



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO UFC VIRTUAL
BACHARELADO EM SISTEMAS E MÍDIAS DIGITAIS**

WILLIAM DE ARAÚJO DIAS

**LOUSA DIGITAL: A UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D NA
ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CANETA ELETRÔNICA PARA USO EM
QUADROS INTERATIVOS DE BAIXO CUSTO**

**FORTALEZA
2019**

WILLIAM DE ARAÚJO DIAS

**LOUSA DIGITAL: A UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D NA
ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CANETA ELETRÔNICA PARA USO EM
QUADROS INTERATIVOS DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas e Mídias Digitais, curso da Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus do Pici, Fortaleza.

Orientador: Prof. Me. Antonio José Melo Leite Júnior.

FORTALEZA
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D536l Dias, William de Araújo.
Lousa digital: a utilização de modelagem e impressão 3D na elaboração de protótipo de caneta eletrônica para uso em quadros interativos de baixo custo / William de Araújo Dias. – 2019.
56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto UFC Virtual, Curso de Sistemas e Mídias Digitais, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Antonio José Melo Leite Júnior.

1. Quadro Interativo. 2. Prototipação. 3. Modelagem 3D. 4. Impressão 3D. I. Título.

CDD 302.23

WILLIAM DE ARAÚJO DIAS

**LOUSA DIGITAL: A UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D NA
ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CANETA ELETRÔNICA PARA USO EM
QUADROS INTERATIVOS DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Sistemas e Mídias Digitais,
curso da Universidade Federal do Ceará (UFC)
– Campus do Pici, Fortaleza.

Aprovado em: ___ / _____ / _____

Banca Examinadora

Me. Antonio José Melo Leite Júnior (Orientador) (IUVI/UFC)

Me. Neil Armstrong Rezende (IUVI/UFC)

Dr. Clemilson Costa dos Santos (IUVI/UFC)

FORTALEZA
2019

AGRADECIMENTOS

À minha família, minha mãe Francisca de Araújo Dias, meu pai Jociclébio Otaviano Dias, meu irmão mais velho Werley de Araújo Dias e minha irmã caçula Shéllida de Araújo Dias, por serem na minha vida os maiores exemplos de união, apoio e dedicação que me ajudaram a seguir firme nesta jornada.

Ao meu melhor amigo-irmão Carlos Henrique Brasil Costa, que foi a pessoa que mais me inspirou e motivou a encarar toda a aprendizagem que me trouxe até a universidade e sempre esteve comigo nos bons e nos maus momentos.

Aos meus colegas e amigos que conheci no curso, que sempre acreditaram no meu potencial, até quando nem eu mesmo estava conseguindo acreditar.

Aos professores, coordenadores e servidores técnico-administrativos do curso de Sistemas e Mídias Digitais, pela excelente experiência de convívio e interação com os alunos do curso, fazendo do nosso curso um dos espaços mais prazerosos de se passar o tempo neste Campus do Pici.

À toda a equipe do Laboratório de Mídias Educacionais, na figura do professor Henrique Sérgio Lima Pequeno, pela oportunidade de participar de um projeto relevante numa área que tem sido uma das minhas paixões dos últimos dez anos e fazer parte da excelente equipe de profissionais do LME.

Ao meu estimado colega de projeto, Yure Vieira Sampaio Albuquerque, pela exemplar atuação, tomando frente das etapas mais consolidadoras do nosso protótipo e por sua monografia, que me guiou no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo descrever o processo de desenvolvimento de um protótipo de caneta eletrônica para um projeto de quadro interativo de baixo custo que está sendo desenvolvido pelo Laboratório de Mídias Educacionais, da Universidade Federal do Ceará, utilizando impressão 3D como meio de agilização da etapa de produção do modelo físico do protótipo. O autor apresenta uma visão geral do projeto e sua função social e mercadológica, e descreve as etapas de conceituação das diferentes versões do protótipo, a modelagem, preparação e ajustes do modelo, a impressão e refinamento das peças, e por fim, apresenta os resultados dos testes realizados com voluntários que demonstram que os requisitos de usabilidade e funcionalidade do protótipo foram atingidos e o protótipo está bem encaminhado para entrar na etapa de produção a qualquer momento que o Laboratório de Mídias Educacionais desejar.

Palavras-chave: Quadro Interativo. Prototipação. Modelagem 3D. Impressão 3D.

ABSTRACT

This paper aims to describe the process of developing a prototype electronic pen for a low cost interactive whiteboard project that is under development by the Educational Media Laboratory of the Federal University of Ceará using 3D printing as a means of streamlining the stage of production of the prototype physical model. The author presents an overview of the project and its social function and marketing value, then describes the stages of conceptualization of the different versions of the prototype, modeling, preparation and adjustments of the model, the printing and refinement of the pieces, and finally presents the results of tests performed with volunteers demonstrating that the usability and functionality requirements of the prototype have been met and the prototype is well on track to enter the production stage at any time the Educational Media Laboratory desires.

Keywords: Interactive Whiteboard. Prototyping. 3D Modeling. 3D Printing.

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2 | CONCEITO DO PROJETO..... | 11 |
| 2.1 | O Modelo Conceitual do Projeto da Lousa Digital..... | 11 |
| 2.2 | Objetivos..... | 12 |
| 2.3 | A Equipe de Desenvolvimento do Protótipo..... | 12 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO..... | 13 |
| 3.1 | Elaborando o Protótipo..... | 13 |
| 3.2 | As Versões da Caneta..... | 15 |
| 3.3 | Os Componentes Eletrônicos..... | 16 |
| 3.4 | 1ª Iteração: Versão Prévia..... | 18 |
| 3.5 | 2ª Iteração: Meu Ponto de Partida..... | 19 |
| 3.6 | 3ª Iteração: Tomando Forma..... | 21 |
| 3.7 | 4ª Iteração: O Modelo Validado..... | 23 |
| 3.8 | 5ª Iteração: Uma Nova Roupagem Para o Protótipo..... | 29 |
| 4 | CONSTRUÇÃO DO MODELO..... | 31 |
| 4.1 | O Processo de Modelagem 3D..... | 31 |
| 4.2 | Preparação do Modelo para Impressão..... | 37 |
| 4.3 | A Impressão..... | 41 |
| 4.4 | Refinamento do Modelo Impresso..... | 43 |
| 5 | TESTES DE FUNCIONALIDADE E DE USABILIDADE..... | 44 |
| 6 | RESULTADOS DOS TESTES..... | 49 |
| 7 | CONCLUSÃO..... | 54 |
| 8 | TRABALHOS FUTUROS..... | 56 |
| | REFERÊNCIAS..... | 57 |
| | ANEXO A – QUESTIONÁRIO SOBRE A LOUSA DIGITAL INTERATIVA..... | 58 |

1 INTRODUÇÃO

O uso de lousas digitais, comumente chamadas de *smartboards*¹, tem se tornado cada vez mais comum nas escolas e universidades e esta tecnologia oferece um grande auxílio à apresentação do conteúdo por oferecer ao professor ferramentas e meios mais sofisticados de representação gráfica e multimídia do assunto sendo abordado em sala. No entanto, essa solução ainda não é viável para a maioria do seu potencial público. Smartboards geralmente custam em torno de \$1.500 a \$6.500 (preço em Dólares, de acordo com os revendedores americanos das lousas interativas)². No Brasil, podem ser encontradas à venda online por preços entre R\$ 1.500 a R\$ 8.999³. Além disso, esses dispositivos requerem cuidados redobrados no manuseio cotidiano pois a manutenção e eventuais consertos nos dispositivos demandam um custo material e logístico, enquanto as lousas convencionais não exigem nada disso, apenas o custo inicial da compra do material.

Ciente deste obstáculo para a popularização deste tipo de tecnologia, o Laboratório de Mídias Educacionais (LME⁴) da Universidade Federal do Ceará, está desenvolvendo um projeto que tem como meta oferecer uma alternativa acessível, por ser um produto de baixo custo de produção e que consegue entregar uma boa funcionalidade como ferramenta de auxílio didático em sala de aula, enquanto demanda muito pouco em termos de dispositivos eletrônicos e *hardware* e *software*⁵.

Com esse objetivo, surgiu o projeto batizado internamente dentro do LME como Lousa Digital. A concepção do projeto partiu da proposta de simplificar o tipo de tecnologia utilizada nas smartboards, diminuindo a quantidade de componentes físicos eletrônicos para aproveitar o potencial de soluções de software para fazer o trabalho da detecção de posição do dispositivo apontador principal – a caneta – em relação a uma área pré-determinada: A lousa.

¹ Smart Board é na verdade o nome de uma marca de lousas interativas. O nome se popularizou pelo fenômeno da Metonímia, similar ao que ocorre com a marca Bom Bril, por exemplo. E o nome da marca virou, no cotidiano, o nome dado ao tipo de produto.

² Informação obtida do site <https://homeschoolbase.com/smart-board-cost/>

³ De acordo com busca no site <https://eletronicos.mercadolivre.com.br/projetores-telas/lousa-interativa-smart-board>

⁴ Link para o site do LME: <http://lme.ufc.br/>

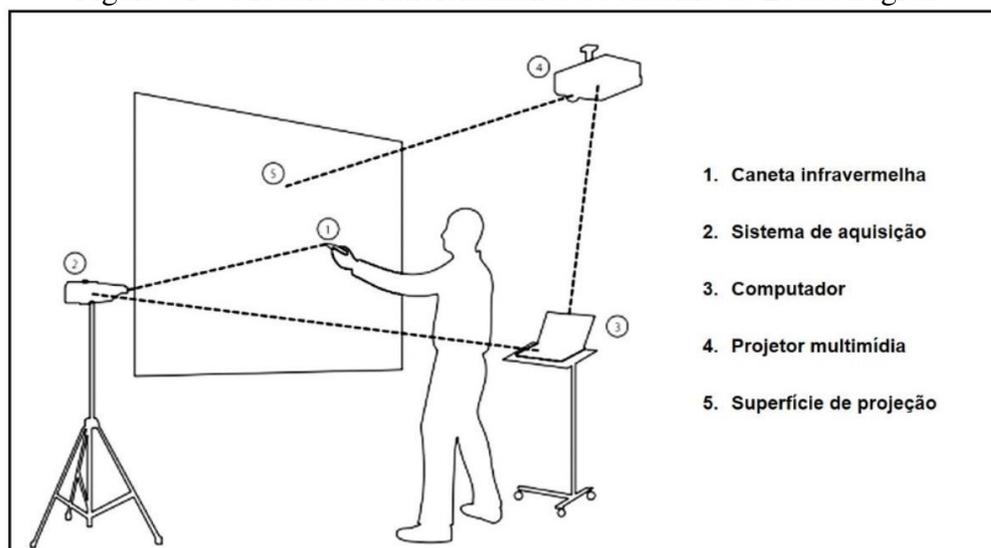
⁵ Hardware e Software são termos técnicos da área da tecnologia que fazem referência aos componentes de um sistema eletrônico. Hardware se refere ao componente físico, o dispositivo; enquanto Software se refere ao componente virtual, o aplicativo executado dentro de uma máquina eletrônica.

Minha participação no projeto aconteceu entre março e dezembro de 2016. No início de dezembro, o projeto entrou num hiato, mas durante todo este período, conseguimos produzir dois protótipos validados, viáveis para os testes de usabilidade, e com eles, o projeto ganhou robustez e potencial para ser retomado e entrar em etapa de produção, dependendo de uma avaliação de mercado e estudo de viabilidade com potenciais clientes do LME.

2 CONCEITO DO PROJETO

2.1 O Modelo Conceitual do Projeto da Lousa Digital

Figura 01 – Modelo de funcionamento do sistema da Lousa Digital



Fonte: PEREIRA (2015) e ajustado por ALBUQUERQUE (2017)

A Figura 01 é uma demonstração do modelo de disposição e funcionamento do sistema conceituado para o projeto da Lousa Digital. Um modelo semelhante havia sido conceituado por PEREIRA (2015, Pág. 11), que dispunha como sensor de aquisição⁶ da caneta a câmera infravermelha um controle remoto *WiiMote*, do console *Nintendo Wii*⁷, para utilização do sistema em aulas de Química. O modelo proposto pelo Laboratório de Mídias Educacionais prevê como diferença do sistema proposto por ela a alternativa do dispositivo de aquisição uma *web camera* simples, apenas atentando para a utilização de um filtro de luz infravermelha, para neutralizar a luminosidade ambiente. Na prática, o *WiiMote* exerce essa mesma função. No entanto, o *WiiMote* pode não ser tão acessível para alguns clientes.

⁶ Chamamos de Sensor de Aquisição qualquer dispositivo utilizado para detectar algum tipo de sinal de entrada emitido por um dispositivo do sistema. Neste caso, o sinal a ser detectado é a luz infravermelha da ponta da caneta, portanto o sensor de aquisição aqui é uma câmera, que é capaz de detectar naturalmente esse tipo de emissão.

⁷ Nintendo Wii é um aparelho de video game, lançado em 2005 pela empresa Nintendo. Um dos seus dispositivos de interação principal é o controle remoto batizado de *WiiMote*, que possui na sua ponta uma câmera para detectar a luz infravermelha emitida por uma barra emissora que é instalada junto à TV, para detectar a posição do controle em relação ao espaço tridimensional.

2.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é descrever o desenvolvimento de um protótipo de caneta eletrônica para ser usado em conjunto com o software desenvolvido pelo Laboratório de Mídias Educacionais, utilizando a Impressão 3D como meio facilitador do processo. Para atingir esse objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Apresentar uma visão geral do projeto e do processo de desenvolvimento;
2. Descrever as diferentes reiteraões do processo, apresentar a conceituação das diferentes versões produzidas em cada etapa da prototipação;
3. Discorrer sobre o processo de modelagem 3D, falando sobre os softwares utilizados, as técnicas e procedimentos usados na produção do modelo 3D impresso;
4. Apresentar os testes realizados com os modelos validados e os resultados obtidos.

2.3 A Equipe de Desenvolvimento do Protótipo

Sob orientação dos professores Antônio José Melo Leite Júnior, Clemilson Costa dos Santos, Gabriel Antoine Louis Paillard e George Allan Menezes Gomes, e sob a supervisão e acompanhamento do professor Henrique Sérgio Lima Pequeno, representando o Laboratório de Mídias Educacionais, trabalhei em dupla com Yure Vieira Sampaio Albuquerque, aluno graduado do curso técnico de Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

Neste projeto, Yure foi responsável pela elaboração do circuito eletrônico da caneta, execução dos testes prévios de funcionalidade do sistema, bem como os refinamentos no driver⁸ da câmera do sistema de aquisição de imagem infravermelha. Eu fui responsável pela elaboração, modelagem, impressão e montagem do modelo físico da caneta.

⁸ Driver é um tipo de software que controla e faz o ajuste direto da integração e comunicação entre um dispositivo periférico - um hardware - e o restante do sistema.

3 DESENVOLVIMENTO

O processo de produção do protótipo da caneta eletrônica é dividido em cinco etapas principais: Conceituação, Modelagem, Impressão e Refinamento, Montagem e Testes de Funcionalidade. Cada etapa é composta de um conjunto de tarefas sequenciadas e a etapa de Testes de Funcionalidade é o momento onde se analisam todos os acertos e ajustes finos necessários ao modelo para garantir a consistência do protótipo. A partir dos testes de montagem é possível saber se o encaixe das peças impressas está nas medidas corretas e validar aquela iteração do modelo para prosseguir para os testes de usabilidade, ou se é necessário voltar para a etapa de modelagem e fazer algum ajuste no modelo para compensar as imperfeições de superfície decorrentes de limitações técnicas da impressora ou de configuração da impressão. Alguns exemplos das imperfeições típicas encontradas no método de impressão 3D utilizado no processo são demonstrados na seção **4.4 Refinamento do Modelo Impresso**.

3.1 Elaborando O Protótipo

A etapa de prototipação do projeto compreendeu uma constante revisão do conceito, buscando adequar-se aos requisitos definidos para o produto como um todo:

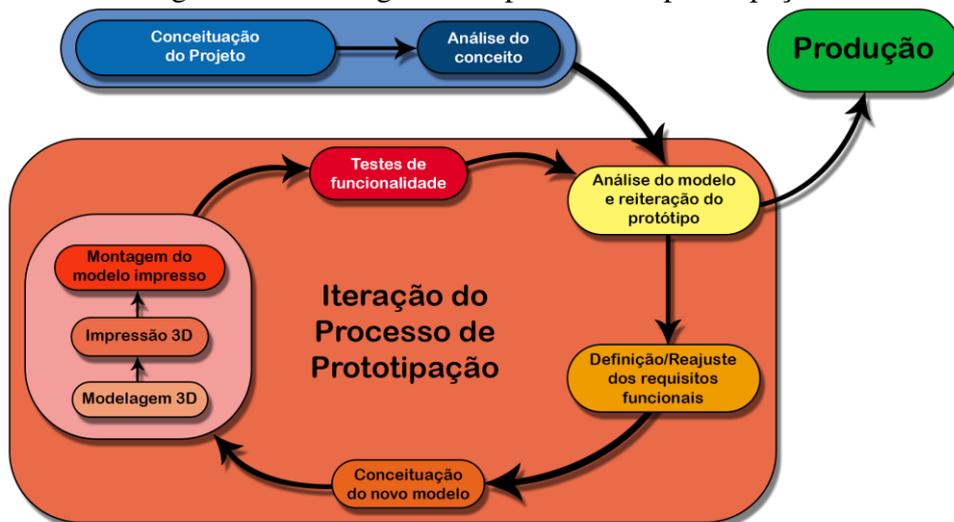
- Fácil usabilidade e consistência do funcionamento do sistema
- Respeito aos aspectos ergonômicos envolvidos no manuseio de uma caneta
- Estruturação física do protótipo consistente e robusta, sem expor ao usuário as vulnerabilidades dos componentes internos

Com isso em mente, sempre que um modelo de protótipo é concluído, os testes prévios de usabilidade da caneta são realizados e são levados a uma avaliação do modelo pela equipe junto ao professor Henrique, onde são levadas em consideração as características de funcionalidade da caneta, a precisão do método escolhido de detecção, a facilidade de uso e os aspectos ergonômicos do modelo. Nesta análise pode-se, por exemplo, modificar ou ajustar os requisitos pontuais do protótipo, caso o modelo atual não esteja apresentando um desempenho

satisfatório. Isso significa modificar o protótipo desde a etapa de conceituação e entrar em uma nova versão do protótipo.

Um dos primeiros problemas de desempenho detectados logo no começo do projeto, que levou o projeto a passar pela primeira remodelagem desde a minha entrada na equipe, quando saímos da 2ª para a 3ª Iteração do projeto, foi quanto à ergonomia, ou mais precisamente a falta de ergonomia do modelo. Era muito grande e desconfortável para ser utilizada por tempo prolongado. Problemas técnicos como esse levaram o protótipo a uma completa remodelagem, isto aconteceu neste caso supracitado e também na etapa seguinte, descrito na próxima seção do trabalho.

Figura 02 – Fluxograma do processo de prototipação



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 As Versões da Caneta

Figura 03 – Separação dos modelos produzidos em cada uma das 5 iterações do protótipo



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao todo, o projeto passou por cinco iterações principais, cada uma delas constituindo uma remodelagem completa do protótipo. Cada modificação do modelo se fez necessária após conclusão da etapa de avaliação e validação do protótipo na iteração anterior. Geralmente as mudanças foram percebidas como necessárias ao ser identificada alguma limitação do modelo que invalidasse a sua usabilidade. Em alguns casos, uma remodelagem foi solicitada para acomodar uma nova funcionalidade apresentada como alternativa a ser experimentada.

Os componentes eletrônicos utilizados ao longo do projeto variaram de acordo com os requisitos que surgiram em cada uma das iterações em que passamos. Alguns itens foram adicionados nas etapas mais iniciais, outros foram substituídos, e mais próximo do final do processo, simplificamos o modelo ao máximo, reduzindo a quantidade de componentes eletrônicos e de peças físicas impressas da carcaça da caneta, enquanto mantínhamos ainda uma margem para expansividade do protótipo.

Graças a essa simplificação do protótipo, o último modelo, produzido na 5ª iteração, possui uma placa única, que integra o compartimento eletrônico junto com o compartimento da pilha (em vez de separar o compartimento da pilha e ligá-lo por fios até a placa), e a carcaça possui apenas 4 partes: A ponta, as metades direita e esquerda do corpo da

caneta e a tampa do compartimento da pilha (enquanto o modelo anterior tinha uma peça extra para unir as duas metades do corpo).

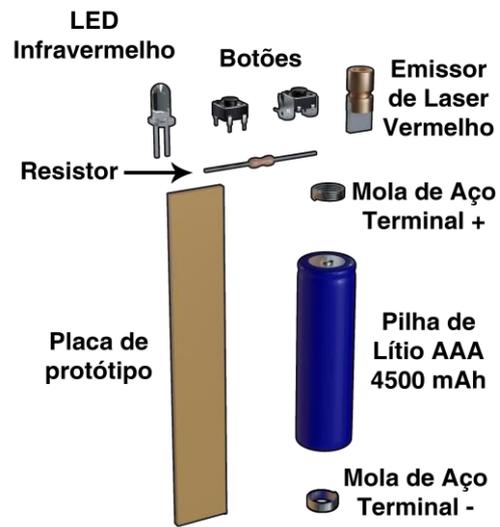
3.3 Os Componentes Eletrônicos

- 2 modelos diferentes de pilha de lítio recarregável
 - 1 pilha AAA — Foi o modelo usado no protótipo validado
 - 1 pilha “18650”. Este número faz referência às dimensões de Diâmetro e Comprimento, respectivamente (sendo 18 mm x 65 mm).
- 2 modelos diferentes de botão de ação
 - 1 modelo para ação frontal (a face do botão fica na extremidade oposta aos terminais eletrônicos)
 - 1 modelo para ação lateral (a face do botão fica na extremidade adjacente à face dos terminais eletrônicos)
- 1 placa de resina com uma camada de cobre em um dos lados para prototipação do circuito eletrônico
- 1 LED infravermelho de comprimento de onda de aproximadamente 850 nm
- 1 laser vermelho utilizado em uma das variações durante a 4ª iteração
- 1 resistor de para integrar o circuito das versões que utilizaram o LED
- 2 molas e 2 fios para os terminais de contato entre a pilha e a placa

A 4ª iteração do projeto atendeu os requisitos de fácil usabilidade e de respeito à ergonomia, mas deixou a desejar no requisito de não expor as vulnerabilidades dos componentes eletrônicos. A 5ª iteração do projeto corrigiu esse problema e então consolidou todos os requisitos funcionais predefinidos. Na 4ª conseguimos um modelo eficaz e versátil e o modelo da 5ª simplificou, como descrito anteriormente, os componentes eletrônicos e também a carcaça. Além do supracitado, o modelo da final descarta a versão de laser, enquanto ainda mantém em sua placa o botão secundário, viabilizando uma potencial expansão de funcionalidade do protótipo.

Figura 04 – Exposição dos componentes eletrônicos validados da 4ª para a 5ª iteração

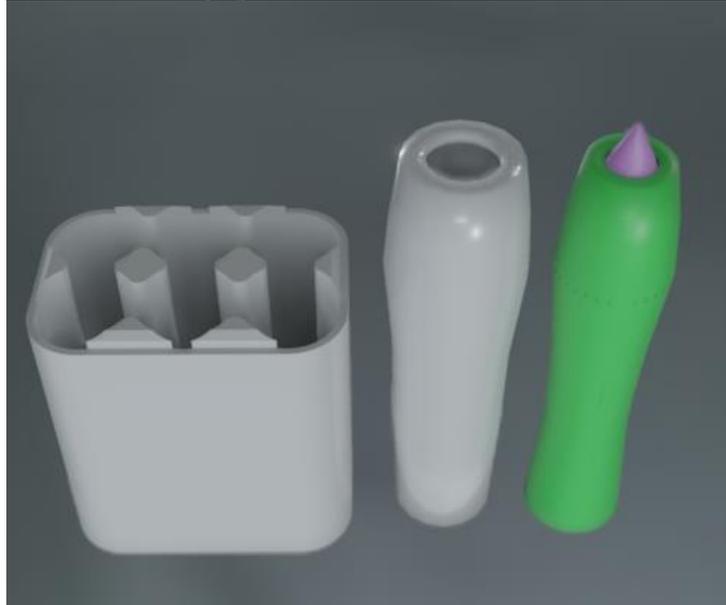
**Componentes usados nos
protótipos validados
(usados na 4ª e na 5ª iteração do projeto)**



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 1ª Iteração: Versão Prévia

Figura 05 – Modelo 3D das peças desenvolvidas antes da minha entrada na equipe



Fonte: Elaborada pelo autor

Até fevereiro de 2016 – Antes da minha entrada no projeto, já havia um rascunho de modelo prévio, ainda muito preliminar, sem muita documentação. Apenas o modelo 3D muito básico. O modelo continha, em conjunto, a caneta e um compartimento para guardar pilhas extras, um total de 6 pilhas AAA. Este era o pedaço de informação mais útil que este modelo continha: O formato da pilha para o qual ele foi pensado, a pilha AAA. Esse formato de pilha seria o meu ponto de partida para modelar os próximos protótipos, como irei descrever na próxima seção.

O modelo da caneta previa dois botões de ação: Um na ponta e outro no fundo, mas não havia um detalhamento de como o botão do fundo funcionaria. Foi possível apenas especular que seria para cumprir a função de botão direito do mouse. Essa é uma função comum em canetas de mesas digitalizadoras que possuem esse botão. Como se tratava apenas de um rascunho, não ficava claro também como deveria funcionar a abertura da carcaça para remoção e/ou troca das pilhas, nem para o acesso à placa e aos componentes eletrônicos.

3.5 2ª Iteração: Meu Ponto de Partida

Figura 06 – Modelo 3D das versões do 1º modelo da caneta e suas respectivas dimensões



Fonte: Elaborada pelo autor

De março a abril – Embora já tenha sido observado que o modelo anterior houvera sido projetado para uma pilha AAA, quando comecei a trabalhar neste modelo, o que tínhamos à nossa disposição era uma pilha de íon de Lítio, recarregável, que fugia dos formatos padrões que eu estava acostumado a ver. Parecia uma pilha AA, mas era consideravelmente maior, tanto em diâmetro quanto em comprimento.

Era necessário então encontrar a denominação para este formato. E na Wikipedia em inglês, encontrei este artigo contendo uma tabela com as dimensões dos diferentes tipos e formatos de pilhas e baterias, e achei aqui a denominação do modelo disponível: Na tabela, essa pilha é rotulada como “18650”, denominação designada a partir das suas dimensões de Diâmetro x Comprimento (ver Figura 07).

Figura 07 – Detalhe da denominação do modelo de pilha utilizado no início do projeto

| | | | | | | |
|--|-----------------------|-------------|-----------|----|----|-------------------------------|
| | 18350 | | 700–1200 | 18 | 35 | [49] |
| | 18490 | | 800–1300 | 18 | 49 | |
| | 18500 ^[53] | | 2000 | 18 | 50 | About the san |
| | 18650 ^[54] | 168A | 1500–3600 | 18 | 65 | This cell typ |
| | 20700 | | 3000–4000 | 20 | 70 | Introduced by |
| | 21700 | 21-70, 2170 | 4200–5000 | 21 | 70 | Announced by Tesla Model 3 |

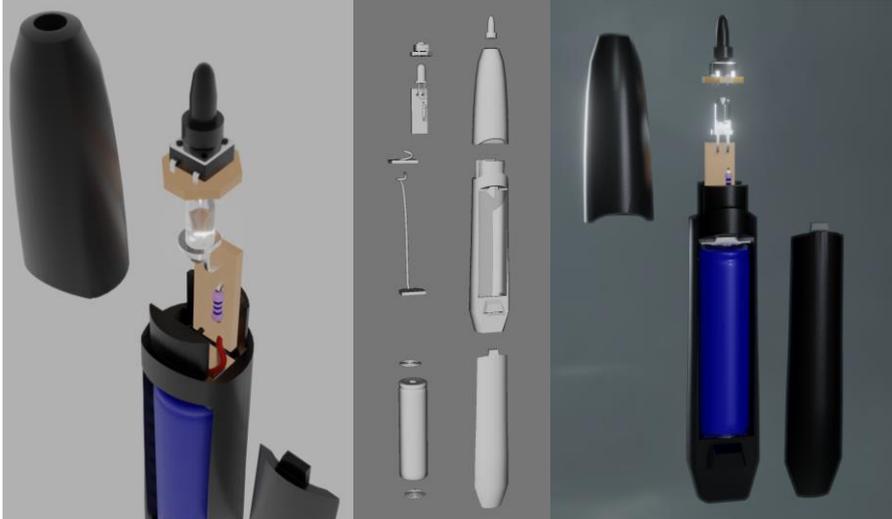
Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_sizes#List_of_Li-ion_sizes

Essa informação era importante porque era a partir da pilha que se iniciaria a modelagem do protótipo, portanto, todas as dimensões da caneta deveriam partir das dimensões da pilha. No começo da etapa de modelagem, ainda estava me baseei nas formas rascunhadas pelo modelo prévio: formato cilíndrico, com uma curvatura suave na parte exterior do perfil, para auxiliar na ergonomia. Desde o começo a ergonomia era um requisito fundamental para o protótipo, e este ponto ficou muito prejudicado devido tamanho incomum da pilha, que forçava todo o modelo a ter um tamanho exagerado.

O problema do tamanho do modelo foi percebido logo na primeira avaliação do protótipo, e para solucioná-lo, os orientadores providenciaram outro modelo de pilha, também recarregável, mas agora no formato padrão AAA. Isso reduziu consideravelmente o tamanho do compartimento da pilha, e permitiria reduzir o tamanho da caneta como um todo. No entanto, ainda não estava projetado o compartimento da placa de circuito que seria responsável pela função de acender o LED infravermelho – e também um vermelho que testaríamos mais adiante – ao apertar o botão principal na ponta da caneta. E mesmo com a redução do tamanho do modelo, o formato que a caneta estava tomando já não estava atendendo o requisito da ergonomia. O modelo ainda era desconfortável de segurar graças ao diâmetro e o formato que estava tomando.

3.6 3ª Iteração: Tomando Forma

Figura 08 – Visualização do 2º modelo da caneta com a organização dos componentes



Fonte: Elaborada pelo autor

Entre abril e junho – A ideia inicial desta versão era de buscar um modelo mais ergonômico e prático, reduzindo então o tamanho total do modelo da caneta, alterando o formato buscando agora modelos mais convencionais de caneta como referência. Essa possibilidade foi facilitada graças à decisão de usar o modelo da pilha no formato AAA, bem menor que a pilha anterior. Isso permitiu que todo o modelo da caneta fosse reduzido.

O design do modelo ainda consistia em peças que seriam encaixadas e desencaixadas com facilidade. E agora havia a ideia geral da parte funcional da caneta, que antes só havia sido modelado o compartimento da pilha. Agora a ideia era que a ponta da caneta acionaria o botão, que por sua vez fechava o circuito na placa, posicionada logo abaixo do botão, e assim acenderia o LED infravermelho na parte médio-superior da caneta. O LED iluminaria toda a parte interna do compartimento funcional, e usaria um material translúcido na carcaça desta parte superior. Esse material translúcido deixaria passar uma parte da luminosidade do LED para ser visível pela câmera.

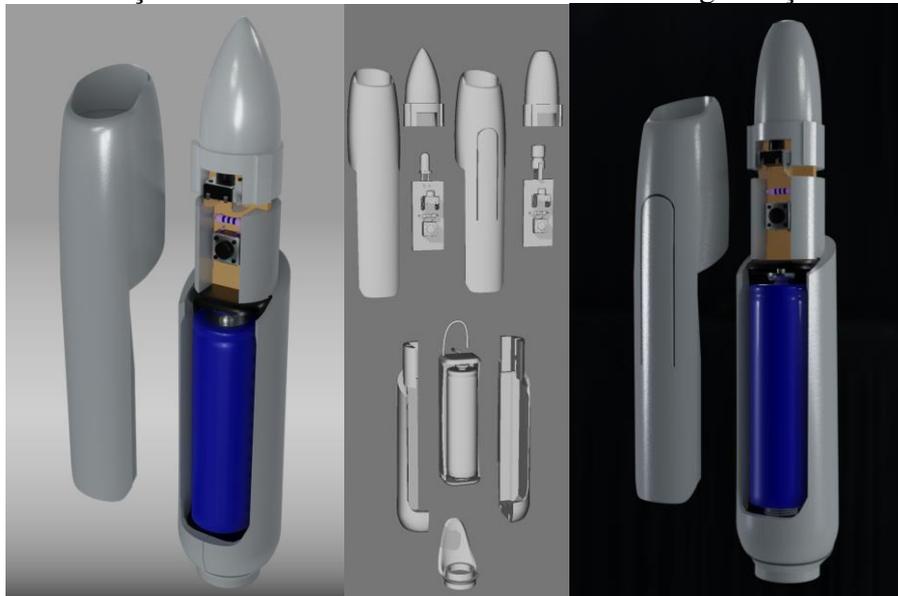
Este modelo apresentou alguns problemas técnicos e um problema grave de design, que concluímos após analisar o primeiro protótipo impresso. Os problemas técnicos que nós encontramos logo no primeiro manuseio do protótipo foram:

- O encaixe das peças da parte superior não era firme o suficiente porque as partes internas de apoio do encaixe precisavam ser pequenas para não bloquear a luminosidade interna o LED, e por causa disso, frequentemente a parte superior se soltava do compartimento da pilha sem nenhum esforço;
- O encaixe do botão próximo na ponta da caneta se provou muito complicado. Era um espaço muito pequeno para encaixar a placa de menos de 1 cm de diâmetro onde o botão era soldado, e lá dentro não havia nada apoiando o botão firmemente no devido lugar. Logo ao pressionar a ponta da caneta, o botão era empurrado pra dentro e era necessário mais trabalho pra recolocá-lo no lugar;

Mas o principal problema de design foi pelo fato de a parte iluminada da caneta ficar no meio do modelo, justamente onde a mão do usuário iria necessariamente ficar cobrindo toda a luminosidade transluzida. Não foi preciso nem testar na prática para que nós já concluíssemos por essa análise prévia que não ia dar certo. A luz ia ficar oclusa pela própria mão do usuário e a câmera dificilmente iria detectá-la. Esses problemas nos fizeram concluir que aquele modelo não seria viável. Tivemos que descartá-lo e remodelar o protótipo do zero, buscando outra filosofia de design. Entraríamos então na 4ª iteração do projeto.

3.7 4ª Iteração: O Modelo Validado

Figura 09 – Visualização das duas versões do 3º modelo com a organização dos componentes

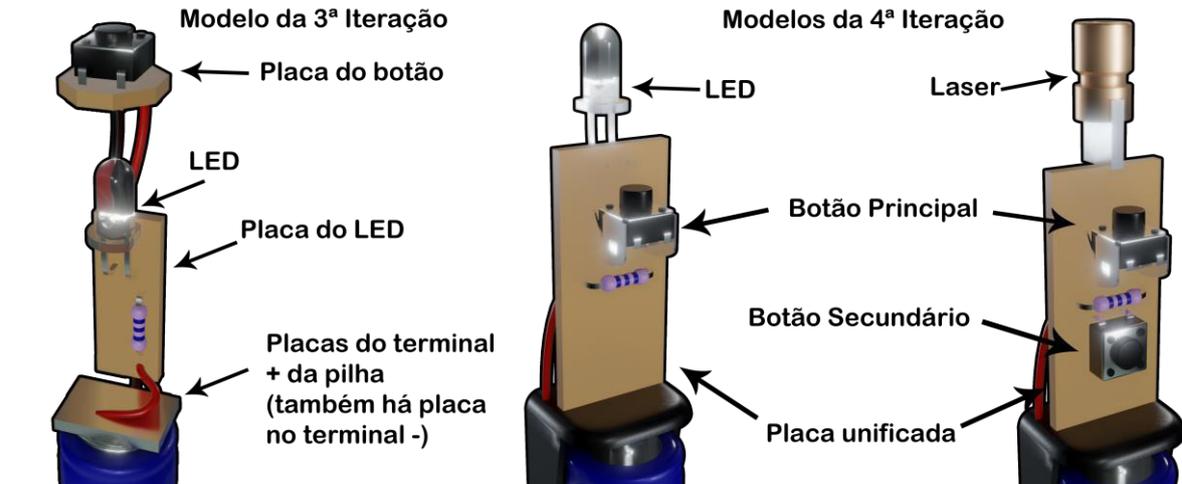


Fonte: Elaborada pelo autor

De junho a setembro – Essa foi a versão onde passamos maior parte do tempo da etapa de testes de usabilidade experimentando novas ideias, o que nos levou a desenvolver duas versões diferentes, pensando em duas formas de interação do usuário com a caneta. Uma das versões, a primeira, usa o LED infravermelho, dessa vez montado diretamente na ponta da caneta, e iluminando o material impresso numa espessura mínima para garantir que a luz do LED não seja completamente ocluída pela própria ponta.

O modelo ainda usava a ideia de encaixe de várias partes. Mas dessa vez, o compartimento da pilha não era mais uma peça única, permitindo a fiação dos terminais da pilha passar por trás do seu compartimento, e encaixada em um espaço próprio na carcaça, até chegar na placa, que agora era uma peça única (ver Figura 10). A tampa principal agora cumpria duas funções simultâneas: cobrir o compartimento da pilha enquanto mantém todas as partes da caneta unidas, mantendo ainda – e agora já pensando à frente – o aspecto estético do protótipo (ver Figura 13).

Figura 10 – Comparação entre as placas da 3ª e da 4ª Iteração

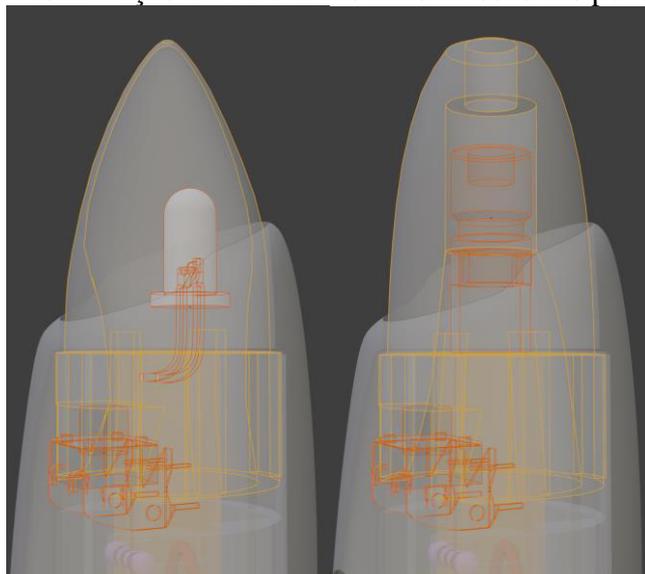


Fonte: Elaborada pelo autor

A princípio, a placa contava apenas com um único botão de ação, que seria pressionado pela carcaça da ponta da caneta. Não havia este botão secundário, mais próximo do compartimento da pilha (ver Figura 10). Ao longo das análises do modelo, surgiu a ideia de utilizarmos um novo método de interação com a lousa: Usar a caneta como um *laser pointer*, possibilitando ser acionado à distância, apontando a caneta para a lousa e pressionando um botão na parte frontal da tampa principal da caneta.

A partir dessa nova ideia, foi elaborada uma versão alternativa, que modificava a ponta da caneta, a tampa principal (ver Figura 11), que agora iria contar com um recorte para formar um pressionador para o novo botão que foi adicionado na placa. Este recorte permite que se aproveite a flexibilidade do material da impressão 3D para criar uma espécie de aba na tampa. Pelo lado interno, esta aba possui uma extrusão que encosta no botão na placa. Quando o usuário pressiona a aba, ela por sua vez pressiona o botão e dispara o laser. A ponta ainda pode ser pressionada, caso o usuário queira usar a caneta de forma convencional. Ela também pressiona o botão principal para disparar o laser.

Figura 11 – Visualização em raio-x das duas versões das pontas da caneta



Fonte: Elaborada pelo autor

Além do LED infravermelho, também experimentamos outras possibilidades para solucionar a detecção da posição da caneta. Testamos um LED vermelho (visível), ainda antes de surgir a ideia de usar o laser, porque durante os primeiros testes de usabilidade, foi identificado que a câmera estava com dificuldades de conseguir, enquanto filtrava a luminosidade natural do ambiente para pegar apenas o espectro infravermelho do LED, pegar também uma intensidade de luz grande o suficiente para calcular com precisão a posição da caneta.

Mas o LED vermelho também não funcionou bem, mesmo trocando o filtro da câmera, resolveu-se então ajustar a sensibilidade da câmera via driver e também ajustando dentro do software da Lousa. Após estes ajustes e novos testes, ele constatou que o modelo com LED infravermelho agora estava funcionando devidamente e então decidimos descartar o modelo com LED vermelho, porque concordamos que a luz vermelha poderia ser inconveniente ao usuário após algumas horas.

Mais uma possibilidade que chegamos a testar incluía o uso de um sensor de proximidade atrelado ao LED na ponta da caneta. Essa ideia surgiu após constarmos que o constante contato da ponta da caneta com a superfície da lousa estava desgastando o material da ponta mais rapidamente do que o ideal, e que talvez seria interessante se houvesse uma forma de acionar a detecção da posição da caneta antes mesmo de pressionar o botão de ação,

e considerar o contato da caneta como se fosse um clique de mouse ou uma ação de fato, de maneira similar ao comportamento das mesas digitalizadoras, em que o sensor da superfície de toque consegue detectar a caneta a uma pequena distância e transformar aquilo em informação de posição do mouse.

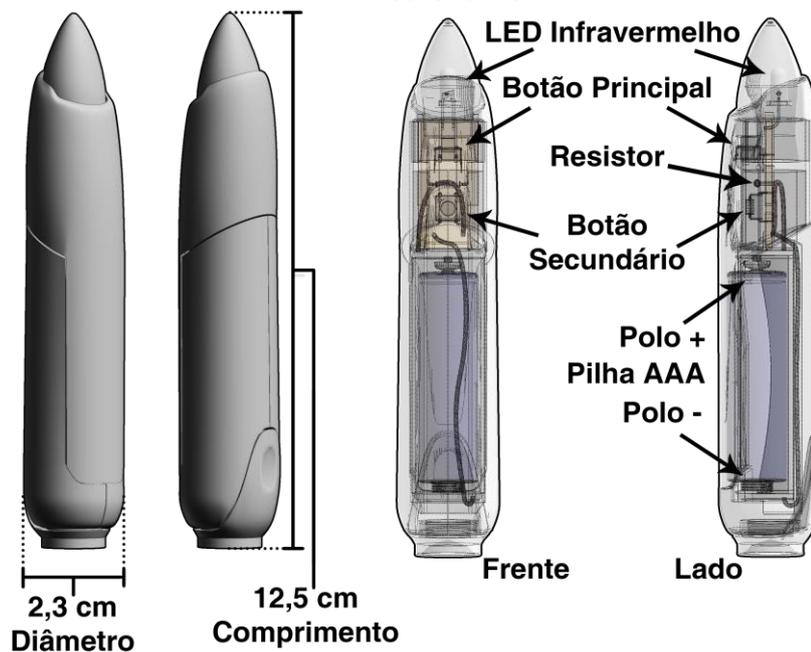
O que nos levou a descartar esse modelo foram dois motivos: Primeiro o fato de que o sensor de proximidade, que ficava localizado também na ponta da caneta, junto ao LED, estava sofrendo interferência da própria carcaça da ponta e disparando o LED antes mesmo de encostar a caneta na lousa; O segundo problema foi porque esta interação que diferencia a posição do dispositivo e o efetivo acionamento dele (novamente fazendo a analogia à mesa digitalizadora, é como se, ao aproximar a ponta da caneta no sensor de toque da mesa, o driver trate isso como sendo a posição do cursor do mouse dentro do sistema operacional, e apenas quando a caneta toca o sensor, o sistema trata como se fosse um clique), necessitaria dois tipos de sinais distintos para serem detectados e identificados pelo sensor do nosso modelo da Lousa Digital, neste caso a câmera. Ou seja, seria necessário que o LED emitisse a luz de uma forma distinta para cada situação, o que demandaria mais uma intervenção no código do software da Lousa, e isso estava fora da nossa competência, pois não éramos a equipe responsável pela programação.

Voltamos então ao modelo com LED infravermelho e foi aí que surgiu a ideia de testarmos uma alternativa com interação remota, aí veio a proposta do laser. Esta nova alternativa se mostrou viável, porém também apresentava um problema similar ao do sensor de proximidade. O laser ainda, quando acionado à distância, através do botão secundário na tampa principal, caía na questão de não diferenciar quando o laser era pra indicar apenas a posição projetada da caneta na imagem e quando a ação (o clique) efetivamente deveria acontecer. O sinal emitido pelo laser é um só, é binário – o laser está aceso ou não – e não diferencia o sinal entre passivo (apenas a posição do cursor na tela) e ativo (clique e mantendo o clique pressionado).

A consequência disso é que, sempre que a luz aparece dentro da imagem projetada e é detectada pela câmera, o software vai identificar esse ponto de luz como o sinal ativo, e se o usuário não estiver com a caneta apontada pra um local onde ele não quer clicar, isso traz diversos problemas de usabilidade.

Apesar deste problema, este modelo estava viável enquanto protótipo. A caneta é perfeitamente utilizável, não é desconfortável, apesar de necessariamente ainda ter uma espessura considerável. Não havia muita liberdade para fazer um modelo fino como as canetas de mesas digitalizadoras convencionais, por causa da natureza do material da impressão 3D e a relativa fragilidade do modelo impresso, caso a carcaça fique muito fina.

Figura 12 – Diagrama em raio-x do 3º modelo em visão ortogonal frontal e lateral e suas dimensões totais



Fonte: Elaborada pelo autor

Com este modelo definido, nós já tínhamos um protótipo bem estabelecido e aprovado para entrarmos na etapa de testes de usabilidade entre a equipe e os testes com voluntários. Os testes estão descritos na seção **5 Testes de Funcionalidade e de Usabilidade**. Mas durante esta etapa, encontramos um problema inerente do design. Não era algo que inviabilizava a praticidade do protótipo, mas era algo que certamente não poderia passar para a etapa de produção. O problema era que a tampa principal, quando removida para acessar a pilha, também deixava exposto o compartimento da placa e dos eletrônicos e deixava a ponta solta (ver Figura 13). Esse problema precisaria ser resolvido cedo ou tarde, antes de entrar na etapa de produção.

Figura 13 – Quando a tampa principal é removida, a parte eletrônica fica exposta e a ponta fica solta



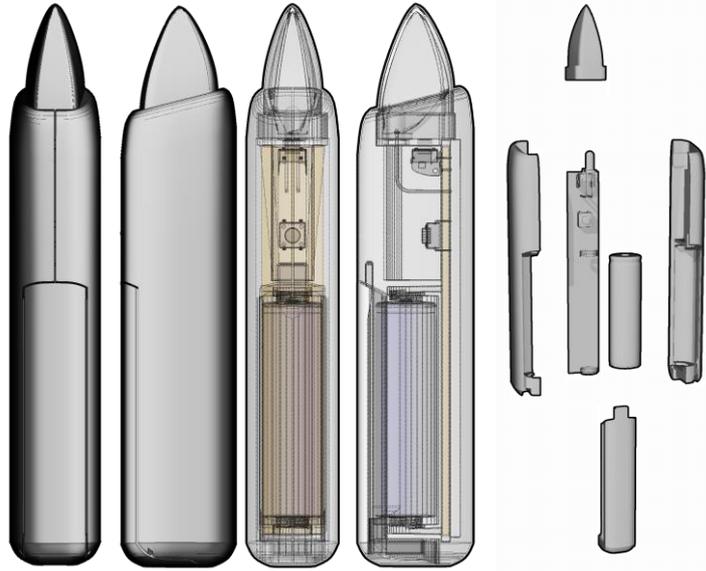
Fonte: Elaborada pelo autor

A tampa principal é encaixada de cima para baixo e, quando retirada, todo o compartimento da placa fica exposto. Durante a etapa de prototipação, além do problema de os componentes eletrônicos ficarem soltos, a carcaça também se desmonta com facilidade nessa situação. Para o modelo de produção, as metades da carcaça seriam seladas com firmeza e apenas a ponta seria facilmente removida, mas mesmo assim, a parte eletrônica inteira permaneceria exposta. Uma grave vulnerabilidade do design que precisava ser consertada.

Por esta razão, mais uma alternativa de design foi concebida, que entraria na 5ª e última iteração do projeto, dessa vez mudando também a aparência da caneta, além de resolver essa questão da vulnerabilidade detectada.

3.8 5ª Iteração: Uma Nova Roupagem Para o Protótipo

Figura 14 – Diagrama em raio-x com visão ortogonal e esquema de montagem



Fonte: Elaborada pelo autor

Do início de outubro ao início de dezembro – Para a próxima versão, decidimos simplificar o protótipo, reduzindo o número de partes do modelo e mantendo como principal meta um formato em que o usuário só possa ter acesso ao compartimento da pilha com facilidade, para que as partes eletrônicas não estejam visíveis quando a tampa principal for removida. A carcaça agora teria apenas duas partes do corpo, a ponta e a tampa da pilha (que agora não seria mais responsável por unir as metades da carcaça).

Além da carcaça, a parte eletrônica também foi simplificada. Agora todo o circuito estava integrado numa placa única e não mais seria separado o compartimento eletrônico do compartimento da pilha. A placa agora integra os terminais Positivo e Negativo da pilha e eles não mais são conectados por fios até a cápsula onde a pilha era encaixada no modelo anterior. Este modelo possui apenas a versão com LED infravermelho, mas o botão secundário foi mantido na placa para uma eventual modificação futura.

Por fora, visualmente, o perfil da seção transversal da caneta mudou. Enquanto todos os modelos até aqui eram cilíndricos (cujo perfil transversal é um círculo), dessa vez o modelo era mais oval, com as laterais achatadas e levemente convergentes (não paralelas). Essa mudança de perfil possibilitou que o manuseio fosse mais ergonomicamente consistente.

Isso significa que o usuário só iria segurar a caneta em dois ângulos possíveis de maneira mais confortável e firme, enquanto que os modelos anteriores permitiam mais liberdade para segurar a caneta em quaisquer ângulos, mas sem muita diferença na firmeza do manuseio.

Figura 15 – Visão Frontal ressaltando o perfil do 4º modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

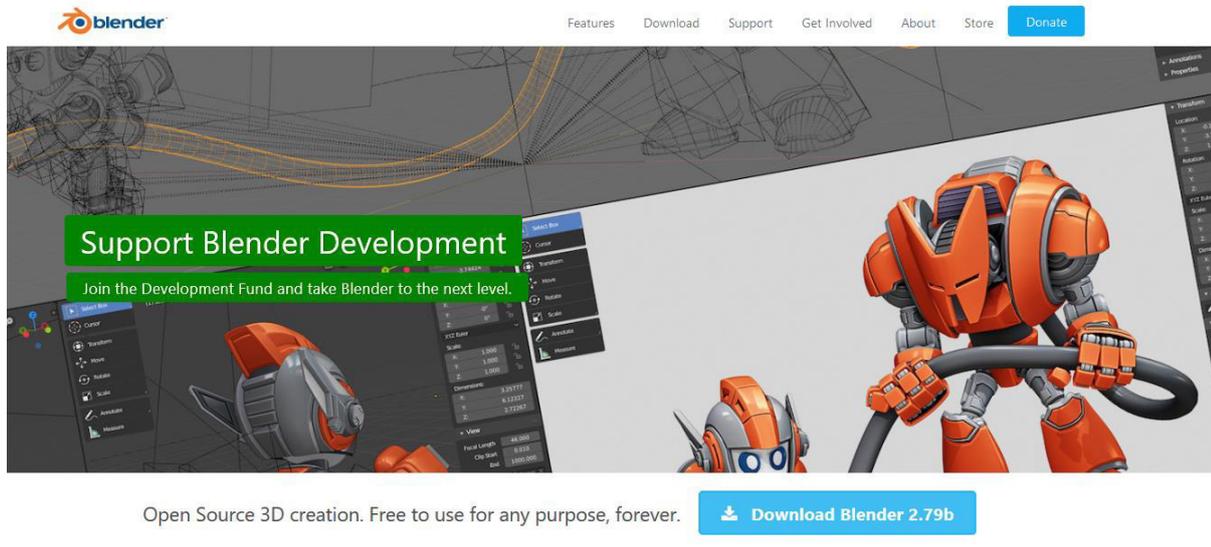
Observando pela ponta da caneta, é mais notável a diferença do perfil transversal oval deste modelo. Este formato já guia a mão do usuário, de forma instintiva, a segurá-la de dois ângulos específicos possíveis, e estes ângulos facilitam que a caneta seja manuseada de forma que a ponta se mantenha visível para a câmera, além de gerar uma boa luminosidade na superfície da lousa, aumentando ainda mais a zona de detecção da luz.

Esta reformulação do protótipo aconteceu já bem no final da minha participação no projeto. No início de dezembro o projeto da Lousa Digital do LME estava entrando em um hiato de desenvolvimento. Isso fez com que os modelos da 4ª e da 5ª iteração fossem os modelos que estão disponíveis até o presente momento, e que já estão bem encaminhados para prosseguir a etapa de prototipação a qualquer momento que o LME decidir retomar o projeto, considerando as questões mercadológicas e de viabilidade do produto.

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

4.1 O Processo de Modelagem 3D

Figura 16 – Página inicial do site da Blender Foundation



Fonte: www.blender.org

Durante todo o projeto, trabalhei com o software Blender, versão 2.79. Por se tratar do programa com o qual eu sou mais familiarizado e experiente, a escolha foi óbvia e isso permitiu que eu já iniciasse meus trabalhos na equipe do LME focado na minha tarefa de produzir o protótipo, sem precisar passar por treinamento prévio e enfrentar uma curva de aprendizagem. Além disso, por se tratar de um software 100% gratuito e de código aberto, é mais outro motivo para se trabalhar utilizando o Blender em projetos que visam gerar soluções de baixo custo.

Trabalhar em um projeto onde o objetivo do modelo seria a impressão 3D demandou de mim uma maneira de pensar e fazer a modelagem que fugia um pouco do padrão que eu estava acostumado, pois para a impressão 3D, algumas etapas do processo de modelagem não são necessários, como por exemplo, as etapas de preparação dos materiais,

texturas, *shaders*⁹, iluminação e ambientação, *rigging*¹⁰ e até mesmo a renderização (esta que costuma ser a etapa que é o principal objetivo quando se trabalha um modelo 3D generalista).

Essa diferença de mentalidade do trabalho me ajudou a deixar de lado, pelo menos para este projeto, alguns vícios muito comuns a quem trabalha com o 3D, como por exemplo, o vício de se preocupar constantemente com a topologia do modelo. Afinal de contas, o que importa para um modelo 3D impresso é apenas o formato geral do modelo e não a correteude topológica, bem como o fluxo e a contagem de polígonos. Estes aspectos são de extrema importância para um modelo 3D bem feito e eficiente, portanto é algo difícil de ignorar.

A modelagem da caneta começa por um processo chamado de blocagem¹¹, no jargão de nicho da Escultura Tradicional e Escultura Digital. No caso da caneta, durante as primeiras versões do protótipo, elas seguem um formato de caneta convencional, cilíndrico. Para fazer a blocagem desse formato no Blender, parti do método de desenhar o perfil da caneta, por extrusão vértice a vértice, mas fazendo apenas uma metade do perfil e em seguida, apliquei um modificador *Screw*¹² de dois passos, como na imagem seguinte. Cada passo do modificador cria uma rotação do desenho em volta do eixo da caneta (neste caso o eixo Z do espaço do programa).

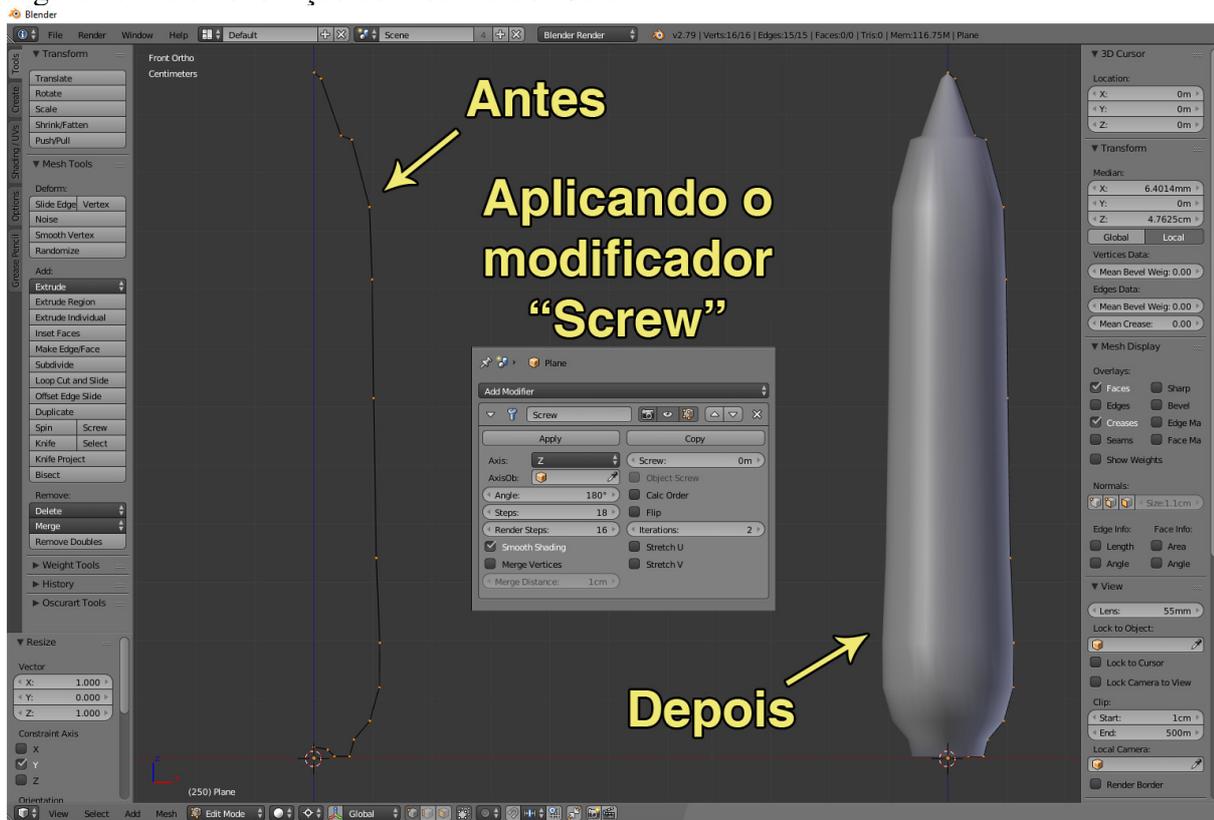
⁹ Shaders são algoritmos usados no processo de alteração da cor de um objeto / superfície na cena 3D, com base em seu ângulo para as luzes e sua distância das luzes para criar um efeito fotorrealista.

¹⁰ Rigging é o processo de criação da estrutura óssea de um modelo 3D. Essa estrutura óssea é usada para manipular o modelo 3D como um boneco para animação.

¹¹ Blocagem é a construção das formas geométricas básicas que irão guiar o formato geral do objeto sendo modelado

¹² O modificador Screw automatiza o processo de gerar uma extrusão das faces, arestas ou vértices, seguido imediatamente de uma operação de rotação em volta de um eixo selecionado, podendo executar estes passos repetidas vezes em apenas um comando.

Figura 17 – Demonstração do modificador Screw



Fonte: Captura de tela pelo autor

Com este simples passo, o formato básico está quase definido, fazendo apenas alguns ajustes manuais nos vértices da linha do perfil, onde for necessário para corrigir o formato, ou então melhorar a definição da curva, aumentando a quantidade de vértices. O modificador Screw poupa dois passos (uma extrusão dos vértices para criar um conjunto de faces e uma rotação dessas faces criadas em 10° ao longo do eixo Z) que eu teria que repetir 36 vezes para fechar os 360° do formato cilíndrico da caneta.

Trabalhar com os Modificadores de Malha é um outro diferencial da mentalidade da modelagem para impressão 3D. São operações pré-programadas no software que executam, de forma automática, alterações no formato do objeto, aumentando ou diminuindo a quantidade de polígonos e simplificando operações que seriam complexas, trabalhosas e repetitivas de se fazer manualmente. Na modelagem generalista, também se usa modificadores para agilizar o processo, mas por causa do constante cuidado com a topologia da malha, alguns modificadores devem ser evitados sempre que possível e usados com moderação quando não houver como evitar, pois podem produzir uma malha resultante problemática de ser tratada na aplicação final do modelo.

Um modificador que eu utilizei bastante neste trabalho da modelagem da caneta foi o modificador *Boolean*. Este modificador executa operações matemáticas de lógica booleana, mais precisamente, três tipos de operações lógicas: Interseção, Diferença e União. O Boolean funciona da seguinte forma: Primeiro eu preciso criar um objeto secundário que irá ser utilizado como base para alterar o formato do objeto que eu já tenho pronto. Em seguida, eu posiciono este novo objeto interseccionando o primeiro na posição e orientação que eu quero que eles se interfiram. Então eu seleciono o objeto principal e adiciono nele o modificador, e dentro das configurações do modificador eu seleciono como alvo o segundo objeto. Dependendo de qual operação lógica eu selecionar, o objeto resultante será diferente.

Figura 18 – Demonstração do modificador Boolean



Fonte: Captura de tela pelo autor

Eu normalmente não costumo utilizar o modificador Boolean porque ele deixa problemas de topologia na malha, mas nesse caso específico, como a topologia não era uma preocupação na minha mentalidade de trabalho, eu vi nele um enorme potencial para facilitar o trabalho e acelerar um processo de recorte da malha que, se eu fosse fazer manualmente, seria um processo bem mais longo e cansativo. E quando usado em conjunto com outros modificadores mais comuns para a modelagem geral, como é o caso do modificador

Subdivision Surface, que suaviza e arredonda as curvas da malha, criando mais polígonos e deixando o modelo com uma definição melhor, o modelo tem sempre a garantia de que a definição da malha vá ser a melhor possível para imprimir um modelo bem suavizado.

Foi dessa forma que eu modelei todos os recortes da parte interna da carcaça da caneta, fazendo assim o compartimento da pilha, os encaixes internos para a *placa* e a forma de encaixe da ponta. Além disso, os modelos da 4ª e da 5ª iteração possuem partes da carcaça que são metades exatas, simétricas e que ao final da impressão são unidas. O recorte das duas metades também foi feito com o Boolean. Eu não tinha, antes de trabalhar com esse projeto, a noção do potencial dessa ferramenta do Blender, mesmo com mais de dez anos de experiência em modelagem 3D. Vivendo e aprendendo na prática.

Essa forma de trabalhar a modelagem tridimensional de objetos mais técnicos é chamada de *Hard Surface Modeling*, ou Modelagem de Superfícies Rígidas. Para este método de trabalho, toda a mentalidade de como tratar a malha do modelo 3D funciona de uma forma diferente de quando se trabalha com Modelagem Orgânica, que é a modelagem de personagens (humanos, animais, etc.). Na Modelagem de Superfícies Rígidas se faz muito uso de modificadores como o Boolean, o *Bevel*¹³, *Edge Split*¹⁴, e vários outros.

Outro aspecto importante de se considerar durante o processo da modelagem é mais por uma questão de boas práticas do uso de qualquer software de modelagem 3D: A organização da estrutura dos objetos e suas hierarquias. O que acontece é que o modelo da caneta nunca é feito em um único objeto. Na verdade, cada pedaço da caneta é um objeto independente, então, cada versão da caneta é composta por uma quantidade de que facilmente chega a dezenas de objetos. Ao longo do projeto, o arquivo do modelo alcançou um total de 102 objetos, entre as diversas versões e suas respectivas variações em cada etapa.

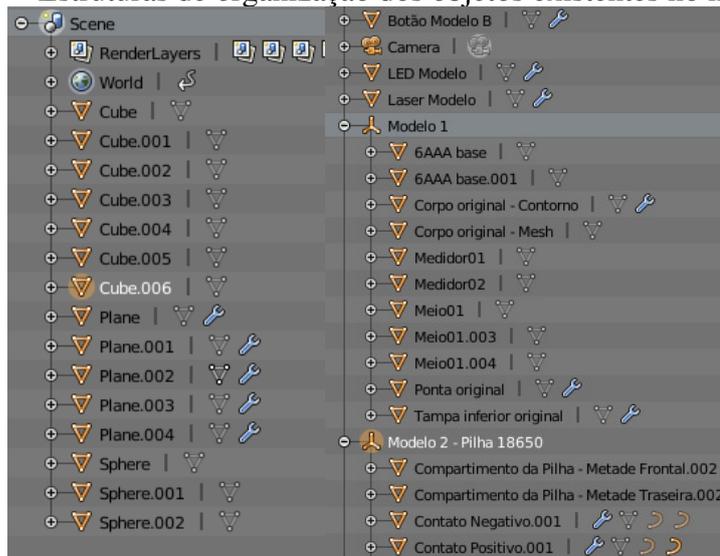
Com essa quantidade tão grande de objetos, é de extrema importância nomear os objetos sempre que o modelo de cada um deles ficar definido. O Blender possui uma seção da

¹³ O modificador Bevel cria subdivisões da malha próximas às arestas pré-determinadas no controle do modificador, para dar o aspecto de suavização de uma borda, também serve para criar um chanfro na peça.

¹⁴ O modificador Edge Split executa internamente na renderização do modelo uma operação de separação das arestas que pode ser definida por um limiar de ângulo entre as faces adjacentes, ou em arestas selecionadas. As arestas marcadas com este modificador possuem uma aparência de uma borda afiada.

sua interface gráfica onde ele lista todos os objetos presentes no projeto, e estes objetos podem ser organizados de forma hierárquica no projeto. Por uma questão de organização e para facilitar a identificação de objetos específicos para o caso de eu precisar ajustar algum eventual defeito da malha ou remodelar e modificar qualquer aspecto de um objeto já existente sem precisar remodelar do zero.

Figura 19 – Estruturas de organização dos objetos existentes no modelo 3D



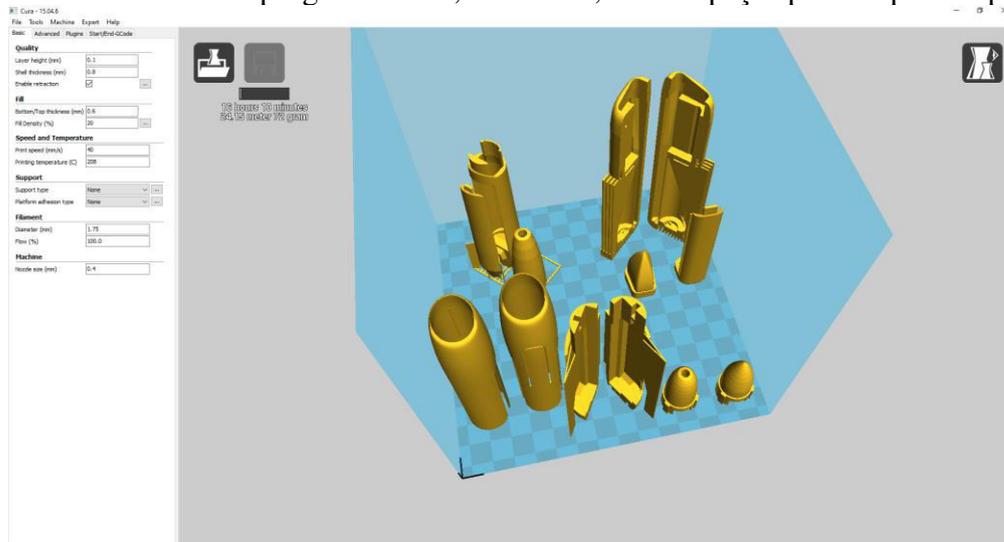
Fonte: Captura de tela pelo autor

À esquerda está a estrutura básica na qual novos objetos adicionados na cena são tratados por padrão pelo Blender. Cada novo objeto adicionado na cena recebe um nome automático, de acordo com o tipo de objeto e o tipo de primitiva ao qual ele pertence. Se já houver um objeto daquele mesmo tipo, os próximos objetos ganham o nome acrescentado do sufixo .001, .002, .003, e assim por diante. O problema que isso traz é: Como identificar facilmente um objeto específico, em meio a centenas de outros objetos, no caso de eu precisar corrigir algum detalhe ou fazer uma mudança no modelo?

À direita está a estrutura que eu organizei para facilitar a tarefa. Nomear cada novo objeto criado é não só uma questão de boas práticas no uso do Blender, como também um facilitador para o trabalho do próprio modelador. Além disso, o Blender trabalha com uma estrutura de hierarquia de objetos, tratada na semântica do programa como estrutura de pais e filhos (*parents* e *children*). Quando selecionamos um objeto pai e realizamos uma operação básica, como movê-lo para outro ponto do espaço da cena, todos os objetos filhos daquele que selecionamos são movidos juntos com seu objeto pai.

4.2 Preparação do Modelo para Impressão

Figura 20 – Interface do programa Cura, versão 15, com as peças prontas para impressão



Fonte: Captura de tela pelo autor

O programa que utilizei para preparar as peças para impressão foi o Cura, versão 15, da Ultimaker¹⁵, fabricante de impressoras 3D. O formato padrão para este tipo de arquivo é o formato .STL, então dentro do Blender, após finalizada a tarefa de modelar as peças da caneta, é preciso antes exportar cada uma das peças como um arquivo deste formato. Mas antes de exportar em STL, é necessário tratar algumas questões envolvidas na impressão 3D.

A primeira questão é quanto à orientação na qual as peças foram impressas. Eu escolhi imprimi-las na vertical porque o formato cilíndrico só consegue manter uma boa definição nas suas curvas desta forma. Se eu usasse a orientação horizontal para imprimir as peças, o acabamento delas incorreria num problema decorrente da forma como a impressora funciona, que deixaria a curvatura com o aspecto de escada (ver Figura 21), semelhante a uma visualização de mapa topográfico de um terreno. Isso é típico da impressão por *Fused Deposition Modeling*¹⁶ – FDM – quando se usa uma resolução baixa no eixo Z.

¹⁵ Site da Ultimaker: <https://ultimaker.com/>

¹⁶ Fused Deposition Modelling é um método de impressão 3D que parte do princípio de fundir um material básico para utilizá-lo como uma espécie de tinta para fazer o desenho do objeto 3D camada após camada. Em cada uma dessas camadas, a impressora desenha a silhueta de uma secção transversal do modelo.

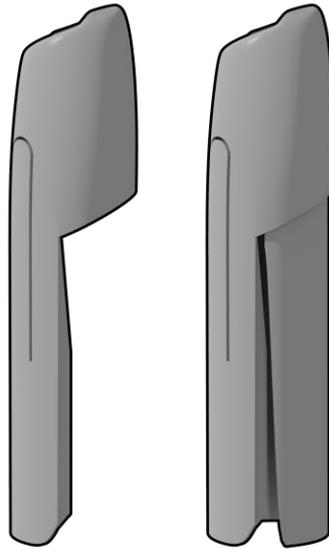
Figura 21 – Demonstração do Efeito Escada decorrente de uma baixa resolução no eixo Z.



Fonte: <http://thrinter.com/high-z-resolution-3d-printing/>

Existem duas formas de evitar esse problema: A primeira seria aumentar a resolução no eixo Z, o que traz como efeito colateral um considerável aumento no tempo total da impressão; A segunda maneira, que para este caso foi a mais prática, foi imprimi-las na vertical. Formatos cilíndricos impressos na vertical resultam num acabamento mais bem definido. Por outro lado, imprimir na vertical exigiu um cuidado com algumas partes do modelo que possuem formatos em que algum pedaço fosse ficar pendurado. Isso ocorreu principalmente na tampa principal do modelo da 4ª iteração (tanto o modelo com LED quanto o modelo com laser).

Figura 22 – Tampa principal da versão de laser, ajustada para impressão



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 22, à esquerda, o modelo da tampa da versão de laser da caneta produzida na 4ª iteração. A parte superior da tampa precisa de um suporte para ser impressa sem causar problemas na impressão e evitar perder todo o trabalho. À direita, a solução para isso foi modelar um suporte cilíndrico de espessura mínima, que pudesse ser facilmente removido após a impressão ser concluída.

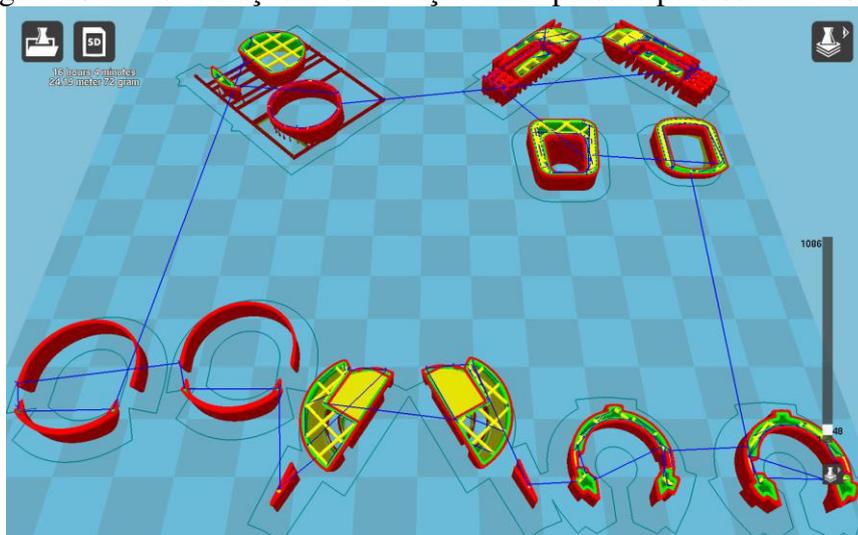
Além dessa peça, outras partes internas da carcaça precisavam de alguma estrutura de suporte para que elas não ficassem penduradas quando a impressora começasse a desenhá-las. Se isso ocorresse, toda a peça seria desperdiçada, porque a impressão ia desmoronar enquanto estivesse ocorrendo. Isso chegou a ocorrer durante um dos testes de impressão, após meia-hora decorrida no processo, uma parte de uma peça de teste começou a ser impressa pendurada, e o filamento da impressora saía do cabeçote e não se sustentava no restante da peça. Precisei interromper o teste imediatamente para não desperdiçar material.

Antes de imprimir, ainda era necessário ajustar alguns parâmetros do programa, como por exemplo, a resolução das camadas da impressão. De forma que a impressora equilibre a qualidade do acabamento com o tempo de impressão. Modelos mais complexos e com mais peças costumavam levar uma tarde inteira imprimindo, e era necessário ficar por

perto da impressora e supervisionar o processo, para o caso de o cabeçote da impressora deixar algum resíduo do filamento acumular no modelo e acabar emperrando na peça.

Eu configurei a impressão da caneta de uma forma que, em média, a impressão das peças levou entre 2 e 3 horas para estar pronta. A estrutura da casca do modelo foi impressa com duas paredes de espessura, e com o preenchimento de 15% no padrão de grade. A impressora tem um bico extrusor de 0,4 mm de espessura, o que significa que a casca das peças da caneta possui uma espessura mínima de 0,8 mm. A Figura 23 mostra uma pré-visualização do traçado que será executado pela impressora. É comum os programas de impressão 3D apresentarem essa ferramenta, para o usuário identificar possíveis falhas e fragilidades no modelo antes de começar o processo, sem ter que esperar até a impressora chegar no ponto vulnerável. É sempre bom conferir o modelo neste modo antes de imprimir.

Figura 23 – Visualização de simulação da impressão pelo software Cura



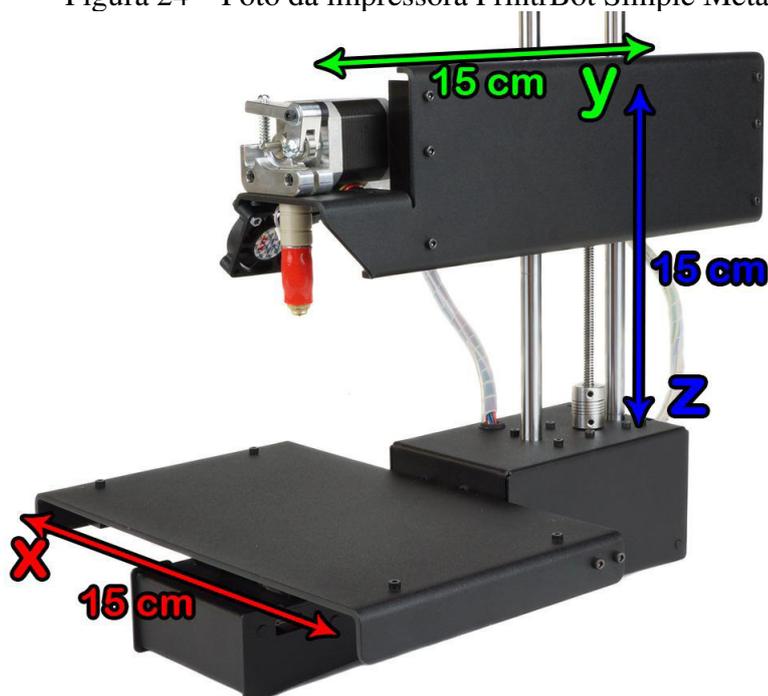
Fonte: Captura de tela pelo autor

As linhas vermelhas indicam as paredes externas da carcaça, as verdes são as paredes internas, já as linhas amarelas indicam o traçado projetado de preenchimento da peça e as linhas azuis indicam os rastros de viagem do cabeçote de uma peça a outra.

4.3 A Impressão

A impressão das peças foi feita por uma impressora de pequeno porte, modelo *PrintrBot Simple Metal* (ver Figura 24), que estava a serviço do LME especificamente para este trabalho no projeto da Lousa Digital. Esta impressora trabalha com o método de impressão FDM.

Figura 24 – Foto da impressora PrintrBot Simple Metal

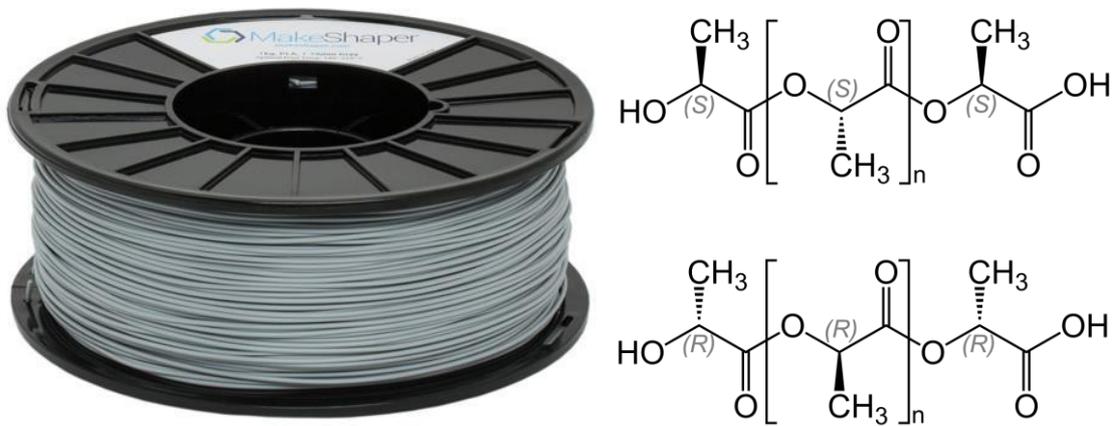


Fonte: <http://fablab.ruc.dk/setup-and-3d-print-with-printrbot-simple-metal/> com intervenção do autor

O modelo de impressora utilizada no projeto possui uma bandeja se move no eixo X, enquanto o cabeçote se move nos eixos Y e Z. O volume total utilizável da bandeja é de 3375 cm^3 ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$). Além disso, o cabeçote possui um motor responsável por puxar o filamento da matéria-prima para dentro de um compartimento que esquenta o material a temperaturas em torno de 200 a 220°C , fazendo com que o filamento derreta e sirva como a tinta de uma impressora convencional. A bandeja e o cabeçote então se movem coordenadamente para desenhar, camada a camada, a forma do objeto. Acoplado ao cabeçote, há ainda uma ventoinha apontada para resfriar o material assim que ele é injetado sobre a bandeja, evitando deformação da peça causado pela volatilidade do filamento derretido.

O material que utilizamos para a impressão foi o Ácido Polilático, mais comumente referido pela sigla PLA, de *Polylactic Acid*. Dentre os materiais mais comuns para impressão 3D, o PLA é o que apresenta a melhor consistência estrutural e se mantém firme enquanto está sendo injetado e resfriado. Outros materiais são muito suscetíveis a deformações enquanto estão esfriando, sendo necessário trabalhar com impressoras fechadas para evitar sofrer influência do ambiente externo durante todo o processo. Este problema de deformação não ocorre quando se utiliza o PLA.

Figura 25 – Filamento de PLA e sua respectiva fórmula química



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Poliácido_láctico

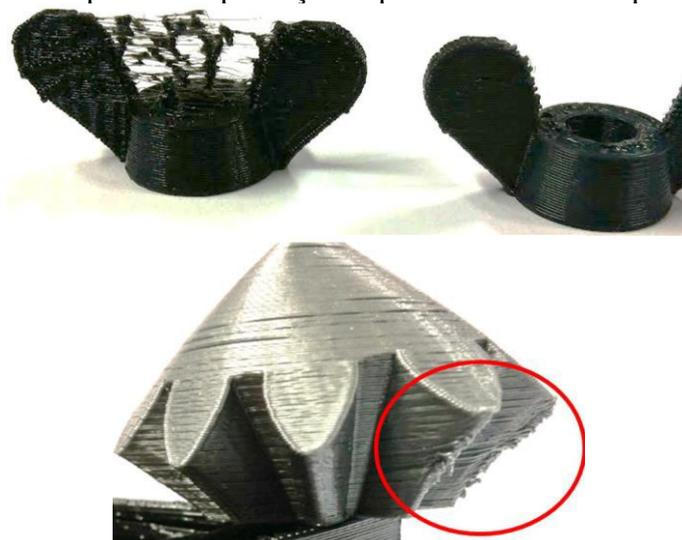
O PLA se mantém estruturalmente consistente e firme em temperaturas de até 50°C. Acima disso, ele começa a se tornar maleável. Isso impõe um cuidado no manuseio de peças impressas com este material. Deve-se manter armazenado em ambientes frescos e com boa circulação de ar. Guardá-lo em um local fechado e sem refrigeração pode resultar em deformação indesejada da peça, podendo resultar na perda total da utilidade do produto.

4.4 Refinamento do Modelo Impresso

Uma característica peculiar da impressão 3D por FDM é que o modelo nunca sai da bandeja com um acabamento perfeitamente bem finalizado. Sempre ficam imperfeições na superfície, devido a diversos fatores da natureza do material utilizado e também decorrentes da configuração da impressora pelo software de impressão. Note na Figura 23 as linhas azuis que mencionei, que representam a trajetória do cabeçote da impressora quando ela viaja de uma peça a outra. Aqui sempre ocorre de, enquanto o cabeçote está parando de injetar o material, e se deslocando até o próximo ponto do desenho, esse deslocamento sempre vai formar um resíduo do filamento, com a consistência de um fio muito fino.

Essa e outras imperfeições da superfície do modelo (ver Figura 26) precisam ser refinadas, ainda antes de a peça ir para a etapa de montagem. Aqui é a hora de remover os suportes que criados para sustentar as partes do modelo que ficariam suspensas durante a impressão (estas partes são descartadas, embora o ideal seja guardá-las para um eventual reaproveitamento do material). Para refinar essas imperfeições, foram usadas ferramentas simples como um estilete para recortar os suportes e os resíduos presos a partes mais resistentes e uma lixa para refinar partes mais delicadas das peças impressas.

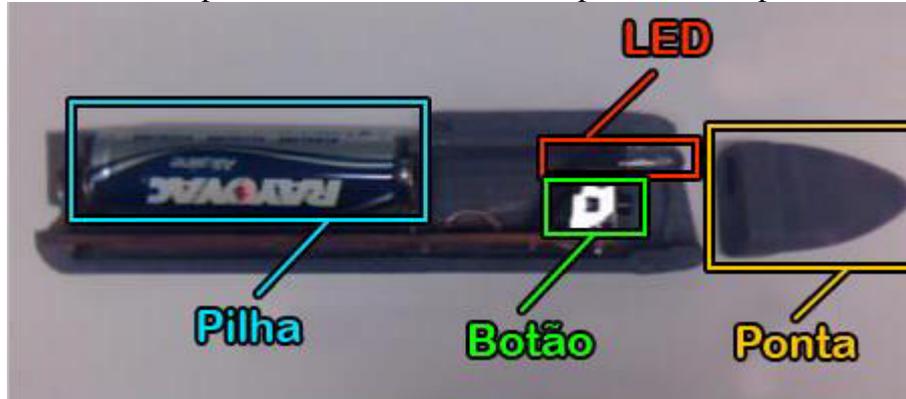
Figura 26 – Exemplos de imperfeições típicas do modelo impresso por FDM



Fonte: <https://cults3d.com/en/blog/articles/identify-correct-3D-printing-problems-defaults>

5 TESTES DE FUNCIONALIDADE E DE USABILIDADE

Figura 27 – Modelo impresso da caneta montada, expondo os componentes eletrônicos



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 29 e adaptado pelo autor

Em cada uma das versões do protótipo, foram realizados dois tipos de testes com o modelo produzido. O primeiro teste foi o de funcionalidade. Este teste foi realizado internamente na equipe e posteriormente estendido aos professores orientadores, e o objetivo deste teste foi de avaliar a eficácia de cada uma das partes do modelo em cumprir sua respectiva função. Por exemplo, testar se o LED estava acendendo corretamente com o pressionar do botão, testar se o encaixe das partes da carcaça (ver Figura 27), certificar que todas as peças estavam com o tamanho e espaçamento correto para ser operada sem causar algum tipo de dano ou bloqueio aos componentes eletrônicos.

O segundo tipo de teste, o de usabilidade, também foi inicialmente realizado internamente, e quando chegamos na 4ª iteração e conseguimos produzir o modelo validado pelos professores, os testes de usabilidade foram abertos aos voluntários. Os testes iniciais de usabilidade tinham o objetivo de avaliar a performance da caneta em conjunto com o restante do sistema. Aqui, ele observou fatores gerais da composição do sistema, além de avaliar a caneta em si. Por exemplo, foi avaliado se a ponta da caneta estava transluzindo luz suficiente para gerar na área de contato da caneta com a lousa uma região de reflexo luminoso que pudesse ser detectado pela câmera (ver Figura 28), também se o modelo da caneta não induzia o usuário a manuseá-la de forma a ocluir a luz, ainda foram testadas diferentes disposições de onde deveria ficar localizada a câmera de aquisição para garantir a melhor visibilidade da lousa.

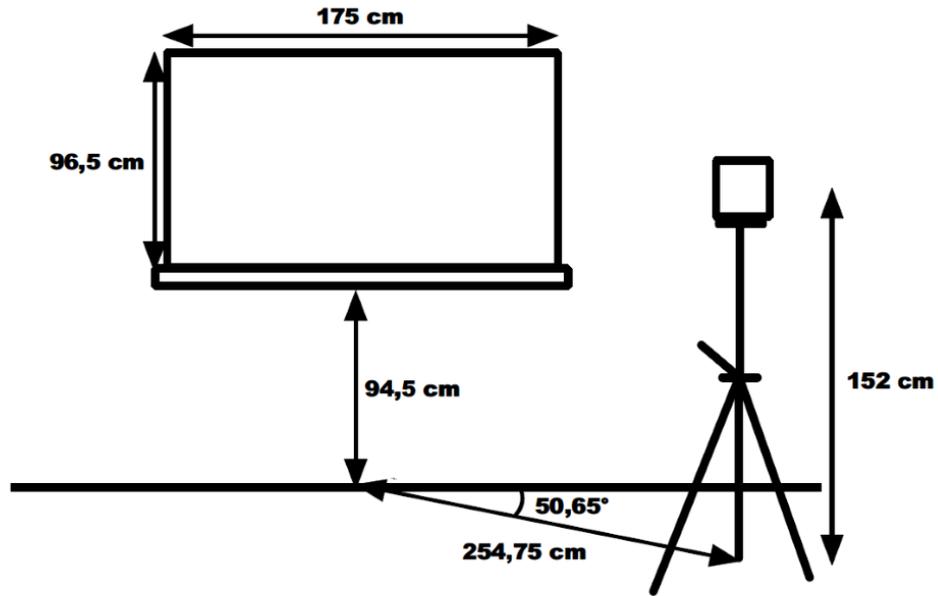
Figura 28 – Teste de detecção da luz da caneta pela interface do software de aquisição



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 35

Após testar diferentes combinações de posição, ângulo e altura do sensor de aquisição, encontramos um ângulo que funcionou bem, porque pegava a projeção da imagem na lousa sem muita distorção de perspectiva, ao mesmo tempo em que o tripé e a câmera não fiquem diretamente no meio da sala (ver Figura 29). Era de grande importância evitar que a câmera ficasse posicionada num ângulo muito agudo – em relação ao plano da imagem projetada – porque a distorção de perspectiva prejudicava diretamente a precisão do cálculo do software para estimar a posição da caneta, resultando em o traço projetado pelo software da Lousa Digital não corresponder com a posição real da caneta sobre a lousa. Também foi um ângulo que permitiu que o usuário pudesse manusear a caneta em qualquer ponto da lousa sem correr muito risco de bloquear a luz com sua mão, braço, ou corpo inteiro. Era, portanto, a melhor posição para serem realizados os testes com os voluntários.

Figura 29 – Posição do sensor de aquisição utilizada para realizar os testes



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 40

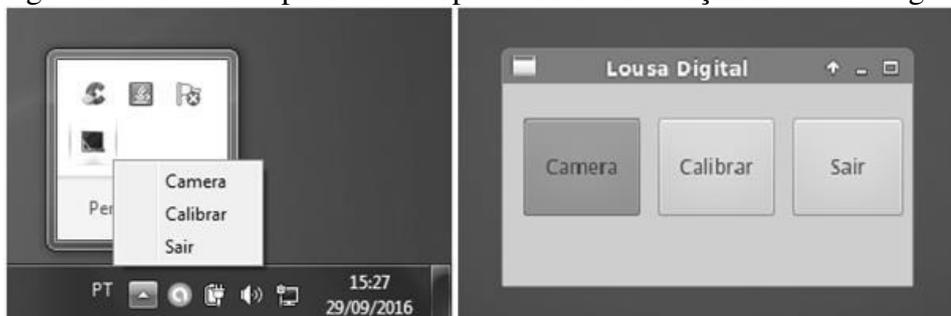
A segunda etapa de testes de usabilidade foi realizada com a participação de voluntários escolhidos aleatoriamente. Para esses testes, demos preferência a pessoas sem nenhuma ligação com o processo de desenvolvimento da caneta, para evitar vícios de percepção do projeto por parte do usuário. Escolhemos pessoas de diversos perfis e níveis de familiarização com lousas interativas e mesas digitalizadoras.

“No teste inicialmente, o voluntário deveria realizar a calibração do sistema, em seguida preencher um caça-palavras. O caça-palavras apresentava nomes de cores, onde o objetivo era sublinhar o nome da cor com sua respectiva tonalidade, utilizando uma barra de ferramentas da aplicação Open-Sankoré para alterar as possibilidades do marcador. Em média cada voluntário concluiu o experimento em 5 minutos.” ALBUQUERQUE (2017), pág. 38

A calibração do sistema é feita clicando no ícone da Lousa Digital, na bandeja do sistema operacional (Windows), e em seguida clicando em “Calibrar” no menu, como demonstrado na Figura 30. Em seguida, o usuário precisa clicar com a caneta em cima dos quatro pontos de limite do quadro, seguindo a ordem de calibração: Primeiro deve clicar no

canto superior-esquerdo, depois no canto superior-direito, em seguida no canto inferior-direito e por fim, no canto inferior-esquerdo (Figura 31)

Figura 30 – Caminho para abrir o aplicativo de calibração da Lousa Digital



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 34

Figura 31 – Ponto de calibração do sensor de aquisição



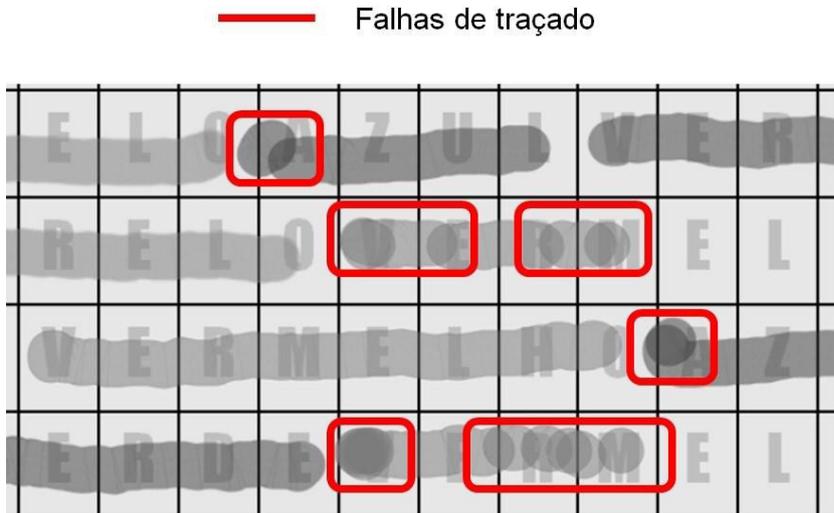
Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 21

Após a calibração, o voluntário do teste é orientado a tentar completar um teste com a aplicação de Palavras Cruzadas, dentro do tempo limite de 5 minutos. As palavras cruzadas possuem os nomes das cores Amarelo, Azul, Verde e Vermelho. O usuário deve marcar cada palavra alterando a cor correspondente da ferramenta Marca-Texto, que pode ser selecionada na barra de menu do aplicativo.

Este teste tem a função de identificar falhas na continuidade do traçado da caneta (ver Figura 32), evidenciando o quão firme a ponta da caneta pressiona o botão para manter o LED aceso durante todo o traço do usuário em diferentes direções de traçado e posições da

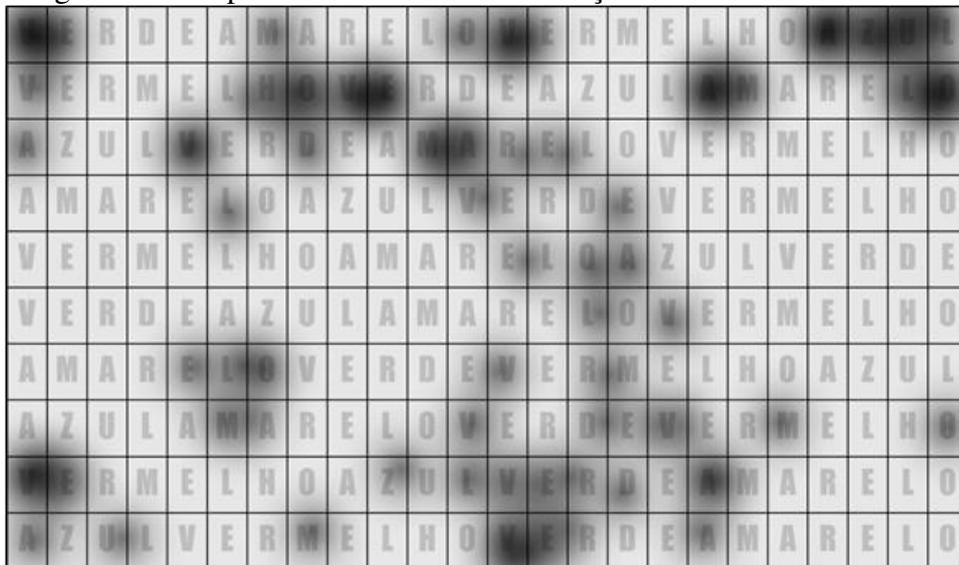
lousa. Feito este teste, ALBUQUERQUE (2017) compilou os resultados dos voluntários para elaborar o mapa de calor dos pontos de falha do traçado (ver Figura 33) para saber em quais posições a caneta tinha maior tendência a falhar a pressão do botão.

Figura 32 – Exemplo de falhas de traçado nas Palavras Cruzadas



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 39

Figura 33 – Mapa de Calor das falhas de traçado encontradas nos testes



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 44

Após a realização do teste com a caneta, cada voluntário respondeu um questionário de análise quantitativa, para traçarmos o perfil demográfico dos usuários e obter *feedback* sobre a experiência do usuário em manusear o nosso protótipo da caneta com o sistema da Lousa Digital e uma aplicação básica do uso cotidiano de um quadro interativo. O questionário pode ser visto no Anexo deste trabalho.

6 RESULTADOS DOS TESTES

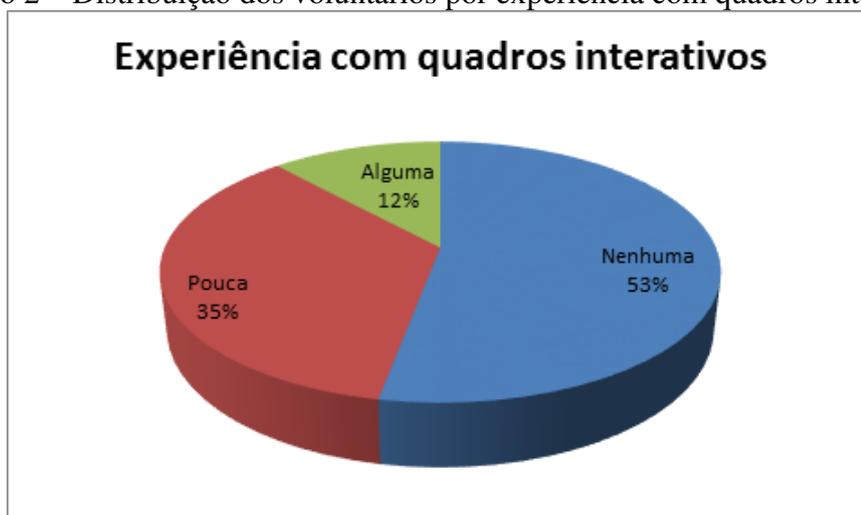
O grupo de teste contou com um espaço amostral de 17 pessoas, entre alunos, professores e funcionários da Escola Estadual de Educação Profissional Jaime Alencar de Oliveira e também no Laboratório de Audiovisual do Bloco Didático do curso de Sistemas e Mídias Digitais, da Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza-CE. 76% dos voluntários são pessoas jovens, com menos de 24 anos, com diferentes níveis de experiência em docência e experiência em uso de quadros interativos, demonstrados nos Gráficos 1 e 2 a seguir.

Gráfico 1 – Distribuição dos voluntários por grau de experiência em docência



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 41

Gráfico 2 – Distribuição dos voluntários por experiência com quadros interativos



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 42

ALBUQUERQUE (2017) demonstra que os testes com a aplicação das Palavras Cruzadas identificaram falhas de traçado da caneta no começo, no meio e no final das palavras (ver Gráfico 3) e que podem ser causadas por dois motivos principais:

- Falha por oclusão: Acontece quando, durante o manuseio da caneta, o usuário inclina a mão, ou posiciona o braço ou o corpo de forma a cobrir a luz emitida pela ponta da caneta, impedindo assim a detecção pela câmera de aquisição;
- Falha por pouca pressão na ponta: Quando o usuário pressiona a ponta da caneta contra a lousa e aciona o botão, uma certa pressão inicial é exercida pela mão do usuário, mas quando este arrasta a caneta para desenhar um traço, normalmente essa pressão aplicada pela mão diminui, para não cansar o braço. Ao fazer isso, o botão principal – que possui uma sensibilidade relativamente baixa – acaba sendo liberado momentaneamente, cortando o circuito e apagando o LED, para logo em seguida ser pressionado novamente.

Gráfico 3 – Total de falhas nos diferentes momentos do traçado



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 43

Quanto ao feedback recebido pelos voluntários nas respostas ao questionário (ver Anexo), ALBUQUERQUE (2017) constatou que os voluntários não apresentaram dificuldade em utilizar a caneta. Ressalta ainda que:

“Quanto à caneta pode-se notar que o percentual para *bom* e *muito bom* foi pouco superior ao *razoável*. Por ser um protótipo era esperado um nível de rejeição elevado, mesmo assim o protótipo foi bem aceito, indicando que um futuro modelo final pode ser baseado neste protótipo.” ALBUQUERQUE (2017), pág. 47

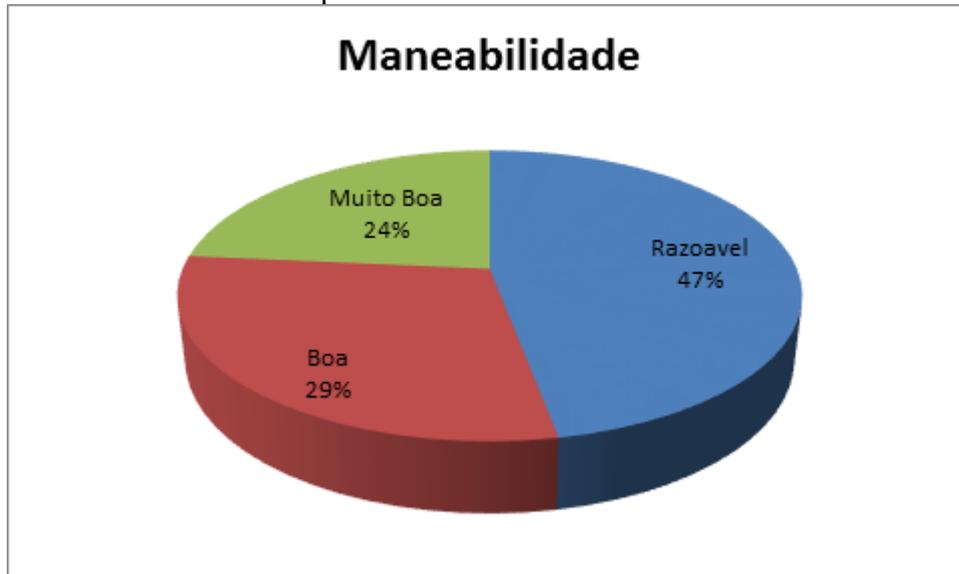
Além das próprias respostas, que também foram compiladas nos gráficos a seguir, que reforçam a boa receptividade do protótipo com o público alvo.

Gráfico 4 – Grau de dificuldade relatado pelos voluntários quanto à calibração da câmera



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 45

Gráfico 5 – Opiniões sobre a maneabilidade da caneta



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 46

Gráfico 6 – Opiniões sobre a precisão da caneta



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 46

Gráfico 7 – Opiniões gerais sobre o sistema da Lousa Digital



Fonte: ALBUQUERQUE (2017), pág. 47

7 CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos com os testes do protótipo, e vendo o feedback positivo dos voluntários, eu concluo que, ao longo destes 9 meses de trabalho (de março ao início de dezembro de 2016) junto ao Laboratório de Mídias Educacionais, eu consegui desenvolver um protótipo robusto e de grande potencial para se tornar uma solução tecnológica viável, do ponto de vista mercadológico, para o auxílio a professores no desenvolvimento e apresentação dos materiais didáticos a serem utilizados em sala de aula.

Os requisitos funcionais da caneta da Lousa Digital foram atendidos. Os testes com usuários voluntários, pessoas que não participaram em nenhum momento do desenvolvimento do produto, mostraram que a caneta entrega uma fácil usabilidade e que o seu funcionamento está adequado à proposta do sistema da Lousa Digital (embora ainda seja um protótipo em fase intermediária de desenvolvimento, e portanto, ainda possa ser aprimorado), não houve queixas referentes aos aspectos ergonômicos do modelo da caneta, e este modelo ainda pode futuramente ser aprimorado em relação ao seu formato final, diâmetro total e robustez estrutural do material de construção.

Junto ao meu estimado colega de equipe Yure Vieira Sampaio Albuquerque e seu excelente empenho na elaboração das soluções tecnológicas e conhecimentos adquiridos na sua formação em Mecatrônica Industrial, também contando com o imprescindível apoio e orientação dos professores Antonio José Melo Leite Junior, Clemilson Costa dos Santos, Gabriel Antoine Louis Paillard e George Allan Menezes Gomes, bem como o acompanhamento do professor Henrique Sérgio Lima Pequeno e todos os esforços combinados da equipe de Pesquisa e Desenvolvimento do Laboratório de Mídias Educacionais, conseguimos apresentar um produto que traz uma proposta de grande relevância para o mercado doméstico de materiais educacionais, oferecendo uma vantagem material na questão da acessibilidade e da manutenção do sistema.

O projeto da Lousa Digital está em hiato desde dezembro de 2016, mas no meu entendimento – e espero que este trabalho possa ajudar a mostrar esta compreensão – o Laboratório de Mídias Educacionais possui em suas mãos um excelente produto a oferecer a futuros clientes da rede Pública e também da rede Privada de Ensino. A qualquer momento que a equipe de análise de viabilidade de mercado do LME decidir que pode retomar o projeto, tenho a certeza de que contribuí para entregar um produto promissor ao mercado.

8 TRABALHOS FUTUROS

Além da caneta eletrônica, ainda tenho a convicção de que posso contribuir para produzir outros elementos integrantes de um kit completo a ser produzido para o projeto da Lousa Digital. Enquanto trabalhava nos modelos da caneta, também cheguei a produzir um suporte para montagem e apoio do conjunto da câmera e filtro de luz infravermelha utilizada num tripé que improvisamos para realizar os testes de usabilidade. Ainda é possível produzir:

- Uma versão final para este suporte da câmera;
- Um tripé de estrutura telescópica que possa ser montado em um formato compacto e de fácil portabilidade;
- Uma maleta personalizada para guardar o conjunto Caneta + Câmera + Tripé + cabos e outros acessórios como pilhas e seus carregadores, *flash drive* ou qualquer outra mídia de armazenamento do material construído e trabalhado dentro do software da Lousa Digital.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Yure V. S. **PROTÓTIPO DE QUADRO DIGITAL DE BAIXO CUSTO**. 2017. Monografia (Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, CE

PEREIRA, Amanda R. **USO DE SISTEMA INTERATIVO BASEADO EM PROJETOR MULTIMÍDIA E CONTROLE “WIIMOTE” DO NINTENDO EM AULAS DE QUÍMICA**. 2015. Monografia (Licenciatura em Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Manual de Referência do Blender 2.79 disponível em:
<https://docs.blender.org/manual/en/latest/index.html>

Manual de Referência do Cura 15.4 disponível em:
http://www.vgtu.lt/files/1461/73/3/13_0/Cura15.4_manual.pdf

Video-aula nº 14 – Parte 1 do canal Manual do Mundo - **Como funciona a impressora 3D?**
Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6N-F4TZkMXI>

Artigo na web introdutório sobre **impressão 3D por Fused Deposition Modelling** disponível em: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>

Introdução aos diferentes materiais comumente utilizados na impressão 3D disponível em:
<https://www.cammada.com/materiais>

ANEXO A - QUESTIONÁRIO SOBRE A LOUSA DIGITAL INTERATIVA

1. Identificação do pesquisado

1.1. Idade _____

1.2. Sexo M F

1.3. Grau de escolaridade

Ensino fundamental

Ensino médio

Bacharelado

Licenciatura

Mestrado

Doutorado

2. Informações Gerais sobre o pesquisado

| | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 2.1. Experiência Informática | Nenhuma <input type="checkbox"/> | Pouca <input type="checkbox"/> | Alguma <input type="checkbox"/> | Bastante <input type="checkbox"/> | Muita <input type="checkbox"/> |
| 2.2. Experiência Docente | Nenhuma <input type="checkbox"/> | Pouca <input type="checkbox"/> | Alguma <input type="checkbox"/> | Bastante <input type="checkbox"/> | Muita <input type="checkbox"/> |
| 2.3. Experiência de utilização de quadros interativos | Nenhuma <input type="checkbox"/> | Pouca <input type="checkbox"/> | Alguma <input type="checkbox"/> | Bastante <input type="checkbox"/> | Muita <input type="checkbox"/> |
| 2.4. Áreas de uso de quadros interativos | Escolar <input type="checkbox"/> | Profissional <input type="checkbox"/> | Pessoal <input type="checkbox"/> | Outra <input type="checkbox"/> | Nenhuma <input type="checkbox"/> |
| 2.5. Que importância dá às funcionalidades extras dos quadros interativos | Nenhuma <input type="checkbox"/> | Pouca <input type="checkbox"/> | Alguma <input type="checkbox"/> | Bastante <input type="checkbox"/> | Muita <input type="checkbox"/> |
| 2.6. Maior habilidade de escrita com a mão | Direita <input type="checkbox"/> | | Esquerda <input type="checkbox"/> | | |

3. Sobre usabilidade da lousa digital

| | | | | | |
|--|---|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 3.1. Como classifica a dificuldade de execução da calibração | Muito difícil <input type="checkbox"/> | Difícil <input type="checkbox"/> | Razoável <input type="checkbox"/> | Fácil <input type="checkbox"/> | Muito fácil <input type="checkbox"/> |
| 3.2. Como classifica a maneabilidade da caneta | Muito fraca <input type="checkbox"/> | Fraca <input type="checkbox"/> | Razoável <input type="checkbox"/> | Boa <input type="checkbox"/> | Muito boa <input type="checkbox"/> |
| 3.3. Como classifica a precisão da caneta | Muito fraca <input type="checkbox"/> | Fraca <input type="checkbox"/> | Razoável <input type="checkbox"/> | Boa <input type="checkbox"/> | Muito Boa <input type="checkbox"/> |
| 3.4. De forma geral, como classifica a solução apresentada | Muito fraca <input type="checkbox"/> | Fraca <input type="checkbox"/> | Razoável <input type="checkbox"/> | Boa <input type="checkbox"/> | Muito Boa <input type="checkbox"/> |