



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Engenharia Mecânica

Trabalho de Conclusão do Curso

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Apresentada por:

Bruno Rodrigues
Bruno de Sousa
Frederico Garcia
Leandro S O Nozela
Victor V. Rezende

Orientador:

Prof. Marco Reis, M.Eng.

Co-orientador:

João Lucas da Hora

Dezembro de 2019

Bruno Rodrigues
Bruno de Sousa
Frederico Garcia
Leandro S O Nozela
Victor V. Rezende

Desenvolvimento do robô de inspeção.

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada
ao , Curso de Engenharia Mecânica do Centro
Universitário SENAI CIMATEC, como requi-
sito parcial para a obtenção do título de **Ba-
charel em Engenharia.**

Área de conhecimento: Interdisciplinar
Orientador: Prof. Marco Reis, M.Eng.

Salvador
Centro Universitário SENAI CIMATEC
2016

Agradecimentos

Resumo

Palavras-chave: Robô de Inspeção, Linhas de Transmissão, Navegação, Cinemática Inversa, Manipuladores

Abstract

Keywords: Inspection Robot,Transmission Lines,Navigation,Inverse Kinematics,Manipulators

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
1.2	Justificativa	2
1.3	Organização do Trabalho de Conclusão do Curso	4
2	Fundamentação Teórica	6
2.1	Didática	6
2.1.1	Pedagogia Tradicional	6
2.1.2	Pedagogia Renovada	7
2.1.3	Pedagogia Tecnicista	8
2.1.4	Pedagogia Crítica	9
2.2	Didática na Sociedade Contemporânea	10
2.2.1	Ensino de Novas Tecnologias	10
2.2.2	Movimento STEM	11
2.3	Robótica Educacional	11
2.3.1	Project-based learning (PBL)	12
2.3.2	Collaborative Learning ou team based learning (TBL)	13
2.3.3	DIY - Do It Yourself	14
2.3.4	Movimento Maker	14
2.4	O que é um Robô	15
2.4.1	Percepção	17
2.4.2	Áreas de Atuação	20
3	Metodologia	23
3.1	Conceituação	25
3.2	<i>Design</i>	25
3.3	Desenvolvimento	26
3.3.1	Validação das ferramentas	26
3.3.2	Movimentação simulada/em simulação	27
3.3.3	Teste com dispositivos físicos e Movimentação física	27
3.3.4	Desenvolvimento de serviços para <i>framework</i> e rotina para ultrapassagem	27
3.4	Operacionalização	28
4	Desenvolvimento e testes	29
4.1	Análise das Funcionalidades	29
4.1.1	Atuação	31
4.1.2	Planejamento de Movimento	32
4.1.3	Gerenciamento de Energia	33
4.1.4	Checagem da Integridade do Sistema	34
4.2	Estudo da Movimentação	35
4.3	Soluções Mecatrônicas para o sistema robótico	36
4.3.1	Escolha a biblioteca de controladores no <i>ROS</i>	37
4.3.2	Solução para cinematática	37

4.3.3	Gerenciamento de Energia	38
4.4	Simulação	39
4.4.1	Simulação para a rotina de ultrapassagem	40
4.5	Testes de Movimentação Física	40
4.5.1	Testes unitários	41
4.5.2	Testes na linha de transmissão	41
4.6	Integração com os subsistemas	42
4.6.1	Teste dos servomotores em rede	42
4.6.2	Teste de movimentação alimentada por banco de baterias	43
4.7	Análise Preliminar	44
5	Conclusão	45
Referências		47

Lista de Tabelas

4.1	Medições de tensão para o <i>hardware</i> de <i>Power Management</i>	39
4.2	Sentido de giro dos motores (Cabo de sincronização direto)	41
4.3	Sentido de giro dos motores (Cabo de sincronização cruzado)	41

Lista de Figuras

1.1	Instalação típica de uma linha de transmissão	3
1.2	Inspeção em linhas de transmissão por veículos aéreos tripulados.	4
2.1	ASIMO	16
2.2	Componentes e controle de robôs	17
2.3	Visão da câmera - Piloto automático	18
2.4	Mapa topológico de um layout de escritório	19
2.5	Grade regular	20
3.1	Fluxograma de desenvolvimento	23
4.1	<i>QFD</i> 2	30
4.2	Arquitetura geral do sistema de movimentação	31
4.3	Fluxograma da funcionalidade de Atuação	32
4.4	Fluxograma da funcionalidade de Planejamento de Movimento	33
4.5	Fluxograma da funcionalidade de Checagem da Integridade do Sistema . .	35
4.6	Visualização do obstáculo no simulador	36
4.7	Robo <i>ELIR</i> no visualizador do <i>ROS</i> com garras abertas	36
4.8	Robo <i>ELIR</i> no <i>Gazebo</i> com garras abertas	40
4.9	Foto do robô na posição que demanda maior torque	43

Lista de Siglas

ELIR	<i>Electrical Inspection Robot</i>
URDF	<i>Universal Robot Description Format</i>
ROS	<i>Robotic Operation System</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
SOTA	<i>State of the Art</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Introdução

”Faça ou não faça, tentativa não há.”

(Mestre Yoda)

(??) O Brasil apresenta uma matriz energética diferente da do resto do mundo, onde as fontes renováveis representam uma grande parte da geração da energia. Segundo a (??), em 2016, a matriz energética mundial contava com somente 14,1% da matriz energética constituída por fontes renováveis, enquanto o brasil já apresentava 82% da sua matriz vinda de fontes renováveis, onde a geração hidrelétrica corresponde a 70% dessa geração.

A expectativa é de que a energia hidrelétrica continue sendo cada vez mais utilizada no país, devido ao crescimento previsto da demanda energética brasileira, onde segundo o (??) o consumo atual é de 405 TWh e a demanda esperada em 2030 é de 950 e 1.250 TWh/ano (??). Mesmo com a grande participação da geração hidrelétrica , somente 23% dos 260 GW totais de potencial hidrelétrico são aproveitados (??).

A concentração de demanda energética no Brasil está concentrada principalmente na região Sudeste devido a densidade populacional e elevada industrialização, isso faz com que dois terços do total da capacidade instalada estejam localizadas na Bacia do Rio Paraná que é a bacia mais próxima da região, enquanto as bacias com potencial menos aproveitado são as localizadas no norte e nordeste do país (??).

Com desenvolvimento do país é esperado um aumento na demanda de energia elétrica e consequentemente um aumento na geração de energia hidrelétrica, isso faz com que seja esperado um crescimento considerável na quantidade das linhas de transmissão, de acordo com (??), em setembro de 2018 o sistema elétrico brasileiro já atingiu 144.828 km de linhas de transmissão. Esse aumento na quantidade de linhas tende a ser amplificado pela tendência à exploração da geração de energia na região Norte, assim sendo necessário a construção de novas linhas para distribuir essa energia para as outras partes do País.

Quanto mais linhas de transmissão e maiores distâncias entre os centros geradores, maiores tendem a ser as perdas. Isso faz com que seja necessária um controle da qualidade dessa transmissão, o que se dá por meio de inspeções. A estrutura já existente apresenta precariedade em alguns aspectos, onde segundo (??) “no Brasil, há uma quantidade

considerável de linhas de transmissão que já ultrapassou os 40 anos de idade. Com o envelhecimento das linhas de transmissão, a manutenção preventiva é um fator de extrema relevância para garantir o perfeito funcionamento dos sistemas.” A necessidade da constante manutenção e a alta periculosidade que os operadores são expostos faz com novas alternativas e tecnologias sejam aplicadas para a manutenção, o uso de Drones pilotados remotamente, com câmeras e sensores já é uma realidade em alguns países do mundo. O desenvolvimento de um robô próprio para inspeção de linha configura uma dessas novas alternativas, e possibilita uma expansão dos horizontes para as tecnologias aplicadas.

1.1 *Objetivos*

O objetivo do trabalho é implementar o sistema de movimentação do robô ELIR (*Electrical Line Inspection Robot*). Onde esse sistema é complementar aos outros existentes no robô, onde o conjunto dessas soluções busca fundamentar a implementação de uma Inspeção autônoma da linha.

1.1.1 *Objetivos Específicos*

Para o desenvolvimento do sistema é necessário realizar o estudo da movimentação, gestão de energia, controle e elaboração de trajetória para sistemas robóticos. A operação na linha faz com que seja necessário a gestão de energia do robô, assim como a integração com os outros subsistemas já desenvolvidos. De forma a garantir a operação na linha, os dispositivos e ferramentas utilizadas devem estar integradas no ROS (*Robot Operating System*), onde é necessário também a integração com outros pacotes já desenvolvidos para o Robô.

1.2 *Justificativa*

Tendo em vista a crescente demanda de energia elétrica do país bem como a previsão , a necessidade de um processo confiável de transmissão se torna amplamente necessário, afinal, diversas unidades consumidoras são alimentadas diariamente, além de instalações que exercem atividades críticas, como hospitais. As unidades geradoras de energia elétrica se encontram em regiões distantes de seus consumidores finais, portanto se faz necessário a utilização de linhas de transmissão de energia elétrica.

Uma linha de transmissão é uma linha composta por cabos condutores de energia

elétrica, utilizada para a transmissão de energia em alta tensão, saindo da origem geradora e indo até às cargas consumidoras.

A garantia da distribuição em condições favoráveis se dá pela confiabilidade das linhas de transmissão e os procedimentos de manutenção aplicados à elas, para isso, é realizada constantemente a rotina de inspeção nas linhas. A rotina de inspeção, se dá através da análise da integridade da estrutura das torres, a condição em que se encontram os isoladoras e as conexões das linhas de transmissão, uma vez que o tempo e a exposição a umidade e ao sol, além de diversos eventos climáticos, fazem com diversas falhas referentes ao desgaste do material venham a aparecer.

Estas análises têm como principal objetivo a detecção de eventuais pontos de ruptura. Outro meio para a localização dos eventuais pontos de ruptura se dá pelo uso de câmeras térmicas, onde existe o aumento da temperatura pontual devido à elevação na resistência elétrica.



Figura 1.1: Instalação típica de uma linha de transmissão

Fonte: (??)

Segundo (??), as rotinas de inspeção de linhas de transmissão se dão principalmente por dois métodos: inspeções por aeronaves e inspeções terrestres. A inspeção realizada por aeronaves, se dá tipicamente com o uso de helicópteros, que executam voos em baixa altitude, extremamente próximos das linhas de transmissão.

Em alguns casos as condições climáticas podem dificultar o procedimento de inspeção e controle da aeronave, além do risco inerente da atividade para os tripulantes, principalmente devido ao fato de que as aeronaves tipicamente operam na região de “homem-morto”, uma zona de altura que representa perigo para os operadores a bordo das aeronaves em caso de uma queda.

A inspeção por vias terrestres possui uma grande dificuldade devido à dependência



Figura 1.2: Inspeção em linhas de transmissão por veículos aéreos tripulados.

Fonte: (??)

do terreno do local, o qual pode ser de difícil acesso devido às características geográficas. Diversos fatores tornam a inspeção de linhas de transmissão um procedimento não só perigoso, mas também altamente custoso.

Segundo (??) as principais desvantagens dos meios convencionais de inspeção de linhas de transmissão são os riscos de acidentes, devido a periculosidade do procedimento de inspeção; o alto custo, uma vez que é necessário a locação e deslocamento de equipamentos específicos para o transporte e inspeção das linhas de transmissão; a alta dependência das condições climáticas e geográficas, uma vez que se torna muito difícil realizar rotinas de inspeção em tempos chuvosos ou em locais de difícil acesso.

Outra grande desvantagem dos procedimentos de inspeção definida por (??) é justamente a necessidade de uma mão de obra qualificada para realização destes procedimentos. Se estes procedimentos de inspeção de linha de transmissão fossem realizados em linhas desenergizadas, o processo seria bem mais simples e rápido, porém existem diversos problemas atrelados ao fato de que existem inúmeras cargas consumidoras que necessitam da energia elétrica gerada.

1.3 Organização do Trabalho de Conclusão do Curso

O documento está organizado em cinco capítulos, seguindo a seguinte estrutura:

Capítulo 1 - Introdução: Faz a contextualização do âmbito no qual a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a problemática, objetivos e como este projeto Theoprax de conclusão de curso está estruturado

Capítulo 2 - Referencial Teórico: Apresenta a base teórica necessária para o desenvolvimento do projeto.

Capítulo 3 - Metodologia: Define o método adotado para o desenvolvimento do projeto, explicitando seu fluxo de atividades e premissas necessárias para aplicar a

metodologia.

Capítulo 4 - Desenvolvimento: Exibe os procedimentos realizados e resultados obtidos através de testes, unitários e integrados, durante o desenvolvimento do projeto.

Capítulo 5 - Conclusão: Apresenta as conclusões, contribuições e algumas sugestões de atividades de pesquisa a serem desenvolvidas futuramente.

Fundamentação Teórica

2.1 Didática

Por muito tempo, segundo ([SAVIANI, 2011](#)), nas sociedades antigas e medievais, a educação era obtida pela maioria das pessoas através do trabalho, sendo a escola apenas um complemento secundário disponível a grupos seletos da elite. A partir do surgimento da sociedade capitalista e seus processos mercantis que os trabalhadores passaram a precisar de conhecimentos que não se voltavam apenas a técnicas de trabalho manual como cultivo da terra, mas também a relações mercantis e acumulação de capital, ao qual inclui instrumentos de trabalho e, posteriormente, moeda, marcando o início da idade moderna e avanço da ciência.

De acordo com ([LARCHERT, 2010](#)), o estudo da didática suma nasceu somente em meados do século XVII, a partir dos estudos pioneiros realizados por Jan Amos Komenský (em latim: Comenius; em português: Comênio), que é considerado pai da didática moderna. Em sua principal obra: *Didática Magna*, Comenius reuniu os conhecimentos sobre o tema e propôs pela primeira vez um modelo revolucionário de ensino em que os conhecimentos científicos são passados não pela imposição característica da época, mas sim pela satisfação e alegria de ensinar e aprender, segundo ([GASPARIN, 2011](#)). A partir de então, a didática, pedagogia e os modelos de escola passaram a ser ponto de estudo enfatizando a maneira de organizar o ensino e moldada de acordo com as necessidades, exigências e transformações da sociedade ao longo dos anos.

A pedagogia pode ser classificada em quatro diferentes escolas: Tradicional, Renovada, Tecnicista e Crítica. ([LARCHERT, 2010](#)) justifica essa classificação de acordo com as características de cada elemento na estrutura didática utilizada, como exposto a seguir.

2.1.1 Pedagogia Tradicional

Do século XVII ao século XIX a didática ficou conhecida como didática tradicional, que se caracteriza por acentuar o ensino humanístico, onde os conteúdos, os procedimentos didáticos e a relação professor-aluno não têm nenhuma relação com o cotidiano do aluno e muito menos com as realidades sociais. Há a predominância da palavra do professor, das regras impostas e do cultivo exclusivamente intelectual ([LIBÂNEO, 2006](#)). Segundo ([LARCHERT, 2010](#)), sua estrutura organizacional é baseada da seguinte forma:

- ”Homem: compreendido a partir dos ideais de igualdade e liberdade pautados na política liberal.
- Conhecimento: a ciência é a única fonte de conhecimento verdadeiro. O conhecimento enciclopédico é transmitido de uma geração para outra;
- Escola: a instituição responsável em preparar os indivíduos para o desempenho dos papéis sociais. Deverá educar para as normas vigentes da sociedade através do desenvolvimento das aptidões individuais, garantindo o preparo intelectual e moral dos alunos;
- Método de ensino: instrução organizada na exposição verbal do professor, provocando o acúmulo de conteúdos:
 - 1º) apresentação da matéria nova de forma clara e completa; 2º) associação entre os conteúdos antigos e os novos; 3º) sistematização e generalização dos conteúdos; 4º) aplicação de exercícios e testes;
- Professor: é o arquiteto da mente, o dono do saber, a autoridade maior responsável pelo ensino, centro do processo educativo;
- Aluno: receptor dos conteúdos transmitidos e do método aplicado;
- Ensino: propedêutico, sustentado nas cátedras, organizado basicamente pela oratória do professor e pela aula expositiva, entendido como a “arte de ensinar” e toda ênfase está na teoria;
- Aprendizagem: memorização de conteúdos, acúmulo de saberes transmitidos pelo professor e repetidos nos livros;
- Avaliação da aprendizagem: individual, oral ou escrita”.

Essa pedagogia dominou o Brasil até a década de 1930, mas ainda pode ser visto no cenário atual.

2.1.2 *Pedagogia Renovada*

A partir da segunda metade do século XX, estudiosos desenvolveram a ideia de que a aprendizagem verdadeira é aquela que nasce dos aspectos sociais, emocionais e cognitivos do aluno, não considerando o ensino como um processo de transmissão, pelo professor aos alunos, de conteúdos prontos, mas uma facilitação da aprendizagem, com o professor na função de estimular o aprendiz a aprender ([LARCHERT, 2010](#)). Ela acentua, igualmente, o sentido da cultura como desenvolvimento das aptidões individuais, mas a educação é um processo interno, não externo; ela parte das necessidades e interesses individuais necessários para a adaptação ao meio ([LIBÂNEO, 2006](#)).

Sua estrutura organizacional é baseada da seguinte forma, segundo ([LARCHERT, 2010](#)):

- ”Homem: compreendido a partir da sua existência, indivíduo único no mundo, vive e interage em um mundo dinâmico;
- Conhecimento: produto da existência e da experiência que deverá ser compreendido e socializado;
- Escola: instituição organizadora e articuladora entre as estruturas cognitivas do indivíduo e as estruturas do meio ambiente;
- Método de ensino: aprender experimentando, aprender a aprender;
- Professor: facilitador da aprendizagem e do desenvolvimento humano;
- Aluno: o aprendiz é o centro do processo educativo;
- Ensino: orientação individual para o aprender fazendo, através de experimentação, pesquisas, dinâmicas de grupo e oficinas;
- Aprendizagem: atividade de descoberta, autoaprendizagem;
- Avaliação da aprendizagem: autoavaliação”.

2.1.3 *Pedagogia Tecnicista*

No Brasil, entre 1950 e 1970, ocorre o desenvolvimento industrial e tecnológico, cenário propício para o desenvolvimento do tecnicismo educacional, inspirado nas teorias behavioristas, cujas unidades de análises são respostas e estímulos. O indivíduo, motivado por estímulos planejados com rigor, responderá satisfatoriamente aos comandos propostos. Esta abordagem atende às exigências da sociedade capitalista, industrial e tecnológica, pois, para a sua sobrevivência, a massa de trabalhadores precisa de objetivos rigorosamente planejados, executados e controlados ([LARCHERT, 2010](#)). O autor baseia a estrutura organizacional da seguinte forma:

- ”Homem: produto do meio social;
- Conhecimento: resultado da experiência planejada, baseada nos princípios científicos;
- Escola: responsável por qualificar mão de obra para o mercado de trabalho;
- Método de ensino: processo de condicionamento através do estímulo – resposta;
- Professor: especialista de uma determinada área é um técnico capacitado para reproduzir com os alunos as dinâmicas aprendidas;

- Aluno: tem o papel de receber, fixar e repetir as técnicas e seus conteúdos;
- Ensino: diretivo e instrução programada;
- Aprendizagem: fixação do programa aplicado, dos conteúdos decorados e da repetição da técnica;
- Avaliação da aprendizagem: verificação dos resultados dos objetivos propostos”.

2.1.4 *Pedagogia Crítica*

A partir de meados da década de 70, a sociedade brasileira passou a ter uma visão crítica acentuada quanto ao cenário político autoritário, levando esse pensamento crítico a contestar diversas áreas, incluindo o modelo didático utilizado. De acordo com ([MARTINS, 1997](#)), essas discussões deram origem a uma didática que traz como princípio norteador a abordagem crítica da educação, influencia o potencial social dos alunos e professores através de debates, diálogos críticos e considera o ensino nas suas múltiplas dimensões: social, afetivo, cognitivo, motor e político. Estudos como Paulo Freire ganharam espaço com proposições de um ensino mais dinâmico e menos alienado, voltado para a libertação do homem. Para ([FREIRE, 2001](#)), o diálogo aberto, igualitário e ativo em todos os interlocutores é o principal caminho para a real comunicação, sendo o único capaz de dissipar e gerar conhecimento com eficácia.

De acordo com ([LARCHERT, 2010](#)), sua estrutura organizacional é baseada da seguinte forma:

- ”Homem: cidadão e agente de transformação social;
- Conhecimento: socialmente referenciado, reflexivo e crítico;
- Escola: construtora de conhecimento crítico que busca a transformação social;
- Método de ensino: dialético, parte da experiência do aluno e do professor, confrontando-a com o saber sistematizado, pautado na dialogicidade, o diálogo como produtor de conhecimento e de emancipação do cidadão;
- Professor: mediador, orientador e agente de mudança social;
- Aluno: aprendiz participativo e crítico;
- Ensino: organização de experiências destacando os conhecimentos da ciência para explicá-las criticamente;
- Aprendizagem: desenvolvimento de estruturas cognitivas e sociais para a emancipação do aluno e do professor;
- Avaliação da aprendizagem: avaliar para mudar; autoavaliação”.

2.2 Didática na Sociedade Contemporânea

A Didática, de acordo com as definições de (LIBÂNEO, 2006), é uma das disciplinas da pedagogia, sendo responsável por estudar e investigar, teórica e praticamente, os objetivos, conteúdos, meios e as condições do processo de ensino, a fim de educar o indivíduo no âmbito social. Por ser dependente da sociedade ao qual o indivíduo está inserido, os modelos didáticos estão em constante transformação para adequar a educação ao modelo social vigente em cada época. No entanto, segundo (AL-MUFTI, 1997), os modelos atuais de educação não estão atendendo ao rápido crescimento demográfico e tecnológico do século XXI, sendo necessário uma adequação mundial a uma sociedade globalizada, tecnológica e superpovoada.

O perfil de aluno contemporâneo é de um indivíduo que cresce em um ambiente sem fronteiras onde parece não haver limites para a velocidade na troca de informações, que ocorre em tempo real, e onde a internet permite obter qualquer tipo de informação na palma das mãos e de onde estiver. Qualquer questão pode ser respondida com uma simples pergunta no Google, transferindo a fonte de aprendizado e modificando o papel da escola.

Para atender ao perfil deste aluno é preciso ensiná-lo a buscar o próprio conhecimento através de informações corretas, guiá-lo em meio a infinidade de informação equivocada que ele pode encontrar na web. Parte dessa adequação se passa por abdicar dos modelos didáticos defasados que ainda persistem em dominar as escolas ao longo do globo, incluindo o Brasil, onde existem vestígios do sistema tradicional; e preparar o aluno para se adequar às transformações cada vez mais frequentes do século XXI. Por isso é cada vez mais coerente pensamentos como o de (FREIRE, 2001), no qual diz que estamos numa sociedade em transição precisando romper com o mal da alienação e investir numa educação crítica que adapta e integra o homem ao mundo invés de acomodá-lo e transformá-lo.

2.2.1 Ensino de Novas Tecnologias

Na sociedade do século XXI, de acordo com (BENITTI, 2009), as pessoas estão imersas desde a infância em ambientes com infinidade de informações, de tecnologia avançada e dinâmica que ultrapassam os limites dos laboratórios e englobam as casas, carros, celulares, computadores e todo o entorno, sendo muito utilizada, mas pouco conhecida pela maioria da população. Este cenário tem expectativa de severidade maior com o desenvolvimento da tecnologia, a chegada da indústria 4.0 e internet das coisas, sendo necessário uma revolução no sistema de ensino para adequar o homem às atividades e profissões do futuro.

Uma forma de viabilizar isso é através da robótica educativa, na qual o aluno é estimulado a desenvolver a sua criatividade, senso crítico, capacidade de elaborar hipóteses, investigar soluções, tirar conclusões e resolver problemas enquanto cria afinidade com conceitos que estão inseridos no seu cotidiano, mas passam despercebidos por boa parte das pessoas. Para tal utiliza-se de softwares didáticos, kits intuitivos e metodologias de ensino baseadas na pedagogia-crítica, onde o aluno é participativo e livre, enquanto o professor é um mediador do conhecimento. Essas metodologias valorizam o trabalho em equipe e desenvolvem a busca própria de aprendizado por mera curiosidade e prazer através de desafios e metodologias DIY (do inglês: Do It Yourself; em português: faça você mesmo) e STEAM (do inglês: science, technology, engineering and Mathematics; em português: ciência, tecnologia, engenharia e matemática), como pode ser visto nos principais kits de ensino de robótica do mercado, por exemplo: Modelix Robotics, Robomind, Mini Maker, Mini Bots e Lego.

2.2.2 *Movimento STEM*

De acordo com ([PUGLIESE, 2018](#)), STEM education (ou educação STEM, em português) não é exatamente uma metodologia de ensino, mas sim um movimento, resultado de uma transformação maior que muitos sistemas educacionais vêm passando globalmente, decorrente da revolução tecnológica e consequente necessidade de inovação nos modelos de ensino. Este movimento nasceu na década de 1990, quando estudos indicavam que os estados unidos estavam caminhando para um colapso empregatício e econômico somados à escassez de profissionais qualificados nas áreas STEM e um alto nível de desinteresse de jovens alunos nessas áreas.

Com base nisso, o movimento propõe a reformulação dos métodos de ensino para se adequar à realidade dos alunos, trazendo maior atratividade e incentivando o desenvolvimento de carreiras STEM. Em termos de metodologia, o movimento preza pela aprendizagem baseada em projetos e desafios, estimulando a curiosidade e participação dos alunos. Apesar de ter se difundido com sucesso pelos Estados Unidos e outros países líderes em educação e tecnologia ao redor do globo, o movimento STEM ainda é tímido no Brasil, caminhando a passos curtos com pouco empenho por parte do sistema básico de educação.

2.3 *Robótica Educacional*

De acordo com ([NASCIMENTO, 2017](#)), a Robótica Educacional, também conhecida como Robótica Pedagógica, é aplicada em ambientes educacionais onde o aluno pode montar e desmontar um robô ou sistema robotizado, proporcionando aos educandos mo-

mentos não só de aprendizado, mas de lazer e entretenimento. Esse termo nasceu por volta da década de 1960, através dos estudos de Seymour Papert e sua teoria que defende o uso do computador nas escolas como um recurso atrativo para crianças, e se popularizou entre os jovens a partir da década de 1990 através do movimento STEAM, mas ainda não está bem integrada como uma ferramenta universal de aprendizagem tecnológica em ambientes escolares regulares.

Segundo ([MAISONNETTE, 2002](#)), a robótica educacional é uma ferramenta interdisciplinar de extremo potencial, que extrapola os limites da sala de aula e instiga o aluno a consultar conteúdo e professores de variadas áreas na busca por uma solução para o seu problema; e é através dessa ferramenta que o aluno constrói o conhecimento através das próprias observações e do próprio esforço, adquirindo uma aprendizagem mais efetiva que se adapta a suas estruturas mentais por ser palpável. Parte dessa otimização na maneira de se aprender está no papel do professor, que deve assumir, segundo ([NASCIMENTO, 2017](#)), o papel de “problematizador” que ajuda o aluno a buscar de maneira autônoma a solução, bem como estreitar o caminho entre o conhecimento empírico e o conhecimento científico. O mesmo autor diz que, para desenvolver o uso da robótica pedagógica, o aluno deverá identificar um problema e entender como solucionar de maneira ordenada utilizando um robô; em seguida, ele desenvolve a programação e testa; ao fim, o aluno pode observar seus resultados e obter a chance de corrigir seus erros caso não atinja os resultados esperados.

Aderir ao movimento STEM é o primeiro passo para aplicar a robótica educacional nas escolas, no entanto, existe muito conservadorismo e dúvidas quanto a como aplicar uma metodologia efetiva, levando muitos autores a realizarem estudos na área para comprovar a eficiência de determinados métodos. Analisando alguns desses estudos, foi possível verificar um padrão de boas práticas e uma tendência a escolher determinadas metodologias para ensinar robótica.

2.3.1 *Project-based learning (PBL)*

De acordo com ([KARAHOCA, 2010](#)), a PBL (em português: aprendizagem baseada em projetos) é uma metodologia de ensino que aumenta a motivação e promove a auto-orientação enquanto o aluno desenvolve e aplica princípios de pensamento crítico, coleta e analisa dados, investiga e aprimora questões, debate ideias, faz previsões e compartilha suas conclusões e descobertas com os demais; podendo ser construída em oito estágios:

- 1) Envolver os alunos em problemas do mundo real; se possível, os alunos selecionam e definem os problemas. O desenvolvimento de robô seguidor de

linha é um dos principais desafios.

- 2) Requerer que os alunos pesquisem, investiguem, usem habilidades de planejamento, pensamento crítico e resolução de problemas enquanto executam tarefas como: colocar materiais no lugar certo, estabelecer posições de momento e equilíbrio, selecionar materiais elétricos, etc.
- 3) Requerer que os alunos aprendam e apliquem conhecimentos e habilidades de conteúdos específicos em uma variedade de contextos, enquanto trabalham no projeto aprendendo elementos de circuito, soldando, operando com silício de calor, descascando cabos, etc.
- 4) Oferecer oportunidades para os alunos aprenderem e praticarem habilidades interpessoais enquanto trabalham em equipes, com adultos em locais de trabalho sempre que possível, havendo seleção de liderança, comunicação e distribuição de tarefas.
- 5) Dar aos alunos a prática de usar o conjunto de habilidades necessárias para suas vidas e carreiras adultas (como alocar tempo / recursos; responsabilidade individual, habilidades interpessoais, aprendizagem através da experiência, etc.). Propõe-se colocar os alunos sob pressão de tempo e materiais limitados, situação essa que é comum na vida profissional.
- 6) Incluir desde o início do projeto expectativas em relação a realizações/resultados de aprendizagem por parte dos alunos e padrões e resultados por parte da escola/estado.
- 7) Incorporar atividades de reflexão que levam os alunos a pensar criticamente sobre suas experiências e vincular essas experiências a padrões específicos de aprendizagem.
- 8) Terminar com uma apresentação ou produto que demonstre aprendizado e seja avaliado; os critérios podem ser decididos pelos alunos, por exemplo, corrida de seguidores de linha.

Estas etapas estimulam a criatividade, buscas por conhecimento e aprendizagem através de prazer e satisfação enquanto se diverte buscando resultados.

2.3.2 Collaborative Learning ou team based learning (TBL)

A aprendizagem colaborativa ou aprendizagem baseada em times é uma situação em que duas ou mais pessoas aprendem ou tentam aprender algo juntos ([DILLENBOURG, 1999](#)). Através dela os alunos aprendem virtudes de colaboração e união, enquanto compartilham e agregam conhecimentos e trabalham juntos na resolução de problemas em

equipe, buscando evolução e resultados coletivos e individuais através de liderança, comunicação, cordialidade e distribuição de tarefas. Observa-se com as conclusões do experimento de ([KARAHOCA, 2010](#)), que a aprendizagem colaborativa é importante na robótica educacional, pois equipes que exercem atividades com contribuição coletiva se sobressaem a grupos individualistas nos aspectos de desempenho e aprendizagem individual e coletiva.

2.3.3 DIY - Do It Yourself

O conceito de DIY (Do-It-Yourself), em português: Faça-você-mesmo, é bem comum na atualidade e se popularizou a partir do início do sec. XXI, através das redes sociais, com o intuito de permitir que qualquer pessoa aprenda a construir, consertar, modificar, fabricar e desenvolver os mais diversos tipos de objetos e projetos de maneira objetiva e sem a necessidade de comprar algo pronto ou de contratar um profissional. Este conceito é muito importante de ser aplicado no ensino de robótica porque permite que qualquer pessoa aprenda a desenvolver um robô sem a necessidade de um ambiente escolar, de um professor ou de conhecimentos avançados na área, podendo aprender na própria casa.

2.3.4 Movimento Maker

O movimento maker é uma extensão da cultura DIY, sendo originado quando a revista Make Magazine, criada nos Estados Unidos, promoveu a Maker Faire (feira de fazedores). Após o sucesso e repercussão do evento, grandes empresas de tecnologia como Samsung, Intel, Microsoft, Raspberry, Arduino e Microchip começaram a desenvolver tecnologias exclusivamente para atender esse público. Na robótica educacional, o Movimento Maker caminha lado a lado com STEM, pois em ambos, a ideia é inovar, empreender e evoluir.

De maneira resumida, o movimento Maker valoriza a possibilidade de utilizar das informações obtidas por pesquisa e conteúdos online de fácil acesso para fazer projetos com as próprias mãos, seja com ajuda de um computador, impressora 3D ou ferramentas, visando aumentar a atratividade para as áreas da ciência e desmistificar tabus relacionados à dificuldade de se aprender novas tecnologias. Como resultado, mais jovens e adultos interessam-se por tecnologia, seguem carreiras na área e aumentam o número de profissionais qualificados no mercado.

Ainda no campo da pedagogia, o ensino da robótica é interdependente de aulas no formato da pedagogia clássica, porém melhor aproveitado quando associado a atividades

práticas em grupo. Por este motivo considera-se que o movimento Maker e algumas metodologias de ensino de robótica são baseadas na concepção de Lev Vygotsky, a qual diz que o sujeito é considerado um ser não só ativo como também interativo, porque adquire conhecimentos a partir de relações intra e interpessoais, exercitando aquilo que o homem tem de melhor: a criatividade ([PALANGANA, 2015](#)) e ([ROCHA, 2013](#)).

Segundo a concepção de Vygotsky, a aquisição de conhecimentos se dá pela interação do sujeito com o meio. Em todos os experimentos, instituições de ensino e produtos voltados a robótica educacional analisados neste trabalho, dois ou mais dos conceitos acima descritos foram aplicados, demonstrando um padrão de métodos efetivos para ensino de robótica.

2.4 O que é um Robô

A partir da primeira Revolução Industrial, houve o advento do uso de máquinas para substituir a mão de obra humana. A busca de cada vez mais automatizar o processo produtivo foi estimulada por diversos princípios, desde os filosóficos, sociais, científicos e econômicos. Karel Čapek, em 1921, criou a palavra robot a partir da peça RUR (Rossum's Universal Robots), apresentando uma fábrica que criava humanóides (robôs) com o intuito de que sejam obedientes e realizem todo o trabalho físico ([WELLEK, 1936](#)). Na década de 1940, o escritor Isaac Asimov representou o robô com uma imagem um pouco diferente: este foi reimaginado como um dispositivo mecânico com um cérebro programável por humanos, que seguia algumas regras ([ASIMOV, 2004](#)). Estas regras são as três fundamentais leis da robótica:

- 1) Um robô não pode fazer mal a um ser humano e nem consentir, permanecendo inoperante, que um ser humano se exponha a situação de perigo;
- 2) Um robô deve obedecer sempre às ordens de seres humanos, exceto em circunstâncias nas quais estas ordens entrem em conflito com a 1a lei;
- 3) Um robô deve proteger a sua própria existência, exceto em circunstâncias que entrem em conflito com a 1a e 2a leis.

([SICILIANO et al., 2010](#)) conceitua que robôs são máquinas que podem substituir humanos em, desde tarefas de esforço físico a, até, tomada de decisões. Atualmente podem ser encontradas máquinas com inteligência artificial que se adequam e tomam decisões a partir de fatores externos, como o ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility) da Honda, que pode ser visto na Figura 01. O primeiro sistema robótico a existir foi o UNIMATE, da UNIMATION Inc.; quando foi instalado na fábrica da General Motors em

Nova Jersey na década de 1950, o UNIMATE era utilizado para elevar peças de metais quentes.



Figura 2.1: ASIMO

Fonte: HONDA

O uso de robôs industriais como o UNIMATE tem como principal reflexo a automação da produção, aumentando, portanto, a quantidade de produtos gerados em dado período de tempo. Outro fator que pode ser relacionado ao uso de robôs em linha de produção é a melhora nas condições de trabalho do ser humano, por meio da redução de atividades perigosas ou insalubres ([BOUTEILLE; BOUTEILLE, 1997](#)). O controle de sistemas robóticos, com o passar dos anos, vem se tornando mais complexo e especializado, porém pode ser simplificado para um controle de malha fechada, que pode ser visto na Figura 2.2.

Percebe-se, a partir da Figura 2.2 que, em sistemas robóticos, existem atuadores e sensores. Atuadores podem ser citados como sistemas que possuem a capacidade de exercer atuação mecânica para o robô, como o exemplo dos servo-motores. Sensores são transmissores que recebem determinado dado e emitem sinais analógicos ou digitais para o computador central, possibilitando o controle de um sistema robótico.

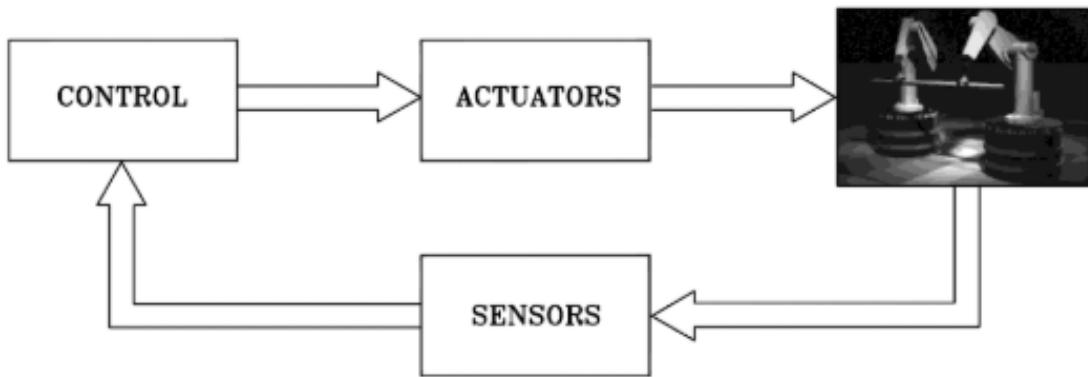


Figura 2.2: Componentes e controle de robôs

Fonte: ([SICILIANO et al., 2010](#))

2.4.1 Percepção

Segundo ([LENT, 2010](#)), para a neurociência, a percepção refere-se à capacidade de associar automaticamente as informações sensoriais à memória e à cognição de tal maneira a gerar conceitos sobre o mundo e orientar os comportamentos. Comparativamente, o robô associa os dados “sensoriais” obtidos através dos sensores aos controladores para que possam ser processados e interpretados, dando assim, a capacidade de percepção aos robôs.

Atualmente, existem diversos sensores que são utilizados, dentre eles: LIDAR, câmeras, IMU, sensores de temperatura, umidade etc. A capacidade de conectar uma ação a partir da percepção de mundo é tarefa do controle, o qual pode emitir comandos de execução para os atuadores a partir das leituras dos sensores. Um exemplo prático disso é o ser humano: quando uma pessoa bate o dedinho do pé, instantaneamente, as terminações nervosas (sensores) emitirão sinais ao cérebro (controle), que por sua vez, emitirá um sinal para os músculos (atuadores) se moverem a fim de interromper a sensação dolorosa.

A visão computacional é a tentativa de simular a visão biológica, o que se torna em um assunto extremamente complexo. ([JAHNE, 2000](#)) escreve que pode-se comparar as funcionalidades básicas dos dois tipos de visão, que são:

- Fonte de radiação: sem a emissão de radiação nada pode ser observado ou processado;
- Câmera: dispositivo que captura a radiação emitida;
- Sensor: dispositivo que converte a radiação capturada em sinal apropriado para o processamento;

- Unidade de processamento: dispositivo que processa os sinais convertidos extraíndo informações adequadas para a medição do objeto e categorizá-las em classes;
- Atuadores: utilização as informações processadas para realizar alguma ação.

Após esclarecidas as principais funções básicas da visão, também é necessário entender que a visão computacional não é somente o processamento de imagens. O processamento de imagens recebe uma imagem como entrada, e como saída tem-se um conjunto de valores numéricos que podem ou não formar outra imagem. Já a visão computacional é a busca de simular a visão humana, em que a entrada é uma imagem, e a saída é a interpretação dela.

(GONZALEZ; WOODS et al., 2008) escrevem que não existe uma fronteira bem definida entre o processamento de imagens e a visão computacional. Porém é possível dividir o caminho entre o processamento de imagem e a visão computacional em três partes: nível baixo, nível médio e nível alto. O nível baixo é de processos primitivos, como pré-processamento de imagem para redução de ruídos, aprimoramento de contraste e nitidez da imagem. Já o nível médio é caracterizado por processos que têm como entrada imagens, mas a saída do processamento são atributos extraídos da imagem, como arestas, contornos e identificação de objetos. O nível alto trata-se dos processos que interpretam um conjunto de objetos reconhecidos na imagem, desta maneira, realizando funções cognitivas que geralmente são associadas à visão biológica.



Figura 2.3: Visão da câmera - Piloto automático

Fonte: Tesla

As aplicações da visão computacional são bastante amplas, e pode ser usada desde para o aumento da produtividade de uma linha de produção através da rápida inspeção, até para que robôs possam compreender seus arredores. Um bom exemplo da utilização da visão computacional é nos veículos autônomos, em câmeras, como podem ser vistos na Figura 2.3, são utilizadas em conjunto com outros tipos de sensores para possibilitar que o automóvel utilize o piloto automático.

Para que um robô móvel seja autônomo, deve ser capaz de perceber o ambiente à sua volta para que assim possa decidir sobre qual a melhor ação a ser tomada e realizá-la com o menor erro possível. Desta maneira, um das funções fundamentais do robô a fim de alcançar seu objetivo, tanto em ambientes externos quanto em ambientes internos, é a aquisição de informações do ambiente em que está localizado através da construção de mapas do local. Segundo ([MURPHY, 2000](#)) os mapas utilizados para navegação dos robôs podem ser classificados, de acordo com sua estrutura, em dois tipos:

- Topológicos: modelo que representa o ambiente por meio de conexão entre pontos de referência. A representação pode ser feita por meio de grafos onde os vértices representam os locais e as arestas representam o caminho entre os locais. Porém esse tipo de representação é pobre em detalhes do ambiente físico;

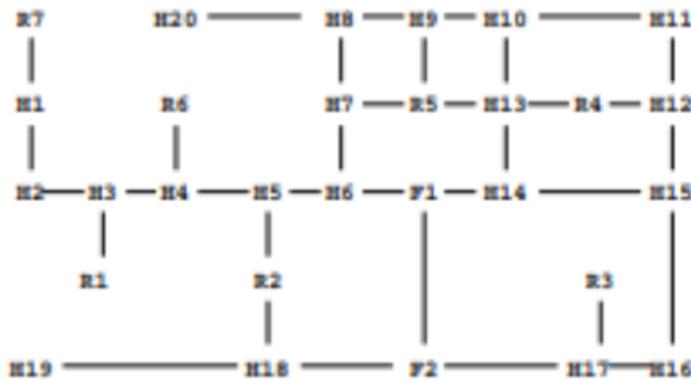


Figura 2.4: Mapa topológico de um layout de escritório

Fonte: ([MURPHY, 2000](#))

- Métricos: modelo que representa o ambiente físico em detalhes. A representação do ambiente é normalmente feita através de um plano dividido em células de tamanhos iguais, que também é chamada de grade. Desta maneira, cada célula representa uma parte do espaço físico.

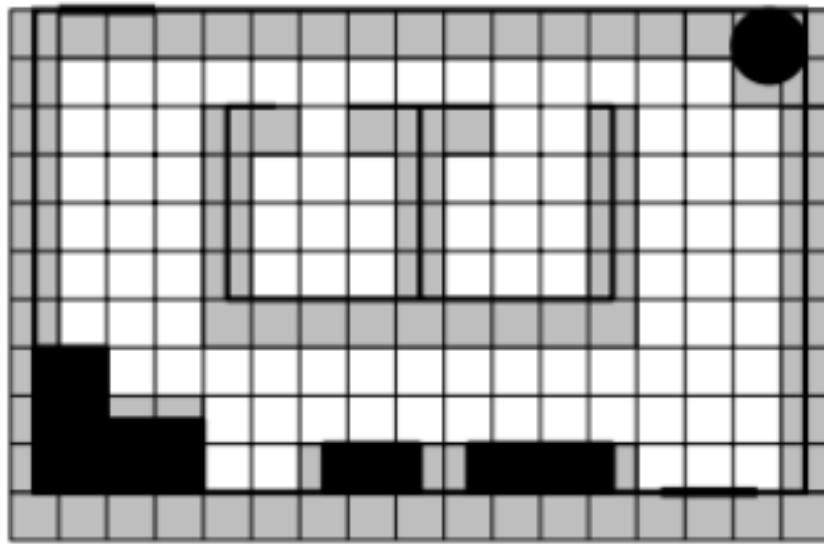


Figura 2.5: Grade regular

Fonte: ([MURPHY, 2000](#))

2.4.2 Áreas de Atuação

Com a união dos sensores, atuadores e um controle lógico, o ser humano tem a possibilidade de criar robôs para uma infinidade de áreas de atuações. ([SICILIANO; KHATIB, 2016](#)) descreve algumas das possíveis áreas em que a robótica pode atuar, como por exemplo:

- Industrial;
- Subaquática;
- Aéreo;
- Espacial;
- Educação.

Na área industrial, como visto anteriormente, foi o pontapé para o desenvolvimento da robótica devido a necessidade do aumento de produtividade das grandes empresas. E nesta área a robótica pode atuar em alguns setores, como por exemplo:

- Soldagem: com a necessidade de uma mão de obra muito especializada devido a grande chance de pequenas imperfeições, que podem levar a grandes consequências, foi introduzido a robótica no processo de soldagem industrial para garantir a repetibilidade do processo;

- Transferência/posicionamento de material: da mesma maneira que a soldagem, a robótica foi introduzida para reduzir os danos ocupacionais aos colaboradores causados pelos movimentos repetitivos e levantamento de peso excessivo. Assim como para assegurar a repetibilidade do processo;
- Pintura: motivado pelas condições perigosas de trabalho, a robótica foi inserida neste contexto para reduzir os impactos das tintas na saúde dos operadores e também para garantir a repetibilidade e a eficiência do processo;
- Usinagem: utilizado devido a sua grande precisão, podem ser utilizado nos mais diversos campos da usinagem bastando apenas providenciar a ferramenta adequada.

“Os oceanos cobrem cerca de 2/3 da superfície da terra e tem sido crítico para o bem-estar dos seres humanos por toda a história. Atualmente, os mares são uma importante fonte de alimento e outros recursos, como petróleo e gás.” ([SICILIANO; KHATIB, 2016](#)). Como destacado pelo autor, os mares e oceanos são peças fundamentais para o desenvolvimento humano ao longo do tempo. No início da exploração subaquática o ser humano contava apenas com mergulhos e veículos submersíveis tripulados.

Porém, existe a necessidade de explorar regiões que expõem a segurança dos seres humanos, e por conta desta necessidade foram desenvolvidos robôs, seja autônomos ou remotamente operados, para que assim fosse possível suprir tais necessidades. Atualmente os robôs subaquáticos atuam em três áreas: comercial, científica e militar. Dentre as áreas de atuação, as atividades mais praticadas são a inspeção (equipamentos, tubulações, terreno), instalação e manutenção (equipamentos e tubulações), pesquisa e coleta de objetos.

O grande índice de fatalidades com aeronaves operadas por seres humanos levou os engenheiros a desenvolver máquinas voadoras capazes de ser operadas sem a presença de humanos ([SICILIANO; KHATIB, 2016](#)). Com isto os robôs têm grande papel no desenvolvimento de aeronaves não tripuladas. Algumas das aplicações dos robôs nesta área são:

- Observação aérea: podem ser usados tanto para uso civil quanto para militar, podem fazer as seguintes ações: mapeamento de terreno, pesquisas ambientais, monitoramento de plantações, filmagens, identificação de alvos;
- Entrega de carga: utilizados para entrega de carga em locais de difícil acesso às pessoas. Muito utilizados também para fazer a aplicação de agrotóxicos em plantações. Utilizado também pelos militares para a entrega de mísseis.

Os robôs são excelentes soluções para o ambiente extremamente perigoso que é o espaço. Segundo a ([NASA, 2017](#)), os robôs são utilizados por diversos motivos, o mais

importante deles é a segurança para os seres humanos, uma vez que robô podem ser dispensados. Outro motivo é o custo, enviar robôs para o espaço é mais barato que enviar humanos, pois eles não têm as necessidades que os seres humanos têm. Segundo ([ESA, 2014](#)) os robôs espaciais tem duas principais aplicações:

- Orbital: usado basicamente para a construção, operação e manutenção da Estação Espacial Internacional (ISS) ou de satélites que orbitam o planeta, através de braços robóticos;
- Exploração planetária: viagens longas e perigosas impulsionaram o desenvolvimento de robôs capazes de vasculharem a superfície de planetas ou corpos celestes. Existem uma variedade de robôs com este propósito, como por exemplo rovers e hoppers, penetrômetros e toupeira robótica, balões, dirigíveis e aviões.

Na educação, os robôs acabam sendo poderosas ferramentas de aprendizado, cada vez mais inseridos no mercado. ([SICILIANO; KHATIB, 2016](#)) escreve que os robôs, no contexto educacional, possuem três papéis principais. O primeiro é o robô como um projeto de linguagem de programação, que se utiliza um exemplo contextualizado para motivar os estudantes se aprofundarem no assunto. O segundo papel é o robô como foco de aprendizado, em que se utiliza um robô físico para ensinar os mais diversos assuntos técnicos durante a construção de um robô. O terceiro e último papel é o robô como colaborador de aprendizado, em que o estudante não está projetando um robô, mas tendo um robô de alto nível como companheiro de aprendizado. Com esses papéis, a robótica consegue desenvolver o estudante em alguns pontos:

- No interesse na ciência e engenharia;
- No trabalho em equipe;
- Na resolução de problemas

Metodologia

”Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado.”

(Gandalf)

De acordo com (??) metodologia é “o conjunto de métodos e técnicas aplicadas para um determinado fim. É o caminho percorrido, a maneira utilizada para atingir um objetivo”. Por certo, descreve os métodos que padronizam uma produção, visando a chegada em um resultado. Em trabalhos acadêmicos a sua importância vai além de descrever o processo de confecção do projeto mas também permite que o mesmo possa ser replicado por outros pesquisadores.

A metodologia aplicada para para o projeto toma como base o desenvolvimento de sistemas robóticos, nesse caso sendo voltada para o desenvolvimento de um sistema de movimentação robótico, presente no robô *ELIR*. A divisão do projeto em fases maiores e menores facilita o fluxo para o desenvolvimento, assim sendo definidas quatro partes maiores, sendo elas: conceituação, *design*, desenvolvimento e operacionalização. O fluxo do projeto está explicitado no Figura 3.1 a seguir:

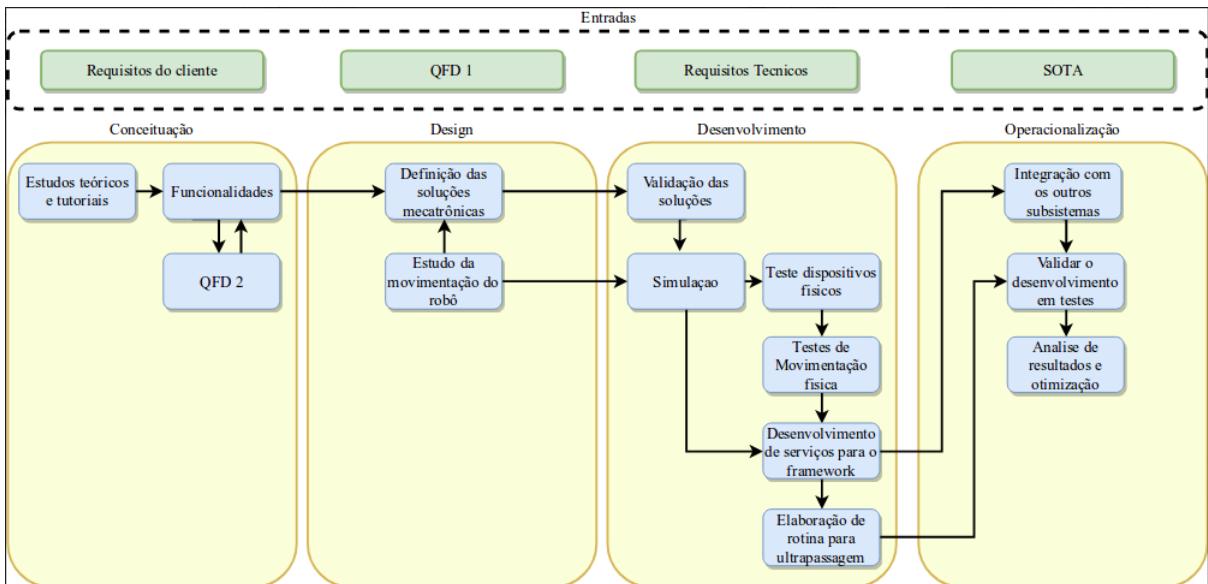


Figura 3.1: Fluxograma de desenvolvimento

Devido a complexidade envolvida nesse tipo de sistema, são utilizadas ferramentas específicas de desenvolvimento, assim como o cliente fornece certos parâmetros iniciais para impulsionar o projeto e guiar desenvolvimento para um resultado satisfatório. São

consideradas entradas para a metodologia os requisitos do cliente, requisitos técnicos, um *QFD* inicial, denominado *QFD 1* e o Estudo do Estado da Arte (*SOTA*).

O requisito consiste na definição documentada de uma propriedade ou comportamento que um produto ou serviço particular deve atender. Existem os requisitos do cliente, no qual são as necessidades e as expectativas do cliente, e os requisitos técnicos possuem uma visão técnica para atender as necessidades do cliente e os objetivos do projeto.

Durante a fase inicial do projeto, foi conversado com o cliente e deixado explícito seus requisitos para o *ELIR*, sendo eles:

- Realizar as funções de forma autônoma;
- Transpor obstáculos e cadeia de isoladores;
- Deslocar-se através do consumo de baterias;
- Deslocamento/movimento realizada por servomotores.

Foi determinado pelo cliente para que o projeto desempenhe corretamente os seguintes requisitos técnicos:

- Desempenho de deslocamento de 15km por dia
- Velocidade de deslocamento médio sem obstáculos de 0.5 m/s
- Ultrapassagem de obstáculos de volume máximo de 410x330x150mm
- Autonomia de potência de 2 horas
- Sistema operacional Linux,
- *Backend* em C++ e Python
- *Framework* ROS Kinetic Kame.

A ferramenta de Desdobramento da Função Qualidade (*QFD*) torna-se importante para guiar o projeto e a incorporar as reais necessidades do cliente. Por meio de um conjunto de matrizes parte-se dos requisitos expostos pelos clientes e realiza-se um processo de "desdobramento" transformando-os em especificações técnicas do produto. Esse desdobramento entre os requisitos do cliente, influencia no desenvolvimento, permitindo encontrar o que impacta mais no resultado final do projeto, assim fazendo com que a prioridade de certas atividades mude.

O estudo do estado da arte é o mapeamento que possibilitará o conhecimento e/ou reconhecimento de estudos que estão sendo, ou já foram realizados com temáticas, ou linhas de pesquisa , iguais ou parecidas a que está sendo estudando. No caso de projetos desenvolvidos em conjunto que incorporam diversas teses acadêmicas, esse estudo facilita a continuação do trabalho e dá uma base o projeto.

3.1 Conceituação

A fase da conceituação consiste na criação de um conceito para o sistema, sendo assim recolhido todo o embasamento teórico necessário para a confecção do projeto. Assim fazendo com que seja elaborada uma ideia para o sistema, o que é a base para todo o projeto, guiando as próximas fases.

As entradas do cliente são de suma importância para essa etapa, onde as mesmas são a base para a ideia do sistema. Com o estudo teórico do que será necessário e o uso das ferramentas como o *QFD*, é possível elaborar as funcionalidades que serão desempenhadas pelo sistema. A elaboração de um segundo *QFD* por parte da equipe acontece em paralelo com a elaboração das funcionalidades e se utiliza do *QFD* 1 junto com os requisitos técnicos e do cliente, buscando conceituar o sistema de forma concreta.

As funcionalidades recebem entradas e saídas, sendo assim, interligadas, esse tipo de metodologia se mostra muito eficiente pois consegue dividir o robô em subsistemas e funções a serem desempenhadas, podendo assim dar uma idéia de como será o seu funcionamento e troca de informações internas. Com a definição das funcionalidades do sistema, é possível partir para a forma da idéia, como ela será aplicada, o que acontece na etapa de *Design*;

3.2 Design

Com um conceito firme para o sistema, a etapa de *design* consiste na forma que a idéia irá ter, para que a mesma seja possível. Com as funcionalidades definidas, é possível decidir quais ferramentas devem ser utilizadas no projeto, de forma a garantir que as mesmas sejam executadas.

Por se tratar do desenvolvimento de um sistema de movimentação, é importante que seja realizado um estudo da forma como será necessário se realizar o movimento do robô, já que isso impacta profundamente na seleção das ferramentas, esse estudo consiste na busca do entendimento de como será sua aplicação real, e está relacionado também

com a simulação, que colabora para o sucesso dessa etapa. São tomados como critérios para a escolha da ferramentas: A quantidade de informação sobre cada ferramenta que há disponível, suporte da comunidade que a utiliza e os tutoriais que cada ferramenta possui. O estudo da movimentação é de grande valia no *design* das soluções mecatrônicas pois, conhecendo as maneiras quais o robô tem que se movimentar, definir os recursos necessários para esse objetivo se torna mais fácil.

3.3 Desenvolvimento

O desenvolvimento consiste na aplicação prática da idéia, sendo a parte que demanda mais tempo e a partir dela, já é possível ter a noção de como será o dispositivo físico final. Contém toda a produção de software, estruturas necessárias para o projeto, e também a construção do protótipo. Com a definição das ferramentas realizada na etapa de *design*, é possível começar a aplicação no sistema de interesse, validando o que foi decidido anteriormente.

3.3.1 Validação das ferramentas

A etapa de validação das ferramentas é onde se realiza os estudos e testes para compreender o funcionamento das mesmas e verificar se suas mecânicas e funcionalidades são adequadas para a solução e desenvolvimento do projeto. Uma vez que a ferramenta esteja escolhida, é realizada a análise do seu funcionamento, seus aspectos gerais, configurações, e como integrá-las ao desenvolvimento do projeto.

Após realizado o estudo da ferramenta, e de como suas mecânicas funcionam e podem auxiliar no desenvolvimento das funcionalidades do projeto, são realizados os primeiros usos das ferramentas, por meio de pequenos testes específicos, a fim de buscar o entendimento amplo de como se operacionalizar e implementar as soluções a partir das funcionalidades das ferramentas.

Uma vez que os testes se mostram efetivos e o conhecimento sobre as suas funcionalidades esteja adquirido, a ferramenta torna-se válida, e pode ser utilizada no desenvolvimento do projeto, podendo ser utilizada em todas as etapas onde se mostre necessária

3.3.2 Movimentação simulada/em simulação

Para a validação das ferramentas, o uso de simulações computacionais é fundamental, devido que a simulação consegue prever os comportamentos do protótipo antes do mesmo estar em operação e com uso das ferramentas disponíveis na robótica e assim validando a maioria das ferramentas e estratégias. A simulação torna-se presente em todos os testes, desde a validação de ferramentas definidas durante a fase de *Design* até do robô em operação, sendo uma poderosa ferramenta para validação dos dispositivos e a movimentação física.

3.3.3 Teste com dispositivos físicos e Movimentação física

Antes de realizar testes do robô se movimentando é necessário garantir que todos os dispositivos físicos estejam funcionando corretamente. Durante essa fase deverá ser realizado a montagem do robô e garantir que esteja conforme a simulação. Logo após, é de extrema importância realizar simulações, testes de esforço, velocidades e posição dos servomotores utilizados na estrutura para que não haja nenhum imprevisto durante os próximos testes de operação.

Com os testes de dispositivos físicos realizados unitariamente, é necessário integrá-los para realizar os testes de movimentação física. Esse teste é realizado tanto na simulação quanto em operação em linha, sendo importante verificar se o mesmo está andando corretamente, observando influência externa do vento.

3.3.4 Desenvolvimento de serviços para *framework* e rotina para ultrapassagem

A estrutura de serviços disponibilizada pelo *framework*, são subrotinas em código para desempenhar uma função específica, a comunicação é feita por um par de mensagens, uma de solicitação e outra de resposta, que quando necessário fazer uso do serviço, uma mensagem de solicitação é enviada, logo após o serviço executa o código contigo nele e retorna uma mensagem de resposta.

Para realizar o rotina de ultrapassagem como um todo é conveniente separar em serviços as partes dos movimento de ultrapassagem, facilitando a identificação de erros e inconsistências. Com os serviços feitos e testados é preciso unificá-los para realizar a ultrapassagem. É importante organizá-los de forma sequencial e analisar como cada serviço se comporta para garantir que foram bem codificados, e se necessário realizar

ajustes na programação.

3.4 Operacionalização

A operacionalização põe em funcionamento todo o conjunto dos dispositivos, sistemas e rotinas necessárias para o funcionamento do robô. A partir do momento em que há itens, rotinas e ferramentas que são parte de uma funcionalidade, desenvolvidas, passa a ser possível a junção destes para que essa funcionalidade tome forma. Com estas finalizadas, é realizada sua integração com outras funcionalidades, para que possa receber suas entradas e entregar suas saídas.

Deve-se também verificar o desempenho das funcionalidades, a validação do desenvolvimento é realizada com testes de operação dos sistemas. Nestes testes, são executados procedimentos que repliquem as situações de operação do robô. É importante também que as condições dessa operação, ambiente, carga e etc. sejam similares as quais o robô irá encontrar.

Após a realização de testes para a validação do desenvolvimento, é possível analisar os resultados dos mesmos. As informações levantadas nos testes mostram se as funcionalidades desenvolvidas realizam o que se espera e a sua eficiência. A partir daí, pontos do projeto a serem melhorados ficam evidentes, possibilitando assim a otimização de funções.

Desenvolvimento e testes

”Minha mãe sempre dizia: ‘a vida é como uma caixa de chocolate. Você nunca sabe o que vai encontrar’.”

(Forrest Gump)

Durante o desenvolvimento do projeto, foram feitos diversos estudos relacionados com o âmbito da robótica. A diversidade de ferramentas existentes faz com que o pesquisador tenha diversos formas de alcançar um resultado final e por se tratarem de conhecimentos específicos, cada ferramenta exige complexidade e dedicação para que seu domínio seja efetivo e resultados satisfatórios sejam alcançados.

A constante pesquisa e trabalho com as mesmas ferramentas definidas no início do processo metodológico possibilitou a realização de diversos testes, buscando validar as decisões tomadas, assim como aumentar o domínio das ferramentas e descobrir a melhor forma de utilizar todo seu potencial.

Os dispositivos eletrônicos oferecem muita informação sobre o seu funcionamento, porém, é necessário conhecer o seu comportamento na prática, já que esses dispositivos serão expostos a situações específicas do projeto, além de que, por estarem funcionando em conjunto com diversos subsistemas, é importante conhecer o seu comportamento quando como organismo de um sistema maior.

Com o decorrer do fluxo metodológico diversos tipos de resultados foram alcançados, seja conhecimento específico de uma ferramenta, validação da sua funcionalidade para um sistema específico ou seu comportamento como um organismo. O conceito do sistema é algo fundamental e o mesmo foi um fruto dessa metodologia, onde as suas funcionalidades desempenham um importante papel para se conhecer a idéia.

4.1 Análise das Funcionalidades

O desenvolvimento do conceito do sistema resultou nas funcionalidades, que por sua vez representam o fluxo das informações. A forma de estabelecer esse fluxo foi idealizando a operação do robô, buscando se determinar as atividades à serem desenvolvidas.

A inspeção de linha, exemplificada como o ato de caminhar na linha e ultrapassar um obstáculo, foi denominada missão. Assim, cada vez que o robô inicia esse processo, é iniciada uma missão.

De forma a garantir a execução da missão de forma efetiva, utilizou-se os requisitos fornecidos para o cliente e o *QFD* 1 aliado ao estudo das ferramentas para determinar os subsistemas presentes no robô, produzindo assim uma versão do *QFD* 2 aliada com a definição das funcionalidades para o sistema robótico, já que ambas aconteceram em paralelo e são complementares, o *QFD* 2 está mostrado na figura 4.1, estando disponível no anexo ??.



Figura 4.1: *QFD* 2

Com uma idealização do fluxo do sistema e suas funcionalidades, foi elaborada uma arquitetura geral do sistema de movimentação, mostrada na figura 4.2 e disponível no anexo ??.. Antes do início da missão, é necessário que o sistema esteja apto a tal, assim foi definida uma funcionalidade para verificação da integridade do sistema, que requisita

os status dos dispositivos antes de realizar a missão por meio de uma checagem, e com o sucesso na checagem, fornece o comando para o início.

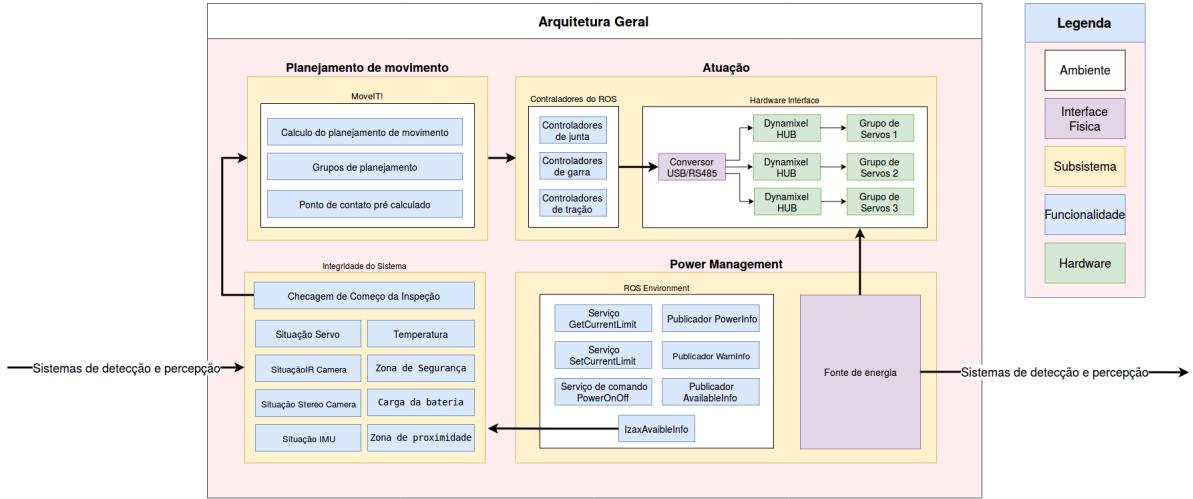


Figura 4.2: Arquitetura geral do sistema de movimentação

Determinou-se que a funcionalidade responsável pelo Planejamento de Movimento, realizasse o cálculo do plano de movimento junto com a administração dos grupos de controle e o cálculo de pontos de contato no robô. Onde essas informações sobre o plano de movimento do robô seriam transferidas para a funcionalidade de atuação do robô, que é responsável por receber esses comandos nas estruturas padrão do *ROS* e realizar o movimento físico do robô.

A movimentação exige muita energia do robô e aliado à necessidade do controle da potência disponível, foi idealizada a funcionalidade de Gerenciamento de energia, responsável por disponibilizar as informações de energia no ambiente *ROS* e fornecer a energia para o sistema de alimentação.

4.1.1 Atuação

Com a arquitetura geral do sistema de movimentação e o fluxo de comunicação, foi possível estabelecer as propriedades específicas da funcionalidade de atuação, onde buscou-se definir suas dependências, saídas e seu funcionamento.

Foi feito um fluxograma para representar a funcionalidade, onde estão ilustrados todos seus parâmetros, como mostra a figura 4.3.

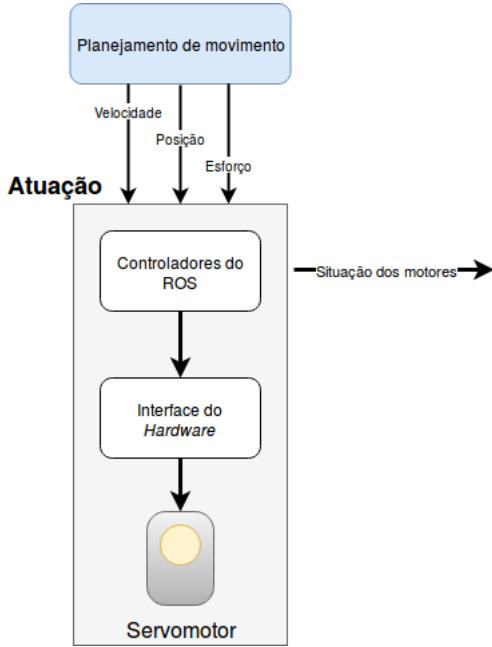


Figura 4.3: Fluxograma da funcionalidade de Atuação

Os comandos relativos a posição, esforço e velocidade para as juntas vêm da funcionalidade de planejamento de movimento, onde a atuação recebe esses comandos, transferindo os mesmos para os controladores do ambiente *ROS* que se comunicam com a interface de *hardware* que envia o comando para os motores realizarem o movimento.

4.1.2 Planejamento de Movimento

A forma que o robô vai realizar seus movimentos é determinado pela funcionalidade de Planejamento de Movimento. Que por sua vez tem a ferramenta *MoveIt!* como importante componente para que a movimentação ocorra de forma efetiva, sendo assim, as unidades de *software* da ferramenta que irão se comunicar com a funcionalidade explicitadas no fluxograma 4.4 estão incluídas no ambiente do *MoveIt!*, recebendo o comando da posição desejada para o *end-effector* e enviando os comandos necessários para as juntas.

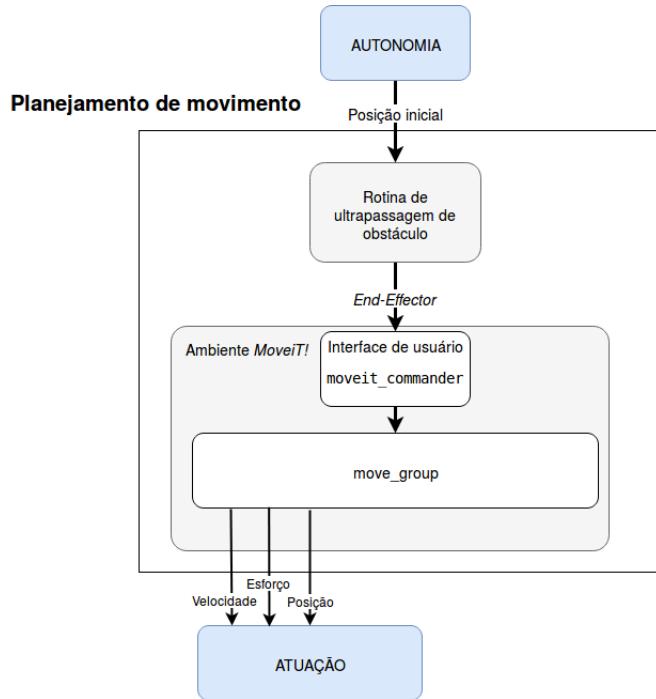


Figura 4.4: Fluxograma da funcionalidade de Planejamento de Movimento

Apresenta uma dependência do sistema de autonomia do robô, que envia uma posição de referência o robô, o que culmina na necessidade da ultrapassagem de um obstáculo, já que, em operação, a ultrapassagem de obstáculos acontece diversas vezes. A rotina de ultrapassagem de obstáculo então envia para o *software* o *end-effector* necessário para a ultrapassagem, e consequentemente são enviados os comandos contendo a posição, esforço e velocidades das juntas para a funcionalidade de atuação.

4.1.3 Gerenciamento de Energia

A necessidade de distribuir a energia elétrica proveniente de uma bateria entre os sistemas eletrônicos do robô, de maneira inteligente se mostrou uma parte fundamental do projeto. Para que isso fosse implementado, houve a necessidade de desenvolver uma funcionalidade responsável por monitorar os níveis de corrente e tensão fornecidos para cada um dos dispositivos eletrônicos do robô, permitindo a criação de um sistema de proteção contra surtos de corrente, com ajuste de limites para valores do fornecimento de corrente.

Após a análise e constatação da necessidade da implementação desta funcionalidade, foram feitas as definições de quais seriam suas entradas, saídas e suas dependências.

A funcionalidade de gerenciamento de energia depende essencialmente da placa mul-

tiplexadora, a qual é responsável por alimentar o *hardware* de *Power Management* com a energia proveniente das baterias, e de que todos os seus drivers e funções estejam instaladas no ambiente *ROS*, para que seja possível utilizar as suas ferramentas.

O sistema de *power management* cria no ambiente *ROS*, estruturas de *software* responsáveis por permitir o monitoramento das portas de alimentação (informando valores de tensão e corrente), bem como a configuração dos limites do fornecimento de corrente e a desativação ou acionamento dos relés digitais de cada uma das portas.

O gerenciamento de energia monitora os valores de corrente fornecidos nas portas, e verifica ocorrência de possíveis surtos, verificando o valor do pico e o tempo de duração. Caso seja detectado um surto de corrente, o fornecimento da porta é desativado, protegendo assim o sistema como um todo.

Uma vez que o estudo do *hardware* e das suas funções no ambientes *ROS* estavam completos, foram iniciados os primeiros testes com partes isoladas do robô para verificar o comportamento do *hardware* e se o seu funcionamento estava de acordo com o esperado, para atender os requisitos da funcionalidade de maneira satisfatória, para assim ser integrado ao sistema.

4.1.4 Checagem da Integridade do Sistema

Todas os sistemas do robô devem operar de maneira correta, para garantir o sucesso na execução da missão, e a partir desta observação, foi concebida a funcionalidade de checagem de integridade do sistema. Sua principal função é garantir que todas os sistemas do robô estejam sem apresentar falhas antes do início da missão. Uma vez que a checagem é realizada, o robô pode iniciar a sua missão.

Esta funcionalidade se mostra importante pelo fato de que a checagem prévia, reduz significantemente os riscos e prejuízos atrelados a uma má execução da missão, como componentes danificados e perda na eficiência durante toda a missão. Todos os sistemas que irão participar da missão, devem estar atrelados ao sistema por meio do ambiente *ROS*, onde cada um irá informar o seu estado para a funcionalidade. O fluxograma 4.5 foi desenvolvido para ilustrar o funcionamento da rotina de checagem integridade do sistema.

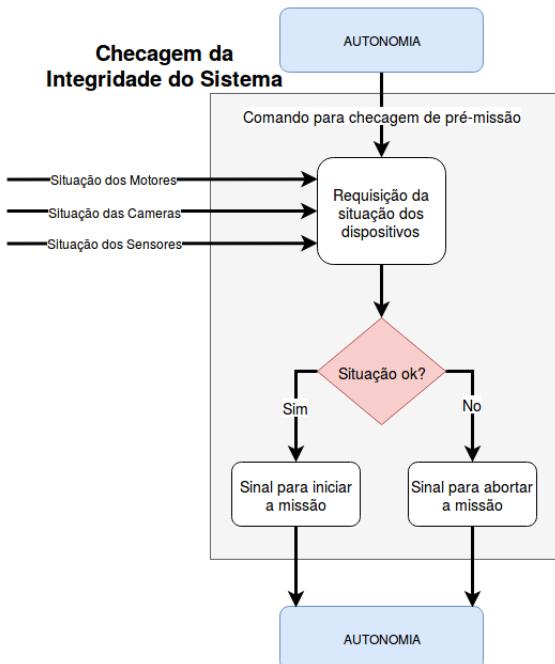


Figura 4.5: Fluxograma da funcionalidade de Checagem da Integridade do Sistema

Uma vez que esta funcionalidade foi concebida, toda as outras integrantes do sistema, deveriam se integrar ao sistema de integridade para garantir que a missão pudesse ser iniciada sem erros graves.

4.2 Estudo da Movimentação

Para o desenvolvimento das ferramentas para ultrapassagem de obstáculos, foi necessária a análise dos movimentos necessários para que fosse realizada a ultrapassagem de obstáculos. Os tipos de movimento a serem realizados influenciam nas ferramentas escolhidas para o controle e operação do robô, já que se busca a otimização do movimento e também redução do tempo gasto no desenvolvimento, de forma a garantir um resultado satisfatório.

Foi feita uma análise utilizando como referência o maior obstáculo, que foi o amortecedor, mostrado na figura 4.6 e levando em consideração a sua modelagem como um paralelepípedo de maior dimensão 535mm. Constatou-se que seria necessário que para a ultrapassagem desse obstáculo, o robô necessitaria abrir um dos braços e se deslocar somente com a unidade de tração central e outro braço. Para isso seriam necessários movimentos para abrir e fechar as garras do robô, assim como um comando específico para afastar a unidade de tração da linha a distância necessária para a abertura da garra. Assim como o movimento que abre o braço suficiente para que esse passe abaixo do obstáculo.

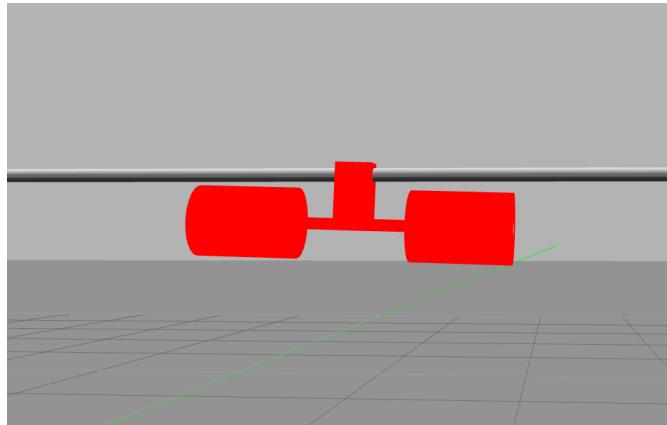


Figura 4.6: Visualização do obstáculo no simulador

A ferramenta de visualização presente no *ROS*, possibilitou testar os limites de giros das juntas e visualizar como seriam as poses do robô sem a necessidade da simulação. O conhecimento relacionado à como a movimentação ia ocorrer possibilitou nortear o desenvolvimento.

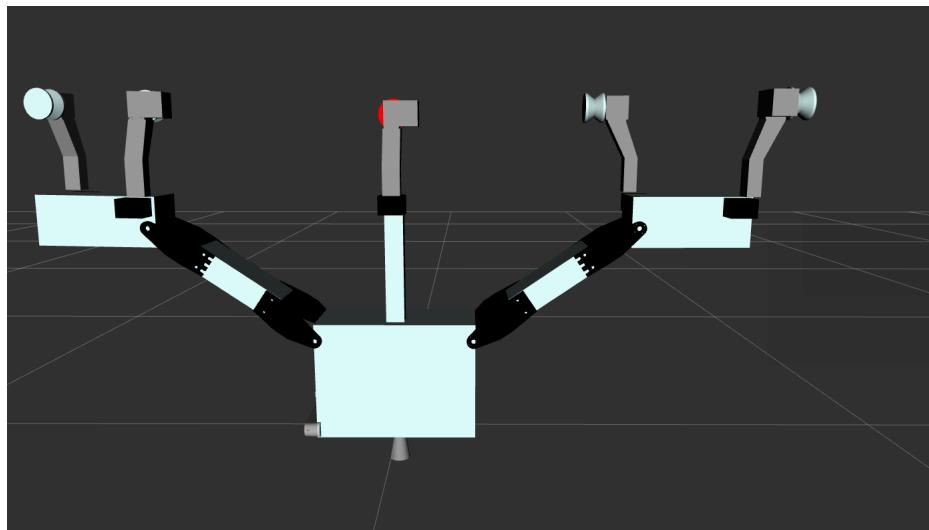


Figura 4.7: Robo *ELIR* no visualizador do *ROS* com garras abertas

4.3 Soluções Mecatrônicas para o sistema robótico

Uma vez que os principais aspectos das funcionalidades estavam definidos, foi necessário realizar a implementação das soluções mecatrônicas no robô. Foram realizados estudos de dispositivos eletrônicos e das suas ferramentas de configuração, bem como programas e *softwares* que seriam necessários para a implementação das funcionalidades.

4.3.1 Escolha a biblioteca de controladores no *ROS*

Para implementar as rotinas de controle e atuação dos motores Dynamixel, era necessário que houvesse algum meio de configurá-lo para operar de maneira desejada, podendo realizar a criação de juntas, e unidades de tração. Especificamente nos motores Dynamixel, isto é possível através da utilização de *drivers*.

Os *drivers* são estruturas de *software* que permitem a compatibilização do dispositivo físico com uma interface computacional, habilitando as suas funções e configurações dentro de um ambiente de *software*, permitindo que o dispositivo possa ser configurado e ter suas funções utilizadas através de comandos provenientes de uma camada de *software* superior.

A movimentação das juntas e eixos do robô se dá pelo uso de servomotores, e para que os mesmos sejam controlados pelo *framework*, que no caso é o *ROS* - é necessário fazer uso de um *driver*.

Diante a variedade de bibliotecas para controlar os motores da dynamixel no *ROS* disponíveis, foi necessário escolher qual será utilizada. Para escolha a biblioteca foram levados alguns parâmetros que influenciam para o fluxo de informações e funcionalidades do robô, assim como complexidade de código, disponibilidade de tutoriais, suporte pela comunidade, as ferramentas disponíveis, compatibilidade do *firmware*, etc.

Foram selecionadas 2 bibliotecas que são disponibilizadas pelo próprio *framework* *ROS*, sendo elas: a *dynamixel_drivers* e a *dynamixel_workbench*. A escolha pela *dynamixel_drivers* se deu pelo fato ser mais velha e por consequência mais materiais disponíveis para consulta, apesar a *workbench* possuir suporte para novas versões do Dynamixel, essa possibilidade não teve muitos benefícios, já que o projeto foi utilizado para versões antigas de motores.

4.3.2 Solução para cinemática

O cálculo da cinemática pode ser realizado de diferentes formas, já que o mesmo parte da modelagem do robô por meio de um conjunto de equações. Existem diferentes solucionadores para problemas de cinemática, que podem utilizar diferentes parâmetros de entrada.

No âmbito da robótica podem ser utilizados tanto os modelos matemáticos já elaborados pelos desenvolvedores, como também o modelo 3D do robô. Esse modelo 3D

é definido geralmente por meio de arquivos do tipo *URDF*, que utilizam uma escrita simples, definindo o robô a partir de seus *links* e juntas. Esse arquivo é o mesmo utilizado para colocar o modelo do robô na simulação, e também é a forma padrão utilizada pelo *software MoveIt!*. Com o estudo do estado da arte fornecido, não era necessário encontrar o conjunto de equações que descrevem o robô, e com a simulação fornecida, também já era possível utilizar o modelo *URDF*. Foi feita uma análise entre as possíveis soluções cinemáticas, buscando encontrar a que garantisse um maior sucesso e facilitasse o desenvolvimento. Levando em consideração a disponibilidade de códigos e tutoriais para serem tomados como base, assim como o uso em projetos semelhantes, a complexidade da aplicação e integração com as estruturas do *ROS*.

Assim levantou-se 3 possíveis soluções para o cálculo da cinemática inversa, sendo elas: o uso do modelo matemático já existente proveniente do estudo do estado da arte, sendo realizada sua solução manualmente por meio de códigos de programação, o uso da ferramenta *MoveIt!* utilizando o modelo *URDF* proveniente da simulação, e o uso da ferramenta *MoveIt!* compatibilizada com modelo matemático.

A uso do modelo matemático completo para o robô, realizando a solução por meio de um código, se mostrou inviável, já que também seria necessário a integração com as estruturas de controle do *ROS*, e mesmo a implementação desse modelo no *MoveIt!* não se mostrou a melhor opção, devido a alta complexidade e a falta de projetos semelhantes para consulta, tal qual a inexistência de tutoriais voltadas para essa aplicação em específico. Assim sendo escolhido o uso da ferramenta *MoveIt!* com o modelo *URDF* proveniente da simulação, já que esse mesmo modelo já é estudado pela equipe, para seu uso na simulação e a aplicação padrão do *MoveIt!* utiliza esse modelo.

Essa solução utiliza os dados sobre o modelo do robô contidos no modelo *URDF* para realizar o cálculo da cinemática de forma analítica, gerando diversas trajetórias e encontrando a melhor possível, baseada nos parâmetros configurados pelo usuário.

4.3.3 Gerenciamento de Energia

A implementação da funcionalidade de gerenciamento de energia foi possível através da utilização de um *hardware* de *Power Management*, uma placa eletrônica, fornecida pelo cliente do projeto, iniciando assim a primeira etapa do desenvolvimento da funcionalidade de gerenciamento de energia, a qual se deu pelo estudo do *hardware*, através da leitura de *datasheets* e esquemas elétricos.

A placa contém sete portas de alimentação gerenciadas por relés digitais sendo cinco delas de 12 Volts e duas de 5 Volts. Dentre as portas de 12 Volts, 4 possuem

regulação de fornecimento de corrente, onde o controle do fornecimento é realizado por um microcontrolador Atmega32U4. Todas as portas possuem sensores de tensão e corrente individuais, facilitando e otimizando o processo de leitura dos . O *firmware* embarcado na placa de *Power Management* possui a principal de função de implementar os relés digitais, onde se realiza uma leitura dos valores de corrente que estão sendo demandados pelas portas.

Para que a integração do *hardware* de *Power Management* fosse realizada ao projeto foi necessário validar o seu funcionamento , e se os valores de tensão fornecidos, estariam de acordo com o configurado. As medições lidas no multímetro e no *software*, foram registradas e comparadas, verificando se os valores de erro eram muito altos. Como mostra a Tabela 4.1 a seguir:

Tabela 4.1: Medições de tensão para o *hardware* de *Power Management*

Porta Lida	Tensão - Multímetro	Tensão - <i>Software</i>
Porta 1	12.03 Volts	12.043 Volts
Porta 2	12.01 Volts	12.037 Volts
Porta 3	12.01 Volts	12.038 Volts
Porta 4	12.01 Volts	12.037 Volts

Foi possível perceber uma pequena variação na leitura em *software* para a leitura realizada pelo instrumento de medição, apesar disso, pelo fato do erro ser de uma ordem baixa para os níveis de operação do robô, considerou-se que esta variação não representaria risco para a operação, validando assim o funcionamento do *hardware* da *Power Management*.

4.4 Simulação

A estrutura do sistema *ROS* e suas ferramentas já compatibilizada faz com que a simulação do sistema impacte de forma efetiva e positiva durante o processo de desenvolvimento. O *software* Gazebo é uma das ferramentas para simulação de ambientes robóticos mais utilizadas atualmente, por apresentar integração nativa com o sistema *ROS* e foi utilizada para o projeto.

Os arquivos para simulação do robô foram fornecidos pelo cliente, e apresentam características semelhantes às esperadas no robô real, como o tipo dos controladores de juntas, que são o padrão do *ROS*, sendo os mesmos utilizados para o robô real, e consistindo assim um parâmetro fundamental para a simulação do sistema de movimentação.

Por apresentar os mesmos tipos de controladores do robô real, foi possível utilizar a simulação para validar a compatibilização do controle da ferramenta *MoveIt!* com os controladores presentes no robô. Essa alternativa possibilitou a compatibilização entre as funcionalidades sem a necessidade do protótipo do robô pronto funcional, economizando tempo do desenvolvimento, já que reduz dependência entre as fases do desenvolvimento.

4.4.1 Simulação para a rotina de ultrapassagem

A automatização dos movimentos do sistema é necessária para que ocorra a ultrapassagem, sendo assim esse conjunto de movimentos denominado de rotina. As estruturas do *ROS* possibilitam a criação de estruturas que quando acionadas realizam comandos específicos.

Por apresentar os mesmo controladores, e com o auxílio do estudo dos movimentos necessários para a ultrapassagem, foi possível desenvolver os códigos que enviam os comandos específicos para os controladores.

Com uso da simulação foi possível desenvolver e testar os serviços do *ROS*, na figura 4.8 é possível observar o serviço de suspender o conjunto de garras em funcionamento:

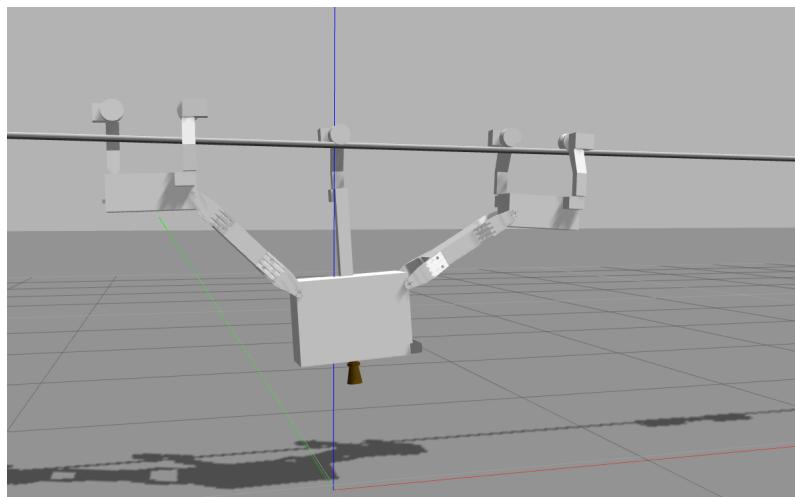


Figura 4.8: Robo *ELIR* no *Gazebo* com garras abertas

4.5 Testes de Movimentação Física

Os testes de movimentação física buscam compreender e validar os movimentos realizados pelo robô, indo desde da análise individual das partes do robô como braços e unidade de tração, até sua movimentação em conjunto.

4.5.1 Testes unitários

Os primeiros testes foram feitos com a estrutura parcialmente montada, já que o objetivo do teste é validar o funcionamento dos controladores de junta do *ROS*, que é a base para o desenvolvimento das funcionalidades de Atuação e Planejamento da Movimentação. Nestes testes, foram estabelecidos os limites de movimentação das juntas, com o intuito de preservar a integridade física dos componentes. As juntas dos braços do robô *ELIR* são compostas por dois servomotores Dynamixel MX-106R fabricados pela Robotis.

No decorrer desses primeiros testes, ocorreram falhas nos motores por excesso de carga em um deles, o que era configurado como mestre. Verificou-se que isso poderia ser contornado com o uso do cabo de sincronização ligando os dois motores de cada junta, já que os motores se comunicariam diretamente entre si para balancear a divisão da carga sobre a junta. Também foi o momento de analisar como se comportavam os servomotores utilizados nas juntas, sob influência do cabo de sincronização.

Tabela 4.2: Sentido de giro dos motores (Cabo de sincronização direto)

Valor pulicado na junta:	Positivo	Negativo
Mestre	Horário	Anti-horário
Escravo	Anti-horário	Horário

Tabela 4.3: Sentido de giro dos motores (Cabo de sincronização cruzado)

Valor pulicado na junta:	Positivo	Negativo
Mestre	Horário	Anti-horário
Escravo	Horário	Anti-horário

Levando em conta que, para realizar o movimento corretamente, os motores tem que se movimentar em sentidos opostos, já que estão fisicamente invertidos, caso seja utilizado o cabo de sincronização cruzado, os motores escravos devem ser configurados com o modo de giro reverso.

4.5.2 Testes na linha de transmissão

O teste no ambiente onde o robô irá operar é de suma importância para o seu desenvolvimento. Tendo como finalidade verificar o comportamento do robô e seus sistemas nessa situação, foram realizados testes de movimentação na linha de transmissão buscando executar etapas que fazem parte da rotina de ultrapassagem. Para verificar o

deslocamento horizontal por meio de roldanas, realizou-se um testes posicionando robô na linha e controlando somente as unidades de tração das roldanas, verificando assim que elas poderiam se soltar da linha. Dessa maneira, concluiu-se que as garras onde estão as roldanas deveriam ter o seu torque habilitado para travá-la na posição, para que o robô não se desprenda da linha.

Durante os testes de movimentação na linha, foram testadas outras etapas da rotina de ultrapassagem. Quando o braço era levantado para retirar as roldanas da linha, todo o robô se inclinava para a frente. Levantou-se a hipótese de que, o fato das juntas dos braços estarem ”relaxadas” permitia essa inclinação. O teste foi repetido com o torque destas juntas habilitado, dessa forma o problema foi contornado.

4.6 *Integração com os subsistemas*

Após a validação do funcionamento dos subsistemas, verificando se estão operando corretamente através dos testes unitários, foi necessário conferir o funcionamento do sistema como um todo, analisando a integração das funcionalidades, com o objetivo de observar se houveram erros no processo de integração. Os testes buscavam seguir com integração simples entre funcionalidades, até os testes finais, envolvendo todas as funcionalidades desenvolvidas durante o projeto.

4.6.1 *Teste dos servomotores em rede*

Como o robô *ELIR* possui ao total 18 servomotores Dynamixel, então torna-se importante verificar o seu comportamento quando todos estão pertencendo a mesma malha de controle. Para isso foi utilizado *hubs* para a separação em 3 grupos, contendo 6 motores por grupo. Para efetuar o teste foi utilizado a biblioteca dos controladores do *ROS* que indica quantos motores estão conectados a unidade de processamento.

Cada grupo de motor foi testado separadamente e todos os 3 foram encontrados, concluindo que as ligações, alimentação e comunicação foram feitas corretamente. Mas ao colocar os 3 grupos de motores, percebeu-se que nem todos os motores eram encontrados.

Buscou-se reduzir as fontes de erro, realizando uma verificação na alimentação e nas ligações responsáveis pela comunicação entre os motores, o que não foi eficiente, assim como a restauração do *firmware* de cada um. Como não haviam mais fontes de erro, buscou-se encontrar motores que poderiam estar induzindo esse problema no sistema. Assim, foi pensado em adicionar motor por motor para observar o comportamento e

a partir disso analisou-se que somente 2 motores específicos causavam falhas na rede, constando que os mesmos estavam com problemas em comunicação em rede e que vieram com defeitos de fábrica. Logo após a troca dos motores defeituosos a comunicação ocorreu de forma coerente e constatou-se que os 18 motores conseguem se comunicar em redes grandes.

4.6.2 Teste de movimentação alimentada por banco de baterias

Para que o robô *ELIR* desempenhasse suas funções de forma autônoma era necessário o uso de baterias que suportasse toda demanda energia do mesmo. Afim de saber quantas baterias iriam ser usadas dentro da estrutura do robô, foi feito uma estimativa a partir

Durante todo desenvolvimento do projeto foi utilizado fontes de bancada onde a tensão era de 14V onde os motores desempenham maior torque. Antes de utilizar as baterias para que o robô pudesse realizar os movimentos na linha, tornou-se importante realizar testes para garantir que a mesma, juntamente com a placa de gerenciamento de energia, fornecem potência suficiente com tensão a 12V para que os motores realizem sua movimentação. Com isso, era interessante verificar por quanto tempo os motores aguentariam na posição que demanda maior torque no qual possui maior carga devido ao momento aplicado ao braço, como mostrada na figura 4.9 a seguir:

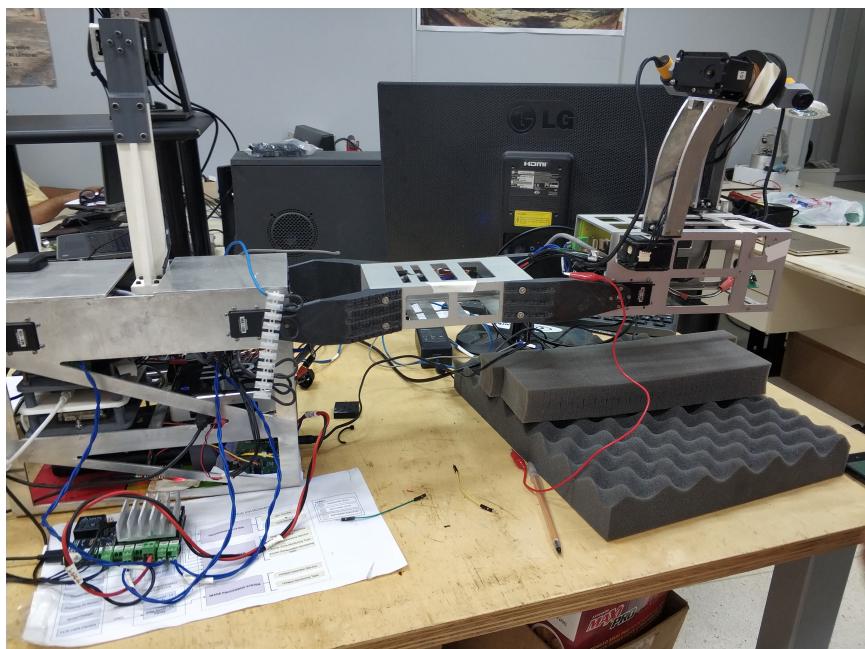


Figura 4.9: Foto do robô na posição que demanda maior torque

Verificou-se que o robô respondeu bem com as baterias ficando nesta posição durante 10 minutos por 3 vezes, validando o seu uso e comprovando que os motores a 12V

fornecidos pela placa realizam torque suficiente para a carga da estrutura.

4.7 Análise Preliminar

Algumas situações só são expostas durante o desenvolvimento do projeto, com a aplicação das ferramentas e a vivência de testes. O desenvolvimento do projeto passou por diversas etapas, onde fora necessário realizar o retrabalho de novos estudos sobre as problema de compatibilização do modelo do robô dentro da plataforma *MoveIt!*, uma vez que o *software* não funciona bem com robôs que possuem apenas dois graus de liberdade, o que é o caso do robô *ELIR*. A observação desse erro é fundamental para o processo de aprendizado no que tange ao desenvolvimento de robótica, tornando o *MoveIt!* uma solução não indicada para o problema da solução da cinemática inversa, porém ainda se mostra muito útil para o planejamento do movimento e integração com outras tecnologias, assim compensando a solução da cinemática manualmente, para projetos de menor complexidade.

Em termos de hardware, os erros que surgiram também foram importantes para ilustrar melhor como os mesmos deveriam ser configurados de maneira correta e também as suas limitações de trabalho, a exemplo dos motores *Dynamixel*, estes mostraram um desempenho mais efetivo ao trabalhar com tensões mais elevadas, 14V ao invés dos tradicionais 12V, diminuindo a corrente demandada durante a operação, otimizando o consumo.

Ainda se tratando do uso dos motores, a necessidade do uso dos cabos de sincronização para evitar erros de sobrecarga foi um fator crucial para o desenvolvimento do projeto. Neste ponto observou-se que os motores, ao trabalharem como *dual-joint* (junta com dois motores), necessitam do uso de cabos de sincronização para transmitir a informação de carga necessária para realização do movimento, balanceando o esforço realizado pelos motores trabalhando em conjunto.

Conclusão

”Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

(Sir Isaac Newton)

Neste trabalho foi desenvolvido o sistema de movimentação para um protótipo de robô de inspeção de linha. O fluxo metodológico foi uma grande conquista desse projeto, onde se buscou seguir as diretrizes de desenvolvimento de projetos robóticos de alto porte, utilizando ferramentas de referência para estabelecer um conceito concreto, e também produzindo diversos tipos de documentação que possibilitaram a produção de um conteúdo palpável em relação a esse trabalho.

O desenvolvimento de aplicações que foi realizado para o projeto, consiste em um conteúdo de suma importância para desenvolvimento de projetos similares, buscou-se utilizar as boas práticas de organização e implementar os padrões utilizados para outros projetos de desenvolvimento.

Inicialmente o projeto consistia em uma fuga da zona de conforto, apresentando diversos conteúdos novos e solicitando uma nova visão sobre o trabalho com engenharia, e com o seu caminhar, saiu da concepção da idéia e desafio do aprendizado para o desenvolvimento de um sistema robótico real.

O conceito gerado para o sistema, utiliza parâmetros de operação semelhantes à sistemas de alta complexidade, apresentando um fluxo de informações de alto nível, possibilitando uma noção sobre o funcionamento do sistema e integração com os outros subsistemas já desenvolvidos.

A organização do sistema, junto com suas ferramentas e conhecimentos produzidos, representa uma grande conquista do projeto. O conhecimento deixado relacionado ao framework *ROS*, as conclusões tiradas da ferramenta *MoveIt!*, assim como o comportamento observado pelos dispositivos físicos faz com que haja uma referência para projetos semelhantes, possibilitando a criação de conceitos cada vez mais consistentes e execução de idéias de forma efetiva.

A estrutura do protótipo montada, com suas ligações para comunicação e alimentação feitas devidamente, assim como esquemáticos desenvolvidos especialmente para o projeto,

possibilita que o mesmo seja tomado como base de estudo, ao se realizar o design e desenvolvimento de outros protótipos.

O uso da estrutura do *ROS* possibilita que seja feita a integração com outros sistemas sem muitos problemas, já que foram adotados os padrões do *framework*, assim possibilitando que o que foi desenvolvido para esse robô, seja utilizado em futuras aplicações, sejam elas tomando como base esse protótipo ou outros semelhantes.

A documentação técnica produzida seguiu de acordo com as orientações de projeto visando o reaproveitamento e continuação do trabalho, atendendo as demandas e solicitações para o desenvolvimento do projeto.

O projeto alcançou as expectativas, problemas inesperados encontrados durante o seu desenvolvimento foram contornados e os grandes desafios do projeto foram concluídos, onde a experiência como um todo foi muito enriquecedora e se deu de forma prazerosa, onde todos os participantes conseguiram aprimorar suas habilidades, crescer como pessoa e como profissional. Pelas palavras do sábio Platão: "A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento."

Referências Bibliográficas

- AL-MUFTI, J. D. I. e. a. *Educação: Um Tesouro a descobrir. Relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o século XXI*. São Paulo, SP, 1997. [2.2](#)
- ASIMOV, I. *I, robot.* [S.l.]: Spectra, 2004. v. 1. [2.4](#)
- BENITTI, F. B. V. e. a. Experimentação com robótica educativa no ensino médio: ambiente, atividades e resultados. *Departamento de Sistemas e Computação Universidade Regional de Blumenau (FURB)*, 2009. [2.2.1](#)
- BOUTEILLE, D.; BOUTEILLE, N. *Les automatismes programmables*. [S.l.]: Cepadues, 1997. [2.4](#)
- DILLENBOURG, P. e. a. Collaborative learning: Cognitive and computational approaches, advances in learning and instruction series. *Elsevier Science, Inc*, 1999. [2.3.2](#)
- ESA. *Applications in Earth Orbit*. European Space Agency, 2014. Disponível em: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Automation_and_Robotics/Applications_in_Earth_Orbit. [2.4.2](#)
- FREIRE, P. *Educação e Mudança*. 24. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Paz e Terra, 2001. [2.1.4](#), [2.2](#)
- GASPARIN, J. L. *Comênia - Coleção Grandes Educadores*. 2011. Atta Mídia e Educação. 24 min. [2.1](#)
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. et al. *Digital image processing*. [S.l.]: Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2008. [2.4.1](#)
- JAHNE, B. *Computer vision and applications: a guide for students and practitioners*. [S.l.]: Elsevier, 2000. [2.4.1](#)
- KARAHOCA, D. Robotics teaching in primary school education by project based learning for supporting science and technology courses. *World Congress on Information Technology*, 2010. [2.3.1](#), [2.3.2](#)
- LARCHERT, J. M. *Pedagogia: didática e tecnologia I*. Ilhéus, BA: UAB/ UESC, 2010. v. 5. (2, v. 5). [2.1](#), [2.1.1](#), [2.1.2](#), [2.1.3](#), [2.1.4](#)
- LENT, R. Cem bilhões de neurônios. *Conceitos fundamentais de neurociência*, v. 2, p. 631–639, 2010. [2.4.1](#)
- LIBÂNEO, J. C. *Democratização da Escola Pública: A pedagogia Crítico-Social dos Conteúdos*. 21. ed. São Paulo, SP: Loyola,, 2006. [2.1.1](#), [2.1.2](#), [2.2](#)
- MAISONNETTE, R. *A utilização dos recursos informatizados a partir de uma relação inventiva com a máquina: a robótica educativa*. 2002. Disponível em: www.proinfo.gov.br. Acesso: 10 ago 2019. [2.3](#)
- MARTINS, P. L. O. *Didática Teórica e Didática prática: Para além do confronto*. São Paulo, SP: Loyola, 1997. [2.1.4](#)

- MURPHY, R. R. *Introduction to Al robotics*. [S.l.]: The MIT Press, 2000. [2.4.1](#), [2.4](#), [2.5](#)
- NASA. *Why do we send robots to space?* 2017. Disponível em: [\(https://spaceplace.nasa.gov/space-robots/en/\)](https://spaceplace.nasa.gov/space-robots/en/). [2.4.2](#)
- NASCIMENTO, J. B. d. A robÓtica educacional no ensino fundamental. *Mostra Nacional de Robótica (MNR)*, 2017. [2.3](#)
- PALANGANA, I. C. *Desenvolvimento e Aprendizagem em Piaget e Vigotski: A relevância Social*. sixth. [S.l.]: Summus Editorial, 2015. [2.3.4](#)
- PUGLIESE, G. *STEM: O movimento, as críticas e o que está em jogo*. 2018. Disponível em: [\(http://porvir.org/stem-o-movimento-as-criticas-e-o-que-esta-em-jogo/\)](http://porvir.org/stem-o-movimento-as-criticas-e-o-que-esta-em-jogo/). [2.2.2](#)
- ROCHA, T. Aprendizagem e desenvolvimento em vygotsky. *UNICERP*, 2013. Disponível em: [2.3.4](http://www.unicerp.edu.br/images/revistascientificas/athoseethos/1Acesso: 12 set 2019. <a href=)
- SAVIANI, D. *Pedagogia histórico-crítica: primeiras aproximações*. 11. ed. Campinas, SP: Autores Associados, 2011. [2.1](#)
- SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer handbook of robotics*. [S.l.]: Springer, 2016. [2.4.2](#)
- SICILIANO, B. et al. *Robotics: modelling, planning and control*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. [2.4](#), [2.2](#)
- WELLEK, R. Karel čapek. *The Slavonic and East European Review*, JSTOR, v. 15, n. 43, p. 191–206, 1936. [2.4](#)