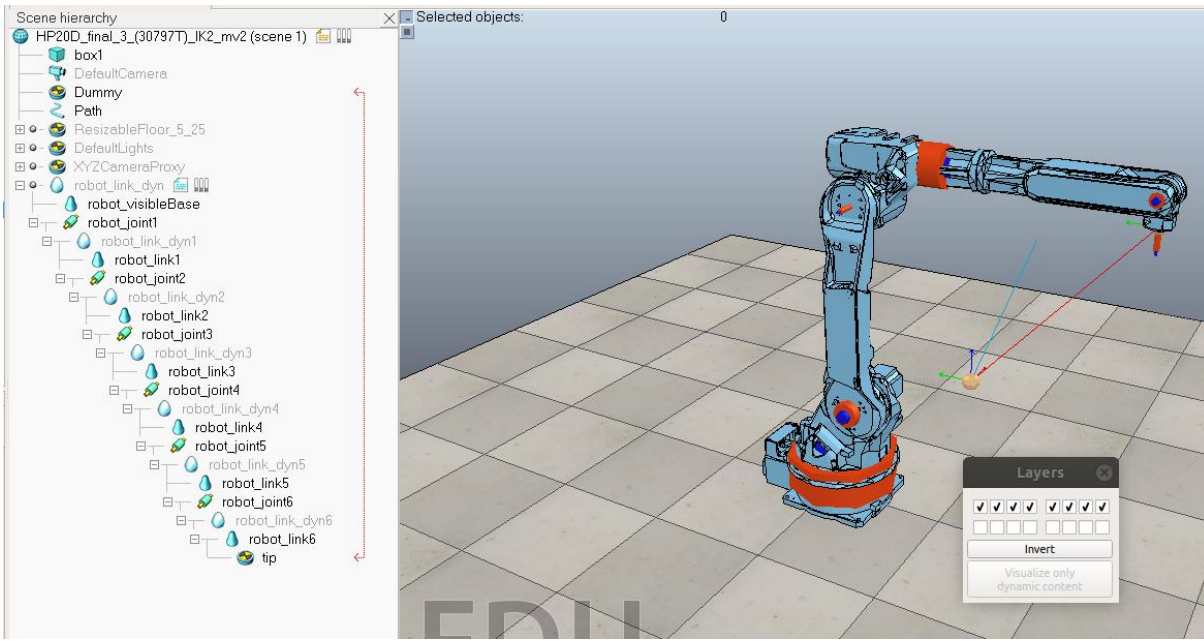
3.1.4 Criação e Posicionamento das Juntas e Criação da Hierarquia

No V-REP há três modelos de juntas, as de revolução, prismática e esférica. No manipulador robótico deste trabalho, todas as juntas são de revolução. Criam-se e posicionam-se as juntas, como mostrado na Figura 27, elas são os cilindros vermelhos.

Em seguida deve-se criar a hierarquia. A hierarquia é criada, pois a movimentação de um elo no espaço afeta a posição e orientação de outros elos, por exemplo, o manipulador deste trabalho possui 6 graus de liberdade (GDL) e 7 elos. Ao se movimentar o elo de

número 2, os elos de número 3 a 7, também se movimentarão. Essa relação é feita através da hierarquia. O modelo dinâmico e visual, de cada elo, devem ficar sempre juntos. A Figura 27 mostra a hierarquia do modelo finalizado.

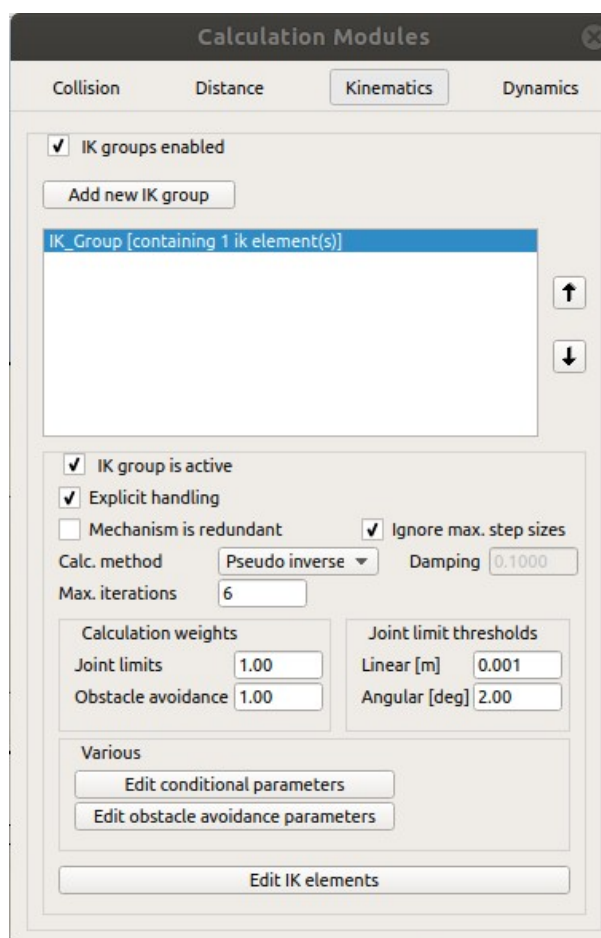
Figura 27 – Hierarquia e juntas do manipulador robótico.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

3.2 Cinemática Inversa

Na literatura há diversas soluções de cinemática inversa. Contudo, o V-REP possui uma função de cinemática inversa, como mostrado no manual do *software* (ROBOTICS, 2019b). Sendo assim, não será necessário implementar uma solução de cinemática inversa via *script*. Para usar esta função deve-se antes criar dois elementos *Dummy's*, que serão o *tip*, que será a posição e orientação do elemento terminal, e o *target*, que será a posição e orientação desejada para o elemento terminal. Ambos são mostrados na Figura 27. Em seguida deve-se selecionar os dois e usar a função *Link selected dummies* em (*Edit > Link selected dummies > IK, tip-target*). Após, cria-se a cinemática inversa (em *Calculation Modules > Kinematics > Add new IK (Inverse kinematics) Group*). Selecionando o *IK Group* criado, exibe-se os parâmetros usados no cálculo da cinemática inversa. Dentre os parâmetros há o método de cálculo (o V-REP possui dois métodos de cálculo para cinemática inversa, o *pseudo inverse* e o DLS), o número de iterações, além de outros parâmetros mostrados na Figura 28.

Figura 28 – Parâmetros do IK *group*.

Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

3.3 Programação do Manipulador Robótico

Usou-se diversas funções para realização das cenas mostradas nas seções 4.1 e 4.2. As funções usadas e suas respectivas descrições são mostradas na Tabela 1. A compreensão destas funções são importante para o entendimento do método usado na programação do manipulador robótico.

3.3.1 Planejamento de Trajetória e Movimento

Para determinar a localização e orientação de um ponto desejado como destino para o manipulador robótico no espaço ao se programar as cenas, utilizou-se um objeto nomeado de alvo, este é mostrado na Figura 29.

O V-REP possui funcionalidades de planejamento de trajetória e movimento usando o OMPL (*The Open Motion Planning Library*). Há algumas funções necessárias para utilização desta biblioteca (ROBOTICS, 2019c). No exemplo citado na seção 2.4.1, utiliza-se esta biblioteca e criam-se diversas funções para usá-las. A movimentação foi realizada

Tabela 1 – Funções usadas na programação do manipulador robótico.

sim.getObjectHandle(‘Nome do objeto’): Identifica o objeto. Função usada em todo objeto o qual se deseja manipular via *script*.

sim.getIkGroupHandle(‘Nome do Ik *Group*’): Identificar o IK *Group* a ser usado. Função usada para obter ângulos das juntas de um posição e orientação desejada e no planejamento de trajetória.

sim.getObjectMatrix(objeto,-1): Retorna a matriz de transformação de um objeto e -1 indica que é em coordenadas absolutas.

getMatrixShiftedAlongZ(m,d): Retorna a matriz de transformação, de uma matriz de transformação m, deslocada no eixo Z, a uma distância d.

getShiftedMatrix=function(m,(dx,dy,dz),direção): Retorna a matriz de transformação, de uma matriz de transformação m, deslocada a uma distância dx, dy e dz no eixo, X, Y, e Z, respectivamente.

sim.setObjectPosition(objeto,destino,d): Coloca um objeto em um posição de destino transladado a uma distância d.

findSeveralCollisionFreeConfigsAndCheckApproach(m,p,n): Calcula possíveis trajetórias as quais não haverá colisão para o ponto m. Tenta encontrar um total de n trajetórias em um limite máximo de p tentativas.

getConfig(): Retorna a posição e orientação atual do manipulador robótico.

findShortestPath(getConfig(),c,n): Retorna a menor trajetória dentre n trajetórias contidas em c.

generateIkPath(getConfig(),m,n): Retorna uma trajetória em linha reta evitando colisão da posição e orientação atual do manipulador robótico com n passos até a posição e orientação m desejada, caso haja.

getReversedPath(trajetória): Retorna o percurso inverso de uma trajetória.

followPath(trajetória): Função que permite o manipulador robótico seguir uma trajetória.

sim.getCollectionHandle(‘Coleção’): Identifica uma coleção criada. Cria-se coleções para identificar quais objetos não podem se colidir, por exemplo, neste trabalho criou-se duas coleções, uma com o manipulador robótico e outra com o restante dos objetos da cena, isto é, para que o manipulador não colida com nenhum objeto presente na cena.

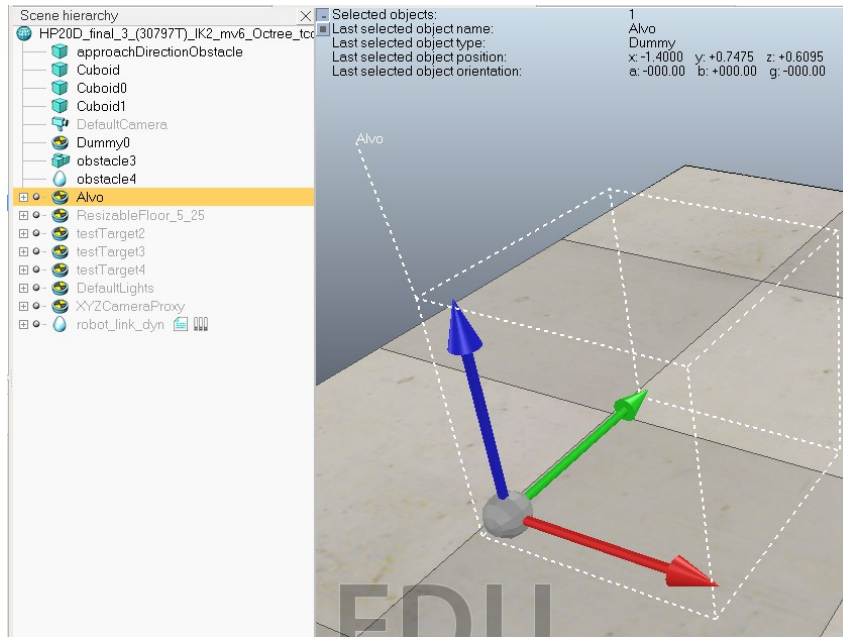
Fonte: Autoria própria.

usando as funções desse exemplo e a lógica de movimentação, de uma posição 1 (“pos1”) a uma posição 2 (“pos2”), se estrutura de acordo com a Figura 30.

3.3.2 Adição de Material

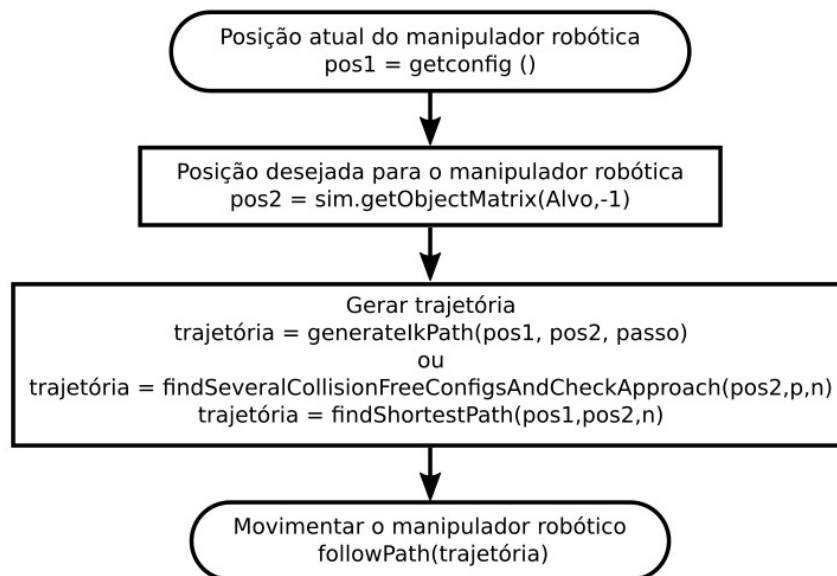
A adição de material se dá através da adição de voxels. No exemplo exposto na seção 2.4.2 utiliza-se a função para adicionar voxels (*sim.insertVoxelsIntoOctree*). No V-REP há a opção para adicionar o octree (*Add > octree*). No exemplo citado, ele cria uma função

Figura 29 – Alvo usado para determinar a localização e orientação de um determinado ponto no espaço.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

Figura 30 – Fluxograma para movimentação do manipulador robótico.



Fonte: Autoria própria.

para ativar a adição de voxels (*enableOctreeCreation*) na posição do elemento terminal do manipulador robótico e para desativar a adição de voxels (*disableOctreeCreation*). No exemplo da seção 2.4.2, cria-se uma função para gerar um degradê nas cores dos objetos criados com voxels. Utilizou-se esta função para que os cordões de solda de diferentes passes tivessem cores diferentes.

3.3.3 Exemplo Didático

Para melhor compreensão do método usado para se programar o robô, nesta subseção será criada uma cena de simulação em que o manipulador robótico realize um processo de soldagem com um único passe. Alvos devem ser colocados na posição e orientação do início (Alvo 1) e fim (Alvo 2) do cordão de solda, respectivamente. No menu do V-REP há as funções *object/item shift* e *object/item rotate* as quais é possível movimentar e rotacionar objetos nas cenas, respectivamente. A programa para esta cena será estruturada da seguinte forma:

- 1ª movimentação: O primeiro movimento a ser realizado pelo robô é de sua posição atual até o ponto de início da soldagem, ou seja, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 30, a posição atual do manipulador robótico será a pos1 e o ponto de início da solda será a pos2. Para se obter a posição e orientação atual do manipulador robótico (pos1), usa-se a função *getConfig()*, explicitada na Tabela 1. Para se obter a posição e orientação de início de solda, usa-se a função *sim.getObjectMatrix*(Alvo 1,-1). Para gerar a trajetória entre os pontos utiliza-se a função *findSeveralCollisionFreeConfigsAndCheckApproach* e *findShortestPath*. Em seguida usa-se a função *followPath* para realizar o movimento.
- 2ª movimentação: O segundo movimento a ser realizado pelo robô é de sua posição atual (Alvo 1) até o ponto de fim do cordão de solda, ou seja, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 30, a posição atual do manipulador robótico será a pos1 e o ponto de início da solda será a pos2. Para se obter a posição e orientação atual do manipulador robótico (pos1), usa-se a função *getConfig()*, explicitada na Tabela 1. Para se obter a posição e orientação do final da solda, usa-se a função *sim.getObjectMatrix*(Alvo 2,-1). Para gerar a trajetória entre os pontos utiliza-se a função *generateIkPath*(pos1,pos2,n). Em seguida usa-se a função *enableOctreeCreation* que inicia a deposição de voxels para representar o cordão de solda e *followPath* para realizar o movimento. A função *disableOctreeCreation* é utilizada em seguida para que no fim da movimentação do manipulador robótico, encerre a deposição de voxels.
- 3ª movimentação: O terceiro movimento a ser realizado pelo robô é de sua posição atual (Alvo 2) até a posição inicial do manipulador robótico, ou seja, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 30, a posição atual do manipulador robótico será a pos1 e a posição inicial do manipulador robótico será a pos2. Para se obter a posição e orientação atual do manipulador robótico (pos1), usa-se a função *getConfig()*, explicitada na Tabela 1. A posição inicial do manipulador robótico pode ser obtida de duas formas, criando um alvo coincidente com a posição inicial e usando a função *sim.getObjectMatrix*(Alvo inicial,-1) ou obtendo a posição orientação antes de

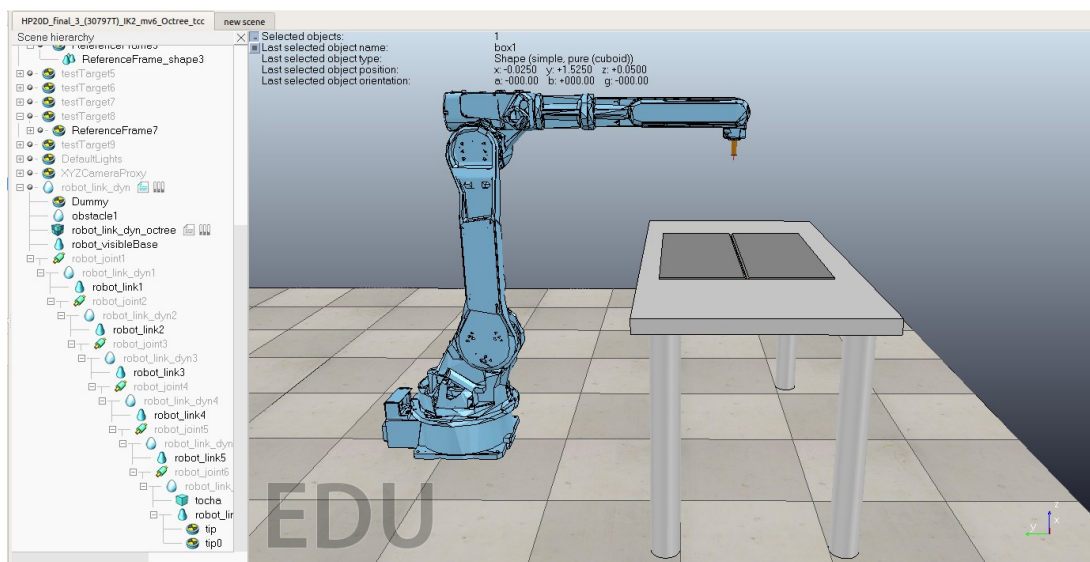
realizar o movimento e a salvando em uma variável. Para gerar a trajetória entre os pontos utiliza-se a função *generateIkPath*(pos1,pos2,n). Em seguida usa-se a função *followPath* para realizar o movimento.

Nas cenas criadas, o robô não se desloca do ponto inicial diretamente a ponto de início de soldagem. Ele se deslocado mais rápido da posição inicial até um ponto próximo ao de início de soldagem e mais devagar até a posição inicial de soldagem, isto é feito para um ganho de tempo. Para evitar a criação de mais um alvo, utiliza-se a função *getShiftedMatrix*, isto é, usa-se a função *sim.getObjectMatrix* a qual retorna a posição m do ponto de início de soldagem e em seguida usa-se a função para transladar o ponto m. Para a solda com diversos passes, o processo realizado foi feito de forma análoga, pois é necessário criar alvos somente no início e no final da solda do passe de raiz. Para os passes de preenchimento, usa-se a posição e orientação do alvo, só que transladado.

4 RESULTADOS

Após realizar todas as etapas da seção 3, elaborou-se o modelo virtual do manipulador robótico *Yaskawa Motoman* HP20D, mostrado na Figura 31. Em seguida, criaram-se algumas rotinas mostrando algumas aplicações do software. Essas aplicações¹ são expostas nas seções 4.1 e 4.2.

Figura 31 – Representação de um cenário com o modelo de simulação do Manipulador robótico *Yaskawa Motoman* HP20D preparado para uma operação de soldagem com junta de topo na posição 1G Plana.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

4.1 Soldagem de Duas Chapas de 1/4 de pol com Junta de Topo e Chanfro em V na Posição 1G Plana

Nesta cena² há o manipulador robótico, uma bancada e duas chapas de 1/4 pol, a serem soldadas com junta de topo e chanfro em V na posição 1G plana, como mostrado na Figura 31. Na cena, não foi implementado a máquina para solda, fios e a garra terra. Criou-se uma representação da tocha de soldagem, o cilindro marrom, melhor visualizado na Figura 32. A deposição de material ocorre a uma distância de aproximadamente 10

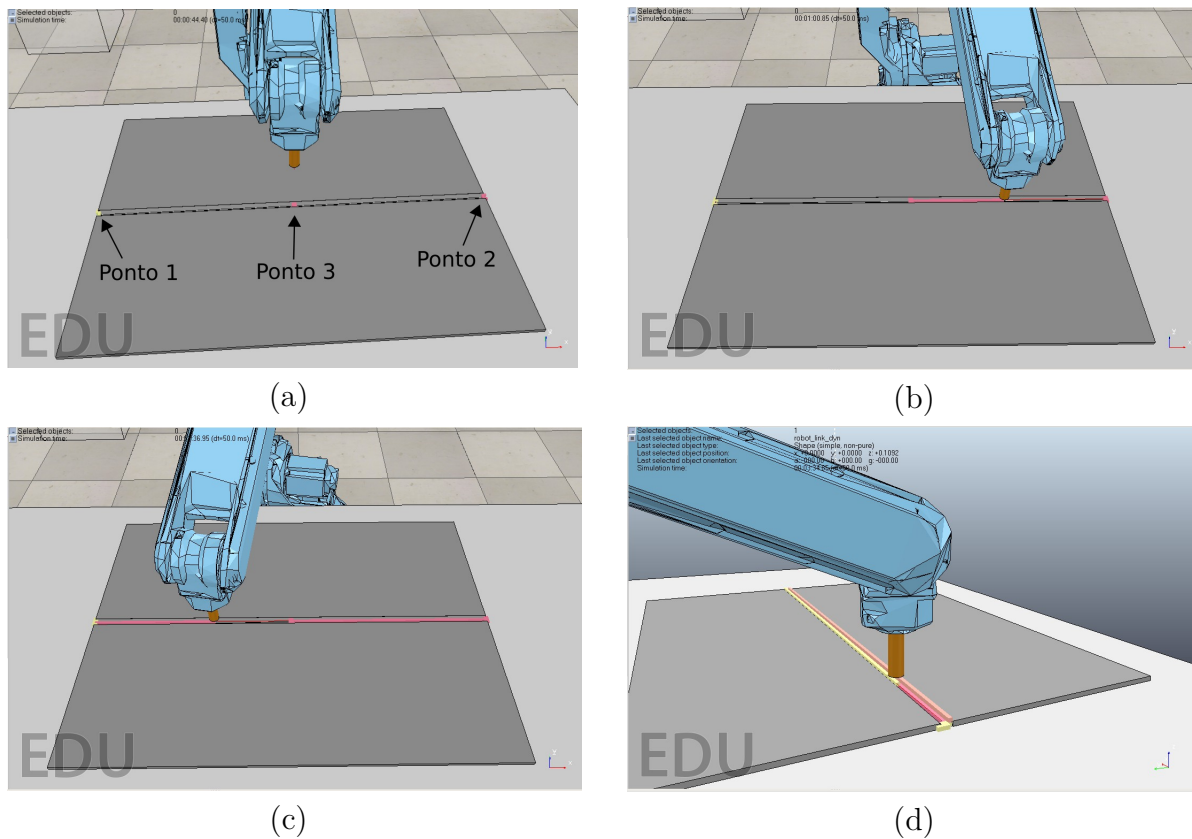
¹ As cenas estão disponíveis na nuvem através do link: <<https://drive.google.com/drive/folders/1ohEEGs-ess-z63SEIEuoQQ8pxViT8VIB?usp=sharing>>

² Para melhor visualização, o vídeo da cena Soldagem de Duas Chapas de 1/4 de pol com Junta de Topo e Chanfro em V na Posição 1G Plana está disponível no *youtube*: <<https://youtu.be/mTp5zi7xYz0>>

mm da tocha de soldagem, esta é DBCP. Esta deposição de material é feita através da adição de voxels, utilizando os octrees.

Algumas técnicas para minimizar distorções foram usadas. Inicialmente foi feito o ponteamto das chapas, um ponto de solda nas extremidades e em um ponto intermediário, como mostrado na Figura 32 (a). O passe de raiz foi feito em duas etapas. O primeiro cordão do passe de raiz foi feito do ponto no centro da chapa até uma extremidade e o segundo, da extremidade até o centro, como mostrado nas Figuras 32 (b) e (c), respectivamente. Em seguida, foram realizados mais dois passes, como mostrado na Figura 32 (d).

Figura 32 – Soldagem de Duas Chapas de 1/4 de pol com Junta de Topo e Chanfro em V na Posição 1G Plana: (a) Ponteamto (b) Primeiro passe de raiz (c) Segundo passe de raiz (d) Segundo passe de enchimento



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

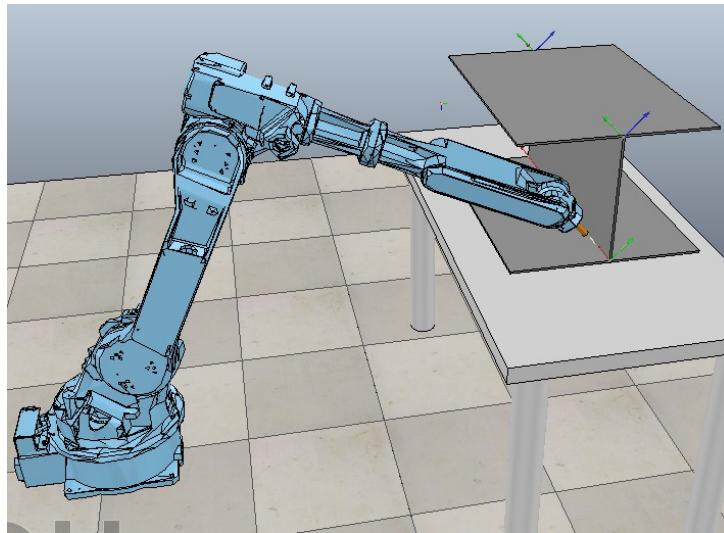
4.2 Soldagem de Perfil I na Posição 2F e 4F

O processo de soldagem que será simulado nesta seção, será a soldagem de um perfil I na posição 2F (horizontal) e 4F (sobrecabeça). A cena³ é mostrada na Figura 33. O que torna interessante este processo é a movimentação do manipulador robótico sem

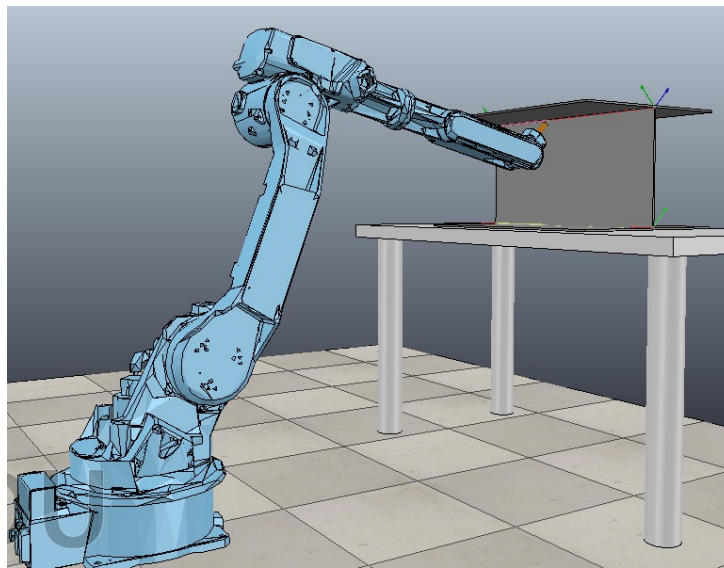
³ Para melhor visualização, o vídeo da cena Solda de Perfil I na Posição 2F e 4F está disponível no *youtube*: <<https://youtu.be/TsaT9T5lNac>>

se colidir com a peça a ser soldada. O processo se inicia com o manipulador robótico se aproximando da junta inferior a ser soldada, em uma das extremidades. Realiza a solda, afasta, aproxima da junta superior, na outra extremidade, realiza a solda e em seguida retorna para sua posição e orientação inicial.

Figura 33 – Solda em perfil I: (a) Solda de junta de ângulo na posição 2F (Horizontal)
(b) Solda de junta de ângulo na posição 4F (sobrecabeça)



(a)



(b)

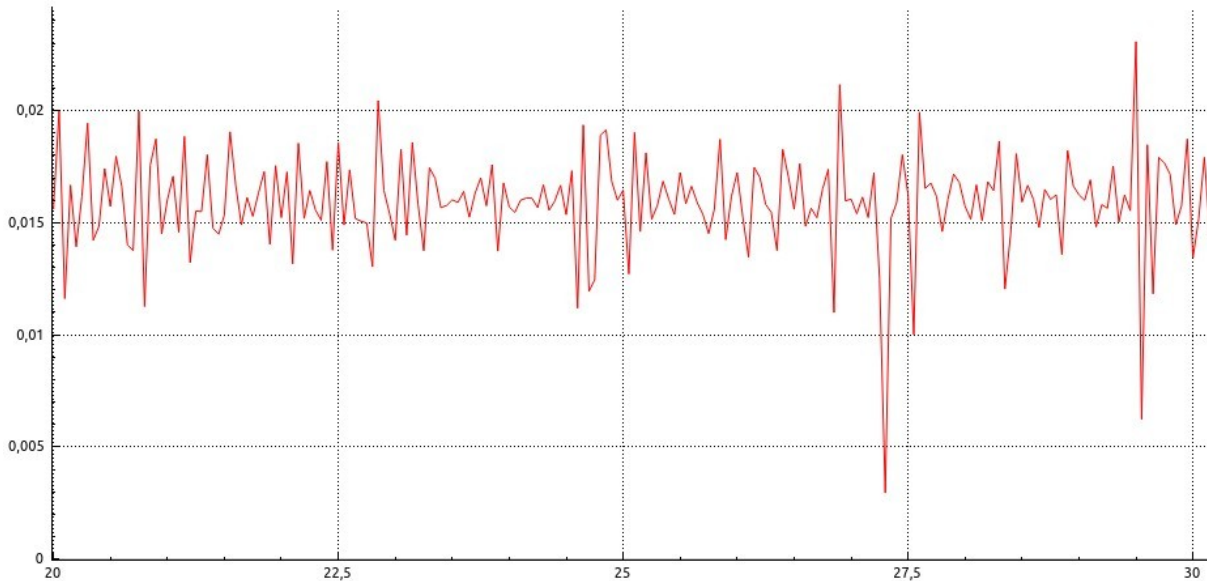
Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

4.3 Análise de Velocidade de Operação

Uma das limitações notadas nas cenas elaboradas é acerca da velocidade do manipulador robótico. Como exposto na seção 2.2, a velocidade da tocha é um parâmetro que tem grande influência no cordão de solda. A Figura 34 é um gráfico da velocidade, em

m/s, criado no V-REP do elemento terminal de um trecho do processo de soldagem da cena mostrada na seção 4.1. Nota-se nesta Figura que no código implementado não ocorre o controle preciso de velocidade como requisitado na soldagem. Isto ocorre pois no código a velocidade é dada pelo número de pontos da trajetória, acarretando em flutuações na velocidade, como percebido na Figura 34.

Figura 34 – Velocidade do elemento terminal no eixo das ordenadas, em m/s. Tempo da simulação no eixo das abcissas, em segundos.



Fonte: Captura de tela do V-REP no sistema operacional Ubuntu 18.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para implementação de um modelo de simulação do manipulador robótico *Yaskawa Motoman HP20D* no software V-REP. As cenas elaboradas representam processos de soldagem, um dos possíveis processos de fabricação capazes de serem realizados pelo manipulador robótico.

A partir dos resultados apresentados, percebe-se um pouco das possibilidades do software, tais como a possibilidade de implementar um manipulador robótico comercial não disponível em sua biblioteca, a de planejamento de trajetória as quais seriam realizadas pelo manipulador robótico e a de simulação de processos de fabricação.

Apesar das soldas serem retilíneas e com baixo nível de complexidade, a criação das trajetórias demandaram tempo e um esforço considerável. Sendo assim, conclui-se que é viável a elaboração de processos com manipuladores robóticos para fins acadêmicos ou em casos com elevada produção, como o da Figura 15, pois para casos com baixa produção, o processo realizado de forma manual, será mais rápido (somado o tempo do processo de soldagem com o tempo gasto para implementação do modelo de simulação) e com menor custo.

As trajetórias realizadas pelo manipulador robótico foram evitando colisão com os objetos nas cenas. Contudo, na prática pode ocorrer de haver objetos além dos criados nas cenas e dos objetos implementados estarem em posições descoincidentes no V-REP. Para sanar este problema, é possível o uso de sensores os quais permite o mapeamento de todo o ambiente em tempo real, como por exemplo, um sensor laser 3D.

5.1 Trabalhos Futuros

Sugere-se trabalhos futuros, com os possíveis temas:

- Adição da modelo real de uma tocha de soldagem.
- Controle de velocidade.
- Comunicação do software com o manipulador robótico, utilizando a arquitetura ROS *node*.
- Diferentes processos, por exemplo, usinagem (o V-REP possui função de remoção de material), movimentação de peças, entre outros.
- Ampliar a cena. Uso de outros robôs e equipamentos implementando o cenário exato do LAMAF.

- Teleoperação do manipulador robótico.

Referências

- ABB. ***ABB wins \$ 52 million robots order to boost manufacturing flexibility at Ford's newest China factory***. 2015. Disponível em: <<https://new.abb.com/news/detail/13892/abb-wins-52-million-robots-order-to-boost-manufacturing-flexibility-at-fords-newest-china-factory>>. Acesso em: 04 de novembro de 2019. Citado na página 36.
- ASIMOV, I. ***Eu, robô***. [S.l.]: Editora Gnome Press, 1950. Citado na página 25.
- COLLINS, D. ***Definition of 'voxel'***. 2019. Disponível em: <<https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/voxel>>. Acesso em: 02 de novembro de 2019. Citado na página 38.
- COPPELIA ROBOTICS. ***V-REP PRO EDU: Virtual Robot Experimentation Platform, Educational License. Versão: 3.6.2***. Zürich, SWI, 2019. Disponível em: <<http://www.coppeliarobotics.com/>>. Acesso em: 13 de novembro de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.
- CRAIG, J. J. ***Introduction to Robotics: Mechanics and Control***. 3. ed. São Paulo: Editora Pearson, 2005. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- GROOVER, M. P. ***Automação industrial e sistemas de manufatura***. 3. ed. São Paulo: Editora Pearson Brasil, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 37.
- HARLEY. ***Visão Computacional: Quadrees e Octrees***. 1998. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/visao/1998/harley/octree.htm>>. Acesso em: 02 de novembro de 2019. Citado na página 38.
- INFOSOLDA. ***Ensaio macrográfico***. 2019. Disponível em: <<https://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos-livros-senai/219-ensaio-macrografico>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2019. Citado na página 28.
- JAMES, M. ***Quadrees and Octrees***. 2018. Disponível em: <<https://www.i-programmer.info/programming/theory/1679-quadrees-and-octrees.html>>. Acesso em: 02 de novembro de 2019. Citado na página 38.
- LIMA, A. et al. ***Teleoperation of an ABB IRB 120 robotic manipulator and BarrettHand BH8-282 using a Geomagic Touch X haptic device and ROS***. In *Proceedings of the 2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, João Pessoa, p. 188–193, 2019. DOI: 10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00042. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- MACHADO, I. G. ***Soldagem & Técnicas Conexas: Processos***. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. Citado 5 vezes nas páginas 29, 30, 31, 32 e 33.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. ***Soldagem - fundamentos e tecnologia***. Minas Gerais: Editora UFMG, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 31 e 32.

PAN, Z. et al. **Automated Offline Programming for Robotic Welding System with High Degree of Freedoms**. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, v. 121, p. 685–692, 01 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-25541-0_86. Citado na página 43.

PEQUENAS EMPRESAS E GRANDES NEGÓCIOS. **Só 48% das indústrias brasileiras são '4.0', diz CNI**. 2019. Disponível em: <<https://revistapegn.globo.com/Empreendedorismo/noticia/2016/05/so-48-das-industrias-brasileiras-sao-40-diz-cni.html>>. Acesso em: 15 de novembro de 2019. Citado na página 25.

ROBOTICS, C. a. **Building a clean model tutorial**. 2019. Disponível em: <<http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/buildingAModelTutorial.htm>>. Acesso em: 29 de outubro de 2019. Citado na página 46.

ROBOTICS, C. b. **Inverse Kinematics Tutorial**. 2019. Disponível em: <<http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/inverseKinematicsTutorial.htm>>. Acesso em: 29 de outubro de 2019. Citado na página 48.

ROBOTICS, C. c. **Path and Motion Planning**. 2019. Disponível em: <<http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/pathAndMotionPlanningModules.htm>>. Acesso em: 29 de outubro de 2019. Citado na página 49.

ROHMER, E.; SINGH, S. P.; FREESE, M. V-rep: A versatile and scalable robot simulation framework. In: IEEE. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. [S.l.], 2013. p. 1321–1326. Citado na página 42.

ROMANO, V. F. **Robótica industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher, 2002. Citado na página 34.

ROSÁRIO, J. M. **Robótica Industrial I Modelagem, Utilização e Programação**. São Paulo: Editora Baraúna, 2010. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 25, 34, 36 e 37.

SANTI, A. de. **As Três Leis da Robótica**. 2019. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/cultura/as-tres-leis-da-robotica/>>. Acesso em: 15 de novembro de 2019. Citado na página 25.

WELDTEC. **Battery Powered Welding Carriage**. 2019. Disponível em: <<https://m.weldtec.com.vn/product/battery-powered-welding-carriage.html>>. Acesso em: 04 de novembro de 2019. Citado na página 35.

YASKAWA. **HP20D/HP20F/HP20F-CR7**. 2019. Disponível em: <http://www.motoman.lt/products/robots/product-view/?tx_catalogrobot_pi1%5Buid%5D=300&cHash=7e1cbba13da9b964605576daa6c0beba>. Acesso em: 18 de dezembro de 2019. Citado na página 46.

ZLAJPAH, L. **Simulation in robotics**. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 79, p. 879–897, 12 2008. DOI: 10.1016/j.matcom.2008.02.017. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 42.

Apêndices

APÊNDICE A – PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL DE CURSO

Tabela 2 – Dados do discente.

Matrícula/Nome	201202305 - Felipe Arantes Lobo
E-mail	felipe.arantes.lobo@gmail.com
Orientador	João Paulo da Silva Fonseca
Curso	Engenharia Mecânica
Tipo de Projeto (Art. 13, Inciso V):	Pesquisa aplicada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1 Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação do Yaskawa Motoman HP20D, um manipulador robótico comercial com 6 graus de liberdade (GDL) amplamente aplicado no meio industrial, usando o Virtual Robot Experimentation Platform (V-REP), uma plataforma de simulação bem reconhecida, e disponível de forma gratuita para fins acadêmico.

A.2 Objetivos

Os objetivos deste projeto são:

- Criar do modelo de simulação.
- Elaborar cenários com planejamento de trajetória e movimento do manipulador robótico.
- Implementar cenários de aplicação em manufatura (soldagem de chapas, montagem/desmontagem de peças).
- Realizar testes e efetuar ajustes necessários

A.3 Metodologia (Atividades a Serem Desenvolvidas).

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Estudo e familiarização com o software de desenvolvimento e simulação V-REP.

- Análise e adequação do modelo CAD 3D do manipulador robótico ao ambiente do V-REP.
- Simplificação do modelo 3D.
- Criação e posicionamento das juntas no software.
- Estudo e implementação da cinemática inversa do robô.
- Estudo e implementação do planejamento de trajetória e movimento, com desvio de obstáculos, via script utilizando a biblioteca OMPL.
- Definição de cenários para testes.
- Realização de testes e ajustes.

A.4 Resultados Esperados

Como resultados, esperam-se:

- Um modelo de simulação do manipulador Yaskawa Motoman 6 na plataforma V-REP.
- Apresentação de um método para desenvolvimento de modelos de manipuladores robóticos comerciais na plataforma V-REP.
- Implementação de cenários, em ambiente virtual, associados às funções do manipulador robótico em operações de manufatura (soldagem de chapas, montagem/desmontagem de peças)

A.5 Cronograma de Atividades

Na Tabela 1 é mostrado o Cronograma de Atividades.

Tabela 3 – Semestre letivo de 2019/2.

Etapas do Projeto	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Pesquisa Bibliográfica	X				
Desenvolvimento	X	X	X	X	
Análise dos Resultados	X	X	X	X	
Elaboração da Monografia			X	X	
Apresentação Projeto Final					X

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – FORMULÁRIO DE METADADOS PARA DISPONIBILIZAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BDTD/UFG

Graduação

Mestrado

Doutorado

	Modelando um robô comercial de 6 GDL usando o V-REP (Virtual Experimentation Platform)
Título em outro idioma:	Modeling a comercial robot with 6 DOF using the V-REP (Virtual Experimentation Platform)
Data da defesa:	12/12/2019

Possui agência de fomento?	<input type="checkbox"/> Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não	Sigla:	
Título do trabalho:			