

# Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução

Fabrício Moraes de Almeida  
(Organizador)



Atena  
Editora  
Ano 2024

# Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução

**Fabrício Moraes de Almeida**  
(Organizador)

The background of the cover is a dark gray color, overlaid with a complex, white, abstract pattern of lines and dots. The lines are thin and form a network of interconnected paths, resembling a circuit board or a data network. The dots are of varying sizes and are placed at various points along the lines, suggesting nodes or components in a system. The overall effect is a technical and futuristic aesthetic.

**Atena**  
Editora  
Ano 2024

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaia/TO

Profª Drª Cristina Aledi Felseburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz

Profª Drª Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo

Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Profª Drª Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

## Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução

**Diagramação:** Thamires Camili Gayde  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Fabrício Moraes de Almeida

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b>	
E57	<p>Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução / Organizador Fabrício Moraes de Almeida. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.</p> <p>Formato: PDF  Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  Modo de acesso: World Wide Web  Inclui bibliografia  ISBN 978-65-258-2392-8  DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.928242804">https://doi.org/10.22533/at.ed.928242804</a></p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Engenharia de computação.  I. Almeida, Fabrício Moraes de (Organizador). II. Título.  CDD 621.3</p>
<b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

A engenharia elétrica e de computação é fundamental no desenvolvimento das tecnologias que impulsionam o mundo moderno. Por exemplo, desde a geração, transmissão, distribuição, utilização de energia elétrica, incluindo fontes renováveis e redes inteligentes, sistemas de comunicação de dados, redes sem fio e telefonia móvel; projeto, desenvolvimento e fabricação de circuitos eletrônicos; dispositivos semicondutores e sistemas embarcados. E também, o uso da inteligência artificial (IA) para o desenvolvimento de sistemas inteligentes e autônomos; IA na saúde, IA no agronegócio, IA na mobilidade, IA na indústria; IoT para conexão de dispositivos e coleta de dados em larga escala, dentre outros.

De forma geral, no livro, são demonstradas diversas abordagens teórico-práticas nos resultados obtidos pelos vários autores e coautores na produção de cada capítulo. Além disso, a Atena Editora oferece a divulgação técnico-científica com qualidade e excelência, primordial para garantir o destaque entre as melhores editoras do Brasil.

Fabício Moraes de Almeida



**CAPÍTULO 1 ..... 1**

A BRUTE-FORCE SYSTEM FOR HID (HUMAN INTERFACE DEVICE) ATTACK FOR ANDROID LOCK SCREEN DEVICES WITH AUTOMATIC UNLOCK DETECTION


Mateus Nunes  
Rafael Schneider

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428041>

**CAPÍTULO 2 ..... 16**

ESTUDO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA DE RONDÔNIA


Alexandre Salgueiro Serrão da Costa  
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira  
Fabrício Moraes de Almeida  
Yuri Rodrigues de Azevedo  
Viviane Barrozo da Silva, Dra  
Antonio Carlos Duarte Ricciotti

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428042>

**CAPÍTULO 3 .....42**

ANÁLISE DO POWER BI DE DADOS REAIS DE 2013 ATÉ O INÍCIO DA PANDEMIA SOBRE A EVOLUÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA LIMPA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA EMPRESARIAL: REGIÃO DO SUL DO BRASIL

Márcio Mendonça  
Ygor Alves Vieira  
Fabio Rodrigo Milanez  
Francisco de Assis Scannavino Junior  
Marcio Jacometti  
Iago Maran Machado  
Edinei Aparecido Furquim dos Santos  
Henrique Franciz Ximenes de Andrade Bilbao  
Henrique Cavalieri Agonilha  
Kazuyochi Ota Junior  
André Luís Shiguemoto  
Miguel Angel Chincaro Bernuy  
Michelle Eliza Casagrande Rocha  
Joao Roberto Sartori Moreno  
Vicente de Lima Gongora  
José Augusto Fabri  
Marcos Antônio de Matos Laia  
Daniel Almeida Colombo


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428043>

**CAPÍTULO 4 .....52**

CONTROLE PID NEURO-ADAPTATIVO EMBARCADO EM UM SISTEMA MAGLEV

Eduardo Marek

Alexandre Dalla’Rosa


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428044>

**CAPÍTULO 5 .....72**

REDES BAYESIANAS PARA AUXILIAR NO DIAGNÓSTICO DA COVID-19

Thiago Costa Brandão Toledo

Edimilson Batista Dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428045>

**CAPÍTULO 6 .....95**

PREVISÃO DE VELOCIDADE DO VENTO COM SÉRIE TEMPORAL MULTIVARIADA UTILIZANDO REDE NEURAIS RECORRENTE

Reginaldo Nunes da Silva


Dario Gerardo Fantini

Mauro Sérgio Silva Pinto

Rafael Castilho Farias Mendes

Marlos José Ribeiro Guimarães

Antônio César Pinho Brasil Júnio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428046>


**CAPÍTULO 7 ..... 108**

USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ROBÓTICO COM CAPACIDADE DE RASTREAR INDIVÍDUO

Lucas G. E. Vieira

Almir S. S. Neto


Francisco S. Viana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428047>

**CAPÍTULO 8 .....116**

ROBÓTICA EDUCACIONAL: ALIMENTADOR AUTOMÁTICO PARA CÃES DE RUA

Rute Maria Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9282428048>

**SOBRE O ORGANIZADOR ..... 124**

**ÍNDICE REMISSIVO ..... 125**

## A BRUTE-FORCE SYSTEM FOR HID (HUMAN INTERFACE DEVICE) ATTACK FOR ANDROID LOCK SCREEN DEVICES WITH AUTOMATIC UNLOCK DETECTION

---

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Mateus Nunes**

Diretoria de Criminalística – Polícia Científica de Santa Catarina (PCI-SC)  
Florianópolis – SC – Brazil

### **Rafael Schneider**

Diretoria de Criminalística – Polícia Científica de Santa Catarina (PCI-SC)  
Florianópolis – SC – Brazil

**ABSTRACT:** Electronic devices can be used to conduct illegal activities making examination of their contents essential for criminal investigation. Many mechanisms implemented over the years for securing users' privacy can hinder lawful access to phone data. This research investigates attack via USB-OTG (On-the-Go) using HID (human interface device) and introduces a system for both PIN and pattern screen lock brute-force. Contributions include stop/resume attack and automatic unlock detection via sensor on display. An assessment was done with 18 compatible devices from real cases and found that 66% were compatible with password retrieval, most of them in less than one week.

### **INTRODUCTION**

With the increasing role of electronic devices in everyone's daily life and therefore growing demand for privacy and security, lawful access to electronic devices has become a challenge. Accordingly to [Reedy 2020], we should expect on the next years an increase in number of cybercrimes involving IoT (Internet of Things) devices, online banking, virtual currencies, fraud, among other areas, and it is reported that the digital forensics worldwide market will grow from \$4.62B in 2017 to \$9.68B by 2022.

Digital evidences forensically acquired can be of great concern in many criminal cases given its potential in establishing impartial factual data that can acquit an innocent or condemn a guilty criminal. These evidences encompass crucial artifacts extracted from device's memory include: list of contacts, call history, text messages received and sent, pictures and videos, and GPS location data [Chernyshev et al. 2017]. These can be

used as evidence in investigations related to serious crimes like drug trafficking, kidnapping, murder, and often are the only source of hope solving a case. However, accessing the content of mobile phone's storage can be hindered by various factors, including encryption, undisclosed or unknown passwords and physical damage, for example.

Physical access to device's memory has been more difficult since the introduction of Full-Disk Encryption (FDE), specifically after many security improvements released in Android 4.4. This scheme encrypts the whole content of the storage memory, making methods such as chip-off and JTAG almost always ineffective [Loftus et al. 2017].

Android 10 and greater homogenized the Platform Security turning mandatory a different and rather more secure encryption scheme called File Based Encryption (FBE) which assigns an encryption key for each file on the system instead of the whole partition, making even harder to brute-force the single key used in the previous design

[Mayrhofer et al. 2021]. Forensic countermeasures include custom bootloaders (for full file system dump or password bypass, if applicable), exploitation of bugs, side-channels, studies about how a user creates a password [Markert et al. 2021] and social engineering to compile better dictionaries, among other techniques for password discovery. Once a device is unlocked, keys can be extracted from memory and artifacts can be parsed using methods similar to the one described by [Groß et al. 2021].

Unlike Apple mobile phones, which are only compatible with a limited set of known iOS versions and an even smaller set of hardware manufactured by Apple itself [Afonin and Katalov 2016], Android devices undoubtedly feature a more complex ecosystem of operating system versions and security patches updates, including a handful of makers of chipsets (e.g. Unisoc, Qualcomm, MediaTek and many others) each owning a set of semiconductor models, which make possible for some security flaws to be exploitable on a given combination of model and software configuration.

One specific component of Android Security Platform of interest is GateKeeper, responsible for implementing user's authentication in a Trusted Execution Environment (TEE) and logic for consecutive wrong password attempts, imposing a timeout as penalty and even increasing for successive errors, throttling brute-force attempts [Google 2018]. A summary of the expected timeout after n-th wrong attempt is shown in Table 1.

Number of consecutive wrong passwords (x)	Calculated timeout penalty (seconds)
[0, 4]	0
5	30
[6, 10]	0
[11, 29]	30
[30, 139]	$30 * (2^{((x-30)/10)})$
[140, inf)	1 day

Table 1. GateKeeper timeout penalty algorithm. Source: [Google 2018].

However this penalty system has been acknowledged to have different implementations among manufacturers [Potocky` and S`tulrajter 2022, Google 2018], differing in timeout increasing steps to even admit fixed timeouts, still providing a theoretical vulnerability for the development of automatic brute-force methods.

In light of the complex landscape described above, this article introduces a system for screen lock brute-force of Android Phones. The subsequent sections of this paper are organized as follows: Section 2 reviews relevant and related works focusing on attacks targeting password security in mobile devices. Building upon this foundational understanding, Section 3 introduces the proposed system for performing a comprehensive brute-force process, leveraging the capabilities of USB-OTG (On-the-Go) and HID (Human Interface Device). The obtained results from the system are presented in Section 4, offering insights into the efficacy and performance of the approach across various vulnerable devices. Moving on to Section 5, a thorough discussion is provided, analyzing the implications of the results within the context of digital forensics and device security. Finally, Section 6 concludes the article by summarizing key findings, discussing broader implications, and suggesting potential avenues for future research.

## RELATED WORKS

Android system initially offered three lock options: no lock, PIN or alphanumeric (text) password. The PIN consists of a numerical password, while alphanumeric option includes characters in upper and lower case, as well as symbols, with a length ranging from 4 digits/characters to 16. This provides a large key space for brute-force attempts.

After the introduction of the Android Lock Pattern (ALP) as a screen lock alternative in 2008, which involves a 3x3 grid of contact points connected according to a set of restrictions (e.g., the number of points must be between four and nine), significant effort was devoted to probing its security. The ALP offers a trade-off between security and ease of use due to its more limited range of different passwords available for selection.

Side-channels methods for password discovery, such as analysing smudges and oily traces left on screen [Aviv et al. 2010, Cha et al. 2017], and using captured footage from video cameras for finger path guessing, as reported in [Ye et al. 2017, Ye et al. 2018], can be combined with social engineering, psychological factors and usability heuristics for password creation. These approaches can create a shortlist of possible candidates for pattern passwords [Andriotis et al. 2016] or PINs [Markert et al. 2021].

Despite showing promising results in theory, side-channels attacks and social engineering are not always very effective in real scenarios, specially with prevalence of more complex patterns or adoption of PIN passwords. This motivates further investigation into alternatives, such as exploitation of HID (human interface device).

## ALPFinder

The work by [Gómez 2018] proposed ALPFinder (i.e. Android Lock Pattern Finder) for brute-forcing pattern lock screens. The setup consisted of an Arduino Leonardo board connected to the device with an USB-OTG cable (see Figure 1). The solution involved specific code that emulated mouse HID, simulating the swipe unlock pattern.

Proof-of-concept experiments were conducted on both real devices and software emulators, yielding satisfactory results. Although the system was straightforward and did not support PIN locks, it provided a significant breakthrough as an attack vector for pattern screen locks.

The main targets for this system were devices with fixed penalty timeout for consecutive incorrect passwords. The approach utilized a probabilistic dictionary of patterns with predefined lengths, which had to be uploaded and integrated into the code running on the Arduino Leonardo.

An important reported aspect was the maximum expected time for unlock based on the pattern's length. Even when using a dictionary attack approach, the brute force process could take weeks, and detecting a successful unlock was not feasible.

Similarly, because both the program and the pattern list were stored in Leonardo's ROM, there was no permanent logging. The entire code had to be recompiled to attempt alternative dictionaries or to accommodate delays in drawing patterns of varying lengths.

## Android-PIN-Bruteforce

Another approach suggested by [Potocky` and S`tulrajter 2022] involved implementing a tethered system (shown in Figure 1) which leveraged the HID capabilities of an Android device to brute force the PIN of the target device. The tool, Android-PIN-Bruteforce, presents a Command-line interface on the host device, allowing configurations such as PIN length, timeout duration, and password dictionaries to be set before initiating the process.

An experiment was conducted using ten devices selected from different brands, models and Android versions. The test concentrated solely on the devices' ability to unlock the screen once the correct password was sent and on the repeatability of the brute-force process when an incorrect password was supplied. The study did not measure the total time required for password discovery.

Overall, compatibility was robust among devices with both micro-USB and USB type-C connections. Only one device was reported as incompatible, likely due to the Android versions bellow 5.0 lacking adequate USB-OTG support.

A crucial observation is the absence of pattern unlocking support; the system relies solely on PINs. Furthermore, the system depends on the battery life of both the target device and the host device. If the battery is depleted, the system shuts down without an option to resume the attack, necessitating a restart.



Figure 1. On the left: UI of the Controller module with main actions available for user. On the right: output of the brute force process on a real case device, high- lighted PIN password discovered and unlock detection. Source: [Gó mez 2018] and [Potocky and Stulrajter 2022].

## SYSTEM DESIGN

During a preliminary investigation, we noticed that often when the correct password is input on a device, its screen lights up with brighter than in a hold state. On the contrary, when the wrong password is entered, the display fades to black a few seconds after the invalid password text warning. This behaviour can be exploited for an unlock detection system.

We propose a novel system composed of two modules: a Controller application that communicates wireless with a Worker microcontroller module. The Worker module emulates mouse and/or keyboard HID accordingly to the screen lock type (pattern or PIN, respectively) and is physically connected to device being exploited by an USB-OTG cable.

The Worker module also features a light sensor for capturing the actual display brightness. It is capable of transmitting this data back to the Controller, enabling automatic detection of successful unlock attempt and triggering the brute-force process to stop.

This system allows low level device access and password input (either PIN, pat- tern, or even alphanumeric) to be physically isolated from a higher-level control module. This isolation enables functionalities like stop/resume, calibration, and unlocking, which can be challenging to implement on a microcontroller.

### Controller module

The Controller module provides a generic and abstract application for brute-forcing pass- words, implementing the main logic, and presenting a user interface for selecting pass- word dictionaries, specifying the type of screen lock, calibrating device settings, storing the off-screen brightness value threshold (for auto unlock detection), maintaining an over- all communication log with timestamps, and initiating start/resume of brute-force attacks.

Firstly a Bluetooth serial connection is established with the Worker module. Then, the user then chooses a dictionary text file and selects the type of password lock on the device, calibrates the photosensor value threshold, and enables the brute-force process to start.

Once the password is sent to the device, the Controller module waits for a pre- defined delay, around a few hundred milliseconds, before probing the current screen brightness. Typically, the screen lights up briefly after a successful unlock. If the algorithm detects an unlocked screen, the process halts, and the UI informs the user that the password has been discovered. If not, a timeout period is awaited as a penalty for wrong password attempts.

It's important to note that the type of lock screen must be configured because drawing a pattern on the screen takes significantly more time compared to a PIN password. Thus, the algorithm must account for this variation in waiting duration.

A calibrated value for screen brightness must be acquired before initiating the process to prevent false unlocks triggered by ambient light. See Algorithm 1 for the pseudocode of the Controller module.

## **Worker module**

The Worker module is based on a microcontroller board with built-in USB HID capabilities, physically connected to the phone with an USB-OTG cable (either USB type-C or microUSB) and receives commands from the Controller via wireless communication. A photosensor is connected to one of the microcontroller inputs to measure display brightness.

It implements a straightforward protocol to respond actions sent from the Controller. It emulates a mouse for drawing the pattern or simulates a keyboard to input the PIN to the device. As the password is received as text, the Worker module must parse it and proceed accordingly based on the lock type. For example, upon receiving '1234', it must simulate moving the cursor while keeping the left mouse button pressed, traversing from position '1' to '2', '2' to '3', and '3' to '4', if it is a pattern password. Alternatively, if a PIN is configured, it should input '1234' in the same manner as a normal keyboard HID.



---

```

Require: lock ← PIN or Pattern
Require: photoThreshold
Ensure: connectedWithWorkerModule
passwordFound ← False
while (passwordFound = False) and (listPasswords >= 0) do
    roundPassword ← listPasswords.Next()
    SEND roundPassword to Worker module
    if lock is PIN then
        inputDelay ← 200
    else if lock is Pattern then
        inputDelay ← 400 + (roundPassword.Length() x 2000)
    end if
    WAIT inputDelay milliseconds
    READ photoSensor value from Worker module
    if photoSensor > photoThreshold
        then passwordFound ← True
        PRINT passwordFound
    else
        WAIT wrong password timeout penalty for next attempt
    end if
end while

```

---

Algorithm 1 Controller module algorithm pseudocode

This module also is responsible for capturing light data from the photosensor, which should be attached to the display. It sends this data back to the Controller to be used as input for the unlock detection algorithm.

Considering that devices have varying screen sizes, especially in case of a pattern lock, and different phone "wake" keystroke combinations, it's essential to perform a brief process of calibration. This process records the mouse pointer's x,y offsets distances, both absolute and relative to other dots, accordingly to the 3x3 dots matrix (for detailed implementation, see [Gómez 2018]), as well as validate the correct sequence of keys to "wake" a phone. Once the calibration process for a specific model is completed, the values can be saved and reused. In some cases, these values can be shared among different models or even among among users of the system.

## Proof of concept

The proposed system was developed as a proof-of-concept implementation and utilized for experimentation. The prototype utilizes an Arduino Pro Micro board featuring an ATmega32u4 microcontroller. This board is equipped with micro-USB input/output, a Bluetooth serial module (HC-05) for communication with the Controller, and a GL5528 model photoresistor for light sensing. To facilitate connection, a pair of USB-OTG cables was employed: one designed for USB type-C connectors and another for the micro-USB standard.

The Worker module assembly can be observed on the right side of Figure 2. Notably, an elastic band is used to attach the photoresistor to capture display brightness,

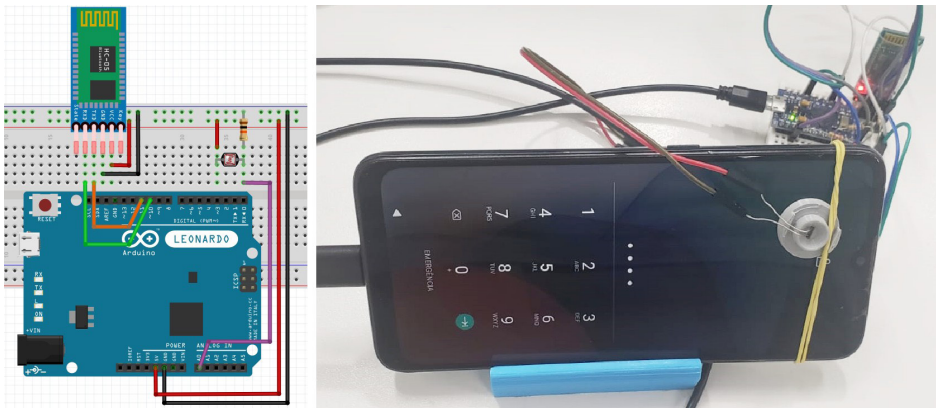


Figure 2. On the left: Schematic of the system design, presenting an Arduino Leonardo, Bluetooth module and light sensor (photo sensor). On the right: Worker module of proof-of-concept, featuring Arduino Pro Micro, Bluetooth module and photo sensor installed on the screen with an elastic band.

While the device is connected via USB type-C to the Arduino Pro Micro running the Worker module code.

Further configuration screens are depicted in Figure 3. These screens encompass setup parameters for establishing a wireless connection with the Worker, reading the photoresistor value for calibration, and selecting either a PIN or pattern lock type. These configurations are essential prerequisites before initiating the brute-force process.

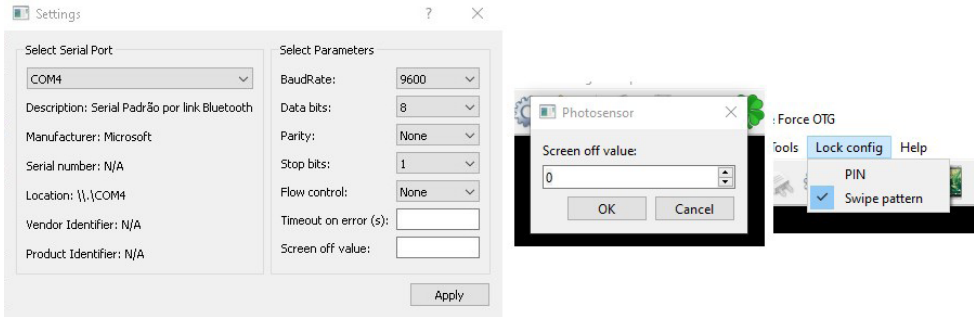


Figure 3. On the left: serial Bluetooth connection setup parameters UI. Center: photo sensor calibration UI. On the right: lock screen type selection menu.

The user interface of the Controller module is presented in Figure 4. The left side of the image provides an overview of available activities. The right side demonstrated the interface after a successful attempt highlighting when the brute-force process stopped and displaying the discovered password.

### EXPERIMENTAL PROCEDURE

An experiment was designed to evaluate the efficacy and effectiveness of the brute-force OTG HID method and the prototype system. It involved testing these method with compatible devices, including with a fixed timeout penalty and increasing penalty interval

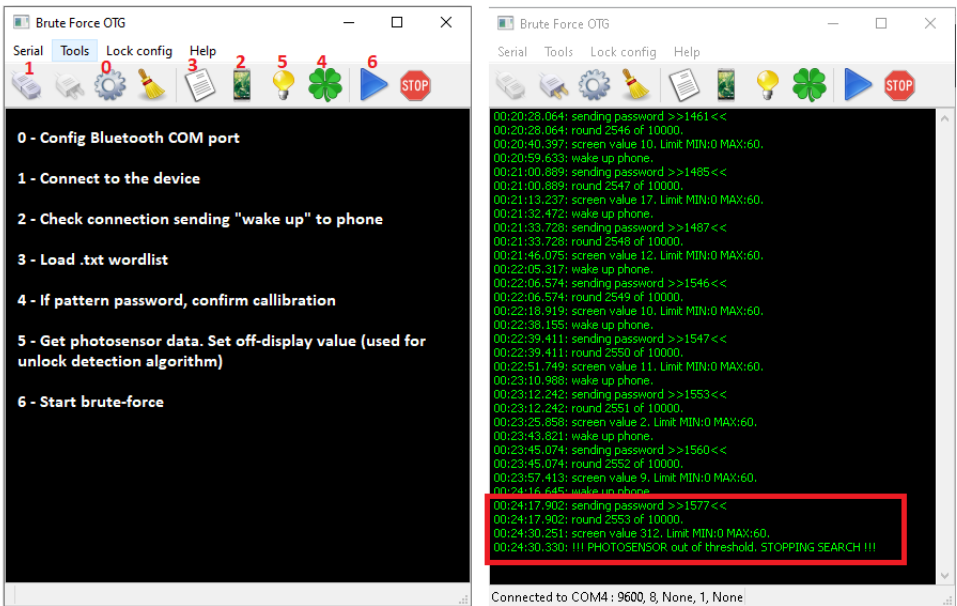


Figure 4. On the left: UI of the controller module with main actions available for user. On the right: output of the brute-force process on a real case device, highlighted PIN password discovered and unlock detection.

Algorithm for either pattern or PIN locks. The maximum attempt time per device was limited to two weeks due to feasibility. Efficacy assessment was conducted by recording the overall system performance, compatibility and identifying pitfalls.

Due to time constraints, dictionaries containing the most common PIN and patterns of a given length, as well customized lists compiled from social engineering, were used in the attacks. The total time taken for successful password discovery was recorded as well as the wordlists used and password attempt rates of the implemented system.

If the password could not be found with the assigned maximum time, it was marked "Negative", and a commercial forensic tool<sup>1</sup> was used to attempt to discover it.

If the password was successfully retrieved using the commercial forensic tool, it was added to a wordlist to validate if the brute-force OTG HID implementation could have potentially retrieved it, given sufficient time. Even if the system could unlock the device using the newly improved list, the result for that specific device remained labeled as "Negative".

The commercial forensic tool had limited availability due to high demand from other cases. We acknowledge its significantly greater efficiency, which, in most cases, enables the breaking of passwords in a fraction of the time required for the completion of brute-force OTG HID method. This efficiency has been recognized across-the-board by various law enforcement agencies and serves as a benchmark for evaluating the effectiveness of this work.

## RESULTS & DISCUSSION

A total of 18 devices were randomly selected from models known to be compatible with brute-force OTG HID method. These devices had a working display and USB connector, and were selected from cases with forensic interest, where the password was either unknown or not provided.

These mobile devices came from three manufacturers: Motorola, Samsung and Xiaomi, featuring six chipsets (different names for commercial models may share the same chipset<sup>2</sup>). The devices were launched between 2013 and 2021, and they ran Android versions ranging from 5 up to 10.

The devices were also categorized into three groups based on the timeout penalty algorithm. Group A included devices with a 30-second penalty after the 5<sup>th</sup> incorrect password attempt. Group B had a 30-second penalty after every incorrect attempt. Group C devices had an incremental penalty.

As detailed in Table 2, results indicated that 66% of the devices were compatible with the brute-force OTG HID technique with a positive password discovery. There was considerable variability in the duration of password brute-force, ranging from one hour to up to eight days, with an average of more than one day for successful unlocks.

1. Cellebrite UFED/Premium ES – <https://www.cellebrite.com>

2. Specific models or commercial names withheld for ethical and security reasons.

Manufacturer	Chipset	Timeout group	Lock type	Brute-force OTG	Time	Forensic Tool
Motorola	MT6762G	B	PIN	Positive	3 days	
Motorola	MT6762	B	PIN	Positive	16 hours	
Samsung	MT6765	C	PIN	Negative		Positive
Samsung	MSM8916	A	PIN	Positive	8 days	
Motorola	MT6762G	B	PIN	Positive	3 days	
Motorola	MT6762G	B	Text	Negative		Negative
Motorola	MT6762G	B	Pattern	Positive	1 day	
Samsung	SC9863A	C	PIN	Positive	1 hour	
Motorola	MT6762G	B	PIN	Positive	6 hours	
Motorola	MT6762G	B	PIN	Positive	1 hour	
Motorola	MT6762	B	PIN	Negative		Positive
Samsung	MT6739	C	Pattern	Negative		Negative
Motorola	MT6762	B	Pattern	Negative		Positive
Motorola	MT6762	B	PIN	Positive	1 hour	
Motorola	MT6762	B	PIN	Positive	5 day	
Motorola	MT6762G	B	PIN	Positive	4 day	
Motorola	MSM8226	A	Pattern	Positive	1 day	
Xiaomi	SDM439	C	Pattern	Negative		Positive

Table 2. List of examined devices.

Only one device examined was locked with alphanumerical (text) password that could not be retrieved by either tool. Pattern passwords were discovered in only 2 out of 5 devices (40%). However, the proposed system successfully discovered the passwords of most devices locked with PINs (10 out of 12), were compatible with the brute-force process (see Figure 5).

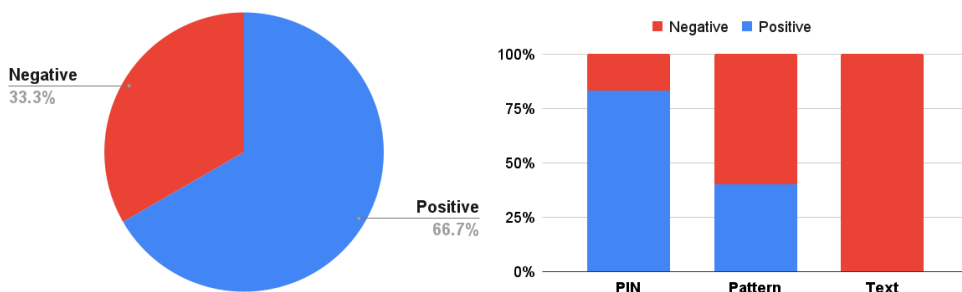


Figure 5. Left: Brute-force OTG HID results showed that 66.7% of the devices had a positive outcome, while 33.3% had a negative. Right: Among devices locked with a PIN, 89% could be cracked, and 40% of those with a pattern. No alphanumerical (text) passwords could be cracked within the designated time.

All devices in group A, which used a less secure timeout algorithm, and nine out of twelve (75%) devices classified in group B, could be brute-forced. The PIN password was only discovered on one of the four devices that had incremental timeout penalties (group C), as shown in Figure 6.

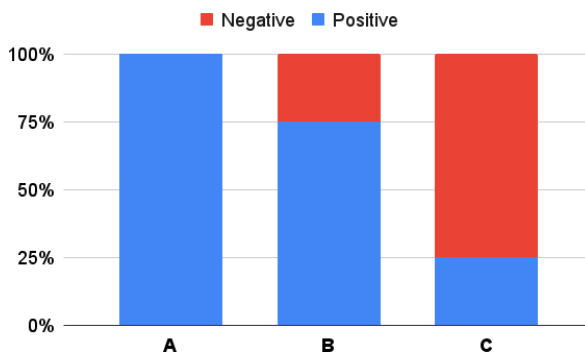


Figure 6. Brute-force results by timeout penalty algorithm group. Group A (less secure penalty) had password retrieved from all the devices. Group B (medium security): 75% of the devices were compatible with password discovery. Group C (incremental penalty): one out of four (25%) were positive.

All passwords retrieved by the forensic tool could be confirmed to work with brute-force OTG HID system, and were subsequently added to a wordlist of known patterns and PINs. Even complex swipe patterns consisting of lengths eight and nine could be correctly emulated by HID and accounted for using the proposed delay computation algorithm. Out of the devices with negative results with the OTG HID brute-force method, only two could not be discovered by the forensic tool.

Lastly, the recorded attempts per hour (APH) for both PIN and pattern screen locks, for Group A and Group B timeout algorithms are presented in Table 3. The data shows no variation in rates for PIN passwords despite their length, providing a more precise anticipation of the maximum brute-force duration. In contrast, rates for pattern locks are notably lower and change in accordance with their length. Longer patterns take significantly more time to exhaust the dictionary compared to smaller ones. For instance, pattern length 6, despite being only 2.6 times the key space of PIN length 4, can take up to approximately 10 times longer to exhaust the dictionary.

Timeout penalty algorithm	Attempts per hour (PIN)	PIN (length 4)	PIN (length 6)	Pattern (length 4)	Pattern (length 6)
Group A (30s penalty after the 5 <sup>th</sup> incorrect)	360	28 hours	4 months	15 hours (APH 110)	12 days (APH 92)
Group B (30s penalty after each attempt)	100	5 days	14 months	24 hours (APH 70)	18 days (APH 62)

Table 3. Group A and Group B devices fixed timeout penalty algorithms and maximum expected time to exhaust the dictionary.

## DISCUSSION

In total, twelve out of eighteen devices (66%) could be brute-forced within a reasonable short period of two weeks. However, it must be noted that only a fraction of the total possible patterns, for example, was tested, underscoring the crucial need for a concise, probabilistic, and reliable dictionary.

Regarding PIN locks, their length is variable between 4 to 16 digits, theoretically offering greater security due to the significantly larger key space. Nonetheless, the results revealed that most PINs are actually much shorter, and effective dictionaries can be generated using social engineering information or probabilistic data from prior successful attempts. Paradoxically, despite the smaller key space, pattern passwords proved to be more difficult to retrieve than PINs, suggesting that alternatives to HID should be explored.

Despite the limited sample size of only a single device configured with an alphanumeric (text) password, brute-forcing it was significantly more challenging. This was due to the fact that the password could comprise letters, numbers, and special characters, adding to the immense complexity of the key space. The vastness of the key space made the use of the proposed system nearly impractical, even when considering only a fraction of the available key combinations. In fact, if we take into account the scenario of increasing penalty throttling, alphanumeric passwords could impose significant difficulties even for the commercial forensic tools, considering the time constraints.

While one device was not compatible with the commercial forensic tool during the experiments, it remained compatible with HID emulation and thus with the brute-force OTG HID method. This suggests a potential application of this system as a final alternative for devices that are incompatible with forensic tools.

During longer sessions, it was observed that the device's battery sometimes ran out. However, in all cases, the brute-force process could be resumed using the log of the Controller module. An alternative for extended sessions is to use a special power connector directly attached to the main logic board of the device or to employ an external power source, replacing device's battery with a continuous source.

False detection of unlocks was relatively common in devices with clock alarms configured. Given this, a false-positive detection is much preferable to missing a true unlock, as the process can always be resumed. However, once a password has been verified, it should not be retested to avoid wasting time. Furthermore, false detection was rarely observed in pattern-locked devices but more common in PIN-locked devices.

## CONCLUSION

In this work we proposed a novel system consisting of two modules for attacking lock screen protections on Android devices using HID brute-force via USB-OTG technique.

Our system identifies a correct password attempt by detecting changes in screen brightness, exploiting the increase in light that devices emit after a unlocking. This approach is particularly valuable, as the extended wait times required for brute-force attempts, ranging from days to weeks, render a manual unlock detection method unfeasible.

We designed an experiment to assess the efficacy and effectiveness of the proposed system using a prototype implementation, and we used a commercial forensic tool as an alternative benchmark for password discovery.

The results revealed that the correct password was successfully retrieved from approximately 66% of the devices within a span of up to two weeks. This outcome validates the system as a viable option, especially for devices with less secure implementations of timeout penalty algorithms. Moreover, considering the overall low cost of building the apparatus and the minimal risk to the examined evidence, the system presents a promising solution for device triage as well.

A potential future approach to mitigate throttling enforcement by the GateKeeper Android component involves exploiting vulnerabilities in the USB-OTG protocol or resetting the failed password counter after each attempt. This strategy aims to avoid disrupting password authentication and could allow for higher attempt rates, facilitating a more comprehensive search across the entire key space.

## ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank all forensic experts, forensic assistants and personnel from Polícia Científica de Santa Catarina for their valuable support and contribution to this research project. Implemented code is available at <https://github.com/matnunes/BruteForceOTG>.

## REFERENCES

Afonin, O. and Katalov, V. (2016). *Mobile Forensics – Advanced Investigative Strategies*. Packt Publishing Ltd.

Andriotis, P., Oikonomou, G., Mylonas, A., and Tryfonas, T. (2016). A study on usability and security features of the android pattern lock screen. *Information & Computer Security*, 24(1):53–72.

Aviv, A. J., Gibson, K. L., Mossop, E., Blaze, M., and Smith, J. M. (2010). Smudge attacks on smartphone touch screens. *Woot*, 10:1–7.

Cha, S., Kwag, S., Kim, H., and Huh, J. H. (2017). Boosting the guessing attack performance on android lock patterns with smudge attacks. In *Proceedings of the 2017 ACM on Asia conference on computer and communications security*, pages 313–326.



Chernyshev, M., Zeadally, S., Baig, Z., and Woodward, A. (2017). Mobile forensics: advances, challenges, and research opportunities. *IEEE Security & Privacy*, 15(6):42–51.

Gòmez, L. S. M. (2018). Descubrimiento automatizado de patrones de acceso en dispositivos móviles android. In *XVIII Simposio Argentino de Informática y Derecho (SID)-JAIIO 47 (CABA, 2018)*.

Google (2018). Android open source project: Android api guide.

Groß, T., Busch, M., and Müller, T. (2021). One key to rule them all: Recovering the master key from ram to break android's file-based encryption. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 36:301113.

Loftus, R., Baumann, M., van Galen, R., and de Vries, R. (2017). Android 7 file based encryption and the attacks against it. *University of Amsterdam*, 33.

Markert, P., Bailey, D. V., Golla, M., Duřmuth, M., and Aviv, A. J. (2021). On the security of smartphone unlock pins. *ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS)*, 24(4):1–36.

Mayrhofer, R., Stoep, J. V., Brubaker, C., and Kravovich, N. (2021). The android platform security model. *ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS)*, 24(3):1–35.

Potocky, S. and Stulrajter, J. (2022). The human interface device (hid) attack on android lock screen non-biometric protections and its computational complexity. *Science & Military Journal*, 17(1):29–36.

Reedy, P. (2020). Interpol review of digital evidence 2016-2019. *Forensic Science International: Synergy*, 2:489–520.

Ye, G., Tang, Z., Fang, D., Chen, X., Kim, K. I., Taylor, B., and Wang, Z. (2017). Cracking android pattern lock in five attempts. In *Proceedings of the 2017 Network and Distributed System Security Symposium 2017 (NDSS 17)*. Internet Society.

Ye, G., Tang, Z., Fang, D., Chen, X., Wolff, W., Aviv, A. J., and Wang, Z. (2018). A video-based attack for android pattern lock. *ACM Transactions on Privacy and Security (TOPS)*, 21(4):1–31.

## CAPÍTULO 2

# ESTUDO SOBRE O DESENVOLVIMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA DE RONDÔNIA

---

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Alexandre Siqueira Serrão da Costa**

Concluinte do curso de Bacharelado  
em Engenharia Elétrica – Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO

### **Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/2255311473963948>

### **Fabício Moraes de Almeida**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>

### **Yuri Rodrigues de Azevedo**

Engenheiro Eletricista – ENERGISA  
RONDÔNIA

### **Viviane Barrozo da Silva, Dra**

Professora do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9428968456380501>

### **Antonio Carlos Duarte Ricciotti**

Professor do Departamento de  
Engenharia Elétrica - Fundação  
Universidade Federal de Rondônia  
Porto Velho – RO  
<http://lattes.cnpq.br/9613876404612535>

**RESUMO:** O capítulo do livro apresenta um estudo sobre: Rondônia teve um crescimento e desenvolvimento de infraestrutura de forma tardia, devido ao contexto histórico de sua ocupação ser dependente de movimentos migratórios exploratórios temporários com pouco preocupação de construção de estruturas permanentes. Anos mais tarde isso resulta em alta dependência em termelétricas para geração de forma custosa e em polos isolados, mas as características propícias da sua bacia hidrográfica alteraram o cenário de dependência para grande gerador de energia elétrica nacional com grande quantidade de usinas de pequeno e grande porte. Agora o crescimento de sua rede de distribuição por grandes investimentos de concessionárias locais reverte situação conectando as populações antes isoladas e desligando as termelétricas, agora desnecessárias.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes de Distribuição Elétrica. Rondônia. Termelétricas. Energia Elétrica nacional.

## STUDY ON THE DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORK IN RONDÔNIA

**ABSTRACT:** The book chapter presents a study on: Rondônia had a late growth and development of infrastructure, due to the historical context of its occupation depending on temporary exploratory migratory movements with little concern for the construction of permanent structures. Years later, this resulted in a high dependence on thermoelectric plants for costly generation and in isolated poles, but the favorable characteristics of its river basin changed the dependence scenario for a large national electricity generator with a large number of small and large plants. size. Now the growth of its distribution network due to large investments from local concessionaires reverses the situation by connecting previously isolated populations and turning off the now unnecessary thermoelectric plants.

**KEYWORDS:** Electrical distribution networks. Rondônia. Thermoelectric plants. National Electrical Energy.

### INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) faz parte da infraestrutura de estado nacional, formado por 3 setores distintos: geração que utiliza toda a matriz elétrica disponível no território federal na produção de energia, transmissão criando as estruturas de longo alcance pelo transporte e disposição da energia em altas tensões (230 kV) a polos de distribuição e subestações, distribuição utiliza subestações abaixadoras ou elevadores para adequar e corrigir o nível de tensão da energia fornecida a consumidores que podem representar a população ou comércios e indústrias [1].

Para o estado de Rondônia o seu histórico precisa ser contemplado com as motivações políticas e econômicas dos movimentos migratórios responsáveis pela construção de sua infraestrutura como estado e atuação de agentes governamentais que lideram o setor elétrico. Outros fatores característicos devido pela sua posição geográfica como: Relevo, fauna e flora, hidrografia e clima se mantêm relevantes devido a soma desses atributos definem as adversidades enfrentadas por projetos a serem iniciados na região, dentre eles o acesso à região, logística de materiais para construção e suprimentos como remédios para lidar com enfermidades locais, todos esses fatores foram de extrema relevância na construção do estado.

O Ministério de Minas e Energia chefia a criação de agências governamentais que operam no setor elétrico como Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com autoridade sobre decisões administrativas e fiscaliza as empresas que atuam no setor como concessionárias. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) responsável pelo controle da rede pertencente ao Sistema Interligado Nacional (SIN) que cobre todo o país, a criação das Centrais Elétricas de Rondônia S/A (CERON) de origem governamental e responsável pelo setor elétrico de Rondônia, e quaisquer outras empresas que aparecem na história do estado com relações diretas ao setor elétrico, tem influência no desenvolvimento da rede de forma direta ou indireta.

O histórico do setor elétrico dentro e fora do estado pode ser feito em dois períodos distintos, a geração e distribuição anterior a existência do Sistema Interligado Nacional (SIN), e o processo de conexão com o SIN trabalhando de forma uniforme com o restante do país. A dependência a certos tipos de gerações locais passa a ser substituída por uma rede mais robusta e desenvolvida que permite a transferência de cargas de forma eficiente controlada por empresas de atuação local em distribuição conhecidas como concessionárias.

A expansão física da rede em conjunto com o desligamento de termelétricas permite visualizar a evolução da rede de distribuição, com polos anteriormente isolados e dependentes agora com acesso às cargas geradas em outras regiões ou por métodos alternativos. As termelétricas agora redundantes se tornam um ponto de referência com o antigo valor de geração de carga comparado com o consumo de parcelas da população que foram migradas de sistemas isolados para a nova rede proporcionada pelo SIN.

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Nesse capítulo será apresentada a pesquisa bibliográfica realizada para servir como referencial e motivação desse estudo. Assim, a revisão foi subdividida por meio de três principais aspectos: as rochas ornamentais e a indústria brasileira, os resíduos de marmorarias, e o estudo das propriedades físicas e mecânicas decorrentes da incorporação dos resíduos em argamassas.

### **Histórico de Rondônia**

O estado de Rondônia, anteriormente conhecido Território federal do Guaporé, foi fundado em 1956 em homenagem ao Marechal Rondon [2]. Ele foi responsável por realizar obras de desbravamento e instalação de rede de comunicação nas regiões Norte e Centro-oeste do país, como a primeira linha telegráfica. Mas a história e movimentos migratórios relevantes do estado antecedem sua constituição formal pelo governo federal na década de 50.

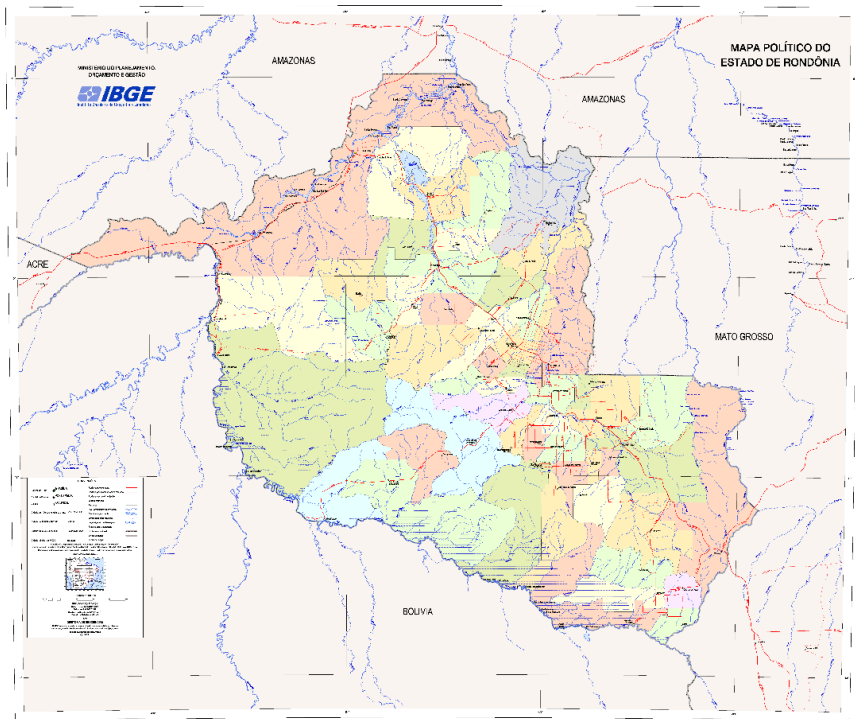


Figura 1 - Mapa Político do Estado de Rondônia (IBGE,2009)

As principais migrações históricas de grande porte do estado estão associadas aos movimentos exploratórios por recursos naturais, os responsáveis pelo maior deslocamento e desenvolvimento de povoações na região são os relacionados ao primeiro ciclo da borracha, a construção da Estrada de Ferro Madeira Mamoré e o segundo ciclo da borracha [6].

Para o primeiro ciclo da borracha que ocorre durante o século XIX (1877 - 1910), com a exploração de seringueiras na região amazônicas para extração matéria prima do látex, trazendo muitos trabalhadores da região nordeste do país. Esse movimento acompanhou margens dos rios como Amazonas e Madeira para o que seria o atual território de Rondônia. O fim desse primeiro ciclo se deve ao crescimento de um mercado rival de extração de látex com plantações de seringueiras montadas em território asiático colonizado por europeus.

O tratado de Petrópolis assinado entre os governos do Brasil e Bolívia em 1903, tratava entre vários tópicos, dois mais importantes para migração do estado, a anexação do território do estado do Acre e a construção de uma ferrovia afim de melhorar a infraestrutura da região e o transporte da borracha amazonense.

A ferrovia conhecida como Estrada de Ferro Madeira Mamoré (EFMM), teve o início da sua construção no ano de 1907 e conclusão no ano de 1917, a construção teve uma grande migração de trabalhadores de todas as regiões do país e de fora. A dificuldade de trabalhar em regiões remotas em conjunto com as más condições médicas fez que que

essa obra sofresse grandes atrasos e um alto índice de mortes proveniente de doenças como malária e febre amarela, extremamente comum na região. [7]

O segundo ciclo da borracha de menor impacto, decorrente da segunda guerra com a necessidade de látex pelos aliados, visto que Japão pertencente ao eixo ocupou pacífico e sudeste asiático que haviam se tornado o novo polo de extração do látex e negando as forças aliadas de material necessário para produção de borracha.

Desde então o maior movimento migratório, ocorrido entre as décadas 1970 e 1980 [8], ao estado tem sido um último de maior escala em procura de um pedaço de terra para moradia fixa e produção agropecuária a estímulo do governo federal.

Uma das características geográficas mais importantes do estado é a presença do rio Madeira, pertencente a bacia hidrográfica do rio Amazonas [26]. O valor estudado neste trabalho é o seu potencial hídrico para atividades de geração elétrica através de duas grandes usinas hidroelétricas (UHEs), Jirau e Santo Antônio.

## **Agências Federais**

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é um órgão regulador criado pelo Ministério de Minas e Energia pela Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997 [3]. Tendo suas funções principais de natureza administrativa e federal.

Ela se responsabiliza pela regulação dos três setores do sistema elétrico de potência (geração, transmissão e distribuição), isso ocorre através da fiscalização direta das concessionárias, estabelecimento de tarifas para cada setor, definindo as diretrizes a serem seguidas para aproveitamento de recursos naturais na geração (como no caso de rios usados por hidrelétricas), conferindo concessões a empresas e empreendimentos que procuram trabalhar no setor elétrico e implementando novas regras definidas pelo governo federal.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é um órgão de constante atuação no setor elétrico, coordenando ações entre diferentes empresas e concessionárias dos setores de geração e transmissão conectadas ao SIN assim como redes de operação isoladas presentes no país. Trabalha debaixo da ANEEL e foi criada pela Lei nº 9.648, futuramente sofreu alterações com a lei nº 10.848/2004, sua regulamentação segue o Decreto nº 5.081/2004. [4]

Suas principais funções têm objetivo de garantir suprimento contínuo de energia elétrica a todo país de forma segura, por isso sua autoridade em coordenação de atividades entre diferentes empresas de diferentes setores de forma simultânea dentro do SIN. Promover o crescimento e otimização de todo SIN usando padrões definidos pela ANEEL, melhorando sua própria rede para garantir estabilidade e acesso irrestrito a população de seus benefícios.

O Sistema Interligado Nacional, é definido pela junção do setor de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil, sendo constituído por gerações de grande parte: hídrica, térmica e eólica, todas de grande porte, e geração hídrica sendo a maior de todas. O sistema se divide em 4 subsistemas baseado nas regiões do Brasil: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e partes da região Norte que ainda apresenta crescimento do SIN. [5]



Figura 2 - Mapa de Conexões do SIN (ONS, 2023).

A junção de todas as gerações do país em uma única rede, atribui ela a possibilidade de compensar por faltas em qualquer ponto com a geração de outro, atingindo seu objetivo de uma rede estável e segura para o mercado.

A maior parte da geração de carga fornecida ao sistema vem de hidrelétricas, aproveitando a grande poder hídrico do Brasil, as usinas térmicas que também foram uma grande fonte de energia ainda têm presença para compensar quaisquer perdas que possam acontecer no sistema e pontos mais isolados com necessidade de carga que era o caso no estado. Com o passar dos anos houve um aumento no uso de usinas eólicas nas regiões nordeste e sul, para o nordeste isso se deve a sua região litorânea.

A energia solar tem se tornado outro investimento de geração tanto com investimentos privados e governamentais que apresenta um crescimento de 59,4% nesse ano [10], sendo a soma da capacidade de usinas e de sistemas de geração próprios.

## Setor Elétrico

Os três setores do SEP: geração, transmissão e distribuição. Trabalham de forma independente e no caso de Rondônia o destaque pode ser dado para os setores de geração e distribuição, com as hidrelétricas e termelétricas para geração, a distribuição expandindo a rede nos pontos urbanos e conectando polos rurais a rede interligada e a outros pontos de geração menores. Por último a transmissão lida com a conexão da geração do estado com o restante do país usando principalmente uma linha de 230 kV que cruza todo o estado.

A geração de energia elétrica vem da transformação de algum tipo de energia para a energia elétrica, isso é definido pela matriz elétrica de um país que é o conjunto de fontes disponíveis para geração de energia elétrica [11]. Em uma visão global a matriz energética é feita principalmente de combustíveis fósseis que são fontes não renováveis enquanto a matriz brasileira é feita principalmente de fontes renováveis.

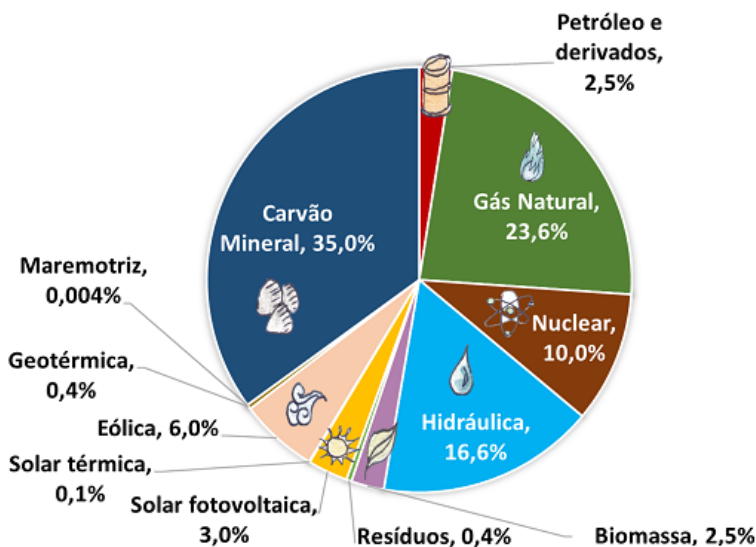


Figura 3 - Matriz energética global (EPE, 2023).



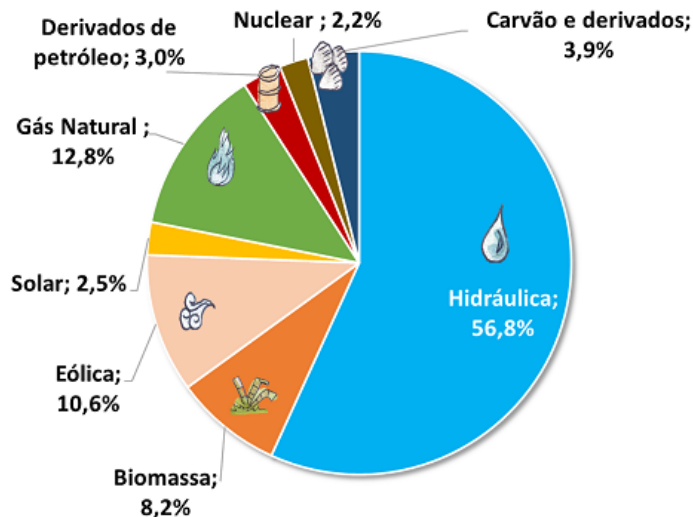


Figura 4 - Matriz energética Nacional (EPE, 2023).

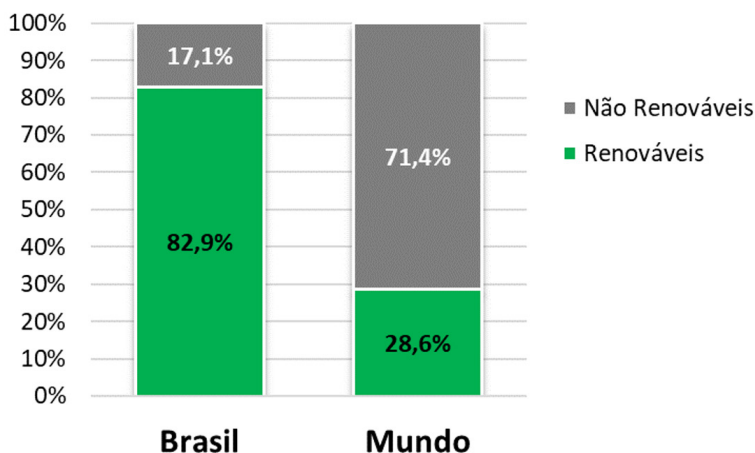


Figura 5 - Tabela de matrizes do Brasil e mundo (EPE, 2023).

## Geração

A geração em Rondônia devido a seu histórico foi em grande parte de termelétricas devido à dificuldade de acesso à região junto dos movimentos migratórios exploratórios, a evolução do estado e a construção de grandes hidrelétricas fez que o esse cenário mudasse transformando-o em um grande produtor energético, mas com um setor de distribuição ineficiente que acarretam grandes custos operacionais devido à falta de logística para transporte [13]. Isso faz que esses dois tipos de geração sejam de destaque para o estado com suas possibilidades de geração local distinta que representa a dicotomia da geração na região.

Geração termelétrica funciona na base de conversão de três tipos diferentes de energias, energia térmica para mecânica e de mecânica para elétrica [12]. Pela praticidade de motores movidos a combustíveis, fez que esse método de geração fosse usado durante os movimentos que ocuparam o estado pois com o difícil acesso à região, ter geração de energia local era a única opção por falta de uma rede distribuição, por mais que tivesse alto custos pela dependência em combustíveis.

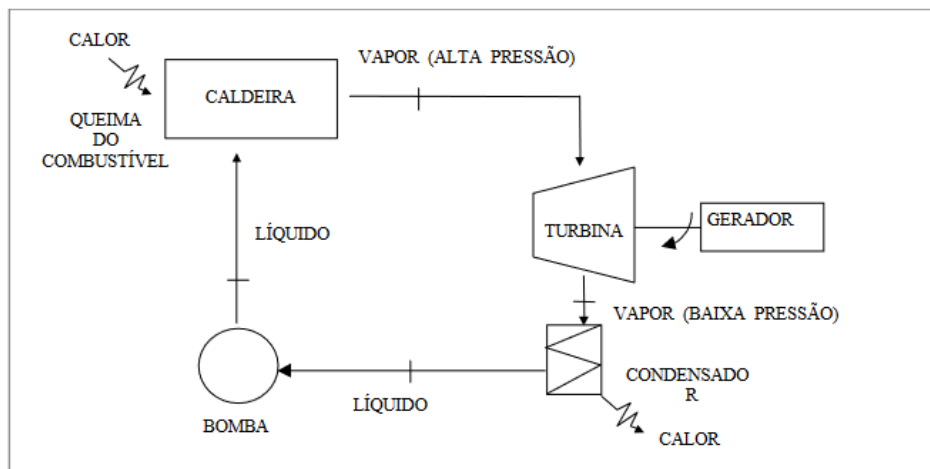


Figura 6 - Máquina térmica (Saidel, 2013).

A queima do combustível caracteriza o processo de combustão que é uma reação exotérmica de liberação da energia presente nas ligações químicas nas moléculas que compõem o combustível usado, essa energia se apresenta na forma de calor usada para realizar trabalho mecânico usando pistões ou turbinas, podemos dividir esse processo em dois grupos: combustão externa e interna.

Para o caso da combustão externa, o calor liberado pela queima de combustível é usado para aquecer algum outro fluido responsável pelo trabalho de movimentar os pistões, um caso simples seria aquecer água para gerar vapor que se expande e movimenta os pistões. Podem ser vistos como exemplo as antigas máquinas a vapor.

Na combustão interna, parte do combustível é misturado com ar para aumentar seu poder de expansão na combustão gerando mais força de forma explosiva que consegue movimentar os pistões ou turbinas. Um exemplo disso pode ser visto em motores de carros e outros veículos.

O movimento criado pela energia mecânica por sua vez é conectado a um gerador de energia elétrica, conectando o motor de combustão com o eixo dele, temos então a última etapa de transformação de energia onde energia mecânica é transformada em energia elétrica.

Com a geração hidrelétrica à água se torna a fonte de energia mecânica usando o volume e potencial encontrado em quedas d'água. Ela pode ser dividida em dois principais tipos de geradoras: as grandes usinas hidrelétricas (UHE) que produzem grande parte da energia brasileira e as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) que são usadas em escala menores para atender a população local.

O princípio físico de seu funcionamento é a soma da força mecânica produzida por um desnível de água com a vazão do corpo d'água onde a usina é instalada, o conjunto dessas forças mecânicas aplicadas a bobinas é o responsável pela geração. [22]

Para conseguir alcançar valores constantes de queda e vazão são construídas as barragens como parte da estrutura da usina possibilitando o controle humano para a geração fazendo dela artificialmente estável mesmo sendo dependente de estações climáticas em relação ao nível hidráulico da fonte.

As estruturas fundamentais de uma usina podem ser consideradas como sendo a barragem, tomada d'água, vertedouro, casa de força e subestação.

Um dos maiores diferenciais desses métodos é a eficiência da geração entre as termelétricas e hidrelétricas. No caso de termelétricas o combustível utilizado assim como o método determinam a sua eficiência da conversão de energia, de forma branda pode se dizer que carvão possui uma eficiência entre 20% e 38% enquanto combustíveis fosseis possuem no máximo 45% [27].

As hidrelétricas têm como principal fator as suas turbinas para determinar sua eficiência considerando uma vazão de água constante. Usando modelos mais comuns de turbinas hidráulicas (Pelton, Kaplan e Sifão), é possível ter um rendimento de acima de 80% de conversão de energia [28] fazendo deste o método mais eficiente e ótimo para larga escala.

## Geração em Rondônia

A geração em Rondônia devido a seu histórico foi em grande parte de termelétricas devido à dificuldade de acesso à região junto dos movimentos migratórios exploratórios, a evolução do estado e a construção de grandes hidrelétricas fez que o esse cenário mudasse transformando-o em um grande produtor energético, mas com um setor de distribuição ineficiente que acarretam grandes custos operacionais devido à falta de logística para transporte [13]. Isso faz que esses dois tipos de geração sejam de destaque para o estado com suas possibilidades de geração local distinta representando a dicotomia da geração na região.

A construção da primeira PCH do estado em Vilhena, conhecida como PCH Rio Vermelho inaugurada em 1987 e com potência instalada de 2600 kW [23]. Demonstrou o grande potencial presente e uma alternativa viável para o desenvolvimento do estado, pois a dependência em termelétricas em cidades do interior fez que durante a década de 90 existisse racionamento de energia com fornecimento variando entre 6 e 12 horas por dia, mas com introdução de PCHs era possível alcançar fornecimento 24h/dia.

No ano de 2022 apresentava-se um total de 44 diferentes PCHs distribuídas pelo estado como pode ser observado no Anexo D com um mapa de todas as subestações ativas e PCHs representadas por um triângulo preto, elas se encontram espalhadas em grande parte no sul do estado como é o caso da Rio Vermelho mencionada anteriormente nas proximidades de Vilhena e outra grande parcela na fronteira norte com o estado do Amazonas e o Rio Madeira.

Anos mais tarde isso resultou na construção das Usinas de Jirau e Santo Antônio no Rio Madeira.

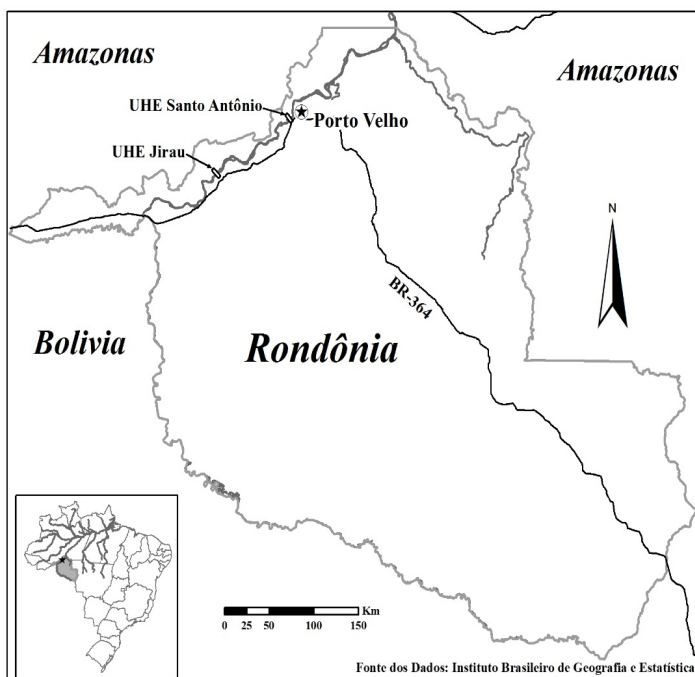


Figura 7 - Mapa das grandes usinas em Rondônia (Rainey, 2016) [20].

## Transmissão

Os serviços de transmissão de energia compreendem de múltiplos sistemas de controle e infraestrutura construída para fins de transferência de cargas por longas extensões do território nacional, utilizando estruturas especializadas para o alto nível de tensão e métodos especiais para garantir a segurança e manutenção da rede.

A transmissão é composta de dois tipos de redes a Rede Básica (RB) e Rede Básica de Fronteira (RBF), ambas fazem parte do SIN. A divisão ocorre baseada no nível de tensão encontrada pela rede, com a RB sendo para linhas e estruturas que atendem tensões iguais ou superiores a 230 kV, a RBF possui linhas e estruturas de para tensões iguais ou superiores 230 kV assim como redes de tensão inferiores a mesma. [14]

No estado de Rondônia o destaque aparece na linha de transmissão conectando ambas UHE de Jirau e Santo Antônio a subestação Coletora utilizando linhas de transmissão de curta distância, mas 500 kV de tensão e então rebaixado a 230 kV para conexão com o restante da linha de transmissão Norte-Sudeste. [15].

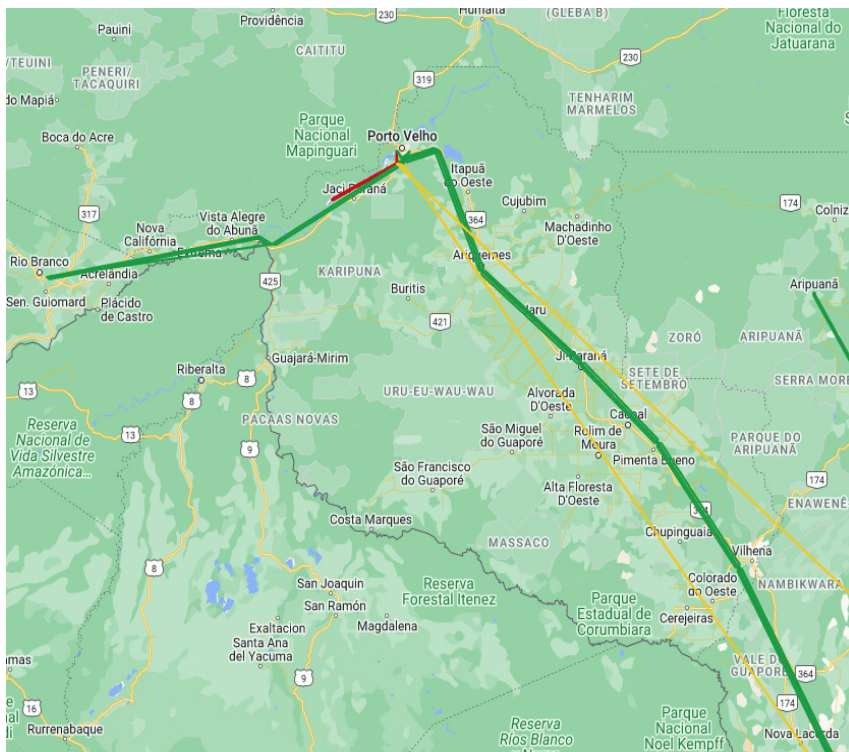


Figura 8 - Mapa do SIN em Rondônia (ONS, 2023).

## DISTRIBUIÇÃO

O trabalho da distribuição de forma sucinta é, levar energia elétrica recebida em suas subestações conectadas a linhas de transmissão até o consumidor, com sua performance sendo fiscalizada pela ANEEL que observa a qualidade do serviço através de vários indicadores como:

- Nível tensão e qualidade de energia, observa as variações no nível de tensão causada por perturbações.
- Atendimento telefônico, tanto o tempo de resposta a reclamações como a quantidade das reclamações recebidas e casos finalizados
- Cumprimento de metas de programas elaborados pela ANEEL, se as empresas contribuíram para o desenvolvimento de programas sociais relacionados ao setor como Luz para Todos.

- Comercial, sobre a eficiência de respostas de suas atividades como realização de leituras, conexão de novos clientes a rede, suspensão, faturamento e ressarcimentos. [18]

A divisão da distribuição e sua categorização quanto ao nível de tensão ocorrem nas subestações responsáveis pelo acolhimento das correntes providenciadas pelas linhas de alta tensão da rede de transmissão já discutidas. As categorias de tensão são agora de alta tensão para valores dentre 69 kV e 230 kV, média tensão dentre 2,3 kV e 69 kV e baixa tensão para valores menores de 2,3 kV [16].

As subestações de distribuição fazem a diminuição do nível de tensão para um nível uniforme adequado da rede de distribuição, pois os valores obtidos nas linhas transmissão são altos demais para os consumidores, necessitando de outros transformadores instalados por toda a rede como vistos em postes para novamente abaixar a tensão e adequando para uso residencial.

O controle dessas subestações é realizado por concessionárias que adquirem licitações provenientes de leilões elétricos realizados pela ANEEL, com as concessionárias fazendo ofertas pelo direito de atuação em regiões apresentadas. As ofertas efetuadas pelas concessionárias diferentes dos leilões normais onde o maior preço se torna o ganhador, procura-se o menor preço que reflete o custo pela prestação de serviço a ser realizado pela empresa participante. Logo o contrato para a prestação de serviço de distribuição elétrica cabe a empresa que promete o menor custo, neste caso isso reflete o melhor preço. [17]

O serviço de distribuição de energia elétrica é realizado por aproximadamente 105 diferentes agentes, sendo 52 Concessionárias, 52 Permissionárias e 1 Designada usando os dados de 2021 [19]. Com um total de unidades consumidoras (UCs) de 89.951.879 atingindo uma população total de 208.488.847 pessoas.

## Distribuição em Rondônia

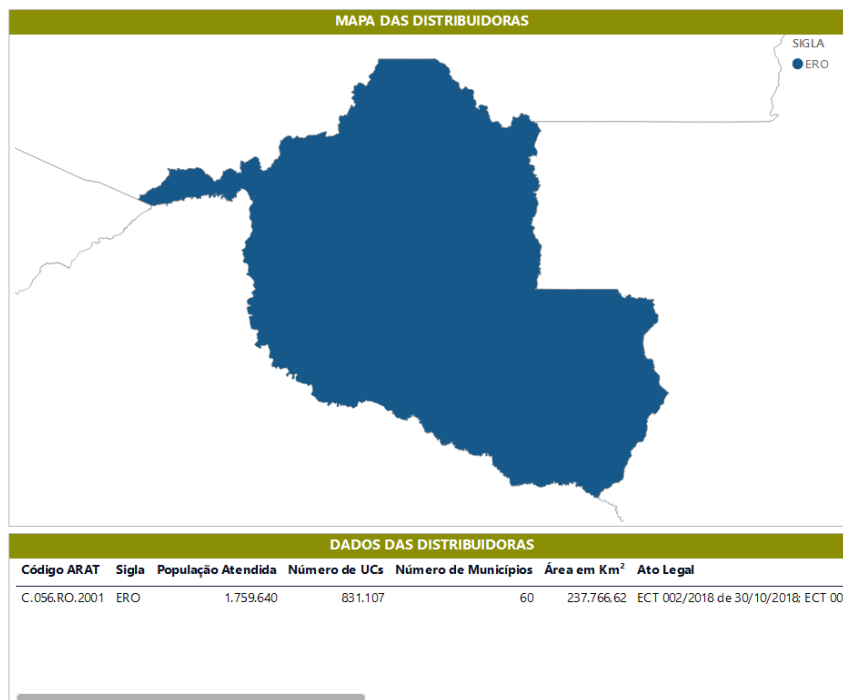


Figura 9 - ANEEL – Mapa das distribuidoras (ANEEL, 2023) [25].

Para monitorar de forma eficiente a todos a ANEEL exige uma série de relatórios e planos sobre as atividades realizadas assim como futuras, dentro das atividades futuras é possível destacar o Plano de Desenvolvimento da Distribuição (PDD).

O Plano de Desenvolvimento de Distribuição (PDD) se refere ao amontoado de estudos realizados pelas empresas responsáveis pela distribuição sobre os investimentos planejados para o ano seguinte baseado nas ações realizadas pelas subestações de baixa, média e alta tensão.

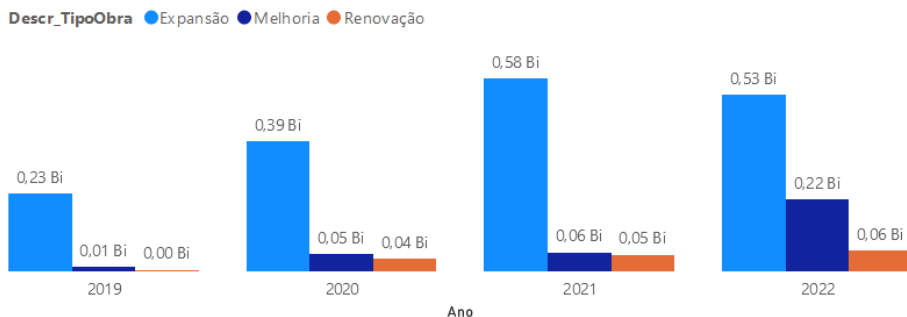
Os investimentos planejados dentro do PDD se dividem em 3 setores:

- Expansão: cobre todos os investimentos relacionados ao incremento de carga disponível, seja pelo crescimento físico da rede que atende um número maior de clientes aumentando a demanda ou necessidade de clientes especiais de setores industriais.
- Melhoria: são os investimentos relacionados a estabilidade e qualidade da rede, como novos equipamentos de proteção a serem instalados na rede para melhor controle e obtenção de dados, reguladores de tensão corrigindo níveis de tensão em longos trechos mantendo a rede uniforme e balanceada evitando danos a dispositivos.

- Renovação: custo de manutenção da rede e troca de equipamento que atingiu limite eficaz de funcionamento e outros ativos que foram danificados de alguma forma.

Esses investimentos mencionados podem fazer parte de outros programas governamentais de infraestrutura. Dentre eles o que possui maior destaque para o tema de crescimento de rede é o Programa Luz para Todos.

O programa Luz para Todos desenvolvido pelo governo federal em 2003, procura transformar a energia elétrica e seu fornecimento um serviço público de fácil acesso a todos, melhorando a qualidade de vida e tendo uma maior integração da população.



Descr_TipoObra	2019	2020	2021	2022	Total
Expansão	234.411.784,00	390.761.311,27	579.900.389,81	532.303.486,30	<b>1.737.376.971,38</b>
Melhoria	14.017.309,00	52.530.967,65	56.852.525,04	217.523.037,08	<b>340.923.838,77</b>
Renovação	2.850.000,00	37.878.870,15	50.731.651,42	61.702.812,31	<b>153.163.333,88</b>
<b>Total</b>	<b>251.279.093,00</b>	<b>481.171.149,07</b>	<b>687.484.566,27</b>	<b>811.529.335,69</b>	<b>2.231.464.144,03</b>

Descr_TipoObra_Class	2019	2020	2021	2022	Total
Luz Para Todos	66.752.526,00	36.556.216,71	51.969.635,82	95.982.413,47	<b>251.260.792,00</b>
Obra com Participação Financeira				3.620.164,30	<b>3.620.164,30</b>
Planejamento Setorial	19.826.326,00	245.891.655,04			<b>265.717.981,04</b>
<b>Total</b>	<b>86.578.852,00</b>	<b>282.447.871,75</b>	<b>51.969.635,82</b>	<b>99.602.577,77</b>	<b>520.598.937,34</b>

\*As informações aqui apresentadas foram encaminhadas pelas distribuidoras e podem, eventualmente, ser revisadas.

Figura 10 - ANEEL – PDD Investimentos (ANEEL, 2023) [25].

Enquanto esses planos demonstram o futuro planejado pelas concessionárias e seus investimentos para a expansão da rede de distribuição para atender a população. Um estudo sobre o perfil do consumo de energia e do número de consumidores dividido em categorias de uso pode ser visto abaixo com dados de 2007 até 2017.



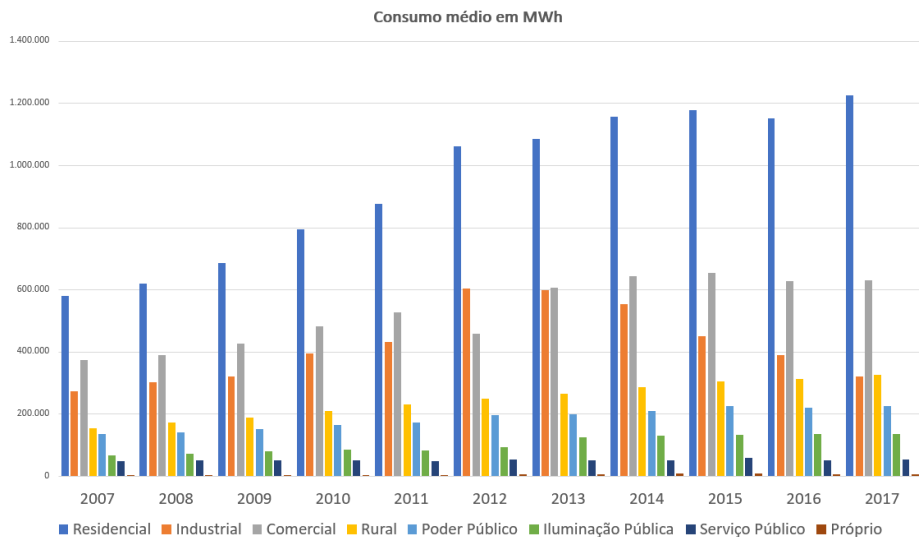


Figura 11 - Consumo em MW/h por tipo de cliente registrador (autoria própria) [2X].

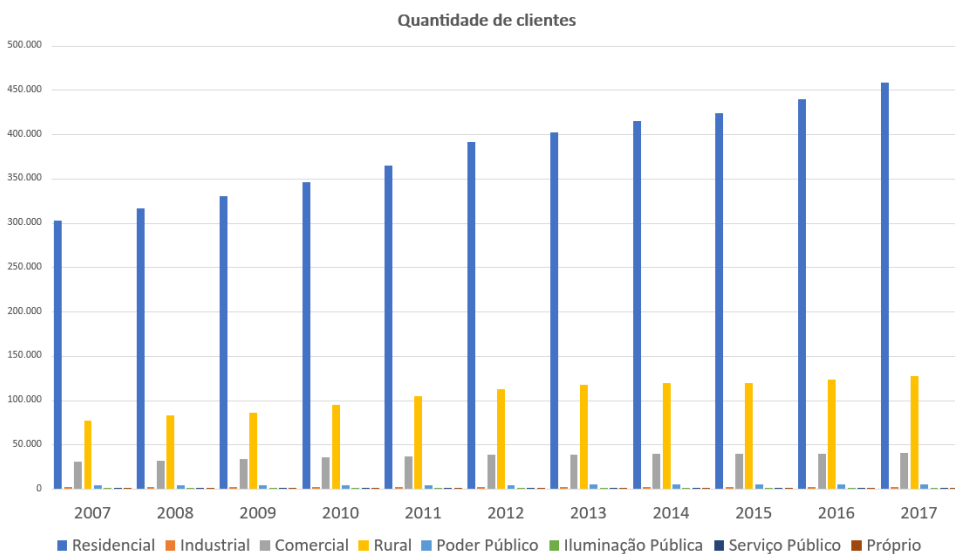


Figura 12 - Quantidade de clientes por categoria de uso (autoria própria).

Segue uma série de observações sobre o crescimento do consumo de energia em MW/h e do número total de clientes dos anos de 2007 a 2017 em cada categoria:

- Residencial: Crescimento no consumo de 112% e de 51% no número de clientes, uma residência pode representar valores associados a uma única pessoa ou um grupo familiar maior em centros urbanos, de forma simplista pode se dizer que consumo foi o dobro da quantidade de novos clientes inseridos na rede, indicando que cada residência consome mais com o passar do tempo.

- Industrial: Crescimento de 18% no consumo e o único caso de diminuição no número de clientes de 25% (de 2.252 para 1.685). Este caso indica que ou um grande número de indústrias saíram de Rondônia e as que permaneceram aumentaram suas atividades e possivelmente expandiram gerando o aumento de consumo, ou que uma quantidade maior de indústrias saiu do estado e foram substituídas por indústrias novas que apresentam um perfil de consumo maior. Dentre atividades industriais do estado é possível destacar mineração de casiterita e processamento de matéria prima como siderúrgicas e madeireiras.
- Comercial: Crescimento de 69% em consumo e 32% de clientes. Apresenta um crescimento similar ao residencial de consumo ser o dobro de clientes, mas levando em consideração que o número de comércios é aproximadamente onze vezes menor que o de residências (40.456 contra 458.222), com consumo sendo apenas metade (629.935 contra 1.225.446) residencial. Isso pode ser atribuído ao fato que comércios apresentam máquinas de alto consumo elétrico de uso contínuo como frigoríficos em supermercados.
- Rural: Crescimento de 111% em consumo e 66% de clientes. Acompanha o crescimento residencial e comercial descrito anteriormente, como o estado apresenta grande atividade agropecuária não é surpreendente que população fora de centros urbanos também tenham crescido, como mencionando anteriormente muitos projetos do governo como Luz para Todos tem acessibilidade a energia elétrica como um foco que faz desse crescimento algo consistente com o resto.
- Poder Público, Serviço Público e Iluminação Pública: Nas categorias listadas temos o governo do estado como cliente e com crescimento planejado para fornecer infraestrutura básica tanto a população como órgãos necessários. Em termos de números apenas o poder público apresenta um grande número de clientes (4.703 clientes em 2017 com um crescimento de 36%) enquanto os outros são apenas algumas centenas (280 para iluminação e 267 para serviços). Dentre os três a iluminação teve o maior crescimento de consumo de 103% que acompanha as ideias discutidas sobre o setor de distribuição de Rondônia ter um perfil expansionista, fazendo a iluminação pública acompanhar esse progresso.
- Próprio: São os casos de clientes que possuem geração própria para se abastecer, mas se encontram conectados à rede de distribuição de forma regular. Apresentam números totais pequenos de clientes (142 em 2017) com apenas 23% de crescimento, mas consumo maior de 62%.

No total Rondônia teve um crescimento no seu número total de clientes de 52% (416.276 em 2007 e 632.946 em 2017) e consumo em 79% (1.627.452 em 2007 e 2.920.273 em 2017 ambos em MW/h). O consumo de cada município de forma individual é visível no anexo A no mesmo formato de MW/h, os dados sobre a quantidade de consumidores de cada município apresentavam erros e foi informado os responsáveis na SEPOG (Secretaria do Estado de Planejamento, Orçamento e Gestão).

A distribuição para esses municípios começa inicialmente das subestações da concessionária seguida de alimentadores que dividem a rede podendo cobrir bairros ou até municípios inteiros dependendo da escala do consumo. Essa expansão física de rede requer um grande investimento para construção de subestações, equipamento especializado como relés de proteção e transformadores de corrente, outros mais comuns como os postes e cabos necessários

A quantidade de subestações e alimentadores são proporcionais ao consumo da região, usando dados de Porto Velho em 2014 podemos encontrar 49 alimentadores distribuídos entre 5 subestações (Porto velho, Tiradentes, Rio Madeira, Alfavile e Areal) enquanto para um município menor como de Itapuã apenas uma subestação com um único alimentador era necessária para abastecer a região. Um mapa modificado das subestações existentes em 2022 é visível em anexo assim como a conexão unifilar do sistema de 2017 em outro anexo.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O capítulo do livro utiliza dados de múltiplas fontes divididas em dois tipos de pesquisa, históricas de Rondônia e técnicas sobre o sistema elétrico de caráter descritivo e exploratório sobre os assuntos abordados.

Para a elaboração do histórico de Rondônia todos os documentos consultados são de fontes governamentais que apresentam a história do estado e outros trabalhos que apresentam informações complementares sobre formação, migrações decorrentes e eventos históricos como construção da estrada de ferro e os ciclos da borracha.

Isso inclui outros textos originalmente sobre comunidades ribeirinhas que podem atribuir mais valor comentando sobre hidrelétricas e rios, a construção de estrada de ferro e migrações decorrentes desse projeto por outros trabalhos acadêmicos.

A parte elétrica é composta de textos técnicos que descrevem o funcionamento de certas máquinas elétricas como motores em associação a outras máquinas elétricas como bobinas e pistões associado a diferentes tipos de geração e como elas são encontradas em Rondônia, assim como os principais atores responsáveis por supervisionar a rede elétrica nacional.

Na rede de distribuição uma extensa pesquisa é elaborada usando dados fornecida pela ANEEL em seu site ou pesquisas similares a desse trabalho com estatísticas relevantes sobre consumo e investimentos no setor de distribuição elétrica em Rondônia. Cálculos sobre taxa de crescimento foram aplicados sobre os dados utilizados a fim de melhor observar os valores de cada categoria individualmente realçando pontos de interesse para discussão.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Rondônia apresenta um perfil único para seu crescimento originalmente isolado e de pouco interesse do governo teve seu valor encontrado com o potencial de geração energético anos mais tarde. O aumento do consumo pela população e como essa energia é utilizada em todos os setores demonstraram claro crescimento da rede física sendo expandida pela concessionária motivada por programas do governo como Luz para todos, assim como uma crescente base de clientes novos que são conectados todo ano.

Portanto, a forma como essa energia tem sido consumida também deixou claro que o aumento não foi apenas na quantidade de pessoa, mas como cada indivíduo consome mais energia, isso reflete a realidade de um estado em crescimento em que não é apenas a quantidade de clientes, mas o aumento da qualidade do nível de vida.

## REFERÊNCIAS

BICHELS, Arlei. **Sistemas Elétricos de Potência: Métodos de Análise e Solução**. Curitiba: EDUTFPR, 2018. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4610/6/sistemaseletricopotencia\\_iniciais.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4610/6/sistemaseletricopotencia_iniciais.pdf). Acesso em: 24 ago. 2023. [1]

GOVERNO DE RONDÔNIA. **Histórico**: Portal da Transparência. Rondônia: RONDÔNIA, 2023. Disponível em: <https://transparencia.der.ro.gov.br/Institucional/Historico>. Acesso em: 24 ago. 2023. citação (GOVERNO DE RONDÔNIA, 2023) [2]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **A ANEEL**: Agência Nacional de Minas e Energia. Distrito federal: BRASILIA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acao-a-informacao/institucional/a-aneel>. Acesso em: 26 ago. 2023. [3] Citação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022)

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS. **O que é ONS**. Distrito federal: BRASILIA, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 26 ago. 2023. [4] Citação (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2023)

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. ONS. **O que é SIN**. Distrito federal: BRASILIA, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 26 ago. 2023. [5]

RONDÔNIA: OCUPAÇÃO E AMBIENTE. Rondônia: UNIR, 2010. Disponível em: <http://www.revistapresenca.unir.br/boletim-presen%C3%A7a/07dorisvalderdiasnunesrondoniaocupacaoeambiente.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2023. [6] Citação (NUNES, 2010)

OLIVEIRA, Juliana Nunes; FERNANDES, Alexandre Lúcio; RIBAS, Diógenes Queiroz; SILVA, Emerson; MUGRABI, Ivo Mateus; JOSÉ, Willames. **Estrada de Ferro Madeira-Mamoré: o abandono da história**. Porto Velho: Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação XXIII Prêmio Expocom, 2016. Disponível em: <https://www.portalintercom.org.br/anais/norte2016/expocom/EX49-0392-1.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2023. [7] Citação (OLIVEIRA et al., 2016)

GOVERNO DO ESTADO DE RONDÔNIA. **Ciclos migratórios fazem parte da história dos 34 anos de Rondônia**. Rondônia: Governo do Estado de Rondônia, 2015. Disponível em: <https://rondonia.ro.gov.br/ciclos-migratorios-fazem-parte-da-historia-dos-34-anos-de-rondonia-conheca/>. Acesso em: 28 ago. 2023. [8] Citação (GOVERNO DO ESTADO DE RONDÔNIA, 2015)

CUNHA, Elton alves da. **A RECENTE OCUPAÇÃO: MIGRAÇÃO E TERRITORIALIZAÇÃO EM RONDÔNIA**. Florianópolis - Santa Catarina: XXVIII Simpósio Nacional de História, 2015. Disponível em: [http://www.snh2015.anpuh.org/resources/anais/39/1434397453\\_ARQUIVO\\_ARECENTEOCUPACAO-editado.pdf](http://www.snh2015.anpuh.org/resources/anais/39/1434397453_ARQUIVO_ARECENTEOCUPACAO-editado.pdf). Acesso em: 28 ago. 2023. [9]

TOP SUN ENERGIA SOLAR. **Marca Histórica**: Brasil ultrapassa 22 GW de energia solar em 2022. Santa Catarina: Globo G1, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/top-sun/top-sun-energia-solar/noticia/2023/01/20/marca-historica-brasil-ultrapassa-22-gw-de-energia-solar-em-2022.ghtml>. Acesso em: 30 ago. 2023. (TOP SUN ENERGIA SOLAR, 2023) [10]

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Matriz Energética**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 30 ago. 2023. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023) [11]

SAIDEL. **Geração Termelétrica**. São Paulo: USP, 2013. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3361605/mod\\_resource/content/1/Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3361605/mod_resource/content/1/Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termel%C3%A9trica.pdf). Acesso em: 2 set. 2023. (SAIDEL, 2013) [12]

HIGUERA, Leidy Milena Mora. **Análise de redução de custos de transporte de óleo diesel para as termelétricas das áreas isoladas de Rondônia**. 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. (HIGUERA, 2017) [13]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Transmissão**: Outorga. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/transmissao/outorga>. Acesso em: 2 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [14]

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS. **PLANO DA OPERAÇÃO ELÉTRICA 2014/2015 PEL 2013: RELATÓRIO EXECUTIVO**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: [https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEL2014-2015\\_Sumario\\_Executivo.pdf](https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEL2014-2015_Sumario_Executivo.pdf). Acesso em: 2 set. 2023. (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2013) [15]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Distribuição**: Regulação. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/regulacao>. Acesso em: 2 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [16]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Leilões**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/leiloes>. Acesso em: 4 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [17]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Distribuição**: Fiscalização. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/fiscalizacao>. Acesso em: 11 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [18]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Distribuição**: Outorgas. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/outorgas>. Acesso em: 11 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [19]

Steven J. Rainey e Maura C. Araújo Rainey. **Perspectivas ribeirinha sobre os impactos da construção de usinas hidrelétricas no rio Madeira em Rondônia**, *Confins* [Online], 29 | 2016, posto online no dia 19 dezembro 2016. Acesso em: 18 out 2023. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/11621>; DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.11621> [20]

IBGE. TerraBrasilis. **Mapas e Cartografia**: Mapa Político do Estado de Rondônia. [S. l.]: IBGE, 2009. Disponível em: <http://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/mapa-politico-do-estado-de-rondonia.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023. (IBGE, 2009) [21]

BRITO, Thiago da Silva Vieira. **FUNCIONAMENTO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA**. Campina Grande - Paraíba: UFCG, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/18145/THIAGO%20DA%20SILVA%20VIEIRA%20BRITO%20-%20TCC%20ENG.%20EL%C3%89TRICA%202010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 set. 2023. (BRITO, 2010) [22]

DELIZA, Eduardo Egidio Vicensi; ALMEIDA, Fabrício Moraes de; FILHO, Flávio de São Pedro; ARENHARDT, Valeria; GUIMARÃES, Roberto Simplício; CALDERARO, Izan Fabrício Neves. **OS CENÁRIOS E AS PERSPECTIVAS DE EXPANSÃO PARA AS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCHs) NO ESTADO DE RONDÔNIA**. Rondônia: Stricto Sensu, 2021. Disponível em: <https://sseditora.com.br/wp-content/uploads/10-OS-CENARIOS-E-AS-PERSPECTIVAS-DE-EXPANSAO-PARA-AS-PEQUENAS-CENTRAIS-HIDRELETRICAS-PCHs-NO-ESTADO-DE-RONDONIA.pdf>. Acesso em: 21 set. 2023. (DELIZA et al., 2023) [23]

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS. **Mapas**. [S. l.]: ONS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 18 set. 2023. (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2023) [24]

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **Relatórios e indicadores**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/distribuicao>. Acesso em: 22 set. 2023. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022) [25]

AGUASAMAZONICAS. **Madeira**. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://pt.aguasamazonicas.org/bacia/bacias-principais/madeira>. Acesso em: 30 set. 2023. (AGUASAMAZONICAS, 2015) [26].

Group GNPW. **Como funcionam as usinas termelétricas?**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/usina-termeletrica/como-funcionam-as-usinas-termeletricas/>. Acesso em: 27 dez. 2023. (GNPW, 2020) [27]

Caus, Tuane Regina. **Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração**. Santa Maria – Rio Grande do Sul: UFSM, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/1380>. Acesso em: 27 dez. 2023. (CAUS, 2014) [28]

## ANEXOS

### Anexo A – Tabela de consumo dos municípios

Região (consumo)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Alta Floresta D'Oeste	17.192	17.689	18.642	20.486	21.161	23.309	25.154	26.412	28.206
Alto Alegre dos Parecis	5.549	6.176	6.930	7.666	7.977	8.799	9.346	10.414	10.497
Alto Paraíso	10.136	12.163	13.231	13.802	14.932	17.060	17.685	20.217	19.369
Alvorada D'Oeste	11.495	12.241	12.932	14.929	15.499	16.530	17.062	18.026	18.545
Ariquemes	133.005	141.846	146.949	164.658	181.893	212.445	200.796	226.656	218.585
Buritis	24.218	24.517	24.987	28.277	31.097	33.417	37.373	40.511	40.056
Cabixi	4.923	5.333	5.649	6.418	6.893	7.508	8.196	9.161	9.441
Cacaulândia	3.306	3.568	3.868	4.331	4.634	5.145	5.466	5.743	5.998
Cacoal	103.417	107.890	113.726	125.241	134.544	144.646	147.363	162.623	172.013
Campo Novo de Rondônia	2.741	3.359	4.271	5.113	5.742	6.510	7.424	7.747	8.060
Candeias do Jamari	12.660	13.300	14.081	16.373	19.067	25.116	26.390	27.768	29.707
Castanheiras	1.425	1.715	1.881	2.015	2.175	2.287	2.557	3.134	3.979
Cerejeiras	16.922	18.069	19.337	21.161	22.493	24.396	24.534	28.041	28.960
Chupunguaia	7.415	8.997	9.847	13.941	18.173	22.280	19.344	20.775	22.948
Colorado do Oeste	19.194	20.147	21.520	22.019	22.635	24.283	24.443	26.061	27.285
Corumbiara	4.007	5.651	6.259	6.939	7.266	7.957	8.367	9.654	10.032
Costa Marques	9.156	9.888	10.032	10.224	11.265	12.574	13.420	14.617	14.816
Cujubim	11.979	14.014	16.365	18.007	19.516	21.279	20.457	22.277	22.683
Espigão D'Oeste	33.406	34.144	40.627	44.501	47.436	50.261	52.114	58.758	61.739
Governador Jorge Teixeira	5.663	5.934	6.365	6.770	7.122	7.515	7.726	6.073	8.331
Guajará-Mirim	32.803	33.711	35.358	38.905	41.338	45.695	48.025	50.552	52.121
Itapuã do Oeste	13.067	17.101	14.796	16.459	21.214	25.459	22.592	23.366	50.051
Jaru	81.528	87.821	89.366	95.442	101.721	113.910	112.900	115.132	117.934
Ji-Paraná	157.795	171.771	185.271	195.911	200.243	222.478	226.314	248.670	253.724
Machadinho D'Oeste	19.250	18.227	19.571	23.057	26.091	32.507	31.936	36.580	36.517
Ministro Andreazza	5.521	6.152	6.350	7.059	7.374	8.170	8.523	9.496	9.780
Mirante da Serra	8.556	8.877	9.618	10.396	10.964	11.864	12.482	13.133	13.845
Monte Negro	9.029	9.672	10.224	11.296	12.142	13.756	14.479	16.237	15.447
Nova Brasilândia D'Oeste	10.768	13.136	13.342	14.672	15.302	16.739	17.883	18.796	19.182
Nova Mamoré	12.255	13.129	13.694	15.502	17.317	22.296	23.271	24.761	26.755

Nova União	4.010	4.315	4.711	5.296	5.463	5.843	5.966	4.960	6.473
Novo Horizonte do Oeste	5.374	7.061	6.698	7.264	7.687	7.943	8.381	9.077	9.520
Ouro Preto do Oeste	43.286	44.151	46.138	49.455	51.972	56.241	57.736	61.333	61.559
Parecis	2.235	1.998	2.487	2.613	2.824	3.130	3.514	3.905	5.484
Pimenta Bueno	44.773	46.731	55.303	60.224	63.469	68.834	72.047	78.391	80.568
Pimenteiras do Oeste	1.218	1.287	1.560	1.880	2.031	2.297	2.406	2.509	2.701
Porto Velho	477.227	512.276	595.067	742.384	825.242	982.327	1.068.790	1.104.875	1.027.822
Presidente Médici	20.312	20.221	21.325	22.681	23.918	25.522	26.944	30.359	31.746
Primavera de Rondônia	2.082	2.397	2.980	3.218	3.337	3.663	4.006	4.187	4.494
Rio Crespo	2.327	2.792	3.524	4.941	5.163	4.242	4.923	5.998	2.777
Rolim de Moura	67.959	68.087	70.495	77.078	92.546	108.514	114.796	125.580	122.885
Santa Luzia D'Oeste	6.227	7.222	8.899	9.166	9.383	10.213	10.690	11.328	11.101
São Felipe D'Oeste	2.905	3.553	4.200	4.256	4.334	4.593	4.812	1.901	5.440
São Francisco do Guaporé	10.875	11.050	11.812	12.363	14.077	15.188	16.266	18.925	19.823
São Miguel do Guaporé	12.176	13.070	17.572	21.378	21.836	23.501	57.156	36.566	37.506
Seringueiras	7.199	7.493	8.080	9.328	10.211	11.345	12.521	12.841	13.577
Teixeirópolis	3.512	3.737	4.051	4.476	4.954	5.169	5.288	6.226	6.317
Theobroma	6.505	7.002	7.506	8.202	8.675	9.415	9.961	10.546	11.280
Urupá	8.263	8.832	9.534	10.317	11.002	11.497	12.154	13.420	13.747
Vale do Anari	3.951	4.448	4.988	5.485	6.349	7.045	6.662	7.195	13.747
Vale do Paraíso	5.351	5.648	5.708	6.066	6.423	6.865	7.334	7.708	7.819
Vilhena	101.308	113.044	119.183	127.552	135.003	153.503	158.639	165.726	176.160
Rondônia	1.627.456	1.742.653	1.906.910	2.177.193	2.371.125	2.713.081	2.864.614	3.024.947	3.029.152



## Anexo b – Tabela de consumo 2007 a 2017

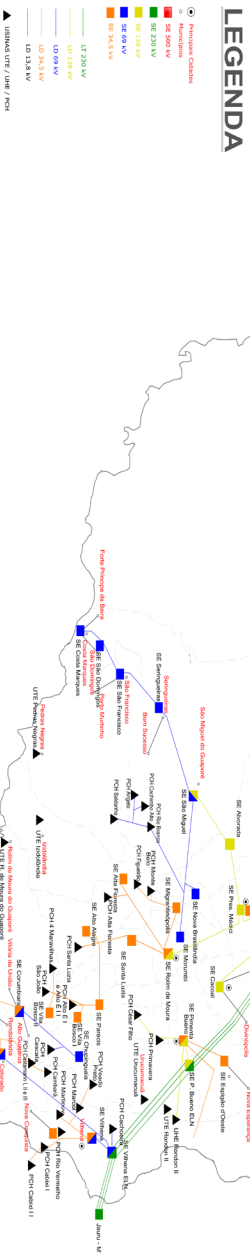
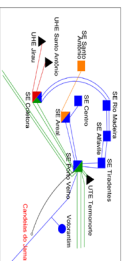
Consumo em MWh	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Residencial	579.235	619.770	685.006	793.954	875.462	1.060.690	1.084.000	1.157.000	1.177.000	1.151.499	1.225.446
Industrial	271.058	300.797	320.708	394.085	432.204	603.134	599.000	553.000	450.000	388.944	320.771
Comercial	371.994	387.879	426.766	480.268	527.470	457.204	606.000	642.000	653.000	627.581	629.835
Rural	154.164	171.144	188.778	208.048	229.592	249.313	264.000	286.000	305.000	311.149	325.764
Poder Público	134.238	138.985	151.604	163.489	172.350	195.237	199.000	208.000	224.000	220.113	225.066
Iluminação Pública	66.832	71.544	79.368	83.990	82.532	91.604	123.000	130.000	131.000	133.664	135.687
Serviço Público	46.638	49.228	50.852	49.529	47.825	52.009	49.000	49.000	59.000	50.599	52.352
Próprio	3.294	3.307	3.831	3.831	3.695	3.893	6.000	7.000	8.000	5.467	5.352
Total	1.627.452	1.742.655	1.906.913	2.177.194	2.371.129	2.713.084	2.930.000	3.032.000	2.997.000	2.889.016	2.920.273

## Anexo c – Tabela de clientes 2007 a 2017

Consumidores totais	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Residencial	302.779	316.788	330.604	345.677	364.927	391.281	402.119	415.354	423.404	439.160	458.222
Industrial	2.252	2.213	2.138	2.125	2.108	2.165	1.977	1.970	1.920	1.824	1.685
Comercial	30.722	31.970	33.808	35.407	36.868	38.258	38.382	39.141	39.168	39.842	40.456
Rural	76.593	82.304	85.959	94.801	104.315	112.030	117.344	119.198	119.529	122.917	127.190
Poder Público	3.470	3.712	3.811	4.002	4.217	4.273	4.501	4.598	4.675	4.664	4.703
Iluminação Pública	158	162	175	184	191	222	246	273	281	281	280
Serviço Público	187	203	207	196	202	204	214	214	226	252	267
Próprio	115	119	122	123	121	120	118	120	138	140	142
Total	416.276	437.471	456.824	482.515	512.949	548.553	564.892	580.868	589.341	609.080	632.945

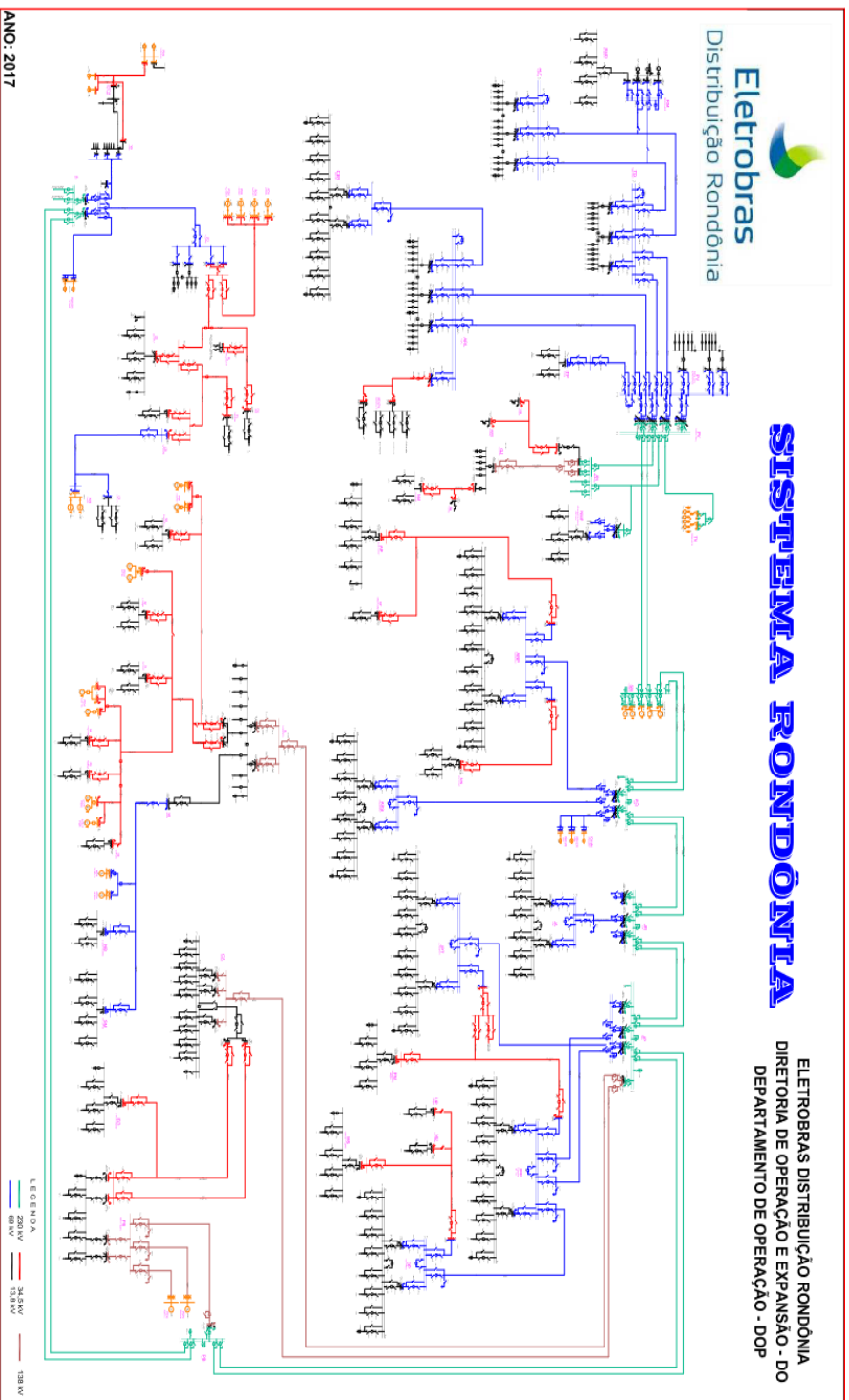
# Anexo d – mapa de subestações de rondônia 2022.

Detalhe das Subestações de Porto Velho



Adaptado do Plano de Negócios 2022/2024

FONTE: ASSESSORIA DE PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO - ENERGISA RONDÔNIA - JAN/2022



## CAPÍTULO 3

# ANÁLISE DO POWER BI DE DADOS REAIS DE 2013 ATÉ O INÍCIO DA PANDEMIA SOBRE A EVOLUÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA LIMPA UTILIZANDO INTELIGÊNCIA EMPRESARIAL: REGIÃO DO SUL DO BRASIL

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná. PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP. Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Ygor Alves Vieira**

Acadêmico em engenharia de controle automação. Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho. Jacarezinho – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8473992714192479>

### **Fabio Rodrigo Milanez**

Faculdade da Industria Senai Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

### **Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

### **Marcio Jacometti**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná . Departamento acadêmico das ciências humanas e sociais aplicadas (DACHS). Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8509336134084374>

### **Iago Maran Machado**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná . Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/4733940365047328>

### **Edinei Aparecido Furquim dos Santos**

Governo do Paraná Secretaria de estado da Fazenda. Maringá – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8706436030621473>

### **Henrique Franciz Ximenes de Andrade Bilbao**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão-PR  
<https://www.linkedin.com/in/henrique-ximenes-14512b113/>

### **Henrique Cavalieri Agonilha**

Graduando na Universidade Filadélfia (Unifil) . Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

### **Kazuyochi Ota Junior**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná . Mestre PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP. Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/3845751794448092>

**André Luís Shiguemoto**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/9243656534211182>

**Miguel Angel Chincaro Bernuy**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0848702819711420>

**Michelle Eliza Casagrande Rocha**

Universidade Norte do Paraná – Unopar – Kroton  
Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

**Joao Roberto Sartori Moreno**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/2121271692037520>

**Vicente de Lima Gongora**

Faculdade da Industria Senai. Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

**José Augusto Fabri**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Computação (DACOM)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/1834856723867705>

**Marcos Antônio de Matos Laia**

Universidade Federal de São Joao Del Rei  
Departamento De Ciência Da Computação – UFSJ  
São Joao Del Rei - PR  
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

**Daniel Almeida Colombo**

Centro Universitário UniSenai PR. Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0172888278106060>

**RESUMO:** O estudo investiga a viabilidade técnica e econômica do investimento em energia solar fotovoltaica para uma indústria, em conformidade com a Resolução Normativa da ANEEL nº 482. Com base em análises financeiras, o investimento de R\$ 170.000,00 resultou em um *payback* descontado de 5 anos e 8 meses, uma taxa interna de retorno de 20,13%, e um valor presente líquido positivo de R\$ 299.192,39, indicando viabilidade econômica. Comparado à poupança, o investimento é mais atrativo, proporcionando retorno financeiro superior. Além da energia solar, outras fontes de energia limpa: como eólica, biomassa e hidrelétrica são consideradas como alternativas de investimento, dependendo das condições locais e das necessidades energéticas do consumidor. O estudo visa analisar dados reais de 2013 até o início da pandemia em estados do sul do Brasil, utilizando o software Power BI, para inferir conclusões relevantes nesse período. Este artigo se encerra com uma conclusão das inferências obtidas e sugere futuros trabalhos

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia solar, Energia Limpa Renovável, Análises dados

## ANALYSIS OF REAL DATA FROM 2013 TO THE ONSET OF THE PANDEMIC ON THE EVOLUTION OF CLEAN ENERGY SOURCES USING BUSINESS INTELLIGENCE WITH POWER BI: SOUTHERN REGION OF BRAZIL

**ABSTRACT:** The study investigates the technical and economic feasibility of investing in photovoltaic solar energy for an industry, in accordance with ANEEL Resolution Normative No. 482. Based on financial analyses, the investment of R\$ 170,000.00 resulted in a discounted payback period of 5 years and 8 months, an internal rate of return of 20.13%, and a positive net present value of R\$ 299,192.39, indicating economic viability. Compared to savings, the investment is more attractive, providing a superior financial return. In addition to solar energy, other sources of clean energy such as wind, biomass, and hydropower are considered as investment alternatives, depending on local conditions and consumer energy needs. The study aims to analyses real data from 2013 until the beginning of the pandemic in southern states of Brazil, using Power BI software, to draw relevant conclusions during this period. This article concludes with a summary of the inferences drawn and suggests future work.

**KEYWORDS:** solar; renewable clean energy; Data Analysis

## INTRODUÇÃO

Uma das transformações mais significativas da sociedade urbana desde o início do período de industrialização é o aumento do consumo de recursos, como matérias-primas e energia. Desse contexto de consumo crescente, emergem indicadores cruciais que possibilitam a formulação de estratégias para o desenvolvimento sustentável, num cenário paradoxal em que o progresso não garante, necessariamente, a sustentabilidade a longo prazo (Chen, 2024).

Entre esses indicadores, destacam-se a viabilidade técnica, econômica e social das fontes energéticas. Assim, é de suma importância construir e validar análises relacionadas à produção de energia limpa e sustentável, especialmente nos setores capazes de demonstrar seu desempenho conforme esses critérios de viabilidade.

Estudos que abordam os impactos ambientais da geração de energia limpa são relevantes e demandam uma organização complexa das atividades humanas (Fernandes et al., 2020), contudo, não são o foco deste trabalho. Portanto, uma análise crucial que certamente contribuirá para o planejamento relacionado à energia limpa e sustentável é compreender em que medida e como ocorre a evolução da produção nos principais setores desse tipo de energia.

Já o setor industrial no Brasil figura como um dos maiores consumidores de energia elétrica, absorvendo cerca de 35% do consumo total em 2022, conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esse elevado consumo tem um impacto significativo nos custos das indústrias, visto que, no mesmo ano, o custo da energia elétrica representou 11,4% dos custos totais de produção das empresas industriais brasileiras, conforme apontado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2022).

Além disso, o Brasil enfrenta o desafio de ter uma das tarifas de energia elétrica mais elevadas do mundo, superando países como França, Canadá, México e Estados Unidos, o que encarece ainda mais o processo fabril e motiva as empresas a buscarem alternativas para mitigar esses custos (CNI, 2021). Essa realidade se tornou mais evidente em 2021, quando o país atravessou um período de estiagem que se estendeu até meados de 2022 (FIEP, 2022). Uma pesquisa industrial realizada no final de 2021 revelou que o terceiro trimestre do mesmo ano foi marcado por uma intensa pressão nos custos industriais, incluindo os custos com energia elétrica, o que afetou a recuperação econômica (FIEP, 2022).

Diante desse cenário, o Brasil apresenta uma vantagem natural para diversificar sua matriz energética, especialmente por meio da geração fotovoltaica. A implementação da geração distribuída no ponto de consumo, utilizando painéis fotovoltaicos instalados nas próprias empresas, emerge como uma opção viável. Essa abordagem não apenas alinha-se às diretrizes de planejamento energético da ANEEL, mas também contribui para o incremento esperado da participação da energia solar na matriz energética, passando de 2,4% para 3,5% até 2025, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021).

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo investigar a viabilidade técnico-econômica do uso de um sistema fotovoltaico (SFV) na modalidade de geração distribuída (GD), destacando sua contribuição para uma unidade tarifada no grupo B.

Além da energia solar fotovoltaica, outras fontes de energia limpa que merecem consideração para empresas industriais incluem:

Energia eólica: Aproveitamento da energia cinética do vento para gerar eletricidade.

Energia hidrelétrica: Utilização do fluxo de água em rios para produção de energia elétrica.

Biomassa: Conversão de resíduos orgânicos em energia, como bagaço de cana-de-açúcar ou resíduos agrícolas.

## GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Essas fontes, quando combinadas com estratégias de eficiência energética, podem ajudar a reduzir os custos operacionais das indústrias, além de contribuírem para a sustentabilidade ambiental.

Conforme as disposições estabelecidas pela Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, posteriormente modificada pela Resolução Normativa da ANEEL nº 687/2015, os consumidores têm permissão para instalar geradores em suas unidades consumidoras e utilizar o sistema elétrico da concessionária de energia elétrica para injetar o excedente de energia gerada. Esse excedente é convertido em créditos de energia válidos por 60 meses, os quais podem ser utilizados para abater o consumo da própria unidade nos meses seguintes ou de outras unidades consumidoras previamente cadastradas e atendidas pela mesma distribuidora, desde que tenham o mesmo titular.

O conceito de autoconsumo remoto refere-se a unidades consumidoras de mesma titularidade que possuem uma unidade consumidora com microgeração distribuída em local diferente das demais unidades consumidoras.

Para unidades consumidoras conectadas em baixa tensão (grupo B), mesmo que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, é devido o pagamento referente ao custo de disponibilidade. A Figura 1 abaixo ilustra o sistema de compensação de energia e as partes envolvidas.

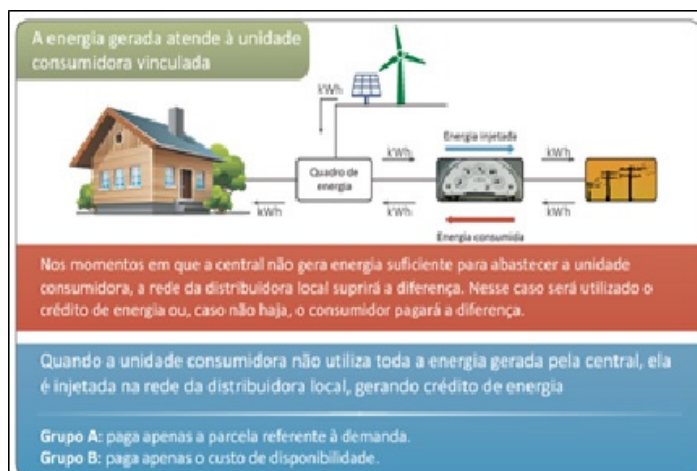


Figura 1 – Sistema de Compensação de Energia

Fonte: (ANEEL, 2016)

Mesmo com dados de aproximadamente 4 anos, no estado em análise, a energia solar é responsável por quase 95%. Posto isso, apesar de outras fontes serem citadas, a solar deverá ter maior enfoque.



De um modo geral, as empresas buscam reduzir custos operacionais, e umas das formas de atingir esse objetivo é investindo em energia solar. Tendo em vista a dificuldade em planejar investimentos nessa área, administradores procuram estudar técnicas de análise para viabilizar projetos dessa natureza.

O objetivo desse tópico é revisar trabalhos já publicados com assuntos correlatos a pesquisa referente a viabilidade técnica financeira da implantação da energia solar em uma unidade consumidora.

De acordo com Souza e Penha (2020), durante o desenvolvimento de estudo de viabilidade econômica de um projeto solar, constataram que o investimento inicial de R\$ 51.200,00 reais se apresentou viável, com *payback* positivo em 4 anos, TIR de 30% e VPL positivo de R\$ 332.000,00 em 15 anos, onde a maior dificuldade encontrada foi o alto valor inicial de investimento. Foi utilizada a TMA de 5%, a mesma utilizada na análise da Sulfiltros.

Um estudo realizado em uma unidade hoteleira em Tapes, RS, na concessionária CEEE, custo inicial de R\$ 144.000,00 reais, gerando 4.000 kWh/mês, o *payback* positivo foi de 4 anos e 7 meses, TIR de 12,64%, maior que a TMA de 10% (Abel et al., 2019).

## **MATERIAIS E MÉTODOS: POWER BI DESKTOP:**

O Power BI Desktop é a versão gratuita da ferramenta, permitindo conectar-se a várias fontes de dados, importar, transformar e modelar dados, criar visualizações interativas e realizar análises avançadas. Já o Power BI Pro é a versão paga, oferecendo recursos extras de colaboração, segurança e integração com outros serviços da Microsoft. Ambas as versões têm vantagens como facilidade de uso, ampla conectividade de dados e capacidade de compartilhamento e colaboração. Em resumo, são ferramentas poderosas para análise de dados e geração de relatórios.

A versão empregada no desenvolvimento dessa pesquisa foi a desktop.

Na seção de resultados, para clarificar o texto, os dados empregados na geração das respectivas figuras são: os anos de 2013 a 2020, com a potência total gerada por meio de energia limpa aplicados na Figura 2, já a Figura 3 fez um gráfico de setores com todos os tipos de energia limpa analisados, finalmente a Figura 4, mostrou por setores o crescimento da energia solar, a qual foi amplamente maior.

## **DESENVOLVIMENTO**

O crescimento da energia limpa é fundamental para o planeta por várias razões importantes:

**Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa:** As fontes tradicionais de energia, como o carvão e o petróleo, são responsáveis por uma grande parte das emissões de gases de efeito estufa que contribuem para as mudanças climáticas. O uso de energias limpas, como solar, eólica e hidrelétrica, ajuda a reduzir essas emissões, ajudando a mitigar o aquecimento global.

**Preservação dos Recursos Naturais:** O uso de energia limpa geralmente envolve recursos renováveis, como a luz solar, o vento e a água. Ao contrário dos combustíveis fósseis, esses recursos são virtualmente inesgotáveis e não se esgotam com o tempo. Isso ajuda a preservar os recursos naturais do planeta para as gerações futuras.

**Diversificação da Matriz Energética:** Dependência excessiva de uma única fonte de energia pode ser arriscada do ponto de vista econômico e ambiental. Diversificar a matriz energética com fontes limpas oferece maior segurança energética e reduz a vulnerabilidade a interrupções de abastecimento e oscilações de preços.

**Criação de Empregos e Estímulo Econômico:** A transição para a energia limpa também pode estimular o crescimento econômico e a criação de empregos. Setores como energia solar, eólica e de tecnologia verde estão em expansão e oferecem oportunidades de emprego em áreas como engenharia, instalação, manutenção e pesquisa e desenvolvimento.

**Melhoria da Saúde Pública:** A queima de combustíveis fósseis para geração de energia está associada à poluição do ar e à liberação de poluentes prejudiciais à saúde, como partículas finas e óxidos de nitrogênio. Ao mudar para fontes de energia limpa, podemos reduzir esses impactos negativos na saúde pública e melhorar a qualidade do ar em nossas comunidades.

Uma estimativa de necessidade de crescimento de geração de energia no Brasil no período de análise é de

2013: Aproximadamente 483.000 GWh

2014: Aproximadamente 495.000 GWh

2015: Aproximadamente 505.000 GWh

2016: Aproximadamente 510.000 GWh

2017: Aproximadamente 520.000 GWh

2018: Aproximadamente 530.000 GWh

2019: Aproximadamente 540.000 GWh

2020: Aproximadamente 550.000 GWh

De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Brasil ou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

## RESULTADOS

A Figura 2 mostra a evolução do crescimento da energia limpa, ao longo dos anos fornecidos pela massa de dados, ressalta-se que facilita a inferência da soma do crescimento.

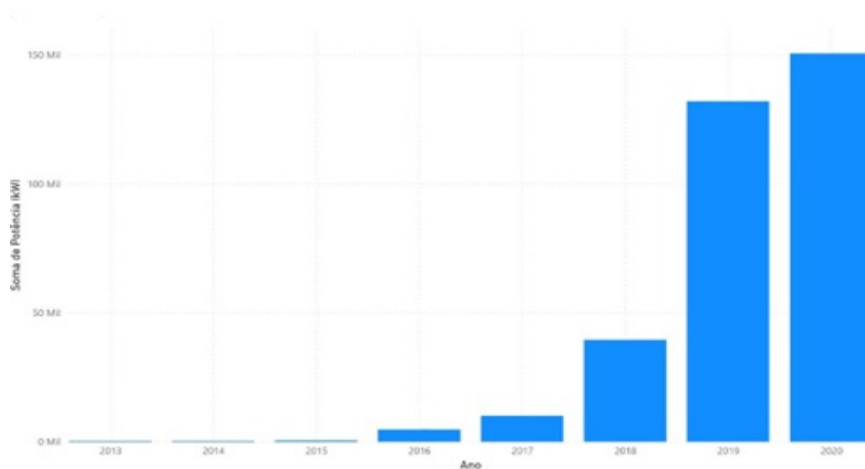


Figura 2 –Crescimento da Geração Energia Limpa

Fonte: Próprio Autor

Já a Figura 3 mostra, por meio de um gráfico de setores apresenta um maior percentual da geração da energia solar comparada as demais.

Esse resultado certamente foi obtido devido a pandemia. Devido a mesma, com a maior permanência das pessoas em suas residências, devido a mudança de comportamento nesse período, pode-se observar um crescimento acentuado nesse de 2019 a 2020. Outra observação relevante foi a estagnação da indústria nessa época, observa-se que é indústria de um modo geral e não indústrias específicas, como as de máscaras por exemplo.

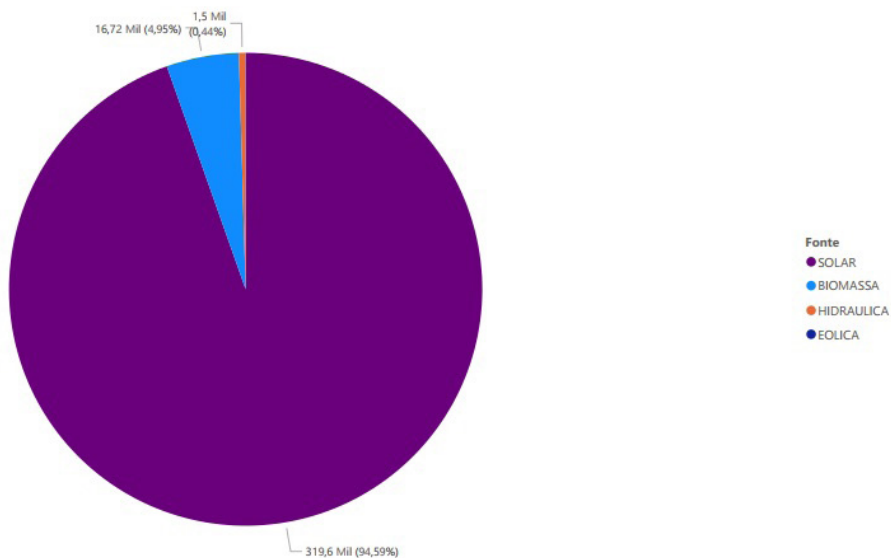


Figura 3 – Percentual das fontes de energia

Fonte: Próprio Autor

Além das observações supracitadas uma tendência de crescimento da energia solar pode ser observada, considerando todos os setores, como por exemplo o rural

E, finalmente a tendência de crescimento (linha preta) apresentada na figura 4 tem um comportamento linear de 2015 a 2020, com um comportamento similar ao do país.

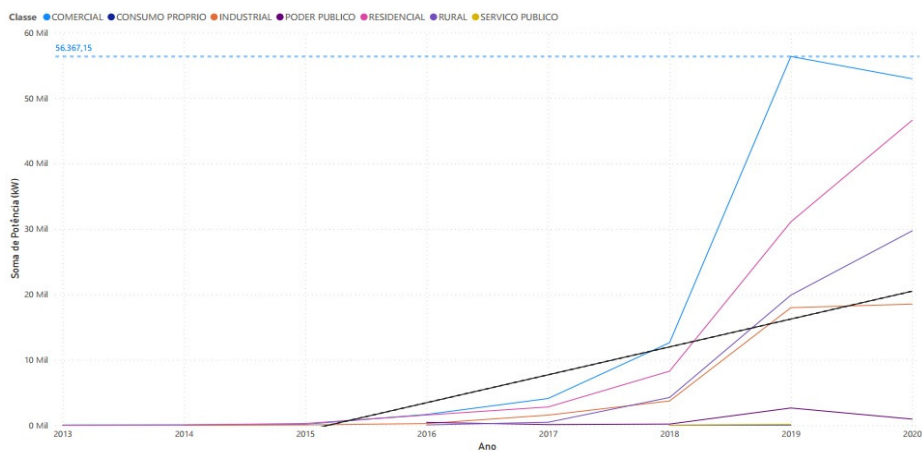


Figura 4 – Crescimento da Energia Solar em diferentes setores

Fonte: Próprio Autor

## CONCLUSÃO

Os resultados foram de surpreendentes analisando somente a massa de dados da planilha. Promissores, como se espera um crescimento da energia limpa, em especial na base analisada, de um estado que tem boa incidência solar, diferentemente de outras regiões como o Nordeste com 506 parques na atualidade, que viabiliza a energia eólica devido a presença de regiões com deslocamentos de ar.

Desse modo a crescente demanda por energia limpa, em particular a energia solar, reflete uma consciência global crescente sobre os impactos negativos das fontes tradicionais de energia, como o carvão e o petróleo, no meio ambiente e na saúde humana. A transição para a energia solar não é apenas uma necessidade urgente para mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também representa uma oportunidade significativa para impulsionar o desenvolvimento sustentável, criar empregos e promover a independência energética.

Futuros trabalhos, dados mais recentes, e endereçam analisar outras regiões do país e objetivar uma correlação entre os mesmos

## REFERÊNCIAS

ABEL, M.; Burger, R.; Carranza, E.; Piraino, P. "Bridging the Intention-Behavior Gap? The Effect of Plan-Making Prompts on Job Search and Employment." *American Economic Journal: Applied Economics*, v. 11, n. 2, pp. 284-301, 2019.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 26 ago. 2023.

CHEN, S.; Zhang, J.; Wei, Z.; Cheng, H.; Lv, S. "Towards Renewable-Dominated Energy Systems: Role of Green Hydrogen," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Custo da energia elétrica para a indústria. Brasília, DF: CNI, 17 nov. 2021. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/>. Acesso em: 13 out. 2022.

FIEP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO PARANÁ. Indicadores de custos industriais. Curitiba: FIEP, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/indicador-de-custos-industriais/>. Acesso em: 27 jun. 2022.

FERNANDES, Juana Angélica Felipe; GONZÁLEZ, Cristian; VALDERRAMA, Alvaro; SILVA, Lígia de Nazaré Aguiar; MARQUES, Eliê Regina Fedel. *Energias Renováveis*, 2020.

SOUZA, Gabriela Romana; PENHA, Roberto Silva. Viabilidade econômica de um projeto de investimento de energia fotovoltaica. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Contábeis) - Centro de Ciências Contábeis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020

# CONTROLE PID NEURO-ADAPTATIVO EMBARCADO EM UM SISTEMA MAGLEV

*Data de submissão: 16/04/2024*

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Eduardo Marek**

Instituto Federal de Santa Catarina –  
Campus Chapecó  
Chapecó – Santa Catarina

### **Alexandre Dalla’Rosa**

Instituto Federal de Santa Catarina –  
Campus Chapecó  
Chapecó – Santa Catarina  
<https://lattes.cnpq.br/0596224519125364>

**RESUMO:** Este artigo propõe um método de sintonização dos coeficientes de um controlador PID através de uma rede neural em um sistema microcontrolado embarcado. Esta arquitetura de controlador neuro-adaptativo se destaca em aplicações não lineares e com constante mudança de dinâmica da planta, neste caso, a bancada MAGLEV. A Bancada de suspensão magnética possui diversas aplicações na indústria, tais como: trens de alta velocidade, rolamentos magnéticos, dissipadores de vibrações, suspensões magnéticas etc. O desenvolvimento da pesquisa se dará da seguinte maneira: primeiramente será realizado um estudo acerca da planta e da arquitetura da rede neural a ser utilizada e informações sobre

o hardware de processamento, tendo estes dados adquiridos dá-se início do design e construção dos algoritmos para o projeto, somando todas as ferramentas desenvolvidas, começará o processo de implementação dos códigos na bancada de suspensão magnética e a comparação com um controlador PID clássico. Validando o desempenho deste método de sintonização, todos recursos gerados durante as pesquisas serão disponibilizados no GitHub para a comunidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microcontroladores, Controle adaptativo, Redes Neurais Artificiais, MAGLEV.

## NEURO-ADAPTATIVE PID CONTROL EMBEDDED IN A MAGLEV SYSTEM

**ABSTRACT:** The present paper proposes a PID controller tuning method based on an artificial neural network, implemented in an embedded microcontroller system. The neuro-adaptative controller architecture is known for its efficiency in non-linear models, with constant parameter changes, in this case, a MAGLEV device. Use largely spread in industrial fields such as: high-speed magnetic levitation trains, magnetic bearings, vibration dampers etc. The

research will be presented in the following sequence: study of the non-linear model, definition of the neural network architecture, evaluation of the hardware specifications, and with that data, the algorithm of the neuro-adaptative controller will be developed, alongside from the firmware. Completed those steps, the test and implementation stage of the proposed control method will begin, reaching its validation through comparison with a classical PID controller. All resources built from this project will be available to all the community in GitHub.

**KEYWORDS:** Microcontrollers, Adaptative Control, Artificial Neural Network, MAGLEV.

## INTRODUÇÃO

A necessidade da contínua melhoria de qualidade no setor industrial fomenta a constante busca e pesquisa de técnicas de otimização dos seus processos e setores. Métodos de controle surgiram na década de 20 (PARK, 2017) e se tornaram importantes ferramentas na indústria no controle de processos. Com a sua implementação busca-se a redução das não conformidades dos procedimentos e ou produtos ali fabricados, fatores, influentes nos quesitos econômicos e comerciais da empresa (BRISK, 2015).

Os controladores são amplamente utilizados em processos de automação da indústria no controle de sistemas (OGATA, 2010). Sendo o PID (proporcional integral derivativo), o mais utilizado na indústria, facilmente aplicado a plantas lentas e com poucos requisitos de performance (RIVAS-ECHEVERRÍA; RÍOS-BOLÍVAR; CASALES-ECHEVERRÍA, 2001). O controlador PID apresenta suas limitações quando a planta possui características como: não linearidades, alta sensibilidade, alta complexidade, perturbações externas significativas e alteração da sua dinâmica e parâmetros conforme o tempo (BI; YING; YONGQUAN, 2003).

Na medida que técnicas de controle e algoritmos novos foram surgindo, o nível de complexidade dos processos e plantas controlados pôde avançar. Entretanto as características: não lineares, modelos de difícil estimação, constante mudança de parâmetros e alta sensibilidade, alinhadas aos requisitos de: precisão, velocidade e robustez, exigem *hardwares* com capacidades de entregar mais operações de cálculo, processadas ainda mais rapidamente (ATHANS, 1966). A possibilidade de implementação destes controladores em dispositivos embarcados é altamente relevante, visto que o determinismo das informações em alguns tipos de processos é indispensável. Somando os fatores mencionados anteriormente a capacidade execução do controlador em um equipamento de baixo custo através de otimizações e criação de novos métodos de abordagem são fundamentais, uma vez que, do ponto de vista comercial é um campo atrativo (ATHANS, 1966).

Neste artigo será abordado um método de controle neuro-adaptativo baseado em um controlador PID, onde, seus ganhos serão atualizados por uma rede neural adaptativa embarcada. Em (HERNÁNDEZ-ALVARADO *et al*, 2016) tem-se uma abordagem similar, entretanto os procedimentos de cálculo dos parâmetros atualizados serão feitos de maneira totalmente embarcada em um microcontrolador de baixo custo.

## CONTROLE ADAPTATIVO

Por definição, os controladores adaptativos, possuem parâmetros que podem ser ajustados na tentativa de melhor adaptarem-se as não linearidades e constante mudança das plantas, assim como um mecanismo de fazê-lo (FIDAN; IOANNOU, 2006). A seleção do tipo de controlador e mecanismo é um processo determinante para a qualidade final do controle empregado.

Dentre as primeiras técnicas de controle adaptativo desenvolvidas temos os ganhos escalonados, derivado dos pilotos automáticos e controladores de voo do final da segunda guerra mundial (LEMOS; MARTÍN-SÁNCHEZ; RODELLAR, 2012). Este método consiste em identificar a não linearidade da planta, linearizá-la, gerar uma curva e escolher pontos de interesse nesta curva para sintonizar diferentes controladores, respectivamente (RUGH; SHAMMA, 2000). O número de pontos e a proximidade entre eles é um fator importante a ser observado, pois, quando o controlador estiver atuando em regiões distantes do ponto em que seus coeficientes foram determinados, a ação da não linearidade será alta (LEITH; LEITHEAD, 2010). Exemplificado na Figura 1.

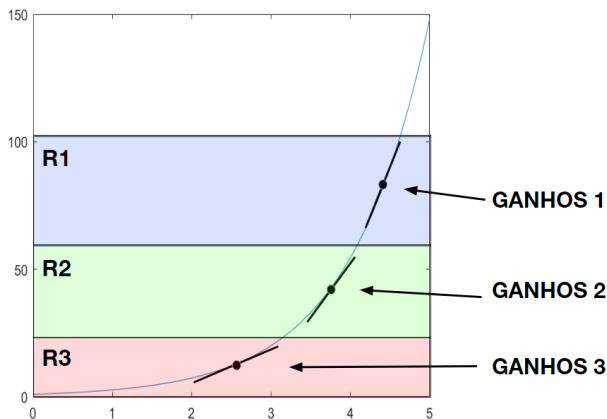


Figura 1: Curva de linearização.

Fonte: autoria própria.

Na abordagem por ganhos escalonados assume-se que a não linearidade é conhecida e pode ser modelada, o que não é verdade para todos os tipos de plantas (ELKHATEM; ENGIN, 2023). Para sistemas cujo as incertezas são desconhecidas ou de difícil modelagem, novas técnicas de controle adaptativo foram criadas.

Os avanços tecnológicos na área da computação possibilitaram a exploração novos algoritmos, que cada vez mais complexos, se tornaram capazes de contornar as incertezas desconhecidas. O uso de redes neurais adaptativas popularizou-se ao final da década de 80, sua capacidade de identificar padrões não lineares e adaptabilidade atraíram interesse da comunidade em aplicações de controle adaptativo, surgindo assim o termo: controle neuro-adaptativo (FIDAN; IOANNOU, 2006).



## Controle neuro-adaptativo

As redes neurais artificiais, Figura 2 podem ser conceituadas como uma função matemática de tamanho e complexidade ajustáveis, que possuem a capacidade de se adaptar às situações problemas. Sua construção e princípio de funcionamento foram inspiradas no cérebro humano, dado essa similaridade, também recebem o nome de perceptron multicamadas (WERBOS, 1988), Figura 3.

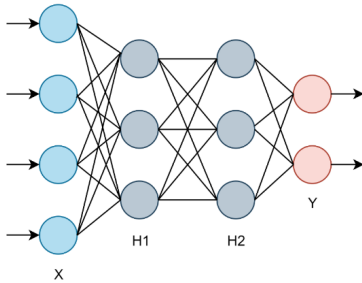


Figura 2: Estrutura da rede neural artificial.

Fonte: autoria própria.

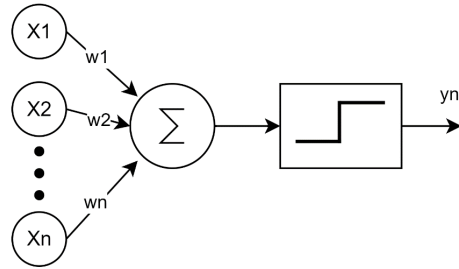


Figura 3: Perceptron de Rosenblatt

Fonte: autoria própria.

Os controladores neuro-adaptativos possuem duas principais arquiteturas: a rede neural substitui o controlador e suas saídas são as ações de controle, Figura 4, observado em (KANG; et al, 2014) (BI; YING; YONGQUAN, 2003), ou a rede neural realiza a sintonização de um controlador, Figura 6, seja qual for sua estrutura (RIVAS-ECHEVERRÍA; RÍOS-BOLÍVAR; CASALES-ECHEVERRÍA, 2001) (HERNÁNDES-ALVARADO *et al*, 2016).

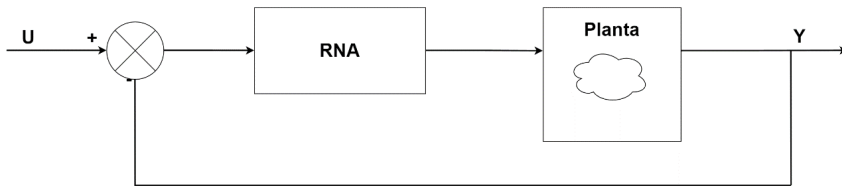


Figura 4: Controlador PID substituído por RNA.

Fonte: autoria própria.

A principal distinção entre os modelos é a certificação de um critério de estabilidade do controlador. No primeiro caso, Figura 4, o autor (KANG; et al, 2014) avalia a estabilidade utilizando a função de Lyapunov em conjunto com as equações de cálculo da variação dos pesos da rede neural. Contudo, no segundo caso, Figura 6, a estabilidade do sistema é garantida na sintonização dos controladores PID utilizados no aprendizado da rede neural (HERNÁNDES-ALVARADO *et al*, 2016). O modelo no qual o controlador é sintonizado por uma rede neural, e não substituído, há uma flexibilidade na escolha da arquitetura do controlador a ser sintonizado e em qual momento os seus ganhos serão atualizados.

## CONTROLADOR NEURO-ADAPTATIVO PROPOSTO

O controlador neuro-adaptativo proposto neste artigo, consiste em um sistema totalmente embarcado para identificação em tempo real dos parâmetros de um controlador PID com filtro derivativo de primeira ordem, através de uma rede neural artificial. Com uma lei de controle definida como:

$$U_{(s)} = \left( K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{T_f s + 1} \right) E_{(s)} \quad (1)$$

A rede neural, Figura 5, baseada no modelo de (HERNÁNDEZ-ALVARADO *et al*, 2016), é construída a partir do arquétipo do controlador acima, sendo:  $k_p$ ,  $k_d$ ,  $k_i$  e  $T_s$  correspondente as suas saídas. Suas entradas são: os erros (referência - saída da planta)  $E_{[k-2, k-1, k]}$  as ações de controle  $U_{[k-2, k-1, k]}$  e saídas da planta (valor lido pelo sensor)  $Y_{[k-1, k]}$  nos tempos indicados entre colchetes.

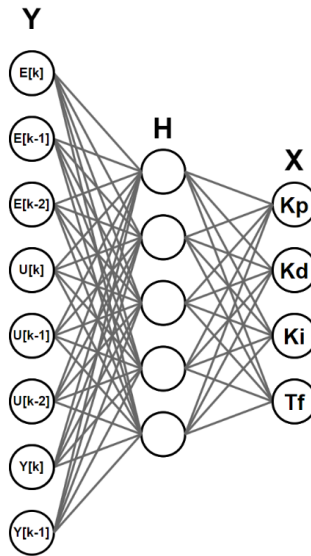


Figura 5: Rede neural implementada.

Fonte: autoria própria.

Além de entradas e saídas, a rede neural requer a definição de mais alguns parâmetros globais, são eles: número de camadas ocultas e respectivos tamanhos, coeficiente de aprendizado e funções de ativação de cada camada.

Assim como elaborado (RASHID, 2016), a rotina *feedforward* é desenvolvida através de operações algébricas entre as matrizes de pesos. Seguindo o modelo de perceptron de Rosenblatt (ROSENBLATT, 1958), Figura 3, agrupa-se os pesos a fim de facilitar a propagação dos sinais pela rede. Observando a Figura 3 constata-se que a saída de cada nó é dada por:

$$y = \sigma \left( b + \sum_{k=1}^l x_k w_k \right) \quad (2)$$

No qual:  $x_k$  são as  $l$  entradas, multiplicadas por suas respectivas intensidades de sinais  $w_k$ ,  $b$  representa um bias e por fim é aplicado uma função de ativação, neste caso a sigmoide  $\sigma$ . Expandindo para toda a rede mediante álgebra de matrizes, temos que o vetor de saídas  $Y_n$  de cada camada  $i$  podem ser descritas como:

$$Y_n = \sigma_n(W_n X_n + B_n) \quad (3)$$

A matriz  $w_n$  possui o seguinte formato:

$$W_{ixj}^n = \begin{pmatrix} w_{00} & \cdots & w_{i0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{0j} & \cdots & w_{ij} \end{pmatrix} \quad (4)$$

e a matriz  $B_n$ :

$$B_{jx1}^n = \begin{pmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

Sendo  $i$  o índice dos nós da camada  $n$  e  $j$  o das entradas  $X_n$ .

## Procedimento de treinamento da rede neural

O formato de treinamento utilizado nesta proposta de controlador neuro-adaptativo é do tipo supervisionada, ou seja, os ganhos da rede são ajustados conforme um conjunto de dados informados pelo usuário (entradas e saídas esperadas).

Antes de definir-se o algoritmo backpropagation, responsável pela correção do valor de cada peso da rede neural, dado um valor de erro, é necessário realizar o cálculo do erro e sua projeção em cada camada. Descrito abaixo, o erro da camada é resultado da: multiplicação escalar da matriz de pesos transposta da camada, pela operação de multiplicação de Hadamard, simbolizada por  $\odot$ , com a derivada da função de ativação:

$$E_n = W_n^T \cdot E_{n+1} \odot \partial\sigma(Y_n) \quad (6)$$

e para a última camada:

$$E_{n_{max}} = (Y_{esperado} - Y_{n_{max}}) \odot \partial\sigma(Y_{n_{max}}) \quad (7)$$

Considerando os pesos  $w_n$ , bias  $B_n$  e um coeficiente de aprendizado  $\alpha$ , a variação dos ganhos é dado como:

$$W'_n = W_n + \alpha(E_n Y_n^T) \quad (8)$$

$$B'_n = B_n + \alpha E_n \quad (9)$$

Na finalidade de executar tais operações em sistemas embarcados, antes foi preciso a criação de uma biblioteca para lidar com as matrizes e os cálculos algébricos. Nela estão presentes as operações de: soma, subtração, multiplicação de Hadamard, multiplicação por escalar, transposta e um método para aplicação de uma função em cada valor da matriz, compondo as funções de ativação. O formato de alocação de ponteiros e estrutura foi selecionado como forma de construção da biblioteca, a fim de se garantir um computo rápido dos valores.

Dispondo da biblioteca de matrizes, foram produzidas as rotinas de: feedforward, cálculo de erros, backpropagation, importação e exportação dos ganhos.

Partindo da premissa que, a rede neural será implementada como uma caixa preta para a identificação da planta e sintonização de um controlador, é desejável treiná-la para suportar a maior quantidade possível de modelos. Contudo, critérios de estabilidade devem ser mantidos, diante disso, limitar o espectro de funções fornecidas a rede deve ser considerado, assim como a qualidade dos controladores sintonizados para cada função, respectivamente.

Sintetizando as asserções acima, foi desenvolvido um script na ferramenta computacional MATLAB para produzir o conjunto de dados de treinamento da rede neural. Partindo da equação de transferência da planta:

1. Gera-se uma função de transferência variando todos os seus coeficientes aleatoriamente em  $\pm V_f\%$  dos valores da planta fornecida.  $V_f$  é definido pelo usuário e dita o quão ampla será a região de atuação do controlador;
2. Sintoniza-se automaticamente um controlador PIDf;
3. Executa simulação do controlador gerado e equação no SIMULINK;
4. Verifica-se estabilidade do controlador;
5. Armazena os valores de ação de controle, erro e saída, seguindo formato de leitura da rede neural;
6. Repete o ciclo acima até que um número satisfatório de dados de plantas distintas possa ser coletado;
7. No intuito de manter os cálculos executados pela rede com grandeza restrita, os dados do conjunto de treinamento são normalizados para valores entre zero e um;
8. Por fim, os dados de: entradas, saídas esperadas e delimitadores das normalizações são armazenados em arquivos de texto.

Considerando que o objetivo, para cada saída da rede é prever um valor, a métrica utilizada em seu treinamento deve ser relacionada ao erro. Logo, optou-se pela utilização do erro quadrático no backpropagation. Os critérios de estabilidade são garantidos através da verificação dos valores máximos e mínimos da simulação, além de um desvio padrão percentual dos valores de erro (referência - saída) da simulação.

## Configuração do controlador

O controlador PID implementado é discretizado utilizando o método de *Tustin*, onde:

$$s \simeq \frac{2z-1}{T_a z+1} \quad (10)$$

aplicando (10) em (1), tendo que  $N = \frac{1}{T_f}$ , temos:

$$U_{[k]} = \frac{E_{[k]}a + E_{[k-1]}b + E_{[k-2]}c + 8U_{[k-1]} - U_{[k-2]}d}{e} \quad (11)$$

onde:

$$a = 4K_p + 4K_d N + 2K_i T_a + 2K_p N T_a + K_i N T_a^2$$

$$b = 2K_i N T_a^2 - 8K_d N - 8K_p$$

$$c = 4K_p + 4K_d N - 2K_i T_a - 2K_p N T_a + K_i N T_a^2$$

$$d = 4 - 2N T_a$$

$$e = 4 + 2N T_a$$

A equação (11) é traduzida e implementada na linguagem C / C ++. Visando futuras pesquisas e aplicações, uma biblioteca foi construída, na qual, a biblioteca de redes neurais fora incluída. Nesta biblioteca o controlador neuro-adaptativo é tratado como uma estrutura. Como principal atributo tem-se a rede neural.

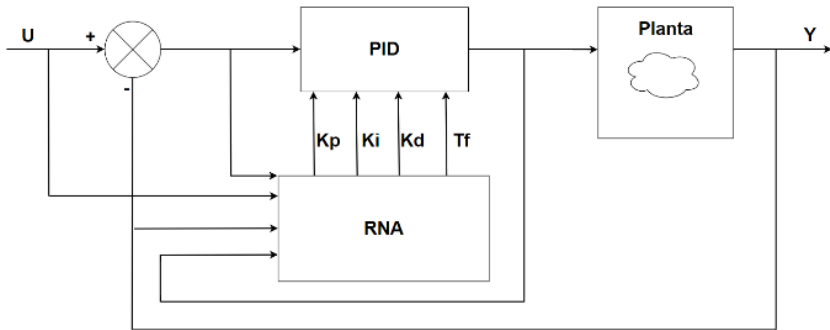


Figura 6: Controlador neuro-adaptativo.

Fonte: autoria própria.

Na Figura 6, configura-se a estrutura realimentada do: controlador, rede neural e planta.

## IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR DESENVOLVIDO

O controlador neuro-adaptativo desenvolvido foi aplicado em uma bancada de suspensão magnética, cujo possibilita a realização de testes voltados a exploração das capacidades de adaptação na presença de não linearidades e constante mudança dos parâmetros da planta.

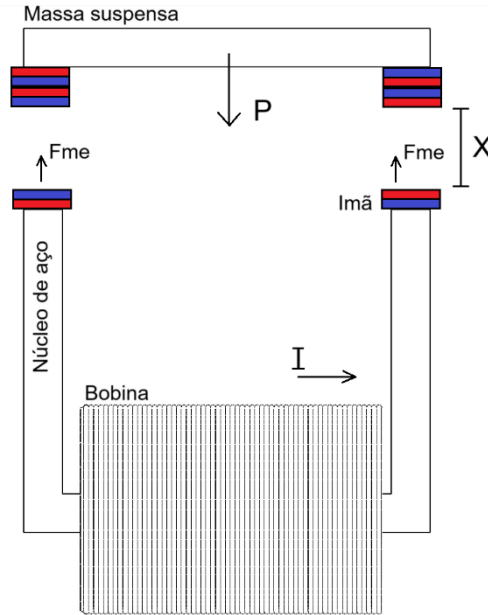


Figura 7: Suspensão magnética.

Fonte: autoria própria.

### Modelo utilizado

Caracterizado pela Figura 7, o diagrama de funcionamento pode ser dividido em dois principais componentes, um sistema massa-mola cujo recebe como entrada uma força magnética, e o sistema utilizado para induzir a força magnética, composto por uma bobina de fios de cobre. De acordo com a corrente fornecida a bobina, o módulo do campo eletromagnético gerado aumenta ou diminui, interagindo com os ímãs posicionados nas extremidades dos entreferros do circuito magnético, provocando uma alteração na posição do corpo suspenso.

As equações características são dadas por (12) e (13):

$$F_{me} = C \frac{i^2}{x^2} \quad (12)$$

$$F = m\ddot{x} + B\dot{x} + kx \quad (13)$$

A equação (12) descreve a força magnética gerada em um sistema MAGLEV (WONG, 1986), onde  $C$  é uma constante característica da bobina,  $i$  a corrente e  $x$  a posição. Em (13) uma força resultante é expressa em função da posição, de forma que, os elementos  $k$  e  $B$  são as constantes elásticas e de atrito. Valores utilizados exibidos na Tabela 1.

Parâmetro	Valor	Unidade
$C$	$2,77 \text{ e}^{-5}$	$\frac{Nm^2}{i^2}$
$\bar{i}$	5	A
$X$	0,005	$m$
$m$	0,1427	$kg$
$B$	0,6943	$\frac{N \cdot s}{m}$
$k$	150,1204	$Nm$

Tabela 1: Coeficientes da planta.

Fonte: autoria própria.

O parâmetro “C”, normalmente obtido de forma experimental, foi encontrado da seguinte forma, equações retiradas de (SADIKU, 2012),  $R_m$ ,  $B$ ,  $\phi$ ,  $S$ ,  $N$ ,  $p$ ,  $x$ ,  $\mu_r$ ,  $\mu_0$  são respectivamente: relutância magnética, densidade de fluxo magnético, fluxo magnético, área da seção transversal, número de espiras, posição do corpo a ser suspenso, espaço do entreferro, permeabilidade relativa do material e permeabilidade constante do ar, conforme:

$$F_{me} = \frac{SB^2}{\mu_0} [N] \quad (14)$$

o campo magnético  $B$  é definido por:

$$B = \frac{\phi}{S} [T] \quad (15)$$

e o fluxo magnético  $\phi$ :

$$\phi = \frac{Ni}{R_m} [Wb] \quad (16)$$

Assumindo que o sistema possui dois entreferros, aplicando (15) e (16) em (14), chega-se em (17):

$$F_{me} = \frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{Ni}{R_m} \right)^2 \quad (17)$$

Considerando o caminho médio  $p$  e a região de atuação  $x$  a relutância magnética do circuito é (18):

$$R_m = \frac{p}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{2x}{\mu_0 S} [Wb] \quad (18)$$

substituindo (18) em (17), obtém-se (19):

$$F_{me} = C \frac{i^2}{x^2} = \frac{N^2 \mu_0 S}{4} \left( \frac{i}{\frac{\rho}{2\mu_r} + x} \right)^2 \quad (19)$$

A parcela expressa abaixo por (20) é desprezível para um núcleo de aço 1020.

$$\frac{\rho}{2\mu_r} = 2e^{-7} \approx 0 \quad (20)$$

Manipulando as equações (19) e (20), definindo  $C$  como (21):

$$C = \frac{N^2 \mu_0 S}{4} \left[ \frac{Nm^2}{A^2} \right] \quad (21)$$

Utilizando os valores da Tabela 2 é possível calcular  $C$ , apresentado na Tabela 1.

Parâmetro	Valor	Unidade
$N$	980	<i>voltas</i>
$\mu_r$	3000	$\frac{H}{m}$
$\mu_0$	$4\pi e^{-7}$	$\frac{H}{m}$
$S$	0,0000950625	$m^2$
$\rho$	0,0012	$m$

Tabela 2: Coeficientes do circuito magnético.

Fonte: autoria própria.

A parcela do comportamento de massa-mola é proveniente da interação entre os ímãs de polos opostos dispostos na região superior (levitada) e inferior (bobina e núcleo). Os coeficientes elásticos  $e$  foram obtidos de forma experimental. Encontrados a partir da análise do ensaio ao degrau, Figura 8.

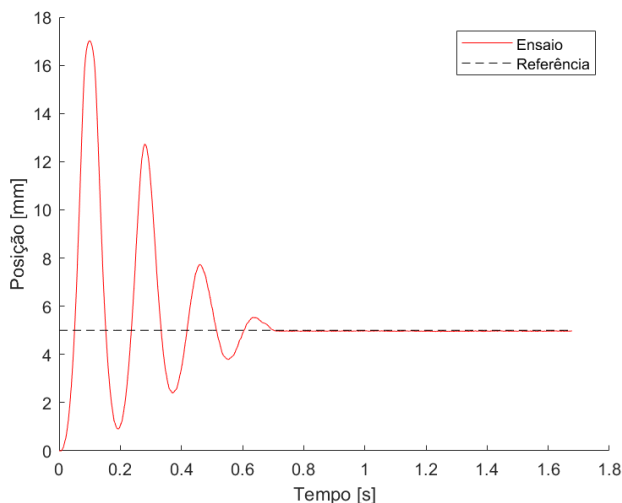


Figura 8: Ensaio ao degrau.

Fonte: autoria própria.



Para uma função de transferência de segunda ordem padrão com acréscimo de um grau de liberdade :

$$G(s) = \frac{\omega_{\eta}^2}{s^2 + \alpha\omega_{\eta}\xi s + \omega_{\eta}^2} \quad (22)$$

utilizando as equações de (OGATA, 2010),

$$\xi = \frac{|\ln M_p|}{\sqrt{\pi^2 \ln(M_p^2)}} \quad (23)$$

$$\omega_{\eta} = \frac{\pi}{T p \sqrt{1-\xi^2}} \quad (24)$$

Os valores de sobressinal  $M_p$  e tempo de pico  $T_p$  são 3,4s e 0,1s, respectivamente, de acordo com a Figura 8. A variável  $\alpha$  é encontrada de maneira iterativa, orientando-se com objetivo de igualar a frequência das senoides do modelo com o ensaio.

Com os valores das equações (23), (24) derivados da análise do ensaio tem-se que:

$$G1(s) = \frac{1052}{s^2 + 4,8665s + 1052} \quad (25)$$

Linearizando (12) nos pontos  $\bar{x}$  e  $\bar{i}$  através de Série de Taylor Bidimensional:

$$F(x,i) \approx F(\bar{x}, \bar{i}) + \left[ \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=\bar{x}, i=\bar{i}} (x - \bar{x}) \right] + \left[ \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{x=\bar{x}, i=\bar{i}} (i - \bar{i}) \right] \quad (26)$$

$$F(x, i) \approx \frac{2C\bar{i}^{-2}}{\bar{x}^2} i - \frac{2C\bar{i}^{-2}}{\bar{x}^3} x + C \frac{\bar{i}^{-2}}{\bar{x}^2} \quad (27)$$

Separando a equação acima e transformando no domínio da frequência:

$$G2 = \bar{x} \quad (28)$$

$$W = C \frac{\bar{i}^{-2}}{\bar{x}^2} \quad (29)$$

prossequindo com os valores da Tabela 1:

$$G2 = 0,005 \quad (30)$$

$$W = 0,000184 \quad (31)$$

De modo que, agrupando funções de transferência  $G1$ ,  $G2$  e o ganho estático  $W$ , em malha aberta, o diagrama de blocos é reproduzido na Figura 9.

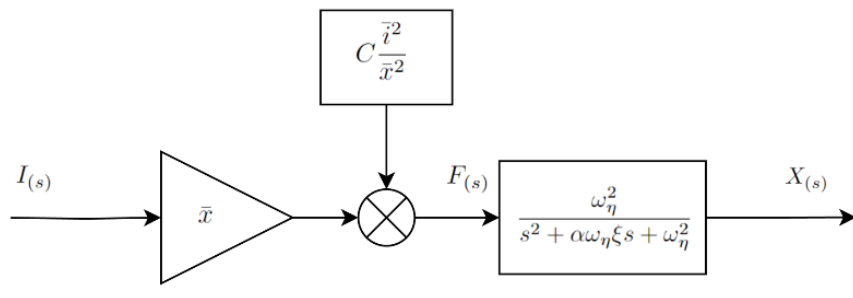


Figura 9: Planta em malha aberta.

Fonte: autoria própria.

Igualando a resposta ao degrau do modelo com a curva do ensaio, plotado na Figura 10:

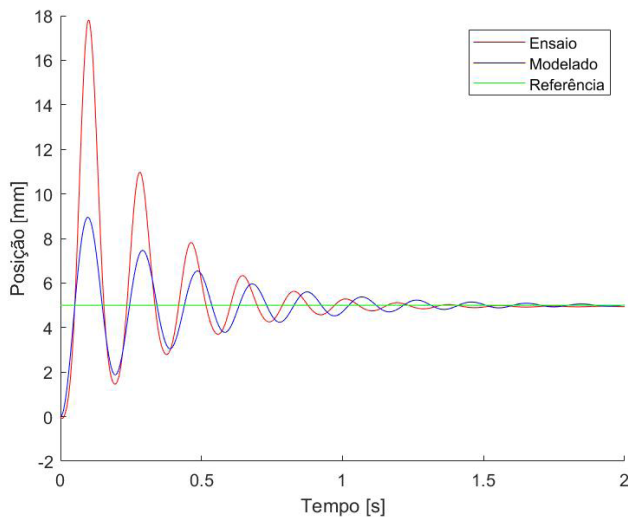


Figura 10: Ensaio vs modelo.

Fonte: autoria própria.

Apesar do modelo calculado ser próximo ao real, a ferramenta IDENT do MATLAB foi usada para obter-se uma função de transferência ainda mais fidedigna. Com ajuste de precisão, exposta na Figura 11. O ajuste da curva obtido resultou em uma função de ordem elevada, devido a tentativa de compensar a dificuldade de incorporar o comportamento não-linear. Logo, assume-se que o modelo obtido não é capaz de compreender todas as não-linearidades da planta.

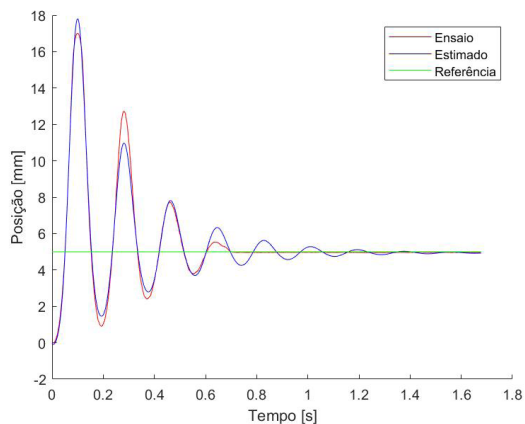


Figura 11: Ensaio vs estimativa IDENT.

Fonte: autoria própria.

Expostos na Tabela 3, os coeficientes gerados pelo MATLAB são posteriormente utilizados na equação (32).

$b_n$	Valor	$a_n$	Valor
$b_0$	-14.85	$a_0$	27.31
$b_1$	7718	$a_1$	7465
$b_2$	$4.176 e^5$	$a_2$	$1.412 e^5$
$b_3$	$8.968 e^7$	$a_3$	$1.423 e^7$
$b_4$	$5.865 e^8$	$a_4$	$1.591 e^8$
$b_5$	$1.289 e^{11}$	$a_5$	$7.669 e^9$
$b_6$	$2.836 e^{11}$	$a_6$	$2.902 e^{10}$

Tabela 3: Parâmetros função da transferência.

Fonte: autoria própria.

Função de transferência base utilizada para o treinamento:

$$G_{(s)} = \frac{b_0 s^6 + b_1 s^5 + \dots + b_5 s + b_6}{s^7 + a_1 s^6 + \dots + a_5 s + a_6} \quad (32)$$

## Treinamento da rede

Dispondo de um modelo matemático próximo ao real, a rotina de geração de dados foi executada no MATLAB, resultando em 1,4 Gb de dados preparados para o treinamento da rede neural. A função de erro quadrático foi utilizada como métrica na avaliação do treinamento, pois o objetivo da rede é prever valores do tipo pontos flutuantes, assegurando que os coeficientes do controlador neuro-adaptativo estejam em sintonia com o estado atual da planta. Um total de 10 épocas com coeficiente de aprendizado de módulo 0,1 foram usados no treinamento, exibido na Figura 12. Após testes, foi constatado que usando apenas uma camada oculta com cinco nós, a rede neural é capaz de realizar o aprendizado para esta aplicação. Topologia final da rede exibida na Figura 5.

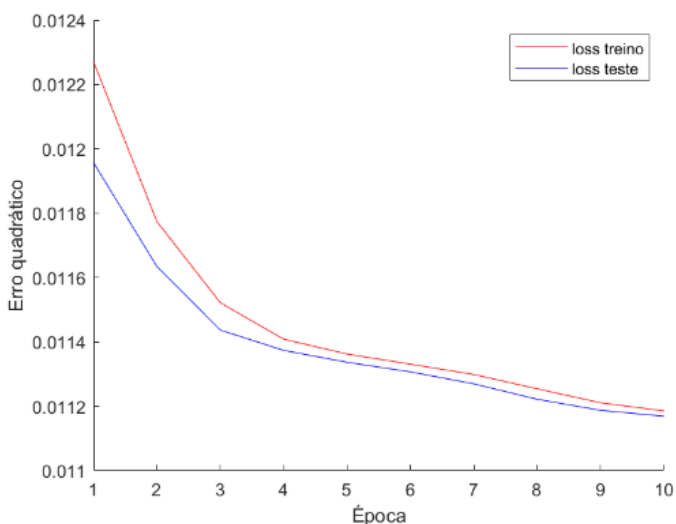


Figura 12: Curva de treino da RNA implementada.

Fonte: autoria própria.

## Implementação no sistema embarcado

A bancada de suspensão magnética funciona a partir do microcontrolador de tecnologia AVR *Esp32 Dev Module*, fabricado pela ESPRESSIF. Selecionado por ter qualidades como: ser um dispositivo de baixo custo, alta disponibilidade no mercado, pode ser programado através da plataforma Arduino. A atuação da bobina do circuito magnético é feita através do chaveamento de um mosfet com um sinal PWM provindo do microcontrolador. A posição da peça levitada é obtida realizando a leitura do valor ADC de um sensor linear de efeito Hall. Como forma de maximizar o potencial de processamento do microcontrolador, não foram utilizadas interrupções por alarme, pois desta forma, o programa executa um ciclo após o outro, sem pausas. *Firmware* representado pelo fluxograma da Figura 13.

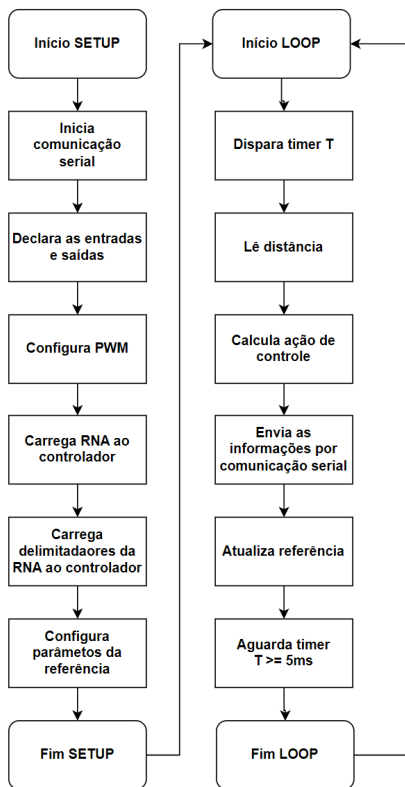


Figura 13: Fluxograma do *firmware*.

Fonte: autoria própria.

Implementado a rede treinada com *clock* de 240MHz, foi constatado que o tempo para rede realizar a rotina do *feedforward* leva em média 550 $\mu$ s. O cálculo da ação de controle em conjunto com a atualização de parâmetro é realizado em 570 $\mu$ s. Apesar do sistema permitir uma frequência de 1,754kHz, a utilizada foi 0,2kHz, dado que a correlação entre tempo de pico do modelo  $T_p$ , 100ms, e o tempo de amostragem do controlador, 5 ms, deve ser de 5 a 20 vezes mais rápida, segundo o autor (OGATA, 2010).

## RESULTADOS OBTIDOS

A eficiência do controlador neuro-adaptativo proposto é comparada em relação a um controlador PID clássico, sintonizado pelo método Ziegler–Nichols. A Figura 14 expõe a comparação da resposta obtida dos controladores a um degrau de diferentes valores de módulo. É possível notar uma clara distinção entre o comportamento dos controladores, nos tempos 2s, 10s e 20 s o PID clássico apresenta um valor de sobressinal elevado. Em adição de ter um tempo de estabilização mais lento que o do controlador neuro-adaptativo, observado nos tempos 3s, 16s e 22s.

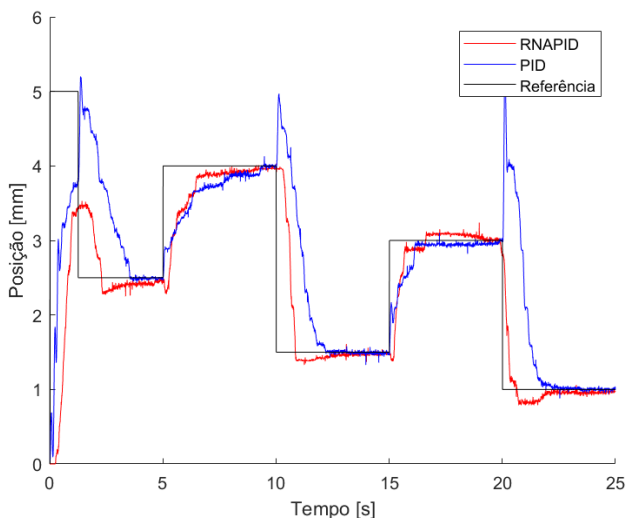


Figura 14: Comparação entre controladores.  
Fonte: autoria própria.

Como forma de avaliar a adaptabilidade e robustez do controlador, foram realizados dois ensaios utilizando os mesmos controladores da comparação da Figura 14. No primeiro é acrescentando uma inclinação de  $20^\circ$  a bancada, já no segundo, uma massa de  $22g$  é adicionada como forma de perturbação fixa.

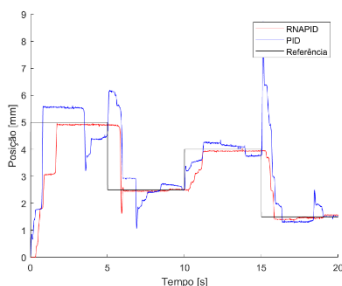


Figura 15: Ensaio com elevação.  
Fonte: autoria própria.

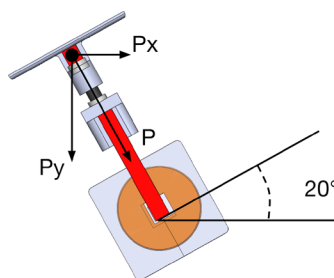


Figura 16: Representação 3D da elevação.  
Fonte: autoria própria.

Na Figura 15 a dinâmica do circuito magnético e sistema massa-mola são alterados, uma vez que, a força peso não é mais normal a superfície de sua base. A temperatura do circuito magnético também deve ser levada em conta, uma vez que devido à alta corrente, o efeito Joule se intensifica, reduzindo a força máxima produzida pelo sistema. Na Figura 15 nota-se que o controlador PID padrão apresenta oscilações e sobressinal do início ao fim. Já o controlador neuro-adaptativo proposto mantém uma atuação similar à do primeiro experimento.

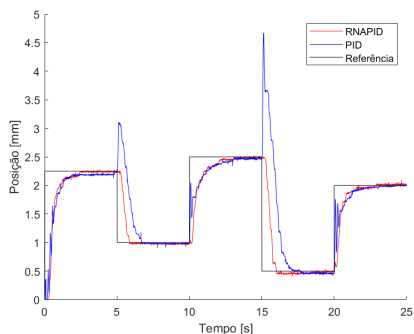


Figura 17: Ensaio com perturbação fixa.  
Fonte: autoria própria.

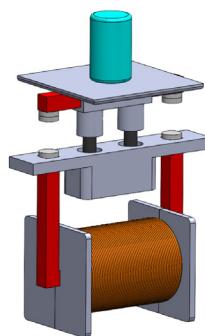


Figura 18: Representação 3D da perturbação fixa.  
Fonte: autoria própria.

No ensaio da Figura 17 o controlador PID clássico apresentou considerável sobressinal e pequenas oscilações nos tempos de 0,1s, 10,1s e 20,1s. Características, que o controlador neuro-adaptativo implementado não exibiu, reforçando a sua capacidade adaptativa proposta.

## CONCLUSÕES

Neste projeto é proposto a construção e implementação de um controlador neuro-adaptativo totalmente embarcado em um sistema microcontrolado em uma bancada com parâmetros de difícil estimação. Ambos os modelos apresentados nas Figuras 10 e 11 não conseguem representar todas as não linearidades da planta.

O controlador PID com filtro derivativo de primeira ordem, sintonizado pela rede neural, foi capaz de manter uma robustez no sistema de malha fechada, diminuindo o sobressinal e reduzindo o valor de erro em para uma referência de degrau, em diferentes regiões de atuação. Somado aos resultados obtidos nos ensaios com inclinação de e acréscimo de um corpo maciço, tais características constataam a alta capacidade de adaptação do controlador neuro-adaptativo a mudanças nos parâmetros da planta, perturbações externas e não linearidades.

Ressalta-se a ótima performance obtida no computo das operações de sintonização dos parâmetros através da RNA e cálculo da ação de controle, com tempo de , realizadas de forma totalmente embarcada em um microcontrolador de baixo custo, e alta disponibilidade, tendo portabilidade a outros hardwares similares. O desenvolvimento e aplicação de uma biblioteca de redes neurais adaptativas voltada para microcontroladores foi o ponto chave para a obtenção dos resultados deste trabalho.

Pesquisas futuras se mostram necessárias na comparação do controlador proposto com outros métodos de controle adaptativo, assim como implementações em outras aplicações práticas.

## REFERÊNCIAS

ATHANS, M. **The status of optimal control theory and applications for deterministic systems.** IEEE Transactions on Automatic Control, 1966. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1098353>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

BAZANELA, A. S.; SEHNEM R. M. **Controle Ótimo Não Linear em Malha Fechada por Redes Neurais Profundas.** SBA, 2022. Disponível em: [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/cba/article/view/3434](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/3434). Acesso em: 16 de novembro de 2023.

BI, Z.; YING, H.; YONGQUAN, Y. **A PID neural network controller.** Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1223703>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

BRISK, M. L. **Process control: potential benefits and wasted opportunities.** Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1448837X.2005.11464113>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

ELKHATEM, A. S.; ENGIN, S. N. **Enhancing performance and stability of gain-scheduling control system using evolutionary algorithms: A case study on transport aircraft.** Expert Systems with Applications, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422018772>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

FIDAN, B.; IOANNOU, P. **Adaptive Control Tutorial.** 11ª edição. Filadélfia: Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, 2006.

GE, S. S.; HANG, C. C.; ZHANG, T. **Nonlinear adaptive control using neural networks and its application to CSTR systems.** Journal of Process Control, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959152498000547>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

HERNÁNDEZ-ALVARADO, L. *et al.* **Neural Network-Based Self-Tuning PID Control for Underwater Vehicles.** Sensors, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1429>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

KANG, J. *et al.* **An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control.** Neurocomputing, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092523121301134X>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

LEITH, D. J.; LEITHEAD, W. E. **Survey of gain-scheduling analysis and design.** International Journal of Control, 2010. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/002071700411304>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

LEMONS, J. M.; MARTÍN-SÁNCHEZ, J. M.; RODELLAR, J. **Survey of industrial optimized adaptive control.** International Journal of Adaptive Control, 2012. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acs.2313>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

LU J.; ZHAO, N. **Neural network algorithm and its application in temperature control of distillation tower.** ARXIV, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2101.00582>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** 5ª edição. Rio de Janeiro: Pearson Universidades, 2010.



PARK, M. *et al.* **Process control and economic cost design for total quality management.** Total Quality Management & Business Excellence, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14783363.2015.1133243>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

RASHID, T. **Make Your Own Neural Network.** Edição ilustrada. Carolina do Sul: Createspace Independent Publishing Platform, 2016.

RIVAS-ECHEVERRÍA, F.; RÍOS-BOLÍVAR, A.; CASALES-ECHEVERRÍA, J. **Neural Network-based Auto-Tuning for PID Controllers.** Neural Network World, 2001. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=286101d6bd52c9cc7eeb02a6c15495f43e5bc187> Acesso em: 15 de novembro de 2023.

ROSENBLATT, F. **The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain.** Psychological Review, 1958. Disponível em: <https://psycnet.apa.org/record/1959-09865-001>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo.** 5ª edição. Bookman 2012.

RUGH, W. J.; SHAMMA, J. S. **Research on gain scheduling.** Automatica, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000510980000583>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

WERBOS, P. J. **Backpropagation: past and future.** IEEE 1988 International Conference on Neural Networks, 1988. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/23866>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

WONG, T. H. **Design of a magnetic levitation control system??? An undergraduate project.** IEEE Transactions on Education, 1986. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5570565>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

# REDES BAYESIANAS PARA AUXILIAR NO DIAGNÓSTICO DA COVID-19

*Data de aceite: 02/05/2024*

**Thiago Costa Brandão Toledo**

**Edimilson Batista Dos Santos**

**RESUMO:** O surto da COVID-19 causada pelo coronavírus SARS-Cov2 foi uma preocupação global grave e urgente. Utilizar Redes Bayesianas para auxiliar no diagnóstico seria benéfico para tomar decisões rápidas sobre as necessidades de tratamento e isolamento, além de permitir determinar quais características apresentadas por casos suspeitos de infecção são os melhores preditores de um diagnóstico positivo. Nesse estudo, o objetivo foi aplicar diferentes algoritmos de aprendizado de Redes Bayesianas, sendo eles: K2, Tree augmented Naive Bayes (TAN) e Naive Bayes (NB). Os algoritmos foram treinados com um conjunto de dados disponibilizado no site Kaggle com informações sobre a Covid-19. Os resultados obtidos pelos os classificadores Bayesianos (NB Categórico, TAN e K2) foram capazes de lidar com eficiência com a tarefa de classificação do atributo alvo COVID-19, apresentando um desempenho semelhante em termos de acurácia,

precisão e recall alcançando valores superiores a 97% em todas as medidas. Além disso demonstraram uma alta capacidade de identificar as variáveis mais relevantes pra um diagnóstico positivo. Por fim com base nos estudos foi evidenciado a eficácia das Redes Bayesianas para auxiliar no diagnóstico da COVID-19.

**PALAVRAS-CHAVES:** Covid-19; K2; Naive Bayes; NB; Redes Bayesianas; SARS-Cov2; TAN; Tree Augmented Naive Bayes.

## BAYESIAN NETWORKS TO ASSIST IN DIAGNOSIS OF COVID-19

**ABSTRACT:** The COVID-19 outbreak caused by the SARS-Cov2 coronavirus was a serious and urgent global concern. Using Bayesian Networks to aid in diagnosis would be beneficial for making quick decisions about treatment and isolation needs, as well as allowing to determine which characteristics presented by suspected cases of infection are the best predictors of a positive diagnosis. In this study, the objective was to apply different learning algorithms for Bayesian Networks, namely: K2, Tree augmented Naive Bayes (TAN) and Naive Bayes (NB). The algorithms were trained with a dataset available on

the Kaggle website with information about Covid-19. The results obtained by the Bayesian classifiers (Categorical NB, TAN and K2) were able to efficiently deal with the COVID-19 target attribute classification task, presenting a similar performance in terms of accuracy, precision and recall reaching values greater than 97 % on all measures. Furthermore demonstrated a high ability to identify the most relevant variables for a positive diagnosis. Finally, based on the studies, the effectiveness of Bayesian networks to assist in the diagnosis of COVID-19 was evidenced.

**KEYWORDS:** Covid-19; K2; Naive Bayes; NB; Bayesian Networks; SARS-Cov2; TAN; Tree Augmented Naive Bayes.

## INTRODUÇÃO

Desde o surgimento do novo coronavírus (*SARS-CoV-2*), responsável pela pandemia de COVID-19 que causou a emergência, na China, em dezembro de 2019, a sociedade enfrenta uma grave crise de saúde global. O rápido surgimento de um grande número de novos casos em países asiáticos e a transferência para a Europa e outros continentes, levou a Organização Mundial da Saúde (OMS) a declarar uma emergência internacional de saúde pública em 30 de janeiro de 2020 e em 11 de março de 2020 uma pandemia (SANTOS, 2021). De acordo com os dados disponíveis (*WORLD HEALTH ORGANIZATION*, 2023 b) até 21 de Março de 2023, houve 761.071.826 casos confirmados de COVID-19, relatados a Organização Mundial de Saude(OMS) ao redor do mundo, e o número de mortos ultrapassou a quantia de 6.879.676

Os coronavírus são um grupo de vírus que foram inicialmente considerados como causadores de doenças respiratórias humanas inofensivas que não apresentavam risco de vida. No entanto, nos últimos anos, ocorreram casos de doenças respiratórias graves e fatais causadas por membros do subgênero beta-coronavírus (STRABELLI, 2020). Alguns exemplos incluem a síndrome respiratória aguda grave *SARS*, que surgiu na China em 2002 e se espalhou rapidamente para outros países, de acordo com o documento técnico (*WORLD HEALTH ORGANIZATION*, 2003), “Um total cumulativo de 8.422 casos prováveis, com 916 mortes, foram relatados” (*WORLD HEALTH ORGANIZATION*, 2003, p. 13); e a síndrome respiratória do Oriente Médio *MERS*, que foi identificada pela primeira vez na Arábia Saudita em 2012 e se espalhou para outros países do Oriente Médio e além, causando mais de 2.600 casos e cerca de 900 mortes (*WORLD HEALTH ORGANIZATION*, 2023 a). Embora o surto de COVID-19, causado pelo coronavírus *SARS-CoV-2*, seja menos fatal do que o *SARS* e o *MERS*, sua alta transmissibilidade resultou em um número absoluto de mortes que excede as epidemias combinadas de *SARS-CoV* e *MERS-CoV*, tendo um impacto significativo na saúde pública, economia e sociedade em todo o mundo.

Visto que a COVID-19 era ainda desconhecida em muitos aspectos, surgiram muitas dúvidas, no início, sobre a tomada de decisão pela equipe médica e governamental. Desta forma, muitos pesquisadores aplicaram técnicas de aprendizado de máquina para auxiliar no

estudo da COVID-19. Entre as diversas técnicas existentes, tem-se proposto o formalismo de Redes Bayesianas para auxiliar no diagnóstico da doença, entre outras aplicações (SANTOS, 2021),(FENTON et al., 2020) e (TORRES et al., 2021).

Uma Rede Bayesiana consiste em um modelo gráfico que caracteriza as dependências e incertezas existentes em um domínio de estudo, através de um grafo que representam relações de probabilidade condicional, isto é, como a ocorrência de certas variáveis depende do estado de outra.

## OBJETIVOS

### Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar se as Redes Bayesianas são modelos relevantes para o diagnóstico da covid e, desta forma, auxiliar os médicos no diagnóstico. Para isso, foram estudados e implementados três algoritmos de aprendizado de Redes Bayesianas: K2, Tree augmented Naive Bayes (TAN) e Naive Bayes (NB), os quais foram treinados com a base de dados “*Symptoms and COVID Presence*”, obtida a partir do repositório Kaggle.

### Objetivos específicos

- Avaliar se a base de dados “*Symptoms and COVID Presence*” do repositório Kaggle está de fato adequada e realizar alterações, quando necessárias;
- Analisar diferentes topologias de uma Rede Bayesiana, produzidas de acordo com as características dos algoritmos K2, TAN e Naive Bayes.;
- Avaliar quantitativamente a previsão de Redes Bayesianas na base de dados por meio de medidas como acurácia;
- Encontrar quais variáveis são mais preditivas para o diagnóstico da COVID-19.

### Fundamentação teórica

Este capítulo apresenta o conceito de Redes Bayesianas, bem como a definição de conteúdo relacionado, para a compreensão deste estudo. Além disso, são descritas revisões bibliográficas de trabalhos relacionados.

## Redes Bayesianas

As Redes Bayesianas consistem em um meio de caracterizar graficamente as dependências e incertezas existentes em um domínio de estudo “e utilizam o Teorema de Bayes como método quantitativo para a revisão dessas probabilidades, com base em uma nova informação amostral.”(SANTOS, 2007, p.6). Facilitando a identificação de “dependências entre variáveis (ou atributos) de uma base de dados, sendo úteis para tarefas de classificação.”(SANTOS, 2007, p.1)

De acordo com Santos (2007), uma limitação muito comum em alguns algoritmos de aprendizado de Redes Bayesianas é a ordenação preexistente das variáveis utilizadas na definição do problema. Assim, a estrutura do grafo das Redes Bayesianas trespassa a depender da ordem das variáveis, o que faz com que a estrutura do grafo altere dependendo da ordem adotada. Isso pode ter “ uma importante função no processo de aprendizado das Redes Bayesianas auxiliando a reduzir o espaço de busca deste problema.” (SANTOS, 2011, p.1)

Uma Rede Bayesianas é representada basicamente por dois componentes principais:

1. Um grafo direcionado acíclico (DAG)  $G = (V, E)$  – é um grafo direcionado e sem ciclos, ou seja, suas arestas tem apenas uma direção tornando impossível percorrer todo o gráfico a partir de uma aresta.

Onde  $V = \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}$  é o conjunto de nós e representa as variáveis aleatórias e  $E$  é o conjunto de pares ordenados de elementos distintos de  $V$  e representa as relações de dependências entre as  $n$  variáveis. Os elementos de  $E$  são chamados de arestas (ou arcos). Uma aresta direcionada do nó  $X_i$  para o nó  $X_j$  indica que  $X_i$  é um dos pais de  $X_j$ . (SANTOS, 2011, p.5)

2. “Uma tabela de probabilidade condicional (CPT) - que quantifica os efeitos que o conjunto de pais de  $X_i$  tem sobre as variáveis  $X_i$  em  $G$ .” (SANTOS, 2011, p.5)

No qual o valor de cada entrada na distribuição conjunta representa a probabilidade de uma conjunção de atribuições específicas, conforme descrito na fórmula extraída de (RUSSEL et al., 2003), p.603.

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{pais}(X_i)) \quad (21)$$

Onde  $P(x_1, \dots, x_n)$  representa a probabilidade conjunta de um conjunto de  $n$  variáveis aleatórias  $(x_1, \dots, x_n)$ , e  $\prod_{i=1}^n P(x_i | \text{pais}(X_i))$  representa a decomposição dessa probabilidade conjunta em termos de probabilidades condicionais de cada variável aleatória em relação às suas variáveis pai. Desta forma, cada entrada na distribuição conjunta é representada pelo produto dos elementos apropriados da tabela de probabilidade condicional (CPT) na Rede Bayesianas.

Na Figura 1 extraída de (RUSSEL et al., 2003) é demonstrado um exemplo de Rede Bayesiana típica, mostrando a topologia e também as CTPs. Nas CTPs, as letras R, T, A, J e M representam Roubo, Terremoto, Alarme, JoãoLiga e MariaLiga, respectivamente.

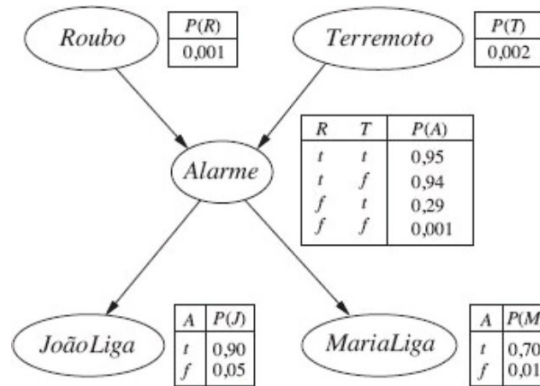


Figura 1 – Representação de uma Rede Bayesiana. Fonte:(RUSSEL et al., 2003)

Em Redes Bayesianas, a ausência de certos arcos (chamados de componentes qualitativos) em um DAG indica a existência de relacionamentos condicionalmente independentes entre as variáveis, e sua presença pode representar a presença de dependências diretas. Tabelas de probabilidade (chamadas de componentes quantitativos) são coleções de medidas de probabilidade condicional que demonstram a força das dependências, atualizadas usando o teorema de Bayes com base em novas informações de amostra.

As Redes Bayesianas podem ser usadas para tarefas de aprendizado supervisionadas e não supervisionadas. Ao executar tarefas de aprendizado supervisionado, as Redes Bayesianas são frequentemente chamadas de classificadores Bayesianos.

## Teorema de Bayes

O teorema de Bayes é uma fórmula matemática probabilística proposta por Thomas Bayes (1702-1761) e publicada em 1763 por seu amigo Richard Price. Muito estudado e utilizado na área da estatística, este teorema permite o cálculo da probabilidade de um evento, dado que outro evento já ocorreu, o que é definido como probabilidade condicional.

Para aplicar o teorema de Bayes, é necessário conhecer alguma informação posterior sobre um determinado evento de interesse e sua probabilidade. Isso permitirá conhecer a probabilidade da união de dois eventos, considerando eventos mutuamente exclusivos.

A fórmula do teorema de Bayes para o cálculo de um evento (X), levando em conta que um evento (Y) ocorreu, é dada pela seguinte expressão:

$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X) * P(X)}{P(Y)} \quad (2.2)$$

Sendo:

- $P(X|Y)$ : Probabilidade do evento X acontecer, dado que Y já ocorreu;
- $P(Y|X)$ : Probabilidade de Y acontecer, dado que X já ocorreu;
- $P(X)$ : Probabilidade de X ocorrer;
- $P(Y)$ : Probabilidade de Y acontecer

O exemplo 2.2 adaptado de ML ENGINEERING ([s.d.]) ilustra como o Teorema de Bayes pode ser usado para calcular a probabilidade de um evento de interesse a partir de probabilidades conhecidas.

**Exemplo 2.2.** Suponha que Maria tenha feito um teste para COVID-19 e deseja saber a probabilidade de ter a doença. Sabemos que o teste não é completamente conclusivo, e que a probabilidade de um positivos verdadeiro é  $P(TP) = P(pos|C) = 0.96$ , enquanto a probabilidade de um falso positivo é  $P(FP) = P(pos|\bar{C}) = 0.04$ . Além disso, conhecemos que a probabilidade de alguém ter COVID-19 é  $P(C) = 0.015$  (117 milhões de casos, 7.9B pessoas) com base em dados estatísticos globais.

Aplicando o teorema de Bayes, podemos calcular a probabilidade de Maria ter COVID-19, dado que o teste dela deu positivo. A equação é:

$$P(C|pos) = \frac{P(pos|C) * P(C)}{P(pos)} = \frac{P(pos|C) * P(C)}{P(pos|C)P(C) + P(pos|notC)(1 - P(C))}$$

Em que:

- $P(C|pos)$  é a probabilidade de Maria ter COVID-19, dado que o teste dela deu positivo;
- $P(pos|C)$  é a probabilidade de um resultado positivo verdadeiro;
- $P(C)$  é a probabilidade de alguém ter COVID-19;
- $P(pos|\bar{C})$  é a probabilidade de um resultado falso positivo;
- $1 - P(C)$  é a probabilidade de alguém não ter COVID-19;
- $P(pos)$  é a probabilidade de um resultado positivo.

Substituindo os valores conhecidos na equação, temos:

$$P(C|pos) = \frac{0.96 * 0.015}{0.96 * 0.015 + 0.04(1 - 0.015)} = 0.268$$

Isso significa que a probabilidade de Maria ter COVID-19, dado que o teste dela deu positivo, é de apenas 0,268. Essa probabilidade é menor do que muitas pessoas esperam, o que destaca a importância de levar em consideração as limitações dos testes e a prevalência da doença ao interpretar os resultados do teste.

## Classificadores Bayesianos

### *Naive Bayes*

O algoritmo Naive Bayes (NB), ou classificador Bayesiano, é um classificador probabilístico muito utilizado em Aprendizado de Máquina, que foi baseado no “Teorema de Bayes”.

É um modelo que sucede a árvore de decisão. Ele parte da premissa de que cada variável é independente das demais, de acordo com a base de dados. Ou seja, ele desconsidera a correlação entre as variáveis, como por exemplo se uma fruta é classificada como Melão por ser amarela e oval, o NB não leva em consideração a correlação entre esses aspectos. Sendo esse o motivo por ser conhecido como “Naive” (ingênuo).

Algumas vantagens do NB são as seguintes:

- Eficiência computacional: o tempo de treinamento é linearmente relacionado ao número de amostras e atributos de treinamento, o tempo de classificação é linearmente relacionado ao número de atributos e não é afetado pelo número de amostras de treinamento.
- Baixa variância: Como o NB não usa pesquisa, ele tem baixa variância, e apresenta um alto viés.
- Aprendizagem incremental: NB opera em estimativas de probabilidade de baixa ordem derivadas dos dados de treinamento. Estes podem ser facilmente atualizados quando novos dados de treinamento são obtidos.
- Previsão direta de probabilidades posteriores.

A função do NB baseado no Teorema de Bayes para se prever o valor do atributo classe  $C$  em função das demais  $n$  variáveis, é calculada pela seguinte equação:

$$P(C|x_1, \dots, x_n) = \alpha P(C) \prod_{i=1}^n P(x_i|C) \quad (2.3)$$

Em que  $P(C)$  é a distribuição a priori do atributo classe e  $\alpha = P(C|x_1, \dots, x_n)$  é constante para todas as classes. Sendo o valor do atributo  $C$  o que produzir a maior probabilidade na Equação 2.3 que será selecionado como a classe prevista.

Na Figura 2 extraída de (SANTOS, 2007, p.29) representa um exemplo da rede de um NB, onde todos os atributos  $A_1, \dots, A_n$  são considerados independentes condicionalmente um do outro, dado o valor do atributo classe  $C$ .



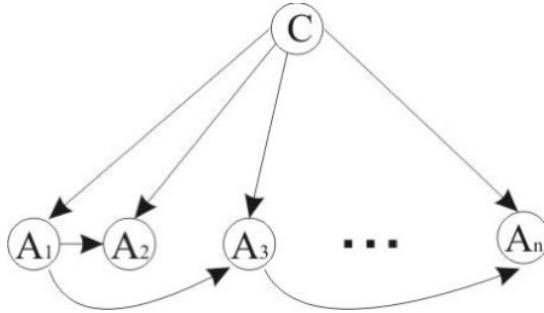


Figura 2 – Estrutura da rede de um classificador Naive Bayes. Fonte: (SANTOS, 2007)

### *Naive Bayes Categórico*

No algoritmo Naive Bayes temos diferentes classificadores que diferem principalmente pelas suposições que fazem em relação à distribuição de  $P(C)$ .

Nesse estudo foi utilizado o Naive Bayes Categórico, sua fórmula é a seguinte como podemos ver na equação (2.4):

$$P(x_i = t | y = c; \alpha) = \frac{N_{tic} + \alpha}{N_c + \alpha n_i} \quad (2.4)$$

Onde  $N_{tic} = |\{j \in J | x_{ij} = t, y_j = c\}|$  é a categoria de numero de vezes que  $t$  aparece nas amostras  $x_p$ , que pertencem à classe  $c$ ,  $N_c = |\{j \in J | y_j = c\}|$  é o números de amostras com a classe  $c$ ,  $\alpha$  é um parâmetro de suavização e  $n_i$  é o número de categorias dos recursos disponíveis  $i$ .

Após uma coleta de dados, é realizado o cálculo com base nessa fórmula, para se obter o resultado final. Esse algoritmo é muito usado para processamento de linguagem natural e diagnósticos médicos, graças a sua análise probabilista condicional.

### *K2*

O K2 é um algoritmo de busca heurística desenvolvido para a indução de estruturas de Redes Bayesianas, apresentado por Cooper e Herskovitz (COOPER; HERSKOVITS, 1991). “Muito conhecido devido ao seu desempenho em termos de complexidade computacional (tempo) e resultados precisos, obtidos quando uma ordenação de variáveis adequada é fornecida “ (SANTOS, 2011, p.14).

Esse modelo parte de um grafo sem arestas e utilizando uma busca gulosa para encontrar a melhor estrutura a cada iteração escolhe uma nova aresta que será inserida na rede. Segundo Santos (2011) o algoritmo se inicia primeiramente, assumindo que todos nós não têm pai. Então, a partir do segundo atributo da lista ordenada (sendo o primeiro o nó raiz), os possíveis pais são testados e o nó que maximiza a probabilidade de a estrutura concordar com o banco de dados é adicionado à rede. Repita esse processo para todos os

atributos até encontrar a melhor estrutura possível da Rede Bayesiana.

A suposição dos atributos pré-ordenados é usada para reduzir o número de possíveis estruturas a serem aprendidas. K2 usa uma lista ordenada (contendo todos os atributos) que afirma que apenas os atributos posicionados antes de um dado atributo  $x_i$  podem ser pais de  $x_i$ . Assim, o primeiro atributo na lista não tem pais, ou seja, é um nó raiz na Rede Bayesiana. (SANTOS, 2011, p.14)

Essa ordenação das variáveis requer conhecimento prévio sobre os dados, sendo esta a principal desvantagem do algoritmo K2.

Para cada atributo, a métrica (pontuação) que K2 usa para testar cada conjunto de possíveis pais do nó é dada por  $g(i, \pi)$  : (extraída de (SANTOS, 2011, p.14))

$$g(i, \pi) = \prod_{j=1}^{q_i} \frac{(r_i - 1)!}{(N_{ij} + r_i - 1)!} \prod_{K=1}^{r_i} N_{ijk}! \quad (2.5)$$

No qual cada atributo  $x_j$  ( $i = 1, \dots, n$ ) possui  $r_i$  valores possíveis ( $v_{i1}, \dots, v_{ir_i}$ ). O atributo  $x_i$  possui um conjunto de nós pais  $\pi_i$ , onde  $q_i$  é o número de instanciações de  $\pi_i$ .  $N_{ijk}$  é o número de objetos no conjunto de dados  $D$ , onde  $x_i$  tem o valor  $v_{ik}$  e  $\pi_i$  é instanciado como  $w_{ij}$ , denotando a  $j$ -ésima instanciação de  $\pi_i$  em relação a  $D$ . Por fim,  $N_{ij} = \sum N_{ijk}$ .

### *Tree Augmented Naive Bayes*

O Tree Augmented Naive Bayes (TAN) é um classificador Bayesiano que tem como objetivo atingir melhores classificadores que o NB, foi proposto por Friedman e Goldszmidt. Em comparação com o Naive Bayes, o TAN pode produzir modelos mais precisos, especialmente em conjuntos de dados com alta dependência entre os atributos, no entanto, a construção do modelo TAN é mais complexa e computacionalmente mais exigente do que o Naive Bayes.

O classificador TAN diminui a restrição imposta na construção da estrutura do NB e permite dependências entre outros atributos além do atributo classe  $C$ , ou seja, existem  $(n-1)$  atributos que dependem condicionalmente de outro atributo além da dependência da classe  $C$ . Os arcos adicionais entre os atributos são encontrados através de um algoritmo de busca, o que significa que não há uma restrição prévia na construção da estrutura do modelo. Dessa forma, é possível identificar dependências entre os atributos que podem melhorar a precisão do modelo, uma vez que nem todos os atributos são independentes entre si.

A Figura 3 extraída de (SANTOS, 2007, p.30), representa um exemplo da rede de um modelo TAN.

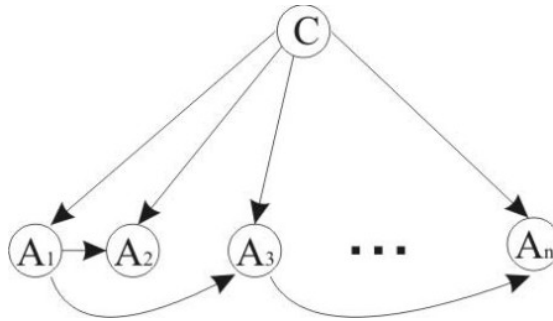


Figura 3 – Estrutura da rede de um classificador TAN. Fonte: (SANTOS, 2007)

O fato de haver, no máximo, mais um pai adicional para cada atributo significa que pode haver um arco no grafo da variável  $A$  para  $A$ . Isso implica que esses dois atributos,  $A$  e  $A$ , não são independentes, dado a classe. A influência de  $A$  nas probabilidades da classe depende também do valor de  $A$ . (SANTOS, 2007, p.30)

A probabilidade a posteriori do modelo TAN é representada pela Equação 2.6 :

$$P(C|x_1, \dots, x_n) = P(C) \cdot P(X_r|C) \prod_{i=1}^n P(x_i|C, X_{parente}) \quad (2.6)$$

A equação representa a probabilidade a posteriori da classe  $C$ , dado um conjunto de valores de atributos  $x_1, \dots, x_n$ . Essa probabilidade é calculada multiplicando a distribuição a priori da classe  $P(C)$  pela probabilidade de ocorrência do nó raiz da árvore onde a classe ocorre ( $P(X|C)$ ) e pelas probabilidades condicionais de cada atributo dado sua classe e seu pai na árvore ( $P(x_i|C, X_{parente})$ ). Essas probabilidades condicionais são calculadas a partir dos dados de treinamento, utilizando a técnica de máxima verossimilhança.

Portanto, a equação da probabilidade a posteriori é uma das principais equações utilizadas no modelo TAN para classificar novos exemplos com base em seus atributos.

## Trabalhos relacionados

*Um estudo aplicado no estado de São Paulo utilizando Redes Bayesianas na predição do controle no avanço de COVID-19.*

A dissertação de Felipe Alexandre Santos (SANTOS, 2021) apresenta um estudo aplicado no estado de São Paulo que utiliza Redes Bayesianas na predição do controle no avanço da COVID-19. O objetivo do estudo é modelar as decisões tomadas pelo PlanoSP, medida criada pelo estado de São Paulo, que permite a cada região reabrir determinados setores de acordo com a fase em que se encontra, determinada pela relação entre a capacidade do sistema de saúde e a evolução da pandemia. Além disso, a dissertação utiliza inferência de Bayes para analisar fatores de risco relacionados a casos médicos de contágio e óbitos por COVID-19.

Para o estudo, foram utilizadas duas bases de dados intituladas como DataSet 1 e DataSet 2; e proposto uma modelagem estrutural de sua Rede Bayesiana, após a extração os dados foram tratados, ordenados e formatados para o processamento da Rede.

A modelagem estrutural da Rede Bayesiana proposta foi elaborada objetivando prever a classificação que uma região receberá pelo PlanoSP com base nos balanços já publicados no DataSet 1, e para o DataSet 2, foi utilizada a divisão em determinados grupos para a implementação e desenvolvimento da Rede Bayesiana, levando em consideração variáveis de entrada em razão da categoria epidemiológica, clínica e demográfica, bem como as categorias numéricas da pandemia no estado de São Paulo.

Nas Figuras 4 e 5 abaixo é apresentado as estruturas Bayesianas propostas para o dataset1 e 2 respectivamente.

Após o tratamento dos dados, as duas bases foram treinadas utilizando dois algoritmos diferentes: expectation-maximization (EM) e Gradient.

Nos testes realizados para o DataSet 1, foi observada uma diferença nas probabilidades à priori encontradas por cada algoritmo de treinamento. Visando uma melhor suavização dos dados de inter classificação, foi constatado que o melhor método para o treinamento deste DataSet seria o Gradient Decrescente.

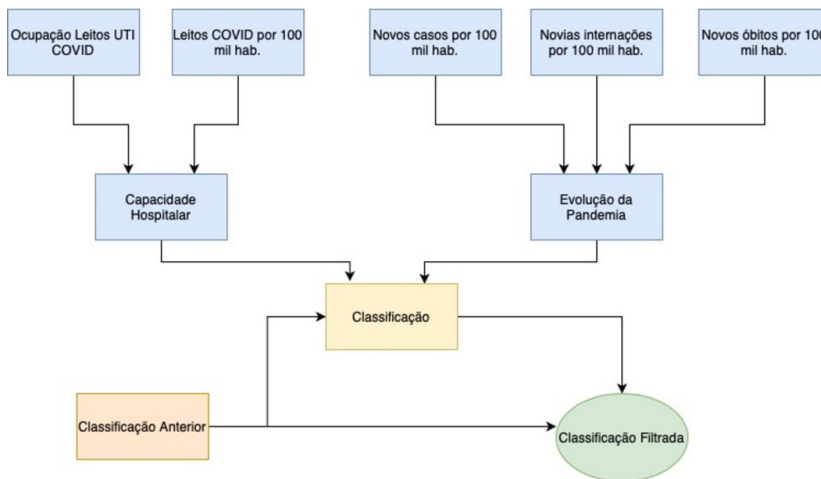


Figura 4 – Estrutura da rede Proposta para o DataSet 1. Fonte: SANTOS, 2021

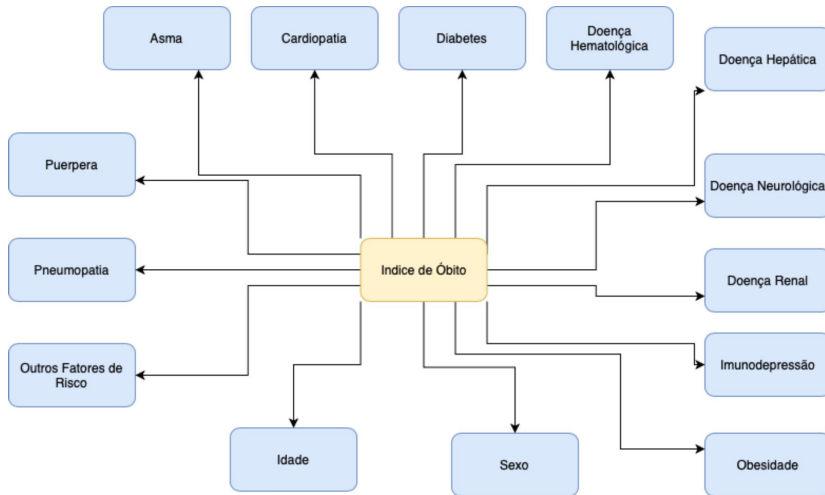


Figura 5 – Estrutura da rede Proposta para o DataSet 2. Fonte: SANTOS, 2021

Com o uso do algoritmo Gradient para o treinamento da Rede Bayesiana, foi realizada uma comparação com os dados do vigésimo balanço, cujos valores não estavam presentes no DataSet, e o algoritmo demonstrou alta eficácia em inferir as fases.

Na segunda Rede Bayesiana, cujos dados para treinamento foram utilizados do DataSet 2, com a inferência da Rede Bayesiana montada, foi possível concluir que o paciente com maior índice de morte seriam aqueles que apresentam idade maior que 80 anos, portadores de asma, obesos e diabéticos.

Os resultados obtidos indicam que o modelo preditivo desenvolvido apresenta alta eficácia em inferir as fases do PlanoSP e em identificar fatores de risco associados à COVID-19. Os autores ressaltam que sistemas como esse podem ser utilizados no auxílio da tomada de decisão pelos órgãos públicos e contribuir para a contenção da pandemia.

O trabalho é relevante para a área de aprendizado de máquina aplicada à saúde pública, e apresenta uma metodologia clara e objetiva para o desenvolvimento de modelos preditivos baseados em Redes Bayesianas.

### *Uso de Redes Bayesianas para apoiar a tomada de decisão sobre a propagação do COVID-19*

No artigo de Freddy E. Torres Cordeiro, Neily González Benítez e Omar Mar Cornelio (TORRES et al., 2021), o principal foco é um estudo da utilização de Redes Bayesianas como ferramenta de modelagem para apoiar a tomada de decisão sobre a propagação do COVID-19. Já que Redes Bayesianas têm a capacidade de armazenar e tratar grandes volumes de informações compostas por diversos tipos de dados; os quais nem sempre são tão precisos e completos quanto necessário. Ao contrário dos modelos matemáticos utilizados no âmbito epidemiológico, que têm características variáveis e não são suficientes para apoiar a tomada de decisão sobre a disseminação da COVID.

A estrutura proposta pelo autores para o uso das Redes Bayesianas foi composta por três componentes:

- Gestão do conhecimento que descreve os elementos fundamentais a conta serem incluídos nos sistemas de informação e vigilância para a propagação da covid.
- Análise inteligente dos dados onde os dados de entradas das fontes utilizadas foram pré processados para remover dados que prejudiquem o resultado, a fim de garantir sua disponibilidade, completude e fidelidade.
- Rede Bayesiana como ferramenta probabilística de apoio a tomada de decisão sobre a disseminação da COVID construída em três fases: definição do gráfico, identificação de modelos canônicos e obtenção dos dados quantitativos.

Os resultados demonstram que a utilização de Redes Bayesianas melhora a qualidade dos processos médicos-assistenciais na previsão e classificação de doenças. Além disso, o grafo da Rede Bayesiana proposta minimiza a imperfeição dos dados presentes, contribuindo para um diagnóstico mais preciso de sintomas, sinais e presença da COVID-19. Na figura 6 é representado o grafo para apoiar a tomada de decisão sobre a propagação do Covid-19.

A Figura 6 evidencia que os sintomas mais relevantes da doença são: Febre e falta de ar, sendo que a direção dos arcos representa uma direção diagnóstica. A informação numérica é introduzida na Rede Bayesiana por meio da tabela de probabilidade condicional de cada nó. O restante dos sintomas são típicos de doenças respiratórias, mas se não houver falta de ar, os pacientes podem estar com gripe. Olhos irritados podem indicar alergias, assim como espirros e coriza.

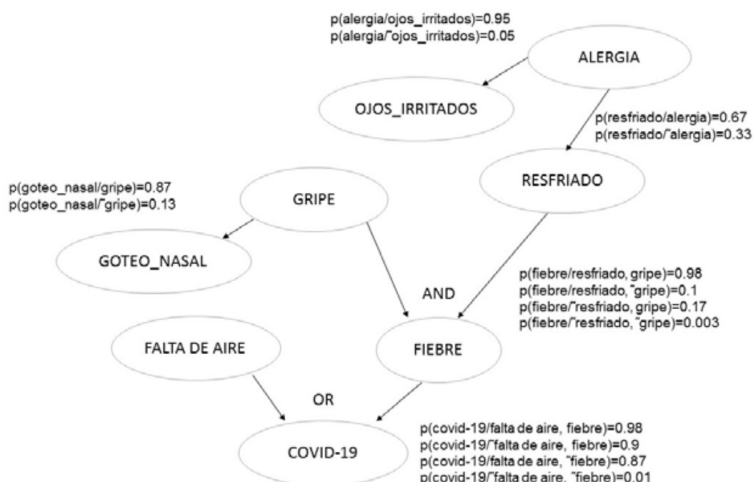


Figura 6 – Grafo para apoiar a tomada de decisão sobre a propagação do Covid-19. Fonte: TORRES et al., 2021

Portanto a utilização de Redes Bayesianas impacta positivamente na certeza do diagnóstico da covid-19, pela sua capacidade de trabalhar com dados discretos e contínuos simultaneamente, a variedade de problemas que podem resolver e a flexibilidade na estrutura do modelo. A utilização dessas ferramentas pode contribuir para uma tomada de decisão mais assertiva e auxiliar na previsão e classificação da doença, o que pode ser importante para a elaboração de estratégias de combate à pandemia.

#### *Um modelo de Rede Bayesiana para avaliação personalizada de risco COVID-19 e rastreamento de contatos*

O artigo (FENTON et al., 2021) apresenta um instrumento de rastreamento para o COVID 19. Para a construção desse instrumento, anteriormente foi feito um levantamento bibliográfico cujo objetivo era saber o que a literatura tinha sobre essa temática. Um dos artigos encontrados demonstrou que para sucesso na aplicação e prática de determinado instrumento, era necessário que 90% a 95% da população tivesse acesso a smartphones, entretanto, 40% da população está com faixa etária acima de 65 anos, o que limita um pouco a utilização de tais ferramentas. Através dessas informações, conclui-se que o instrumento denominado aplicativo de rastreamento de contatos não é a melhor estratégia para contenção de uma pandemia.

Outro estudo propôs um aplicativo também, desenvolvido no Reino Unido (NHSX), em que, através da tela do seu celular, era mostrado quando um indivíduo estivesse próximo a alguém contaminado. Entretanto, só é mostrado no celular tempos depois, quando a doença já se transmitiu a várias outras pessoas.

O atual artigo, a partir dos estudos analisados, propôs um instrumento de caráter dissertativo, ou seja, o usuário fornecia as informações através de um questionário e tais informações eram inseridas em uma plataforma, a fim de diminuir a possibilidade de comprometer a privacidade do usuário, os dados armazenados centralmente são a probabilidade do usuário ter covid-19 e a localização do gps. É importante destacar que o modelo apresentado é um BN causal, ou seja, sua estrutura é definida pelo conhecimento básico de causalidade, e não apenas a partir de dados.

Sendo assim, o modelo Bayesiano busca calcular a probabilidade de uma pessoa contrair o “COVID 19” de forma assintomática, nos estágios leve ou grave. O modelo foi integrado em um aplicativo para smartphones, e além de calcular a probabilidade de um indivíduo contrair a doença, oferece também informações estatísticas sobre regiões cuja propensão é grande para novos surtos.

O modelo virtual consiste em nós e arcos, os nós correspondem a variáveis que podem ou não ser observáveis, além de serem caracterizados como discretos ou contínuos. A partir de tais variáveis, surgem valores que sugerem determinada probabilidade, dependendo do tipo e estado do nó na tela.

Por sua vez, surgirá um arco entre nós caso as variáveis correspondam de forma considerável, estatisticamente falando.

A partir disso, é mostrada uma tabela de probabilidade, vale ressaltar que tal probabilidade será baseada nas informações pré-estabelecidas.

Em síntese, um indivíduo só poderá ser infectado se tiver entrado em contato com o vírus. A quantidade de vírus contraída determinará a probabilidade de infecção real.

Qualquer instrumento ou ferramenta cujo objetivo é estimar determinada circunstância oferece limitação em sua prática e determinada margem de erros.

Entretanto, diferente dos outros aplicativos já desenvolvidos, o presente modelo combina diversas informações inseridas pelo próprio indivíduo, o que garante maior assertividade contanto que a informação seja inserida de forma honesta. Além de fornecer informações específicas em relação a probabilidade de surtos e de nível de infecção, bem como leve ou grave.

Em suma, a proposta dos autores apresentada no artigo, baseada na coleta centralizada de apenas três dados: a probabilidade de o usuário ter COVID-19, a localização do GPS e um identificador exclusivo. O modelo BN proposto diferencia-se de outras soluções, pois combina informações retrospectivas com rastreamento de sintomas e fornece probabilidades personalizadas do status passado, atual e futuro da COVID-19.

Além disso, o modelo preserva a privacidade, pois as informações pessoais não são compartilhadas e apenas o status atual de probabilidade do COVID-19 e a localização do GPS precisam ser compartilhados. O estudo sugere que soluções como essa podem ter um efeito benéfico na contenção da propagação da pandemia e na redução da necessidade de bloqueios draconianos, combinadas com uma estratégia de comunicação eficaz.

## METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever a base de dados empregada no estudo e sua análise, bem como descrever a aplicação dos modelos de Redes Bayesianas implementados.

### Base de Dados

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizado uma base de dados importada do Kaggle denominada "Symptoms and COVID Presence". O conjunto contém 5434 dados, sendo 4383 casos positivos e 1051 negativos. Ela é composta por 21 atributos, sendo eles: *Breathing Problem* (Problema Respiratório); *Fever* (Febre); *Dry Cough* (Tosse seca); *Sore throat* (Dor de Garganta); *Running Nose* (Coriza); *Asthma* (Asma); *Chronic Lung Disease* (Doença Pulmonar Crônica); *Headache* (Dor de Cabeça); *Heart Disease* (Doença Cardíaca); Diabetes; *Hyper Tension* (Hipertensão); *Fatigue* (Fadiga); Gastrointestinal; *Abroad travel* (Viagens); *Contact with COVID Patient* (Contato com Paciente COVID); *Attended Large*



*Gathering* (Participou de grandes encontros); *Visited Public Exposed Places* (Visitou Público Locais Expostos); *Family working in Public Exposed Places* (Família trabalhando em Locais Públicos Expostos); *Wearing Masks* (Uso de Máscaras); *Sanitization from Market* (Higienização do Mercado); COVID-19 (positivo ou negativo).

A base foi tratada na linguagem Python com o auxílio das bibliotecas **Pandas** e **Dataprep**. Foi verificado que não há valores ausentes na base, sendo assim ela nos oferece mais confiança, precisão, eficiência e *insights* nas análises e tomadas de decisões. Também foi verificado os valores mais frequentes do atributo alvo (COVID-19) indicando uma frequência muito maior de casos positivos (4383 contra 1051) representando 80,7% da base. Com o desbalanceamento da base evidenciado foi feita uma base balanceada que pode evitar possíveis vieses e garantir uma análise mais equilibrada e precisa dos dados.

Também foi analisado a correlação dos atributos onde foi possível perceber que os atributos *Wearing Masks* (Uso de Máscaras) e *Sanitization from Market* (Higienização do Mercado) tem ausência de variação com o mesmo valor (Falso/No) para todos os dados, dessa forma eles não fornecem informações úteis para a previsão do atributo alvo, portanto, eles podem ser descartados da base de dados sem afetar negativamente a precisão ou qualidade da análise preditiva. Além de constatar que os atributos *Fever* (Febre), *Dry Cough* (Tosse seca) e *Sore throat* (Dor de Garganta) juntamente com *Breathing Problem* (Problema Respiratório) foram os atributos que tiveram maior correlação com o atributo alvo. Os atributos *Abroad travel* (Viagens), *Attended Large Gathering* (Participou de grandes encontros) e *Contact with COVID Patient* (Contato com Paciente COVID) tiveram uma interferência secundária na predição.

Para facilitar a análise e aprendizagem da base de dados pelos algoritmos implementados a base foi convertida para valores booleanos *False* e *True*, definidos como os valores numéricos 0 e 1, respectivamente, uma vez que, originalmente, os atributos possuíam valoração “Yes”/“No”.

Para os três modelos (NB Categórico, TAN e K2) foi utilizado a função *train\_test\_split* para separar a base em um conjunto de teste e treinamento. Os testes foram feitos utilizando 20% (1087 - base desbalanceada e 421 - balanceada) das instâncias do banco de dados e o restante dos dados foram para treinamento.

## Base de Dados balanceada

No tratamento da base foi verificado seu desbalanceamento no atributo alvo (COVID-19) com uma frequência muito maior de casos positivos (4383 contra 1051). A fim de trazer um equilíbrio nas escolhas aleatórias do teste, evitando um viés de classificação sem uma classe majoritária de casos positivos, que poderia tornar o algoritmo tendencioso para a mesma, foi feita uma base balanceada. Além de evitar um viés de classificação uma base balanceada pode melhorar a precisão e reduzir o sobreajuste.

A base de dados foi balanceada retirando instâncias positivas, agora conta com a mesma quantidade de casos positivos e negativos, 1051 para cada classe.

A correlação dos atributos dessa nova base de dados não difere muito da base desbalanceada em relação aos atributos mais significativos, porém a correlação dos atributos com atributo alvo aumentou consideravelmente.

## Aplicação dos modelos de Redes Bayesianas

Os algoritmos foram implementados para os modelos definidos na fundamentação teórica Naive Bayes, K2 e TAN utilizando a linguagem Python e os recursos disponíveis na mesma.

Para os três modelos sua precisão foi calculada usando o método *score()* que quantifica a frequência com que a classificação foi realizada corretamente e o método *classification\_report* que gera um relatório mostrando as principais métricas de classificação.

Segue uma breve descrição de cada classificador:

- **Naive Bayes** foi implementado com auxílio da biblioteca *Scikit-learn*. Primeiramente foi feita a separação da base de dados em atributos preditores (x) e o atributo alvo (y), que é a coluna “COVID-19”.

O modelo então é treinado usando o método *CategoricalNB()* e *fit()*. Em seguida é usado para fazer previsões usando o método *predict()*.

Para identificar as características (atributos preditores) mais relevantes para a predição de um diagnóstico positivo, é utilizado o método *SelectKBest* usando a função chi-quadrado como função para avaliar a relevância das características. A função de pontuação do chi-quadrado é uma medida estatística que mede a dependência entre duas variáveis categóricas. Nesse contexto, ela é usada para determinar a relação entre cada atributo individual e a variável alvo.

- **Tree Augmented Naive Bayes** foi implementado com auxílio das bibliotecas *Scikit-learn* e *PGMPY*.

O grafo da rede TAN foi construído a partir dos dados carregados utilizando as classes *TreeSearch* e *BayesianEstimator* a partir delas foram feitas as seguintes funções: *est = TreeSearch (df\_train, root\_node = 'Breathing Problem')* e *dag = est.estimate (estimator\_type = 'tan', class\_node = 'COVID-19')*, o parâmetro *root\_node* é o nó raiz da estrutura do grafo, enquanto o *class\_node* é o nó alvo que você deseja prever, já *estimator\_type = 'tan'* define algoritmo a ser usado para estimar o DAG.

Então a Rede Bayesiana é construída a partir da estrutura do grafo usando as funções disponíveis nas classes *BayesianNetwork* e *BayesianEstimator*.

Para identificar as características (atributos preditores) mais relevantes para a predição de um diagnóstico positivo, foi utilizado o método *classifier.feature\_importances\_*.

- **K2** O algoritmo foi implementado com a ajuda das bibliotecas *Scikit-learn* e *numpy*, fundamentos teóricos e os pseudocódigos disponíveis em (SANTOS, 2007, p.16 ) e (SANTOS, 2011, p.15).

As variáveis de entrada e saída são definidas sendo **symptoms** contém os nomes dos atributos relacionados com a COVID-19 considerados como entradas do modelo, e **target** é o nome da variável de saída, que é 'COVID-19'. A estrutura da Rede Bayesiana é definida como um dicionário chamado **network**. Cada atributo em **symptoms** é associado a uma lista vazia de pais, e **target** é associado à lista de todos os atributos presentes em **symptoms**. Dessa forma a estrutura da Rede Bayesiana indica que o target (COVID-19) é diretamente dependente de todos os atributos.

O algoritmo K2 responsável por determinar os pais específicos para cada atributo com base na maximização do escore de pontuação é então implementado para aprender a estrutura da Rede Bayesiana. Para cada nó (atributo) em **symptoms**, são encontrados os melhores pais para o nó, com base na pontuação de uma métrica de qualidade (score). Os pais são selecionados iterativamente, considerando até três sintomas anteriores. O melhor pai para cada nó é adicionado ao **network**.

A função *predict* realiza previsões recebe uma instância de teste e o **network**. A função calcula as probabilidades dos nós no **network** com base nos seus pais. Se um nó não tiver pais, a probabilidade é calculada com base na média do valor desse nó nos dados de treinamento. E retornado um dicionário de probabilidades.

Esta função também realiza as previsões para os casos de teste. Ela é usada para obter as probabilidades dos nós no **network**, e uma previsão binária é feita com base na probabilidade do nó **target**. As previsões são armazenadas na lista *predictions*.

A identificação das características mais relevantes é feita usando o método *mutual\_info\_classif*.

## RESULTADOS

A aplicação dos classificadores TAN e K2 sobre a base de dados utilizada no estudo, produziu as representações gráficas, apresentadas nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

É importante salientar que o Naive Bayes categórico não gera um grafo explícito como em outras abordagens, pois nesse classificador, cada variável é tratada de forma independente, e a probabilidade condicional de cada variável dado o valor do rótulo é calculada.

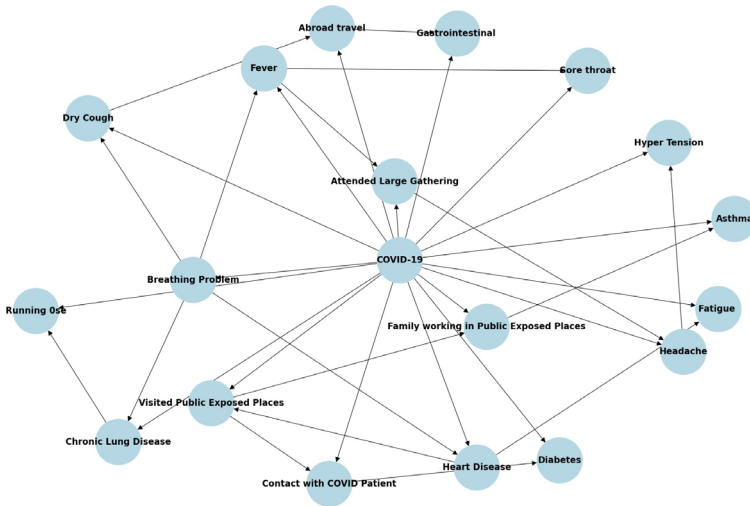


Figura 7 – Estrutura da rede TAN gerada sobre a base de dados. Fonte: Autor

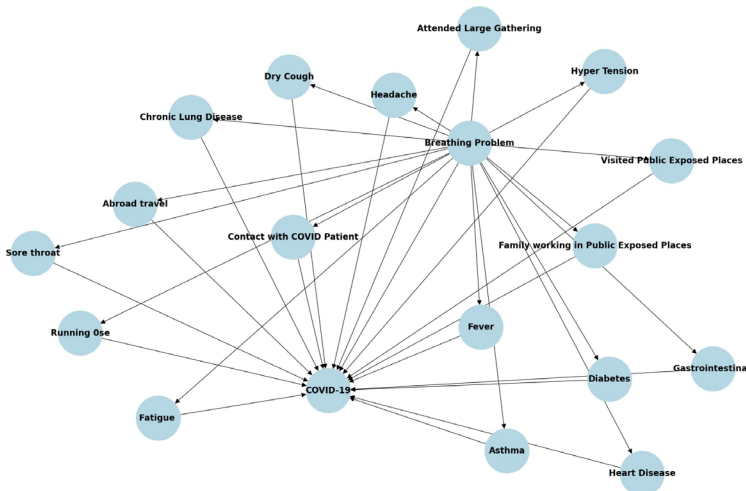


Figura 8 – Estrutura da rede K2 gerada sobre a base de dados. Fonte: Autor

Nas Figuras 7 e 8, é possível observar as relações de dependência condicional entre as variáveis, representadas pelas arestas nas redes geradas.

A direção das arestas indica a direção da dependência condicional entre os atributos. Por exemplo, se uma aresta aponta do atributo A para o atributo B, significa que o atributo B depende condicionalmente do atributo A. Isso implica que o valor do atributo B é influenciado pelo valor do atributo A.

Portanto, ao analisar as direções das arestas nas Figuras 7 e 8, podemos identificar quais atributos afetam diretamente outros atributos e compreender as relações de dependência entre eles.

Na Figura 7, na rede gerada pelo classificador TAN, é notável que todos os atributos estão dependentes do alvo “COVID-19”. Além disso, podemos observar as dependências entre alguns atributos, como a ligação entre “*Visited Public Exposed Places*” (Visitou Público Locais Expostos) e “*Contact with COVID Patient*” (Contato com Paciente COVID).

Na Figura 8, gerada pelo K2 como mencionado anteriormente, o atributo “COVID-19” foi associado a uma lista contendo todos os atributos, o que indica sua dependência com todos eles. Também foi observado que todos os atributos são dependentes do atributo “*Breathing Problem*” (Problema Respiratório). Isso ocorre devido ao fato de o K2 considerar a ordem dos atributos, sendo o atributo mencionado o primeiro nessa ordem.

A Tabela 1 expõe o relatório de classificação das medidas de acurácia, precisão e recall (sensibilidade) encontrados para cada classificador Bayesiano. Primeiramente descrevendo as métricas usadas para avaliar o desempenho dos modelos de classificação:

- **Precisão:** A precisão é a proporção de instâncias corretamente classificadas como positivas em relação ao total de instâncias classificadas como positivas. Uma precisão alta indica que o modelo tem baixa taxa de falsos positivos.
- **Recall (Sensibilidade):** O *recall* é a proporção de instâncias corretamente classificadas como positivas em relação ao total de instâncias verdadeiramente positivas. Um *recall* alto indica que o modelo tem baixa taxa de falsos negativos.
- **Acurácia:** A acurácia é a proporção de instâncias corretamente classificadas em relação ao total de instâncias.

Modelo	Desbalanceado			Balanceado		
	Acurácia	Precisão	Recall	Acurácia	Precisão	Recall
NB Categórico	97,24%	97%	97%	97,62%	98%	98%
TAN	97,88%	98%	98%	98,10%	98%	98%
K2	98,16%	98%	98%	98,57%	99%	99%

Tabela 1 – Classificação das medidas de acurácia, precisão e Recall de cada modelo Bayesiano

Pelos os resultados da Tabela 1, podemos observar o desempenho dos diferentes classificadores Bayesianos para dois cenários: desbalanceado e balanceado.

Em ambos os cenários os três classificadores (NB Categórico, TAN e K2) apresentam resultados semelhantes em termos de acurácia, precisão e *recall*. No entanto, o desempenho balanceado é ligeiramente superior em comparação com o desbalanceado, o que sugere que o balanceamento dos dados pode ser benéfico para melhorar a capacidade de previsão dos modelos.

Todos os modelos alcançaram uma acurácia superior a 97%, o que indica um bom desempenho geral, com destaque para o K2, que alcançou uma acurácia de 98,57%.

A precisão e o *recall* para todas as classes foram de 97% ou mais, indicando que os modelos têm uma baixa taxa de falsos positivos e falsos negativos.

Em geral, os classificadores Bayesianos (NB Categórico, TAN e K2) são capazes de lidar com eficiência com a tarefa de classificação do atributo alvo COVID-19.

Para identificar as características mais relevantes para o diagnóstico da COVID-19, foi feita uma média de frequência entre as 10 características mais destacadas nas listas de *ranks* retornadas pelos algoritmos, o que indica sua importância consistente na detecção e previsão da COVID-19.

As características encontradas foram: *Abroad travel* (viagem ao exterior); *Breathing Problem* (Problema respiratório); *Sore throat* (Dor de garganta); *Dry Cough* (Tosse seca); *Attended Large Gathering* (Participou de Grande Reunião); *Contact with COVID Patient* (Contato com Paciente com COVID); *Fever* (Febre); *Family working in Public Exposed Places* (Família trabalhando em locais públicos expostos); *Visited Public Exposed Places* (Visitou locais públicos expostos) e *Asthma* (Asma - condição preexistente que pode agravar o quadro da COVID).

## CONCLUSÃO

Com a pandemia de COVID-19 e suas mutações, desenvolver tecnologias para melhorar o controle de doenças altamente infecciosas é uma tarefa importante e benéfica. Este estudo propõe o uso de Redes Bayesianas para auxiliar no diagnóstico do COVID-19, os três modelos implementados (NB Categórico, TAN e K2) demonstraram alta eficiência na tarefa de classificar a base de dados apresentando resultados semelhantes e valores altos de acurácia, precisão e *recall* todos acima de 97% indicando a consistência dos modelos e a sua capacidade de realizar uma boa classificação das instâncias.

É interessante observar que com a base de dados balanceada, os modelos tiveram um ligeiro aumento na acurácia, precisão e *recall* em comparação com a base desbalanceada. Isso mostra que o balanceamento dos dados pode ter um impacto positivo no desempenho dos modelos. Além disso, incorporar novos dados à base de treinamento pode melhorar a eficácia dos modelos e também o possível uso em doenças futuras ou novas pandemias.

Os modelos demonstraram uma alta capacidade de identificar os fatores de risco, eles estão principalmente relacionados a alta transmissibilidade do vírus (viagem ao exterior, contato com paciente com COVID, família trabalhando em locais públicos expostos, Visitou locais públicos expostos, participou de grande reunião) que pode se propagar de pessoa para pessoa por meio de gotículas que se espalham pelo nariz ou pela boca quando uma pessoa doente tosse ou espirra. E a sintomas (problema respiratório, dor de garganta, tosse seca, febre, asma) característicos da COVID, embora já conhecidos e divulgados pelo Ministério da Saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, [s.d.]), é importante ressaltar essa forma de identificação que evidencia a eficácia das Redes Bayesianas para auxiliar no diagnóstico da COVID.

Por fim, ao utilizar uma boa base de dados, tais modelos são muito eficazes e podem ser implementados e utilizados para auxiliar os órgãos públicos a tomar decisões e contribuir efetivamente para a contenção da COVID-19 e de doenças futuras.

## REFERÊNCIAS

AQUINO, E.M.L., Silveira, I.H, Pescarini, J, Aquino, R., Souza-Filho, J.A. Medidas de distanciamento social no controle da pandemia de COVID-19: Potenciais impactos e desafios no Brasil. Documento Eletrônico. Disponível em <https://www.scielo.br/j/csc/a/4BHTCFF4bDq4qT7WtPhvYr>.

COOPER, G. F.; HERSKOVITS, E. A bayesian method for constructing bayesian belief networks from databases. In: Uncertainty Proceedings 1991. [S.l.]: Elsevier, 1991. p.86–94. Disponível em <https://arxiv.org/pdf/1303.5714.pdf>.

DATAPREP. DataPrep User Guide. Disponível em: [https://docs.dataprep.ai/user\\_guide/user\\_guide.html](https://docs.dataprep.ai/user_guide/user_guide.html).

FENTON, Norman & McLachlan, Scott & Lucas, Peter J. & Dube, Kudakwashe & Hitman, Graham & Osman, Magda & Kyrimi, Evangelia & Neil, Martin. (2020). **A privacy-preserving Bayesian network model for personalised COVID19 risk assessment and contact tracing**. Disponível em: <https://11nq.com/wnamt>.

KAGGLE Symptoms and COVID Presence (May 2020 data). Disponível em: <https://www.kaggle.com/datasets/hemanthhari/symptoms-and-covid-presence>.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Novo Coronavírus (COVID-19): Informações básicas. Disponível em: <https://11nk.dev/80nRo>.

ML ENGINEERING. Lecture 7. Bayesian Learning. Documento Eletrônico. Disponível em <https://encr.pw/SvCas>.

PANDAS. Pandas User Guide. Disponível em: [https://pandas.pydata.org/docs/user\\_guide/index.html#user-guide](https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html#user-guide).

PGMPY Bayesian Estimator. Documento Eletrônico. Disponível em: [https://pgmpy.org/param\\_estimator/bayesian\\_est.html](https://pgmpy.org/param_estimator/bayesian_est.html).

PGMPY Learning Tree-augmented Naive Bayes (TAN) Structure from Data. Documento Eletrônico. Disponível em: <https://encr.pw/rq3pU>.

PGMPY Source code for pgmpy.estimators.BayesianEstimator. Documento Eletrônico. Disponível em: <https://encr.pw/p9Jgx>.

PGMPY Source code for pgmpy.estimators.TreeSearch. Documento Eletrônico. Disponível em [https://pgmpy.org/\\_modules/pgmpy/estimators/TreeSearch.html](https://pgmpy.org/_modules/pgmpy/estimators/TreeSearch.html).

PGMPY Tree Search. Documento Eletrônico. Disponível em [https://pgmpy.org/structure\\_estimator/tree.html](https://pgmpy.org/structure_estimator/tree.html).

RUSSEL, Stuart; NORVING, Peter. **Inteligência Artificial**. Terceira edição. Elsevier Editora Ltda, 2013

SANTOS, Edimilson Batista. **Aprendizado indutivo de redes bayesianas: além da precisão na tarefa de classificação**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://encr.pw/LOGC3>.

SANTOS, Edmilson Batista. **A ordenação das variáveis no processo de otimização de classificadores bayesianos: Uma abordagem evolutiva**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Departamento de Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/361>.

SANTOS, Felipe Alexandre. **Um estudo aplicado no estado de São Paulo utilizando Redes Bayesianas na predição do controle no avanço de COVID-19**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14076>.

SCIKIT LEARN Naive Bayes. Documento Eletrônico. Disponível em: [https://scikit-learn.org/stable/modules/naive\\_bayes.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/naive_bayes.html).

SCIKIT-LEARN. SelectKBest. Disponível em: [https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature\\_selection.SelectKBest.html](https://scikitlearn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_selection.SelectKBest.html).

STRABELLI, Tânia Mara Varejão; UIP, David Everson. COVID-19 e o Coração. Arq. Bras. Cardiol., v. 114, n. 4, p. 598-600, abr. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/abc/a/NWkKJDxLthWSb53XFV9Nhvn/?lang=pt>.

THE GUIDE TO TUNNEL VISION Classification with Tree-augmented Naive Bayes (TAN) and Pgmpy. Documento Eletrônico. Disponível em: <https://loudly-soft.blogspot.com/2020/08/classification-with-tree-augmented.html>.

TORRES CORDERO, F.; GONZÁLEZ BENÍTEZ, N.; MAR CORNELIO, O. **Empleo de las redes bayesianas para apoyar la toma de decisiones sobre la propagación de la Covid-19**. Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, v. 14, n. 5, p. 154-167, 1 maio 2021. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8590474>.

WEBB, Geoffrey. (2016). **Naive Bayes**. Disponível em: <https://encr.pw/DXglw>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2003). Consensus document on the epidemiology of severe acute respiratory syndrome (SARS). World Health Organization. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/70863>. Acesso em: 27 mar. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2023 a), Middle East respiratory syndrome. Disponível em: <https://11nq.com/UnaWr>. Acesso em: 20 mar. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (2023 b), WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. Disponível em: <https://covid19.who.int>. Acesso em: 27 mar. 2023.



# PREVISÃO DE VELOCIDADE DO VENTO COM SÉRIE TEMPORAL MULTIVARIADA UTILIZANDO REDE NEURAS RECORRENTE

*Data de aceite: 02/05/2024*

### **Reginaldo Nunes da Silva**

Universidade Estadual do Maranhão,  
Departamento de Engenharia da  
Computação, São Luís, Maranhão, Brasil

### **Dario Gerardo Fantini**

Universidade de Brasília, Departamento  
de Engenharia Mecânica, Laboratório  
de Energia e Ambiente, Brasília, Distrito  
Federal, Brasil

### **Mauro Sérgio Silva Pinto**

Universidade Estadual do Maranhão,  
Departamento de Engenharia da  
Computação, São Luís, Maranhão, Brasil

### **Rafael Castilho Farias Mendes**

Universidade de Brasília, Departamento  
de Engenharia Mecânica, Laboratório  
de Energia e Ambiente, Brasília, Distrito  
Federal, Brasil

### **Marlos José Ribeiro Guimarães**

Laboratório de Aerodinâmica Aplicada de  
Furnas, Departamento de Segurança de  
Barragens e Tecnologia - DSB.E, Goiânia,  
Goiás, Brasil

### **Antônio César Pinho Brasil Júnio**

Universidade de Brasília, Departamento  
de Engenharia Mecânica, Laboratório  
de Energia e Ambiente, Brasília, Distrito  
Federal, Brasil

**RESUMO:** A investigação da série temporal é fundamental para o monitoramento e administração de sistemas elétricos, particularmente no contexto de sistemas de energia eólica, onde a capacidade de prever a velocidade do vento com elevada precisão é crucial. Tal previsão possibilita o despacho de energia de maneira eficiente e contribui para a mitigação dos riscos associados à volatilidade inerente das condições eólicas. O presente estudo propõe e implementa um modelo de Rede Neural Recorrente Multivariada com Memória de Curto e Longo Prazo (MV-LSTM do inglês Long Short-Term Memory Networks with Multiple Variables) para analisar dados de velocidade do vento, incluindo medidas médias, máximas e mínimas em base horária. Adicionalmente, uma Rede LSTM univariada foi desenvolvida para servir como termo de comparação. Os dados empregados neste estudo foram coletados por meio de um anemômetro sônico, durante o intervalo de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2015, em um ecossistema de cerrado nativo na Fazenda Água Limpa (FAL), situada no Distrito Federal, Brasil. Os resultados obtidos indicam que a inclusão dos vetores de velocidade máxima e mínima aprimora significativamente a precisão das

previsões de velocidade do vento. Além disso, o modelo MV-LSTM demonstrou uma redução no atraso das previsões em situações de transições abruptas na velocidade do vento, um desafio previamente identificado por Xie et al. (2021) em sua pesquisa. Sugere-se que o modelo pode ser aperfeiçoado através da adição de camadas adicionais e da integração com outros métodos de aprendizado de máquina para otimizar ainda mais o desempenho preditivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** MV-LSTM, Previsão, Energia Eólica

## WIND SPEED FORECAST WITH MULTI-VARIABLE TIME SERIES USING RECURRENT NEURAL NETWORK

**ABSTRACT:** Investigating time series is crucial for monitoring and administering electrical systems, especially in the context of wind energy systems, where the ability to predict wind speed with high precision is critical. Such forecasting enables efficient energy dispatch and contributes to mitigating risks associated with the inherent volatility of wind conditions. This study proposes and implements a Multivariate Long Short-Term Memory (MV-LSTM) model to analyze wind speed data, including average, maximum, and minimum hourly measurements. Additionally, a univariate LSTM network was developed for comparison. The data used in this study were collected through a sonic anemometer, from January 1 to December 31, 2015, in a native cerrado ecosystem at Fazenda Água Limpa (FAL) in the Federal District, Brazil. The findings indicate that including maximum and minimum speed vectors significantly improves the accuracy of wind speed forecasts. Moreover, the MV-LSTM model showed a reduction in forecast lag in situations of abrupt wind speed transitions, addressing a challenge previously identified by Xie et al. (2021). It suggests that the model could be further enhanced by adding additional layers and integrating with other machine learning methods to optimize predictive performance.

**KEYWORDS:** MV-LSTM, Forecast, Wind Energy

## INTRODUÇÃO

A análise de dados de séries temporais é fundamental para o controle e gerenciamento de diversos sistemas. Atualmente, os sistemas de conversão de energia renovável representam os principais motivadores para o desenvolvimento de análises de séries temporais (Jin et al., 2020). Séries temporais são importantes para realizar previsões de dados futuros e, com isso, planejar quanto de energia será possível despachar em determinado período, assim como para o gerenciamento de parques eólicos ou fotovoltaicos (Dubey et al., 2021). Portanto, análises de séries temporais de dados de velocidade do vento e irradiação solar são bastante estudadas com o objetivo de maximizar a conversão de energia.

Contudo, para prever o futuro dos dados, não basta apenas o valor histórico da variável-alvo; outros fatores com influência implícita também devem ser considerados na análise (Liang, Nguyen, Jin, 2018; Jin et al., 2020; Dubey et al., 2021). A velocidade do

vento pode ser influenciada pela temperatura, irradiação solar, umidade e direção do vento, além das condições topográficas. Du (2018) argumenta que, ao realizar análises com variáveis multidimensionais que apresentam correlação entre si, a precisão das variáveis-alvo da análise é melhorada devido à correlação intrínseca e às características históricas.

Diversos trabalhos que fazem análise de séries temporais para previsão de dados futuros foram publicados nos últimos anos. Dubey et al. (2021) utilizam a Média Móvel Integrada Autoregressiva (ARIMA), ARIMA sazonal (SARIMA) e Long Short-Term Memory (LSTM) para prever o consumo de energia em uma base de dados diária, e os resultados obtidos mostram que o modelo LSTM apresenta melhores resultados. Rashid (2018) desenvolveu uma análise de um conjunto de dados de consumo de energia para criar um modelo de previsão utilizando ARIMA. Essas análises de big data podem ajudar as empresas de energia a melhorar a gestão de energia e serviços. Zufferey et al. (2016) aplicam Redes Neurais Artificiais (RNAs) para previsões precisas de carga de curto prazo em sistemas fotovoltaicos (PV) e investigam diferentes níveis de agregação espacial. Os resultados mostram que o fluxo de energia confirma os benefícios da previsão de séries temporais para apoiar a operação da rede.

Para um controle e gerenciamento inteligente de turbinas eólicas, é importante ter informações antecipadas de velocidade do vento para permitir uma operação estável do sistema de energia. Yao, Huang e Jia (2018) aplicaram um modelo LSTM em conjunto com a teoria dos Conjuntos Fuzzy-Rough (SFR) para a previsão de velocidade do vento a curto prazo. Os resultados mostraram que o modelo FRS-LSTM tem maior precisão de predição do que a rede neural tradicional. Cao e Gui (2018) utilizaram o modelo LSTM para previsão de séries temporais de velocidade do vento em conjunto com o modelo LightGBM. Apesar de o LSTM conseguir identificar as dependências de longo prazo, sua capacidade de lidar com diferentes janelas de dados no curto prazo para vários intervalos de tempo é insuficiente para uma boa previsão. Assim, é comum que o LSTM seja combinado com outro modelo de previsão.

A previsão confiável e precisa da velocidade do vento é a base para a utilização eficaz da energia eólica. Shao (2021) utiliza a combinação da rede LSTM e FWA (Firework Algorithm) para fazer a previsão da velocidade do vento baseada na velocidade em tempo real. Os resultados mostram que o método FWA-LSTM reduz os erros de previsão da velocidade do vento. Xie et al. (2021) desenvolveram um modelo LSTM multivariado (MV-LSTM) para previsão de velocidade do vento a curto prazo baseado em temperatura, pressão e umidade. A seleção das variáveis foi feita a partir do coeficiente de correlação de Pearson. O modelo MV-LSTM apresentou resultados superiores aos modelos ARMA e LSTM com variável única. Portanto, é evidente que o modelo LSTM tem sido amplamente utilizado para previsão de velocidade do vento; no entanto, é necessário desenvolver modelos que auxiliem o LSTM a aumentar a acurácia da previsão para alcançar alta confiabilidade.

Com a inserção dos vetores de velocidade máxima e mínima no modelo, as características de curto prazo podem ser mais bem definidas. Dessa forma, este artigo propõe um modelo de previsão de velocidade do vento utilizando o modelo LSTM multivariado baseado em dados de velocidade média, máxima e mínima horária. Uma análise baseada no coeficiente de correlação de Pearson é realizada, e o modelo é treinado com dados históricos coletados no Cerrado brasileiro nativo no Distrito Federal.

## MÉTODOS E DADOS

### Descrição do sítio

O Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília vem conduzindo, ao longo dos últimos cinco anos, um experimento de caracterização da camada limite atmosférica sobre uma área de Cerrado brasileiro nativo na cidade de Brasília. O estudo utiliza medições experimentais em torres de 8 m de altura com a técnica Eddy Covariance, com o objetivo de verificar a dinâmica da camada limite atmosférica e estimar fluxos no bioma (ver Fig. 1). Registra-se um conjunto de dados com taxas de aquisição de 10 Hz que incluem os componentes tridimensionais da velocidade do vento, as concentrações de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, e a temperatura.



Figura 1 - Experimento Eddy Covariance. Torre de 8 m sobre área de Cerrado nativo (a); Detalhe do anemômetro sônico 3D (b).

Os dados foram coletados na Fazenda Água Limpa (FAL), que pertence à Universidade de Brasília, localizada no Distrito Federal, com as coordenadas 15°57'13" S 47°54'58" W. A FAL está localizada a 28 km da sede do Campus Universitário da Asa Norte e faz parte da Área de Proteção Ambiental das Bacias do Gama e Cabeça do Veado. A torre com anemômetro sônico foi instalada nas coordenadas mostradas na Fig. 2.

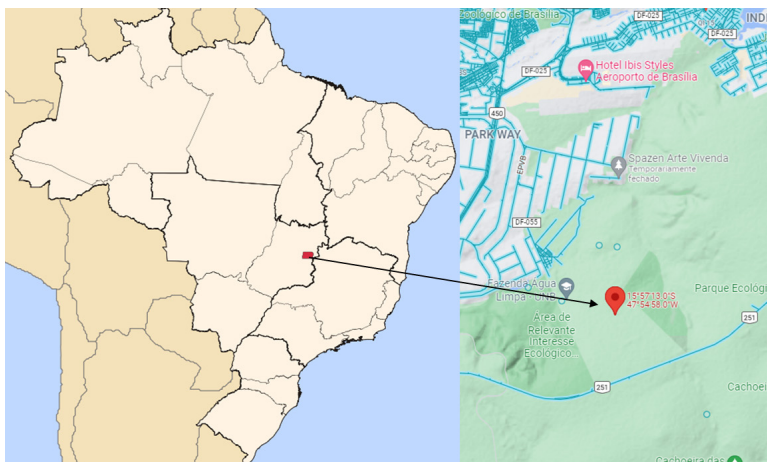


Figura 2 – Localização da torre de coleta dos dados.

## Descrição dos dados

As séries temporais são agrupadas em valores horários e em bases mensais no sentido de estabelecer a resposta sazonal da camada limite atmosférica sobre a área de Cerrado nativo. De forma ilustrativa, esses valores são apresentados na Tabela 1. Observa-se que, nesta região, os ventos são fracos, com médias em torno de 2 m/s. Em alguns dias, a velocidade máxima do vento pode excepcionalmente atingir 5 m/s. A velocidade do vento é maior nos meses de junho a agosto, período em que as ondas de frio características do inverno local proporcionam ventos mais intensos.

	Velocidade Média (m/s)	Velocidade Máxima (m/s)	Desvio Padrão
<b>Jan</b>	1.9	4.8	0.841
<b>Fev</b>	2.0	5.8	1.002
<b>Mar</b>	1.6	4.1	0.790
<b>Abr</b>	1.5	4.8	0.769
<b>Mai</b>	1.9	5.2	0.832
<b>Jun</b>	2.9	5.7	0.858
<b>Jul</b>	2.1	6.2	0.995
<b>Ago</b>	2.3	5.0	1.021
<b>Set</b>	1.9	4.9	0.940
<b>Out</b>	1.9	4.9	0.974
<b>Nov</b>	1.8	6.6	0.932
<b>Dez</b>	1.8	4.8	0.847

Tabela 1 - Valores médios mensais de vento em torre de 8 m sobre o Cerrado.

Neste estudo, os dados da série temporal de todos os elementos meteorológicos foram usados para prever a velocidade do vento a curto prazo. As observações foram feitas entre 1 de janeiro e 31 de dezembro de 2015 e agrupadas em médias horárias. 80% dos dados totais (292 dias  $\times$  24 h = 7008 amostras de dados) foram usados para treinar o modelo, e os últimos 20% dos dados totais (73 dias  $\times$  24 h = 1752 amostras de dados) foram usados para testar o modelo. Para abordar a questão dos valores ausentes, o valor médio dos dois pontos de dados antes e depois do ponto de dados ausente foi utilizado para reposição.

### Long Short-Term Memory (LSTM)

Em 1997, Hochreiter et al. (1997) propuseram o modelo de rede Long Short-Term Memory (LSTM), que incorpora memória de curto e longo prazo através de um mecanismo de controle de portas, mitigando assim o problema de desaparecimento ou explosão de gradientes encontrado em Redes Neurais Recorrentes (RNNs). A Fig. 3 ilustra a estrutura básica de uma célula LSTM. A rede é composta por uma célula com uma porta de saída  $T_o$ , uma célula de memória  $\tilde{c}_t$ , uma porta de entrada  $T_i$  e uma porta de esquecimento  $T_f$ .  $W$  e  $U$  representam as matrizes de pesos compartilhados dos neurônios,  $h_t$  é o estado oculto no momento  $t$ ,  $x_t$  é a entrada da rede no momento  $t$ , e  $\sigma$  e  $\tanh$  são as funções de ativação.

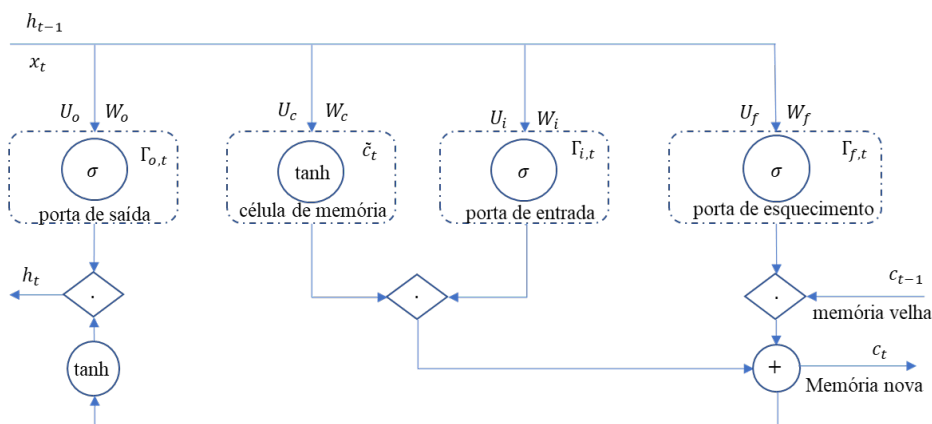


Figura 3 – Estrutura básica de uma célula da rede LSTM.

A rede LSTM funciona a partir do controle dos *gates*. A porta de esquecimento determina quais informações da memória velha é descartada ou retida. Com  $h_{t-1}$  e  $x_t$ , uma saída de 0 e 1 é obtida, onde 0 significa descartado e 1 retido. A saída da porta de esquecimento é dada pela Eq. (1)

$$\Gamma_{f,t} = \sigma(U_f h_{t-1} + W_f x_t + b_f), \quad (1)$$

em que,  $b_f$  é o vetor de polarização.

A porta de entrada determina as informações que são adicionadas à célula e tem como função gerar informações para as funções tanh e sigmóide de modo combinado com a porta de esquecimento e atualiza o estado da célula da rede LSTM. As informações são dadas pelas Eq. (2) e Eq. (3).

$$\Gamma_{i,t} = \sigma(U_i h_{t-1} + W_i x_t + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{c}_i = \tanh(U_c h_{t-1} + W_c x_t + b_c) \quad (3)$$

A última etapa da célula de uma rede LSTM é A porta de saída. É na porta de saída que as informações do estado atual da célula são determinadas e em conjunto com as funções sigmóide e tanh calcula a saída da célula. As informações da porta de saída são calculadas pelas Eq. (4) e Eq. (5)

$$\Gamma_{o,t} = \sigma(U_o h_{t-1} + W_o x_t + b_o), \quad (4)$$

$$h_t = \Gamma_{o,t} \tanh(c_t), \quad (5)$$

### **Rede Long Short-Term Memory Multivariado (MV-LSTM)**

Neste artigo, é proposto um modelo LSTM multivariado para previsão de dados de velocidade do vento a curto prazo baseado nas velocidades média, máxima e mínima horária. As características dos dados são analisadas a partir do coeficiente de correlação de Pearson. A estrutura do modelo é mostrada na Fig. 4.

A seleção das variáveis de entrada para o modelo foi definida com o objetivo de verificar se inserindo dois vetores com velocidade máxima e mínima ao modelo os resultados previstos melhoram. A correlação de Pearson foi utilizada para verificar o quanto esses vetores se correlacionam. Variáveis correlacionada melhoram os resultados previstos para o modelo MV-LSTM apresentado por Xie et. al (2021). Porém, os valores máximo e mínimo ainda não apresentam bons resultados devido o modelo apresentar instabilidades com esses dados. O coeficiente da correlação de Pearson pode ser calculado pela Eq. (6)

$$r(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (6)$$

em que,  $r(x, y)$  é o coeficiente de correlação de Pearson entre  $x$  e  $y$ ,  $\text{cov}(x, y)$  é a covariância entre  $x$  e  $y$ ,  $\sigma_x$  é o desvio padrão de  $x$  e  $\sigma_y$  é o desvio padrão de  $y$ .

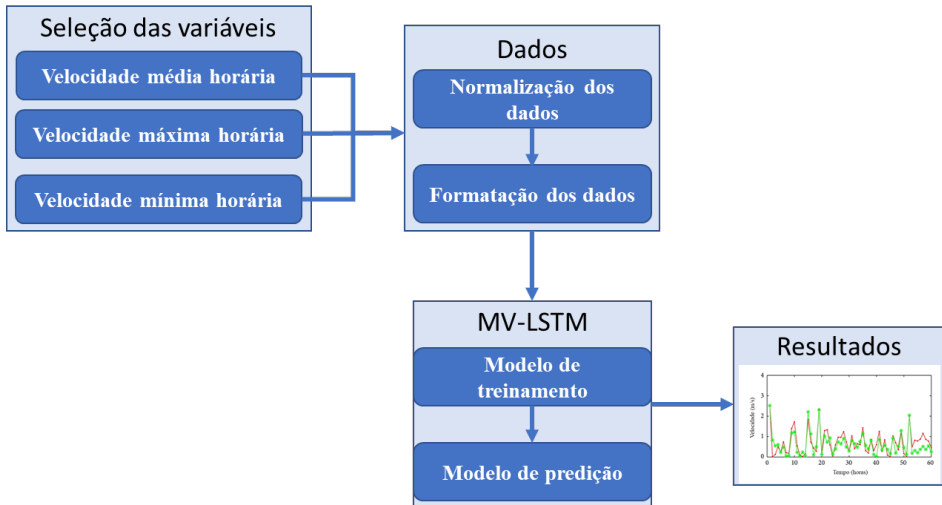


Figura 4 – Estrutura da rede LSTM multivariável proposta para previsão da velocidade do vento descrita em quatro etapas de desenvolvimento.

Para garantir que as variáveis de entrada tenham escalas e estruturas semelhantes em todos os vetores é necessário a normalização. Os valores máximo e mínimo são utilizados para normalizar os dados de treinamento e teste. Todos os vetores são normalizados a partir da Eq. (7).

$$v_{inorm} = \frac{v_i - v_{min}}{v_{max} - v_{min}}, \quad (7)$$

em que,  $v_{inorm}$  são os valores do recurso normalizado para o tempo  $i$ ,  $v_{max}$  e  $v_{min}$  são os valores máximo e mínimo do conjunto de dados para um recurso,  $v_i$  são os valores real no tempo  $i$ . Todos os dados foram normalizados e escalonados entre 0 e 1.

O próximo passo é formatar os dados de forma que todos os vetores de velocidade se tornem uma matriz de entrada no modelo MV-LSTM. Para configurar a rede MV-LSTM foi utilizado a biblioteca Python chamada Keras. Sendo uma rede de aprendizado supervisionado, LSTM precisa ter duas partes de dados. Dessa forma, os dados são divididos em amostra e os rótulos correspondentes, ou seja, entrada  $x$  e saída  $y$ , onde a entrada  $x$  representa os dados de amostra e  $y$  representa o rótulo correspondente aos dados de amostra. Portanto, os conjuntos de treinamento e teste precisam ser formatados em duas partes  $x$  e  $y$ . As amostras de velocidade são representadas pelo vetor  $v_i = (v_{média}, v_{máxima}, v_{mínima})$ , assim a formatação dos dados pode ser feita a partir da montagem de uma matriz contendo todos os vetores de acordo com a Eq. (8) e Eq. (9).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_t \\ v_2 & v_3 & \dots & v_{t+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_n & v_{n+1} & \dots & v_{t+n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$



$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{t+1} \\ y_{t+2} \\ \vdots \\ y_{t+n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

em que,  $x_i$  é a amostra de um recurso,  $v_i$  são as observações dos dados no tempo  $i$ .

Os dados do conjunto de treinamento formatado são utilizados para treinar o modelo de rede LSTM. A rede aprende de forma iterativa de modo que os parâmetros de peso são otimizados para o modelo aprender as características dos dados. A Tab. 2 mostra os hiper parâmetros do modelo de rede LSTM.

Parâmetros	VALOR
epoch size	30
batch size	64
neuron size	12
loss function	mean absolute error (MAE)
optimizer	adaptive moment estimation (adam)

Tabela 2 – Hiper parâmetros da rede MV-LSTM.

A última etapa do processo foi a previsão da velocidade do vento com o modelo da rede MV-LSTM treinado com o conjunto de teste foi usada como a entrada do modelo, e o modelo treinado tem como valor previsto  $yn'$ , como mostrado na Eq. (10). Com os dados de testes e com os valores previstos o modelo calcula-se o valor do erro a partir da Eq. (11).

$$\begin{bmatrix} yn'_1 \\ yn'_2 \\ \vdots \\ yn'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} yn'_{t+1} \\ yn'_{t+2} \\ \vdots \\ yn'_{t+n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - yn'_i| \quad (11)$$

## Métricas de avaliação

Para avaliar o desempenho do método MV-LSTM foi empregado as quatro métricas quantitativas que são as mais utilizadas. O erro foi calculado a partir do Mean absolute erro (MAE), R-squared ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro quadrado médio (MSE). O MAE, RMSE, MSE e  $R^2$  são definidos da seguinte forma:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - yn'_i|, \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}, \quad (13)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2, \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \overline{y})^2} \quad (15)$$

em que,  $y_i$  é a observação da velocidade do vento no tempo  $i$  e  $\widehat{y}_i$  é a previsão da velocidade do vento no tempo  $i$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados de velocidade média, máxima e mínima para cada hora do ano de 2015 foi calculado a matriz dos coeficientes da correlação de Pearson. Os coeficientes são apresentados no gráfico da Fig. 5. Como era esperado as velocidades máxima e mínima tem alta correlação com a velocidade média, mas a velocidade mínima é menos correlacionada com a velocidade máxima do que a velocidade média. É importante destacar que outros parâmetros meteorológicos apresentam correlação com as mudanças na velocidade do vento, no entanto, para este artigo foi considerado apenas as velocidades máxima e mínima horária em conjunto com a velocidade média, de modo a melhorar a previsão de uma rede LSTM multivariável. O coeficiente da correlação de Pearson varia de -1 a 1. Quando as variáveis apresentam alta correlação o coeficiente é igual a 1 e quando são totalmente descorrelacionadas é igual a -1. No caso, das variáveis utilizadas nesse estudo são altamente correlacionadas, visto que, são dados de velocidade do mesmo *dataset*.

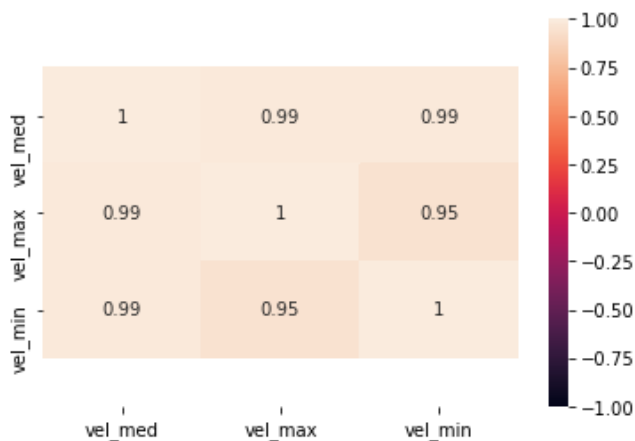


Figura 5 – Correlação de Pearson para os três vetores de velocidade.

Os resultados de predição dos métodos LSTM e MV-LSTM são mostrados como os valores das métricas de avaliação nas Tab. 3, onde o melhor desempenho é destacado em negrito. Os valores de RMSE mostram que o modelo MV-LSTM tem um desempenho melhor do que o modelo LSTM. O método MV-LSTM pode lidar bem com os picos de velocidade. A Fig. 6 apresenta o erro médio absoluto para os dados de treino e teste para o modelo MV-LSTM. O erro do teste é um pouco maior do que o de teste, de certo modo, esse é um comportamento esperado.

Métodos	MAE	RMSE	MSE	R2
LSTM	0.24	0.096	0.0094	0.54
MV-LSTM	<b>0.0394</b>	<b>0.061</b>	<b>0.0037</b>	<b>0.602</b>

Tabela 3 – Os valores métricos de avaliação para os dois modelos no conjunto de teste.

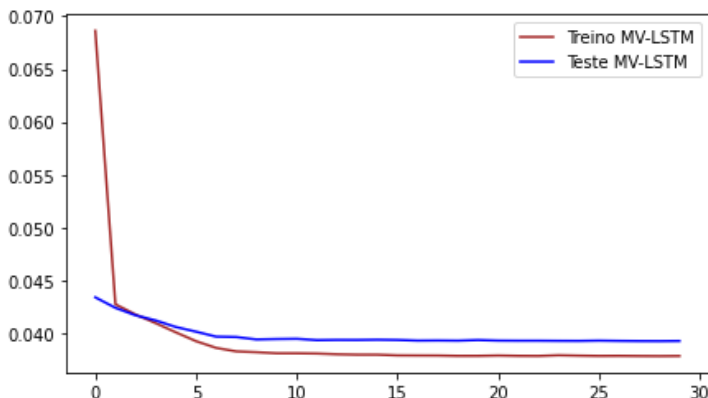


Figura 6 – Curva do erro médio absoluto do modelo VM-LSTM.

Comparando os dados de teste com os dados preditos foi verificado que os picos de velocidade para a rede MV-LSTM com dados de velocidade máxima e mínima diária melhora a previsão dos picos de velocidade média em comparação com as previsões feitas com a rede LSTM com uma variável. A Fig. 5 apresenta as três curvas com destaque para o detalhe de dois picos de velocidade em que o modelo MV-LSTM apresenta valor mais próximo do valor observado e resolve o atraso quando se tem uma mudança de velocidade brusca. No trabalho de Xie et. al (2021) o modelo MV-LSTM implementado apresenta melhoria na previsão, porém continua com atrasos quando há uma mudança brusca de velocidade.

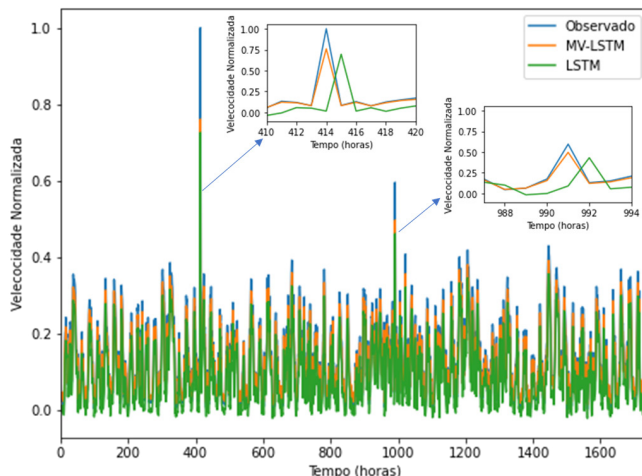


Figura 7 – Dados de testes da rede LSTM e VM-LSTM.

Com as informações dos picos de velocidade horária o modelo aprende as mudanças bruscas dos dados e com isso as informações de picos máximo e mínimos não são descartadas. Diferentemente quando não tem os valores dos picos das mudanças repentinas o modelo descarta, visto que, com os valores médios esses picos apresentam em menor magnitude e menor período. Com os dados de máximo e mínimo de hora em hora modelo MV-LSTM aprende as características dos dados e desenvolve uma previsão com maior acurácia.

## CONCLUSÕES

Neste artigo, é proposto um modelo de rede neural recorrente multivariada do tipo memória de curto longo prazo (MV-LSTM) para previsão de velocidade a curto prazo. Sendo um modelo multivariáveis pode-se prever velocidade do vento a partir de dados históricos de velocidade média, máxima e mínima horária para previsão de velocidade do vento. O modelo foi verificado a partir de dados histórico de uma torre com anemômetro sônico da Laboratório de Energia e Ambiente -UnB que realizou medições entre 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015.

O resultado do modelo MV-LSTM é comparado com resultado do modelo LSTM com única variável de entrada. As observações experimentais mostram que o desempenho do modelo MV-LSTM apresenta desempenho de previsão melhor que a rede LSTM de variável única com base apenas em dados históricos de velocidade média do vento. A rede MV-LSTM implementada com as velocidades máximas e mínimas retirou o atraso na previsão da velocidade quando há uma alteração brusca, como em uma rajada de vento. Isso é importante, pois os modelos utilizados atualmente não lidam muito bem com as instabilidade e volatilidade dos dados de velocidade do vento.

O modelo implementado não foi testado com outro conjunto de dados. No entanto, a próxima etapa vai ser implementar o modelo para outro *dataset* de dados e otimizar a capacidade de aprendizado do modelo, bem como implementar *Gated Recurrent Unit Network* (GRU) que é um modelo de aprendizado de máquina supervisionada e fazer comparações. Com base nisso, consideraremos otimizar a capacidade de aprendizado do modelo aumentando sua complexidade, como adicionando camadas de rede e combinando outras redes neurais, melhorando assim a precisão de previsão do modelo para velocidades do vento com maior instabilidade e volatilidade.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de P&D “Otimização do modelo meteorológico BRAMS, com validação experimental, para subsidiar aperfeiçoamentos de modelagens em sistemas eólicos” - PD-0394-1709/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, desenvolvido pela Eletrobras FURNAS e Universidade de Brasília.

R N Silva e M S S Pinto agradecem à Universidade Estadual de Maranhão - UEMA, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- Cao, Y., Gui, L., 2018. Multi-Step wind power forecasting model Using LSTM networks, Similar Time Series and LightGBM, 5th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), pp. 192-197.
- Dubey, A. K., Kumar, A., García-Díaz, V., Sharma, A. K., Kanhaiya, K., 2021. Study and analysis of SARIMA and LSTM in forecasting time series data, Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 47, n. 10, pp. 114-128.
- Du, S., Li, T., Yan Y., Shi-Jinn, H., 2019. Deep Air Quality Forecasting Using Hybrid Deep Learning Framework, arXiv, vol. 47, pp. 114-126.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J., 1997. Long short-term memory, Neural Comput, vol. 9, pp. 1735–1780.
- Jin, X., Yu, X., Wang, X., Bai, Y., Su, T., Kong, J., 2020. Prediction for Time Series with CNN and LSTM, Springer Singapore, pp. 631-641.
- Liang, S., Nguyen, L., Jin, F., 2018. A Multi-variable Stacked Long-Short Term Memory Network for Wind Speed Forecasting, IEEE Int. Conf. Big Data, pp. 4561–4564.
- Rashid, M. H., 2018. AMI Smart Meter Big Data Analytics for Time Series of Electricity Consumption, 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications, pp. 1771-1776.
- Xie, A., Yang, H., Chen, J., Sheng, L., Zhang, Q., 2021. A Short-Term Wind Speed Forecasting Model Based on a Multi-Variable Long Short-Term Memory Network, vol. 12, n. 1, pp. 2073-4433.
- Yao, W., Huang, P. Jia, Z., 2018. Multidimensional LSTM Networks to Predict Wind Speed, 37th Chinese Control Conference (CCC), pp. 7493-7497.
- Zufferey, T., Ulbig, A., Koch, S., Hug, G., 2017. Forecasting of Smart Meter Time Series Based on Neural Networks, Springer International Publishing, pp. 10-21.

# USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ROBÓTICO COM CAPACIDADE DE RASTREAR INDIVÍDUO

*Data de aceite: 02/05/2024*

**Lucas G. E. Vieira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão- IFMA

**Almir S. S. Neto**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão- IFMA

**Francisco S. Viana**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão- IFMA

**RESUMO:** A robótica tem sido de grande ajuda ao homem para completar inúmeras tarefas, ela é empregada em diversos lugares como hospitais, aeroportos, fábricas, entre outros. A visão computacional é utilizada em conjunto com a robótica a fim de obter informações do ambiente, entretanto, isso requer um grande poder de processamento, visto que grande parte dos trabalhos desenvolvidos recentes na área de detecção de objetos utilizam de redes neurais robustas, inviabilizando o uso de sistemas embarcados de baixo custo. Este artigo apresenta um sistema de baixo custo para detecção e rastreamento de uma pessoa usando uma câmera RGB em tempo real, para isso desenvolveu-se um sistema

de controle de movimento de robô utilizando apenas os parâmetros obtidos da detecção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica; Detecção de objetos; Rastreamento; MobileNet; Baixo custo

## INTRODUÇÃO

A Robótica é um campo que reúne várias áreas do conhecimento, tais como mecânica, eletrônica, informática, inteligência artificial, engenharia de controle, entre outras.

A robótica é capaz de proporcionar maior flexibilidade, melhoria da qualidade de trabalho e aumento da segurança ocupacional (SIEGWART *et al.*, 2011). Por este motivo, a robótica tem sido utilizada em um grande número de processos industriais, tais como: manutenção de produtos, soldagem, aplicação de produtos (pintura, colagem...), carga e descarga de máquinas, mecanização, processos de corte, montagem de produtos, paletização, medição, inspeção e etc. (TURIEL *et al.*, 2002).

Embora na atualidade os robôs industriais executem múltiplas tarefas com grande precisão e rapidez, a principal desvantagem que apresentam é a sua falta de mobilidade, podendo atuar apenas dentro da sua área de trabalho, entendendo-a como o volume do espaço definido através os pontos acessíveis pelos elementos do robô (SIEGWART *et al.*, 2011).

Dentro da robótica está a robótica móvel, um ramo que se concentra no estudo da mobilidade de robôs. Nele, a maioria das aplicações se concentra tanto na teleoperação de robôs, quanto em seu comportamento autônomo (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Na robótica móvel, um dos aspectos fundamentais é a obtenção de informações do ambiente em que o robô opera. Para isso, robôs móveis contam com múltiplos sensores, como sensores de proximidade, pressão, sensores de luz... Apesar da quantidade de informações que podem ser extraídas desses sensores serem limitadas, eles têm sido utilizados em um grande número de trabalhos porque as informações desses sensores são muito fáceis de processar e interpretar. Uma das opções de sensoriamento mais importante hoje é a visão computacional, pois de uma imagem é possível extrair uma grande quantidade de informações como distância, localização, posição, formas e cores do objeto.

As principais desvantagens da visão computacional em robôs são o custo computacional necessário para extrair e processar as informações da imagem, bem como a dependência das condições ambientais, em termos de iluminação, presença de objetos, etc. Esse custo não seria um problema em outras áreas, mas na robótica móvel é, uma vez que a maioria das operações em robôs deve ser realizada em tempo real.

Neste trabalho, é apresentado um sistema robótico de baixo custo capaz de lidar com processamento de imagens, assim como utilizar desse recurso para seguir pessoas.

## COMPONENTES DO SISTEMA

### Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um computador em placa única do tamanho de um cartão de crédito, mas que possui todos os componentes que um computador de custo mais elevado. Esta é uma placa de baixíssimo custo, tornando-a extremamente atrativa, versátil e viável para desenvolvimento de projetos (LIMA *et al.*, 2020).

O modelo utilizado nessa pesquisa trata-se do Raspberry Pi 3 B+, portando um processador Cortex-A53 (ARMv8) quad-core de 1.4GHz, 1GB de memória RAM, 40 pinos GPIO, 4 portas USB, entrada para cabo Ethernet, suporte a Wi-Fi, entrada para fonte DC de 5V/2.5A e saída HDMI.

## OpenCV

OpenCV é uma biblioteca de funções de programação voltadas principalmente para a visão computacional em tempo real. Desenvolvida originalmente pela Intel, a biblioteca é multiplataforma e gratuita para usar sob a licença de código aberto BSD (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Ela possui mais de 2.500 algoritmos otimizados, que incorporam um conjunto abrangente de funções relacionadas tanto a visão computacional clássica, quanto a atual. Esses algoritmos podem ser usados para detectar e reconhecer rostos, classificar objetos, classificar ações humanas em vídeos, rastrear movimentos de câmera, etc. Todas as estruturas de *ar-rays* OpenCV são convertidas para *arrays* Numpy. Portanto é possível combinar operações realizadas no Numpy com o OpenCV, o que diminui imensamente o número de limitações (SEKHAR; RAO, 2019). Utilizou-se essa biblioteca visando ler, mostrar e fazer um pré-processamento da imagem obtida através da câmera.

## MobileNet

Para a detecção de pessoas utilizou-se o modelo MobileNet. Este trata-se de uma classe de modelos eficientes, que se concentra principalmente em aplicativos móveis e sistemas embarcados de visão computacional. O motivo principal da utilização desse modelo é a razão entre a eficiência e o custo de processamento. Para fazer essa otimização ela usa um conceito novo para reduzir a sua complexidade computacional: Convolução Separável em Profundidade.

Para melhor compreensão, será feita uma revisão do modelo, baseado no artigo (HOWARD *et al.*, 2017).

### *Convolução separável em profundidade*

é uma convolução em profundidade seguida por uma convolução pontual, seu modelo é representado na Figura 2.1.



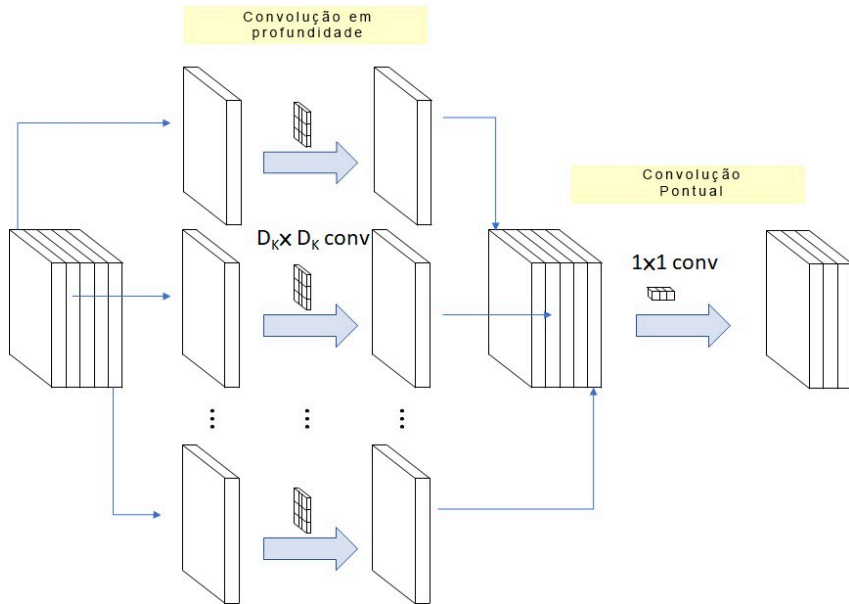


Figura 2.1: Convolução em profundidade seguida por uma convolução pontual. Imagem retirada e modificada de (SCIENCE, 2018)

Convolução pontual é a convolução espacial  $D_K \times D_K$  em canais. Supondo que na Figura 2.1, tenhamos 5 canais, então tem-se 5 convolução espacial  $D_K \times D_K$ . Convolução pontual na verdade, é a convolução  $1 \times 1$  para alterar a dimensão.

Com a operação acima, o custo de operação é:

$$D_K \cdot D_K \cdot M \cdot D_F + M \cdot N \cdot D_F \cdot D_F$$

onde M: Número de canais de entrada, N: Número de canais de saída,  $D_K$ : Tamanho do kernel e  $D_F$ : Tamanho do mapa de características.

Para convolução padrão, é:

$$D_K \cdot D_K \cdot M \cdot N \cdot D_F \cdot D_F \quad (2.1)$$

Assim, a redução do cálculo é:

$$\frac{D_K \cdot D_K \cdot M \cdot D_F \cdot D_F + M \cdot N \cdot D_F \cdot D_F}{D_K \cdot D_K \cdot M \cdot N \cdot D_F \cdot D_F} = \frac{1}{N} + \frac{1}{D_K^2} \quad (2.2)$$

Quando  $D_K \times D_K$  é  $3 \times 3$ , 8 a 9 vezes menos computação pode ser obtida, mas com apenas uma pequena redução na precisão.

## Estrutura do modelo

Exceto a primeira camada, que se trata de uma convolução tradicional, as demais camadas da arquitetura MobileNet são baseadas em convoluções DSC. A última é completamente conectada, seguida por uma Softmax.

Type / Stride	Filter Shape	Input Size
Conv / s2	$3 \times 3 \times 3 \times 32$	$224 \times 224 \times 3$
Conv dw / s1	$3 \times 3 \times 32$ dw	$112 \times 112 \times 32$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 32 \times 64$	$112 \times 112 \times 32$
Conv dw / s2	$3 \times 3 \times 64$ dw	$112 \times 112 \times 64$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 64 \times 128$	$56 \times 56 \times 64$
Conv dw / s1	$3 \times 3 \times 128$ dw	$56 \times 56 \times 128$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 128 \times 128$	$56 \times 56 \times 128$
Conv dw / s2	$3 \times 3 \times 128$ dw	$56 \times 56 \times 128$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 128 \times 256$	$28 \times 28 \times 128$
Conv dw / s1	$3 \times 3 \times 256$ dw	$28 \times 28 \times 256$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 256 \times 256$	$28 \times 28 \times 256$
Conv dw / s2	$3 \times 3 \times 256$ dw	$28 \times 28 \times 256$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 256 \times 512$	$14 \times 14 \times 256$
$5 \times$ Conv dw / s1	$3 \times 3 \times 512$ dw	$14 \times 14 \times 512$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 512 \times 512$	$14 \times 14 \times 512$
Conv dw / s2	$3 \times 3 \times 512$ dw	$14 \times 14 \times 512$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 512 \times 1024$	$7 \times 7 \times 512$
Conv dw / s2	$3 \times 3 \times 1024$ dw	$7 \times 7 \times 1024$
Conv / s1	$1 \times 1 \times 1024 \times 1024$	$7 \times 7 \times 1024$
Avg Pool / s1	Pool $7 \times 7$	$7 \times 7 \times 1024$
FC / s1	$1024 \times 1000$	$1 \times 1 \times 1024$
Softmax / s1	Classifier	$1 \times 1 \times 1000$

Figura 2.2: Arquitetura do modelo Mobilenet. Imagem retirada de (SCIENCE, 2018)

Através da Figura 2.2, nota-se a utilização da estratégia de regularização *batchnormalization*, caracterizada pela normalização em lote (BN) e ReLU aplicadas após cada convolução.

## Robô

Visando montar um sistema de baixo custo, utilizou-se um robô genérico, exibido na figura 2.3, com 2 motores de 3-6V. Para controle dos motores empregou-se um Driver Ponte H conectado ao Raspberry e 6 pilhas alcalinas em série para alimentação.

Além disso, uma webcam foi acoplada ao protótipo para obtenção das imagens.

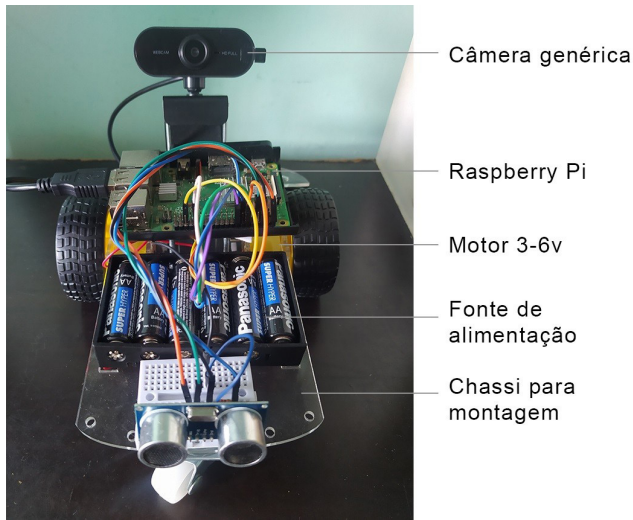


Figura 2.3: Protótipo do robô.

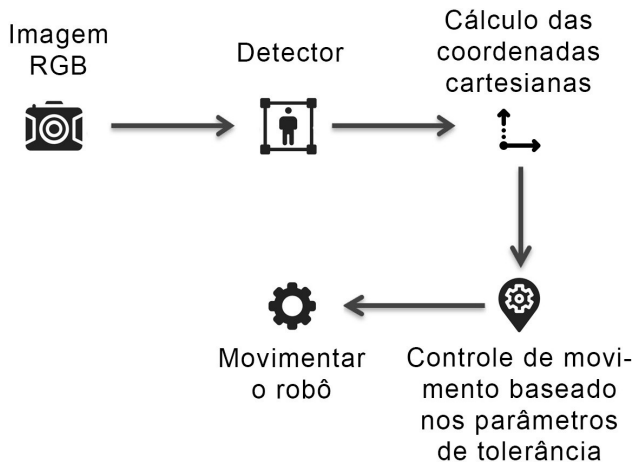


Figura 3.1: Fluxograma do código desenvolvido

## TRABALHO DESENVOLVIDO

O fluxograma completo para o robô que segue pessoas pode ser dividido nas seguintes quatro partes (fig. 3.1).

A Rede Neural Convolutiva MobileNet foi utilizada para detectar pessoas em um determinado quadro RGB. Ao passar a imagem RGB no modelo e uma pessoa ser detectada, é retornado a coordenada cartesiana da caixa delimitadora. Para que sejam feitas as estimativas e correções, é calculada a centroide com os valores obtidos.

O sistema de coordenadas cartesianas do robô pode ser observado na figura 3.2.

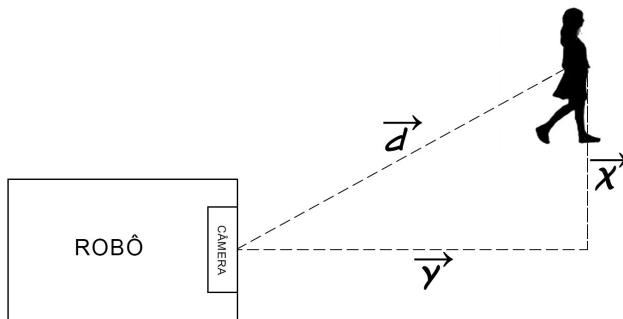


Figura 3.2: Sistema de coordenadas do robô

O controle de movimento é feito a partir de um mecanismo de acionamento diferencial. Esse sistema é baseado em parâmetros definidos previamente, e que podem ser ajustados de acordo com as necessidades do usuário, estes preceitos serão chamados de tolerância.

Quando o usuário estiver fora do limite definido como tolerável, serão feitos ajustes no movimento do robô para que os valores da centroide esteja dentro dos parâmetros estabelecidos, para facilitar o entendimento esse processo foi ilustrado na figura 3.3, as linhas verdes são os limites determinados anteriormente.

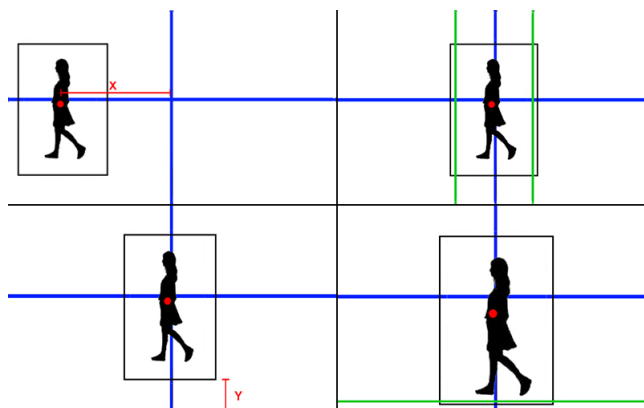


Figura 3.3: Mecanismo de acionamento diferencial

Para controle de quando seguir em frente ou parar, o Y final é utilizado como base. Quando esta coordenada estiver acima dos parâmetros estabelecidos, o robô andará até o Y final ficar a baixo da tolerância.

O manuseio de curvas é feito com base nos parâmetros relacionados ao eixo X. O posicionamento do usuário será estimado utilizando a média entre o X inicial e final, este valor será comparado com os parâmetros de tolerância, caso seja maior o robô virará à esquerda e caso seja menor o robô virará à direita, esses movimentos serão feitos até que a centroide esteja dentro da projeção estipulada.

## CONCLUSÃO

O objetivo geral da pesquisa foi alcançado, como apresentado nesse artigo, um sistema de baixo custo baseado em visão computacional e aprendizado pro- fundo para detecção e rastreamento de pessoas em tempo real foi desenvolvido.

Esse sistema viabiliza que mais pesquisas e protó- tipos possam ser desenvolvidos, afinal toda a neces- sidade de equipamentos caros e robustos está sendo eliminada.

Na versão atual, o sistema robótico rastreia uma pessoa através do modelo MobileNet e mediante os resultados obtidos é calculado as coordenadas car- tesianas e o valor médio das mesmas. A partir des- ses dados é feito o controle de movimento do robô, um sistema de navegação autônomo baseado em vi- são computacional foi desenvolvido com o propósito de manter o baixo custo do protótipo, descartando a necessidade de sensores adicionais e/ou câmeras *depth sense*.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFMA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão) pelo apoio ao desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS

BRADSKI, G.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. Estados Unidos: O'Reilly Media, 2008.

HOWARD, A. G.; ZHU, M.; CHEN, B.; KALENICHENKO, D.; WANG, W.; WEYAND, T.; ANDREETTO, M.; ADAM, H. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. **arXiv preprint arXiv:1704.04861**, 2017.

LIMA, F.; DIAS, W.; MORENO, E. Implementação de um cluster embarcado usando a plataforma raspberry pi. **Anais da VI Escola Regional de Alto Desempenho do Rio de Janeiro**, p. 11–15, 2020.

SCIENCE, Towards Data. 2018.

SEKHAR, C.; RAO, K. V. Detection of vehicle intrusion using opencv. **arXiv preprint arXiv:1704.04861**, v. 8, p. 1596–1599, 2019.

SIEGWART, R.; NOURBAKSH, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. Londres: MIT press, 2011.

TURIEL, J.; FRAILE, J.; PERAN, J. Applications of robotics: Latest trends and new perspectives. **DYNA**, p. 61–68, 2002.

# ROBÓTICA EDUCACIONAL: ALIMENTADOR AUTOMÁTICO PARA CÃES DE RUA

*Data de aceite: 02/05/2024*

**Rute Maria Rosa**

**RESUMO:** A tecnologia está presente na nossa vida o tempo todo, através dela é possível desenvolver soluções para vários problemas do nosso cotidiano. O avanço tecnológico fez com que até mesmo jovens estudantes pudessem ter acesso a robótica. Um dos problemas sociais enfrentados no Brasil, é o abandono aos animais de rua (GONÇALVES, 2016). A ideia central é a realização de uma campanha que incentive as pessoas a cuidarem dos animais de rua, caso não seja possível a adoção, alimentando-os com um dispositivo acoplado ao portão da sua residência feitos com materiais de baixo custo. Desta forma, este artigo tem como objetivo propagar o uso da robótica educacional com alunos do 2º do Ensino Médio na criação de um alimentar automático para animais de rua. O alimentador automático foi produzido de forma simples, não exigindo uma programação complexa para seu funcionamento. Conclui-se que é necessário o incentivo não só em questões técnicas, como também metodologias que desenvolvam a criticidade e autonomia dos

estudantes, frente as necessidades sociais. Por isso, quanto mais direcionamentos em questões como essas, maiores serão os resultados que podem ser aplicados na melhoria da sociedade como um todo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica, Educação, Animais, Tecnologia

### EDUCATIONAL ROBOTICS: AUTOMATIC FEEDER FOR STREET DOGS

**ABSTRACT:** Technology is present in our lives all the time, though it is possible to develop solutions to various problems in our daily lives. Technological advances have made it possible for even young students to have access to robotics. One of the social problems faced in Brazil is the abandonment of stray animals (GONÇALVES, 2016). The main idea is to carry out a campaign that encourages people to take care of stray animals, if adoption is not possible, feeding them with a device attached to the gate of their residence, made with lowcost materials. Thus, this article aims to propagate the use of educational robotics with high school students in the creation of automatic food for stray animals. The automatic feeder was produced in a simple

way, not requiring complex programming for its operation. It is concluded that it is necessary to encourage not only technical issues, but also methodologies that develop criticality and autonomy of students, given social needs. Therefore, the more directions on issues like these, the greater the results that can be applied to improve society as a whole.

**KEYWORDS:** Robotics, Education, Animals, Technology

## INTRODUÇÃO

Atualmente a tecnologia tem feito parte da vida das pessoas, através dos meios de comunicação, transportes, eletroeletrônicos, entre outros. Estes são alguns exemplos utilizados diariamente, porém a grande maioria não compreende corretamente como é o funcionamento desses equipamentos. Por isso têm-se discutido a inserção de conceitos de lógica e programação de computadores na educação básica, de acordo com o pesquisador Seymour Papert, a robótica é tão essencial quanto outras disciplinas devido à sua presença diária na sociedade.

Desenvolver algoritmos a partir do pensamento lógico auxilia em várias áreas de conhecimento, principalmente em tarefas relacionadas a programação, quando esses conceitos são utilizados nas situações cotidianas ou na resolução de situações problemas, gera motivação e interesse por parte dos alunos. Uma forma de oportunizar o conhecimento científico- tecnológico é desenvolver a inventividade e a experimentação a partir do lúdico, assim a robótica permite a promoção de conceitos multidisciplinares na sala de aula.

O envolvimento e a intervenção dos alunos em problemas sociais, como os maus tratos aos animais de rua, é possível a partir de uma prática pedagógica significativa. Assim o ensino de Robótica é ampliado ao elaborar construções que levem os alunos a resolverem questões com o uso de criatividade e a inventividade tecnológica.

O presente artigo tem como objetivo propagar o uso da Robótica Educacional com alunos do 2º do Ensino Médio na criação de um alimentador automático para animais de rua. Tendo como ponto principal a resolução de uma situação-problema através da tecnologia e do uso de materiais recicláveis. A ideia deste protótipo é a realização de uma campanha que incentive as pessoas a cuidarem dos animais de rua, caso não seja possível a adoção, alimentando-os com um dispositivo acoplado ao portão da sua residência feitos com materiais de baixo custo.

Este trabalho está dividido em cinco seções, sendo a segunda a apresentação dos conceitos relacionados a Robótica Educacional e o uso de ferramentas na educação básica como ferramentas como LEGO®MINDSTORMS® Education EV3, na Seção 3 há a descrição da metodologia; na Seção 4 serão discutidos os resultados e na Seção 5 a exposição das conclusões.

## ROBÓTICA NA ESCOLA

Nesta seção serão discutidos o que é a Robótica Educacional e o uso da ferramenta LEGO®MINDSTORMS® Education EV3 para melhor percepção das circunstâncias que acompanham a realização do projeto.

### Robótica Educacional

A robótica se refere ao desenvolvimento de diversos dispositivos que auxilia o homem em situações adversas ou mesmo em atividades que requer uma repetição do processo. Sendo conhecida como a “ciência dos sistemas que interagem com o mundo real, com pouco ou mesmo nenhuma intervenção humana” (MARTINS, 2006).

Atualmente, estudos nessa área permitem a criação de artefatos que vão além das indústrias automobilísticas, têxtil, agronegócio, alimentícias, entre outras. Chegando também nas escolas, ao deixar de produzir apenas robôs para se tornar também um instrumento no processo de ensino- aprendizagem (ABREU, 1999).

A Robótica Educacional considerada também como Robótica Pedagógica, é encontrada em ambientes educacionais como auxílio na montagem e desmontagem de robôs ou sistema robotizado, fornecendo aos estudantes momentos de lazer e entretenimento na aprendizagem (SANTOS et al. 2016).

Os espaços escolares que contenham materiais como sucatas ou kits utilizados em programação de dispositivos, como peças, sensores e motores, são ferramentas para a Robótica Educacional. Esses ambientes permitem o desenvolvimento de habilidades como raciocínio lógico, criatividade e trabalho em equipe (GERBER et al. 2017).

A partir da identificação de um problema, o aluno será incentivado a solucioná-lo de uma forma lógica, com o auxílio de um robô. Esse processo permite que seja desenvolvido a Robótica Educacional, pois durante a programação do robô, com uso da linguagem apropriada, ocorrerá uma sequência de causa/ efeito para a obtenção da ação que se deseja, formentando o desenvolvimento do raciocínio lógico (CASTILHO, 2002).

Ao desenvolver a programação, o aluno poderá testá-la, caso os testes não correspondam satisfatoriamente, é possível a reprogramação do processo até que se chegue ao resultado esperado. Dessa forma, o aluno terá a oportunidade de refletir sobre suas ações, corrigindo os erros quando necessário.

O ato de montar e desmontar um robô, ou fazer uma programação e testá-la, faz com que o aluno crie conexões neurais muito complexas, de forma singular, auxiliando na sua capacidade cognitiva (CASTILHO, 2002).

A escola contribui de forma positiva para a sociedade emergente, pois ela passa a corresponder às novas exigências sociais e históricas que a humanidade está vivenciando (FREIRE & GUIMARÃES, 2003). Isso permitirá a potencialização do ensino- aprendizagem, através dos desafios propostos aos alunos, incentivando-os a sistematizar suas ideias, testar hipóteses e buscar a efetivação da atividade por intermédio do pensamento investigativo.



A plataforma educacional da LEGO é fundamentada em quatro eixos: aprender a conhecer; aprender a fazer; aprender a viver juntos; e aprender a ser (DELORS, 2012). Considerando também que o aprender a agir é muito importante no desenvolvimento das atividades. É um instrumento muito utilizado pelos professores de robótica, pois permite a construção do conhecimento através da experimentação, trazendo para a realidade do aluno.

O kit LEGO Mindstorms é composto por componentes que viabilizam a transmissão de dados e o seu processamento, por sensores, atuadores e peças que vão desde conexão até transmissão de movimentos (LEGO, 2006).

Cada kit possui uma maleta contendo 541 peças de plástico e borracha, apresentando diferentes tamanhos e cores, assim como blocos inteligentes que podem armazenar a programação, que se conecta a um cabo USB com o computador.

O LEGO MINDSTORMS Education EV3 possui uma versão pré-instalada do próprio aplicativo. Assim o aluno tem acesso a plataforma que é composto por blocos EV3 possuindo o *firmware* atualizados e sua bateria, que serão conectados por via Bluetooth na sala de aula. Isso facilita a compreensão lógica através do uso de uma linguagem gráfica para a realização das atividades.

## **A CRIAÇÃO DO ALIMENTADOR AUTOMÁTICO PARA ANIMAIS DE RUA**

Um problema que ocorre frequentemente em regiões urbanas é o maltrato aos animais, principalmente em situação de abandono. Pensando nesta dificuldade, com o intuito de minimizá-la, os alunos do 2º ano do ensino médio da escola SESI- 424 propuseram a criação de um alimentador automático que pudesse atender à necessidade básica de alimentação desses animais. Após várias pesquisas de projetos semelhantes, buscou-se um protótipo feito com materiais de baixo custo e acessível a comunidade.

O alimentador foi criado para ser acoplado a um portão residencial e com materiais recicláveis, com o intuito de reprodução do projeto pela comunidade. A partir da união de canos de PVC e um dispositivo com sensor que libera a ração sempre que um animal se aproxime.

A ração é colocada em pequenas quantidades na parte superior do alimentador, podendo armazená-la e liberar quando o sensor fosse acionado.

A ideia inicial é propagar a campanha de alimentação e cuidado com animais de rua de forma voluntária. Uma maneira que os alunos encontraram para divulgar essa ação, foi o uso da robótica na criação desse dispositivo e o incentivo a sua reprodução por parte da comunidade ao redor da escola. Dessa forma, o protótipo pode ser criado sem obter conhecimentos em programação e o uso de materiais do cotidiano, que poderiam ser descartados, mas que serão úteis nesse projeto.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a parte física do material, usou-se canos de PVC encontrados em áreas de reciclagem, conforme a Figura 1, rosca sem fim e o kit Lego EV3 para a programação.



Figura 1: Canos de PVC

Fonte: Autores, 2021

Na rosca sem fim foi acoplado um cano de PVC, para armazenamento da ração, conforme a Figura 2. Quando a rosca gira, o alimento chega até o final, caindo na bandeja.



Figura 2: Montagem do dispositivo

Fonte: Autores, 2021

Com a estrutura organizada, foi realizada a montagem e programação do motor tendo como suporte peças do LEGO Mindstorms NXT como base de sustentação do objeto. Os sensores e motores foram adicionados para o funcionamento da programação, conforme a Figura 3.



Figura 3: Sensor e motor acoplado ao dispositivo

Fonte: Autores, 2021

No cano que está servindo como base, foi adicionado um sensor de movimento, que ao ser acionado com no mínimo de 15 cm de movimentação de um objeto, permite que o motor seja ligado e a rosca gire, disponibilizando uma quantidade de alimento na bandeja.

O sensor ultrassônico é acionado quando ocorre a reflexão das ondas sonoras para medição da distância entre o sensor e o objeto que estiver em sua direção. Esse sensor é conectado ao Bloco EV3 através das portas de entradas e cabos achatados.

Após a programação do Bloco, o software designará o sensor conforme a porta utilizada, conforme a Figura 4.

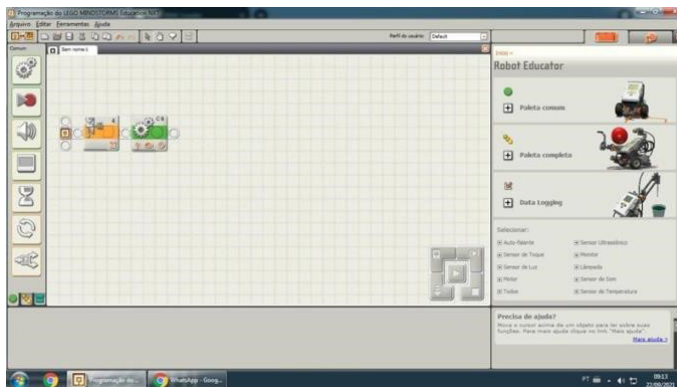


Figura 4: Programação LEGO

Fonte: Autores, 2021

O alimentador foi montado durante o período remoto, em meio a pandemia, por isso os alunos fizeram as reuniões de forma online para a discussão do projeto. A montagem do dispositivo foi realizada na casa dos integrantes. Já a parte de programação e adição do sensor e motor, foi feita na escola, na sala de informática com as orientações da professora.

Após a programação e encaixe dos componentes, o dispositivo foi testado num dos portões de entradas dos alunos no prédio escolar, com o cachorro de um dos funcionários.

Observou-se o funcionamento do dispositivo numa certa proximidade do cão com o sensor, acionando a rosca e liberando uma quantidade de ração, conforme demonstrado na Figura 5.



Figura 5: Cão sendo alimentado pelo dispositivo

Fonte: Autores, 2021

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O alimentador automático foi produzido de forma simples, não exigindo uma programação complexa para seu funcionamento. O resultado foi alcançado, porém existem algumas ressalvas, como a necessidade de acrescentar alguns componentes que controlem a quantidade de ração a ser liberada.

O maior benefício desse dispositivo é que a sua produção pode ser feita com materiais recicláveis e de fácil acesso, possibilitando a reprodução pela comunidade em diversos pontos de um bairro, por exemplo.

A ideia principal seria fomentar ações como essa, na criação de dispositivos que melhorem as condições dos animais de rua, isso foi possível com o uso da tecnologia nas aulas de Robótica.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma forma simples de produzir um alimentador automático para cães de rua, utilizando materiais recicláveis. Como foi apontado, existem muitos animais domésticos em situação de abandono, tendo suas necessidades básicas privadas por falta de cuidados, assim se pensou em uma solução baseada no ensino de Robótica.

A Robótica Educacional também pode incentivar os alunos a buscarem soluções de problemas que envolvam as questões sociais, pois essa tecnologia mostra que seus conteúdos podem ser usados de diversas maneiras e com vários níveis de aprendizagem. Sendo um curso interdisciplinar, não é necessário seu uso apenas em competições ou atividades que requerem aprofundamento em programação.

Conclui-se que é necessário o incentivo não só em questões técnicas, como também metodologias que desenvolvam a criticidade e autonomia dos estudantes, frente as necessidades sociais. Por isso, quanto mais direcionamentos em questões como essas, maiores serão os resultados que podem ser aplicados na melhoria da sociedade como um todo.

## REFERÊNCIAS

ABREU, M. História dos cordéis e folhetos. Campinas. SP. Ed: Mercado das Letras: Associação de Leitura do Brasil, 1999. p. 73-108

CASTILHO, A. T. Variação dialetal e ensino institucionalizado da língua portuguesa. In: BAGNO, M. (Org.). Linguística da norma. São Paulo: Loyola, 2002. p. 2736.

DELORS, J. Os quatro pilares da educação. In: DELORS, Jacques et al. (Org.). Educação: um tesouro a descobrir: Relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o século XXI. Brasília: UNESCO, 2012.

FREIRE, P. e GUIMARÃES, S. A África Ensinando a Gente: Angola, Guiné-Bissau, São Tomé e Príncipe. São Paulo: Editora Paz e Terra. 2003.

GERBER, A., HOFFMAN, M., MORGAN, J., & RAYMOND, C. (2017). Um em um milhão: Experimentos de campo sobre a proximidade percebida da eleição e a participação eleitoral (nº w23071). Escritório Nacional de Pesquisa Econômica.

GONÇALVES, V. C de S. Das consequências jurídicas ao garantir castração a animais e seu impacto sócio- econômico na saúde pública. 2016. Monografia (Curso em Bacharelado em Direito). Centro Universitário Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, São Paulo, 2016.

[LegoMindstorm 2006b] The Lego Mindstorm Kit site: <http://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/sdp/lego/lego.html>, Março, 2006.

MARTINS, A. O que é Robótica. São Paulo, Editora Brasiliense, 2006.

PAPERT, S. M. Logo: Computadores e Educação. São Paulo, Editora, Brasiliense, 1985 (edição original EUA 1980)

SANTOS, A. F.; RODRIGUES, G. P.; ASSUNÇÃO, M. B. & FLAVIANO, S. L. L. "Quem quiser que conte outra": A contação de histórias como prática educativa. In.: III Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG – Inovação: Inclusão Social e Direitos, Pirenópolis, 2016.

**FABRÍCIO MORAES DE ALMEIDA:** Professor do Departamento de Engenharia Elétrica – UFRO e Professor/Pesquisador do Programa de Doutorado PGDRA/UFRO. Líder do grupo de pesquisa **GEITEC** ([www.geitec.unir.br](http://www.geitec.unir.br)). É Doutor em Física pela UFC desde 2005 com pós-doutorado - UFMT/CNPq (2009), para saber mais, acesse: <http://lattes.cnpq.br/5959143194142131>.

E para outras informações, acessar o link: <https://www.researchgate.net/profile/Fabricio-Almeida>

**SÍMBOLOS**

500 kV de tensão 27

**A**

Adaptative control 53, 70

Algorithm 1 Controller module algorithm pseudocode 7

Análises dados 44

Animals 116, 117

ARIMA sazonal (SARIMA) 97

Artificial neural network 52, 53

Attack for android lock screen 1

Automatic unlock detection 1

**B**

Baixo custo 53, 66, 69, 108, 109, 112, 115, 116, 117, 119

Bayesian networks 72, 73

Biblioteca Scikit-learn 88

Bloco EV3 121

Brute-force system 1

**D**

Data analysis 44

Detecção de objetos 108

**E**

Electrical distribution networks 17

Energia eólica 45, 51, 95, 96, 97

Energia solar 22, 35, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51

**H**

HID (human interface device) 1, 3

**L**

LEGO Mindstorms NXT 120

Linguagem Python 87, 88

**M**

MAGLEV 52, 53, 61

Média móvel integrada autoregressiva (ARIMA) 97

Microcontrollers 53

MobileNet 108, 110, 112, 113, 115

MV-LSTM 95, 96, 97, 101, 102, 103, 105, 106

## **N**

Naive bayes 72, 73, 74, 78, 79, 80, 88, 89, 93, 94

National electrical energy 17

## **O**

OTG HID method 9, 10, 13

## **P**

PIN-locked devices 13

## **R**

Raspberry Pi 109, 115

Rastreamento 85, 86, 108, 115

Redes de distribuição elétrica 16

Redes neurais artificiais 52, 55, 97

Renewable clean energy 44

Robótica educacional 116, 117, 118, 123

Robótica pedagógica 118

Rondônia 16, 17, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41

## **S**

SARS-Cov2 72, 73

Sistema de coordenadas do robô 114

Sistema robótico 108, 115

## **T**

Technology 116, 117

Thermoelectric plants 17

Tree augmented naive bayes 72, 73, 80, 88

## **U**

UHE de Jirau e Santo Antônio 27



# Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# Engenharia elétrica e de computação: tecnologia em evolução

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)