

MATHEUS RAMOS MORGADO

**Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado
para skate da Fábrica do Futuro POLI**

São Paulo
2019

MATHEUS RAMOS MORGADO

**Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado
para skate da Fábrica do Futuro POLI**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia

São Paulo
2019

MATHEUS RAMOS MORGADO

**Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado
para skate da Fábrica do Futuro POLI**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia de
Sistemas Eletrônicos

Orientadores:
Profa. Dra. Roseli de Deus Lopes
Prof. Dr. Eduardo de Senzi Zancul

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na publicação

Morgado, Matheus Ramos

Projeto e desenvolvimento de sistema eletrônico embarcado para skate
da Fábrica do Futuro POLI / M. R. Morgado -- São Paulo, 2019.
59 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Fábrica de ensino 2.Indústria 4.0 3.Sistemas embarcados 4.Digital
twin I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e irmã, pelo constante apoio e incentivo nos meus projetos.

À minha companheira, Camila, por me acompanhar nos momentos mais difíceis.

Ao Archisman, Beatriz, Henrique, Lorennna, Lucas, Luiz, Mariana, e todos que trabalham na Fábrica do Futuro, por colaborarem com sugestões para o projeto.

À Isabella, por indicar fabricantes de circuito impresso para o projeto.

Ao Daniel, por realizar a impressão de peças 3D para o projeto.

Ao Prof. Seabra, pelos conselhos e recomendações durante todo o projeto.

À Profa. Roseli e Prof. Eduardo, por desde 2014 confiarem no meu trabalho e me proporcionarem a participação em projetos acadêmicos incríveis, além de trabalharem ativamente por uma educação mais inovadora e conectada com a realidade da indústria e os problemas da sociedade.

Ao Fundo Patrimonial Amigos da Poli, por investir direta e indiretamente na minha formação profissional e no desenvolvimento da Fábrica do Futuro.

RESUMO

Com o crescente uso de dados no desenvolvimento de produtos, o impacto da Indústria 4.0 no setor industrial e a implementação de fábricas de ensino em diversas universidades ao redor do mundo, torna-se evidente a necessidade da Escola Politécnica da USP se atualizar para acompanhar as inovações de diferentes áreas. O objetivo principal deste projeto consiste em contribuir no aperfeiçoamento do produto-exemplo estudado na Fábrica do Futuro POLI, uma fábrica de ensino inspirada nos conceitos da Indústria 4.0. Foi projetado e implementado um sistema eletrônico para ser fixado ao skate da fábrica, em que é possível monitorar a velocidade atingida, a distância percorrida e os movimentos do skate. A implementação desse sistema foi dividida em dois módulos, um módulo responsável pelo cálculo de velocidade e distância utilizando um sensor magnético, e um outro módulo que calcula a posição e orientação do skate utilizando um acelerômetro e giroscópio. Como resultado, obteve-se um sistema de monitoramento completo com potencial para contribuir com pesquisas e atividades acadêmicas realizadas na Fábrica do Futuro POLI.

Palavras-chave: Fábrica de ensino. Indústria 4.0. Sistemas embarcados. *Digital twin*.

ABSTRACT

With the increasing use of data in product development, the impact of Industry 4.0 on the industrial sector and the implementation of educational factories in several universities around the world, it becomes evident that "Escola Politécnica - USP" needs to keep abreast of innovations in different areas. The main objective of this project is to contribute to the improvement of the product-example studied in "Fábrica do Futuro POLI", a learning factory inspired by the concepts of Industry 4.0. An electronic system was designed and implemented to be fixed to the skateboard of the factory, in which it was possible to monitor the speed reached, the distance traveled and the movements of the skate. The implementation of this system was divided into two modules, a module responsible for calculating speed and distance using a magnetic sensor, and another module that calculates the position and orientation of the skate using an accelerometer and gyroscope. As a result, a complete monitoring system with the potential to contribute to research and academic activities carried out at "Fábrica do Futuro POLI" was obtained.

Keywords: Learning factory. Industry 4.0. Embedded systems. Digital twin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Projeto de uma fábrica com tecnologias da 4 ^a Revolução Industrial	13
Figura 2	Contextualização da Fábrica do Futuro POLI	14
Figura 3	Vista explodida de exemplo de motor de skate elétrico	17
Figura 4	Exemplo de sistema elétrico e de controle de skate elétrico	17
Figura 5	Exemplo de aplicativo para skate conectado	18
Figura 6	Árvore de objetivos	19
Figura 7	Principais dimensões do <i>shape</i> de um skate	22
Figura 8	Mercado global de <i>digital twins</i>	24
Figura 9	Módulo A: Representação do Nível 0	29
Figura 10	Módulo B: Representação do Nível 0	30
Figura 11	Módulo A: Representação do Nível 1	31
Figura 12	Módulo B: Representação do Nível 1	32
Figura 13	Planejamento de atividades para 2019	33
Figura 14	Painel de gerenciamento de tarefas	34
Figura 15	Módulo A: Identificação do ímã acoplado na roda	36
Figura 16	Módulo A: Exemplo de funcionamento do teste realizado	37
Figura 17	Módulo B: Simulação da movimentação do skate	38
Figura 18	Esquemas elétricos: Módulo A e Módulo B	39
Figura 19	Layout da PCI: Módulo A e Módulo B	40
Figura 20	PCIs fabricadas: Módulo A (frente) e Módulo B (verso)	41
Figura 21	Módulo A: Banco de dados na nuvem	42
Figura 22	Módulo A: Interface com última medição realizada e led desligado	42

Figura 23	Módulo A: Interface com dados históricos e led ligado	43
Figura 24	Módulo B: Interface de visualização 3D e skate físico	44
Figura 25	Módulo B: Variáveis utilizadas para representar a movimentação do skate	44
Figura 26	Módulo B: Interface de monitoramento apresentando <i>Roll</i> , <i>Pitch</i> e <i>Yaw</i>	45
Figura 27	Dimensões do suporte para módulos	45
Figura 28	Visualização 3D do projeto de suporte para módulos	46
Figura 29	Resultado da impressão 3D do suporte para módulos	46
Figura 30	Módulos eletrônicos com componentes soldados e suporte	47
Figura 31	Módulos eletrônicos fixados no skate	47
Figura 32	Visão geral do skate com módulos fixados	48
Figura 33	Módulo de iluminação em funcionamento	48
Figura 34	Skate com módulos em funcionamento	49
Figura 35	Módulo A: Demonstração de funcionamento	50
Figura 36	Módulo A: Visualização do banco de dados durante teste	51
Figura 37	Módulo B: Demonstração de funcionamento	52
Figura 38	Apresentação do projeto em reportagem televisiva	53
Figura 39	Apresentação do projeto em visita técnica	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos de marketing	20
Tabela 2	Requisitos de marketing x Requisitos de engenharia	21
Tabela 3	Comparativo de modelos nacionais de skate elétrico	23
Tabela 4	Alternativas de solução x Requisitos de engenharia	25
Tabela 5	Análise de alternativas: Didático	26
Tabela 6	Análise de alternativas: Monitoramento de velocidade e distância	27
Tabela 7	Análise de alternativas: Monitoramento de movimentos	27
Tabela 8	Solução escolhidas x Requisitos de engenharia	28
Tabela 9	Módulo A: Descrição do Nível 0	30
Tabela 10	Módulo B: Descrição do Nível 0	30
Tabela 11	Módulo A: Descrição de custos de componentes	35
Tabela 12	Módulo B: Descrição de custos de componentes	35
Tabela 13	Módulo A: Resultados do teste com protótipo	37
Tabela 14	Módulo A: Resultados do teste com módulo implementado	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO	13
1.2	IDENTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE	15
1.3	DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DO PROJETO	15
1.4	PESQUISA DE LEVANTAMENTO DA SITUAÇÃO	16
1.4.1	Visão geral	16
1.4.2	Tecnologias relevantes	17
1.4.3	Árvore de objetivos	18
2	ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS	20
2.1	REQUISITOS DE MARKETING	20
2.2	REQUISITOS DE ENGENHARIA	20
2.3	RESTRIÇÕES TÉCNICAS	21
2.4	BENCHMARKING COMPETITIVO	22
2.4.1	Principais dimensões de um skate	22
2.4.2	Mercado nacional de skates elétricos	23
2.4.3	Mercado global de <i>digital twins</i>	24
3	GERAÇÃO DE CONCEITOS	25
3.1	ALTERNATIVAS	25
3.2	AVALIAÇÃO INICIAL	25
3.3	ANÁLISE DE FORÇAS E FRAQUEZAS	25
3.3.1	Didático	26
3.3.2	Monitoramento de velocidade e distância	26
3.3.3	Monitoramento de movimentos	27
3.4	ALTERNATIVAS ESCOLHIDAS	28
4	DECOMPOSIÇÃO FUNCIONAL	29

4.1	PROJETO NÍVEL 0	29
4.1.1	Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância	29
4.1.2	Módulo B - Monitoramento de movimentos	30
4.2	PROJETO NÍVEL 1	31
4.2.1	Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância	31
4.2.2	Módulo B - Monitoramento de movimentos	31
5	GERENCIAMENTO DO PROJETO	33
5.1	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	33
5.2	GERENCIAMENTO DE TAREFAS	34
5.3	ORÇAMENTO E COMPRAS	34
6	PROTOTIPAÇÃO	36
6.1	MÓDULO A - MONITORAMENTO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA	36
6.2	MÓDULO B - MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS	38
7	IMPLEMENTAÇÃO	39
7.1	DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE	39
7.1.1	Esquema elétrico	39
7.1.2	Layout de placa de circuito impresso	40
7.1.3	Fabricação de placa de circuito impresso	40
7.2	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE	41
7.2.1	Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância	41
7.2.2	Módulo B - Monitoramento de movimentos	43
7.3	FABRICAÇÃO DE SUPORTE PARA MÓDULOS	45
7.4	MONTAGEM E FIXAÇÃO DE MÓDULOS	46
8	RESULTADOS	49
8.1	VISÃO GERAL	49
8.2	MÓDULO A - MONITORAMENTO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA	50
8.3	MÓDULO B - MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS	52

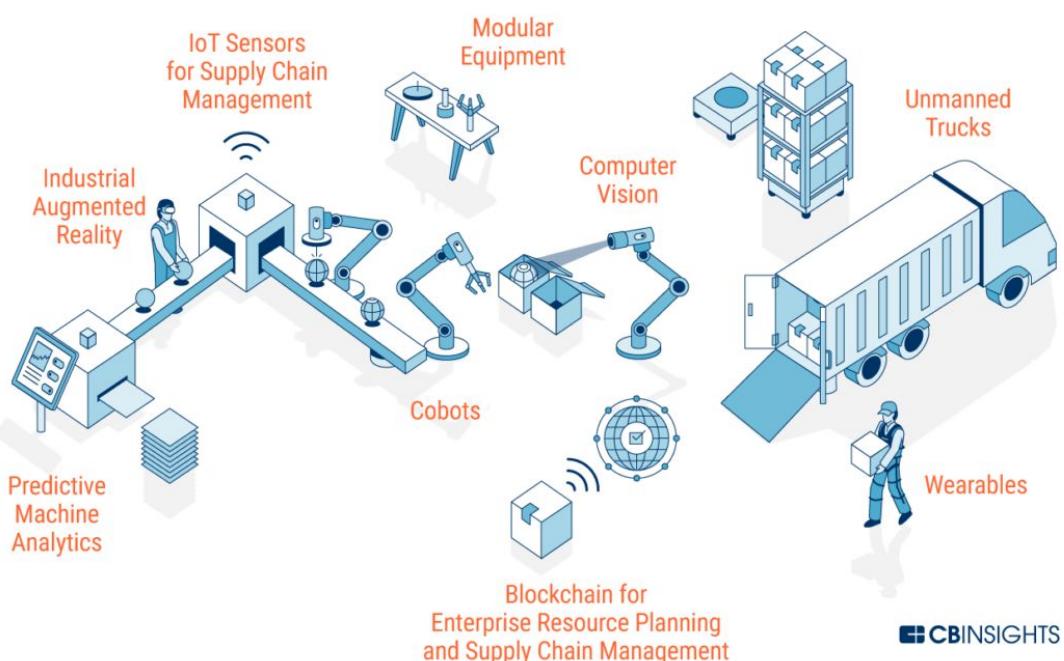
8.4	APRESENTAÇÕES EXCLUSIVAS	53
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	APÊNDICE A - <i>Ranking</i> de Objetivos	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROJETO

O presente trabalho está inserido no âmbito da Fábrica do Futuro POLI, um novo laboratório didático coordenado pelo curso de Engenharia de Produção, que aplica o conceito de indústria 4.0 em um ambiente de ensino e pesquisa (NAOE, 2016), onde estudantes de diferentes cursos de engenharia podem entender como as tecnologias da chamada Quarta Revolução Industrial (LASI et al., 2014) podem ser utilizadas na indústria.

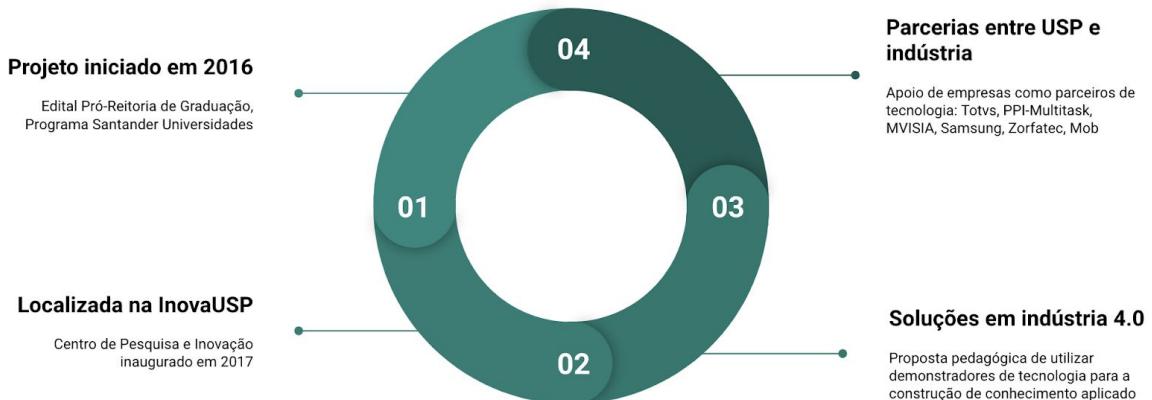
Figura 1 - Projeto de uma fábrica com tecnologias da 4^a Revolução Industrial



Fonte: CB INSIGHTS, 2018.

A concepção desse laboratório de ensino segue uma tendência já observada em diferentes países e escolas de engenharia (WAGNER et al., 2012). Além disso, a implementação de uma fábrica de aprendizagem se baseia em três princípios: aulas expositivas não são o suficiente para o aprendizado; estudantes se beneficiam de experiências interativas *hands-on*; e a participação em conjunto e integrada de alunos, faculdade e indústria no processo de aprendizagem, gera benefícios tangíveis para todos os envolvidos (LAMANCUSA et al., 2008).

Figura 2 - Contextualização da Fábrica do Futuro POLI



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desde a sua concepção em 2015, a Fábrica do Futuro POLI tem sido objeto de estudo para diversos estudantes de graduação e pós-graduação, principalmente do curso de Engenharia de Produção. Descreve-se, a seguir, o conteúdo de três trabalhos de formatura realizados no âmbito da Fábrica do Futuro POLI, relevantes e relacionados a este trabalho.

O primeiro trabalho foi responsável por definir o escopo da fábrica e mapear a infraestrutura necessária para implementação. Após um extenso estudo de iniciativas relacionadas, recomenda que todos os processos deveriam ser guiados por um produto-exemplo, sendo sugerido como produto representante uma bicicleta (SILVA, 2015).

Já no trabalho subsequente, após uma revisão do projeto de concepção da fábrica e da escolha do produto-exemplo, recomenda utilizar o skate como produto-exemplo, tendo como referência os seguintes critérios: variedade de materiais e processos produtivos; simplicidade da estrutura e de seus componentes; possibilidade de incorporar serviços agregados; e facilidade em realizar uma produção customizada (NAKANO, 2016). Além disso, o trabalho também detalha os componentes que fariam parte da fábrica e estabelece um foco maior na montagem do skate e não na produção de peças para o skate (CHENG, 2016).

Por fim, o terceiro e mais recente trabalho relacionado à Fábrica do Futuro POLI, detalha a implementação de uma versão inicial do laboratório de ensino, descrevendo com detalhes os demonstradores para o ensino de tecnologias

relacionadas à indústria 4.0. Em relação ao produto-exemplo, o autor sugere que o skate tivesse uma caixa de conectividade acoplada à sua estrutura para possibilitar o skate se conectar à internet e transmitir informações como distância percorrida e nível de desgaste das rodas (GUIMARÃES, 2017).

1.2 IDENTIFICAÇÃO DAS NECESSIDADES DO CLIENTE

A partir da análise dos trabalhos anteriores sobre a Fábrica do Futuro POLI e de entrevistas com os atuais responsáveis pelo laboratório, foi identificado que o produto-exemplo, em suas condições no momento do início deste trabalho, ainda era muito simples e não possuía nenhum tipo de conectividade ou sensoriamento, o que impossibilitava a criação de um modelo digital do skate que conseguisse representar o produto físico real.

Considerando as limitações funcionais do produto-exemplo naquele momento e que o desenvolvimento de um *digital twin* promoveria uma integração ciber-física da manufatura (QI; TAO, 2018) na Fábrica do Futuro POLI, foi identificada a necessidade do projeto e desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado para obter dados do skate, a fim de possibilitar futuras pesquisas e análises com os dados obtidos.

1.3 DECLARAÇÃO DOS OBJETIVOS DO PROJETO

O objetivo deste projeto foi desenvolver um sistema eletrônico para ser acoplado ao skate da Fábrica do Futuro POLI, permitindo a aquisição de dados que serão utilizados inicialmente para aprimorar o modelo digital do produto-exemplo, podendo futuramente possibilitar análises de dados mais complexas como o estudo do comportamento do usuário com o skate e a previsão da manutenção do skate.

O sistema possibilitará ao estudante que visitar a Fábrica do Futuro POLI interagir com o skate em tempo real e obter dados como velocidade atingida e distância percorrida, além de permitir que o professor desenvolva atividades didáticas práticas e discussão sobre as tecnologias embarcadas no skate.

Espera-se que este projeto sirva como base para novos trabalhos de formatura e que sirva de exemplo e contribua para uma maior integração de atividades da Fábrica do Futuro POLI com outros espaços e laboratórios da POLI-USP focados em inovação (InovaLab@Poli), empreendedorismo (Núcleo de Empreendedorismo da USP) e tecnologias móveis (Samsung OCEAN USP).

1.4 PESQUISA DE LEVANTAMENTO DA SITUAÇÃO

1.4.1 Visão geral

Os desafios relacionados à mobilidade urbana têm sido pauta para o desenvolvimento de políticas públicas, projetos acadêmicos de pesquisa e modelos de negócio inovadores relacionados ao conceito de servitização (BAINES et al., 2007).

No Brasil, a mais recente empresa que decidiu entrar no mercado de mobilidade chama-se Yellow, uma startup que oferece como serviço o compartilhamento de bicicletas e patinetes elétricos. Apesar de ser uma solução nova no Brasil, esse mesmo modelo já foi testado e replicado em diversos países como China, Estados Unidos e França (BARIFOUSE, 2018).

Além de bicicletas e patinetes elétricos, os skates elétricos também estão sendo utilizados, principalmente no chamado *first mile/last mile* – trajetos curtos antes e depois de usar transporte público.

Diversas empresas têm se destacado no mercado de skates elétricos, mas uma em especial está atraindo altos investimentos: a Inboard Technology. Após arrecadar mais de 400 mil dólares numa plataforma de *crowdfunding*, a empresa, que se diferencia por integrar a bateria e toda o circuito eletrônico ao *shape* do skate, recebeu na sua última rodada de investimentos cerca de 8 milhões de dólares (SHIEBER, 2017).

Visto que o esporte *skateboarding* será uma nova modalidade nos próximos jogos olímpicos, em 2020, existe um potencial crescimento de atletas profissionais nos próximos anos, assim como o surgimento de dispositivos que consigam

monitorar as manobras realizadas pelo skatista e de empresas que ofereçam serviços a fim de colaborar com a preparação de atletas para competições.

1.4.2 Tecnologias relevantes

A partir da pesquisa de skates tecnológicos de referência no mercado, foi possível perceber que a instalação de motores elétricos já é uma realidade em skates comercializados fora do Brasil, e o que diferencia uma empresa da outra costuma ser a potência do motor oferecido e o serviço agregado à motorização.

Figura 3 - Vista explodida de exemplo de motor de skate elétrico



Fonte: INBOARD TECHNOLOGY, 2016.

Além disso, algumas empresas, como a Mellow Boards, oferecem ao skatista a possibilidade de controlar a velocidade do skate por meio de um controle físico ou integrado a um aplicativo no *smartphone*.

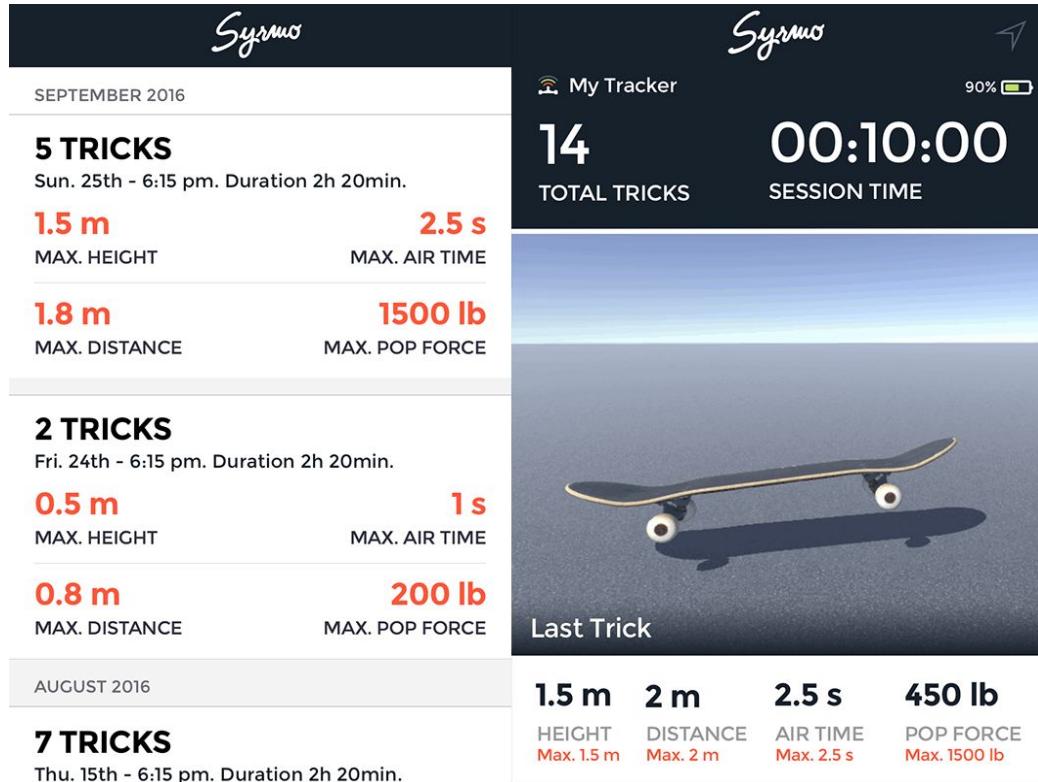
Figura 4 - Exemplo de sistema elétrico e de controle de skate elétrico



Fonte: MELLOW BOARDS, 2017.

Já a Syrmo, uma *startup* criada em 2013, desenvolveu um dispositivo que após ser acoplado ao skate, transmite via tecnologia *Bluetooth* os movimentos do skate para um aplicativo, permitindo acompanhar em tempo real o skatista.

Figura 5 - Exemplo de aplicativo para skate conectado



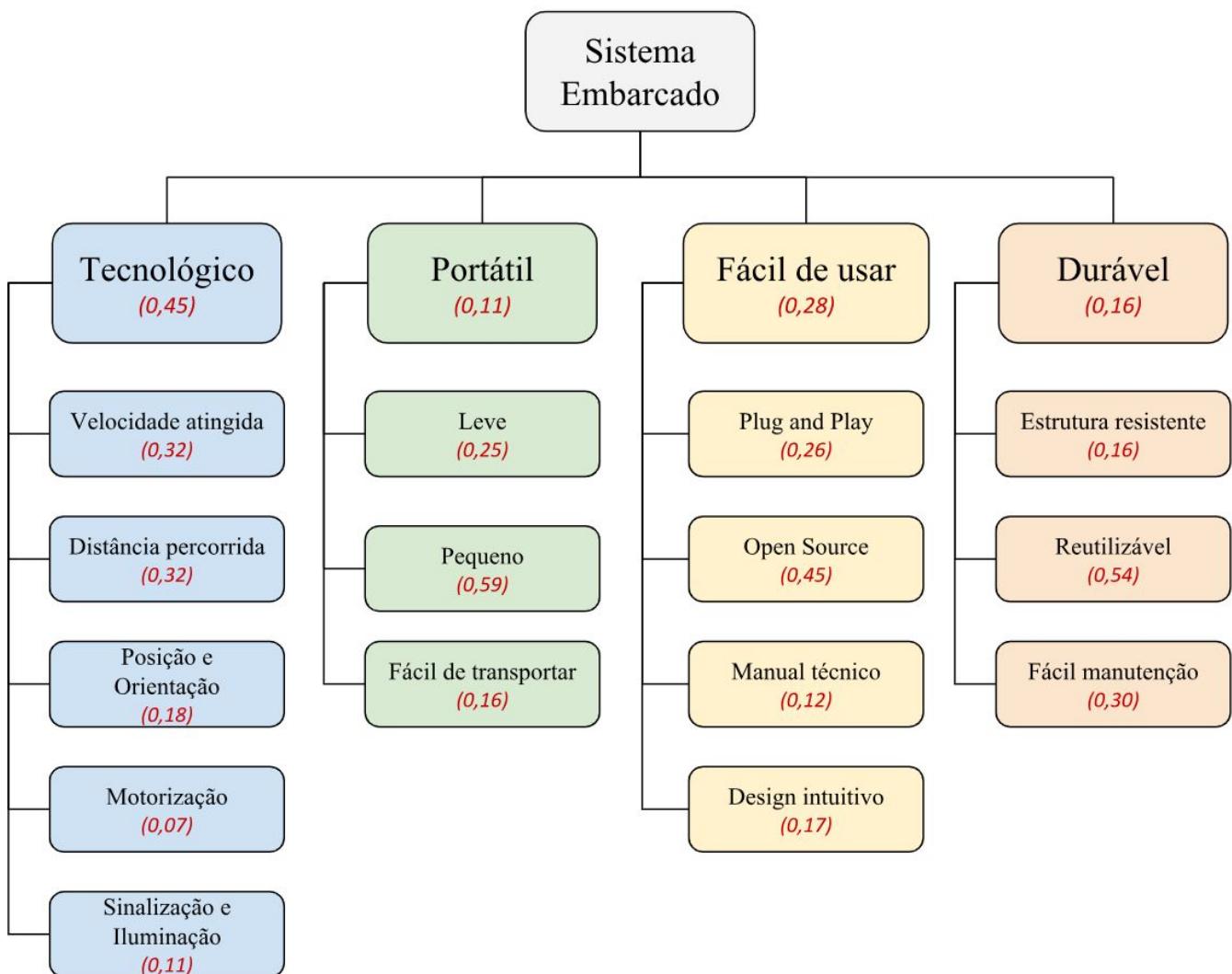
Fonte: SYRMO, 2014.

1.4.3 Árvore de objetivos

Por meio da realização de entrevistas e conversas informais com pessoas relacionadas à Fábrica do Futuro POLI com amigos que andam de skate frequentemente e com colegas de curso, foi possível obter uma lista de requisitos e funcionalidades relevantes para um skate moderno e tecnológico.

Após analisar cada item, chegou-se a 15 necessidades hierarquizadas por similaridade funcional, para as quais foram calculados pesos a partir do ranqueamento de objetivos, permitindo assim a construção completa da árvore de objetivos. Os cálculos realizados para obter cada peso mostrado na árvore de objetivos estão detalhados no Apêndice A.

Figura 6 - Árvore de objetivos



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 ESPECIFICAÇÃO DE REQUISITOS

2.1 REQUISITOS DE MARKETING

A partir da análise realizada para obter os pesos apresentados anteriormente na árvore de objetivos, foi possível definir uma lista de requisitos de marketing para o projeto de sistema eletrônico embarcado.

Tabela 1 - Requisitos de marketing

#	Requisitos de Marketing
1	Medição da velocidade atingida
2	Medição da distância percorrida
3	Monitoramento da posição e orientação
4	Motorização
5	Sistema de sinalização e iluminação
6	Leve
7	Pequeno
8	Fácil de transportar
9	<i>Plug and Play</i> (conexão rápida e prática)
10	Uso de ferramentas <i>Open Source</i>
11	Manual técnico bem elaborado
12	Design intuitivo (fácil usabilidade)
13	Estrutura resistente
14	Reutilizável
15	Fácil manutenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 REQUISITOS DE ENGENHARIA

Após a definição dos requisitos de marketing, foram especificados e justificados os requisitos de engenharia correspondentes para cada grupo de requisitos de marketing do sistema eletrônico embarcado.

Tabela 2 - Requisitos de marketing x Requisitos de engenharia

Requisitos de Marketing	Requisitos de Engenharia	Justificativa
6. <i>Leve,</i> 7. <i>Pequeno,</i> 8. <i>Fácil de transportar</i>	As dimensões não devem ultrapassar 4" x 2" x 8" (L x A x P).	O sistema deve ser acoplado abaixo da prancha do skate no espaço entre os pares de rodas. Estimativa realizada a partir do estudo de modelos de skates.
4. <i>Motorização,</i> 5. <i>Sistema de sinalização e iluminação,</i> 13. <i>Estrutura resistente,</i> 14. <i>Reutilizável,</i> 15. <i>Fácil manutenção</i>	O custo de produção total do sistema e do skate não deve exceder o valor de R\$ 800.	Estimativa baseada na análise de preço de skates elétricos vendidos no Brasil.
9. <i>Plug and Play,</i> 11. <i>Manual técnico bem elaborado,</i> 12. <i>Design intuitivo</i>	O tempo médio para explicação, instalação e configuração do sistema não deve ultrapassar 30 minutos.	Considerando uma explicação didática eficiente para estudantes sem conhecimentos prévios do sistema, estima-se que 30 minutos seja suficiente.
1. <i>Medição da velocidade atingida,</i> 2. <i>Medição da distância percorrida,</i> 10. <i>Open Source</i>	O usuário deve conseguir acompanhar a velocidade atingida e a distância percorrida por meio de um dispositivo móvel.	A integração do skate a um aplicativo estimula o desenvolvimento de projetos e amplia o número de tópicos estudados a partir do produto-exemplo.
3. <i>Monitoramento da posição e orientação,</i> 10. <i>Open Source</i>	O sistema deve implementar o monitoramento da posição e orientação do skate durante uso.	O monitoramento constante dos movimentos do skate permite o desenvolvimento de um modelo 3D digital aprimorado do skate físico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3 RESTRIÇÕES TÉCNICAS

Foi definido que a escolha de componentes do sistema eletrônico deveria considerar itens acessíveis e de baixo custo, para facilitar a reposição em caso de mau funcionamento e não comprometer o orçamento da Fábrica do Futuro POLI. Por isso, foi selecionado para uso neste projeto o microcontrolador ESP8266 NodeMcu

ESP-12, em razão de seu baixo custo e fácil acesso. Também foi considerada a otimização da eficiência energética do sistema, para evitar a necessidade de carregamento frequente da bateria que fornece energia elétrica ao sistema.

Uma vez que é esperado que a Fábrica do Futuro POLI receba a visita e colaboração de diversos estudantes, professores e pesquisadores, a placa de circuito impresso foi projetada e desenvolvida para ser relativamente fácil de ser compreendida e não apresentar riscos de segurança para os visitantes.

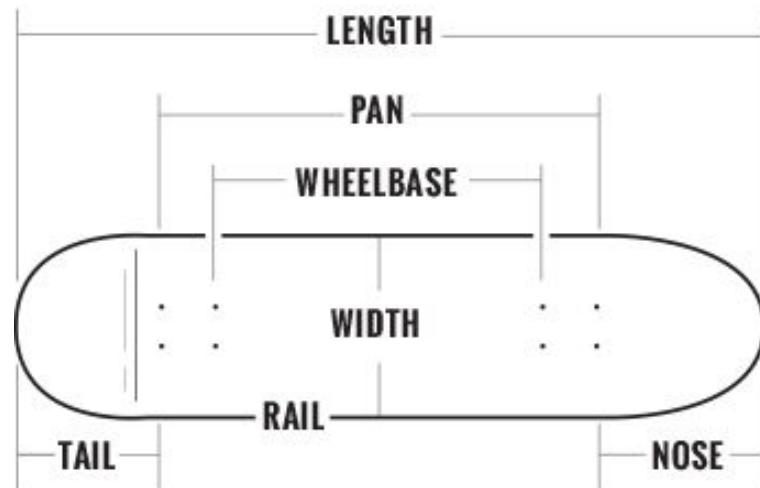
2.4 BENCHMARKING COMPETITIVO

2.4.1 Principais dimensões de um skate

Utilizando como referência o modelo de skate da Fábrica do Futuro POLI, foi realizada uma pesquisa para entender a variação das dimensões do *shape* de um skate convencional. Esse estudo foi importante para obter uma estimativa do espaço disponível para o acoplamento do sistema eletrônico embarcado no skate.

Em relação à largura (*width*) os modelos de skates variam entre 7" e 10", essa costuma ser a principal dimensão para escolha de um skate. Enquanto que a distância entre parafusos internos (*wheelbase*) varia entre 13" e 15".

Figura 7 - Principais dimensões do *shape* de um skate



Fonte: WAREHOUSE SKATEBOARDS, 2014.

2.4.2 Mercado nacional de skates elétricos

Uma vez que não foi encontrado um produto comercializado no Brasil parecido com o projeto de sistema eletrônico embarcado proposto, foi realizada uma análise comparativa de modelos de skates elétricos, visto que uma evolução provável desse trabalho seja o desenvolvimento de um módulo de motorização.

A principal conclusão obtida da análise de skates elétricos nacionais foi que a variação do preço está diretamente relacionado à potência do motor, sendo que as demais especificações são bem semelhantes entre os modelos analisados.

Tabela 3 - Comparativo de modelos nacionais de skates elétricos

	Audisat SE100	Maxfind MaxC	Maxfind MaxA
Preço	R\$819,00	R\$1.999,90	R\$2.990,00
Controle remoto	Possui	Possui	Possui
Velocidade máxima	20 km/h	20 km/h	28 km/h
Peso	5,6 kg	3,5 kg	5,5 kg
Peso máximo suportado	120 kg	80 kg	100 kg
Potência do motor	350 W	500 W	1000 W
Capacidade da bateria	2200 mAh	2200 mAh	2200 mAh
Autonomia da bateria	3 horas	14 km	12 km
Fonte	https://www.submarino.com.br/produto/28890426/skate-eletrico-audisat-se-100-10km-h-120kg	https://www.submarino.com.br/produto/31100178/skate-eletro-maxfind-maxc-preto	https://www.submarino.com.br/produto/43131561/skate-eletro-maxfind-max-a

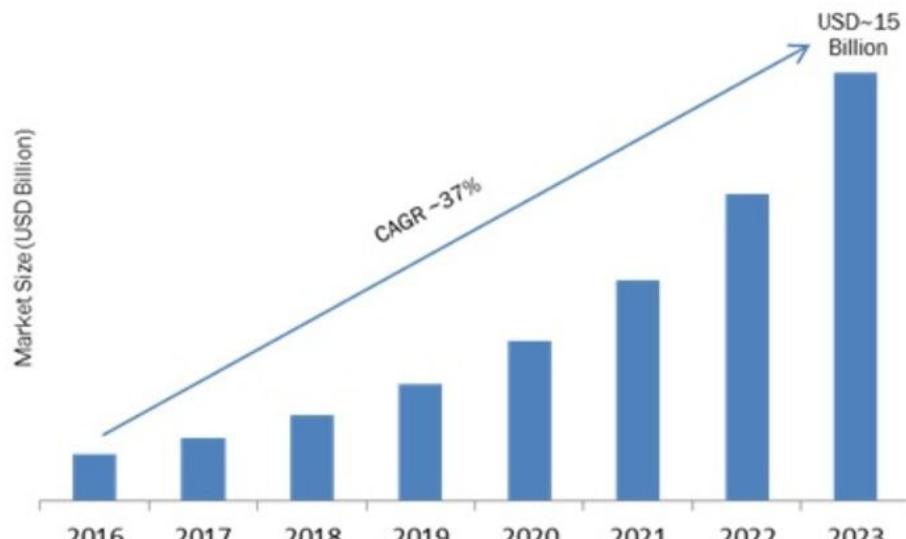
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.3 Mercado global de *digital twins*

Dado que o sistema eletrônico que será acoplado no skate tem como principal objetivo adquirir dados para aprimorar o modelo digital do produto-exemplo, foi realizada uma análise das empresas que têm investido no mercado de *digital twins* – termo técnico utilizado para se referir à réplica digital de um sistema físico.

De acordo com relatório do Instituto Market Research Future (2018), espera-se que o mercado global de *digital twin* tenha um crescimento de 2017 até 2023 de 37%. Além disso, atualmente as principais aplicações dessa tecnologia têm sido para o *design* de aeronaves e turbinas, sendo as corporações de destaque desse setor: General Electric, IBM Corporation, Microsoft Corporation, Oracle Corporation, Cisco Systems, Inc., PTC, Inc., Ansys, Inc., Dassault Systèmes, Siemens AG, Robert Bosch GmbH.

Figura 8 - Mercado global de *digital twins*



Fonte: MARKET RESEARCH FUTURE, 2018.

3 GERAÇÃO DE CONCEITOS

3.1 ALTERNATIVAS

Após definir e analisar todas as especificações de requisitos de marketing e engenharia do projeto, foi realizado um *brainstorming* de possíveis soluções para cada requisito de engenharia.

Tabela 4 - Alternativas de solução x Requisitos de engenharia

Dimensões restritas	Baixo custo	Didático	Monitoramento de velocidade e distância	Monitoramento de movimentos
Componentes SMD	Componentes usados ou seminovos	Manual técnico	Sensor de efeito hall	Acelerômetro e Giroscópio
Modularização	Ferramentas de laboratórios da USP	Treinamento de monitores	Sensor de velocidade encoder	Integração com smartphone
		Vídeo-aula		

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 AVALIAÇÃO INICIAL

A partir de uma avaliação breve das alternativas de solução, considerou-se descartar: o uso de componentes SMD pela complexidade técnica e alto custo; e a compra de componentes usados ou seminovos pela dificuldade de analisar a qualidade e procedência.

3.3 ANÁLISE DE FORÇAS E FRAQUEZAS

Para avaliar as alternativas de solução remanescentes, utilizou-se o método de análise de forças e fraquezas, em que se atribui pesos para cada ponto forte e fraco, sendo que no final, a alternativa com maior soma é escolhida como solução mais adequada para ser desenvolvida.

3.3.1 Didático

Para o requisito didático, o resultado da análise de forças e fraquezas foi: manual técnico (+2), treinamento de monitores (-1) e videoaula (-1).

Tabela 5 - Análise de alternativas: Didático

	Forças	Fraquezas
Manual técnico	<ul style="list-style-type: none"> • Alta padronização (+ + +) • Realização de atualizações e correções de forma fácil (+ +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de imprimir novas versões em caso de atualização (-) • Pouca interação com o usuário (- - -)
Treinamento de monitores	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição da demanda do professor responsável (+ + +) • Compartilhamento do conhecimento (+ +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de realizar edital de inscrição e treinamentos (- -) • Alta rotatividade (- - - -)
Videoaula	<ul style="list-style-type: none"> • Conteúdo apresentado de forma interativa (+ + + +) • Demonstração de situações na prática (+ + +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento complexo para obter uma didática eficiente (- - -) • Dificuldade de acessar rapidamente um tópico específico (- - - -)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Monitoramento de velocidade e distância

Para o requisito monitoramento de velocidade atingida e distância percorrida, o resultado da análise de forças e fraquezas foi: sensor de efeito hall (+1) e sensor de velocidade encoder (-2).

Tabela 6 - Análise de alternativas: Monitoramento de velocidade e distância

	Forças	Fraquezas
Sensor de efeito hall	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implementação do sensor (+ +) • Não interfere na estrutura do skate (+ + + +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de interferência eletromagnética (---) • Necessidade de acoplar um ímã (--)
Sensor de velocidade encoder	<ul style="list-style-type: none"> • Medição com alta precisão (+ + +) • Sensores disponíveis no almojarifado do PSI-EPUSP (+ +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Medição impactada em ambientes com vibração mecânica (---) • Necessidade de realizar adaptações na estrutura física do skate (-----)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Monitoramento de movimentos

Para o requisito monitoramento de movimentos do skate, o resultado da análise de forças e fraquezas foi: acelerômetro e giroscópio (+2) e integração com smartphone (-2).

Tabela 7 - Análise de alternativas: Monitoramento de movimentos

	Forças	Fraquezas
Acelerômetro e Giroscópio	<ul style="list-style-type: none"> • Integração com microcontrolador (+ + +) • Monitoramento preciso do skate (+ + +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Componente de alto custo (-) • Baixa resistência à impactos (---)
Integração com smartphone	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do custo total do sistema embarcado no skate (+ +) • Aproveitamento de sensores do smartphone do usuário (+ + +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexidade técnica considerável para desenvolver aplicativo mobile (---) • Medidas com baixa precisão (-----)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 ALTERNATIVAS ESCOLHIDAS

Considerando os resultados obtidos na avaliação inicial de alternativas e da análise de forças e fraquezas, foram obtidas as alternativas de soluções consideradas mais adequadas para cada requisito de engenharia do sistema eletrônico embarcado.

Tabela 8 - Solução escolhidas x Requisitos de engenharia

Dimensões restritas	Baixo custo	Didático	Monitoramento de velocidade e distância	Monitoramento de movimentos
Modularização	Ferramentas de laboratórios da USP	Manual técnico	Sensor de efeito hall	Acelerômetro e Giroscópio

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 DECOMPOSIÇÃO FUNCIONAL

A fim de obter um nível maior de detalhamento e entendimento do sistema eletrônico embarcado, foi elaborada uma decomposição funcional, tendo como referência a abordagem *Top-Down* – metodologia iterativa em que se divide um módulo inicial em vários sub módulos, define a entrada, a saída e o comportamento, até atingir componentes tangíveis.

4.1 PROJETO NÍVEL 0

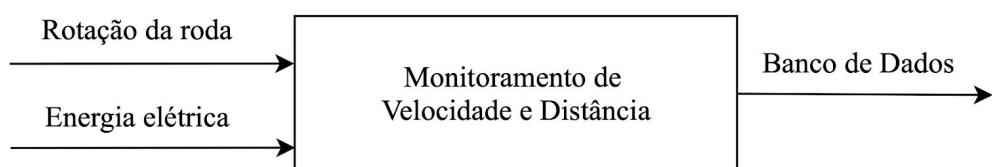
Devido à restrição de espaço livre para acoplamento do sistema embarcado abaixo do *shape* do skate e a preferência da Fábrica do Futuro POLI pela modularização da solução, decidiu-se que o sistema eletrônico embarcado deveria ser dividido em 2 módulos independentes: o módulo A, para monitorar a velocidade atingida e a distância percorrida, e o módulo B, para monitorar os movimentos do skate.

Dessa forma, os estudantes que irão interagir com o produto-exemplo poderão escolher qual dos módulos acoplar no skate, aumentando o número de possibilidades de customização e diminuindo a complexidade de projeto de um módulo único com diversas funcionalidades.

4.1.1 Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância

Para detalhar o funcionamento do módulo de monitoramento de velocidade atingida e distância percorrida pelo skate, foi elaborado um diagrama de blocos e uma tabela descriptiva.

Figura 9 - Módulo A: Representação do Nível 0



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Módulo A: Descrição do Nível 0

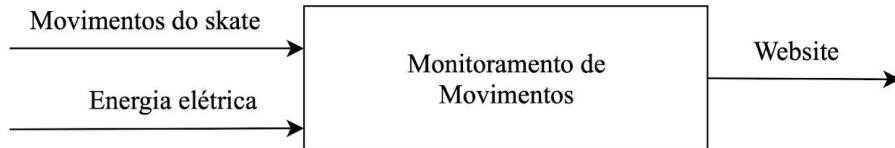
Módulo	Monitoramento de velocidade e distância
Entradas	Energia elétrica, Rotação da roda
Saídas	Banco de dados
Funcionalidade	Interpreta a rotação da roda do skate e envia para um banco de dados a medição da velocidade e distância

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Módulo B - Monitoramento de movimentos

Para detalhar o funcionamento do módulo de monitoramento de movimentos do skate, foi elaborado um diagrama de blocos e uma tabela descriptiva.

Figura 10 - Módulo B: Representação do Nível 0



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Módulo B: Descrição do Nível 0

Módulo	Monitoramento de movimentos
Entradas	Energia elétrica, Movimentos do skate
Saídas	Website
Funcionalidade	Interpreta a posição e orientação do skate e envia os dados para um website responsável por simular os movimentos do skate em tempo real

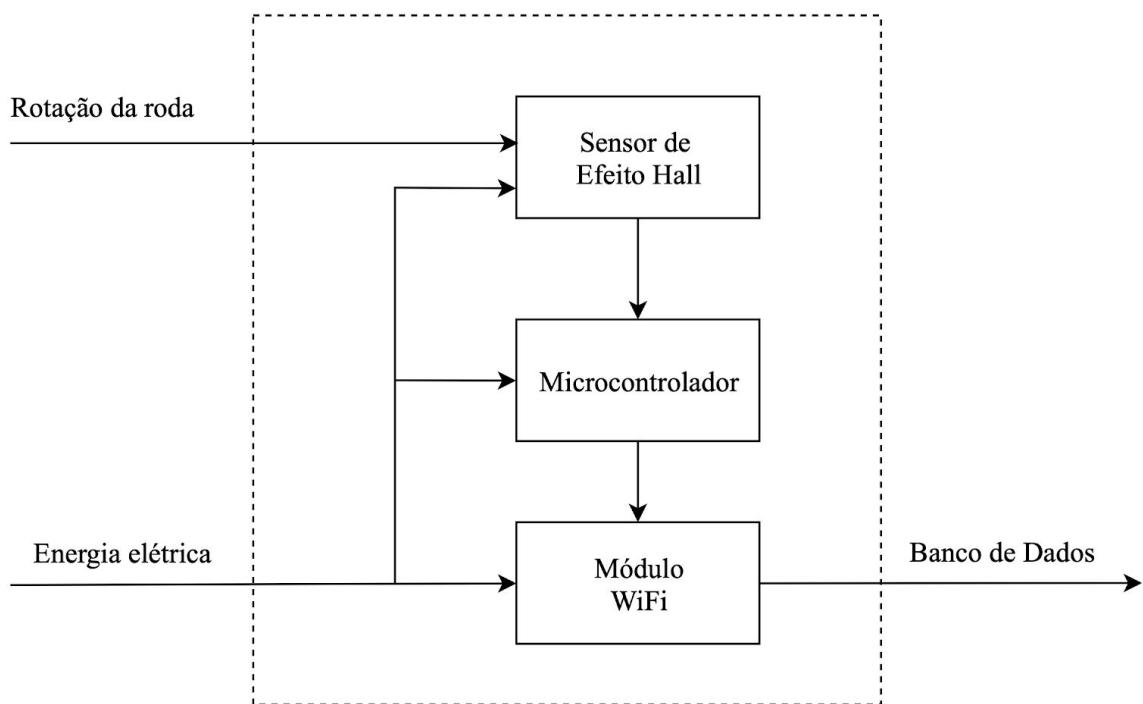
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PROJETO NÍVEL 1

4.2.1 Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância

Após a representação do nível 0 do módulo para monitoramento de velocidade atingida e distância percorrida pelo skate, realizou-se a representação do nível 1, a fim de explicar detalhadamente a relação entre os submódulos internos.

Figura 11 - Módulo A: Representação do Nível 1

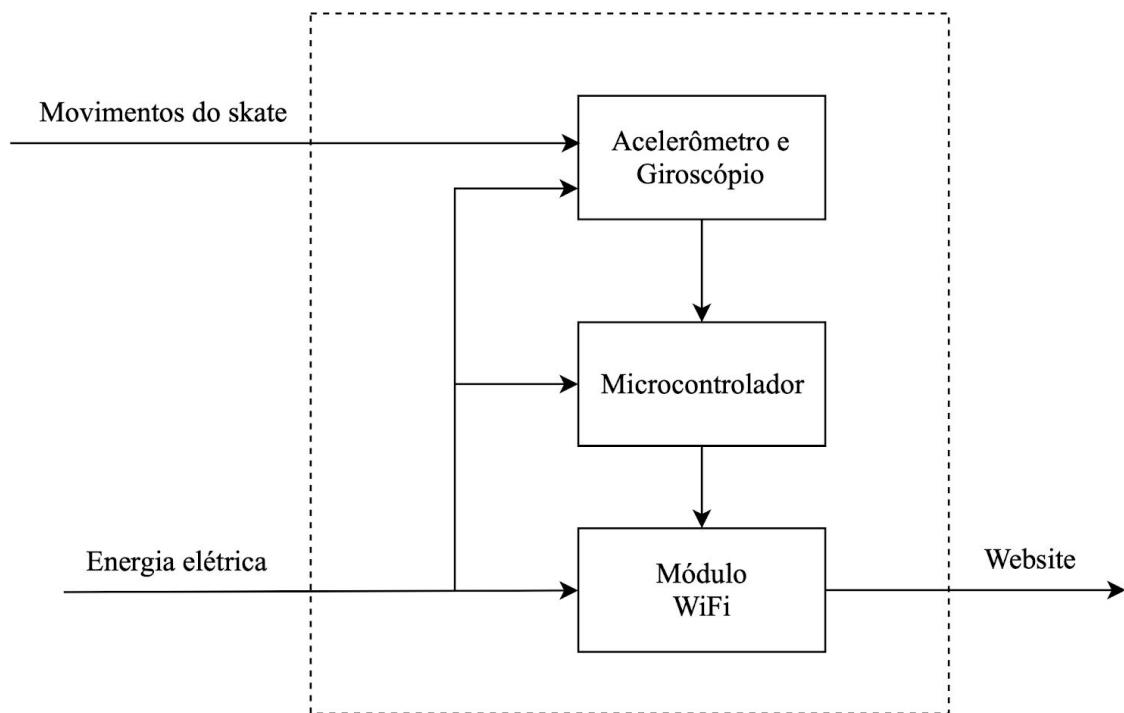


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Módulo B - Monitoramento de movimentos

Após a representação do nível 0 do módulo para monitoramento de movimentos do skate, realizou-se a representação do nível 1, a fim de explicar detalhadamente a relação entre os submódulos internos.

Figura 12 - Módulo B: Representação do Nível 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 GERENCIAMENTO DO PROJETO

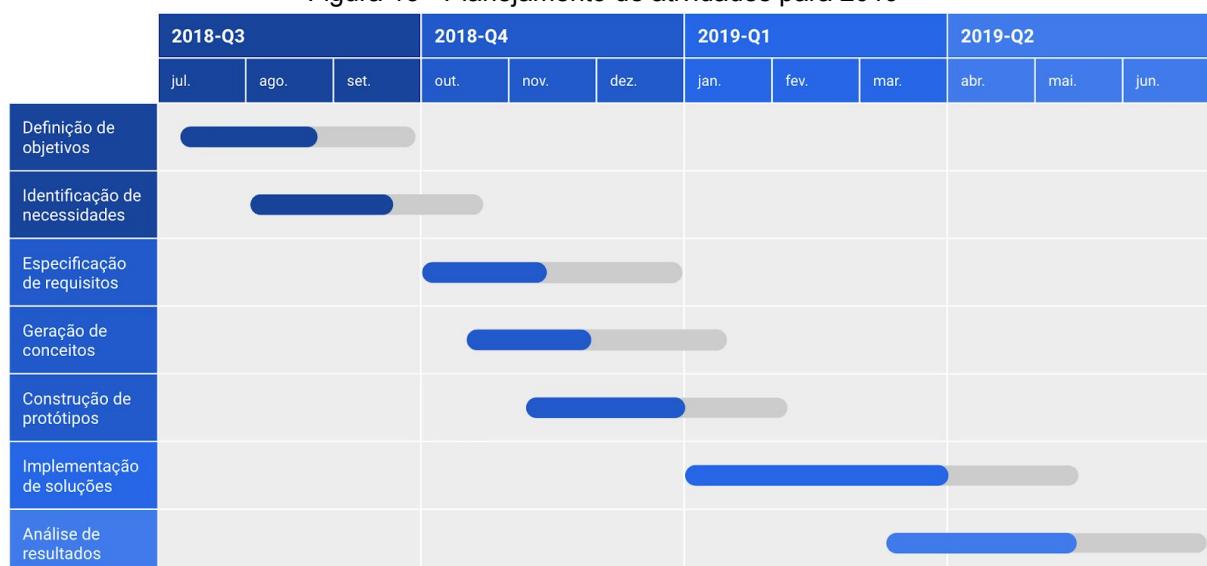
O projeto de formatura do curso de Engenharia Elétrica - Ênfase em Eletrônica e Sistemas da Escola Politécnica da USP é dividido basicamente em 2 etapas. Durante um semestre é realizado o planejamento e o protótipo do projeto a ser avaliado, enquanto que no semestre seguinte é realizada a implementação, validação e documentação do projeto.

A etapa 1 foi realizada durante o 2º semestre de 2018 e a etapa 2 durante o 1º semestre de 2019. Tendo em vista que o projeto foi realizado individualmente e que teve um nível de dificuldade técnica razoavelmente elevado, foi elaborado um cronograma de referência para organizar as atividades realizadas e construído um painel de tarefas para otimizar a gestão de tempo.

5.1 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

A fim de apresentar uma visão geral do desenvolvimento do projeto aos orientadores, foi elaborado um cronograma com atividades-chave. Resumidamente, a fase de desenvolvimento do projeto consistiu em estudo de produtos relacionados, compra de componentes, desenvolvimento de provas de conceito, implementação, validação e documentação.

Figura 13 - Planejamento de atividades para 2019



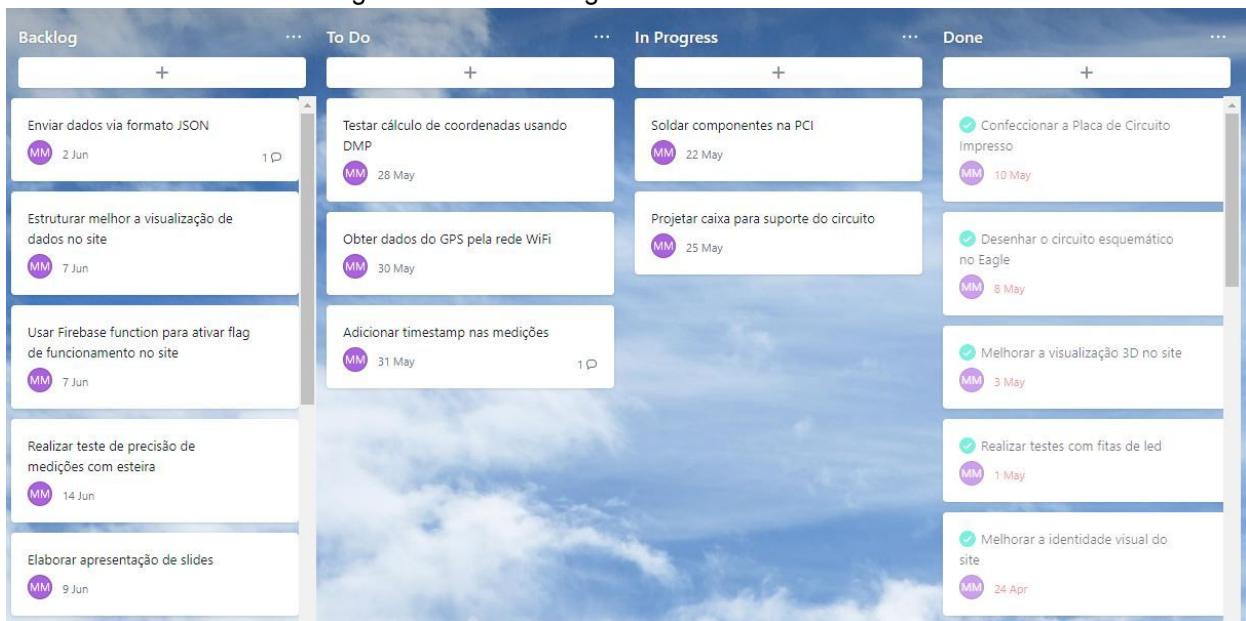
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 GERENCIAMENTO DE TAREFAS

Tendo em vista que o cronograma do projeto representa uma visão pouco detalhada do dia a dia do projeto, foi construído um painel, na aplicação web Asana, para gerenciamento das tarefas do projeto, a fim de auxiliar na gestão de tempo e colaborar com a priorização entre tarefas.

Inicialmente, todas as tarefas a serem realizadas foram colocadas na coluna *Backlog*, e classificadas de acordo com a data para ser realizada. As atividades com maior prioridade eram colocadas na coluna *To Do*, enquanto que as atividades que estavam sendo realizadas eram colocadas na coluna *In Progress*. Por fim, quando a tarefa era concluída, bastava colocar uma confirmação e alterar para a coluna *Done*.

Figura 14 - Painel de gerenciamento de tarefas



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 ORÇAMENTO E COMPRAS

Como o sistema eletrônico embarcado está inserido no contexto da Fábrica do Futuro POLI e tem como objetivo servir de objeto de estudo para estudantes, professores e pesquisadores, para realizar a compra de componentes para o projeto, foi possível utilizar parte do orçamento que o laboratório conseguiu em uma parceria com o Fundo Patrimonial Amigos da Poli.

A documentação das compras de componentes para o projeto foi separada por módulo eletrônico, a fim de entender com mais detalhes a divisão de custos. Em resumo, o componente mais caro para ambos os módulos foi a placa de circuito impresso fabricada na Micropress, uma empresa especializada em fabricação.

Tabela 11 - Módulo A: Descrição de custos de componentes

Componente	Quantidade	Preço	Impacto
Placa de Circuito Impresso (FR4 1,6mm 1L 1/2oz)	1	R\$ 82,53	35,5%
Carregador portátil usb p/Smartphone 3000mAH	1	R\$ 54,90	23,6%
Módulo WiFi ESP8266 NodeMcu ESP-12	1	R\$ 40,90	17,6%
Linha de LED RGB x8 WS2812 5050	1	R\$ 19,90	8,5%
Ímã Neodímio Disco Autoadesivo 3M 10x1,5 mm	10	R\$ 10,50	4,5%
Sensor Hall KY-003 de Alta Sensitividade	1	R\$ 8,90	3,8%
Parafuso de Aço para Madeira 3x10mm Auto Atarraxante	20	R\$ 5,39	2,3%
Jumper Premium 20 cm M/F	10	R\$ 5,00	2,1%
Barra de soquete header fêmea 40 vias 90 graus	1	R\$ 2,50	1,1%
Barra de soquete header fêmea 40 vias 180 graus	1	R\$ 1,50	0,6%
Barra de Pinos 40 vias 14,5mm 90 graus	1	R\$ 0,75	0,3%
Total		R\$232,77	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o alto impacto da placa de circuito impresso no custo de ambos os módulos, 35% do custo do módulo de velocidade e distância e 41% do módulo de movimentos, uma sugestão para fabricação, em larga escala, seria fabricar na China, onde o preço varia entre USD 2,00 e USD 5,00.

Tabela 12 - Módulo B: Descrição de custos de componentes

Componente	Quantidade	Preço	Impacto
Placa de Circuito Impresso (FR4 1,6mm 1L 1/2oz)	1	R\$ 82,53	40,6%
Carregador portátil usb p/Smartphone 3000mAH	1	R\$ 54,90	27,0%
Módulo WiFi ESP8266 NodeMcu ESP-12	1	R\$ 40,90	20,1%
Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050	1	R\$ 17,90	8,8%
Parafuso de Aço para Madeira 3x10mm Auto Atarraxante	20	R\$ 5,39	2,7%
Barra de soquete header fêmea 40 vias 180 graus	1	R\$ 1,50	0,7%
Total		R\$203,12	100,0%

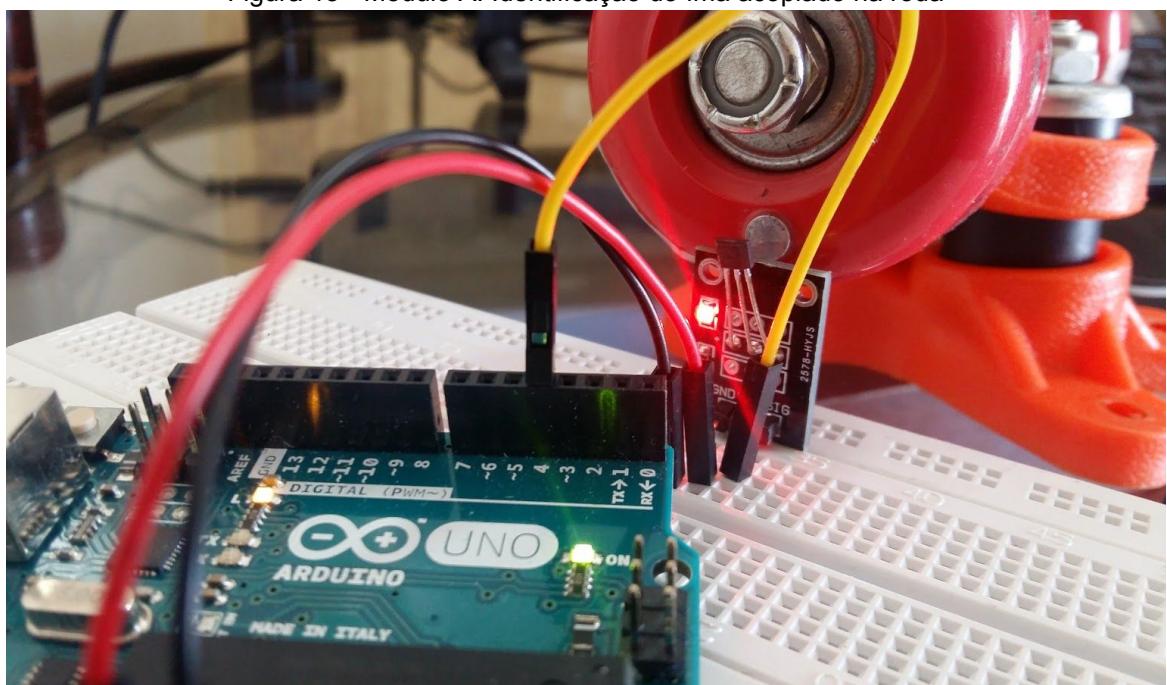
Fonte: Elaborado pelo autor.

6 PROTOTIPAÇÃO

6.1 MÓDULO A - MONITORAMENTO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA

Para verificar a possibilidade e dificuldade de implementação do módulo de monitoramento de distância percorrida e velocidade atingida, foi desenvolvido um protótipo, baseado em Thomsen (2014), que funciona da seguinte forma: quando o sensor de efeito hall identifica o aumento do campo magnético em sua proximidade, um led vermelho acende e um sinal é enviado para o microcontrolador (Arduino Uno), confirmando a proximidade do ímã fixado na roda do skate.

Figura 15 - Módulo A: Identificação do ímã acoplado na roda



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a fim de validar a eficiência do protótipo, foi elaborado um teste em que o sensor de efeito hall realizava a contagem do número de voltas da roda do skate dentro de um intervalo de tempo de 5s. Sabendo que uma volta completa da roda corresponde a um deslocamento de 16cm do skate, bastou o microcontrolador multiplicar 16cm pelo número de voltas para saber a distância percorrida pelo skate em um intervalo de 5s, e depois dividir essa distância percorrida por 5s para encontrar a velocidade atingida em cm/s em um intervalo de 5s de medição.

Figura 16 - Módulo A: Exemplo de funcionamento do teste realizado

```

COM3

19:21:35.775 -> 1 voltas
19:21:35.775 -> speed [cm/s]: 3.20
19:21:35.822 -> distance [cm]: 16.0
19:21:40.760 -> 2 voltas
19:21:40.760 -> speed [cm/s]: 6.40
19:21:40.807 -> distance [cm]: 32.0
19:21:45.758 -> 3 voltas
19:21:45.805 -> speed [cm/s]: 9.60
19:21:45.805 -> distance [cm]: 48.0
19:21:50.773 -> 4 voltas
19:21:50.773 -> speed [cm/s]: 12.80
19:21:50.820 -> distance [cm]: 64.0
19:21:55.787 -> 4 voltas
19:21:55.787 -> speed [cm/s]: 12.80
19:21:55.787 -> distance [cm]: 64.0
19:22:00.755 -> 1 voltas
19:22:00.802 -> speed [cm/s]: 3.20
19:22:00.802 -> distance [cm]: 16.0
19:22:05.769 -> 5 voltas
19:22:05.769 -> speed [cm/s]: 16.00
19:22:05.816 -> distance [cm]: 80.0
19:22:15.775 -> 7 voltas
19:22:15.775 -> speed [cm/s]: 22.40
19:22:15.822 -> distance [cm]: 112.0
19:22:20.790 -> 12 voltas
19:22:20.790 -> speed [cm/s]: 38.40
19:22:20.790 -> distance [cm]: 192.0

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Módulo A: Resultados do teste realizado

Número de voltas	Distância percorrida [cm]	Velocidade atingida [cm/s]
1	16,0	3,2
2	32,0	6,4
3	48,0	9,6
4	64,0	12,8
5	80,0	16,0
6	96,0	19,2
7	112,0	22,4
8	128,0	25,6
9	144,0	28,8
10	160,0	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

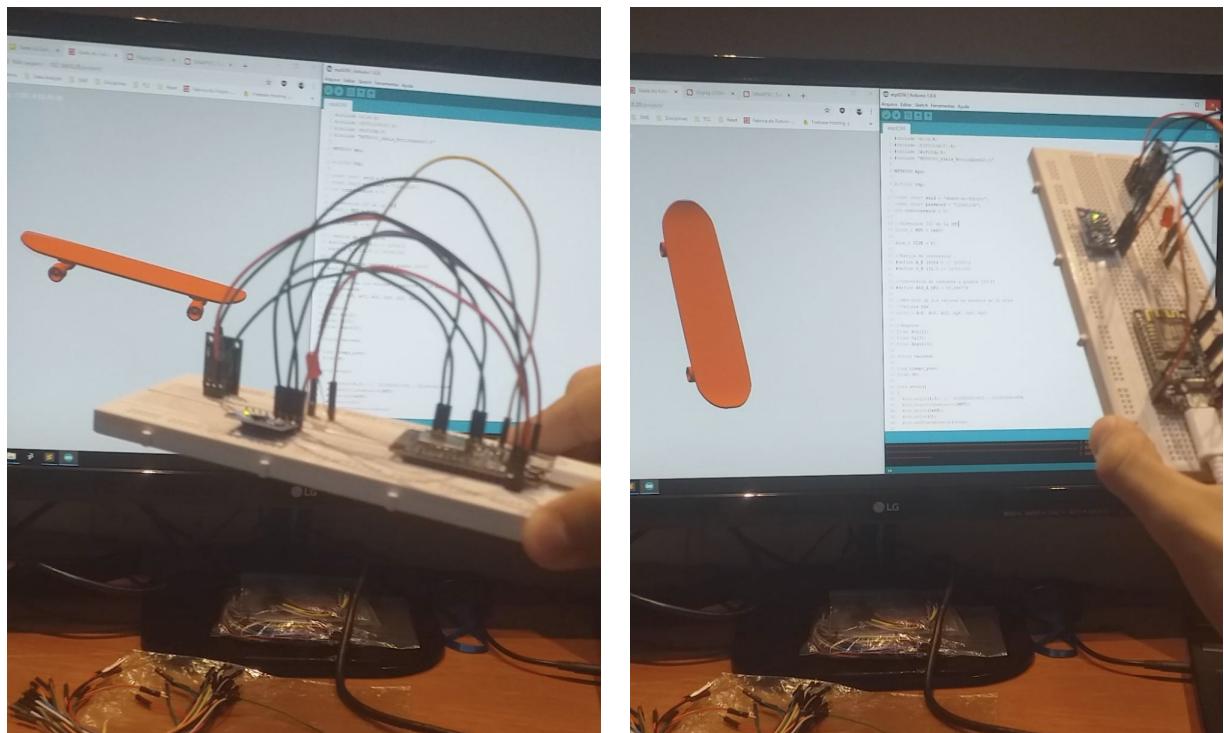
6.2 MÓDULO B - MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS

Além do desenvolvimento do protótipo para monitoramento de velocidade e distância, foi construído também um protótipo para monitoramento de movimentos, baseado em Townsend et al. (2015), com o objetivo de analisar o grau de complexidade para configurar e implementar o módulo eletrônico embarcado responsável por monitorar os movimentos do skate.

No protótipo construído foi utilizado o sensor MPU-6050, que contém um acelerômetro e um giroscópio num único chip tipo MEMS. Além disso, o sensor possui alta precisão devido ao conversor analógico digital de 16-bits integrado para cada canal, possibilitando a captura dos canais X, Y e Z ao mesmo tempo.

Com base nas medições realizadas pelo sensor, o Módulo WiFi ESP8266 NodeMcu ESP-12 conectado ao sensor envia as medições para uma interface web (desenvolvida pelo autor e descrita na seção 7.2.2) associada a um modelo de skate 3D, possibilitando simular a movimentação de um objeto virtual com base nos movimentos do sensor real físico.

Figura 17 - Módulo B: Simulação da movimentação do skate



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 IMPLEMENTAÇÃO

Visto que os resultados apresentados na Tabela 13 confirmam que o protótipo de monitoramento de velocidade e distância possui o funcionamento esperado, e que a Figura 17 comprova que o protótipo de monitoramento de movimentos tem a capacidade de controlar a movimentação do modelo digital do skate, foi dado início à próxima fase do projeto, a de implementação.

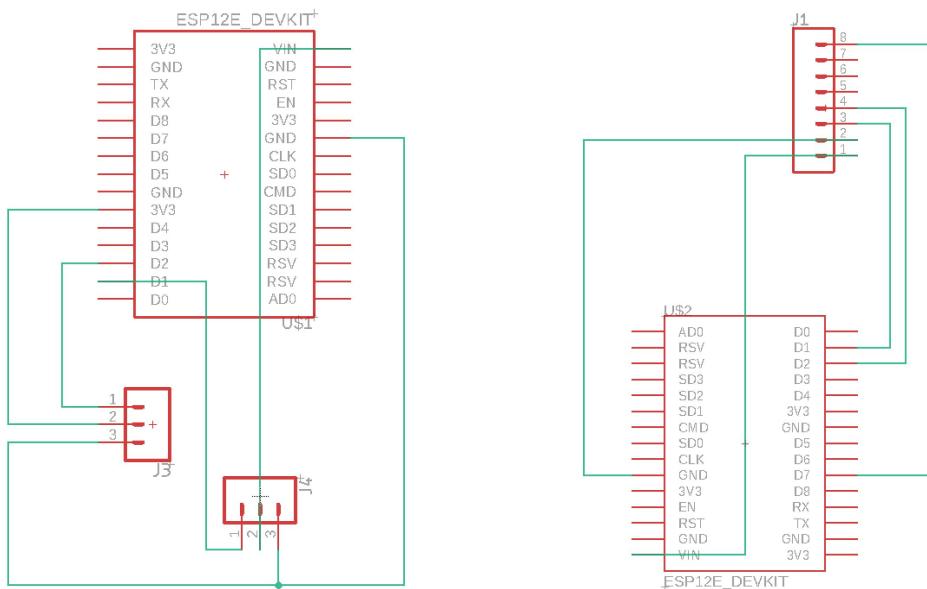
A fase de implementação corresponde ao desenvolvimento dos módulos descritos anteriormente, e foi subdividida em: (1) desenvolvimento do hardware dos módulos eletrônicos; (2) desenvolvimento dos softwares que interpretam os dados adquiridos pelos sensores de cada módulo; (3) fabricação de um suporte para os módulos; e (4) montagem e fixação dos módulos no skate.

7.1 DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

7.1.1 Esquema elétrico

Após realizar a construção dos protótipos em protoboards, os circuitos elétricos foram representados graficamente em esquemas elétricos utilizando o Autodesk EAGLE, um software de automação de projetos eletrônicos.

Figura 18 - Esquemas elétricos: Módulo A e Módulo B

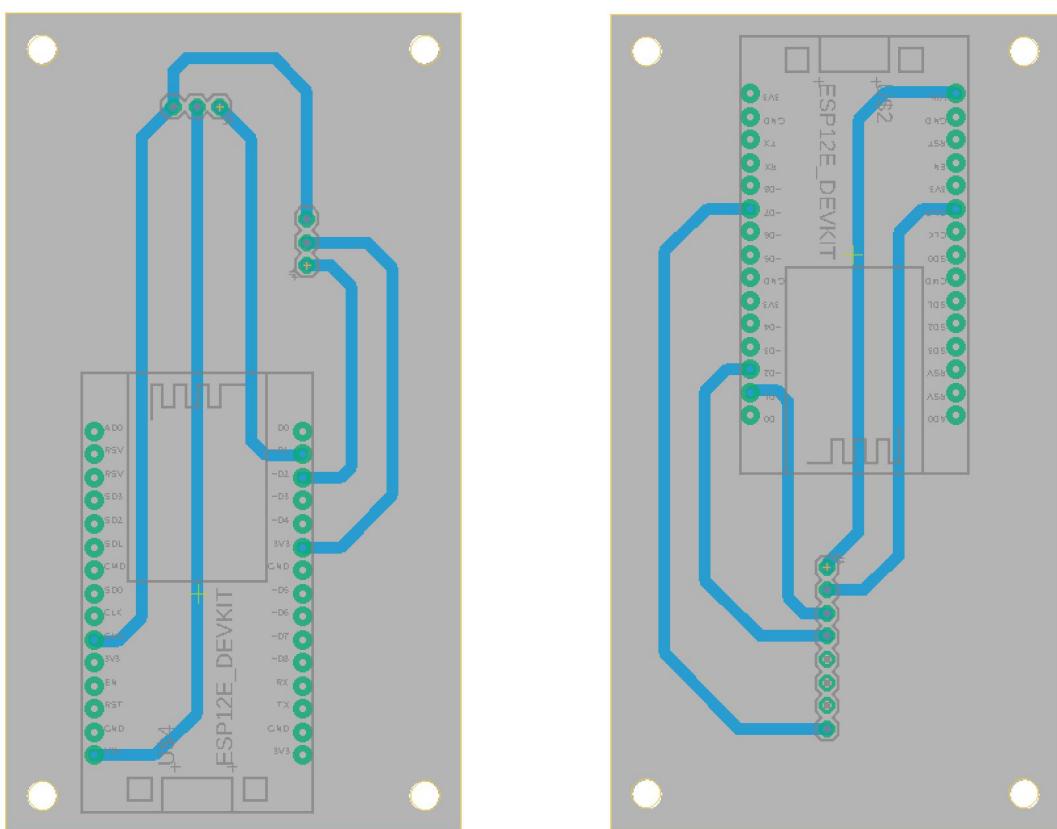


Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1.2 Layout de placa de circuito impresso

Com base nos esquemas elétricos elaborados, foram desenvolvidos os layouts da placa de circuito impresso (PCI) de cada módulo, também utilizando o Autodesk EAGLE. A fim de facilitar a fabricação de suportes, ambos os módulos foram projetados com a mesma altura e largura de placa.

Figura 19 - Layout da PCI: Módulo A e Módulo B

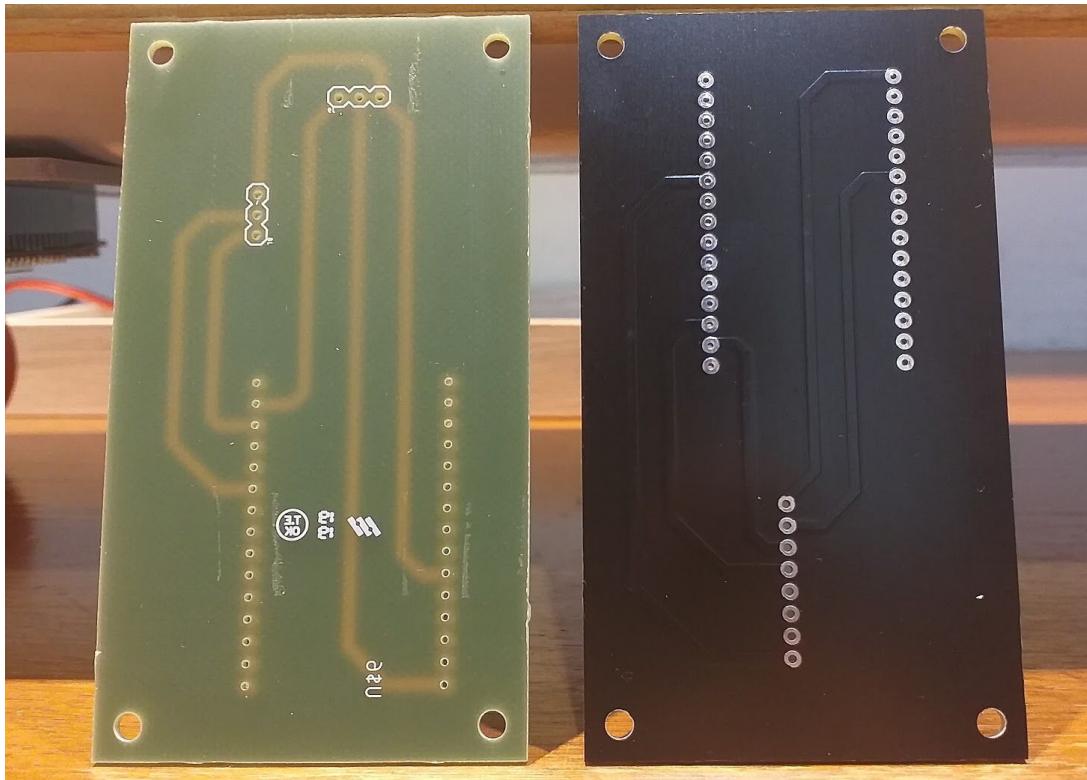


Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1.3 Fabricação de placa de circuito impresso

Uma vez definido o layout de cada módulo eletrônico, foi possível gerar os arquivos gerber, necessários para a fabricação industrial da placa de circuito impresso. Com base no levantamento de orçamentos em 4 empresas: TEC-CI, VB Circuitos, Micropress e ART-CI, foi escolhida a empresa Micropress como fabricante das placas de circuito impresso do projeto, pela alta qualidade e desconto oferecido.

Figura 20 - PCIs fabricadas: Módulo A (frente) e Módulo B (verso)



Fonte: Elaborado pelo autor.

7.2 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

7.2.1 Módulo A - Monitoramento de velocidade e distância

Para o desenvolvimento do banco de dados do módulo de monitoramento de velocidade atingida e distância percorrida, foi utilizado um banco de dados hospedado na nuvem que possui integração facilitada com aplicações web, sensores e bibliotecas para o microcontrolador utilizado no projeto.

Além disso, cabe ressaltar que a configuração do banco de dados, a integração com o microcontrolador e a criação da plataforma web para visualização de dados foram baseadas no projeto de Viebrantz (2017).

O software do módulo A é subdividido em: (1) código do microcontrolador ESP-12E que faz a aquisição de dados e envia via WiFi; (2) banco de dados hospedado na nuvem (*Firebase Realtime Database*) que recebe os dados via WiFi; e (3) interface web responsável por apresentar os dados adquiridos, verificar se o skate está em movimento e controlar a lanterna de led do skate.

Figura 21 - Módulo A: Banco de dados na nuvem

The screenshot shows the Firebase Realtime Database interface for a project named 'Skate do Futuro'. The 'Database' tab is selected, and the 'Realtime Database' button is highlighted. Below the tabs are 'Dados', 'Regras', 'Backups', and 'Uso'. The main area displays a tree structure under the 'skate-do-futuro-mrm' root, specifically the 'distance' node. It contains several child nodes with numerical values: '-LdA225BBnPKKV0_-PL9: "42.9"', '-LdA23JxTRqHj_GBFnMk: "44.3"', '-LdA24UTo0vYN3EJKryP: "49.8"', '-LdA25hIGpNmyPhmKHfb: "57.1"', '-LdA26vTz_5H7ysNLmbH: "64.0"', '-LdA28BsxZOJQEIVtL2P: "72.5"', '-LdA29Z0AUgVd1owRF0X: "80.6"', and '-LdA36j9jaELYEyyh4rQ: "80.6"'. To the right of the tree is a legend titled 'Legenda' with four items: 'alterados' (yellow square), 'adicionados' (green square), 'excluídos' (red square), and 'movidos' (blue square). The legend text states: 'As atualizações em tempo real são destacadas com as seguintes cores:'.

Fonte: Elaborado pelo autor.

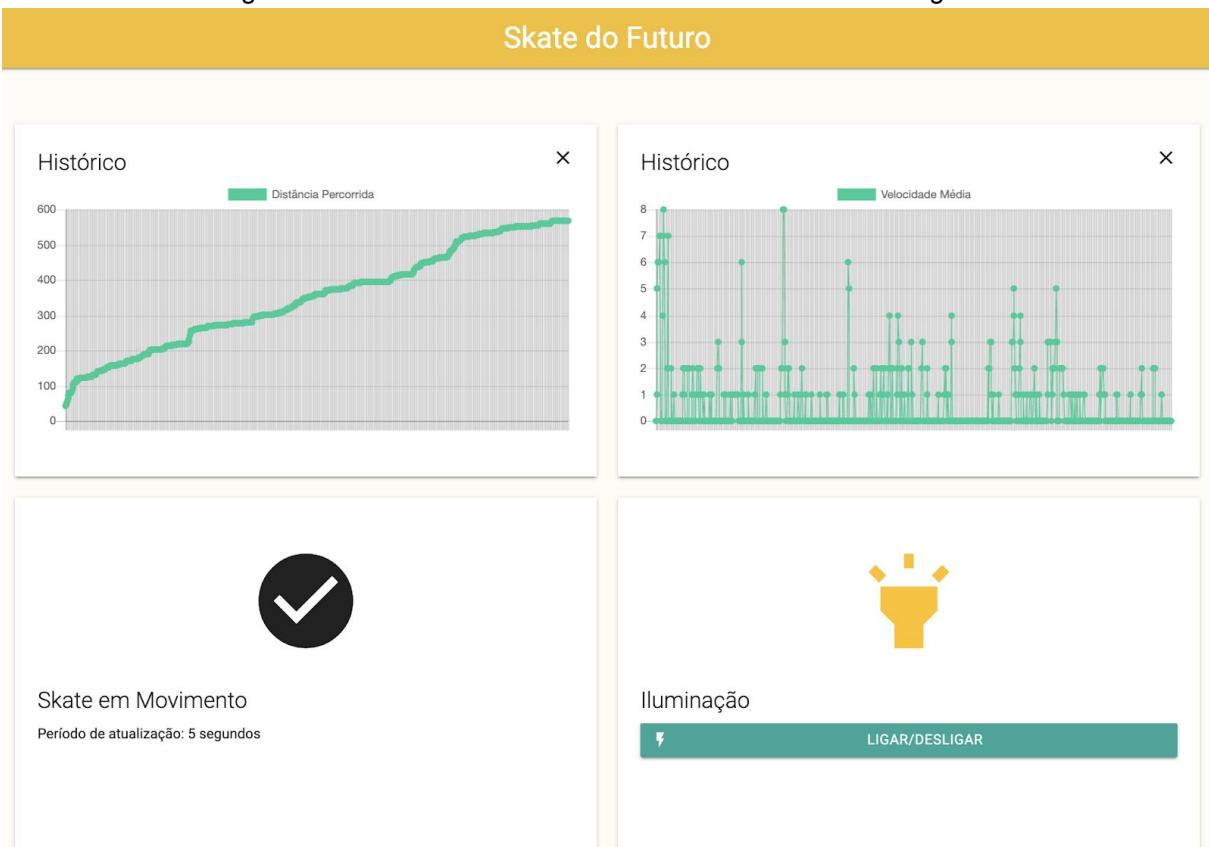
Figura 22 - Módulo A: Interface com última medição realizada e led desligado

The screenshot shows the 'Skate do Futuro' mobile application interface. At the top is a yellow header bar with the project name. The main screen is divided into four large cards:

- Distância Percorrida:** Displays '568.8 m'. Below it is a link 'Clique para ver histórico'.
- Velocidade Média:** Displays '0 km/h'. Below it is a link 'Clique para ver histórico'.
- Skate em Movimento:** Shows a circular icon with a checkmark. Below it is the text 'Período de atualização: 5 segundos'.
- Iluminação:** Shows a lightbulb icon. Below it is a green button labeled 'LIGAR/DESLIGAR'.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Módulo A: Interface com dados históricos e led ligado



Fonte: Elaborado pelo autor.

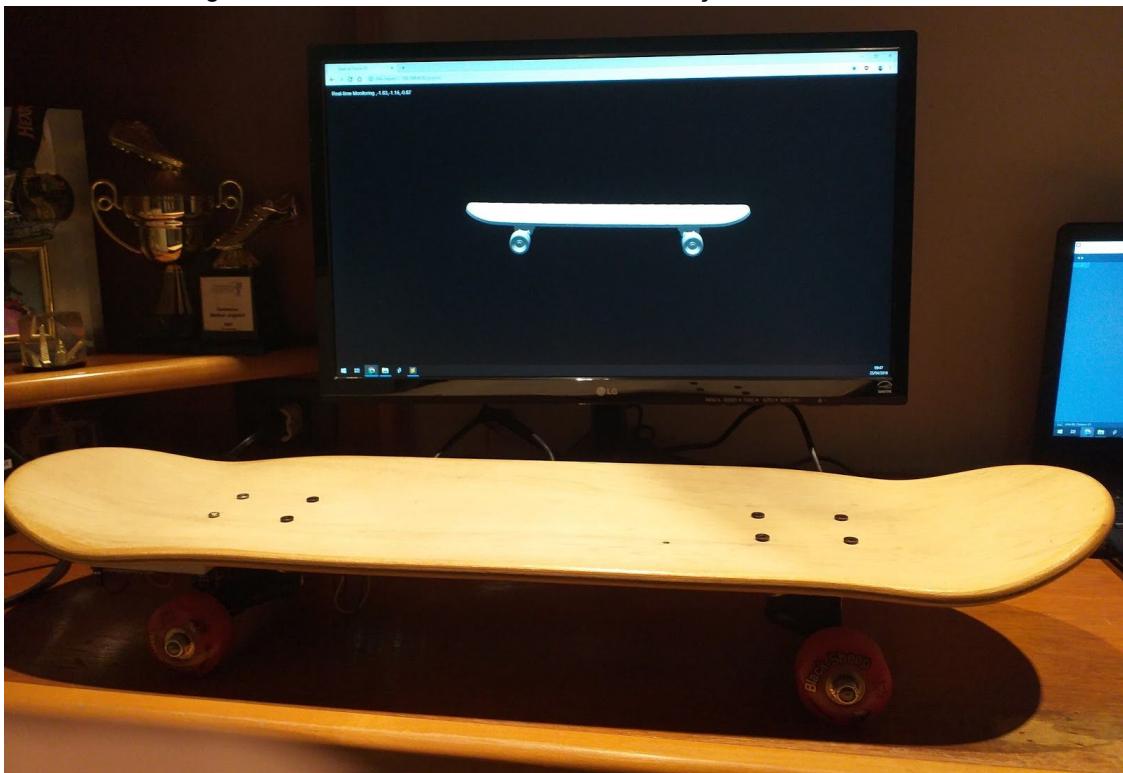
7.2.2 Módulo B - Monitoramento de movimentos

O desenvolvimento da interface para visualização 3D dos dados adquiridos pelo sensor MPU-6050, que tem embarcado um chip que realiza o processamento digital de movimentos, foi baseado nos projetos descritos em Alomar (2017) e Llamas (2016).

O software do módulo B é subdividido em: (1) código do microcontrolador (ESP-12E) que envia os dados processados pelo sensor via WiFi; e (2) interface web que recebe os dados via WiFi e simula em tempo real no modelo virtual do skate os movimentos do skate físico.

A interface web de visualização 3D foi hospedada em um servidor local Apache e desenvolvida com as linguagens de programação HTML5 e PHP e a biblioteca Three.js. Durante o desenvolvimento da interface foi considerado o uso de um servidor na nuvem, mas para garantir baixa latência do sistema e rápida atualização do modelo virtual, foi escolhido um servidor local para hospedagem.

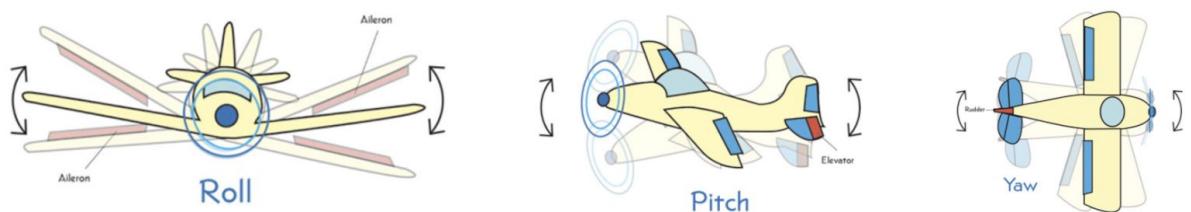
Figura 24 - Módulo B: Interface de visualização 3D e skate físico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da visualização do modelo virtual do skate, a interface web também apresenta um monitoramento em tempo real de ângulos que representam a movimentação do sensor de posição e orientação em torno de três eixos ortogonais localizados próximo ao centro de massa do *shape* do skate - os eixos longitudinal, lateral e perpendicular. O movimento em torno do eixo longitudinal é chamado de *roll*, o movimento em torno do eixo lateral é chamado de *pitch* e o movimento em torno do eixo perpendicular é chamado de *yaw*.

Figura 25 - Módulo B: Variáveis utilizadas para representar a movimentação do skate



Fonte: Adaptado de HOW THINGS FLY, 2012.

Figura 26 - Módulo B: Interface de monitoramento apresentando *Roll*, *Pitch* e *Yaw*

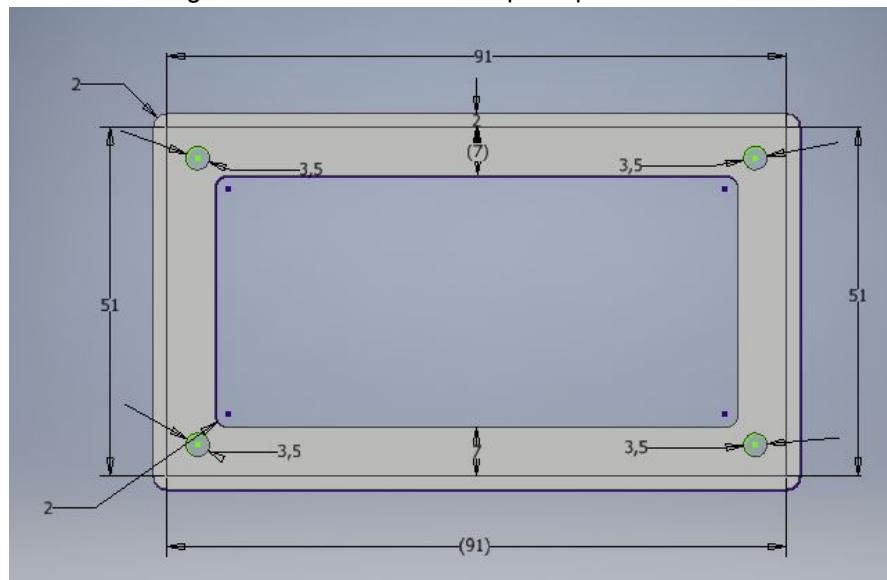


Fonte: Elaborado pelo autor.

7.3 FABRICAÇÃO DE SUPORTE PARA MÓDULOS

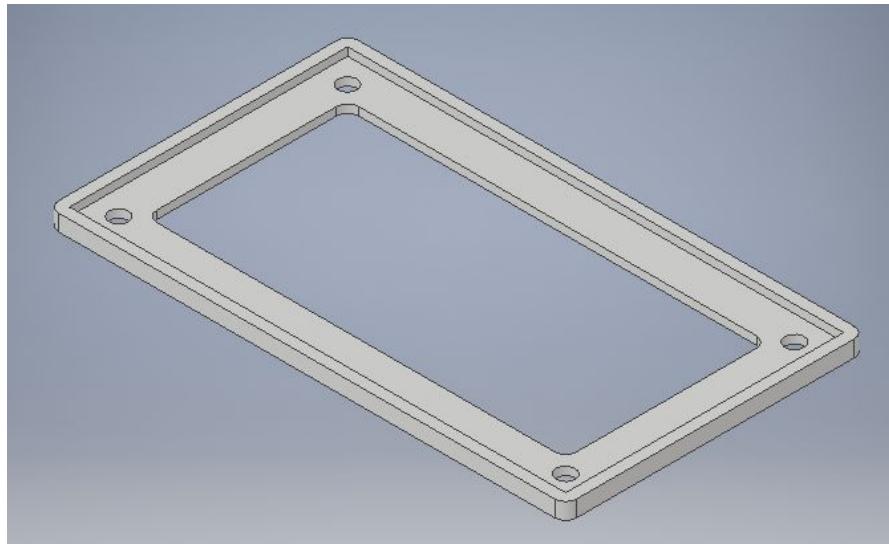
A fim de facilitar o acoplamento das placas de circuito impresso no skate e garantir uma segurança maior dos módulos eletrônicos, foi projetado e fabricado em um suporte sob medida em uma das impressoras 3D da Fábrica do Futuro POLI.

Figura 27 - Dimensões do suporte para módulos



Fonte: Elaborado pelo autor.

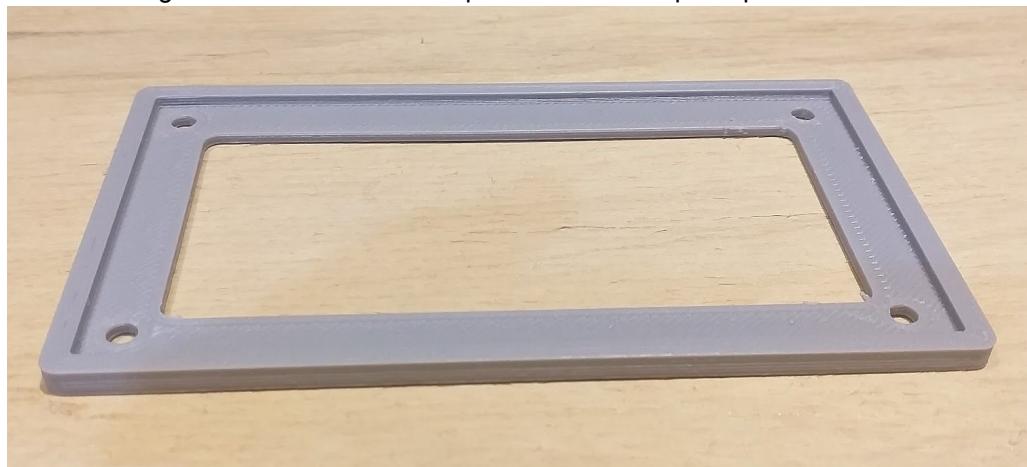
Figura 28 - Visualização 3D do projeto de suporte para módulos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe ressaltar que o suporte foi projetado para ser utilizado com os dois tipos de módulo, mas que futuramente seria interessante projetar modelos de suporte mais customizados que protejam os módulos da chuva e de intempéries climáticas.

Figura 29 - Resultado da impressão 3D do suporte para módulos

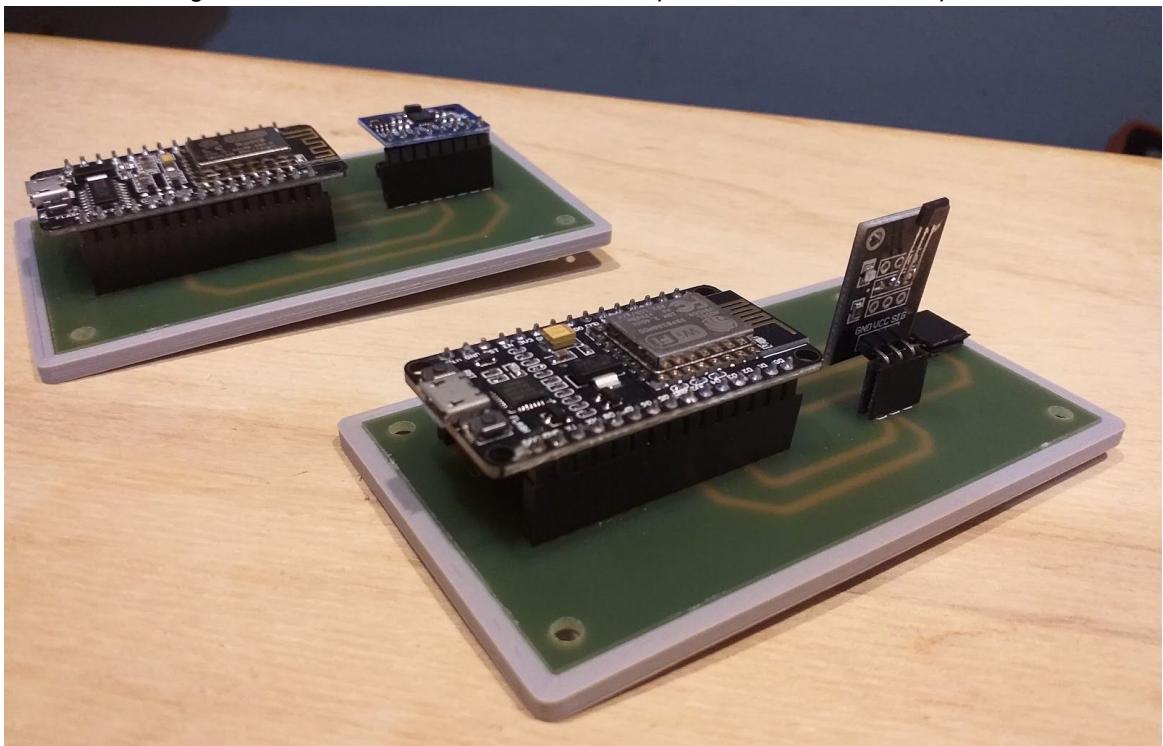


Fonte: Elaborado pelo autor.

7.4 MONTAGEM E FIXAÇÃO DE MÓDULOS

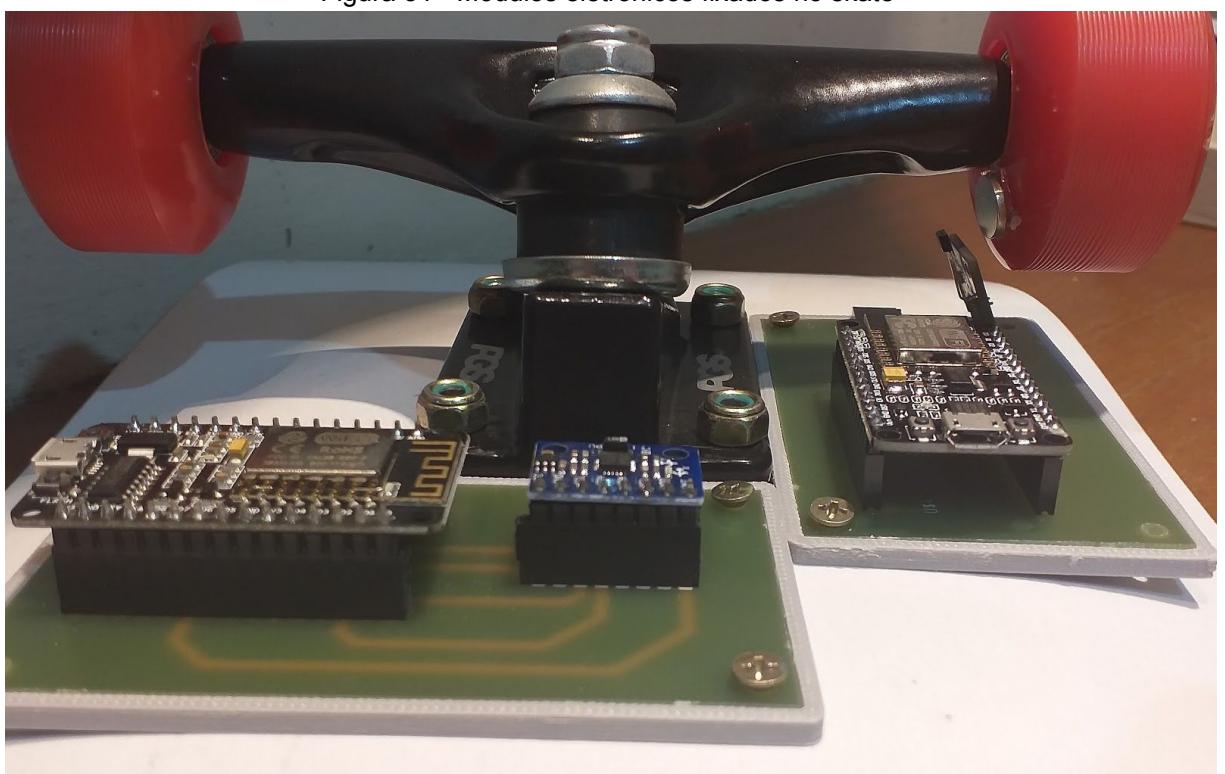
Após a fabricação das placas de circuito impresso, o desenvolvimento de software e a criação de um suporte, realizou-se a solda de componentes em cada módulo, o encaixe do módulo com o suporte e por fim, a fixação no skate por meio de parafusos para madeira auto atarraxantes.

Figura 30 - Módulos eletrônicos com componentes soldados e suporte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Módulos eletrônicos fixados no skate



Fonte: Elaborado pelo autor.

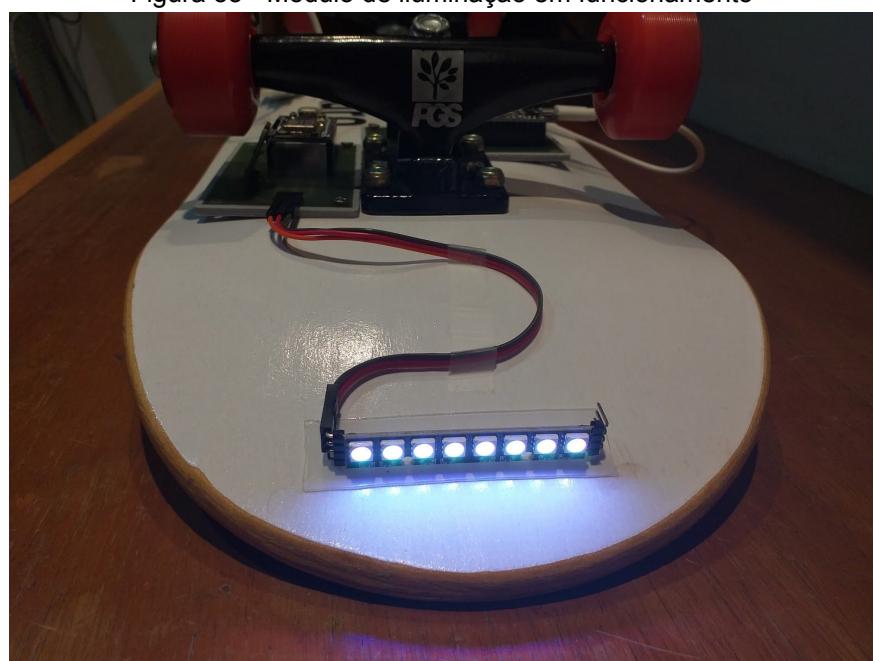
Figura 32 - Visão geral do skate com módulos fixados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, apesar do módulo de iluminação não ter um peso considerável na árvore de objetivos representada na Figura 6, foi implementado e fixado um sistema de iluminação de LED controlado pela mesma interface utilizada para apresentação dos dados de monitoramento de velocidade e distância.

Figura 33 - Módulo de iluminação em funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

8 RESULTADOS

8.1 VISÃO GERAL

Os resultados mostrados nas seções a seguir explicam detalhadamente o funcionamento dos módulos eletrônicos desenvolvidos. Resumidamente, em todos os testes realizados as medições apresentaram resultados consistentes, ou seja, a cada repetição do teste, o módulo eletrônico se comportou da mesma forma. Além disso, apesar da metodologia usada em cada teste não ser tão sofisticada, as medições foram suficientes para obter conclusões prévias.

Durante os processos de implementação e testes foi observado que os sistemas embarcados projetados possuem potencial não só para incentivar e aprimorar novas pesquisas no contexto da indústria 4.0 e da Fábrica do Futuro POLI, mas também para se tornarem produtos comercializáveis com foco em colaborar no treinamento de skatistas profissionais.

Figura 34 - Skate com módulos em funcionamento



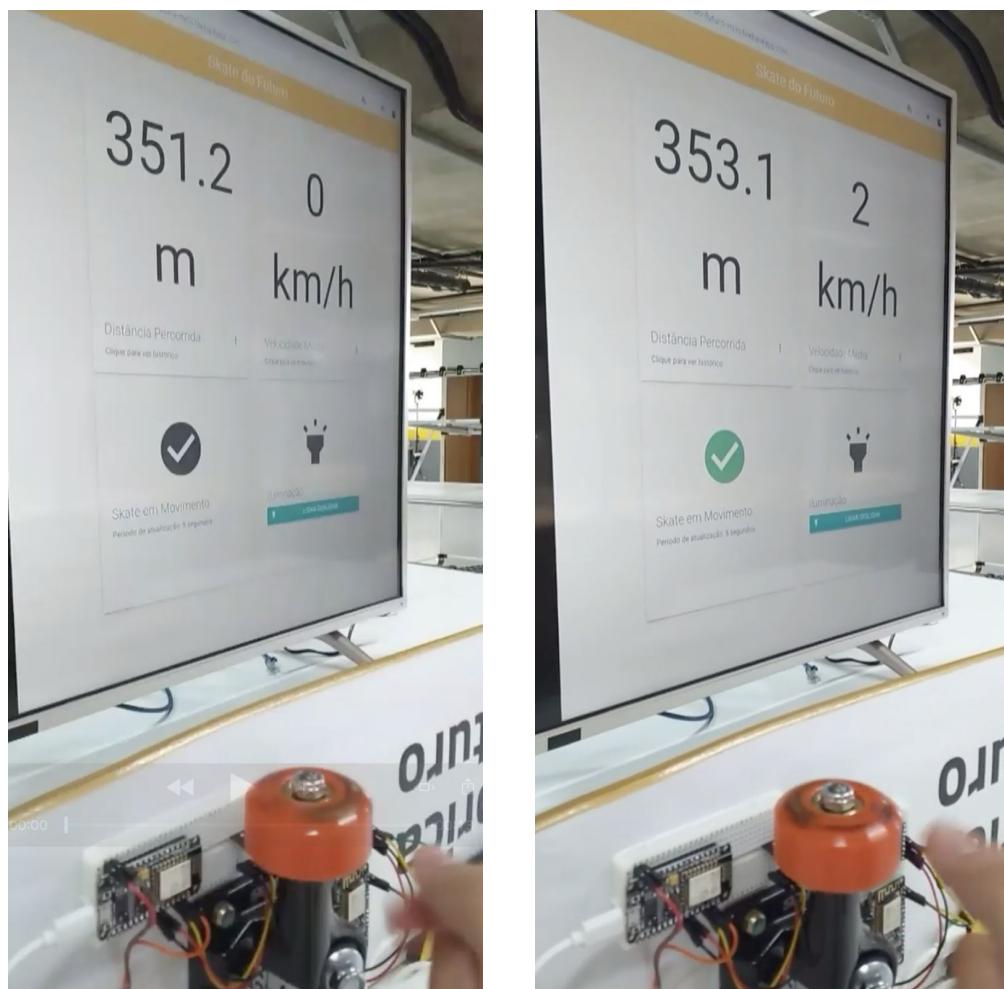
Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2 MÓDULO A - MONITORAMENTO DE VELOCIDADE E DISTÂNCIA

A fim de validar as medidas realizadas pelo módulo de monitoramento de velocidade e distância, foi realizado um teste parecido com o descrito na seção 6.1. Dado um intervalo de tempo 5s, o sensor de efeito hall realizou a contagem do número de voltas da roda do skate nesse intervalo, enquanto que o microcontrolador fez o cálculo da distância percorrida acumulada e da velocidade atingida durante o intervalo de 5s, e enviou essas medições para um banco de dados na nuvem.

Além de verificar a eficiência de medições, esse teste também serviu para validar se a interface web informa corretamente se o skate está em movimento e apresenta em tempo real os dados enviados pelo sensor acoplado ao módulo.

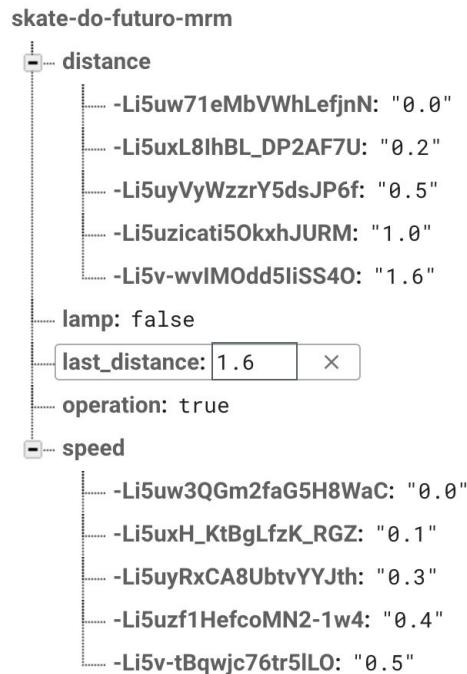
Figura 35 - Módulo A: Demonstração de funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Módulo A: Visualização do banco de dados durante teste

<https://skate-do-futuro-mrm.firebaseio.com/>



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 14, pode-se observar que a medição realizada pelo módulo testado possui uma variação de até 30% comparado com o valor esperado de medição. Além disso, dada a dificuldade considerável de realizar visualmente a contagem do número de voltas efetuadas pela roda do skate, seria interessante, futuramente, colocar o skate sobre uma esteira de academia e comparar as medições do módulo com a medição da própria esteira, como feito no trabalho realizado em Hare (2012).

Tabela 14 - Módulo A: Análise de resultados do teste realizado

Número de voltas	Distância percorrida acumulada [m]		Velocidade atingida [km/h]	
	Valor esperado	Medição	Valor esperado	Medição
0	0,00	0,0	0,00	0,0
1	0,16	0,2	0,12	0,1
2	0,48	0,5	0,23	0,3
3	0,96	1,0	0,35	0,4
4	1,60	1,6	0,46	0,5
5	2,40	2,4	0,58	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.3 MÓDULO B - MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS

Para validar o funcionamento e observar os resultados da implementação do módulo de monitoramento de movimentos, foi realizado um teste que consistiu em posicionar o skate em 6 posições diferentes para então observar a posição do modelo digital do skate e a variação nas medições de *Roll*, *Pitch* e *Yaw*.

Tendo em vista os resultados apresentados, pode-se considerar que o modelo digital desenvolvido consegue representar a posição e orientação do modelo físico em algumas posições pré-determinadas.

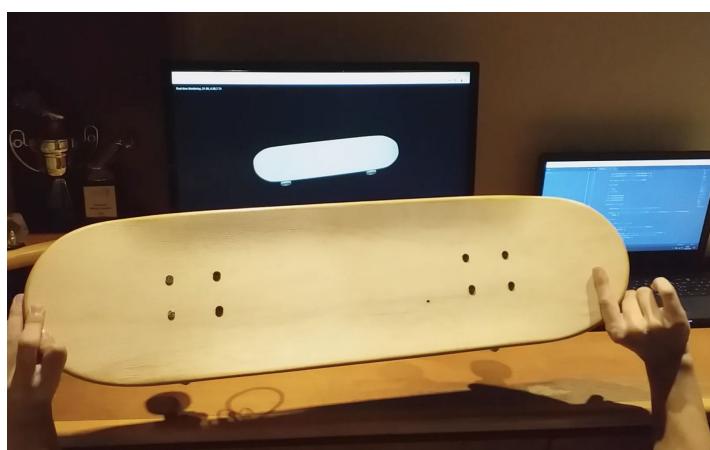
Figura 37 - Módulo B: Demonstração de funcionamento



Roll	Pitch	Yaw
-177,52	177,58	-62,85



Roll	Pitch	Yaw
-175,92	177,30	57,69



Roll	Pitch	Yaw
-92,80	178,17	1,66



Roll	Pitch	Yaw
95,37	178,98	-2,09



<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
-177,65	145,72	9,57

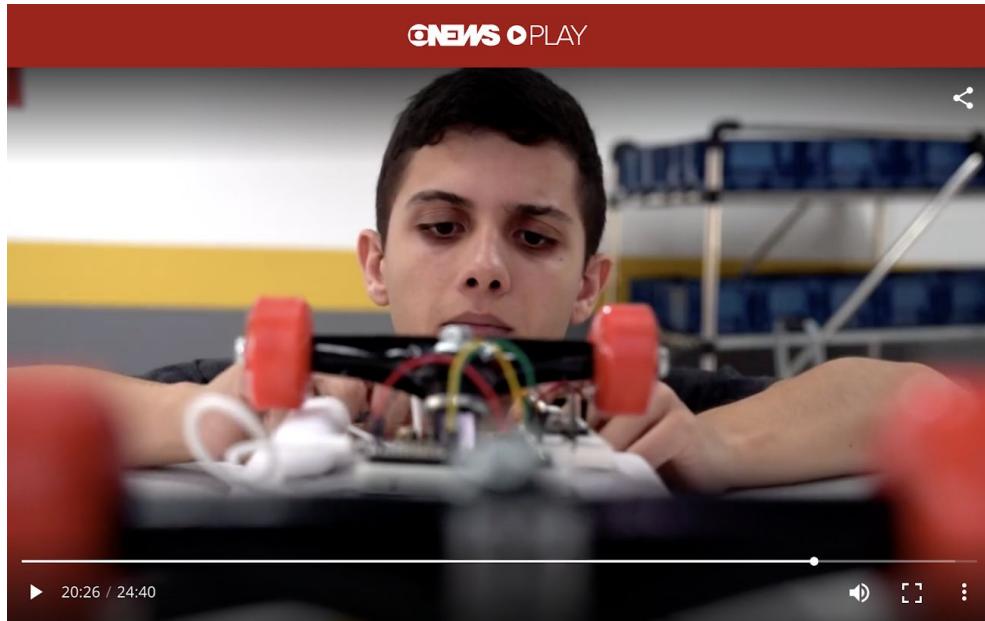
<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
-179,83	-144,53	8,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.4 APRESENTAÇÕES EXCLUSIVAS

Nos meses de abril e junho de 2019, a Fábrica do Futuro POLI esteve em destaque. Participou de uma reportagem da GloboNews sobre o futuro da educação e recebeu visita técnica de associados da Associação Brasileira de Internet Industrial (ABII). Em ambos momentos foram apresentados resultados parciais do projeto e recebidas recomendações e sugestões de melhoria.

Figura 38 - Apresentação do projeto em reportagem televisiva



Fonte: GLOBONEWS, 2019.

Figura 39 - Apresentação do projeto em visita técnica



Fonte: Fábrica do Futuro POLI.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a declaração de objetivos do projeto descrita na seção 1.3 deste documento e os resultados apresentados na seção 8, pode-se afirmar que o projeto e desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado para o modelo de skate da Fábrica do Futuro POLI foi bem sucedido e tem um grande potencial para contribuir no avanço das pesquisas do laboratório e com atividades práticas nas disciplinas dos cursos de Engenharia da Escola Politécnica e de outras instituições parceiras.

Além disso, o projeto contribuiu de forma significativa na formação acadêmica do autor, visto que para elaborar e construir os módulos eletrônicos do sistema embarcado foi necessário estudar não apenas circuitos eletrônicos e sensores, mas também aprender sobre requisitos de marketing, comportamento do usuário e inovações relacionadas ao setor de mobilidade urbana.

Considerando que esse projeto continuará a ser desenvolvido outros estudantes no contexto da Fábrica do Futuro POLI, sugere-se como principais melhorias a desenvolver e implementar: a otimização do processo de envio de dados via WiFi, integração de módulos eletrônicos e integração de dados de GPS do celular com o módulo de monitoramento de velocidade e distância.

Espera-se também que esse projeto tenha impacto em pesquisas futuras sobre o tema skate conectado e que, de alguma forma, sirva de inspiração para outros estudantes realizarem projetos de formatura para o aprimoramento de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento da Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALOMAR, A. **Proyecto #3 ESP8266** – Manipular Modelo 3D con MPU6050 (PHP + WebGL + Three.js). 2017. Disponível em: <<http://www.sinaptec.alomar.com.ar/2017/10/proyecto-3-esp8266-manipular-modelo-3d.html>>. Acesso em: abr. 2019.
- BAINES, T. S. et al. **State-of-the-art in product-service systems**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. v. 221, n. 10, p. 1543-1552, 2007.
- BARIFOUSE, R. **Redes de bicicletas sem estações chegam ao Brasil: solução ou novo problema para as cidades?** BBC News Brasil, 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-45039832>>. Acesso em: set. 2018.
- CB INSIGHTS. **Future Factory: How Technology Is Transforming Manufacturing**. Research Briefs, 2018. Disponível em: <<https://www.cbinsights.com/research/future-factory-manufacturing-tech-trends/>>. Acesso em: mar. 2019.
- CHENG, Y. W. **Fábrica POLI: detalhamento de uma fábrica de ensino no contexto da Indústria 4.0**. São Paulo, 140 p., 2016.
- GLOBONEWS. **Temporada 2: O futuro já começou**. GloboNews em Movimento, jun. 2019. Disponível em: <<https://globosatplay.globo.com/globonews/v/7682518/>>. Acesso em: jun. 2019.
- GUIMARÃES, M. O. **Fábrica do Futuro POLI – Implementação de uma fábrica de ensino voltada para a Indústria 4.0**. São Paulo, 135 p., 2017.
- HARE, J. **Skateboard/longboard speedometer project**. IOP Publishing: Journal of Physics Education. v. 47, n. 4, p. 409-417, 2012.
- HOW THINGS FLY. Roll, **Pitch, and Yaw**. Smithsonian National Air and Space Museum, 2012. Disponível em: <<https://howthingsfly.si.edu/flight-dynamics/roll-pitch-and-yaw>>. Acesso em: jun. 2019.
- INBOARD TECHNOLOGY. **M1**. 2016. Disponível em: <<https://www.inboardtechnology.com/products/m1-electric-skateboard>>. Acesso em: out. 2018.
- LAMANCUSA, J. S. et al. **The Learning Factory: Industry-Partnered Active Learning**. Journal of Engineering Education, v. 97, n.1, p. 5-11, 2008.
- LASI, H. et al. **Industry 4.0**. Business & Information Systems Engineering, vol. 6, no. 4, pp. 239-242, 2014.

- LLAMAS, L. **Determinar la orientación con Arduino y el IMU MPU-6050**. 2016. Disponível em: <<https://www.luisllamas.es/arduino-orientacion-imu-mpu-6050/>>. Acesso em: abr. 2019.
- MARKET RESEARCH FUTURE. **Digital Twin Market Research Report - Global Forecast 2023**. Half-Cooked Research Reports, 100 p., 2018. Disponível em: <<https://www.marketresearchfuture.com/reports/digital-twin-market-4504>>. Acesso em: nov. 2018.
- MELLOW BOARDS. **Buy The Finest Electric Skateboard & Longboard Kit**. 2017. Disponível em: <<https://www.mellowboards.com/en/electric-skateboard-kit>>. Acesso em: out. 2018.
- NAKANO, D. **Laboratório Didático Fábrica do Futuro POLI**. Edital Pró-Reitoria de Graduação, Programa Santander Universidades: e-Grad, ed. 2015-2016, 2016.
- NAOE, A. **Fábrica inteligente vai trazer a indústria do futuro para a universidade**. Jornal da USP, 2016. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/?p=9489>>. Acesso em: ago. 2018.
- QI, Q.; TAO, F. **Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison**. IEEE Access, vol. 6, pp. 3585-3593, 2018.
- SHIEBER, J. **Inboard Technology raises \$8 million to be the Tesla of electric skateboards**. TechCrunch, 2017. Disponível em: <<https://techcrunch.com/2017/11/16/inboard-technology-raises-8-million-to-be-the-tesla-of-electric-skateboards/amp>>. Acesso em: nov. 2018.
- SILVA, J. C. **Fábrica POLI: Concepção de uma fábrica de ensino no contexto da Indústria 4.0**. São Paulo, 121 p., 2015.
- SYRMO. **A smart pad that tracks your session trick by trick**. 2014. Disponível em: <<http://syrmo.com/>>. Acesso em: nov. 2018.
- THOMSEN, A. **Sensor Hall KY-003 com Servo Tower Pro SG-5010**. Blog FilipeFlop, 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/sensor-hall-servo-tower-pro-sg5010>>. Acesso em: nov. 2018.
- TOWNSEND, K. et al. **Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor**. Adafruit Learning System, 2015. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/adafruit-bno055-absolute-orientation-sensor?view=all>>. Acesso em: nov. 2018.
- VIEBRANTZ, A. **Sensoriamento e Controle Realtime com Firebase e ESP8266**. Medium, 2017. Disponível em: <<https://medium.com/@alvaroviebrantz/sensoriamento-realtime-com-firebase-e-esp8266-6e54b9bff1c1>>. Acesso em: mar. 2019.
- WAGNER, U. et al. **The State-of-the-Art and Prospects of Learning Factories**. Procedia CIRP, vol. 3, p. 109-114, 2012.

WAREHOUSE SKATEBOARDS. **Skateboard Deck Buying Guide**. 2014. Disponível em: <<https://www.warehouseskateboards.com/help/Skateboard-Decks-Buying-Guide>>. Acesso em: out. 2018.

APÊNDICE A - Ranking de Objetivos

Ranking de Objetivos - Nível 1

	Tecnológico	Portátil	Fácil de usar	Durável	Média Geométrica	Peso
Tecnológico	1	3	2	3	2,06	0,45
Portátil	1/3	1	1/3	1/2	0,49	0,11
Fácil de usar	1/2	3	1	2	1,32	0,28
Durável	1/3	2	1/2	1	0,76	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor

Ranking de Objetivos - Nível 2 (Tecnológico)

	Velocidade atingida	Distância percorrida	Posição e Orientação	Motorização	Sinalização e Iluminação	Média Geométrica	Peso
Velocidade atingida	1	1	2	4	3	1,89	0,32
Distância percorrida	1	1	2	4	3	1,89	0,32
Posição e Orientação	1/2	1/2	1	3	2	1,08	0,18
Motorização	1/4	1/4	1/3	1	1/2	0,40	0,07
Sinalização e Iluminação	1/3	1/3	1/2	2	1	0,64	0,11

Fonte: Elaborado pelo autor

Ranking de Objetivos - Nível 2 (Portátil)

	Leve	Pequeno	Fácil de transportar	Média Geométrica	Peso
Leve	1	1/3	2	0,87	0,25
Pequeno	3	1	3	2,08	0,59
Fácil de transportar	1/2	1/3	1	0,55	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor

Ranking de Objetivos - Nível 2 (Fácil de usar)

	<i>Plug and Play</i>	<i>Open Source</i>	<i>Manual técnico</i>	<i>Design intuitivo</i>	<i>Média Geométrica</i>	<i>Peso</i>
<i>Plug and Play</i>	1	1/3	3	2	1,19	0,26
<i>Open Source</i>	3	1	2	3	2,06	0,45
<i>Manual técnico</i>	1/3	1/2	1	1/2	0,54	0,12
<i>Design intuitivo</i>	1/2	1/3	2	1	0,76	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor

Ranking de Objetivos - Nível 2 (Durável)

	<i>Estrutura resistente</i>	<i>Reutilizável</i>	<i>Fácil manutenção</i>	<i>Média Geométrica</i>	<i>Peso</i>
<i>Estrutura resistente</i>	1	1/3	1/2	0,55	0,16
<i>Reutilizável</i>	3	1	2	1,82	0,54
<i>Fácil manutenção</i>	2	1/2	1	1,00	0,30

Fonte: Elaborado pelo autor