



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
DE COMPUTAÇÃO



# Caixa Comportamental Aprimorada para Análise de Tarefas de Discriminação Tátil em Roedores.

**José Wanderson Oliveira Silva**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves

**Tese de Doutorado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Engenharia de Computação) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: D332

Natal, RN, Março de 2023.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, José Wanderson Oliveira.

Caixa comportamental aprimorada para análise de tarefas de discriminação tátil em roedores / José Wanderson Oliveira Silva.

- 2023.

72 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. Natal, RN, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Marcos Garcia Gonçalves.

1. Automação - Tese. 2. Caixa Comportamental - Tese. 3. Estímulos Somatossensoriais - Tese. I. Gonçalves, Luiz Marcos Garcia. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 681.5 (043.2)

*A Deus, aos meus pais, Abmael e Raimunda, pela paciência durante a realização deste trabalho.*

*Deixo um agradecimento especial ao meu orientador Prof Luiz Marcos Garcia Gonçalves por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e pela confiança depositada na minha proposta de projeto.*

*Também quero agradecer ao ISD e aos professores, Edgard e Fabricio, pelo acolhimento e base de apoio no meu projeto, assim como pela qualidade da estrutura oferecida.*



---

# Resumo

---

Entre os trabalhos de pesquisa realizados com roedores na área de Neurociência, destacam-se os estudos comportamentais. Para a realização desses estudos, são geralmente usadas plataformas fechadas e controladas nas quais o roedor é inserido, sendo elaboradas tarefas, dependendo do estudo, devendo o mesmo realizá-las. Para estudar o aprendizado de comportamentos a partir de discriminação tátil, por exemplo, as tarefas geralmente vêm acompanhadas de uma recompensa normalmente seguindo o modelo de aprendizado por reforço. Essas plataformas são normalmente conhecidas como caixas comportamentais. Na presente proposta, temos como objetivo melhorar as metodologias e técnicas usadas nesta área de pesquisa, desenvolvendo novas tecnologias para este tipo de estudo, incluindo automatização de alguns procedimentos com a caixa comportamental voltados para as tarefas de discriminação tátil. Fizemos alguns testes iniciais de uma caixa comportamental, usando um modelo computacional de simulação física, a partir dos quais desenhamos uma nova estrutura para a plataforma, com os espaços e materiais melhor elaborados, e utilizando apenas componentes que podem ser comprados no mercado ou desenvolvidos facilmente. Nossa hipótese demonstrada é que esta nova estruturação para a caixa comportamental melhora o estudo de modelos relativos ao sistema sensorio-motor de maneira mais refinada. Por exemplo, a plataforma pensada possibilita o controle com mais precisão da abertura das barras de discriminação, que atualmente não é feito de modo satisfatório. O modelo final permite também desenhar experimentos mais complexos de tomada de decisões utilizando o sistema de câmeras e sensores, permitindo uma melhor avaliação do desempenho dos roedores. Isso inclui melhorias na determinação da quantidade de acertos nas tarefas realizadas nos estudos em questão. Logo, como contribuição prática principal, acreditamos que o presente estudo proporciona que laboratórios que trabalham com este tipo de pesquisa possam desfrutar de uma ferramenta de baixo custo e com facilidade de desenvolvimento. Todo o material e documentos desenvolvidos estão disponibilizados em uma plataforma colaborativa multiusuário.

**Palavras-chave:** Estímulos Somatossensoriais; Automação; Roedores; Caixa Comportamental.



---

# Abstract

---

Among the research works carried out with rodents in the area of Neuroscience, behavioral studies stand out. In order to carry out these studies, closed and controlled platforms are generally used in which the rodent is inserted, and tasks are elaborated, depending on the study, which the rodent must carry out. To study the learning of behaviors from tactile discrimination, for example, tasks are usually accompanied by a reward, normally following the reinforcement learning model. These platforms are commonly known as behavioral boxes. In this thesis, we aim to improve the methodologies and techniques used in this research area, developing new technologies for this type of study, including the automation of some procedures with the behavioral box aimed at tactile discrimination tasks. For that, we started with some initial tests of a behavioral box, using a computational model of physical simulation, from which we designed a new structure for the platform, with best-elaborated spaces and materials, and using only components that can be bought in the market or easily developed. Our demonstrated hypothesis is that this new structure for the behavioral box should improve the study of models related to the sensorimotor system in a more refined way. For example, the designed platform enables more precise control of the opening of the discrimination bars, which is currently not done satisfactorily. The final model also allows for the design of more complex decision-making experiments using the camera and sensor system, allowing a better evaluation of rodent performance. This includes improvements in determining the number of correct answers in the tasks performed in the studies in question. Therefore, as a main practical contribution, we believe that the present study provides that laboratories that work with this type of research can enjoy this new low-cost tool that is easy to develop and use. All developed materials and documents are made available on a multi-user collaborative platform.

**Keywords:** Whiskery; Somatosensory Stimuli; Automation; Rodents; Behavioral Box.



---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Problemas e Proposta de Tese . . . . .	2
1.2 Motivação . . . . .	3
1.3 Metodologia . . . . .	3
1.4 Hipótese . . . . .	4
1.5 Contribuição . . . . .	4
1.6 Organização do Texto . . . . .	5
<b>Lista de Símbolos e Abreviaturas</b>	<b>1</b>
<b>2 Ferramental Teórico e Metodológico</b>	<b>7</b>
2.1 Condicionamento Operante do Comportamento . . . . .	7
2.1.1 Discriminação simples . . . . .	7
2.1.2 Discriminação condicionada . . . . .	8
2.2 Estudos Cognitivos de Decisão . . . . .	9
2.3 Aspectos Metodológicos da Automação . . . . .	10
2.3.1 Comunicação entre Processos . . . . .	11
2.3.2 Instrumentação e Supervisão . . . . .	12
2.4 Funcionamento Básico da Caixa Comportamental . . . . .	13
2.5 Treinamento a ser Realizado . . . . .	15
2.6 Aspectos Metodológicos da Proposta . . . . .	16
<b>3 Trabalhos relacionados</b>	<b>19</b>
3.1 Trabalhos Teóricos e Experimentais com Caixas Comportamentais . . . . .	19
3.2 Sistema Somatossensorial Vibracional . . . . .	22
3.3 Evoluindo o Projeto da CCO - Nossa Proposta . . . . .	23
<b>4 Aprimorando a Caixa Comportamental</b>	<b>27</b>
4.1 Projeto de Hardware e Software . . . . .	27
4.2 Modelagem Estrutural (Parte Mecânica) . . . . .	29
4.2.1 Base . . . . .	29

4.2.2	Paredes . . . . .	29
4.2.3	Tampas das Câmaras . . . . .	30
4.2.4	Portas Deslizantes . . . . .	30
4.2.5	Scotch-Yoke . . . . .	31
4.2.6	Nose Poke . . . . .	32
4.2.7	Bomba de Recompensa . . . . .	33
4.2.8	Cremalheira . . . . .	33
4.2.9	Câmeras de Vídeo e Suportes . . . . .	34
4.2.10	Montagem da Caixa . . . . .	36
4.3	Lógica de funcionamento da caixa comportamental . . . . .	36
4.3.1	Controle da caixa comportamental . . . . .	38
4.3.2	Automatização da Caixa - Eletroeletrônica . . . . .	39
4.4	Software de Controle . . . . .	41
4.4.1	Software de Controle do Aparelho Comportamental . . . . .	41
4.4.2	Software Supervisório da Caixa Comportamental . . . . .	42
4.5	Estrutura Física da CCO (Materiais e Componentes) . . . . .	44
4.5.1	Microcontrolador Arduino Uno . . . . .	44
4.5.2	Atuadores (Motores e Servo-motores) . . . . .	44
4.5.3	Sensores de infravermelho . . . . .	45
4.5.4	Plataforma-base e módulos do dispositivo . . . . .	46
4.6	Visão integrada da caixa comportamental completa . . . . .	47
4.7	Engenharia de Requisitos da Caixa Comportamental . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>53</b>
5.1	Setup Experimental para Validação Funcional . . . . .	53
5.2	Experimentos e Resultados com Rato Robótico . . . . .	55
5.3	Testando as Funções do Supervisório . . . . .	59
5.4	Discussão dos Resultados . . . . .	61
5.4.1	Uso de Redores Reais nos Experimentos . . . . .	62
5.5	Comparativo das Caixas Comportamentais . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>65</b>
6.1	Aspectos Metodológicos . . . . .	65
6.2	Relevância das Contribuições . . . . .	66
6.3	Trabalhos Futuros . . . . .	67
6.4	Publicações Resultantes da Tese . . . . .	68
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>69</b>

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Diagrama esquemático da caixa comportamental Estrutural . . . . .	14
2.2	Diagrama esquemático da caixa comportamental funcional . . . . .	15
4.1	Estruturas da base. . . . .	29
4.2	Scotch Yoke . . . . .	31
4.3	Scotch Yoke Dimensões . . . . .	32
4.4	Conjunto Nose Poke e Sensores IR . . . . .	32
4.5	Sistema de Bomba . . . . .	33
4.6	Piãõ Cremalheira . . . . .	34
4.7	Sistema de Câmeras . . . . .	34
4.8	Câmara Principal . . . . .	35
4.9	Câmara de Discriminação . . . . .	35
4.10	Peças da caixa numeradas para montagem . . . . .	37
4.11	Logica funcional . . . . .	38
4.12	Diagrama de Blocos do Microcontrolador. . . . .	39
4.13	Automatização da Caixa. . . . .	40
4.14	Diagrama do software de controle da caixa comportamental . . . . .	42
4.15	Diagrama do software: Tela de supervisor da caixa comportamental . . . . .	43
4.16	Caixa Comportamental Construída - versão final. . . . .	44
4.17	Caixa Comportamental Automatizada Completa . . . . .	47
4.18	Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão lateral. . . . .	48
4.19	Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão frontal. . . . .	48
4.20	Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão superior. . . . .	49
4.21	Caixa Comportamental Construída - visão lateral. . . . .	49
4.22	Caixa Comportamental Construída - visão superior. . . . .	50
4.23	Caixa Comportamental Construída - versão final. . . . .	50
4.24	Caixa Comportamental Construída - versão final. . . . .	51
5.1	Rato de controle remoto. . . . .	55
5.2	Remote Control Mouse 1. . . . .	55
5.3	Remote Control Mouse 2. . . . .	56
5.4	Remote Control Mouse 3. . . . .	57
5.5	Remote Control Mouse 4. . . . .	58
5.6	Remote Control Mouse 5. . . . .	59
5.7	Diagrama 5 do software supervisor da caixa comportamental . . . . .	60
5.8	Tela de Training Program do software supervisor da caixa comportamental . . . . .	60
5.9	Diagrama 7 do software supervisor da caixa comportamental . . . . .	61



---

# Lista de Tabelas

---

4.1	Lista de Materiais de Controle. . . . .	52
4.2	Lista de Materiais de Estrutura. . . . .	52
4.3	Lista de Materiais Modulares do Dispositivo. . . . .	52
5.1	Comparativo das Caixas Comportamentais. . . . .	64



---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Roedores são animais muito utilizados como cobaias em experimentações da área de Neurociência na atualidade devido a uma série de características, tais como o seu tamanho reduzido, ciclo reprodutivo curto, prole numerosa, precocidade, fácil manuseio, nutrição variada e adaptação ao cativeiro (Andrade et al. 2006). Entre os diversos procedimentos realizados com roedores, destacam-se os estudos comportamentais de condicionamento operante que consistem basicamente em um processo de aprendizagem no qual o comportamento do animal é modificado por uma recompensa ou punição. Não obstante, os roedores são excelentes cobaias para o estudo do sistema sensorial tátil, pois esses animais utilizam suas vibrissas (bigodes) para se localizar e discriminar objetos. O sistema sensorial tátil é composto por nervos sob a superfície da pele os quais enviam informações ao cérebro, como toque, dor, temperatura e pressão, desempenhando um papel importante na percepção do ambiente, assim como nas reações protetoras para a sobrevivência do animal.

Para realização desses estudos, são comumente utilizados aparatos de treinamento conhecidos como caixas de condicionamento operante (CCO), ou OCB, da sigla em inglês (*operating conditioning boxes*). Existem muitos tipos de CCO, e o funcionamento de cada tipo visa estudar algumas características desejadas do comportamento dos animais. Por exemplo, usar labirintos T e Y (Handley & Mithani 1984) normalmente se aplica ao estudo do processo de tomada de decisão. O labirinto em cruz elevado visa estudar as características da ansiedade, enquanto os de campo aberto visam estudar as características espaciais e de ansiedade (Huang et al. 2001). Essas plataformas utilizadas com o intuito de estudar o comportamento e o sistema sensorial tátil dos roedores são conhecidas como caixas comportamentais, que nada mais são que um tipo de CCO no qual os animais têm que discriminar a largura de uma abertura, usando apenas as suas vibrissas para receber uma recompensa. Entre os métodos usados e tarefas comportamentais, encontra-se o condicionamento operante, com utilização de tarefas como discriminação simples ou condicional, como será descrito no Capítulo 2.

## 1.1 Problemas e Proposta de Tese

Existem dois problemas principais com as plataformas atuais, que são seu custo e sua disponibilidade. A disponibilidade é uma consequência natural do custo, na maioria das vezes eles não são facilmente disponibilizados como plataformas comerciais por não haver muitos consumidores. No entanto, alguns deles são especificamente projetados e construídos por indústrias específicas, sem fichas técnicas disponíveis e havendo a necessidade de um profissional especializado da mesma indústria/empresa, a fim de repará-los em caso de problemas. Uma das empresas que fabrica este tipo de equipamento é a Plexon (Plexon 2022), pioneira e inovadora líder em soluções personalizadas de alto desempenho para aquisição de dados, pesquisa comportamental e análises avançadas projetadas especificamente para pesquisa em neurociência. Seus equipamentos e soluções estabelecem as bases para o trabalho que está sendo feito em todo o mundo em áreas como ciência básica, interfaces cérebro-máquina (IMC), doenças neurodegenerativas, comportamentos viciantes e neuroprotéticas. Os clientes da Plexon representam algumas das mais avançadas instalações acadêmicas nacionais e internacionais, hospitais de pesquisa, empresas farmacêuticas e laboratórios governamentais (Plexon 2022).

Porém, podemos notar que ao utilizar este em específico, bem como outros aparatos disponíveis comercialmente, na maioria das vezes, o pesquisador fica submisso da tecnologia e daquela casa comercial, pagando muito dinheiro por serviços que, em alguns casos, um simples técnico de laboratório com experiência básica em elétrica e eletrônica e/ou alguma experiência em plataformas de computação poderia realizar. Isso remete a outro problema, devido ao seu preço, não são fáceis de serem atualizados ou substituídos por equipamentos modernos, estando na maioria das vezes ultrapassados e desatualizados nos laboratórios onde existem. Além disso, há uma série de tarefas feitas manualmente que são uma parte demorada dos experimentos, como a anotação manual das variáveis em algumas das tarefas.

Com o objetivo de superar ou diminuir tais problemas, neste trabalho, pretendemos estudar maneiras de melhorar o aparato da caixa comportamental, incluindo seu projeto e construção e, eventualmente, contribuir com melhorias nas técnicas utilizadas nesta área de pesquisa. De fato, propomos um modelo aprimorado, com um novo sistema para automatização e de coleta de dados deste tipo de plataforma, apresentando uma forma alternativa de realizar estudos das tarefas de discriminação tátil com roedores.

Assim, nossa solução e principal proposta desta tese é aprimorar o estudo de modelos comportamentais relacionados ao aprendizado do animal e o sistema sensorio-motor de forma mais refinada com uma nova plataforma que permite um controle mais preciso da abertura das barras de discriminação, o que atualmente não é feito de forma satisfatória pelas plataformas atuais. Além disso, o aparato desenvolvido permite projetar experimentos de tomada de decisão mais complexos usando tanto a câmera de vídeo quanto o sistema de sensores, permitindo uma melhor avaliação do desempenho do roedor na tarefa de discriminação. Portanto, o presente estudo traz um passo a mais nessa área, com uma ferramenta de baixo custo, facilidade de construção e operação que pode ser utilizada por laboratórios que trabalham nessa área de pesquisa. Toda a documentação produzida e/ou utilizada no desenvolvimento do projeto, incluindo o material e dispositivos utilizados,

bem como outros documentos necessários, está disponibilizada à comunidade na página (<https://www.natalnet.br/sibgrapi2022/behavioral-box/>) dos Laboratórios Associados Natalnet na web .

## 1.2 Motivação

As tarefas de discriminação tátil em roedores constituem um excelente modelo experimental para investigar o funcionamento cerebral (Krupa et al. 2001). Essas tarefas também são muito utilizada para o desenvolvimento de interfaces cérebro-máquina e cérebro-cérebro como o estudo a Brain-to-Brain Interface for Real-Time Sharing of Sensorimotor Information (Pais-Vieira et al. 2013). Porém, como citado acima, a CCO utilizada por Krupa baseia-se em componentes eletrônicos e atuadores já superados tecnologicamente, o que torna a operação e manutenção da caixa e continuação dos estudos uma tarefa difícil. Assim, como será visto adiante a partir de pesquisas que realizamos na literatura a respeito, suplantando essas dificuldades tecnológicas foi a principal motivação e objetivo prático inicial do trabalho (que permitiu nossa contribuição principal, vista adiante).

Ou seja, queremos justamente desenvolver um aparato portátil, de baixo custo, que utilize componentes presentes no mercado brasileiro, que possibilite ao pesquisador realizar o treinamento de discriminação tátil com pelo menos a mesma eficiência que o modelo usado anteriormente. Notamos que alguns desses equipamentos se encontram inoperantes atualmente em muitos laboratórios, devido à dificuldade de manutenção. Além disso, com a utilização da tecnologia mais recente, usando microcontroladores e servo motores, será possível projetar experimentos diferentes e com maior precisão como por exemplo, pequenas variações na abertura das barras, bem como facilitando a programação da CCO, tal como proposta por Krupa (Krupa et al. 2001).

## 1.3 Metodologia

Em termos metodológicos, neste trabalho, percorremos desde a parte mais teórica, relacionada a teoria do comportamento condicionante, até à descrição e implementação, mais prática do aparelho comportamental e do seu processo de funcionamento autônomo (automação). Ou seja, deve ser analisada a teoria mais relevante para desenvolver, na prática, um aparato que se adapte às necessidades do estudo da aprendizagem, incluindo modularidade, portabilidade e capacidade de realizar múltiplos experimentos, entre outros tópicos. Assim, os aspectos teóricos discutidos brevemente acima devem ser aprofundados inicialmente, com vários estudos visando entender o processo onde as técnicas de aprendizagem serão empregadas. Em seguida, na etapa de projeto, todos os componentes que compõem a caixa, bem como o seu funcionamento, devem ser claramente especificados. Esses aspectos teóricos e práticos da metodologia são discutidos adiante em seção específica do capítulo de teoria (Capítulo 2), para melhorar compreensão da proposta do aparelho desenvolvido. Visando validar o modelo proposto e construído, apresentamos posteriormente detalhes sobre a construção e experimentos com resultados que demonstram seu correto funcionamento.

## 1.4 Hipótese

Nossa hipótese principal demonstrada neste texto é que a nova estruturação para a caixa comportamental melhora a execução do processo, de forma geral, facilitando o estudo de modelos relativos ao somato-sensorial, quando se utiliza tarefas envolvendo aprendizado de comportamentos, também permitindo que se tenha mais controle e uma melhor sintonia no experimento, de maneira mais aprimorada. Por exemplo, a plataforma pensada possibilita o controle com maior precisão da abertura das barras de discriminação, que atualmente não é possível de ser feito de modo satisfatório com o modelo tradicional anterior (Krupa et al. 2001). O modelo final permite também desenhar experimentos mais diversificados envolvendo a tomada de decisões, com a utilização do sistema de câmeras e sensores, nos permite uma melhor avaliação do desempenho dos roedores. Isso inclui também melhorias na contagem da quantidade de acertos nas tarefas realizadas nos estudos em questão, que é feito de forma automática.

## 1.5 Contribuição

Com base na hipótese colocada acima, podemos formalizar que a contribuição principal desta tese é de cunho teórico-prático. Ou seja, o objetivo básico do trabalho desenvolvido nesta tese é melhorar as pesquisas na área, o que culminou, em termos práticos, com o desenvolvimento e validação de uma caixa comportamental mais atual. Assim, usando metodologias mais recentes, sabendo dos principais problemas, e tendo a motivação claramente colocada acima em mente, a principal contribuição deste trabalho reside no desenvolvimento de uma CCO que seja open-hardware para a realização de estudos de neurociência envolvendo tarefas de discriminação tátil com utilização de pequenos roedores (ratos ou camundongos e similares). Principalmente, acreditamos que o presente estudo deve proporcionar que outros pesquisadores (e laboratórios) que trabalham com este tipo de pesquisa possam desfrutar de uma ferramenta de baixo custo e com facilidade de desenvolvimento.

A atuação das várias partes da caixa bem como a coleta de dados deve também funcionar de maneira automatizada. Além disso, o baixo custo de desenvolvimento é outra característica desejada, e a mesma deve ser construída com utilização de componentes nacionais ou encontrados facilmente no mercado brasileiro. Como contribuição secundária, abrimos a possibilidade de que os pesquisadores desta área possam realizar o estudo do sistema somatossensorial em roedores de maneira mais fácil e refinada, uma vez que agora se torna possível, por exemplo, monitorar as atividades sem intervenção e controlar com muita precisão a abertura das barras de discriminação. Bem como, temos a possibilidade de planejar experimentos como aversão ao paladar, sendo item de tomada de decisão, sendo esta outra das principais contribuições advindas da proposta, tendo em mente as aplicações científicas do aparato.

Ou seja, em resumo, introduzimos um modelo aprimorado de CCO automatizada, open-hardware e open-software, que apresenta portabilidade, acessibilidade e fácil desenvolvimento, no Brasil. Todos os atuadores foram construídos com servo motores, que possibilitam a fácil substituição e portabilidade. Dessa forma, em termos implementaci-

onais, o problema estudado e resolvido nesta tese é o de automatizar a caixa comportamental. Para tal, deve-se basicamente cumprir algumas etapas metodológicas. A primeira delas é estudar as tarefas a que se propõem e os modelos existentes, para, a partir de então, fazer o projeto da caixa com todos os seus acessórios. Essas tarefas a serem realizadas pelos roedores a serem consideradas foram previamente estudadas, a partir das quais escolhemos o melhor projeto de *hardware* e *software* para automatizar essas funcionalidades que a caixa se propõe e executar, já pensando nos experimentos que os roedores deverão realizar para validar o aparato desenvolvido.

Alguns desses experimentos poderão até ser pensados a posteriori, portanto, a caixa deve ter alguma adaptabilidade nos graus de liberdade das suas peças móveis. A segunda etapa é a construção da caixa propriamente dita. Em nosso projeto melhorado da caixa comportamental, consideramos utilizar técnicas de impressão 3D sempre possível, para as as peças e componentes que devem ser especificamente fabricadas, e também que a mesma terá partes feitas de acrílico. Esta etapa do projeto foi minuciosamente estudada, e feita cuidadosamente. Deve-se considerar, por exemplo, que os roedores são animais com uma ótima memória espacial, com precisão milimétrica. Finalmente, tendo a parte estrutural pronta, a parte do hardware e eletrônica a ser utilizada deve ser elaborada. Em nosso projeto, usamos o Arduino Uno para gerenciar todas as tarefas que pode ser automatizadas, incluindo treinos simulados ao final com um rato robótico remotamente controlado, para poder dar um retorno no tocante às etapas anteriores antes de experimentar com roedores reais, para verificar a grosso modo se o aparato atende ou não às expectativas. Esta abordagem pode ser estendida facilmente para experimentos com roedores reais, fugindo ao escopo deste trabalho.

## 1.6 Organização do Texto

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte forma: No Capítulo 2, são abordados a descrição do aparelho comportamental e suas etapas de construção. O Capítulo 3 apresenta os métodos já existentes e realizados para estudo do sistema somatosensorial. No Capítulo 4, mostra-se o passo a passo as propostas para a implementação e automatização da caixa comportamental. No Capítulo 5 são apresentados os projetos prévios e os resultados obtidos na modelagem da caixa. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e o cronograma de atividades.



---

## Capítulo 2

# Ferramental Teórico e Metodológico

---

Neste capítulo são tratados os aspectos teóricos e metodológicos mais relevantes para entender o problema em foco, incluindo a parte da teoria sobre condicionamento operante e as nuances envolvidas no processo de automatização de uma caixa comportamental. Esta última envolve o processo de desenvolvimento completo, com a parte do projeto e da construção em si da caixa (e seus componentes), tendo um aspecto mais prático. Colocamos uma breve descrição do aparato comportamental incluindo o processo de funcionamento autônomo (automatização). Estudamos e analisamos as teorias e práticas mais relevantes para se desenvolver um aparato que possa se adequar às necessidades do estudo do sistema sensorial-motor, tais como a modularidade, portabilidade, e a possibilidade de executar múltiplos experimentos, entre outras. As etapas do projeto dos componentes que integram a caixa são especificadas claramente, de modo que se entenda toda a metodologia adotada.

### 2.1 Condicionamento Operante do Comportamento

O condicionamento operante do comportamento pode ser entendido simplesmente como um método (ou técnica) previamente desenvolvido, e a ser seguido, cujo objetivo é prover a aprendizagem de um novo comportamento. A aprendizagem ocorre normalmente através da utilização de estímulos (auditivos, visuais táteis ou gustativos) e por meio de consequências do ambiente (reforços e punições). Desde sua criação, ele vem sendo empregado em várias áreas de conhecimento (e Maria Amalia Andery 2016). Na Neurociência, sua utilização abriu espaço para uma gama de novos estudos, com a consequente aquisição de novos conhecimentos, utilizando tarefas que emulam comportamentos. O aprendizado pode ocorrer através de discriminação simples ou condicionada, visto a seguir.

#### 2.1.1 Discriminação simples

A materialização desta contingência e a comprovação dos métodos de aprendizagem foram desenvolvidos inicialmente a partir do trabalho de Skinner, psicólogo Behaviorista, que desenvolveu um ambiente denominado de *caixa de Skinner*. Essa caixa era basicamente composta por uma alavanca, um comedouro e uma grade geradora de choque

elétrico. Neste ambiente, podia-se observar dois tipos de contingências. Na primeira, *se* a alavanca fosse apresentada e o indivíduo realizasse o *comportamento* de pressioná-la, *então* ele recebia uma recompensa (reforço). Na segunda, *se* a alavanca fosse apresentada e o indivíduo realizasse o *comportamento* de se fugir para a parte traseira da caixa, *então* ele recebia um pequeno choque elétrico (punição) (e Maria Amalia Andery 2016).

O termo discriminação simples refere-se à resposta do animal, que, no caso, aprende uma tarefa simples de discriminação tátil. Ou seja, a resposta está condicionada ao comportamento e desejo imediato do roedor, independentemente de outros fatores mais complexos que podem ser colocados em tarefas com condições mais elaboradas, conforme visto a seguir.

### 2.1.2 Discriminação condicionada

Paradigmas experimentais utilizados para medição do tempo de resposta frequentemente analisam a sequência no processamento de informação, que se inicia com a percepção, passa pela tomada de decisão, e vai até a ação responsiva, efetivamente (Dade 2011). Para o desenvolvimento de tarefas comportamentais que contemplem a avaliação desses processos, o modelo simples de Skinner foi melhorado, propiciando o surgimento de diferentes modelos experimentais visando a discriminação condicionada, que foram desenvolvidos ao longo da história. Esses modelos são tais como os modelos de configuração, de regra única, e de regra múltipla (e Maria Amalia Andery 2016). Esses modelos foram desenvolvidos através do estabelecimento de discriminações condicionais, mais complexas. Diferentemente do condicionamento respondente (simples), em que um estímulo elicia uma resposta, no condicionamento operante os estímulos têm a função de criar contexto para que uma nova resposta ocorra.

As caixas comportamentais modernas têm sido utilizadas nesses modelos de discriminação condicionada, ajudando a elucidar uma série de dúvidas sobre o aprendizado de comportamentos mais complexos. Então, para um projeto a contento, é necessário entender primeiro como a caixa será utilizada. O problema em foco começa com o desenvolvimento de uma metodologia para a aquisição do comportamento desejado. Para formular melhor o problema, que será visto à frente, em termos teóricos, basicamente, colocamos a seguir mais alguns pontos sobre a neurociência comportamental e sobre automação, que serão necessários para o desenvolvimento dos trabalhos e consequente validação da nossa proposta.

## 2.2 Estudos Cognitivos de Decisão

Sabe-se que o sistema sensorial tátil é de fundamental importância para os roedores. Eles possuem hábitos noturnos e dependem principalmente das vibrissas para se localizar e discriminar objetos (Shuler et al. 2001). O córtex pré-frontal, mais especificamente o cíngulo anterior, está associado, dentre outras funções, ao monitoramento de erros, atenção e mudança de estratégia em tarefas de dupla escolha, influenciando nos processos de tomada de decisão. O processo de tomada de decisão é uma função cognitiva complexa que depende da integração de diversos estímulos sensoriais e experiências prévias para antecipar e aperfeiçoar um resultado.

Do ponto de vista da Neurociência, o ato de decidir pode ser entendido como um processo cognitivo que envolve a escolha de uma alternativa frente a várias outras. Em uma determinada circunstância, um sujeito se depara com uma situação cuja solução tem várias alternativas que podem ser escolhidas. Neste caso o indivíduo deve ser capaz de identificar e julgar cada uma delas para escolher aquela que resolverá a situação. Após a escolha, esta decisão deve ser executada em forma de uma ação. Por fim, esta ação gerará resultados (positivos ou negativos) que servirão como *feedback* para o sujeito em situações problemáticas futuras (Glimcher et al. 2009) e (Gold & Shadlen 2007). No entanto, o processo de escolha envolve uma série de eventos (implícitos ou explícitos) que devem ocorrer para se alcançar um objetivo específico.

O objeto de estudo que será aplicação para o qual estamos desenvolvendo a caixa comportamental são as tomadas de decisões perceptuais, que são aquelas dependentes de informações sensoriais que chegam ao sistema nervoso. Nesta categoria, as decisões são influenciadas por diversas características da informação sensorial (como tipo de estímulo, velocidade, estímulos de interferência), por fatores atencionais e de memória. Este último, possui um papel importante, uma vez que escolhas realizadas previamente devem ser acumuladas na memória para que possam ser comparadas com o contexto atual, e decisões com maiores chances de resultados satisfatórios sejam tomadas de acordo com (Ridderinkhof et al. 2004).

Do ponto de vista cognitivo, para tomar decisões, é necessário a integração de muitos sistemas neurais para realização de uma escolha. Será necessário um sistema neural que acumule e compare os estímulos sensoriais com informações armazenadas previamente, um sistema que detecte as interferências e dificuldades contidas no sinal sensorial e recrute sistemas atencionais para que a informação seja processada de forma satisfatória. Além disso, é necessário um sistema para representação das diversas variáveis de decisão, incluindo as possíveis escolhas a serem feitas. Por fim, é necessário um sistema que monitore a execução da ação, detectando possíveis erros e ajustando o comportamento para se obter resultados otimizados, segundo (Heekeren et al. 2008) e (Romo et al. 2012).

Ao identificar múltiplas escolhas, o sujeito deve avaliar qual terá resultados mais satisfatórios. Então, a escolha deve ser julgada com base em diferentes fatores, tais como: a utilidade de cada uma delas, o tempo necessário para executá-la, os esforços despendidos, a probabilidade de acerto ou erro, os riscos implicados a cada uma delas e o valor atribuído a cada um dos possíveis resultados (Bautista et al. 2001).

As grandes vibrissas dos ratos e camundongos estão fixadas à pele do animal em uma

disposição bem definida de cinco linhas designadas dorso-ventralmente por letras de A a E, onde cada linha possui de 4 a 9 vibrissas formando arcos enumerados no sentido caudal para o rostral ou da face (Brecht et al. 1997, Petersen 2007). Assim, a posição de cada vibrissa pode ser dada pelo sistema de coordenadas das linhas e dos arcos. As vibrissas estão ancoradas à pele do animal por meio de uma estrutura chamada folículo que confere movimentação e sensibilidade tátil (Petersen 2014). Durante o comportamento exploratório ativo, os ratos realizam movimentos rápidos e rítmicos das vibrissas (5-20 Hz).

Na maioria das vezes, estes movimentos ocorrem de forma sincronizada bilateralmente, porém as vibrissas também podem se mover independentemente. Outros estudos mostram que os ratos podem alterar o ritmo de movimento das vibrissas, ou seja, mudar a frequência e a amplitude do movimento, adotando diferentes comportamentos exploratórios (Berg & Kleinfeld 2003, Carandini & Churchland 2013). Além de encontrar objetos, os ratos usam as vibrissas para coletar informações como pressão, velocidade, tamanho, forma e textura através da combinação de movimentos de protração e retração (para frente e para trás) das vibrissas. E movimentos da cabeça juntamente com o ajuste da postura.

Especificamente, os estudos desenvolvidos por Krupa e colaboradores (Krupa et al. 2001) permitiram um grande avanço na compreensão do sistema somatossensorial de roedores. O trabalho desenvolvido com título *Integração bilateral da informação do whisker no córtex somatossensorial primário de roedores* (Shuler et al. 2001) mostra que a região responsável pelo processamento de informação da vibrissa no córtex somatossensorial primário(SI) de roedores integra informações de almofadas de vibrissa contralateral e ipsilateral. Ou seja, o SI de roedores junta as informações de ambas as almofadas e propõem que tais interações possam estar por trás da capacidade de roedores de discriminar estímulos táteis bilaterais e de funções mais complexas como a percepção modal cruzada (cross-modality). A caixa comportamental usada no trabalho de Krupa et al. (2001) foi desenvolvida justamente para essas tarefas, mas se encontra ultrapassada atualmente, como colocado acima. Assim, alguns aspectos teóricos e práticos de Automação devem ser considerados também, discutidos a seguir (Seção 2.3).

## 2.3 Aspectos Metodológicos da Automação

Automação pode ser entendida como a metodologia ou como a técnica que integra, basicamente, outras três áreas: a eletrônica que se encarrega da arquitetura e implementação de *hardwares*; a mecânica que abrange os dispositivos atuadores; e a tecnologia da informação, que engloba os softwares de controle do sistema (Siembra 2021). Assim, um projeto de automação geralmente demanda uma equipe multidisciplinar composta por especialistas em engenharia de *software* (e eventualmente de produção), mecânica e mecatrônica. Os primeiros sistemas de automação foram idealizados ainda no final do século XIX quando o mundo presenciava a revolução industrial. A principal meta desses sistemas era fazer com que as tarefas manuais passassem a ser executadas por máquinas, tendo como objetivo principal o aumento da eficiência da produção (Siembra 2021). Esse objetivo inicial tem sido melhorado hoje em dia. Mais especificamente, no presente trabalho, a ideia é usar a automação para acelerar e facilitar o estudo do condicionamento

comportamental com roedores.

De fato, atualmente, a automação se embasa na projeção e implantação de sistemas ciber-físicos, que controlam processos materiais e gerenciam as tomadas de decisões de forma totalmente descentralizada. Com a internet das coisas, esses sistemas ganharam a habilidade de dialogar com diversas máquinas simultaneamente e enviar informações em tempo real para gestores e supervisores. Nos tempos da indústria 4.0, o modelo de automação está mais focado em princípios tais como interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade de operação em tempo real, orientação a serviço, e modularidade. Contudo, sistemas mecânicos e eletrônicos mais simples ainda não foram abandonados, pois existem processos em que a mão de obra humana se faz fundamental à qualidade do produto. Além disso, sistemas ciber-físicos apresentam custo mais elevado, o que, às vezes, impossibilita sua implantação (Siembra 2021). Não obstante, nos dias atuais, além de uma sólida base (sistema) de comunicação sobre a qual estão geralmente implementados, um sistema automatizado é composto também por 2 outras partes principais (Siembra 2021):

1. **Parte Operacional** - É a parte do sistema que atua diretamente no processo, sendo um conjunto de elementos que fazem a máquina se mover e realizar a operação desejada. Esses elementos que formam a parte operacional são os dispositivos de acionamento e pré-acionamento como motores, cilindros, compressores, válvulas, pistões, e também dispositivos de detecção como sensor indutivo, sensor capacitivo, sensor de visão, sensor ultrassônico entre outros (Siembra 2021).
2. **Parte de controle** - Na parte de controle, temos a ferramenta programável do sistema que normalmente é implementada com o auxílio de um Controlador Lógico Programável (CLP). Antigamente, essa lógica era feita com relés eletromagnéticos, temporizadores, placas eletrônicas e módulos lógicos. Atualmente, com o aumento do volume de dados e componentes eletrônicos, o mais comum é o uso de CLPs e computadores industriais para controle de máquinas e processos (Siembra 2021).

### 2.3.1 Comunicação entre Processos

A comunicação eficiente de dados (síncrona e assíncrona) é a chave do processo de automação, como um todo, principalmente visando estabelecer conexão entre os diversos componentes do sistema de supervisão (um dos responsáveis pelo processo de automação, visto adiante). A evolução dos sistemas eletrônicos e das comunicações digitais a longa distância permitiu a inserção de elementos de controle diretamente nas plantas, em campo, diminuindo o atraso e as dificuldades de manutenção sem, contudo, perder as funcionalidades de monitoramento, ajuste e configuração a partir de uma localização remota via internet ou por antenas (sistemas wireless) (Pavani 2011). A tecnologia atual evoluiu, concretizando os chamados protocolos abertos de comunicação digital, os quais possuem normas bem definidas e de domínio público que, se seguidas, garantem a intercomunicação entre equipamentos certificados, os quais podem ser fornecidos por vários fabricantes diferentes.

Esses protocolos são conhecidos como barramentos de campo ou *fieldbus*, sendo os mesmos, classificados quanto ao tipo de dispositivo que comunicam e quanto ao formato

dos dados que transportam. A comunicação pode ser feita por meio de redes sem fio (*wireless*) que permite conexão sem a necessidade do uso de cabos (Pavani 2011). Pode ser também por meio de outros equipamentos que usam radiofrequência ou comunicação via infravermelho. Ou seja, o *fieldbus* pode ser entendido como um sistema de rede de comunicação industrial que permite o tráfego de dados para o controle em tempo real do processo (Pavani 2011).

### 2.3.2 Instrumentação e Supervisão

Automação requer ainda algum tipo de instrumentação, que pode ser entendida como qualquer dispositivo (instrumento) ou conjunto de dispositivos utilizados com a finalidade de medir, indicar, registrar ou controlar as variáveis de um processo (STARLING 2008). Pode haver instrumentos específicos para medir, indicar, registrar e controlar cada variável de processo. Assim, um processo de automação pode ser entendido como o conjunto de operações necessárias para obter um produto ou controlar a operação de uma máquina. Os processos industriais são semelhantes aos do corpo humano, mas partimos da decisão do grau de automação desejado, pois no corpo humano vários processos são automáticos, independente da decisão, como a respiração, a circulação sanguínea, os processos que envolvem a digestão e outros sistemas biológicos. Na indústria, um menor grau de automação é mais barato de implementar, e um maior grau de automação geralmente requer a compra e instalação de máquinas caras e complexas, como robôs industriais (Pavani 2011).

Em geral, a instrumentação fornece dados para um sistema supervísório, que permite monitorar e rastrear as informações, principalmente em se tratando de sistemas industriais ou de plantas de engenharia. Dados são coletados por meio de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e posteriormente apresentados ao usuário em tempo real. Como citado acima, nosso sistema da caixa comportamental utiliza um software com as mesmas finalidades para monitorar e supervisionar as variáveis e dispositivos de seu sistema de controle, conectados através de controladores específicos (*drivers*). As informações devem ser continuamente atualizadas e armazenadas em um banco de dados que pode ser local ou remoto. Sistemas supervísórios foram criados ao longo dos tempos para reduzir o tamanho dos painéis e melhorar a interface homem/máquina; eles são baseados em computadores que executam um software específico de supervisão de processos industriais.

Na atividade de supervisão, estão inclusas todas as funções de monitoramento do processo tais como gráficos de tendências de variáveis analógicas ou digitais, relatórios em vídeo e impressora, dentre outras. A operação nos sistemas atuais tem a grande vantagem de substituir as funções das antigas mesas de controle, otimizando os procedimentos de ligar e desligar equipamentos ou sequências de equipamentos, ou ainda mudar o modo de operação dos equipamentos de controle (Souza 2005). No controle supervísório os algoritmos de controle são executados em uma unidade de processamento autônoma, geralmente do tipo controlador lógico programável (CLP). Assim, o sistema de supervisão é responsável somente por ajustar os *set-points* do mecanismo de controle dinamicamente, de acordo com o comportamento global do processo.

De fato, o dispositivo de caixa comportamental consiste em uma plataforma construída com vários componentes, como motores, sensores e microcontroladores. Esses elementos são fundamentais para realizarmos a automação da operação da plataforma em questão. A interação com o dispositivo ocorre, basicamente, por meio de entradas e saídas, supervisionadas pelo nosso software. Em nossa tese, propomos um sistema mais simples que os acima, para realizar as mesmas três atividades básicas de supervisão, operação e controle. Na prática, visando suprir a necessidade de monitorar o treinamento e otimizar todas as etapas funcionais do aparelho, desenvolvemos dois sistemas modulares, um para controle (calibração) e outro para supervisão da caixa comportamental, que serão melhor descritos adiante, no Capítulo 4.

## 2.4 Funcionamento Básico da Caixa Comportamental

O esquema básico da caixa comportamental adotada neste trabalho é mostrado na Figura 2.1. O aparato consiste basicamente de uma câmara principal (maior) ligada a uma câmara de discriminação (menor) através de uma passagem tipicamente estreita, com 7,5 cm de largura. A câmara de discriminação é separada da câmara principal por uma porta deslizante controlada por um sistema de cremalheira. Este sistema possui uma cremalheira superior e outra inferior acopladas às extremidades superiores das respectivas portas deslizantes. As bases de rolamentos das portas são conectada à base de acoplamento dos motores-engrenagem, onde os servos motores são fixados, promovendo a rotação das roldanas dentadas, que, por sua vez, fornecem o movimento ao sistema cremalheira para abrir e fechar cada uma das portas deslizantes. Na parede frontal da câmara principal, estão os dois dispositivos em que o roedor deverá inserir o nariz, denominados de nose-pokes (ver Figura 2.1), que permite ao roedor sinalizar se a abertura é larga ou estreita. Dentro de cada um dos nose-pokes há um tubo de 2 mm de diâmetro onde é inserida uma pequena mangueira que fornece água como recompensa quando ocorrem discriminações corretas. Diretamente na frente de cada nose-poke há uma pequena placa metálica que o cobre completamente quando estiver fechado, evitando assim o acesso ao nose-poke (esta placa não aparece na Figura 2.1).

Um sensor infravermelho é usado para determinar quando o animal coloca o nariz na cavidade existente no nose-poke. Basicamente, quando o feixe de luz é rompido, o sensor gera um sinal que é enviado para o microcontrolador Arduino que comanda todo o experimento comportamental. A câmara de discriminação contém um terceiro *nose poke* localizado na parte média da parede frontal, como pode ser visto nas Figuras 2.1 e 2.2. Este dispositivo também tem um sensor infravermelho acoplado à sua parte lateral, que detecta quando algo entrou no compartimento de discriminação. Este compartimento possui duas barras, feitas de plástico por impressão 3D, responsáveis por delimitar uma abertura entre si. Ambas são controladas por mecanismo chamado *scotch-yoke*, que através da rotação do servo motor acoplado ao sistema interno transforma movimento angular da roldana interna do componente em movimento linear, favorecendo assim os movimentos de ir e vir da barra.

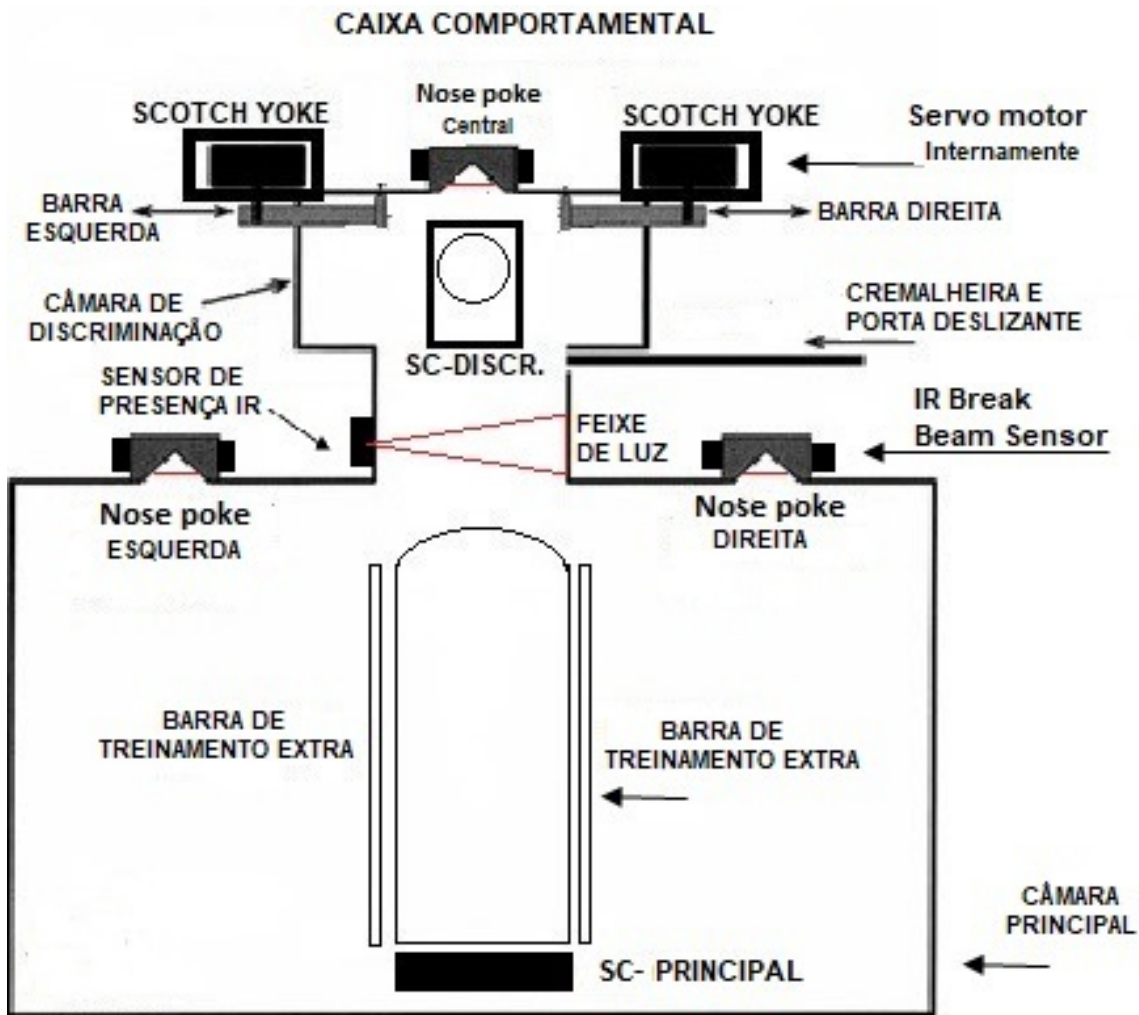


Figura 2.1: Diagrama esquemático da caixa comportamental Estrutural.

A parte superior da caixa desenvolvida possui dois suportes, sobre sua tampa, aos quais podem ser acopladas câmeras para captura das atividades executadas no interior do equipamento. Estes suportes são feitos de acrílico e são localizados em cada uma das câmaras, posicionados estrategicamente para capturar qualquer movimento executado no interior da caixa. O sistema de visão computacional responsável por processar essas informações e câmera está sendo desenvolvido em trabalho paralelo a esta tese, não fazendo parte do escopo do presente trabalho (Lima et al. 2022). A base do aparato comportamental é uma tampa feita de acrílico, com formato retangular, à qual as paredes da caixa são conectadas. Essas também possuem formato retangular sendo também fabricadas de acrílico. Um conjunto de barras cilíndricas, que denominamos de grelha, cobre toda a área do fundo, com 696 cm<sup>2</sup>. Esta grelha é composta de 32 barras cilíndricas de alumínio com 25 cm de comprimento e 5 mm de diâmetro. Uma bandeja de embutir feita de acrílico completa o aparato, sendo de fácil inserção na grelha. Ainda, o aparato completo é feito de tal forma que pode ser colocado dentro de uma caixa de isolamento à prova de som e à

prova de luz. Isso permite isolar o roedor do mundo exterior, sendo necessário em alguns tipos de experimentos.

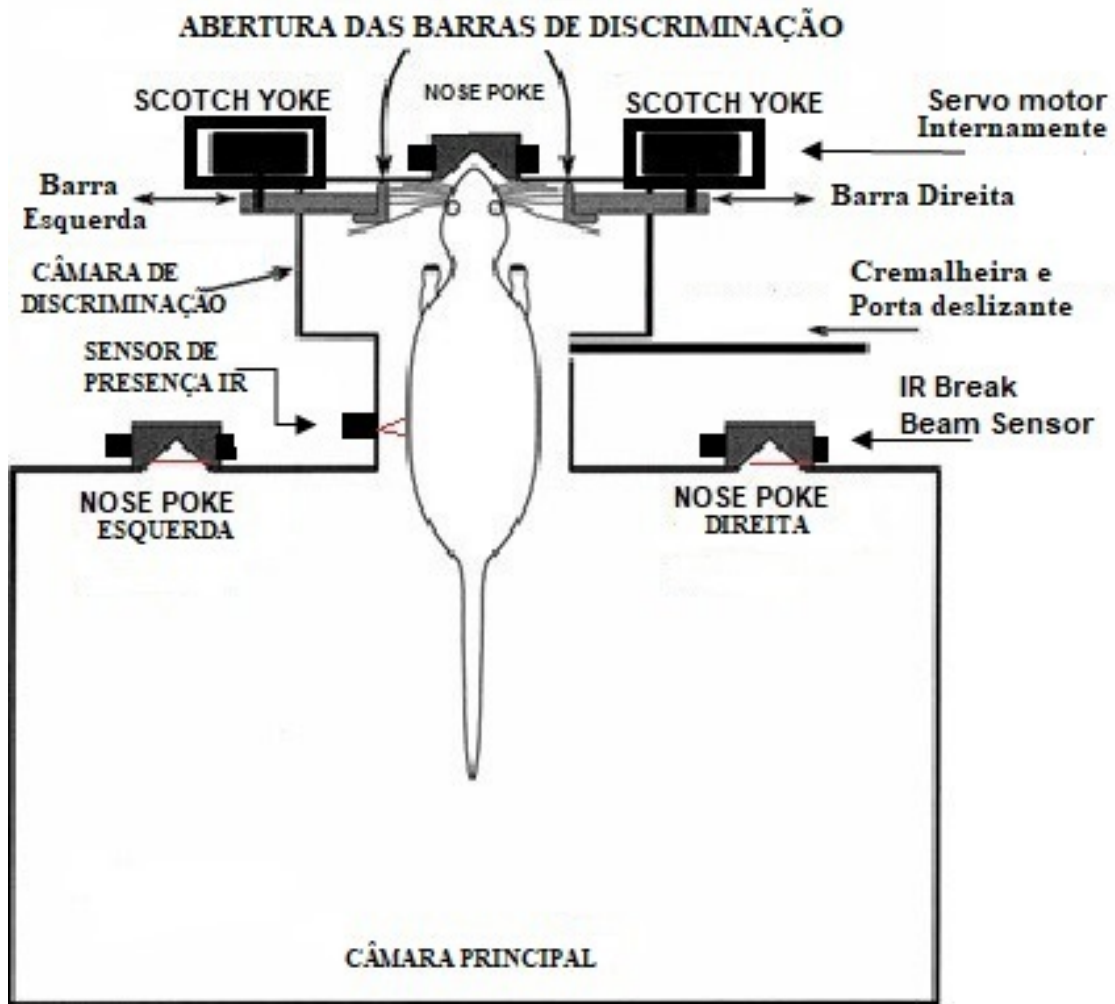


Figura 2.2: Diagrama esquemático da caixa comportamental funcional.

## 2.5 Treinamento a ser Realizado

O treinamento com os roedores segue uma sequência de procedimentos e regras. Em cada tentativa, o roedor é colocado na caixa comportamental, na parede frontal da câmara de principal, onde estão os dois mecanismos para o roedor inserir o nariz, que permitem ao rato responder se a largura da câmara de discriminação é larga ou estreita. O treinamento neste caso consiste na discriminação da largura das barras a cada recompensa. Dentro de cada uma desses mecanismos, há um tubo de 2 mm de diâmetro em que é inserida uma pequena mangueira de fornecimento de água como recompensa por discriminações corretas. Diretamente na frente de cada um há uma pequena placa de ABS que o cobre

completamente quando fechado, evitando assim o acesso ao mesmo indevidamente.

O sensor é ativado sempre que o animal colocar o nariz acionando o sensor infravermelho que se encontra no componente nose-poke, detectando que o mesmo inseriu o nariz para responder. Ao romper o feixe de luz um sinal é enviado para o Arduino que controla o experimento comportamental. A câmara de discriminação contém um terceiro sensor de presença localizado no meio da parede frontal que também funciona com um sensor infravermelho acoplado em sua lateral, que detecta quando algo entrou no compartimento de discriminação. Esse compartimento possui duas barras, feitas de acrílico, responsáveis por delimitar uma abertura entre si. Ambas as barras são controladas pelo mecanismo chamado *scotch-yoke*.

Ao passar por esse compartimento o animal deixa a câmara de discriminação e é fechada a porta principal, que permite o acesso de uma câmara à outra. Logo, o mesmo passará para a câmara principal onde receberá a recompensa de acordo com o acerto discriminativo da abertura das barras. Quando a largura das barras estiverem estreitas o rato receberá a recompensa do lado esquerdo e quando a largura das barras estiver larga, do lado direito. Os dois acessos às recompensas são abertos simultaneamente proporcionando uma gotinha equivalente a 25 microlitros de água se o roedor acertar. Caso o mesmo erre, não receberá a recompensa, sendo assim reiniciada a etapa novamente, fechando-se o acesso às recompensas e abrindo-se a porta principal de acesso à câmara de discriminação. É então realizado um novo sorteio aleatório de abertura das larguras das barras, com uma nova tentativa podendo ser iniciada. Ao término do treinamento, os animais são devolvidos ao biotério para aproveitamento em outras atividades, ou então sacrificados, dependendo do protocolo adotado.

## 2.6 Aspectos Metodológicos da Proposta

Como visto, estudos da discriminação tátil em roedores fornecem um excelente modelo experimental para investigar o funcionamento cerebral. Em termos teóricos, a ideia é abrir o leque para que estudos sobre o sistema sensorio-motor de roedores possam ser realizados de maneira mais refinada, com a possibilidade de desenhar experimentos mais complexos de tomada de decisão.

A proposta desta tese, visionada acima, torna possível controlar com muita precisão a abertura das barras de discriminação. O intuito é desenvolver um aparelho que possa favorecer o aprendizado e melhorar o desempenho do animal, assim como podem ser executados diversos treinamentos dentro do mesmo ambiente de trabalho oferecido. O aparato deve ser projetado para eliminar a possibilidade de que os roedores possam usar outras pistas sensoriais (por exemplo, auditivas, visuais ou olfativas) para resolver a tarefa ou, mais importante, que o roedor possa usar os bigodes e nariz para realizar as discriminações táteis e qualquer outro treino a ser indexado. Além disso, o aparato comportamental deve ser projetado para que os roedores se aproximem e amostram a abertura de largura variável com seus grandes bigodes faciais de maneira bem controlada, diversas vezes em séries.

Especificamente, como foi visto, o trabalho desenvolvido por Krupa e colaboradores (Krupa et al. 2001) permitiu um grande avanço na compreensão do sistema somatossen-

sorial de roedores. Há também outros trabalhos que mostram que a região do bigode do córtex somatossensorial primário dos roedores (SI) integra informações de almofadas de bigode contralateral e ipsilateral (Shuler et al. 2001). Desta forma, o sistema sensorial dos roedores integra informações de ambas as almofadas e propõe que tais interações possam estar por trás da capacidade dos ratos de discriminar estímulos tácteis bilaterais e de funções mais complexas como a percepção modal cruzada (*cross-modality*), tal como no trabalho de Winters (Jacklin et al. 2015).

Tendo isso como base, a metodologia usada para validar a proposta pode ser resumida de modo mais específico. De cunho mais prático, utilizamos tecnologia de ponta em materiais e eletroeletrônica voltada à automação, com o incremento de soluções baseadas em software, tendo como base uma plataforma de prototipagem livre, usando Arduino, Python, Linux e Android, para construir uma caixa comportamental melhorada em relação às que existem, de acordo com nossa busca feita na literatura a respeito, colocada no Capítulo 3, adiante. O intuito é facilitar a vida de pessoas na área de pesquisa. A ideia é abrir caminhos para que possa ser possível a implementação de agentes autônomos, que deverão interagir em determinado ambiente por meio das informações fornecidas pelos sistemas de percepção, ou de conhecimento, agindo no objetivo de realizar tarefas pré-determinadas (realização dos treinos/tarefas de forma autônoma).

Em nossa proposta, todas as tarefas do treinamento são totalmente automatizadas e controladas pelo microcontrolador arduino, não exigindo intervenção do pesquisador-experimentador. Como citado acima, após a construção, o aparelho comportamental pode ser fechado em uma caixa de isolamento à prova de luz, passando a ser iluminado com luz infravermelha. Neste caso, o comportamento de cada roedor deverá ser monitorado por meio de câmeras de vídeo sensíveis ao infravermelho (colocadas acima da câmara de discriminação e da câmara principal, nos respectivos suportes). Desse modo, pode-se eliminar qualquer necessidade de oclusão da visão dos roedores.

De certa forma, a construção do equipamento com diversos mecanismos de substituição simples proporciona uma relevância significativa no manuseio e funcionamento do mesmo. O sistema engloba modularidade, permitindo inserção de componentes extras relacionados a um determinado mecanismo. Algumas funcionalidades já são extras são tais como: duas barras para inserir treino forçado na câmara principal, um par de nose pokes de recompensa, possibilidade de levar o dispositivo para ambientes fora do laboratório e até mesmo a adaptação de mais câmeras ao aparelho. Os componentes modulares podem ser combinados entre si de forma praticamente ilimitada. Assim, as ideias de obtenção de múltiplas funcionalidades tornam-se realidade.

A fiabilidade e a capacidade de expansão asseguram que o sistema modular construído possa ser utilizado durante período de tempo maior. Após discutir os trabalhos relacionados, no Capítulo 3, na sequência, iremos detalhar depois, no Capítulo 4, a construção (ou implementação) propriamente dita do equipamento desenvolvido neste trabalho, usando as respectivas metodologias mencionadas acima.



---

# Capítulo 3

## Trabalhos relacionados

---

Como visto anteriormente, para a realização de estudos comportamentais, comumente são utilizados aparatos de treinamento conhecidos como caixas de condicionamento operante (CCO). Existem vários tipos de CCO, sendo que o funcionamento de cada caixa visa estudar alguma característica de comportamento dos animais. Por exemplo os labirintos em T e Y (Handley & Mithani 1984), visam tomada de decisão. O labirinto de cruz elevado visa estudar características de ansiedade (Huang et al. 2001), o campo aberto visa tanto estudar características espaciais, quanto de ansiedade. Já o trabalho de (Krupa et al. 2001), utiliza uma CCO com características funcionais semelhantes ao aparelho desenvolvido neste trabalho. Neste Capítulo, colocamos trabalhos teóricos e experimentais e também discutimos a parte prática de alguns trabalhos já colocados neste texto, bem como contextualizamos nossa proposta em relação a esses.

### 3.1 Trabalhos Teóricos e Experimentais com Caixas Comportamentais

Nesta seção analisamos trabalhos teóricos e experimentais encontrados na literatura envolvendo a utilização de CCO. Foram encontrados alguns estudos com a necessidade de um ambiente específico para se obter respostas às diversas perguntas e hipóteses, onde são desenvolvidos aparatos ou aparelhos comportamentais, visando através dessas ferramentas as melhores formas de chegar a soluções nos mais variados estudos. Iniciando com a caixa comportamental desenvolvida por Krupa e colegas (Krupa et al. 2001), foi citado anteriormente que ela apresenta um mecanismo que permite que os animais discriminem a abertura entre duas barras utilizando apenas a suas vibrissas. Este mecanismo elimina a possibilidade do roedor usar outras pistas sensoriais (por exemplo, visuais ou olfativas) para resolver a tarefa ou, mais importante, que os ratos pudessem usar os bigodes menores ao redor de seus lábios e nariz em vez de seus grandes bigodes faciais para realizar as discriminações táteis. Além disso, o aparato comportamental foi projetado para que os camundongos se aproximassem e amostrassem a abertura de largura variável com seus grandes bigodes faciais de maneira bem controlada e muito repetível.

O animal tem que associar a abertura larga ou estreita com a posição (lado direito ou esquerdo da caixa) onde ele recebe uma gota de água como recompensa. O dispositivo foi utilizado em diversos experimentos de discriminação tátil, como o estudo publicado

com o título *A Brain-to-Brain Interface for Real-Time Sharing of Sensorimotor Information* (Pais-Vieira et al. 2013). Nesse estudo, interfaces cérebro-cérebro foram usadas para ajudar os roedores a colaborarem uns com os outros. Quando um segundo roedor foi incapaz de escolher a alavanca correta, o primeiro notou (não obtendo uma segunda recompensa), e produziu uma rodada de disparos de neurônios relacionados à tarefa que tornaram o segundo roedor mais propenso a escolher a alavanca correta. Os roedores desse experimento foram recompensados quando as ações foram realizadas pelo *roedor decodificador*, que se conformava aos sinais de entrada e quando os sinais foram transmitidos pelo *roedor codificador*, que resultou na ação desejada. Porém, como notado acima, o desenvolvimento dessa caixa tem quase 20 anos, e para sua construção foram utilizados componentes eletrônicos e atuadores já superados tecnologicamente. A operação dessa caixa antiga é um procedimento complexo, uma vez que envolve placas controladoras ligadas a um PC dedicado, um compressor de ar para o acionamento dos atuadores, PCB com inúmeros componentes afixados em um quadro de mais de 1 m<sup>2</sup> de área. Além disso, esse sistema utiliza muitos componentes importados que são raros de serem encontrados no Brasil, dificultando algum eventual reparo necessário no artefato.

O trabalho com título *Bilateral integration of whisker information in the primary somatosensory cortex of rats* realizado por Shuler (Shuler et al. 2001) utilizando o mesmo modelo de aparato anterior, busca uma representação isomórfica da almofada de bigodes contralateral no córtex cerebral de roedores que serviu como um exemplo canônico em áreas somatossensoriais primárias em que a superfície corporal contralateral é representada espacialmente como um mapa topográfico. Ao caracterizar as respostas evocadas por estímulos multibigodes, fornecemos evidências diretas de que a região do bigode do córtex somatossensorial primário(SI) do rato integra informações das almofadas dos bigodes contralaterais e ipsilaterais. As proporções de neurônios SI responsivos a estímulos de vibrissas ipsilaterais, bem como suas probabilidades de resposta, aumentaram com o número de vibrissas ipsilaterais estimuladas. Sob estimulação bilateral das vibrissas, as respostas de 95% dos neurônios registrados foram afetadas pela estimulação de vibrissas ipsilaterais. As respostas táteis contralaterais dos neurônios SI foram profundamente influenciadas por estímulos ipsilaterais anteriores e vice-versa. Esse efeito dependia tanto da localização espacial quanto do tempo relativo dos estímulos bilaterais das vibrissas, levando a assimetrias espaciais e temporais de interação. A estimulação bilateral de vibrissa resultou em apenas mudanças modestas na latência da resposta evocada. A estimulação ipsilateral anterior também mostrou afetar as respostas táteis evocadas por estímulos ipsilaterais posteriores.

Um estudo anciente, utilizando um labirinto de braço radial, foi realizado por Hiraga e Iwasaki (Hiraga & Iwasaki 1983), em 1983. O trabalho intitulado como *Recent advances in studies of rat memory in the radial-arm maze* mostra a realização de uma tarefa do labirinto de braço radial com um novo paradigma experimental para avaliar a memória animal, que é diferente dos labirintos tradicionais, como os labirintos T e Y, citados acima. O labirinto de braço radial consiste em uma plataforma central e vários braços (geralmente são 8) que se estendem radialmente a partir da plataforma. O animal (o rato na maioria dos casos) é treinado para uma tentativa por dia para comer pellets colocados no final de cada braço, e após treinamentos por 1-2 semanas, passa a obter os pellets de forma eficiente,

### 3.1. TRABALHOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS COM CAIXAS COMPORTAMENTAIS 21

ou seja, sem reentrar nos braços, de forma desnecessária. O desempenho efetivo nesta tarefa baseia-se em dois tipos de memória. A memória de referência inclui informações sobre a configuração de estímulos extralabirinto (principalmente visuais), e a memória de trabalho, incorpora os braços escolhidos na tentativa corrente. A informação na memória de referência é efetiva em todas as tentativas, enquanto que a informação na memória de trabalho é efetiva apenas em uma determinada tentativa (Hiraga & Iwasaki 1983).

Outro estudo em uma área ligeiramente diferente, visando estudar neuropatologias, cujo manuscrito foi denominado de *NLRP3 Inflammasome-Dependent Increases in High Mobility Group Box 1 Involved in the Cognitive Dysfunction Caused by Tau-Overexpression*, foi realizado por Zhao et al. (Zhao et al. 2021). Eles observaram que a *hiperfosforilação de tau* é uma alteração característica presente em uma série de condições neurológicas, como o traumatismo cranioencefálico (TCE) e doenças neurodegenerativas, por exemplo. Tratamentos direcionados à proteína 1 da caixa de grupo de alta mobilidade (HMGB1) induzem efeitos neuroprotetores nessas condições neuropatológicas. Comparado com camundongos de tipo selvagem (WT) com superexpressão de tau, a regulação negativa de p-tau e HMGB1 foi observada em NLRP3 nos camundongos, indicando que as alterações de HMGB1 eram dependentes de NLRP3. Além disso, o tratamento com a substância glicirrizina em um estágio tardio reduziu acentuadamente os níveis de p-tau e melhorou o desempenho nos labirintos Y e T e a capacidade de camundongos com superexpressão de tau de construir ninhos. Isso revelou melhorias na memória espacial e também na função avançada do hipocampo. Os achados desse trabalho identificaram que a p-tau tem um papel desencadeante na modulação da neuroinflamação e memória espacial de forma dependente de NLRP3, e sugeriram que o tratamento com inibidores de HMGB1 pode ser uma melhor estratégia terapêutica para as tauopatias.

Outro trabalho relacionado, encontrado na literatura, com título *Effects of cytotoxic hippocampal lesions in mice on a cognitive test battery* foi realizado por Deacon et al. (Deacon et al. 2002). No estudo, os camundongos receberam lesões citotóxicas que removeram seletivamente todo o hipocampo e giro denteado, exceto as porções mais ventrais. Eles foram prejudicados na alternância de tentativas discretas espontâneas e recompensados em labirintos em T. A aquisição de memória de referência para a localização de uma plataforma escondida no labirinto aquático de Morris foi prejudicada nos camundongos lesionados. Em uma tarefa de memória de referência no labirinto em Y elevado, na qual apenas um braço foi recompensado, os camundongos lesionados não mostraram evidências de aprendizado. Em uma tarefa em labirinto Lashley III, no entanto, onde a rotação do labirinto demonstrou que o desempenho do controle era independente de pistas espaciais distais, a aquisição de aprendizado nos camundongos lesionados não foi prejudicada. Os níveis de controle de alternância espontânea contínua em um labirinto em Y foram muito baixos para revelar um déficit hipocampal. Um pequeno prejuízo na aquisição de uma tarefa de esquiva passiva de múltiplas tentativas foi observado em camundongos lesionados, apesar de um pequeno, mas significativo aumento na reatividade ao choque nas patas. Esses resultados são amplamente consistentes com os achados em roedores lesionados no hipocampo, nas mesmas tarefas ou semelhantes, e refletem um grande comprometimento da cognição espacial, com relativa economia de desempenho em tarefas não espaciais.

Nesta linha, um último estudo correlato que apresentamos é o trabalho intitulado *An automated behavioral box to assess forelimb function in rats*, que foi realizado por Wong et al. (Wong et al. 2015). Usando componentes desenvolvidos por plataformas eletrônicas de código aberto, eles projetaram e testaram uma caixa comportamental automatizada de baixo custo para medir a função dos membros anteriores em ratos. O aparelho foi fabricado, principalmente usando acrílico, e foi equipado com vários sensores para controlar a duração e a dificuldade da tarefa, que era relacionada à detecção de resultados de alcance e dispensa de pellets. O software de controle, foi desenvolvido em MATLAB, e também foi utilizado para controlar uma câmera para capturar e processar o vídeo durante as tarefas de alcance. É importante ressaltar que esse processamento pode ser adotado para monitorar o desempenho da tarefa quase em tempo real. Os autores demonstraram ainda que o aparato automatizado pode ser usado para agilizar a aquisição de habilidades, aumentando assim o rendimento, bem como facilitando estudos de aprendizagem motora precoce versus tardia. A configuração também é prontamente compatível com o monitoramento eletrofisiológico crônico.

## 3.2 Sistema Somatossensorial Vibracional

Buscamos também na literatura uma outra classe de trabalhos, teóricos e experimentais, que abordam o sistema somatossensorial vibracional ou o sistema somatossensorial trigeminal de camundongos. Esses trabalhos são importantes, uma vez que são amplamente utilizados para estudar as propriedades da somatossensação no cérebro de mamíferos (Zerari-Mailly et al. 2001). Numerosos estudos eletrofisiológicos desse sistema forneceram informações detalhadas sobre os mecanismos táteis e sobre o processamento a nível de neurônio único (Krupa et al. 2001). Por outro lado, sabe-se muito pouco sobre as propriedades relacionadas à aquisição e processamento de informações táteis comportamentais relevantes em camundongos acordados e bem comportados.

Não obstante, já foram realizados estudos onde examinou-se várias questões associadas aos diferentes aspectos funcionais da matriz vibrissal em camundongos, que estejam realizando ativamente discriminações táteis. Primeiramente foi examinado a natureza funcional básica do sistema vibratório (vibrissas). Estudos anteriores mostraram que a matriz vibrissal do camundongo pode funcionar como uma folha receptiva semelhante à pele, ou seja, usada para detectar e discriminar a textura de diferentes superfícies (Carvell & Simons 1990). Por outro lado, um estudo recente desafia essa hipótese sugerindo que as grandes vibrissas faciais atuam como sensores táteis discretos e pontuais e que servem para detectar diferenças na distância de objetos ou superfícies próximos (Brecht et al. 1997).

Além disso, os resultados de Brecht et al. (Brecht et al. 1997) levantam a possibilidade de que, nas tarefas de discriminação de textura (Carvell & Simons 1990), os camundongos usavam preferencialmente as vibrissas mais rostrais, à volta da ponta do nariz para resolver a tarefa, e não as vibrissas caudais maiores, possibilidade esta que nunca foi testada. Embora seja possível que as grandes vibrissas mistas podem preservar ambas as funções (textura discriminação e detecção à distância), nenhum estudo anterior demonstrou sistematicamente que os camundongos conseguem discriminar pequenas diferenças

à distância usando apenas essas vibrissas.

Os resultados do estudo desenvolvido por Krupa (Krupa et al. 2001) demonstram claramente que a matriz vibrissal pode funcionar como um detector de distância granular. Os ratos aprendem rapidamente a discriminar entre aberturas muito largas ou estreita (62 vs 65 mm; uma diferença de apenas 5%). Curiosamente, Carvell et al. (1990) relatam que uma diferença de 6% no espaçamento de uma grade tátil fina (1,00 vs 1,06 mm) parecia estar perto dos limites da resolução tátil em uma tarefa de discriminação muito diferente, dependendo das vibrissas. Nesse estudo o animal passa por diversos testes de discriminação das barras no tocante à sua largura (estreita/largo). Os roedores realizaram discriminações de abertura usando apenas sua vibrissa maior. Não havia evidências de que eles usassem as vibrissas menores ao redor do nariz ou dos lábios para realizar a tarefa. Além disso, é muito provável que os mesmos possam realizar discriminações ainda maiores e precisas, se duas aberturas diferentes foram apresentadas simultaneamente, lado a lado, em um paradigma de discriminação de duas escolhas, em vez da apresentação de uma única abertura usada. Além disso, os ratos também foram capazes de discriminar a largura da abertura rapidamente. Normalmente, as vibrissas dos roedores permaneciam em contato com a abertura por apenas algumas centenas de milissegundos, mesmo durante as discriminações mais difíceis.

### **3.3 Evoluindo o Projeto da CCO - Nossa Proposta**

Vimos a importância de todos os trabalhos acima, referentes a diversos estudos com roedores e como esses estudos podem ser usados para se entender melhor o comportamento desses animais, estendendo-se aos mamíferos, de um modo geral. Ainda, como visto acima, a CCO desenvolvida por Krupa e colegas (Krupa et al. 2001) apresenta um mecanismo que permite que os animais discriminem a abertura entre duas barras utilizando apenas as suas vibrissas. O animal associa a abertura larga ou estreita com a posição (lado direito ou esquerdo da caixa) onde recebe uma gota de água como recompensa.

Esta CCO foi bastante usada a posteriori, em experimentos de discriminação tátil (Pais-Vieira et al. 2013), onde interfaces cérebro-cérebro são usadas para ajudar os roedores a colaborar uns com os outros. Quando um segundo roedor é incapaz de escolher a alavanca correta, o primeiro é notado (não recebendo uma segunda recompensa) e produz uma rodada de disparos de neurônios relacionados à tarefa que torna o outro mais propenso a escolher a alavanca correta. Ambos são recompensados quando as ações são executadas pelo "roedor decodificador" em conformidade com os sinais de entrada e quando os sinais são transmitidos pelo "roedor codificador", o que resulta na ação desejada.

Em outro estudo com a mesma caixa, Mezdari et al. (Mezdari et al. 2011), apresentam, no trabalho que tem como título *Avaliação do comportamento de ratos alojados em caixas de cores diferentes*, um estudo sobre a adequação do ambiente físico quanto aos hábitos da espécie em relação ao bem-estar animal. O refinamento dessas pesquisas, ultimamente, vem ganhando importância investigativa. Com o objetivo de avaliar o comportamento de camundongos alojados em caixas de diferentes cores, utilizaram 48 animais machos com 3 meses de idade divididos em seis grupos, sendo que três grupos foram alojados em caixas brancas e outros três em caixas pretas, durante 4 semanas. Empregando o labirinto em

cruz elevado (LCE), experimentos mostraram que os animais alojados nas caixas brancas dispenderam maior tempo de permanência nos braços fechados dessas caixas. No teste do campo aberto (CA), houve maior ambulação do grupo mantido em caixas pretas. E, na esquiiva inibitória, os dados indicaram um aumento significativo no tempo de permanência na plataforma do grupo alojado em caixas pretas. Assim, os animais alojados em gaiolas de cor preta apresentaram maior tendência exploratória (menor ansiedade) e melhor aprendizado.

No entanto, como dito acima, o modelo anterior de caixa comportamental que inspirou o atual foi desenvolvido há quase 20 anos, utilizando componentes eletrônicos e atuadores já tecnologicamente ultrapassados. Com isso, a operação da caixa tradicional torna-se um procedimento complexo. Especificamente, o trabalho desenvolvido por Krupa e colaboradores (Krupa et al. 2001), permitiu um grande avanço no entendimento do sistema somatossensorial dos roedores. Neste trabalho, melhoramos o projeto, usando o conceito de hardware e software livre, o que significa que qualquer pessoa pode montá-lo, modificá-lo, melhorá-lo e personalizá-lo, partindo do mesmo hardware básico, baseado em Arduino.

Atualmente, utilizamos o Arduino uno, que é uma placa microcontroladora baseada na CPU Atmel, a primeira placa Arduino baseada em um microcontrolador de núcleo ARM (Arduino 2022). Com isso, os circuitos de I/O podem ser facilmente conectados a um computador e programados via IDE (Integrated Development Environment) utilizando linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB. Uma vez programado, o microcontrolador pode ser utilizado de forma independente, por exemplo, pode-se colocá-lo para controlar a abertura e fechamento das portas deslizantes, ligar e desligar as luzes, além de utilizá-lo como um dispositivo de medição ou qualquer outro uso desejado.

Buscando na literatura modelos experimentais diferentes, os quais poderiam ser adotados como modelo de estudo no aparato comportamental desenvolvido. Observamos que modelos de CCO utilizados no experimento de (Krupa et al. 2001) desde seus últimos experimentos não foram mais desenvolvidos exemplares como os utilizados. Assim, no projeto aqui desenvolvido, propomos um modelo onde o arduino é o hardware responsável por automatizar e controlar os processos de funcionamento da caixa comportamental, assim como controlar a abertura e fechamento das portas de correr, controlando a soltura do nose-poke, assim como o controle do sensor de infra-vermelho. Desenvolvemos um modelo CCO automatizado de hardware aberto para ser usado em experimentos de discriminação tátil com roedores, com portabilidade, variedade funcional, desempenho eficiente e principalmente baixo custo.

Todos os atuadores foram construídos com servomotores, o que permite fácil substituição e manutenção. Na mesma direção, a nova caixa comportamental foi projetada de forma a eliminar a possibilidade de que os roedores possam usar outras pistas sensoriais (por exemplo, auditivas, visuais ou olfativas) para resolver a tarefa ou, mais importante, que os roedores possam usar suas vibrissas e nariz para realizar as tarefas. Com isso, tarefas de discriminação tátil e também outras tarefas, relacionadas a outros tipos de treinamento podem ser consideradas. Além disso, o aparato comportamental é projetado para que os ratos se aproximem e experimentem a abertura de largura variável com suas vi-

brissas, de maneira controlada, várias vezes em uma série. Como visto acima, estudos de descrição tátil em roedores fornecem um excelente modelo experimental para investigar o funcionamento do cérebro. Assim, desenvolvemos um dispositivo que favorece o aprendizado e o desempenho do animal, bem como favorece a realização do treinamento para diferentes tarefas dentro de um mesmo ambiente de trabalho. O modelo de caixa comportamental desenvolvido neste trabalho permite maior flexibilidade e maior diversificação nos treinos, além dos experimentos clássicos executados usando o modelo de Krupa (Krupa et al. 2001), como treinos forçados e unilaterais. Ou seja, a independência científica de poder experimentar e trocar o experimento de forma simples, sem depender de terceiros, é mais uma razão para que equipamentos abertos como os proposto aqui sejam cada vez mais utilizados.



---

## Capítulo 4

# Aprimorando a Caixa Comportamental

---

Os passos relatados no Capítulo 2, a serem seguidos no projeto da caixa comportamental desenvolvida, são apresentados neste capítulo. Como visto, a proposta metodológica consta de vários passos: estudar e implementar a lógica de funcionamento da caixa, automação das funcionalidades da caixa, e modelagem das tarefas a serem executadas. As possíveis alternativas e as efetivamente utilizadas para as implementações desses passos serão descritas a seguir.

### 4.1 Projeto de Hardware e Software

Como ferramentas de auxílio para o desenvolvimento de processos de controle foram utilizados uma placa microcontroladora Arduino Uno (Arduino 2022) e seu ambiente de programação (Arduino IDE), com o objetivo de controlar os atuadores e sensores presentes no sistema. O aparato comportamental tem três sensores infravermelhos HD-DS25CM-3MM (fabricado pela Omron), três servo motores TowerPro MG995 (fabricado pela TowerPro). As paredes e a base da caixa são feitas de Acrílico. Ela possui ainda duas bombas peristálticas, três *nose pokes*, trava de segurança do suporte de câmeras, e um sistema pião-cremalheira, sendo todos feitos de acrílico. Possui também um *scotch yoke* construído parte de acrílico, suporte de câmeras feitos de acrílico e câmeras de vídeo B/P (fabricadas pela Panasonic). O Arduino é uma placa microcontroladora desenvolvida com o objetivo de ser um dispositivo que fosse ao mesmo tempo barato, funcional e fácil de programar, sendo dessa forma acessível a estudantes e projetistas, sendo possível miniaturizar muitos sistemas de controle.

Como citado acima, adotamos o conceito de *hardware* (e software) livre, o que significa que qualquer pessoa pode montar, modificar, melhorar e personalizar o arduino, partindo do mesmo *hardware* básico. Assim, foi criada uma placa composta por um microcontrolador Atmel, circuitos de entrada/saída e que pode ser facilmente conectada à um computador e programada via IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) utilizando uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB. Depois de programado, o microcontrolador pode ser usado de forma independente, ou seja, você pode colocá-lo para controlar desde o abrir e fechar de um portão até um robô, as luzes da sua casa, a temperatura do ar condicionado, pode utilizá-lo como um aparelho de medição ou qualquer

outro projeto. No projeto desenvolvido o Arduíno será o *hardware* responsável pela automatização e controle dos processos de funcionamento da caixa comportamental, sendo ele responsável de maneira específica por controlar a abertura e fechamento da porta deslizante, controle da liberação de recompensa dos nose pokes e controle dos sensores.

Além disso com o avanço de tecnologias como os motores de passo e servo motores, diminuiu muito a complexidade dos atuadores. Os servos motores são modelos de motores comuns com controladores e encoder acoplados. São destinados e projetados para uso em aplicações de controle de movimento que exigem posicionamento de alta precisão, reversão rápida e desempenho excepcional. Sendo assim, eles são amplamente utilizados em robótica, sistemas de radar, sistemas de fabricação automatizados, máquinas-ferramentas, computadores, etc.

Podem ser motores de Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA), síncrono ou de indução. Já o motor de passo é um motor elétrico que desloca um ângulo a cada pulso recebido do drive de controle. O número de passos gerados pelo motor, é exatamente igual ao número de pulsos recebidos e a velocidade do motor é igual a frequência de entrada de pulsos. Podem ser utilizados como máquinas rotuladeiras, dosadores, bomba peristáltica, equipamentos médicos, etc. O Servo motor e o Motor de passo são bem parecidos quanto a construção e para alguns princípios básicos de funcionamento: Ambos os motores incorporam um rotor com ímã permanente, um estator com bobinas e não possuem escovas ou comutadores, fato que permite uma vida útil bem longa. Não possuem elementos de desgastes além dos rolamentos radiais, e esses desde que, estejam operando abaixo das capacidades de esforços radiais sobre o eixo, a vida útil de um motor de passo ou servo motor, operando em condições normais de trabalho é de aproximadamente 12 anos, período que pode ocorrer enfraquecimento do magnetismo do rotor de ímã permanente.

A utilização de ferramentas gráficas computacionais para a concepção e desenvolvimento de uma caixa comportamental automatizada, torna esta tarefa mais eficiente e permite ainda a rápida verificação de diferentes esquemas de adequação ao projeto, buscando a solução mais adequada para o problema em estudo. O SketchUp foi originalmente desenvolvido pela *At Last Software* (@last software), empresa com sede em Boulder, Colorado, que foi adquirida pela Google, anunciado a 14 de março de 2006. Em 2012, a *Trimble Navigation* adquiriu o programa. O *SketchUp* está disponível em duas versões: a versão profissional, Pro, e a versão gratuita, Make, (para uso privado, não comercial), disponível nas plataformas *Windows* e *IOS*, além de uma versão web que executa diretamente no *browser*.

## 4.2 Modelagem Estrutural (Parte Mecânica)

A estrutura mecânica da caixa comportamental possui vários componentes e mecanismos, tais como: uma base, paredes, tampas das câmaras, portas deslizantes, *scotch-yoke*, *nose pokes*, bomba peristáltica, câmeras de vídeo e seus suportes, e cremalheira, entre outros.

### 4.2.1 Base

Conforme ilustrado na Figura 4.1, a base possui dimensões 66,0 cm x 45,5 cm x 5,5cm sendo construída de madeira, a tampa da Base possui dimensões 66,0 cm x 45,5 cm x 1,0 cm sendo construída de acrílico, O conjunto de barras (grelha) devem cobrir uma área de 29 cm x 24 cm, sendo que a grelha é composta de barras cilíndricas de alumínio com 25 cm de comprimento e 5 mm de diâmetro, com espaçamento de 0,8 cm de uma barra para outra. A gaveta ou bandeja possui dimensões 29,0 cm x 42,2 cm x 1,8 cm sendo construída de alumínio.

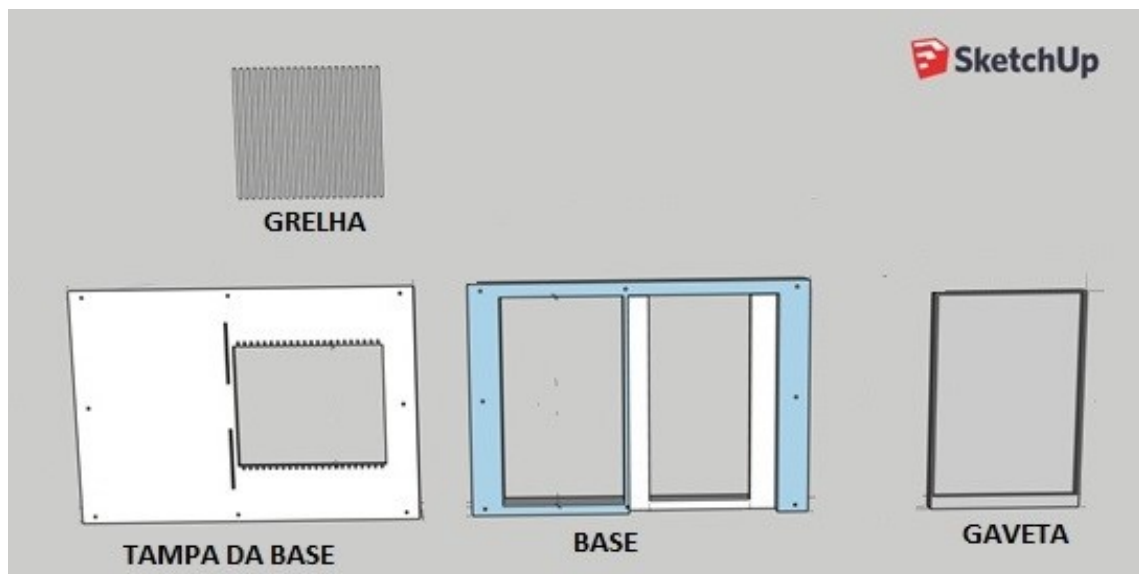


Figura 4.1: Estruturas da base.

### 4.2.2 Paredes

As paredes formam um total de 9 peças, sendo:

#### Câmara Principal

- Uma parede de 30,0 cm x 25,0 cm x 0,5 cm;
- Uma parede de 30,0 cm x 23,5 cm x 0,5 cm;
- Uma parede de 30,0 cm x 6,3 cm x 0,5 cm;

- Duas paredes de 30,0 cm x 8,5 cm x 0,5 cm, com cortes diagonais nas bordas (30,0 cm x 7,8cm x 0,5cm) e furo de 2,4 cm de diâmetro na parte inferior.

#### **Câmara de Discriminação**

- Uma porta de 29 cm x 16,6 cm x 0,5 cm;
- Duas paredes de 30,0 cm x 16,8 cm x 0,5 cm, com cortes retangulares na parte inferior esquerda com 9,0 cm x 4,5 cm x 0,5 cm, com distância de 0,5 cm da extremidade da peça;
- Uma parede de 30,0 cm x 7,5 cm x 0,5 cm e furo de 2,4 cm de diâmetro na parte inferior.

#### **Geral**

- Oito calços de 2,2 cm x 1,6 cm x 1,0 cm que ficarão nas bases das paredes com furos de 3 mm cada.
- Os Furos de união das paredes possuem 3mm.

### **4.2.3 Tampas das Câmaras**

As Tampas formam um total de 2 peças (uma na câmara de recompensa externa e uma na câmara de discriminação do centro), sendo:

#### **Tampa da Câmara Principal**

- Mede 715,47 cm<sup>2</sup> de área e 1 cm de espessura;
- Contém dois cortes de 28 cm x 0,5 cm para entrada de barras auxiliares;
- Contém um corte de 25,3 cm x 6,6 cm para permitir a filmagem do compartimento interno;
- Dois pares de furos de 3 mm de diâmetro, distanciados 12,8 cm entre si, para acoplamento dos suportes da câmara;
- Um par de furos de 3 mm de diâmetro, distanciados 3 cm entre si, para acoplamento dos suportes da porta deslizante.

#### **Tampa da Câmara de Discriminação**

- Mede 142,8 cm<sup>2</sup> de área e 0,5 cm de espessura;
- Contém um furo circular de 4,2 cm de diâmetro para entrada do suporte com a câmara.

### **4.2.4 Portas Deslizantes**

As portas deslizantes permitem a comunicação entre os espaços, deixando tudo mais amplo e arejado. Assim como elas também podem separar os ambientes de forma discreta, e funcionam quase como paredes móveis. Deixando o ambiente interno dinâmico, com a possibilidade de mudar configuração da caixa de acordo com as necessidades do treinamento.

### LADO 1

- Mede 411,4 cm<sup>2</sup> de área e 0,5 cm de espessura (42,7 cm x 10 cm x 0,5 cm);
- Possui corte na extremidade inferior para facilitar o deslocamento e travamento da porta.

### LADO 2

- Mede 393,4 cm<sup>2</sup> de área e 0,5 cm de espessura (40,6 cm x 10 cm x 0,5 cm);
- Possui corte na extremidade inferior para facilitar o deslocamento e travamento da porta.

## 4.2.5 Scotch-Yoke

O *scotch-yoke* é um mecanismo que converte o movimento linear de um cursor em movimento rotacional ou vice-versa. O pino é diretamente acoplado a um garfo deslizante com uma fenda que engata um pino na peça rotativa (Figura 4.2). Esses mecanismos são comumente usados em atuadores de válvula de controle em oleodutos e gasodutos de alta pressão, bem como em vários motores de combustão interna, motores a ar quente e motores a vapor. Esse modelo também é usado em máquinas de teste para simular vibrações com movimentos harmônicos simples. No trabalho desenvolvido o conjunto *scotch-yoke* será utilizado no deslocamento das barras da câmara de discriminação, local que o animal será levado a identificar a abertura das barras. O objetivo desse mecanismo é controlar a abertura barras de discriminação.

O conjunto será conectado por um servo motor MG995 no centro da roldana circular. Quando a manivela, que é uma peça mecânica constituída por um braço perpendicular a um eixo, estiver ligada à sua extremidade inicia-se o movimento de rotação, o movimento de rotação recebido será transmitido pelo eixo e o transforma, por intermédio de um tirante, em movimento linear de vaivém quando este estiver girando no sentido horário, o *scotch-yoke* estará recebendo o momento de deslocamento para frente.

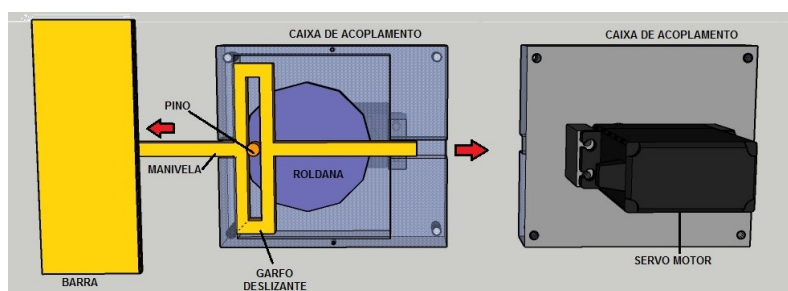


Figura 4.2: Scotch-Yoke.

O deslocamento máximo do garfo depende do comprimento da Manivela. A roldana completa a Revolução no sentido horário ao mesmo tempo em que o *scotch-yoke* desliza completamente movido para frente. Após isso, a roldana girará continuamente para voltar na posição inicial de rotação, então o sistema se move para trás e volta para a posição

inicial. As principais vantagens que levaram a escolha desse mecanismo para a caixa, foram: A necessidade de menos partes móveis, redução do atrito, vibração e desgaste. A utilização de menores dimensões do motor e a saída de alto torque com um tamanho de barras pequenas. As dimensões podem ser vistas na Figura 4.3.

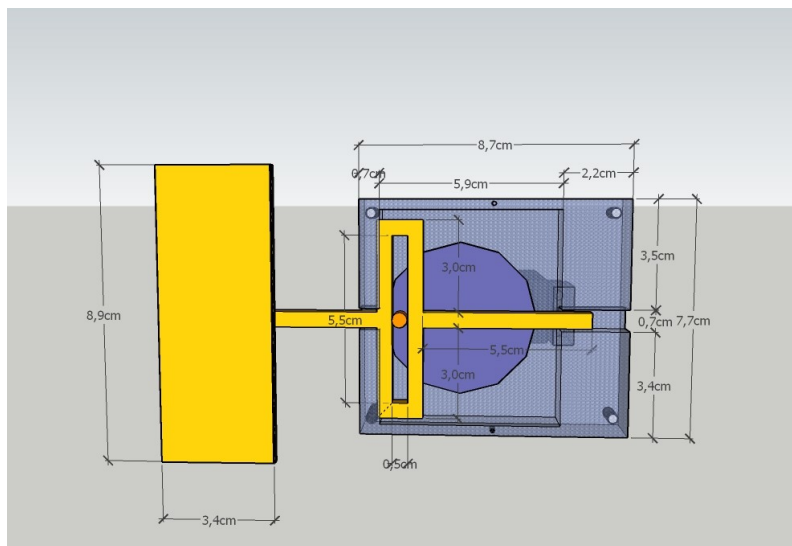


Figura 4.3: Scotch Yoke (dimensões no projeto).

#### 4.2.6 Nose Poke

O *nose poke* (Figura 4.4) consiste em um dispositivo de resposta com detecção de feixe de luz para sinalizar quando o animal posiciona o focinho no orifício. A abertura de onde o animal coloca o nariz tem 2,50 cm de diâmetro por 2,286 cm de profundidade com um orifício de passagem de 1,03 cm de diâmetro.

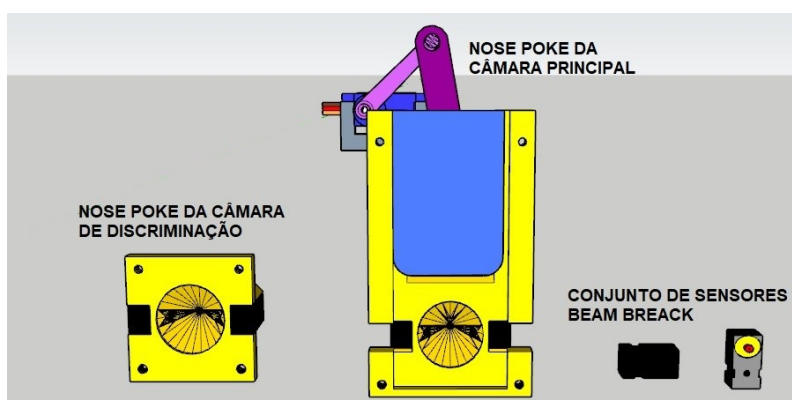


Figura 4.4: Conjunto Nose Poke e Sensores IR.

### 4.2.7 Bomba de Recompensa

A bomba de recompensa é um tipo de dispositivo utilizado para procedimentos que necessitam de controle de volumes precisos de líquidos. A bomba será utilizada para a liberação de recompensa (Figura 4.5), 50 microlitros de água por cada acerto nas tarefas. O mecanismo é composto por duas mini bomba de água RS-385, o qual será responsável por liberar as gotas de água.

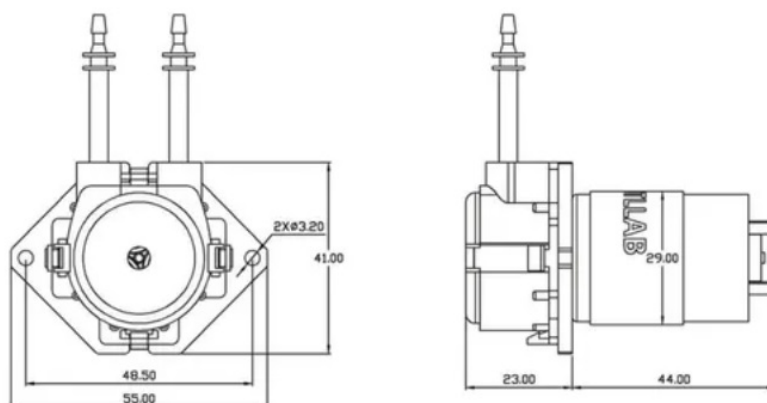


Figura 4.5: Sistema de Bomba de Recompensa

A Mini Bomba de Água 12V RS385 foi criada especialmente para o desenvolvimento de projetos de prototipagem, incluindo automação residencial (domótica) e prototipos robóticos baseados em plataformas microcontroladoras, entre elas, Arduino e *Raspberry Pi*. Possui um motor capaz de impulsionar entre 1500 ml a 2000 ml por minuto, sendo destacada pela sua eficiência e precisão durante sua execução em conjunto com o Arduino, por exemplo.

Ela é aplicada geralmente no desenvolvimento de carrinhos ou robôs bombeiros, robôs hidráulicos, irrigadores automáticos no caso de automação residencial, entre outros. Por ter um tamanho reduzido e baixo peso a o dispositivo pode ser aplicado na grande maioria dos projetos, operando com tensão recomendada entre 9V a 15V, permitindo elevação máxima de até 3 metros e altura de aspiração de até 2 metros. O sistema de recompensa com um motor acoplado a uma seringa não atendeu os requisitos nesse processo, devido a inúmeras falhas de atuação do motor e imprecisão no fornecimento das recompensas.

### 4.2.8 Cremalheira

A cremalheira mostrada na Figura 4.6 é um dispositivo mecânico de formato reto que ajuda na realização de movimentos lineares. O modelo desenvolvido é feito em acrílico, sendo a cremalheira superior com dimensões (18,8 cm x 0,5 cm x 0,5 cm), a parte inferior possui (6 cm x 0,5 cm x 0,5 cm) tem como objetivo auxiliar o movimento da porta deslizante e fixa-las em si. Como mostra (Figura 4.6).

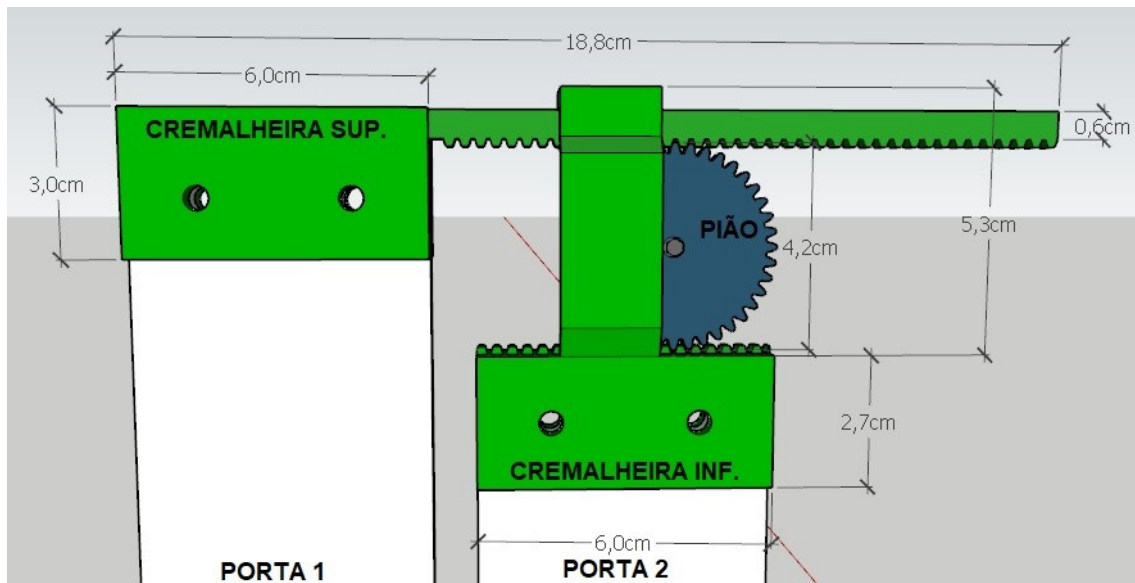


Figura 4.6: Sistema de Pião Cremalheira

#### 4.2.9 Câmeras de Vídeo e Suportes

As câmeras de vídeo (Figura 4.7) são usadas neste trabalho para o registro visual dos experimentos, seja através de vídeo ou de imagens. Para possibilitar a instalação de câmeras de vídeo, foram desenvolvidos suportes para facilitar o acoplamento das câmeras (Figura 4.7), visando melhorar o ajuste, posicionamento e a segurança de captura das imagens ou vídeos, com cobertura de toda a área da caixa. Na câmara principal o suporte possui um grau de liberdade para ajuste angular, enquanto que na câmara de discriminação o suporte é fixo sem necessidade de ajuste angular, já sendo suficiente para cobrir toda a câmara.

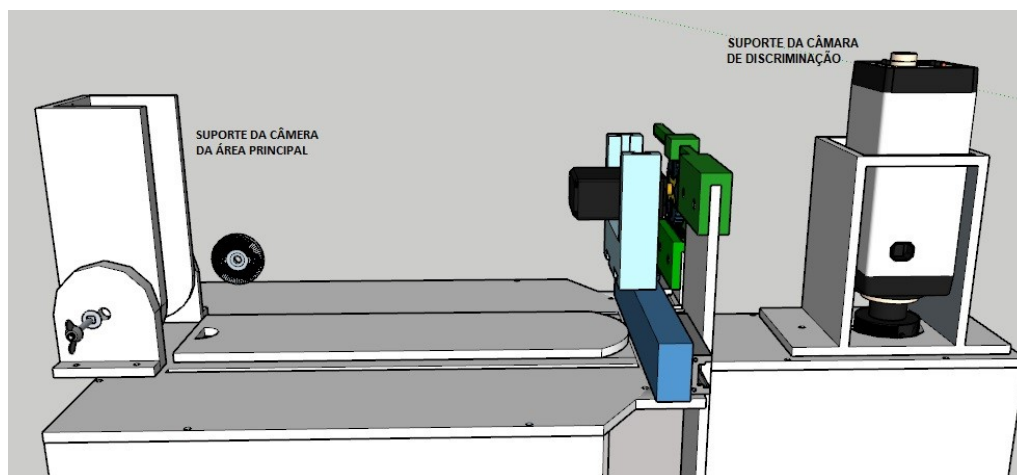


Figura 4.7: Sistema de câmeras projetado

O suporte da câmera de vídeo principal (Figura 4.8) foi desenvolvido para facilitar

o registro das atividades na câmara principal. Foi construído de acrílico, contendo uma caixa de filmagem onde ppde ser colocada a câmera, com dimensões de 10 cm x 6,5 cm x 5 cm. Este suporte possui 8 furos de 6mm para prender a câmera permitindo ajustar o seu posicionamento. Ele possui duas hastes personalizadas para manter a caixa de filmagem estável em um ângulo regulável e um sistema de travamento composto por uma arruela dentada para evitar o escorregamento e variação de posição da câmera, conforme mostrado na Figura 4.8.

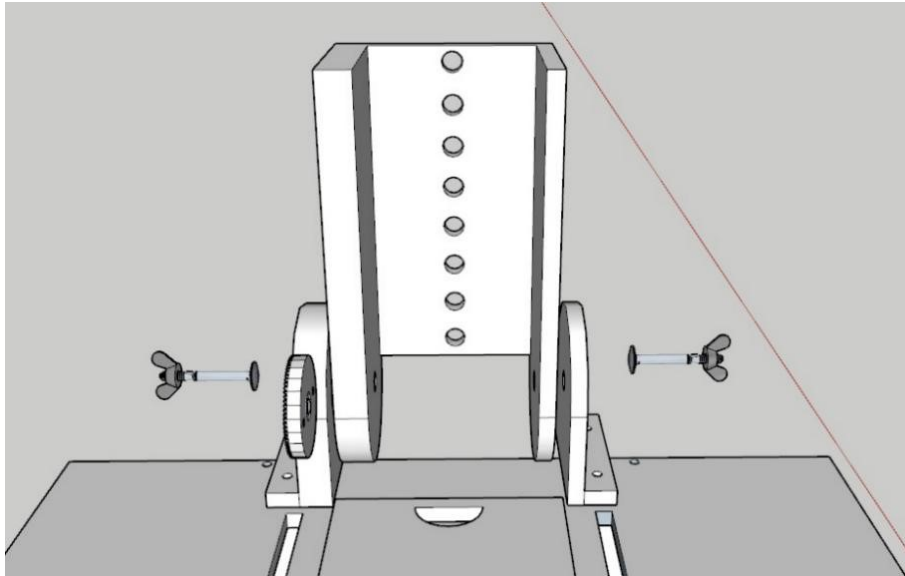


Figura 4.8: Suporte da Câmara Principal

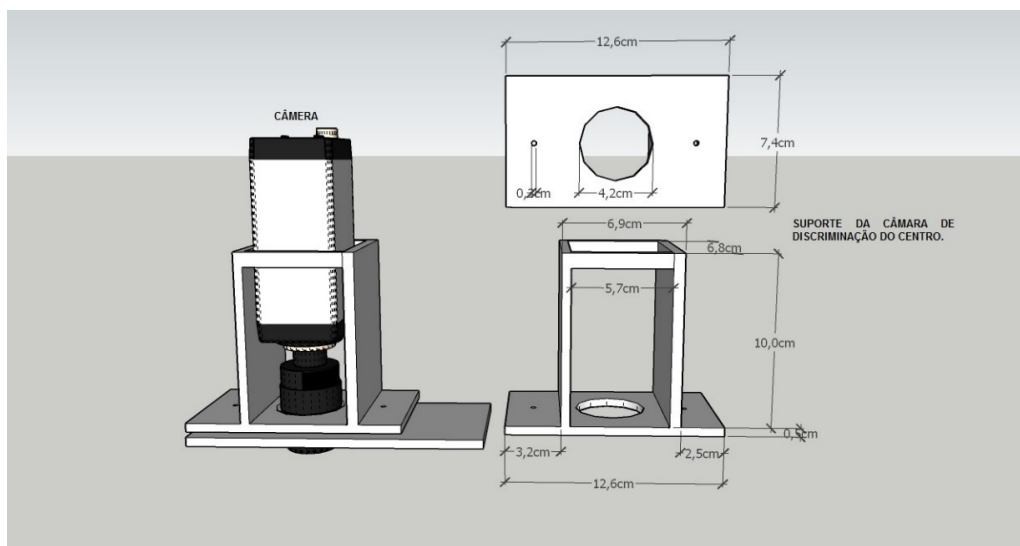


Figura 4.9: Suporte da Câmara de Discriminação

O suporte da câmera de vídeo da câmara de discriminação (Figura 4.9) foi desenvolvido para capturar o momento em que o animal estiver tocando suas vibrissas nas barras

de discriminação. Foi feito de acrílico, com dimensões de 10 cm x 12,6 cm x 6,8 cm. O mesmo possui um furo no centro da peça para permitir captar o momento em que o roedor toca suas vibrissas nas barras. Este suporte funciona como base de sustentação vertical da câmera, e encontra-se acima da tampa da área de discriminação, sendo fixado com parafusos nos orifícios de 3 mm na peça.

#### 4.2.10 Montagem da Caixa

O processo de montagem da caixa foi pensado de modo que seja um procedimento simples, que possa ser executado por um técnico, a partir de um guia de montagem a ser produzido. As etapas deste processo são enumeradas na figura 4.10. Esta maneira simplificada de construção tem sua importância dentro do contexto geral, sempre com o objetivo principal de auxiliar dentro de suas especificações o andamento do desenvolvimento do projeto elaborado. Após ser devidamente mensurado todos os seus itens, passamos para a etapa de construção, em local específico para implementação dos mecanismos aqui projetados. Um primeiro protótipo da caixa foi construído e a ideia foi avançar este protótipo, finalizando-o e validando-o, na presente proposta.

Todo o treinamento comportamental pode ser totalmente automatizado, sendo controlado por computador, não exigindo intervenção de um operador. Para o controle, foi desenvolvido um programa em *Python* que usa a interface de programação da placa microcontrolada arduino e seu ambiente de programação (IDE) arduino, ambos associados. O aparato comportamental foi colocado em uma sala exclusiva para o treinamento, sendo iluminada com luz normal. Como será visto adiante nos experimentos envolvendo um rato mecânico, o mesmo pode também monitorado por meio de câmeras de vídeo sensíveis ao infravermelho (colocadas acima da câmara), eliminando assim qualquer necessidade de obstruir a visão dos roedores.

### 4.3 Lógica de funcionamento da caixa comportamental

Neste trabalho, visamos resolver as dificuldades tecnológicas e desenvolver um equipamento que forneça novas linhas de estudos e possibilite ao roedor o treinamento de discriminação tátil com melhor eficiência e aprendizado. Ou seja, a nova interface da caixa não é apenas uma atualização da caixa utilizada por Krupa (Krupa et al. 2001). O modelo desenvolvido neste trabalho permitirá uma maior flexibilidade e maior diversificação nos treinos, além do modelo de treino clássico realizado por Krupa e demais pesquisadores. Será possível projetar experimentos mais complexos como citados no Capítulo anterior (3). Por exemplo, determinar pequenas variações na abertura das barras e como essa variação se comporta nos disparos cerebrais do roedor. A Figura 4.11 ilustra a lógica de funcionamento da caixa comportamental, utilizando alguns materiais e equipamentos, que serão descritos a seguir, assim como as etapas que serão executadas pelo algoritmo do microcontrolador que controla a caixa. Logo após o código ser carregado (etapa 1), observa-se que todos os módulos nas câmaras são habilitados (tarja verde). Em seguida, serão concatenadas as ativações de cada módulo, fazendo com que o treino proposto seja executado de forma correta.

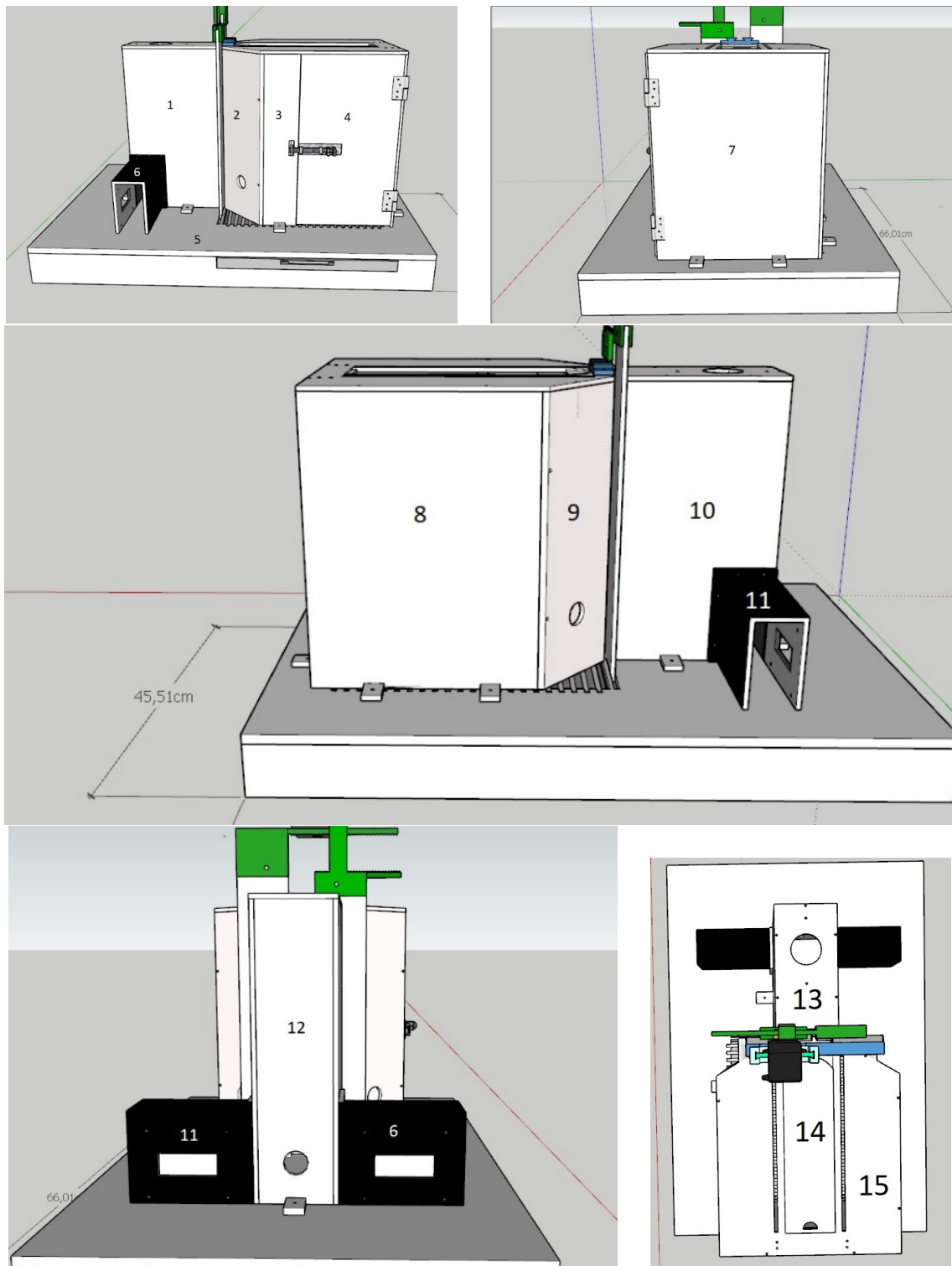


Figura 4.10: Peças da caixa numeradas para montagem

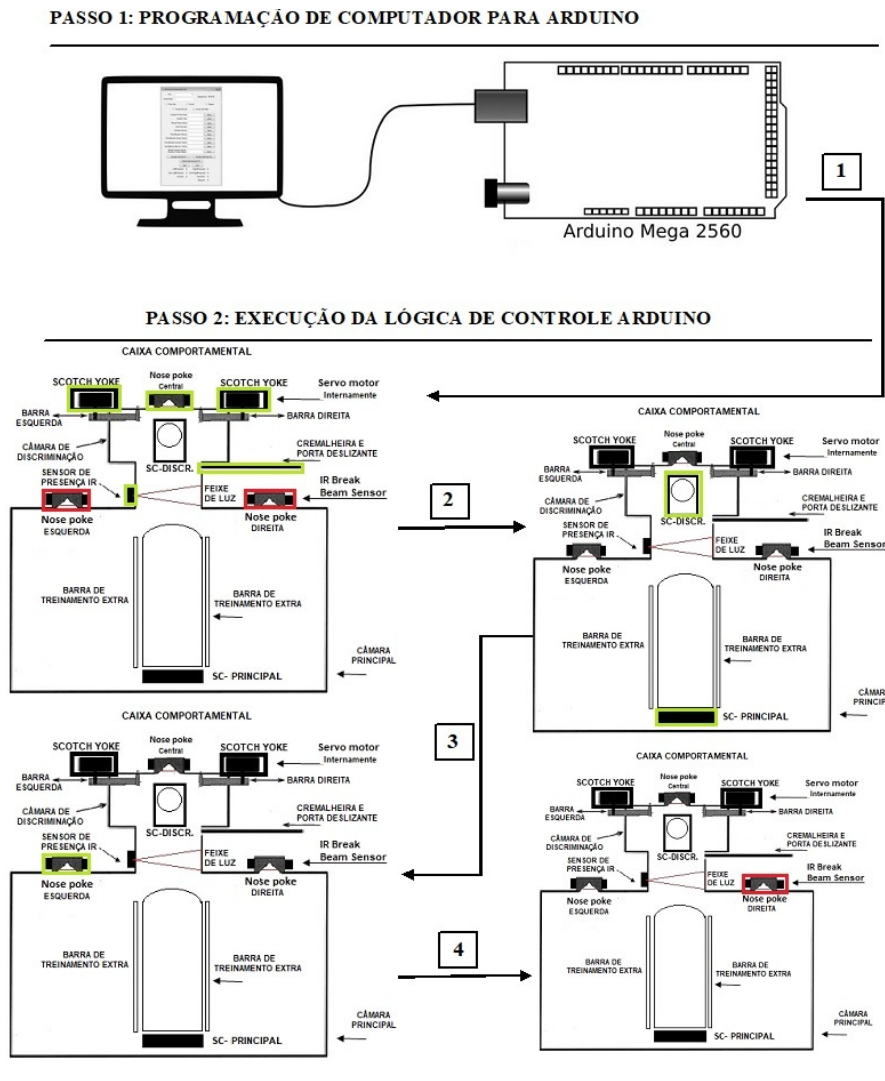


Figura 4.11: Diagrama de Logica funcional.

### 4.3.1 Controle da caixa comportamental

Toda a parte de controle de baixo nível da caixa comportamental é executada pelo microcontrolador arduino, conforme mostrado na Figura 4.11. Este tipo de microcontrolador funciona como um computador de chip único fabricado especificamente para aplicações de controle de sistemas embarcados, podendo ser usado com muita facilidade em aplicações de controle digital devido a seu baixo custo. Podem ser programados usando linguagens consideradas de baixo nível, como C ou C++, de nível intermediário (como *Python*) ou ainda em linguagens de baixíssimo nível (*Assembly*). Linguagens como C, C++ ou *Python* oferecem algumas vantagens, como facilidade de entendimento do código de programação e modularidade, e tem também desvantagens em relação a *Assembly*. Por exemplo, o tamanho do código na memória é normalmente maior que os programas desenvolvidos usando *Assembly*, e, também, em geral são processados mais lentamente.

Neste trabalho, usamos a linguagem C++. Ainda, a maioria dos microcontroladores tem os circuitos internos necessários para aplicações de controle. Por exemplo, um microcontrolador pode ter conversores Analógicos/Digitais para que sinais externos possam ser amostrados e digitalizados. Eles também têm portas de entrada e saída para que dados digitais possam ser lidos ou emitidos pelo microcontrolador (Ibrahim 2006). Alguns dispositivos possuem conversores Digitais/Analógicos e as saídas do conversor podem ser usadas para controlar uma planta através de um atuador, como ilustrado na Figura 4.12.

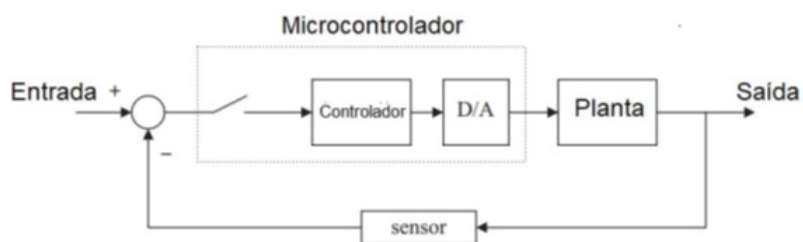


Figura 4.12: Diagrama de Blocos do Microcontrolador.

### 4.3.2 Automatização da Caixa - Eletroeletrônica

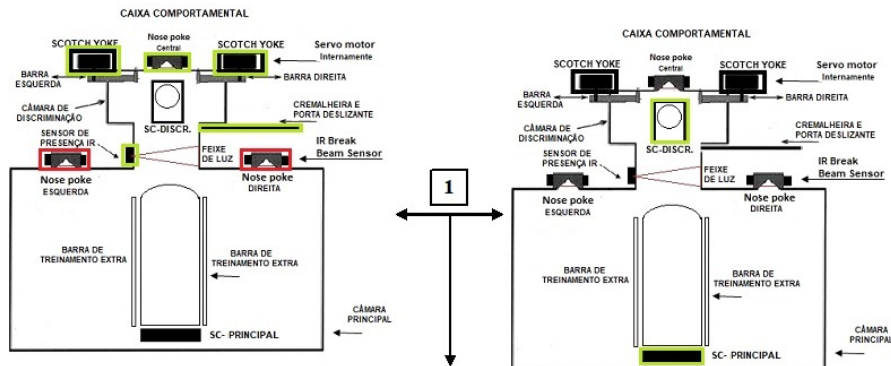
Na etapa descrita no diagrama ilustrado na Figura 4.13, fazemos a programação do arduino para que ele envie o comando para o módulo *scotch-yoke*. Este ordena a abertura das barras, e em seguida o módulo cremalheira efetua o comando de abrir as portas deslizantes. Assim, o *nose poke* central é ativado, concluindo a primeira etapa de preparo para utilização. Após estar pronto para uso, a etapa anterior aguarda comandos do arduino. Este dá o comando para que o módulo *scotch-yoke* execute a abertura das barras, em modo estreito ou largo. Em seguida, o módulo cremalheira abre a porta deslizante, liberando o acesso para a câmara de discriminação, o que é detectado pelo *nose poke* central que é ativado pela passagem de luz no sensor infravermelho.

Na sequência, inicia-se as atividades de recompensa, onde o arduino ativa os respectivos *nose pokes* por um tempo determinado, e, simultaneamente, o módulo cremalheira fecha a porta deslizante. Caso o *nose poke* seja o correto, será detectado a quebra de feixe de luz pelo seu sensor infravermelho e, por conseguinte, a ativação do módulo da bomba de recompensa, no qual um mini-servo libera a barra de acesso para recompensa, para a recepção da mesma pelo roedor. Porém, se o *nose poke* for o errado, o mini-servo não libera a barra de acesso para recompensa, e, como consequência, a recompensa não é liberada. Após todo esse processo o arduino reinicia o processo para a primeira etapa podendo ser recomeçado um novo treino ou tentativa.

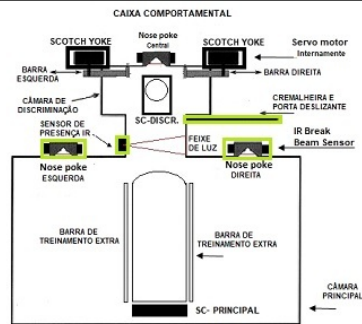
Seguindo essa lógica de funcionamento desenvolvemos um programa em *Python*, que é uma linguagem de nível um pouco mais alto do que C++, portanto, ainda mais fácil de programar. Através dela deixou-se toda a mecatrônica em modo escravo e o software passou a controlar todas as etapas de comando. Isto significa que o circuito eletrônico associado ao *hardware* arduino passam a ser elementos complementares às funcionalidades operacionais do aparelho.

## CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA CAIXA COMPORTAMENTAL

## ETAPA 1. Ativação dos módulos da câmara de discriminação



## ETAPA 2. A ativação dos módulos de entrega de recompensas e acesso às câmaras



## ETAPA 3. Liberação de recompensa

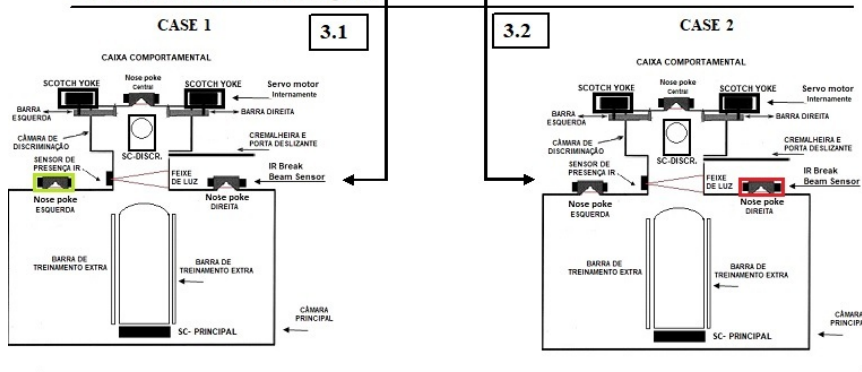


Figura 4.13: . Diagrama de Automação da Caixa.

Embora tenha desenvolvido um aparato comportamental novo e com diversos recursos, não poderia-se continuar com dependência aos meios de registros anteriores. Desta forma, implementamos varias linhas de códigos, no arduino IDE, e a emparelhamos com um *software* em *Python*. Usamos um sistema supervisorio para isso. As telas de supervisorios adicionam o arduino através de uma comunicação via USB, com a função de adicionar ou localizar qualquer *hardware*, conforme mostram as Figuras 4.14 e 4.15.

## 4.4 Software de Controle

O controle manual pode ser considerado como o tipo mais simples de controle. No controle manual o operador aplica a energia a, tais comoo processo através do atuador. O processo usa esta energia e produz uma saída em consequência. Mudando o ajuste do atuador, altera-se a energia no sistema e, portanto, a saída resultante do processo.

Dessa forma todos os atuadores e sensores estão sendo controlados pelo *hardware* Arduino de forma integrada, fechando assim um sistema mecatrônico. A partir disso, deixa-se todo sistema controlado pelo arduino como "escravo"de um *software* de controle "mestre"desenvolvido em *Python*.

### 4.4.1 Software de Controle do Aparelho Comportamental

Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada de *script*, imperativa, orientada a objetos, funcional, de tipagem dinâmica e forte. Ela foi elaborada para que as pessoas desenvolvedoras escrevam instruções com menos linhas de código. O desenvolvimento da linguagem *Python* começou no final da década de 1980 por Guido Van Rossum, enquanto ele trabalhava no *Centrum Wiskunde & Informatica* (CWI) em Amsterdã. Afim de criar uma linguagem de script mais eficiente, capaz de acessar recursos do sistema operacional Amoeba.

Com o objetivo de realizar testes funcionais ou calibrações das funções executadas pela caixa comportamental, o *software* de controle executa um programa contendo as funções de teste ou calibração, como mostra a Figura 4.14, a serem realizadas antes de cada processo de treinamento na caixa comportamental.

Para iniciar esta etapa, devemos acoplar o arduino à porta serial e, em seguida conectar-se ao sistema como mostrado na Figura 4.14. Esta versão do controle possui funções *Open* (abre) e *Close* (fecha) para todas as etapas funcionais da caixa, sendo elas:

1. Na câmara principal: os sensores e atuadores dos nose pokes e a regulação do tempo de liberação de recompensa em milissegundos.
2. Na porta principal que dá acesso de uma câmara à outra.
3. Na câmara de discriminação: a abertura das barras e suas possíveis variações de aberturas (estreito, largo e totalmente aberta).

Os sensores são representados por círculos de cor verde (*on*) e vermelho (*off*). Ao todo, temos quatro sensores para detecção de atividades específicas. Quando estiverem detectando alguma atividade naquele determinado local, se apresentarão na tela em cor verde, caso contrário se apresentarão na tela em cor vermelha, para mostrar inatividade ou não atuação deles.

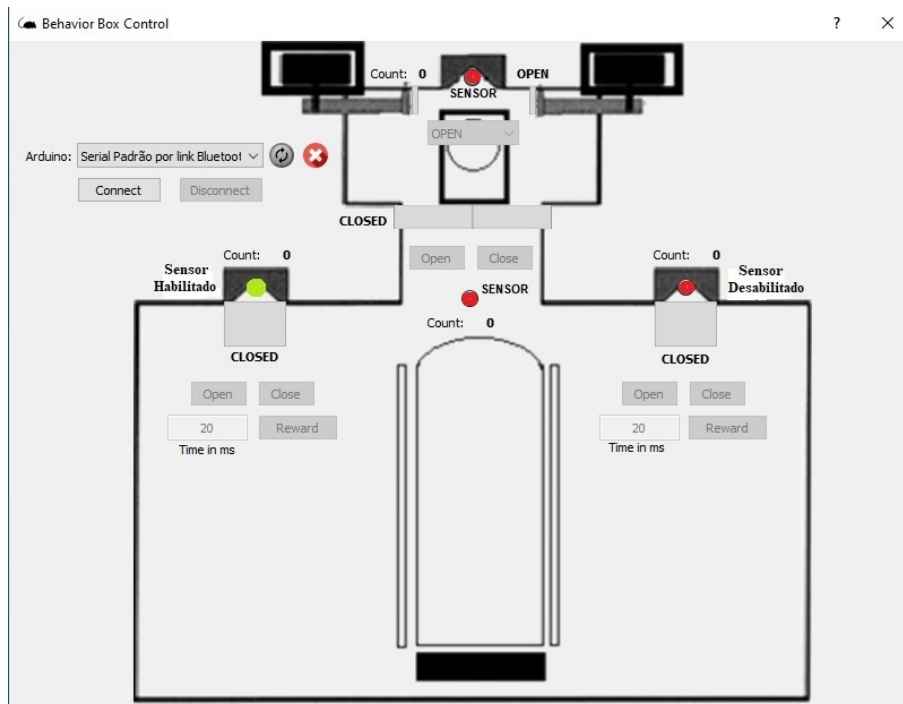


Figura 4.14: Diagrama do software de controle da caixa comportamental.

#### 4.4.2 Software Supervisório da Caixa Comportamental

Os sistemas supervisórios, também conhecidos como SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), são amplamente utilizados pela automação industrial nas funções de supervisão, operação e controle. De forma resumida, um *software* de supervisão apresenta um programa específico deste trabalho, como mostra a Figura 4.15. Este programa contém as funções de monitoramento e controle, em tempo real, de todas as tarefas que estiverem sendo realizadas no interior da caixa comportamental.

A tela do *software* supervisório que desenvolvemos (Figura 4.15 tem, na sua parte superior, o *menu* de funções do *software*, com os principais comandos disponíveis (*File*, *Manage*, *Results* e *Help*). Em resposta à qualquer opção de seleção neste menu principal, o sistema se conecta com o *hardware* de controle (Arduino) e os botões de estado funcional dos sensores, aparecem ativados ou desativados (nas cores verde ou vermelho), dependendo da seleção realizada, como ilustrado na Figura 4.15.

Aparece também um botão para atualizar (*Update*) as imagens ou vídeos das câmeras, o qual possibilita assistir e/ou gravar os treinos, os quais serão exibidos no espaço definido pelo quadrado preto, onde ficam as câmeras de cada área do aparelho comportamental. Um lado irá registrar as ações na câmara principal, onde ficam o fornecimento das recompensas e o outro registrará as ações na câmara de discriminação, onde ficam as barras de discriminação e o *nose poke* central.

Abaixo das telas de registro, temos os botões de seleção dos animais e o tipo de treino que será executado. Em seguida, temos uma caixa de diálogo com apresentação das informações da atividade que será executada, mostrando o tipo de discriminação, a

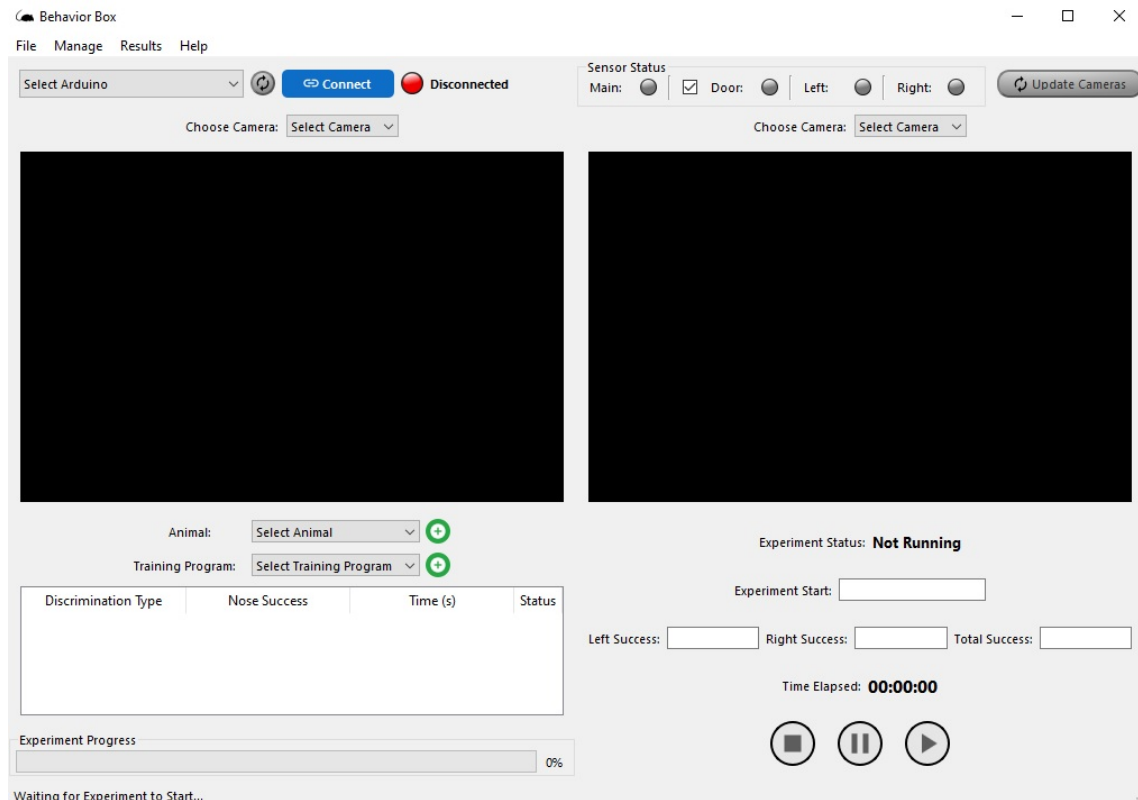


Figura 4.15: Tela do software supervisorio da caixa comportamental.

taxa de sucesso e/ou acerto na execução corrente, o tempo e estado de execução (*status*). Ao lado dessas funcionalidades, temos os botões de execução das tarefas programadas propriamente ditas, sendo: o estado atual do experimento (*Running / Not Running*), o início do experimento, e a contagem de sucesso ou número de execuções corretas em cada lado de recompensa, assim como os acertos totais. E por fim, na parte inferior da tela, temos a barra de progresso dos treinos operados na caixa comportamental, como mostrado na Figura 4.15.

Os sistemas supervisorios geralmente possuem a funcionalidade de serem integrados com bancos de dados e, dessa forma, possibilitar registros históricos de dados gerais do processo. Além disso, possuem ferramentas para a geração de relatórios diversos, sejam eles textuais, gráficos ou mistos. Conforme a arquitetura de implantação do sistema, pode disponibilizar os relatórios na própria estação de operação do processo, em outras máquinas da rede ou até mesmo via *internet*.

Ainda, um sistema supervisorio geralmente se conecta com equipamentos do processo (sejam eles CLPs e/ou outros dispositivos) por drivers de comunicação específicos. Na presente CCO, estamos fazendo esta conexão com o arduino, que permitem comunicação através dos mais diversos protocolos existentes. Essa característica faz com que os supervisorios sejam utilizados largamente como fonte de dados de processo para outras aplicações. Outras telas do sistema supervisorio desenvolvido neste trabalho serão apresentadas no Capítulo 5, adiante.

## 4.5 Estrutura Física da CCO (Materiais e Componentes)

Colocamos aqui os materiais diversos e equipamentos usados na construção da caixa, e propondo uma atualização de outros mais antigos, como citado acima. Nesta Seção, tentamos descrever esses equipamentos e materiais, visando o entendimento da plataforma como um todo. Entre os materiais e equipamentos de acionamento e controle do dispositivo estão os motores, microcontroladores e sensores, cujas características principais são descritas a seguir. Como visto acima, utilizamos o Arduino Uno como microcontrolador. Na categoria motores, no projeto, deverão ser utilizados 3 servo-motores Mg995, 2 Micro servo-motores sg90 e 2 bombas dosadoras peristálticas. Quanto ao único tipo de sensor utilizado, por enquanto, estão 4 pares de sensores infravermelho (*IR Breakbeams*).

### 4.5.1 Microcontrolador Arduino Uno

O Arduino Uno R3 é uma placa baseada no microcontrolador Tmega328 (*datasheet*). Ele tem 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação uma conexão ICSP e um botão de *reset*. Ele contém todos os componentes necessários para suportar o microcontrolador, simplesmente conecte a um computador pela porta USB ou alimentar com uma fonte ou com uma bateria e tudo pronto para começar. A placa Arduino Uno é a melhor placa para aprender e começar a criar seus projetos eletrônicos com programação. Possui a mesma estrutura e componentes, além de ser compatível com todos os produtos da Arduino.

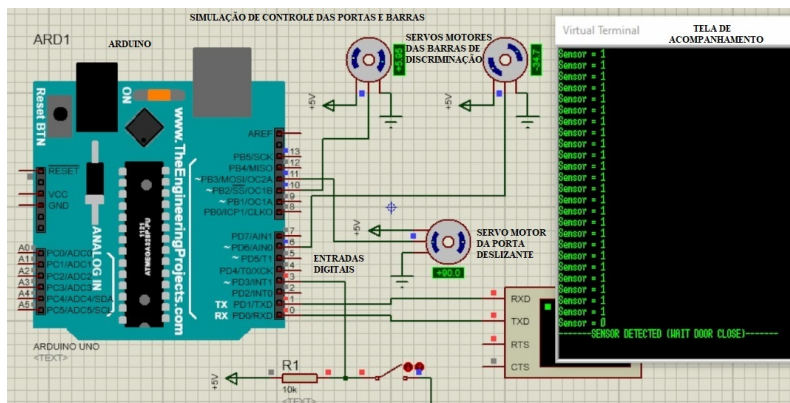


Figura 4.16: Simulação dos atuadores e sensores no Arduino.

### 4.5.2 Atuadores (Motores e Servo-motores)

O micro servo 9g SG90 é utilizado para atuar no módulo do *nose-pokes* devido às suas dimensões se adequarem as peças destinadas e pelo fato de ser um servo de alta qualidade e excelente em projetos de robótica com arduino, PIC, *Raspberry* e entre outros. Este servo se adequa para projetos de: helicópteros RC e aviões de marca como *Hitec*,

*Futaba GWZ, JR* e etc. De certa forma acaba se integrando ao nosso mecanismo para controlar uma barra de acesso ao nose poke. Possui ângulo de rotação de 180 graus e acompanha um cabo de 3 pinos referente a alimentação/controla e diversos acessórios. O Micro Servo 9g SG90 é uma excelente alternativa, tanto pelo seu custo (em torno de 18,00 reais), quanto por sua robustez e pequena dimensão. Possuindo as seguintes especificações: Voltagem de Operação: 3,0 – 7,2V; Ângulo de rotação: 180 graus; Velocidade: 0,12 seg/60Graus (4,8V) sem carga; Torque: 1,2 kg.cm (4,8V) e 1,6 kg.cm (6,0V); Temperatura de Operação: -30C +60C; Tipo de Engrenagem: Nylon; tamanho cabo: 245mm; Dimensões: 32 x 30 x 12mm; Peso: 9g.

A utilização do motor MG995 tem como principais características o alto torque e resistência. É um componente essencial para projetos de robótica, mecatrônica e diversos outros projetos. Na robótica, o servo motor é responsável por movimentar braços, pernas e mãos dos robôs. No automodelismo o servo motor é utilizado para virar as rodas dianteiras dos carrinhos e no aeromodelismo é utilizado para controlar os flaps das asas dos aviões. Neste projeto ele tem a função de comandar a abertura das portas e barras.

As conexões do Servo Motor MG995 são compatíveis com os padrões *Futaba, JR, Hitec, GWS, Cirrus, Blue Bird, Blue Arrow, Corona, Berg, Spektrum* e outros. Possui engrenagens de metal e o mesmo tem um torque de 9,4 Kg/cm em 4,8VDC e de 11 Kg/cm em 6VDC. Além disso, este servo pode girar em até 180°.

A bomba dosadora peristáltica - Intllab é amplamente utilizada no campo da análise experimental, bioquímica, farmacêutica, produtos químicos finos, biotecnologia, farmacêutica, produtos, cerâmica, tratamento de água, proteção ambiental, etc. Neste projeto ela assume a função de fornecer a recompensa aos nose pokes.

### 4.5.3 Sensores de infravermelho

Neste projeto, os sensores infravermelhos (IR) são uma maneira simples de detectar movimento. Aqui utilizamos como mecanismos de monitoramento de acesso a rotinas e compartimentos da caixa comportamental. Estão presentes integrados aos nose pokes de recompensa e o principal. Eles trabalham tendo um lado de emissor que envia um feixe de luz infravermelha humana invisível, então um receptor no meio do caminho que é sensível a essa mesma luz. Quando algo passa entre os dois, e não é transparente para o IR, então o 'feixe está quebrado' e o receptor irá avisá-lo.

Comparado aos sensores PIR, os *breakbeams* são mais rápidos e permitem um melhor controle de onde você deseja detectar o movimento. Em comparação com os módulos do sonar, eles são menos caros, estando no mercado com um valor em torno de 12,00 reais. No entanto, é necessário tanto o emissor quanto o receptor em lados opostos da área que deseja monitorar. Possui as seguintes especificações: Distância de detecção: aproximadamente 25cm / 10 "; Tensão de alimentação: 3.3 - 5.5VDC; Corrente de Emissão: 10mA a 3.3V, 20mA a 5V; Capacidade atual de saída do receptor: dissipador 100mA; Ângulo do LED do Transmissor / Receptor: 10 °; Tempo de Resposta: menor que 2 ms; Dimensões: 20 mm x 10 mm x 8 mm / 0,8 "x 0,4"x 0,3 "; Comprimento do cabo: 234 mm / 9,2 "; Peso (de cada metade): aproximadamente 3g.

#### 4.5.4 Plataforma-base e módulos do dispositivo

Na parte da estrutura física, são utilizados tanto materiais quanto elementos prontos como sensores e atuadores. O acrílico e alumínio são utilizados para a estrutura maciça do dispositivo desenvolvido. Basicamente, fará parte da estrutura final os seguintes componentes: 01 base de acrílico; 15 paredes de acrílico; 02 barras de inserção extra de acrílico; 25 barras cilíndricas de 5mm de alumínio maciço. O acrílico é um polímero utilizado em várias áreas do mercado devido à sua facilidade de adquirir formas, leveza e alta resistência devido apresentar uma superfície brilhante e transparente, fatores essenciais na criação de muitas peças com o material. As espessuras das chapas em acrílico são de 5 mm, o que torna possível que o acrílico seja utilizado inclusive aguentando até mesmo a pressão hidrostática. Quando em baixas espessuras, o acrílico se transforma em peças muito leves, facilitando o transporte das mesmas. Os quais foram ideais para confecção de itens de menor tamanho para o aparelho desenvolvido.

As chapas acrílicas costumam apresentar uma durabilidade mínima de 10 anos, resistindo a qualquer tipo de ação climática. São materiais bastante flexíveis que pode originar diversas formas em tamanhos diferentes. Com isso a construção dos componentes estruturais com esse material foi uma alternativa excelente. Já as barras cilíndricas são estruturas modulares feitas de alumínio destinadas para a base, funcionando com piso da câmara principal. Foram necessárias 25 peças de 5 mm de diâmetro e 25 cm de comprimento, as quais juntas formam uma grelha ou conjunto de barras.

Alguns módulos específicos do dispositivo podem ser encontrados no mercado, já prontos, entre os quais destacamos: 3 *nose pokes*; 2 *scotch-yokes*; 1 conjunto cremalheira; 2 bomba de recompensa (bombas peristálticas); 02 suportes de câmeras. No entanto, visando integrar esses módulos nesta etapa do projeto, torna-se necessário o desenvolvimento de algumas peças personalizadas. Para isso, utilizamos a prototipagem 3D que permite a fabricação de peças mais adequadas ao projeto, aumentando a previsibilidade de erros e garantindo que o se tenha mais rapidez na construção do dispositivo como um todo, uma vez que não é necessário buscar e esperar por alternativas no mercado.

A possibilidade de imprimir peças muito complexas de uma só vez, com a quantidade exata de matéria prima necessária para sua confecção é uma das grandes vantagens para a escolha da impressão 3D na fabricação de peças. Com esta tecnologia, serão acoplados facilmente ao projeto componentes modulares tais como o *nose poke*. As peças internas do *scotch yoke* e conjunto cremalheira foram impreças em acrílico. A escolha pelo desenvolvimento dessas peças em impressão 3D, favoreceu em uma considerável redução de custos, evitando desperdícios. Além disso, a alta precisão no design, permite o encaixe perfeito de peças de substituição e manutenção, economizando tempo com ajustes e correção. Os materiais desenvolvidos, confirmam toda a agilidade e versatilidade desse processo e a excelente relação custo benefício na escolha dessa solução.

## 4.6 Visão integrada da caixa comportamental completa

Após o projeto estrutural de todos os componentes da caixa e o levantamento dos materiais e módulos necessários, foi realizado o planejamento dos treinamentos dos roedores, a serem trabalhados como tarefas, e a automatização propriamente dita da caixa completa. Após esta fase de projeto, realizou-se a adequação dos materiais, que será discutido nesta seção através de uma visão completa do dispositivo. Algumas modificações foram necessárias como o módulo da bomba de seringa que consta nas imagens do projeto no *sketchup*, na Figura 4.17 foram substituídas por bombas peristálticas conforme consta na Figura 4.23. Essa modificação trouxe maior precisão no fornecimento das recompensas e esteticamente enxugou o projeto final.

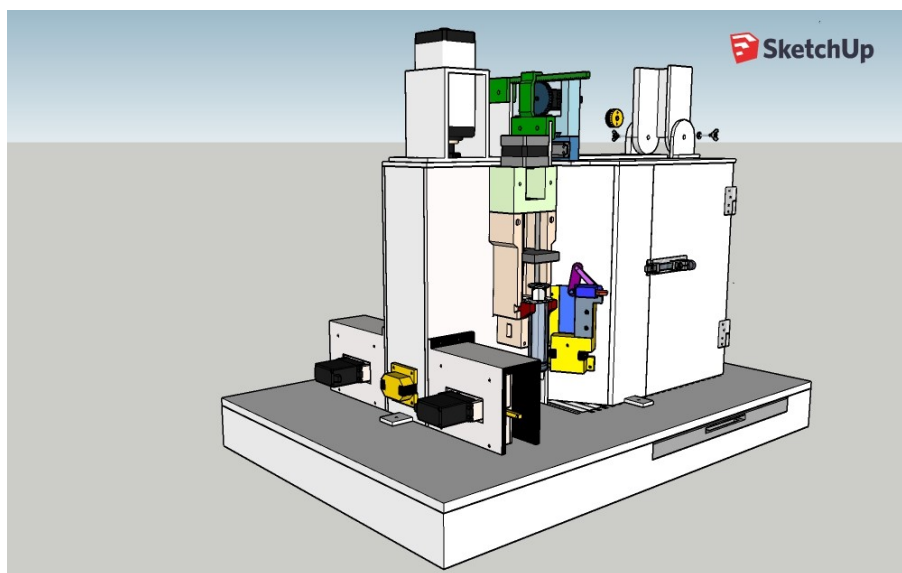


Figura 4.17: Caixa Comportamental Automatizada Completa: Projeto Sketchup.

O dispositivo mostrado na Figura 4.17 funciona totalmente integrado às funcionalidades do arduino, o qual é o cérebro do aparelho. Os mecanismos de movimentação das barras, liberação e entrega de recompensa, abertura de portas deslizantes, funcionam de forma integrada e em conjunto colaboram para que o treino a ser realizado possa ter sucesso. A filmagem dos treinos é obtida de forma simultânea ao processo treinamento de cada animal.

A porta de inserção do animal na caixa é bem maior, facilitando o manuseio de materiais como a caixa que o animal é transportado. Favorecendo o usuário a ter mais liberdade de trabalho. As paredes e espaço interno são fielmente mantidas suas dimensões e ângulos posicionados, a sua base tem um estilo favorável para possíveis limpezas e manutenções estruturais, conforme mostrado na Figura 4.18.

Os *nose pokes* de recompensa, mostrado na Figura 4.4, estão integrados com as bombas peristálticas, os quais foram projetados para atuarem de maneira precisa na liberação da recompensa, conforme Figuras 4.19 e 4.20.

O movimento das barras de discriminação está ligado ao *scotch-yoke* o qual atuará

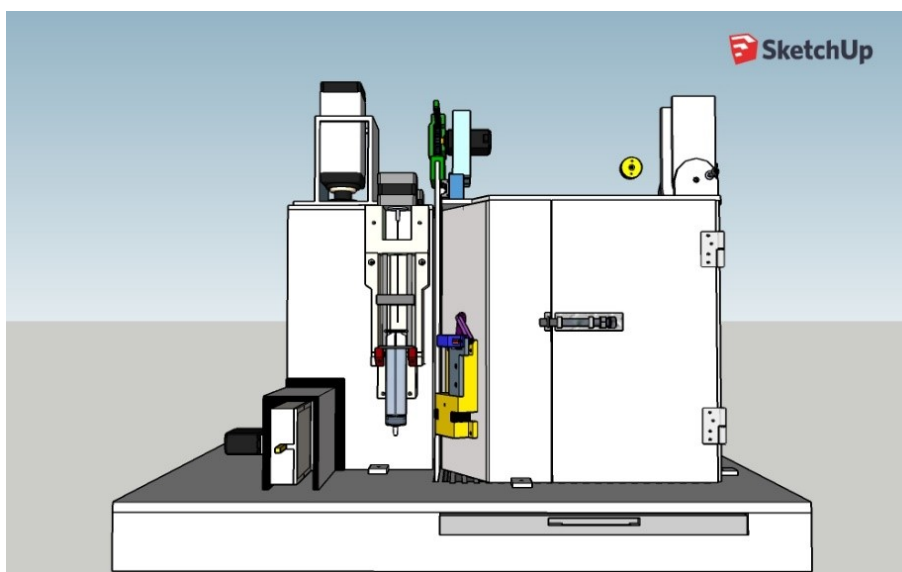


Figura 4.18: Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão lateral.

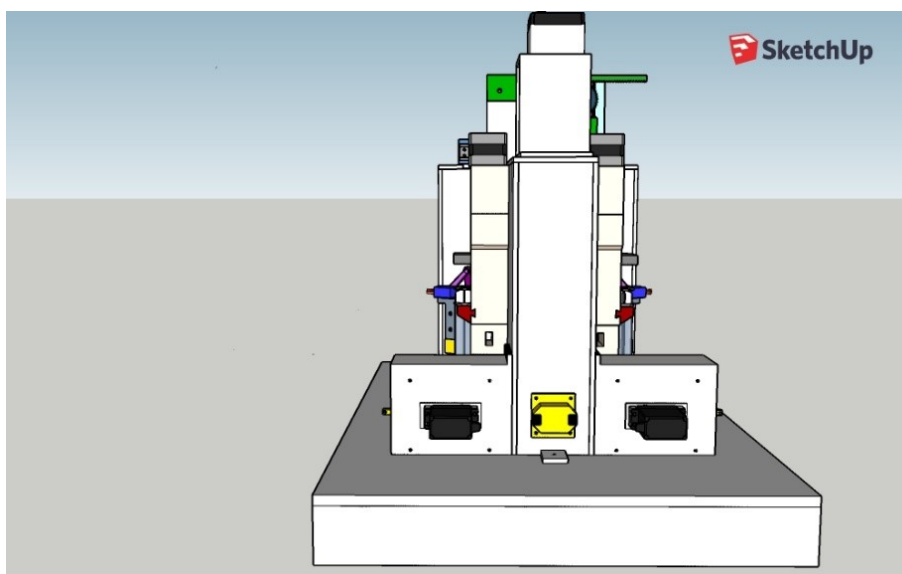


Figura 4.19: Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão frontal.

na determinação do espaço de uma abertura estreita (62 mm; coluna da esquerda) ou larga (68 mm; coluna da direita). A porta deslizante é comandada pelo sistema pino-cremalheira, a qual irá liberar o acesso do roedor da câmara principal para a câmara de discriminação. Além disso, o equipamento em sua parte superior tem dois espaçamentos, conforme Figura 4.20, os quais permitem a inserção de barras inteiriças, as quais proporcionam a realização de treinos diversos ao que ele tem como treino principal (Figura 4.11).

Fechando a parte de construção da CCO, neste ponto do trabalho, as partes estruturais do dispositivo foram construídas em peças de acrílico e usando impressão 3D, conforme

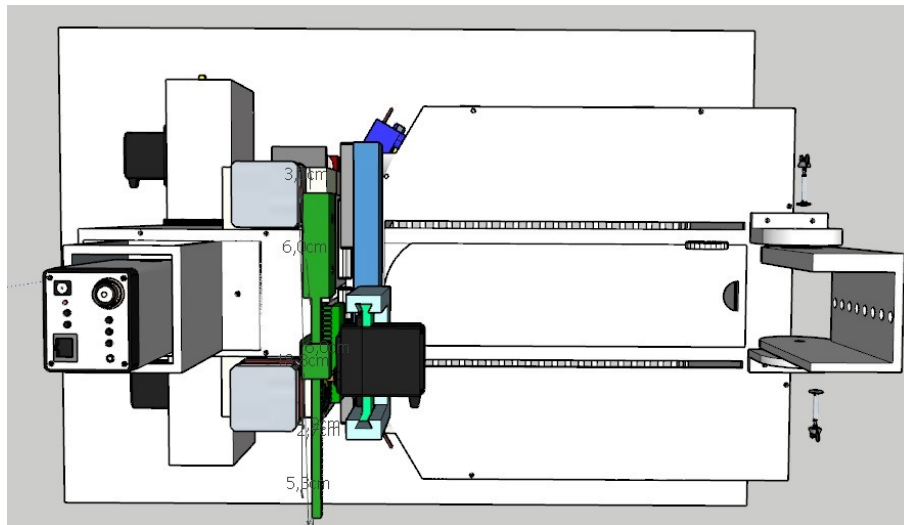


Figura 4.20: Caixa Comportamental Automatizada Completa - visão superior.

pode ser visto nas Figuras 4.21 e 4.22). Foram então fixadas todas as peças modulares já adquiridas na parte estrutural da caixa, assim como a integração dos mecanismos físicos com o computacional e controle, fatando apenas a parte experimental, a seguir no texto, para fazer a validação do aparato comportamental cuja versão final é mostrada nas Figuras 4.23 e 4.24.

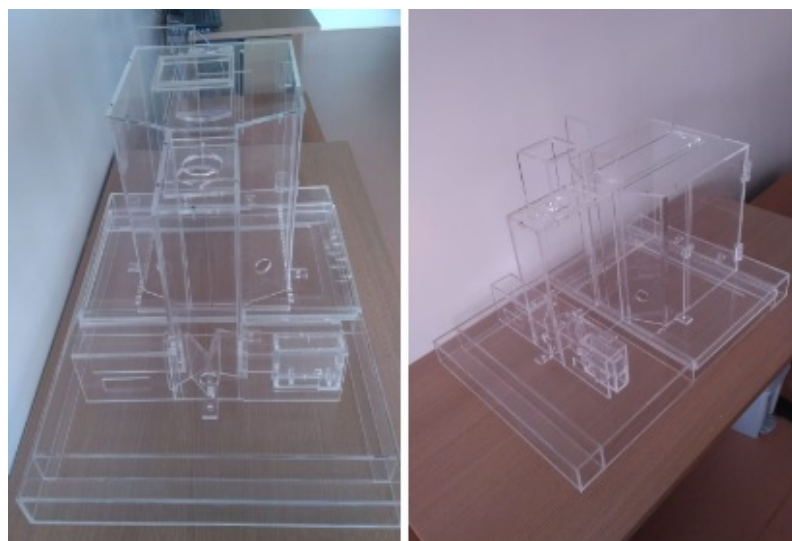


Figura 4.21: Caixa Comportamental Construída - visões frontal e oblíqua.

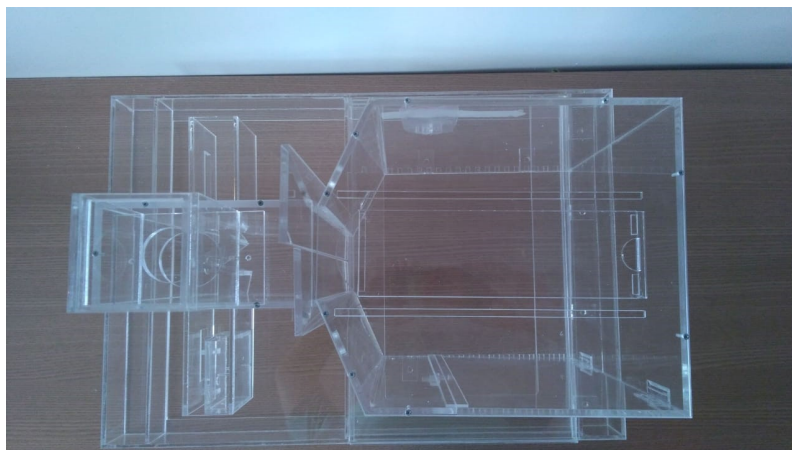


Figura 4.22: Caixa Comportamental Construída - visão superior.

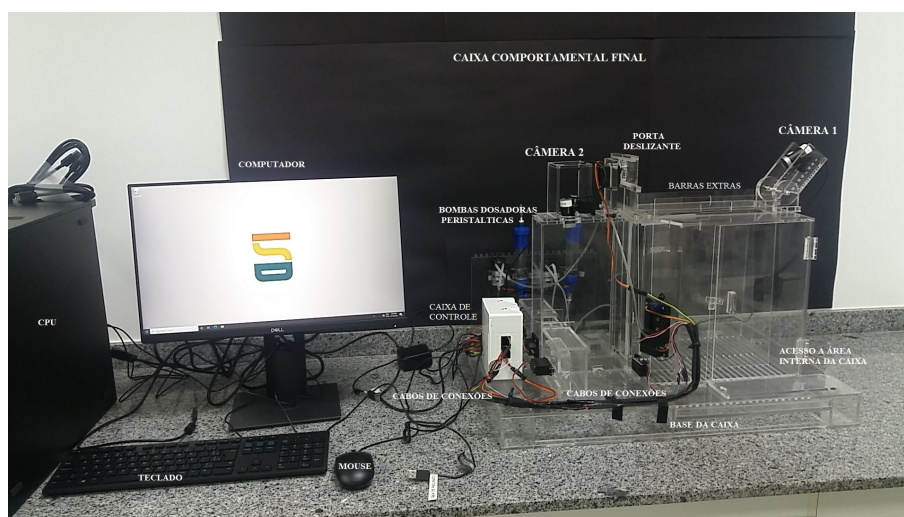


Figura 4.23: Caixa Comportamental Construída - versão final.



Figura 4.24: Caixa Comportamental: Software - versão final.

## 4.7 Engenharia de Requisitos da Caixa Comportamental

Os requisitos das tarefas foram analisados e com base nesses requisitos, os materiais descritos nas tabelas foram pensados e adquiridos. Na tabela 4.1 mostramos os materiais necessários para construção dos mecanismos de controle do aparelho comportamental desenvolvido. Em seguida a tabela 4.2 são mencionados os itens fundamentais para a construção estrutural da CCO. Já na tabela 4.3 mostramos cada dispositivo modular que pode ser fabricado, porém facilmente substituídos caso haja mudança funcional em algum treino específico.

Visto que a Engenharia de Requisitos (ER) também tem a função de diminuir custos de desenvolvimento através de um processo de amadurecimento de ideias à medida que novos requisitos são expostos. Os materiais mencionados nas tabelas abaixo, são utilizados principalmente na conscientização de que os requisitos são mutáveis e através da escolha de um modelo de ciclo de vida adequado. Os requisitos estarão sempre mudando durante o desenvolvimento de um produto, e quão melhor for o processo de escolha de requisitos do projeto, menores serão os problemas encontrados em função de toda a dificuldade que envolve esta importante parte da análise. Neste projeto com os requisitos citados investimos em torno de 7.000,00 reais, tornando-o acessível para desenvolvimento.

Tabela 4.1: Lista de Materiais de Controle.

Material de Controle do Dispositivo			
ITENS DA CAIXA	Quantidade (unid)	KRUPA, D. J, 2001	SILVA, J. W. O, 2023
Servo Motores Mg995	03 (Três)	Não	Sim
Micro Servo Motor sg90	02 (Dois)	Não	Sim
Bombas Peristálticas	02 (Dois)	Sim	Sim
Arduino Uno	01 (Um)	Não	Sim
Fios	Diversos	Sim	Sim
Sensores IR Breakbeams	04 (Quatro)	Sim	Sim
Câmeras de Vídeo	02 (Dois)	Sim	Sim

Tabela 4.2: Lista de Materiais de Estrutura.

Material de Estrutura do Dispositivo			
ITENS DA CAIXA	Quantidade (unid)	KRUPA, D. J, 2001	SILVA, J. W. O, 2023
Base de Acrílico	01 (Um)	Não	Sim
Paredes de Acrílico	15 (Quinze)	Sim	Sim
Barras de Inserção Extra de Acrílico	02 (Dois)	Não	Sim
Barras Cilíndricas de Alumínio maciço(5mm)	25(Vinte e cinco)	Sim	Sim

Tabela 4.3: Lista de Materiais Modulares do Dispositivo.

Material Modular do Dispositivo			
ITENS DA CAIXA	Quantidade (unid)	KRUPA, D. J, 2001	SILVA, J. W. O, 2023
Nose Poke	3 (Três)	Sim	Sim
Scotch Yoke	2 (Dois)	Não	Sim
Conjunto Cremalheira	2 (Dois)	Não	Sim
Suporte de Câmeras	2 (Dois)	Não	Sim
Suporte Bomba peristáltica	1 (Um)	Não	Sim

---

# Capítulo 5

## Experimentos e Resultados

---

A finalidade principal dos nossos experimentos é testar o aparato comportamental, validando conseqüentemente a proposta desta tese. Ou seja, verificar se as modificações resultaram em melhorias no estudo do aprendizado e na análise do sistema somatossensorial, através dos mais diversos tipos de treinamentos possíveis na caixa. Há alguns tipos de treinamentos que atualmente não se consegue realizar, mas que com as mudanças realizadas no projeto serão possíveis de implementação. A seguir destacamos os experimentos realizados usando esse novo modelo.

Ressaltamos que, além de implementar, efetivamente, essas melhorias no processo, e testar, disponibilizamos toda a documentação relativa à nova ferramenta para a comunidade, no site (<https://www.natalnet.br/sibgrapi2022/behavioralbox/>) dos Laboratórios Associados Natalnet.

### 5.1 Setup Experimental para Validação Funcional

A validação funcional deste projeto implica em realizar vários testes práticos usando a caixa comportamental desenvolvida para realização de tarefa de discriminação tátil em pequenos roedores. Entre os vários quesitos ou problemas ainda em aberto, e/ou sem respostas, queremos verificar:

1. O tempo que os bigodes permanecerem em contato com as barras de abertura;
2. Analisar a velocidade com que os roedores são capazes de realizar essas discriminações combinada com sua capacidade de discriminar diferenças muito finas nas larguras de abertura;
3. Detectar a distância granular que a matriz vibrissal consegue fornecer uma informação precisa para o roedor;
4. Em que circunstância os roedores também usam seus bigodes faciais para discriminar entre diferentes texturas de superfície.

Entre os vários resultados possíveis de serem obtidos com este aparato comportamental, queremos também verificar:

1. A eficácia, no tocante aos aspectos mecânicos, eletrônicos e computacionais, está garantida mediante os treinos simulados que foram realizados no aparato desenvol-

- vido. Ou seja, com isso podemos garantir as mesmas condições que os animais poderão aprender o comportamento no treinamento ao qual é submetido;
2. Como o sistema sensorio motor irá se comportar mediante os treinos submetidos no novo aparato desenvolvido, uma vez que é possível controlar com muita precisão a abertura das barras de discriminação, estaríamos associando a captação das vibrissas por imagem com os *spikes* neuronais. Visto que tendo a garantia do aprendizado comportamental, a captação de informações cerebrais do sistema sensorio motor são melhores adquiridas;
  3. Os novos desenhos dos experimentos mais complexos de tomada de decisão do aparelho de estudo comportamental, e o quanto o aparato é uma importante ferramenta para o estudo do sistema sensorial tátil, possibilitando que essa ferramenta possa ser usada para estudos mais profundos na área de discriminação.

De forma prática, a validação funcional do aparato comportamental desenvolvido visa justamente verificar o correto funcionamento da caixa comportamental com os diferentes tipos de treinamento possíveis de serem executados, incluindo o monitoramento das etapas do treinamento pelos sensores. Efetivamente, queremos verificar se as melhorias de processo introduzidas resultaram em uma nova ferramenta para a comunidade, sendo isso, na prática, o que temos que validar. Para isso, vislumbramos dois setups experimentais diferentes. O primeiro deles seria por meio da utilização de animais vivos para realização do treinamento, o que não será realizado no presente trabalho, pois o objetivo aqui é apenas validar o correto funcionamento do dispositivo aprimorado proposto.

A segunda opção, que adotamos aqui, é através de testes contínuos e repetitivos utilizando um modelo de roedor mecânico (de controle remoto), com anotação de dados. Notamos que esta é uma boa escolha porque não precisamos, pelo menos neste momento do desenvolvimento, sacrificar os animais após os testes (o que pode ser obrigatório em tais tipos de experimentos, dependendo do protocolo). Além do que, a opção de usar um roedor robótico não precisa ter seu protocolo ético formalizado, pois não envolve seres vivos. Isso foi fator decisivo em nossa escolha, uma vez que o processo de solicitação ao comitê de ética ficou comprometido com a pandemia. Conseguimos mostrar, ao final, que existem alguns novos tipos de treinamento que não poderiam ser realizados com materiais antigos, mas que podem ser feitos com as modificações e utilizando o novo aparato proposto neste trabalho. Destacamos ao final, nas discussões, todo o conjunto de treinos que podem ser realizados com este novo modelo.

## 5.2 Experimentos e Resultados com Rato Robótico

Neste procedimento experimental utilizou-se um rato eletrônico que tem movimentos para a frente e para trás, podendo também fazer giros. Observamos que o rato mecânico tem uma aparência realista, e possui controle remoto para executar o deslocamento. É fabricado com plástico nas cores cinza, preto ou marrom, com fonte de alimentação: 2x1.5 V usando pilhas AA. Suas dimensões são 22cm x 7.5cm x 6cm, e tem peso aproximado de 100g (Figura 5.1).



Figura 5.1: Rato de controle remoto.

A etapa experimental foi realizada no biotério do Instituto Santos Dumond (ISD) localizado em Macaíba, RN, Brasil, usando o rato-modelo, conforme ilustrado na Figura 5.2. O experimento inicial serviu como teste dos elementos sensoriais de captura de movimentos da caixa, além de testarmos a execução de tarefas de captura de imagens.

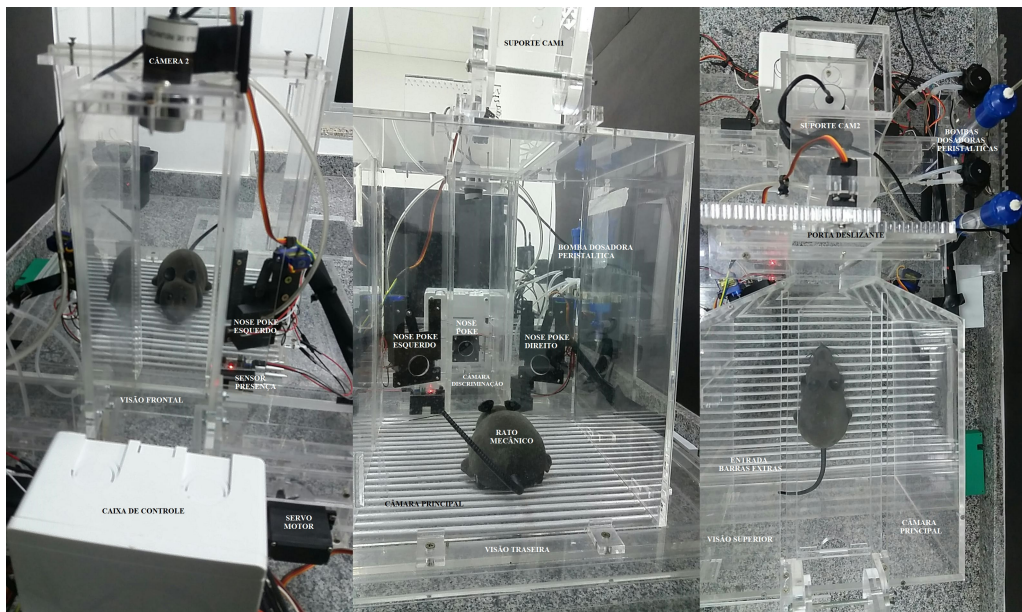


Figura 5.2: Rato de controle remoto na caixa comportamental.

Planejamos e executamos uma tarefa comportamental que exige que o rato discrimine a largura de uma abertura larga ou estreita usando apenas as vibrissas mistaciais maiores. Para isso, os sensores e atuadores devem estar precisamente aptos a captarem qualquer atividade vinda do interior da caixa. O monitoramento da tarefa se dá pelo *software* supervisorio desenvolvido para esse estudo, por intermédio de duas câmeras, localizadas uma na câmara principal e a outra na câmara de discriminação, conforme mostrado na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

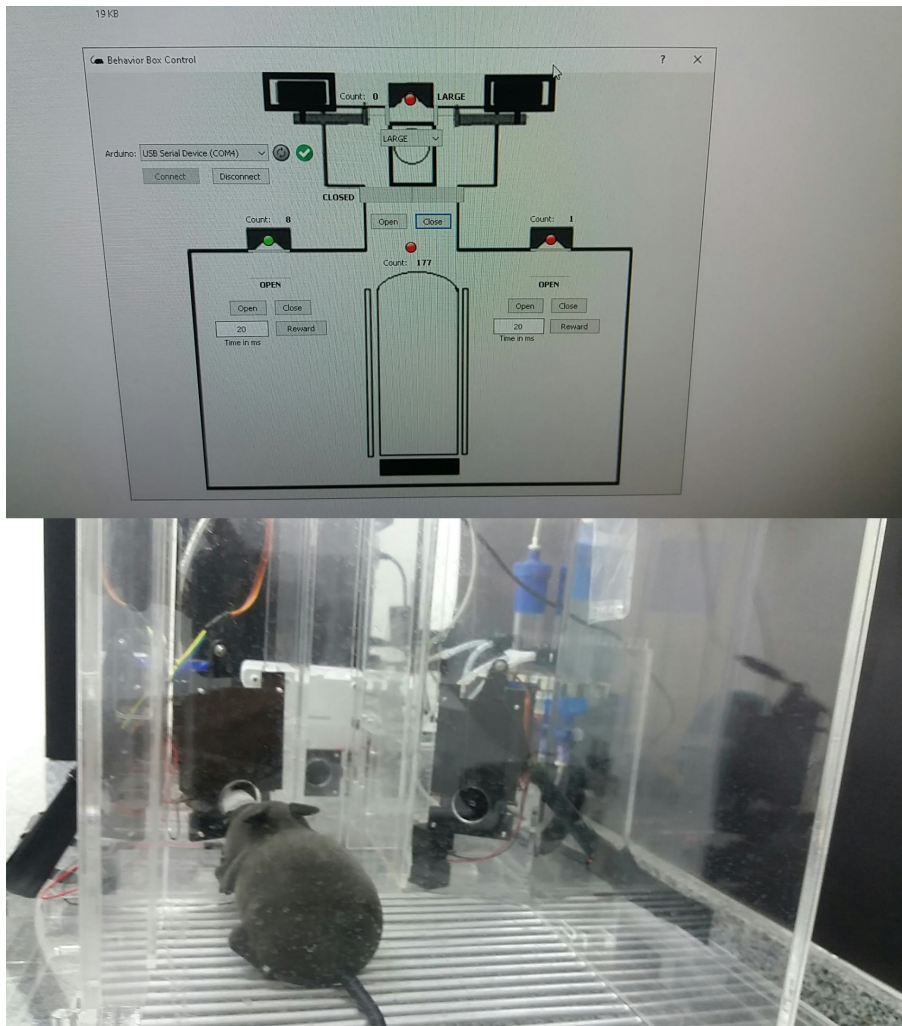


Figura 5.3: Ativação do sensor de recompensa esquerdo, referindo-se à posição larga da barra.

O rato mecânico utilizado em nossos experimentos serviu para essa tarefa, onde pôde ser validada a ferramenta de simulação da discriminação com precisão entre aberturas de largura de barras, ativando os sensores no *nose poke* central com o nariz. Discriminações precisas exigiam um grande número de acertos nos orifícios dos *nose-pokes* de recompensa e discriminação, os quais são importantes para o sucesso da tarefa motora executada.

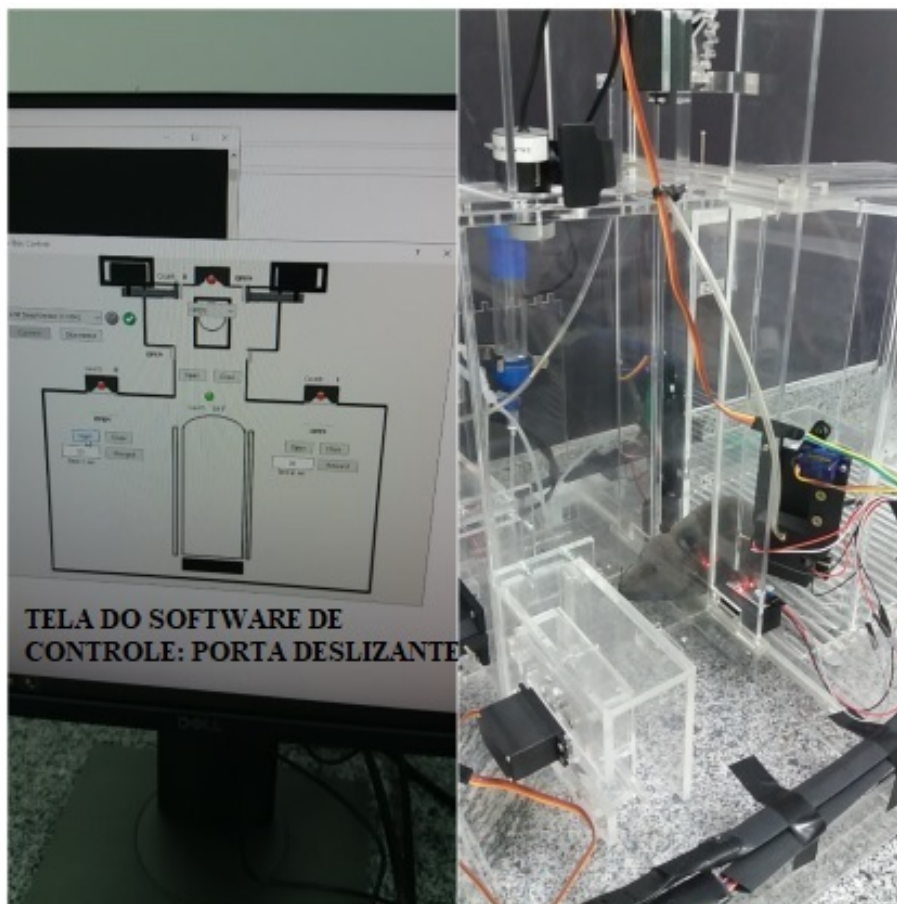


Figura 5.4: Ativação do sensor central, para segurança do rato, evitando o esmagamento.

Então executamos os movimentos dentro da caixa comportamental repetidas vezes, visando obter o maior número de possíveis falhas operacionais durante as tarefas. Realizamos cerca de 300 testes com rato robótico provocando estresse máximo dos componentes e testando a eficácia do modelo desenvolvido. O sistema não apresentou travamentos, nem ocorreram paralisações das atividades de aprendizado.

No treinamento, avaliamos as condições de aprendizagem no ambiente interno oferecido pela caixa, através da verificação por imagem e vídeo. Conseguimos também gravar o treinamento e executar uma pós-análise do desempenho, que poderá ser útil no caso de roedores reais que possam ser submetidos a treinos nesta caixa comportamental. Como os ratos obrigatoriamente devem passar pelos *nose pokes*, logo, estaremos através dessa tarefa-teste confirmando a precisão que a caixa possui, bem como ferramentas para oferecer um bom ambiente de aprendizado. Conforme pode ser verificado nas Figuras 5.5 e 5.6, em todos os testes realizados, os sensores foram acionados e as recompensas liberadas.

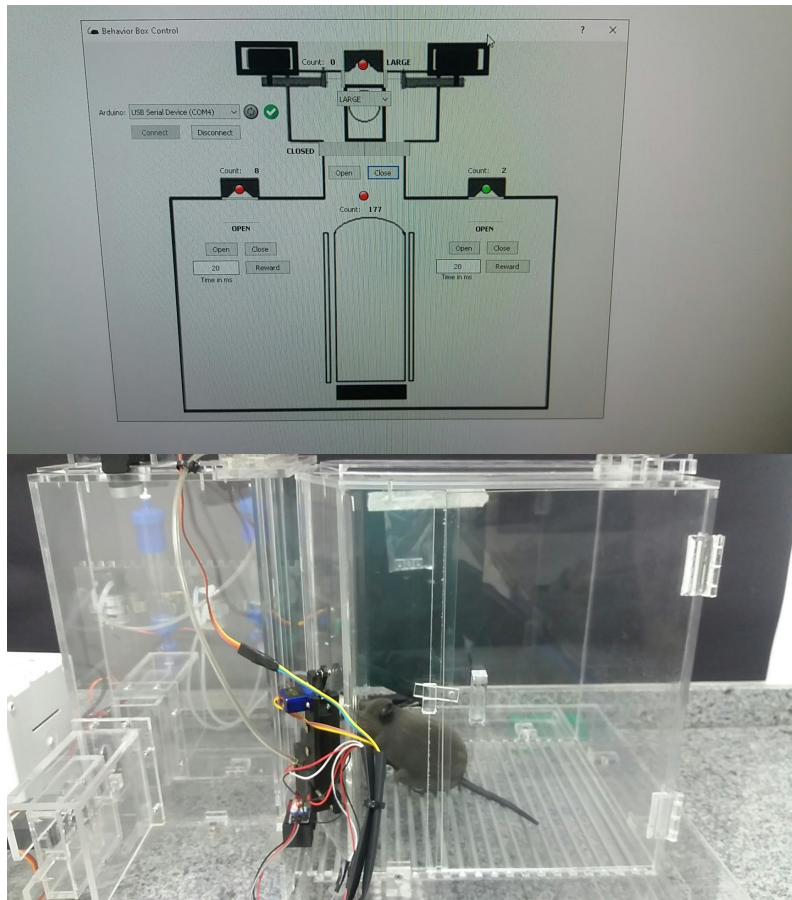


Figura 5.5: Ativação do sensor de recompensa direito, referindo-se à posição estreita da barra.

Nas Figuras 5.5 e 5.6, observamos também a localização do rato mecânico em tempo real, no *software* supervisor. Através dessa ferramenta, podemos determinar a localização em tempo real e qual a etapa do treinamento que está sendo realizada. Este aparato possibilita ao usuário que está assistindo o treinamento uma visão geral da evolução do animal durante o uso, proporcionando a certeza de que durante a execução dos treinamentos o animal estará sendo observado, podendo-se monitorar todas as etapas que o animal estará ativo ou dormindo.

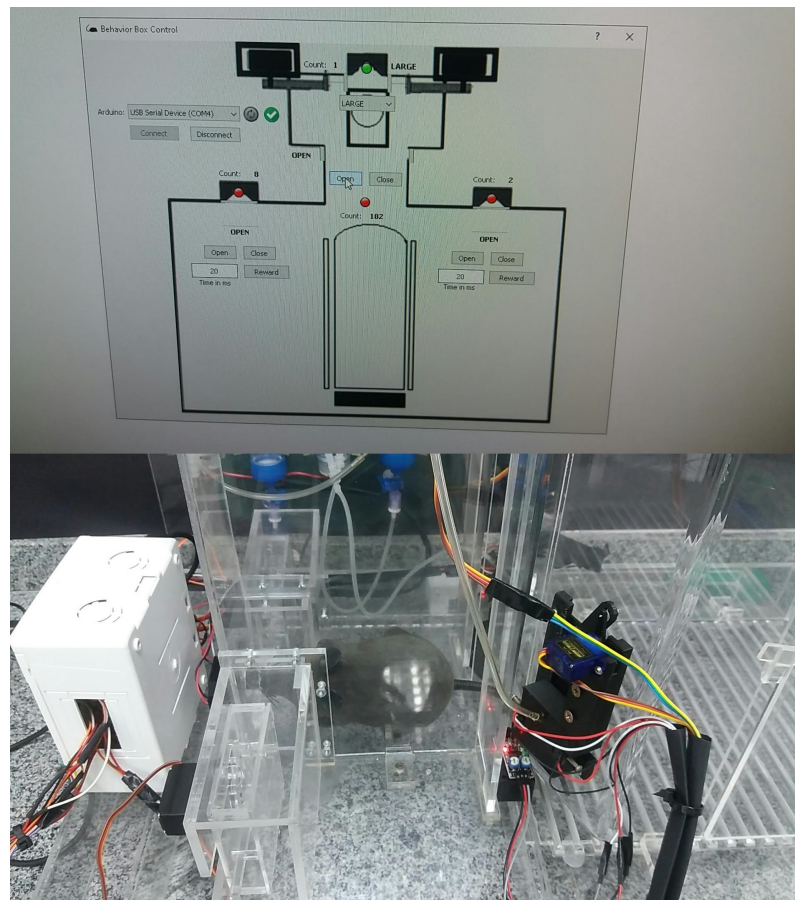


Figura 5.6: Rato de controle ativando o sensor do nose-poke central, referente à etapa de discriminação, com as vibrissas do rato tocando as barras.

### 5.3 Testando as Funções do Supervisório

Mostramos a seguir testes realizados para ilustrar o funcionamento básico do software supervisor da caixa comportamental, validando o funcionamento do mesmo de forma correta. O usuário pode iniciar qualquer funcionalidade do software pressionando os botões na parte superior da tela do menu (na Figura 4.15, acima), ativando as principais opções (*File, Manage, Results e Help*). Ao selecionar a opção *Manage*, por exemplo, temos as opções *Animal e Training Program*.

A Figura 5.7 ilustra o procedimento de registro de um novo roedor, acionado pela opção *Animal*, onde podem ser registradas informações sobre o animal em questão, tais como o nome e peso entre outros dados do registro. A Figura 5.8 ilustra a realização de um treinamento, acionado pela seleção do ícone *Training Program*, também a partir da opção de gerenciamento (*Manage*). No caso, esta tela permite adicionar os tipos de atividades que serão executadas e o tempo para cada uma das etapas.

A Figura 5.9 as informações resultantes de um treinamento realizado para um determinado animal cadastrado, funcionalidade esta que pode ser acionada pelo usuário através do botão *Results*.

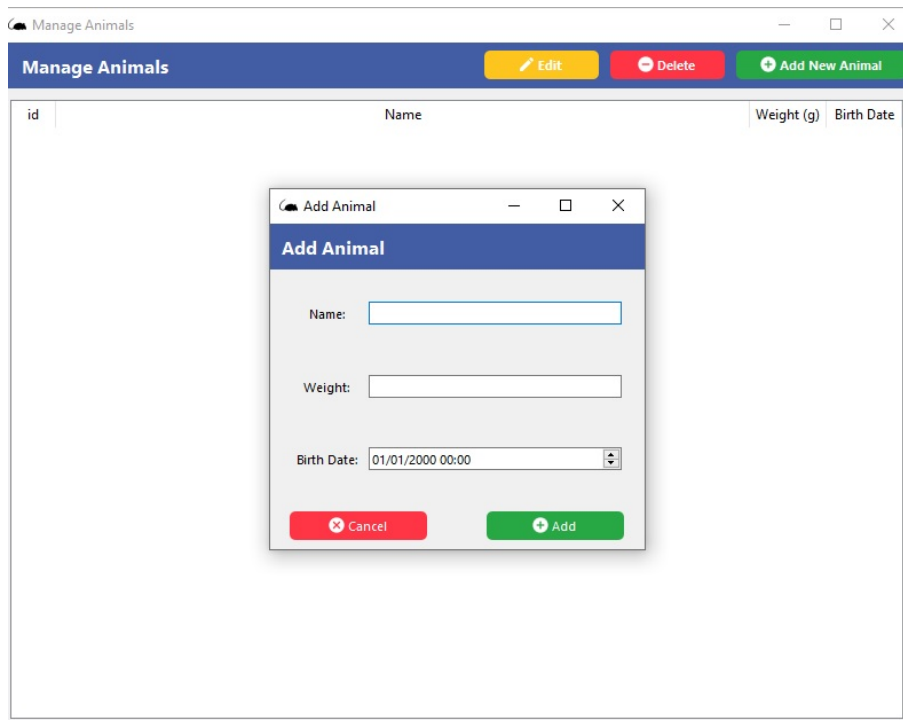


Figura 5.7: Tela de função "Animal" do software supervisor da caixa comportamental.

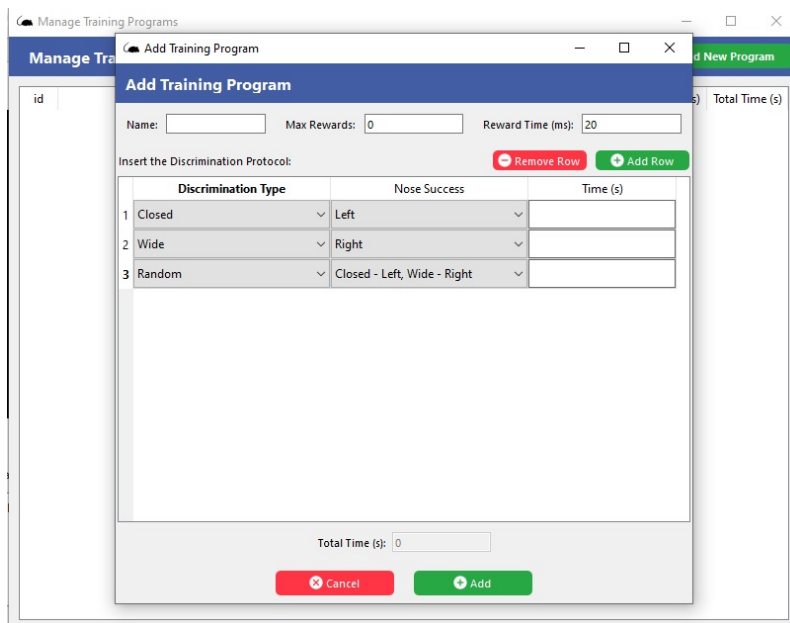


Figura 5.8: Tela de função "Training Program" do software supervisor da caixa comportamental.

Essas são algumas das principais características funcionais do software desenvolvido para atender as tarefas executadas no ambiente interno da caixa.

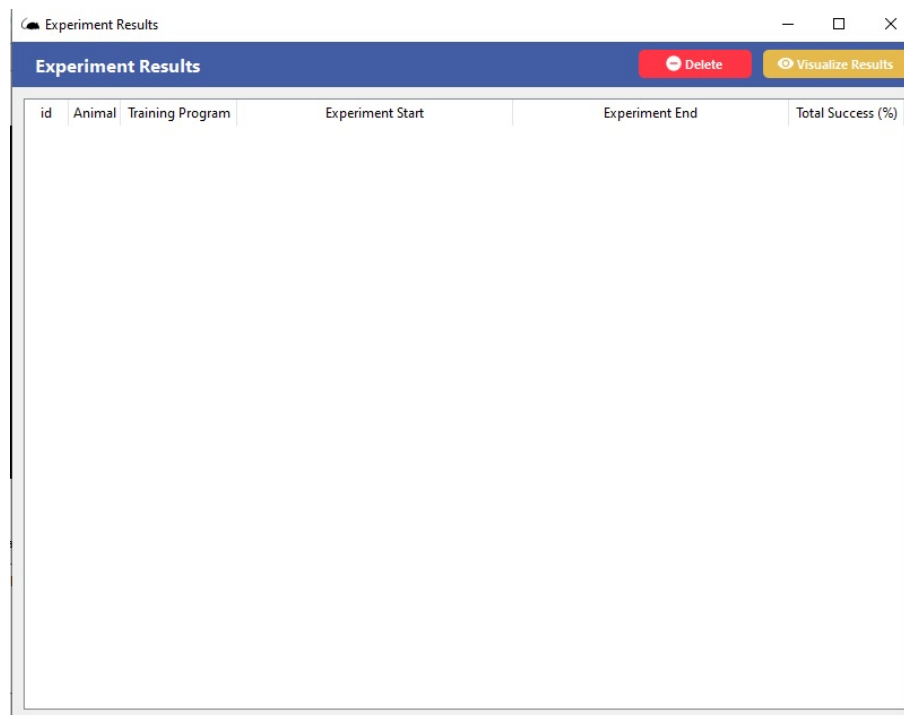


Figura 5.9: Tela de função "Results" do software supervisor da caixa comportamental.

## 5.4 Discussão dos Resultados

Como visto, o resultado principal desta tese é a caixa comportamental desenvolvida até então, que possui diversos diferenciais tecnológicos e funcionais. Tecnicamente, podemos destacar o fato de ser um aparelho modular, ou seja, qualquer mudança de peças ou compartimentos podem ser realizados sem comprometer as demais estruturas. Funcionalmente, o aparato comportamental possui duas entradas para inserir barras extras para treinos forçados. Com essa inserção de barreira, pode-se desenvolver um novo protocolo comportamental. O modelo criado possibilita o treinamento de discriminação descrito nos itens funcionais da caixa, sendo que o principal é o treinamento em si, além de possibilitar treinos forçados com discriminação de barras e recebimento de recompensas forçados (esquerdo ou direito).

Além disso, acreditamos que a presente proposta possa vir a atender a necessidade que outros grupos de pesquisa apresentam e optem a adotar esse modelo experimental aberto, pois atualmente pouquíssimos grupos utilizam equipamento similar devido a dificuldade de instrumentação. Visto que alguns grupos de pesquisa optam por modelos animais mais simples, por exemplo um T-maze, pelo simples fato de não conseguirem implementar uma caixa complexa como a qual este trabalho contempla, mesmo que com isso terão que fazer perguntas científicas mais simples. A nossa caixa permite realizar um treinamento forçado diretivo, sem a necessidade de recebimento de recompensa, apenas com discriminação das barras.

Neste contexto, é possível responder perguntas do tipo: como o córtex somatossensorial primário poderia influenciar as tomadas de decisões de maneira mais específica com aberturas das barras de forma randomizada? Ou, talvez, estruturas do córtex pré-frontal (PFC) sejam melhores preditoras do comportamento durante uma tarefa onde o animal ativamente explora o ambiente com treinamento forçado? Roedores têm sido muito utilizados como sujeitos em estudos de tomada de decisões perceptuais para diversas modalidades sensoriais. No entanto, é sabido que a modalidade de estímulos táteis nestes animais possui uma particular importância (Shuler et al. 2002).

Isso porque o sistema somatossensorial destes animais apresenta uma alta especialização das regiões cerebrais que se dedicam a representar as informações sensoriais táteis capturadas. Tal especialização torna ratos e camundongos animais modelos para o estudo do sistema tátil, além de oportunizar o estudo de processos cognitivos como a tomada de decisões.

Assim, todo o foco de pesquisa possível a partir deste trabalho está nas vibrissas do roedor. Não obstante as contribuições tecnológicas da construção da caixa até então realizada, conjecturamos que as vibrissas sejam um dos principais elementos usados para analisarmos o sistema somatossensorial dos roedores. Além disso, o tipo de caixa desenvolvido é, até o momento, o modelo mais completo que possibilita treinamentos para analisar essa área e pretendemos validá-la aperfeiçoando as metodologias de aprendizado existentes.

### 5.4.1 Uso de Redores Reais nos Experimentos

Convém observar que ocorreram outros problemas que foram enfrentados neste trabalho, como por exemplo, a paralização de atividades devido à pandemia do Covid-19. O trabalho foi interrompido no início da pandemia, mas foi retomado gradativamente, de acordo com os protocolos de segurança. A ideia inicial é que a validação seria feita através da aplicação de treinamentos com roedores reais, conforme especificado inicialmente, com uma quantidade planejada de 10 roedores da linhagem *Wistar*. Utilizamos o *software G\*power V3.1.9.7* para o cálculo deste número, considerando uma margem de erro  $\alpha = 0.05$  e um desvio padrão  $\beta = 0.95$ , para uma diferença correspondente ao tamanho de efeito (ou *effect size*)  $dz = 1.2$ , também chamado de *z score* ou grau de confiança. Com isto, foi obtido o número de animais  $n = 10$ , com um grau de confiança de 80%, analisando os dados pelo teste de *Wilcoxon*. O número de animais solicitado para este projeto foi escolhido com significância estatística e visam minimizar o sofrimento animal e realizar a validação do projeto piloto em questão.

Ou seja, o projeto inicial era realizar a validação da caixa comportamental através do treinamento/atividades executadas no equipamento com roedores reais da espécie *Rattus norvegicus*, originária da Ásia, e atualmente naturalizada em quase todas as regiões povoadas do planeta. Esta é a espécie mais comum e conhecida entre todas. A UFRN e ISD possuem normas com relação à ética em pesquisa envolvendo pesquisa com seres vivos, que devem ser respeitadas. Assim, nos certificamos de todos os documentos necessários para solicitar junto ao órgão responsável na UFRN que é a Comissão de Ética no Uso de Animais ([ceua.propesq.ufrn.br](http://ceua.propesq.ufrn.br)) e no ISD ([ceua@isd.org.br](mailto:ceua@isd.org.br)),

e abrimos o processo de solicitação de todas as declarações necessárias para a continuidade dos trabalhos experimentais com roedores. Porém, devido às restrições impostas pela pandemia do Covid-19 (*SARS-Cov2*), não foi possível finalizar o pedido. Para contornar este problema, optamos por realizar experimentos com um rato mecânico, que possui aproximadamente as mesmas características (no tocante ao peso, dimensões e aparência) do roedor acima citado, e cujo movimento pode ser controlado através de um controle remoto. Esses experimentos para validar nossa proposta foram realizados e contornamos isso e, reportados acima no início deste Capítulo 5. Ou seja, não obstante, ao final dos experimentos, os resultados obtidos com o rato robótico proporcionaram confirmar que o aparelho é confiável e permitiu verificar a funcionalidades desejadas, com os treinos sendo realizados de forma totalmente autônoma.

## 5.5 Comparativo das Caixas Comportamentais

A análise de um comportamento consiste em identificar eventos, definir quais destes eventos se caracterizam como estímulos e estabelecer em quais condições as respostas (ações) dos organismos ocorrem. Estas condições podem ser simples ou complexas (Todorov 2014).

Ao analisarmos como estímulos simples geram respostas simples ou “automáticas”, estamos analisando um comportamento respondente ou reflexo, mas ao avaliarmos como um organismo interage com seu ambiente “operando” modificações, estamos analisando o comportamento operante. Para isso ocorrer necessitamos da caixa comportamental, que em sua função de contingência, permite avaliar a relação de dependência entre eventos ambientais e comportamentais.

Na tabela 5.1 mostramos os principais dispositivos que integram o funcionamento das caixas comportamentais que colaboram para que cada evento se realize, o comportamento operante é a aprendizagem de um novo comportamento através das consequências no ambiente composto pelos elementos citados. No comportamento operante, as contingências são utilizadas para descrever as condições sob as quais os reforços e as punições são estabelecidos para induzir a ocorrência de um novo comportamento (Todorov 2014).

Dentro deste contexto desenvolveu-se um aparato comportamental reformulado, suprimindo necessidades que antes os laboratórios desbravavam, sendo que agora de acordo com a tabela 5.1 demonstramos as soluções adquiridas na caixa desenvolvida.

Tabela 5.1: Comparativo das Caixas Comportamentais.

VERSÕES DAS CAIXAS COMPORTAMENTAIS DESENVOLVIDAS			
ITENS/FUNÇÕES DA CAIXA	KRUPA, D. J, 2001	SILVA, J. W. O, 2019	SILVA, J. W. O, 2023
CONTROLE UNILATERAL DAS BARRAS	Não	Sim	Sim
COMPONENTES PNEUMÁTICOS	Sim	Não	Não
BASE EM ACRILICO	Não	Sim	Sim
SUORTE DE CÂMERAS DE VÍDEO	Não	Sim	Sim
SISTEMA MODULAR	Não	Sim	Sim
PORTAS DESLIZANTES	Sim	Sim	Sim
SENSORES	Sim	Sim	Sim
SENSOR PORTA PRINCIPAL	Não	Sim	Sim
SCOTCH YOKE NAS BARRAS	Não	Sim	Sim
ENTRADA PARA TREINO FORÇADO	Não	Sim	Sim
NOSE POKE CENTRAL	Sim	Sim	Sim
NOSE POKE RECOMPENSA	Sim	Sim	Sim
PORTABILIDADE (PORTÁTIL)	Não	Sim	Sim
CONTROLE ARDUINO	Não	Sim	Sim
DEPENDÊNCIA DE PC	Sim	Não	Não
PAREDES DE ACRILICO	Sim	Sim	Sim
FÁCIL SUBSTITUIÇÃO DE PEÇAS	Não	Sim	Sim
BOMBA PERISTÁLTICA	Não	Não	Sim
BARRAS EXTRAS	Não	Sim	Sim
SOFTWARE DE CONTROLE PRÓPRIO	Não	Não	Sim
SOFTWARE SUPERVISÓRIO PRÓPRIO	Não	Não	Sim

Na caixa utilizada por (Krupa et al. 2001) descreveram uma tarefa de discriminação tátil onde o objetivo dos animais era diferenciar a distância entre duas barras paralelas e escolher um lado (direito ou esquerdo) para receber uma recompensa de água. Os autores da caixa desenvolvida por (Oliveira Silva et al. 2023) revelaram que ratos podem realizar essa mesma tarefa e aprender a associar o lado correto da recompensa (com base no estímulo apresentado) integrando diversas tentativas executadas no aparelho desenvolvido. De acordo com os estudos de (Krupa et al. 2001), mostraram que os animais são capazes de discriminar aberturas com até 3,5 milímetros de diferença, possuindo itens que de acordo com a tabela 5.1. Já o levantamento feito por (Oliveira Silva et al. 2023) mostraram que podem executar variações independentes e mais precisas nas aberturas das barras, favorecendo outros tipos de treinos. Entre os itens que a caixa possui como mostrado na tabela 5.1 observamos que a caixa comportamental desenvolvida neste trabalho possui diversas soluções. Ao longo dos últimos anos, outros pesquisadores mostraram o engajamento de muitas outras regiões cerebrais durante a discriminação tátil nessa tarefa. E, por se tratar de uma tarefa que envolve comportamentos complexos, como a tomada de decisões, é essencial o desenvolvimento de aparatos que possam analisar áreas de processamento cognitivo superior com eficácia.

---

# Capítulo 6

## Conclusão

---

Como visto, neste trabalho propomos melhorias no dispositivo utilizado para estudar o comportamento e o sistema sensorial tátil de roedores, denominado de caixa comportamental, utilizado em pesquisas da área de Neurociência Computacional ou Neurociência Comportamental. Projetamos um novo modelo, com um desenho moderno, e construímos o novo desenho do dispositivo para ser utilizado na realização de tarefas de aprendizado de comportamentos em que os animais devem discriminar a largura de uma abertura usando apenas suas vibrissas para receber recompensas.

### 6.1 Aspectos Metodológicos

Realizamos testes iniciais usando um modelo da caixa comportamental que reproduzimos em computador, usando simulação física, a partir do qual projetamos a nova estrutura para a plataforma, elaborando os respectivos espaços de forma a proporcionar mais conforto aos animais e usando materiais e eletro-eletrônicos de última geração. O novo modelo permite a realização de tarefa de forma totalmente automatizada, incluindo a possibilidade de aquisição de imagens, além da coleta de outros dados.

Para verificar e validar o novo equipamento do ponto de vista do seu funcionamento, simulamos uma série de treinamentos comportamentais usando um rato robótico, na verdade, um rato mecânico de brinquedo, controlado remotamente. O rato mecânico realizou tarefas onde tocava as partes da plataforma, simulando as tarefas de discriminação tátil. Anotamos vários dados, como mostrado acima, e, principalmente, verificamos a não ocorrência de falhas em todos os dispositivos (sensores e atuadores), validando portanto a parte funcional do aparato nos experimentos com o rato mecânico.

Nos experimentos, todas as tarefas puderam ser realizadas sem a intervenção do operador, que é justamente um os principais avanços introduzido com o novo modelo de dispositivo proposto. Ou seja, a parte sequencial e automatizada das atividades experimentais foram realizadas com sucesso usando o rato robótico, onde pudemos também realizar o monitoramento usando sensores e câmeras de vídeo, utilizados em cada etapa do treinamento proposto como teste. Com isso, pode-se evidenciar que o mesmo deva ocorrer em atividades experimentais com os animais vivos, no tocante ao aprendizado e à execução dos treinos, implicando diretamente na eficiência do aparato para os estudos envolvendo futuras análises de tarefas de discriminação tátil em roedores.

## 6.2 Relevância das Contribuições

O dispositivo para estudo comportamental desenvolvido é uma ferramenta importante para o estudo do sistema sensorial tátil. O trabalho aqui desenvolvido permite que outros laboratórios utilizem esta plataforma de forma acessível e de fácil desenvolvimento.

Inicialmente validamos o dispositivo e o deixamos pronto para uso posterior, com o planejamento 2022 19th Latin American Robotics Symposium, 2022 14th Brazilian Symposium on Robotics and 2022 13th Workshop on Robotics in Education, LARS-SBRWRE 2022, 2022, pp. 448–453 e execução de experimentos comportamentais. Com os experimentos, verificamos principalmente que a caixa desenvolvida proporciona a melhora na aquisição de dados e análise desses experimentos de aprendizado funcional. Ou seja, como colocado no texto, outra grande contribuição desta tese foi tornar possível a *independência científica*, isto é, poder experimentar e trocar ou modificar o experimento de forma simples e natural, sem depender de terceiros.

Esta é a razão principal para que equipamentos abertos como os proposto aqui sejam cada vez mais utilizados. Abordamos abaixo uma lista sugestiva de experimentos ou tarefas com complexidade notadamente superior aos equipamentos anteriores, que podem ser formulados usando o nosso modelo, tais como:

1. Realização de experimentos envolvendo variações muito pequenas na abertura das barras com a possibilidade de verificar como essa variação se comporta a partir do disparo cerebral do roedor, além de facilitar a programação da CCO.
2. Realização de testes de acomodação operante, tipo:
  - Aversão ao paladar (substituindo a recompensa doce por algo que o rato não gosta ou algo neutro);
  - Preferência por sacarose (sacarose em uma pomada no nariz e água em outra).
3. Realização de testes de memória de trabalho ou adicionando choque por pulsos elétricos, a fim de usar o treinamento de memória aversiva.
4. Verificação de reação do sistema sensorio-motor com variações na abertura das barras alternadamente, onde apenas uma barra é puxada e a outra contraída, e como essa variação se comporta nos disparos aéreos do rato, observando que apenas estímulos poderiam ser captados por apenas um lado das vibrissas, sem CCO.
5. Por se tratar de uma plataforma modular, podemos prover variações nas localizações dos focos, com suas finalidades específicas, podendo obter novos modelos experimentais para diferentes áreas de estudo.

## 6.3 Trabalhos Futuros

A partir de agora, a caixa comportamental deverá ser utilizada em pesquisas com roedores reais, para os quais pretendemos realizar experimentos comportamentais para melhor verificar o quanto o aparato desenvolvido melhora na aquisição de dados e análise desses experimentos. Outras tarefas envolvendo a utilização de visão computacional, desenvolvidas para os experimentos que estão sendo realizados em paralelo a este projeto (Lima et al. 2022), também serão adicionadas ao conjunto atual de ferramentas, o que inclusive melhorará o conjunto atual. Um protocolo ético foi elaborado e está sendo verificado por nossos organismos internos à UFRN e no ISD para realizar esse novo conjunto de experimentos.

Ainda, título de trabalho futuro, deveremos realizar experimentos que não puderam ser realizados nesta tese, usando ratos vivos. O aparelho desenvolvido poderá ser melhor avaliado e validado no tocante à sua eficiência, não apenas no tocante à eficácia, como foi atestado no presente trabalho. Um conjunto de treinamentos deverá ser planejado, sendo eles executados visando verificar a eficiência do aparato comportamental. Penamos em realizar um treinamento forçado diretivo, sem a necessidade de recebimento de recompensa, apenas com discriminação das barras.

Para isso, pretendemos selecionar 10 roedores, com base no cálculo do *software G\*power* V3.1.9.7, e teremos em consideração que o aprendizado obteve sucesso quando o animal executar um mínimo de 3 atividades corretas consecutivamente ou então quando ele conseguiu-las dentro do tempo estimado para cada animal, que é no mínimo 20 minutos de atividade por dia. Este treinamento poderá ser dividido em duas fases ou etapas. Na primeira, o animal realiza a tarefa comportamental com a barreira física bloqueando o lado direito e na segunda etapa, bloqueando o lado esquerdo, até atingirem o critério de aprendizagem. Através da caixa comportamental desenvolvida podemos fazer o monitoramento total dos treinos realizados pelos ratos, assim como controlar de maneira mais refinada a abertura das barras de discriminação.

Ainda, outros experimentos envolvendo roedores robóticos (agentes robóticos) estão sendo pensados e serão elaborados, visando o aprendizado de comportamentos simples pelos mesmos. Neste caso, tendo implementada a autonomia no roedor robótico, isto é, com seus sensores e atuadores controlados por um computador embarcado (*single board computer*) e tendo-se uma memória de processamento, a ideia é tentar imitar o comportamento dos roedores reais, usando alguma técnica de aprendizado de máquina baseada em aprendizado por reforço com redes profundas (deep reinforcement learning). Nesse caso, técnicas de imitação do roedor real poderão ser também utilizadas, visando o agente robótico autônomo adquirir o comportamento esperado.

## 6.4 Publicações Resultantes da Tese

Durante a execução deste trabalho, além dos conhecimentos adquiridos em todas as atividades relacionadas com o doutorado, conseguimos publicar os resultados em um periódico relevante, bem como em eventos bem qualificados. Inicialmente, publicamos a ideia do nosso trabalho, ainda em andamento, no Workshop de Teses e Dissertações do LARS, com o trabalho (Silva & Gonçalves 2020).

O software de controle supervisorio (próprio da caixa), foi o próximo desenvolvimento, que tornou o sistema independente de qualquer tecnologia anterior, concluído em 2021, e inicialmente publicado no VIII Simpósio de Neuroengenharia no trabalho intitulado *Uma Caixa Comportamental para Análise de Tarefas de Discriminação Tátil em Roedores para Pesquisa em Neuroengenharia* (Oliveira Silva et al. 2022).

Colaboramos também com o trabalho desenvolvido em um estudo de mestrado, em paralelo a este, que foi publicado como artigo em 2022 no Workshop de Trabalhos em Andamento da *Conference on Graphics, Patterns, and Images* (SIBGRAPI), sendo o trabalho intitulado *Towards a Computer Vision System for Monitoring and Stimulation of Rodents* (Lima et al. 2022).

Finalmente, os principais resultados aqui descritos foram publicados em 2023 no artigo completo que dá suporte a esta tese, no periódico *Sensors* (MDPI), intitulado *Improved Behavioral Box and Sensing Techniques for Analysis of Tactile Discrimination Tasks in Rodents* (Oliveira Silva et al. 2023).

---

## Referências Bibliográficas

---

- Andrade, Antenor, Sergio Correia Pinto & Rosilene Santos de Oliveira (2006), *Animais de laboratório: criação e experimentação*, Editora Fiocruz.
- Arduino (2022), 'Arduino', Online, available at url <https://www.arduino.cc/>. Accessed in August, 10, 2022.
- Bautista, Luis M., Joost Tinbergen & Alejandro Kacelnik (2001), 'To walk or to fly? how birds choose among foraging modes', *Proceedings of the National Academy of Sciences* **98**(3), 1089–1094.  
**URL:** <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.98.3.1089>
- Berg, Rune W. & David Kleinfeld (2003), 'Rhythmic whisking by rat: Retraction as well as protraction of the vibrissae is under active muscular control', *Journal of Neurophysiology* **89**(1), 104–117. PMID: 12522163.  
**URL:** <https://doi.org/10.1152/jn.00600.2002>
- Brecht, Michael, Bruno Preilowski & Michael M. Merzenich (1997), 'Functional architecture of the mystacial vibrissae', *Behavioural brain research* **84**(1-2), 81–97.
- Carandini, M. & A. K. Churchland (2013), 'Probing perceptual decisions in rodents', *Nature Neuroscience* **16**, 824–831.
- Carvell, George E & Daniel J Simons (1990), 'Biometric analyses of vibrissal tactile discrimination in the rat', *Journal of Neuroscience* **10**(8), 2638–2648.
- Dade, Penny (2011), 'Encyclopedia of child behavior and development', *Reference Reviews*.
- Deacon, Robert MJ, David M Bannerman, Brian P Kirby, Adam Croucher & J Nicholas P Rawlins (2002), 'Effects of cytotoxic hippocampal lesions in mice on a cognitive test battery', *Behavioural brain research* **133**(1), 57–68.
- e Maria Amalia Andery, Paula Debert (2016), 'Discriminação condicional: Definições, procedimentos e dados recentes', *Revista Brasileira de Análise do Comportamento* **2**(1).  
**URL:** <https://periodicos.ufpa.br/index.php/rebac/article/view/801>
- Glimcher, Paul W, Colin F Camerer, Ernst Fehr & Russell A Poldrack (2009), Introduction: A brief history of neuroeconomics, em 'Neuroeconomics', Elsevier, pp. 1–12.

- Gold, Joshua I & Michael N Shadlen (2007), 'The neural basis of decision making', *Annu. Rev. Neurosci.* **30**, 535–574.
- Handley, Sheila L & Siddika Mithani (1984), 'Effects of alpha-adrenoceptor agonists and antagonists in a maze-exploration model of 'fear'-motivated behaviour', *Naunyn-Schmiedeberg's archives of pharmacology* **327**(1), 1–5.
- Heekeren, Hauke R, Sean Marrett & Leslie G Ungerleider (2008), 'The neural systems that mediate human perceptual decision making', *Nature reviews neuroscience* **9**(6), 467–479.
- Hiraga, Y. & T. Iwasaki (1983), 'Recent advances in studies of rat memory in the radial-arm maze', *Yakubutsu Seishin Kodo* **3**, 99–108.
- Huang, Ren-Qi, Cathy L Bell-Horner, Mohammed I Dibas, Douglas F Covey, John A Drewe & Glenn H Dillon (2001), 'Pentylentetrazole-induced inhibition of recombinant  $\gamma$ -aminobutyric acid type a (gabaa) receptors: mechanism and site of action', *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics* **298**(3), 986–995.
- Ibrahim, Dogan (2006), *Microcontroller based applied digital control*, John Wiley & Sons.
- Jacklin, Derek L., Patrick Kelly, Cristina Bianchi, Tyler MacDonald, Hugh Traquair & Boyer D. Winters (2015), 'Evidence for a specific role for muscarinic receptors in crossmodal object recognition in rats', *Neurobiology of Learning and Memory* **118**, 125–132.  
**URL:** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1074742714002159>
- Krupa, David J., Matthew S. Matell, Amy J. Brisben, Laura M. Oliveira & Miguel A. L. Nicolelis (2001), 'Behavioral properties of the trigeminal somatosensory system in rats performing whisker-dependent tactile discriminations', *Journal of Neuroscience* **21**(15), 5752–5763.  
**URL:** <https://www.jneurosci.org/content/21/15/5752>
- Lima, Renan Araujo, José Wanderson Oliveira Silva & Luiz Marcos Garcia Gonçalves (2022), Towards a computer vision system for monitoring and stimulation of rodents, em 'Anais Estendidos do XXXV Conference on Graphics, Patterns and Images', SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, pp. 80–83.  
**URL:** [https://sol.sbc.org.br/index.php/sibgrapi\\_estendido/article/view/23265](https://sol.sbc.org.br/index.php/sibgrapi_estendido/article/view/23265)
- Mezadri, Telmo José, Xana Raquel Ortolan, André Luiz Thieme, Nathalia Piacentini, Vera Lucia Lângaro Amaral & Marcel Frajblat (2011), 'Avaliação do comportamento de ratos alojados em caixas de cores diferentes', *Revista de Etologia* **10**(1), 21–26.
- Oliveira Silva, José Wanderson, Renan Araújo Lima, Edgard Morya, Fabricio Lima Brasil & Luiz Marcos Garcia Gonçalves (2023), 'Improved behavioral box and sensing

- techniques for analysis of tactile discrimination tasks in rodents’, *Sensors* **23**(1).  
**URL:** <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/1/288>
- Oliveira Silva, José Wanderson, Renan Araújo Lima, Edgard Morya, Fabricio Lima Brasil & Luiz Marcos Garcia Gonçalves (2022), Uma caixa comportamental para análise de tarefas de discriminação tátil em roedores para pesquisa em neuroengenharia, em ‘Proceedings of VIII Simpósio de Neuroengenharia’, Natal, RN, Brasil, pp. 1–4.
- Pais-Vieira, Miguel, Mikhail Lebedev, Carolina Kunicki, Jing Wang & Miguel AL Nicolelis (2013), ‘A brain-to-brain interface for real-time sharing of sensorimotor information’, *Scientific reports* **3**(1), 1–10.
- Pavani, Sérgio Adalberto. (2011), ‘Instrumentação básica.’, *Behavioural brain research* **3**, p. 98.
- Petersen, Carl C. H. (2014), ‘Cortical control of whisker movement.’, *Annual review of neuroscience* **37**, 183–203.
- Petersen, Carl C.H. (2007), ‘The functional organization of the barrel cortex’, *Neuron* **56**(2), 339–355.  
**URL:** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896627307007155>
- Plexon (2022), ‘Sobre plexon inc’, url <https://plexon.com/about-plexon-inc/>. . Acess in 07 of july - 2022.
- Ridderinkhof, K, Markus Ullsperger, Eveline Crone & Sander Nieuwenhuis (2004), ‘The role of the medial frontal cortex in cognitive control’, *Science (New York, N.Y.)* **306**, 443–7.
- Romo, Ranulfo, Luis Lemus & Victor de Lafuente (2012), ‘Sense, memory, and decision-making in the somatosensory cortical network’, *Current Opinion in Neurobiology* **22**(6), 914–919. Decision making.  
**URL:** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959438812001304>
- Shuler, Marshall G, David J Krupa & Miguel AL Nicolelis (2001), ‘Bilateral integration of whisker information in the primary somatosensory cortex of rats’, *Journal of Neuroscience* **21**(14), 5251–5261.
- Shuler, Marshall G, David J Krupa & Miguel AL Nicolelis (2002), ‘Integration of bilateral whisker stimuli in rats: role of the whisker barrel cortices’, *Cerebral Cortex* **12**(1), 86–97.
- Siembra (2021), ‘O que é automação industrial’, url <https://www.siembra.com.br/noticias/o-que-e-automacao-industrial/>. .
- Silva, José Wanderson & Luiz Marcos Gonçalves (2020), A behavioral box for tactile tasks discrimination, em ‘Anais Estendidos do XII Simpósio Brasileiro de Robótica e XVII Simpósio Latino Americano de Robótica’, SBC, Porto Alegre, RS, Brasil,

pp. 23–36.

**URL:** [https://sol.sbc.org.br/index.php/sbirlars\\_estendido/article/view/14952](https://sol.sbc.org.br/index.php/sbirlars_estendido/article/view/14952)

Souza, Rodrigo (2005), ‘Uma arquitetura para sistemas supervisórios industriais e sua aplicação em processos de elevação artificial de petróleo.’, url <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15444/1/RodrigoBS.pdf>. .

STARLING, Antônio N. (2008), *Instrumentação e controle: guia básico / Eletrobrás [et al.]*, IEL/NC, 2008. 218 p. : i, Brasília.

Todorov, João Claudio (2014), ‘Contingências de seleção cultural’, *Revista Brasileira de Análise do Comportamento* **8**(2).

Wong, Chelsea C, Dhakshin S Ramanathan, Tanuj Gulati, Seok Joon Won & Karunesh Ganguly (2015), ‘An automated behavioral box to assess forelimb function in rats’, *Journal of neuroscience methods* **246**, 30–37.

Zerari-Mailly, Fawzia, Gabrielle Pinganaud, Céline Dauvergne, Pierre Buisseret & Catherine Buisseret-Delmas (2001), ‘Trigemino-reticulo-facial and trigemino-reticulo-hypoglossal pathways in the rat’, *Journal of Comparative Neurology* **429**(1), 80–93.

Zhao, Yan, Si-Wei Tan, Zhi-Zhong Huang, Fa-Bo Shan, Ping Li, Ya-Lei Ning, Shi-Yang Ye, Zi-Ai Zhao, Hao Du, Ren-Ping Xiong, Nan Yang, Yan Peng, Xing Chen & Yuan-Guo Zhou (2021), ‘Nlrp3 inflammasome-dependent increases in high mobility group box 1 involved in the cognitive dysfunction caused by tau-overexpression’, *Frontiers in Aging Neuroscience* **13**.

**URL:** <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnagi.2021.721474>