

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ROGER RODRIGUES DA SILVEIRA

**PROTÓTIPO DE SISTEMA ROBÓTICO UTILIZANDO HARDWARE LIVRE PARA
MONITORAÇÃO DE AMBIENTES RADIOATIVOS**

Rio de Janeiro

2020

ROGER RODRIGUES DA SILVEIRA

**PROTÓTIPO DE SISTEMA ROBÓTICO UTILIZANDO HARDWARE LIVRE PARA
MONITORAÇÃO DE AMBIENTES RADIOATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência em Engenharia Nuclear – Profissional em Métodos Computacionais

Orientadores: Prof. Dr. Claudio Marcio do Nascimento Abreu Pereira

Prof. Dr. Roberto Schirru

Rio de Janeiro

2020

DA SILVEIRA Rodrigues, Roger

Protótipo de sistema robótico utilizando hardware livre para monitoração de ambientes radioativos / Roger Rodrigues da Silveira – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2020.

xiii, 67f. : il.; 31 cm.

Orientadores: Claudio Marcio do Nascimento Abreu Pereira e Roberto Schirru

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2020.

1. Radiação Ionizante. 2. Arduino. 3. Operação Remota

**PROTÓTIPO DE SISTEMA ROBÓTICO UTILIZANDO HARDWARE LIVRE PARA
MONITORAÇÃO DE AMBIENTES RADIOATIVOS**

Roger Rodrigues da Silveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES.

Aprovada por:

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

Ao professor Cláudio Márcio por incentivar meu ato de inscrição no programa de pós-graduação, por me apoiar nos momentos de dificuldade.

Ao professor Roberro Schirru que me abençoou e me deu a oportunidade de seguir com meu estudo.

Aos amigos Vinícius Gonzaga, Paulo Silveira, Maximiano Correia Martins e Ivo Wulf. Cada um colaborou naquilo que são experientes e estiveram sempre me apoiando. Muito do que sei hoje veio desse pessoal.

Agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos fornecida durante o curso de mestrado.

RESUMO

A utilização de equipamentos que permitam a avaliação remota de variáveis em ambientes que representam risco para o homem já tem sido feita com sucesso no decorrer das últimas décadas. Geralmente demandando grandes quantias financeiras, esses equipamentos são desenvolvidos por equipes complexas e multidisciplinares.

No âmbito da engenharia nuclear, a exposição à radiação é um tema recorrente e minimizar essa exposição tem sido uma preocupação contínua por parte de pesquisadores e equipes técnicas. Uma solução para evitar exposição desnecessária à radiação é a utilização de dispositivos robóticos autônomos ou de operação remota, tais como: robôs terrestres, drones (aéreos e subaquáticos), entre outros veículos controlados remotamente com fins de proporcionar uma avaliação situacional e realização de medições em áreas sujeitas à radiação.

Este trabalho tem por objetivo a elaboração de um protótipo de um sistema robótico baseado em robô terrestre, utilizando-se de componentes de baixo custo, largamente disponíveis no mercado (tecnologia Arduino). O robô, dotado de sensor de radiação e câmera de vídeo, pode ser telecomandado via Internet ou executar um mapeamento autônomo definido pelo operador. Para tal, além do robô em si, foi desenvolvida uma interface humano-sistema (IHS) através da qual o operador pode telecomandar o robô ou programar sua atividade e visualizar os dados monitorados de forma gráfica e textual. O sistema robótico de monitoração desenvolvido é de grande importância acadêmico-científica e possibilitará o desenvolvimento de diversas investigações referentes à utilização de robôs terrestres para a área nuclear, como por exemplo, a utilização de algoritmos inteligentes para mapeamento radiológico de áreas radioativas ou mesmo busca e localização de fontes.

Palavras-Chave: Radiação ionizante, Arduino, Operação remota, Robô.

ABSTRACT

The use of equipment that allows the remote assessment of variables in environments that represent risk to man has already been made successfully over the past few decades. Generally demanding large amounts of money, this equipment is developed by complex and multidisciplinary teams.

In the field of nuclear engineering, radiation exposure is a recurring theme and minimizing this exposure has been an ongoing concern by researchers and technical teams. A solution to avoid unnecessary exposure to radiation is the use of autonomous or remote operating robotic devices, such as: terrestrial robots, drones (aerial and underwater), among other vehicles controlled remotely with the purpose of providing a situational assessment and carrying out measurements in areas subject to radiation.

This work aims to develop a prototype of a terrestrial robot, using low cost components, widely available on the market (Arduino technology). The robot, equipped with a radiation sensor and video camera, can be remote controlled via the Internet or perform an autonomous mapping defined by the operator. For this purpose, in addition to the robot itself, a human-system interface (IHS) was developed through which the operator can remote control the robot or program its activity and view the monitored data in a graphic and textual way. The robotic monitoring system developed is of great academic-scientific importance, and will enable the development of several investigations regarding the use of terrestrial robots for the nuclear area, such as, for example, the use of intelligent algorithms for radiological mapping of radioactive areas or even search and location of sources.

Keywords: Ionizing radiation, Arduino, Remote operation, Robot.

LISTA DE FIGURAS

Figura. 1 – Arduino Uno.	17
Figura. 2 – Arduino Mega.	17
Figura. 3 – Arduino Nano.	18
Figura. 4 – Exemplos de Shields. Micro controlador com suporte a WiFi ESP8266 (esq.), Ponte H L9110 (dir.).....	18
Figura. 5 – Ambiente de Desenvolvimento do Arduino.....	19
Figura. 6 – Tubo Geiger-Müller utilizado nesse protótipo.....	20
Figura. 7 – Diagrama básico de um contador Geiger-Müller.....	21
Figura. 8 – Modelos de chassis para robôs com rodas disponíveis no mercado.	22
Figura. 9 – Chassis fabricados em MDF.	23
Figura. 10 – Montagens dos motores e Ponte H.....	24
Figura. 11– Montagens da placa compatível com Arduino, NodeMCU e reguladores de tensão.....	25
Figura. 12 – Montagem do suporte para celular. Note que há um aparelho celular montado, com o periscópio instalado.	26
Figura. 13 – Detector Geiger-Müller equipado com tubo GM M4011.	26
Figura. 14 – Diagrama Geral do Robô.	28
Figura. 15 – Diagrama de sequência do Loop do Arduino.....	29
Figura. 16 – Telas do Supervisório.....	30
Figura. 17 – Tela do Controle de Exibição das Telas.....	31
Figura. 18 – Tela do Controle Manual do robô.	31
Figura. 19 – Tela de configuração do Modo Semiautônomo.	32
Figura. 20 – Gráfico do Mapeamento de Área.	33
Figura. 21 – Tela do Dashboard.	34
Figura. 22 – Tela do Supervisório com feed de vídeo habilitado através do Skype.	34
Figura. 23 – Diagrama de sequência do Handshake feito entre as partes.	35
Figura. 24 – Foto tirada demonstrando o laptop executando o aplicativo Supervisório e a chamada de vídeo do Skype®.	37
Figura. 25 – Robô em deslocamento através da tele operação.....	37
Figura. 26 – Rota padrão utilizada no teste.	38
Figura. 27 – Representação de uma elevação na contagem momentos depois de ter se aproximado da amostra.....	39

Figura. 28 – Gráfico demonstrando a diminuição na contagem de acordo com o afastamento da fonte.	39
Figura. 29 – Gráfico representando o mapeamento da área ao final do teste. Repare no pico de contagens no ponto referente à amostra.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IOE	- Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
MDF	- Medium Density Fiberboard
PWM	- Pulse Width Modulation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.2. OBJETIVOS	13
1.3. JUSTIFICATIVA	14
1.4. METODOLOGIA	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. PROTOTIPAÇÃO	16
2.2. ARDUINO	16
2.3. ATIVIDADE	20
2.4. CONTADOR GEIGER-MÜLLER.....	20
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	22
3.1. CONSTRUÇÃO DO ROBÔ	22
3.2. PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO NO ROBÔ	29
3.3. DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO SUPERVISÓRIO	30
3.4. COMUNICAÇÃO ENTRE SUPERVISÓRIO E ROBÔ.....	35
4. TESTE DO PROTÓTIPO	36
4.1. TELE OPERAÇÃO.....	36
4.2. OPERAÇÃO SEMIAUTÔNOMA.....	38
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Não são poucas as circunstâncias nas quais a exposição humana pode tornar-se arriscada. Em diversos setores de trabalho existe a necessidade de se executar tarefas onde o trabalhador, mesmo que esteja de acordo com todas as medidas de segurança, acaba sendo exposto aos componentes que permeia o ambiente no qual está inserido. No âmbito das instalações nucleares podemos citar alguns exemplos de situações que causam exposição ao operador: Reparos e manutenção, vigilância do perímetro, acesso a ambientes restritos relacionados ao elemento combustível, gerenciamento de rejeitos radioativos, inspeções e atuação em atividades no circuito primário e/ou secundário de uma usina nuclear e quaisquer outras áreas controladas.

O Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), por exemplo, possui diversas áreas controladas, dentre elas as dependências do reator Argonauta, o depósito de rejeitos radioativos, e o acelerador de partículas Ciclotron. Quando estão em uso, apesar das tecnologias de blindagem de radiação empregadas, tornam suas instalações radioativas e, portanto, perigosas para acesso humano. Os operadores devem utilizar procedimentos e equipamentos de proteção radiológica [1] que diminuam a dose absorvida por eles no caso de operações que exijam manipulação ou qualquer intervenção que ocorra naquele ambiente. Muitas vezes, é necessário que se espere a diminuição dos níveis de radiação para que se possa acessar as dependências. Para verificar a condição radiológica geral do ambiente utiliza-se de detectores de área. No caso de busca de traços de contaminação ainda se faz necessária a atuação de um profissional de proteção radiológica utilizando detectores portáteis. Isso acaba contribuindo para a absorção de dose pelo trabalhador.

Outro exemplo clássico pode ser descrito como um ambiente controlado onde, por alguma razão, uma amostra radioativa diminuta tenha sido perdida. Muitas vezes é necessário que pessoas busquem por essa amostra, operação que também contribui na dose absorvida.

O ato de avaliar as condições de um local perigoso já vem sendo realizado com sucesso por robôs em substituição ao homem, tendo como exemplos o robô de seis rodas para detecção de radiação [2], o robô Orpheus-AC2 integrado ao veículo militar CBRN [3], o TALON

modificado para medição de radiação em Fukushima [4]. Geralmente esses robôs são adaptados para transportar os mesmos equipamentos que um operador carregaria para exercer a função de medir a radiação no ambiente desejado.

Entretanto, observa-se que os robôs aplicados para avaliação de radiação foram elaborados com tecnologias e equipes as quais exigem investimentos em larga escala, geralmente utilizando-se de componentes proprietários, manufaturados apenas para a utilização no projeto do robô.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um protótipo de sistema robótico de baixo custo com um robô terrestre e um sistema de supervisão remoto (IHS), capaz de detectar e medir radiação de um ambiente, enviando dados para um operador.

Vale destacar que o protótipo destina-se primordialmente a investigações acadêmicas e científicas, servindo como “facility” para pesquisas relacionadas com novas possibilidades de utilização e algoritmos avançados, como os de inteligência artificial e de exames robóticos, atualmente muito estudados.

Para tal, é proposta, através desse trabalho, a elaboração de um equipamento que se utiliza de materiais facilmente adquiridos no mercado de prototipação, largamente comercializados. Este trabalho visa investigar a adequação de tais materiais na construção de robôs de baixo custo com os objetivos:

- Monitoração de ambientes radioativos, através de operação remota;
- Mapeamento radiológico de áreas, com exibição de perfis de dose para o operador;
- Investigações acadêmicas em robótica autônoma (algoritmos de Inteligência Artificial);
- Pesquisas relacionadas com exames robóticos, dado que pelo baixo custo e facilidade de construção, podem ser facilmente replicados;

Visando a radioproteção por meio de utilização de equipamentos remotos para leitura de radiação e a tomada estratégica de decisão embasada em fatos, a elaboração de uma facility modular e de baixo custo permite a investigação e identificação de tarefas onde se poderia realizar a substituição de um operador para a realização de tarefas básicas no que tange a detecção de radiação.

Pelo fato de ser modular e utilizar componentes disponíveis no mercado, pode trazer ao meio acadêmico uma plataforma de aprendizado e prototipação, permitindo a utilização para outros fins, bastando alterar/incluir sensores para diferentes usos e/ou prover alterações/inclusão de novos algoritmos, de forma relativamente simples.

Como sub objetivos deste trabalho, pode-se destacar:

- A investigação da utilização da tecnologia Arduino [7] para construção do robô;
- Desenvolvimento de um Sistema Supervisório que se comunique com o robô através de internet, permitindo o controle e recebendo informações de radiação e imagens, adquiridos em tempo real;
- Permitir que através do Sistema Supervisório do Robô (SSR) possam ser programadas rotas para que o robô faça mapeamentos de forma autônoma com exibição de gráficos de perfis de dose, de forma a auxiliar as tomadas de decisão;

1.3. JUSTIFICATIVA

A substituição do homem por robôs na tarefa de monitorar remotamente áreas sujeitas à radiação é por si só de extrema importância para preservação da saúde e segurança do trabalhador envolvido. Entretanto, o desenvolvimento de um robô para avaliação de radiação é um processo que demanda um grande investimento financeiro, não apenas no desenvolvimento e construção do robô em si, mas em pesquisas relacionadas com as áreas de aplicação onde se deseja atuar.

O protótipo desenvolvido nesse trabalho é um aparato de apoio a pesquisas e investigações acadêmico-científicas relacionadas com a utilização de robôs na área nuclear. O processamento, aquisição e transmissão de dados do robô são baseados em hardware de baixo

custo, amplamente utilizado mundialmente (tecnologia Arduino), o que facilita a sua popularização e difusão no meio acadêmico e científico, especialmente por parte dos pesquisadores da área de aplicação (no caso, nuclear). Por ser de fácil programação, o aparato desenvolvido poderá dar suporte às pesquisas relacionadas, por exemplo, à utilização de novos algoritmos, como os de Inteligência Artificial (IA) [9]. Dada a facilidade de ser replicado, a tecnologia desenvolvida pode fomentar pesquisas referentes a exames robóticos (sistemas com vários robôs).

O protótipo, em seu estado atual de desenvolvimento, já permite a implementação de diversas funcionalidades que possam ser desenvolvidas pelo público acadêmico, tornando-se uma base para pesquisa e desenvolvimento na área nuclear e em outras áreas da engenharia.

1.4. METODOLOGIA

Muitos conceitos aplicados na parte da montagem do robô no que tange a elaboração das partes mecânicas foram trazidos de modelos mais simples previamente elaborados, facilmente encontrados no mercado. Desta forma, a aquisição dos componentes foi facilitada pela larga disponibilidade.

A operação remota será obtida através do desenvolvimento de um aplicativo supervisorio que fica encarregado de enviar as instruções para o robô, e passivamente receber imagens e os dados de radiação monitorados. Esse aplicativo foi desenvolvido para a plataforma Windows, utilizando ferramentas de desenvolvimento na sua maioria gratuitas, ou com versões de avaliação. A comunicação entre o robô e o supervisorio se dará pela internet através de um link Wifi. A obtenção do feed de imagens que permite a orientação remota do robô foi permitida através da utilização de um telefone celular instalado num suporte apropriado para tal função, posicionado de maneira tal que, acoplado a um periscópio, a câmera do próprio celular é utilizada para enviar as imagens via Skype® para o operador.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PROTOTIPAÇÃO

A Prototipação é um estado de desenvolvimento de um produto de maneira que seja possível demonstrar a intenção da criação, o funcionamento básico, a forma análoga à desejada do produto final; sem utilizar altos investimentos de dinheiro e tempo. Essa técnica é largamente utilizada nos diversos setores da indústria e outros mercados. Protótipos são mais que objetos construídos para teste interativo, são ferramentas de comunicação que podem influenciar a direção de um projeto [8].

Existem várias formas de prototipação, dentre elas a prototipação no papel, a prototipação assistida no computador, modelos em escala, dentre outras. Mas todas elas trazem orientação para a elaboração de uma solução para um problema.

2.2. ARDUINO

Arduino é tecnologia de hardware livre baseada em uma série de microcontroladores ATmel AVR [6], circuitos eletrônicos interface, comunicação, sensores, atuadores, entre outros, para prototipação e desenvolvimento de sistemas robóticos e de automação em geral. Foi criado na Ivrea Interaction Design Institute, na Itália, como uma ferramenta acessível para estudantes. Tem sido utilizado em uma gama de projetos por sua facilidade de obtenção e flexibilidade e simplicidade na programação. Por ser open-source, a comunidade é aberta para realizar modificações e personalizações tanto da placa quanto do software utilizado para sua programação.

Existem diversos modelos de Arduino, para diversas aplicações. Dentre elas podemos citar:

- **Arduino Uno:** É a versão mais amplamente utilizada para estudo e aprendizado, considerado o Arduino padrão [11]. A Figura 1 exibe uma fotografia desta versão.



Figura. 1 – Arduino Uno.

- **Arduino Mega:** É uma versão que possui mais portas para diversas funcionalidades, muitas vezes utilizada para controlar impressoras 3D “DIY” [12], entre outras aplicações. A Figura 2 exibe uma fotografia desta de um Arduino Mega.



Figura. 2 – Arduino Mega.

- **Arduino Nano:** É uma versão diminuta, muito interessante para embarcar em projetos que imponham restrições de espaço [13]. A Figura 3 exibe uma fotografia de um Arduino Nano.

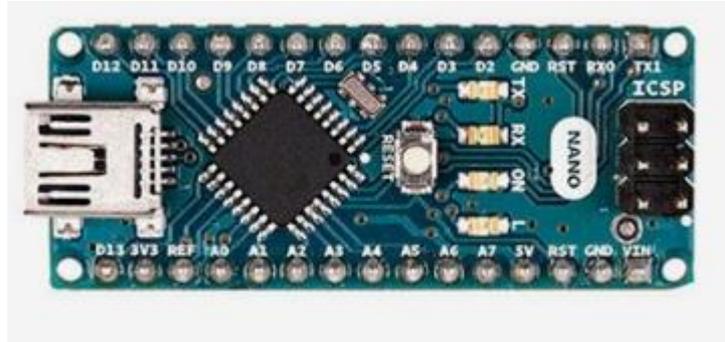


Figura. 3 – Arduino Nano.

O universo do Arduino não seria o mesmo sem os incontáveis Shields – Placas com sensores, chaves, circuitos integrados e diversos outros dispositivos – de baixo custo que são desenvolvidos por vários outros fabricantes com o objetivo de trazer funcionalidades para o Arduino ou qualquer outro projeto que envolva micro controladores. Geralmente são moldados de maneira tal que facilite sua montagem direta no Arduino ou em placas de prototipação, mais conhecidas como *protoboards*. Na Figura 4 podem ser vistos alguns exemplos de shields.

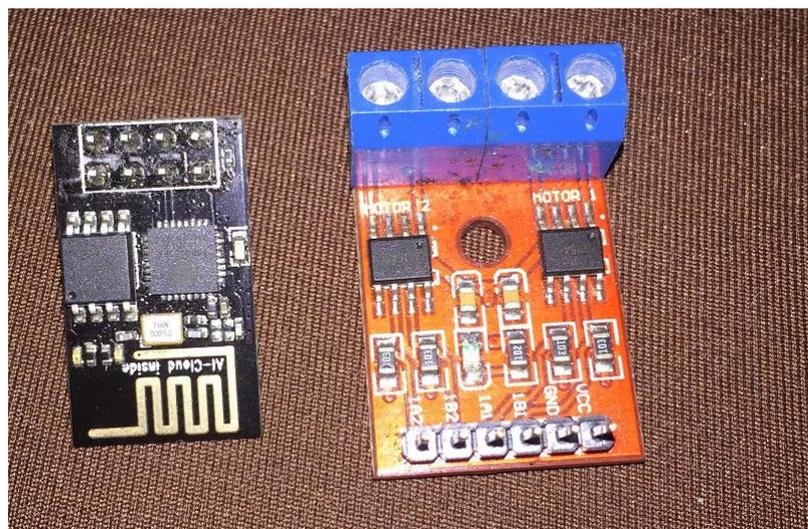
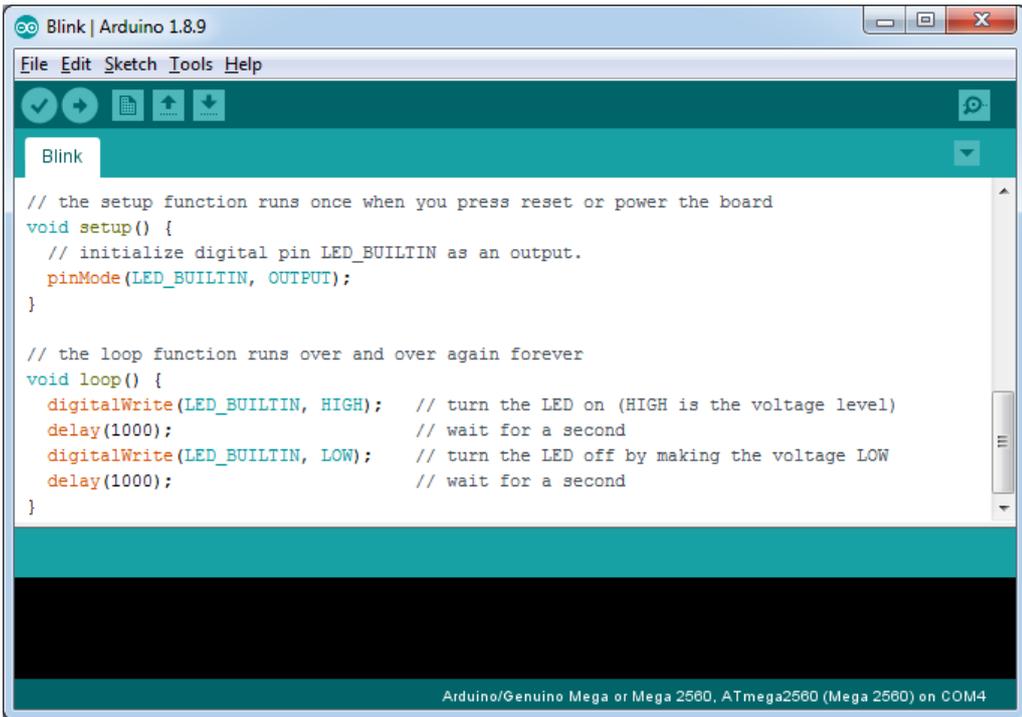


Figura. 4 – Exemplos de Shields. Micro controlador com suporte a WiFi ESP8266 (esq.), Ponte H L9110 (dir.).

O ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) mantido pela comunidade do Arduino foi escrito na linguagem de programação Java, e é constantemente atualizado. É utilizado para realizar o upload de códigos-fonte para qualquer placa de Arduino. A programação do Arduino em si é relativamente simples, respeitando o conceito do ciclo de vida da sua operação. Dividida em duas etapas:

- **Setup:** Assim que o Arduino é ativado, ele executará um bloco de código que geralmente é utilizado para a configuração, para inicialização de variáveis, ou qualquer atividade que precise ser executada uma única vez.
- **Loop:** O código inserido no bloco Loop será executado ciclicamente pelo tempo que o Arduino estiver ativado, salvo em condições de reinicialização alcançadas. A lógica do funcionamento esperado do Arduino é colocada nesse bloco. As variáveis inicializadas ou alteradas no Setup vão ter seus valores mantidos até aqui, onde poderão ser acessadas/alteradas.

Na Figura 5 podemos ver o ambiente de desenvolvimento do Arduino, uma ferramenta simples e funcional; onde foi carregado um código de exemplo disponível na própria ferramenta.



The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "Blink | Arduino 1.8.9". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for running, saving, and other functions. The main text area contains the following code:

```
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

At the bottom of the window, the status bar displays "Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) on COM4".

Figura. 5 – Ambiente de Desenvolvimento do Arduino.

2.3. ATIVIDADE

A atividade é uma grandeza radioativa que representa o número de transformações nucleares espontâneas de uma amostra radioativa dentro de um intervalo de tempo decorrido. [1]

$$A = \frac{dN}{dt}$$

A unidade adotada para representar a quantidade de transformações no intervalo de um segundo é o becquerel (Bq).

$$Bq = s^{-1}$$

Não se deve confundir atividade com contagem, pois não necessariamente a contagem reflete a quantidade exata de transformações que ocorrem numa amostra, até por causa de vários fatores envolvidos, como por exemplo, a sensibilidade do detector, a faixa de energia ser compatível com a construção do detector, o tempo entre uma liberação e a outra.

2.4. CONTADOR GEIGER-MÜLLER

O contador Geiger-Müller é um detector que utiliza uma câmara ou tubo com gás e em seu interior possui um filamento e um campo elétrico formado pelo circuito do detector. Quando um par de íons transpassa a fina barreira da câmara e atinge o filamento, ocorre uma diferença de potencial, que é percebida pelo equipamento.



Figura. 6 – Tubo Geiger-Müller utilizado nesse protótipo.

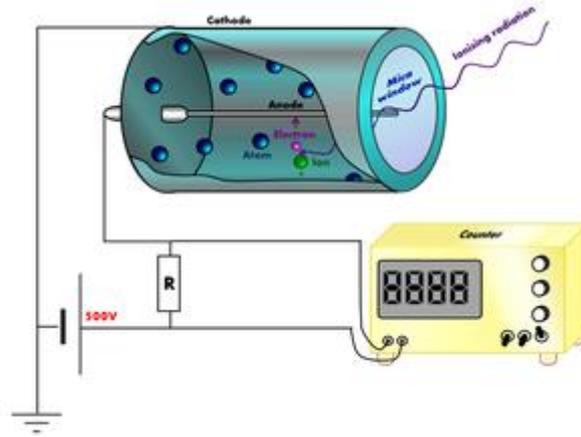


Figura. 7 – Diagrama básico de um contador Geiger-Müller

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O Robô desenvolvido consiste de uma estrutura vertical dividida em camadas funcionais que carregam os dispositivos essenciais para o funcionamento e para a futura implementação de novas funcionalidades. Dispondo de conexão WiFi através do NodeMCU, o mesmo é proposto para estudo e apoio a inspeção de ambientes quanto à contagem de radiação em um determinado ponto ao nível do solo, pois carrega consigo um detector Geiger-Müller ligado diretamente ao micro controlador Arduino Mega.

3.1. CONSTRUÇÃO DO ROBÔ

Em vista dos robôs previamente elaborados, foi concebida a ideia de elaborar um robô com rodas sendo adequado para utilização indoor, com pouco ruído durante sua operação, duração das baterias melhorada e facilidade de controle. No mercado de prototipação existem vários modelos de chassis para carros controlados por Arduino, na Figura 8 podem ser vistos dois modelos comuns a vários projetos educacionais ou de prototipação.



Figura. 8 – Modelos de chassis para robôs com rodas disponíveis no mercado

O material utilizado na construção desses chassis é o acrílico, um material leve. Porém oferece pouca resistência à torção e tende a quebrar quando aplicado peso, sem contar que é altamente inflamável, tem tendência a manchar quando entra em contato com alguns produtos químicos comuns, como por exemplo, a acetona. Para solucionar o problema de resistência do chassi foi utilizado placas de MDF cru de 3 mm de espessura, cortadas em formato circular, medindo $15,50 \text{ cm} \pm 0,05$ com cavas para montagem dos motores DC, como podem ser vistas na Figura 9.

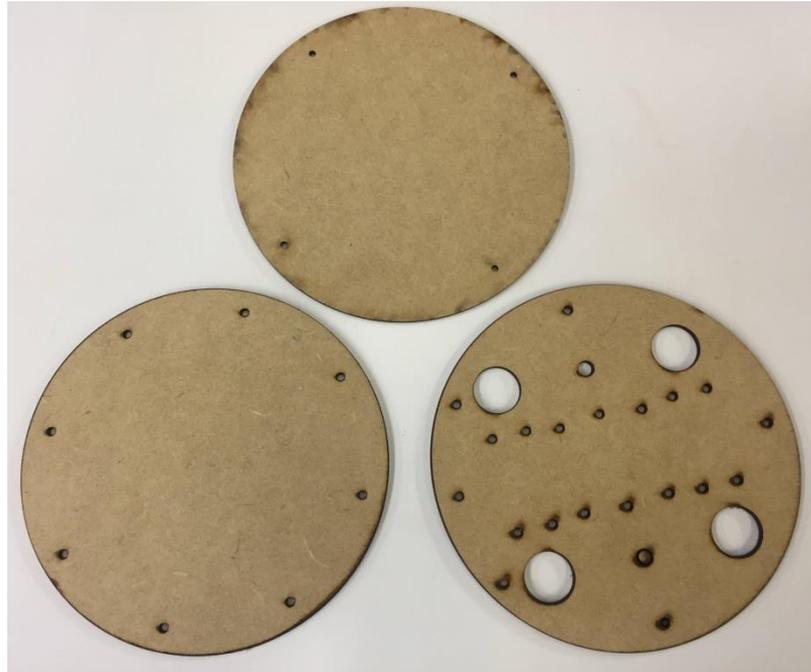


Figura. 9 – Chassis fabricados em MDF.

O formato circular aliado ao posicionamento quadrangular das cavas de fixação dos motores DC foi escolhido para facilitar o movimento de rotação, que terá grande importância no funcionamento do modo semiautônomo que será apresentado posteriormente nesse trabalho.

Os orifícios destinados a parafusos foram posicionados de modo que permita escalar o tamanho do robô mantendo um padrão; de forma que os dispositivos embarcados sejam organizados em camadas, sendo separados por funcionalidade. Podemos listar as camadas de acordo com seus objetivos, que são os seguintes:

- 1. Camada de Tração e Força** - O primeiro e segundo andar deve utilizar o chassi com cavas de fixação dos motores DC. Os motores DC utilizados possuem caixa de redução, são encaixados nas cavas de fixação e presos através de cantoneiras de alumínio. Esses motores são ativados através de um Driver Ponte H L298N, um circuito utilizado para definir o sentido de rotação do motor, através da abertura e fechamento de chaves que determinam a polarização dos motores conectados, que os controla através de PWM (modulação da largura de pulso), ou seja, ao invés de usar circuitos resistivos para alterar a tensão que alimenta os motores, altera-se a largura do pulso que incide nos motores para definir a velocidade que irão girar.

A montagem dos motores e da Ponte H no chassi pode ser vista na Figura 10. Também vai fixado nesse andar o suporte para 3 pilhas de íon de Lítio, modelo 18650, fornecendo aproximadamente 3,7 volts cada, ligadas em serie fornecem algo em torno de 11 volts. Uma chave liga-desliga é utilizada pra cortar o circuito das pilhas para o resto do robô.

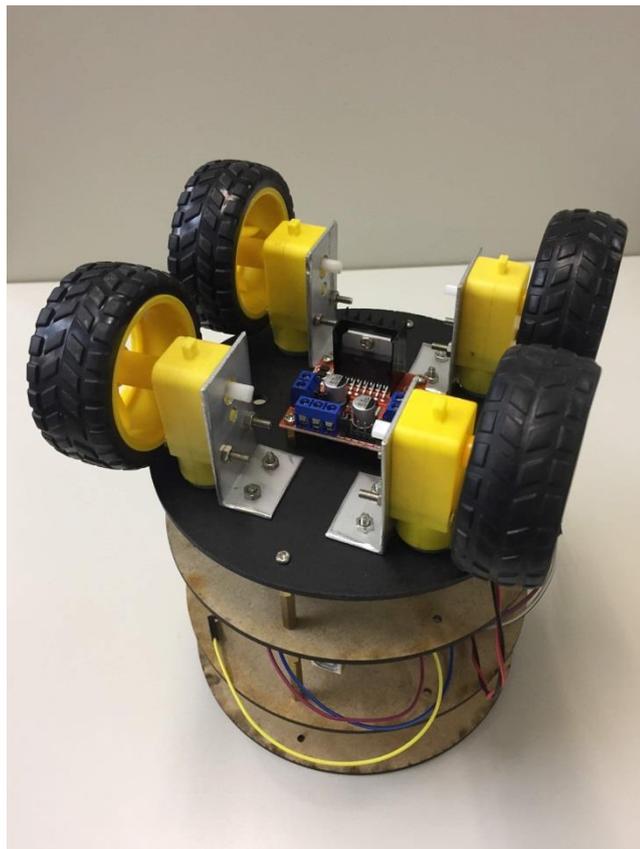


Figura. 10 – Montagens dos motores e Ponte H.

2. Camada de Controle e Comunicação - O segundo andar comporta a placa de prototipação Arduino modelo Mega2560, o kit de desenvolvimento NodeMCU que utiliza o microcontrolador ESP8266 capaz de comunicação WiFi que fará a ponte entre o robô e o Supervisor, dispositivos para regulação de tensão para alimentação dos demais circuitos e uma placa de ensaio que foi utilizada para facilitar e agilizar a preparação das ligações entre os diversos dispositivos.

A placa de prototipação Arduino Mega2560 foi escolhida em detrimento ao modelo Uno, que é o mais popular dentre os entusiastas e ser mais barata, por conta da quantidade superior de conexões do tipo Serial que ela possui, de tal maneira que

facilita o processo de depuração do código fonte aplicado sem precisar desabilitar o ESP8266 que também exige uma comunicação Serial (em comparação, o Uno possui apenas uma conexão Serial disponível que é ocupada quando conectado ao computador via USB), e por ter mais portas de interrupção para serem aplicadas em encoders para correção de trajetória, entretanto não serão abordadas no escopo do projeto nesse momento.

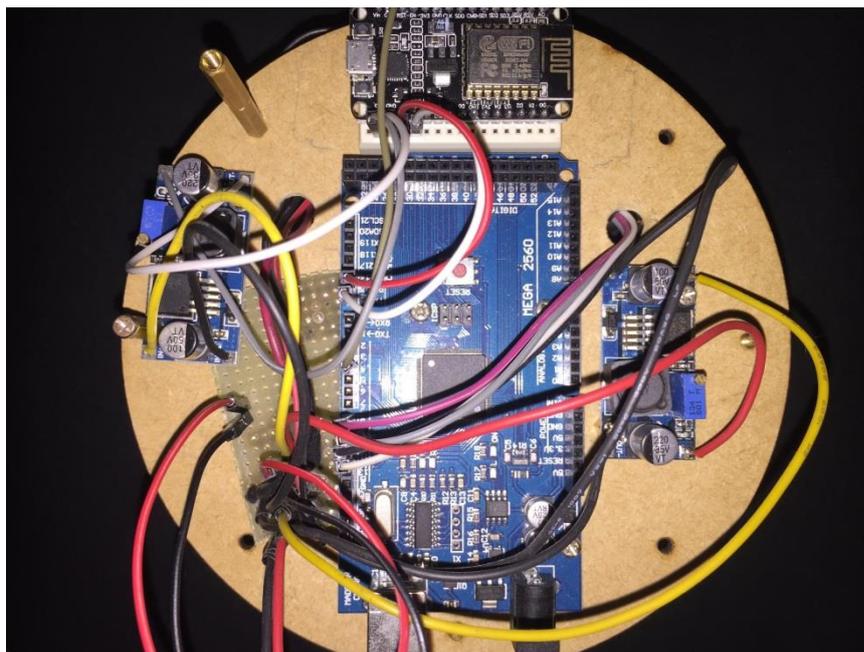


Figura. 11 – Montagens da placa compatível com Arduino, NodeMCU e reguladores de tensão.

- 3. Camada do Suporte para Celular** - O terceiro andar será utilizado para comportar um aparelho celular na posição horizontal, ajudando a diminuir o centro de gravidade. A função do celular é permitir a realização de uma chamada de vídeo através do aplicativo Skype, desenvolvido pela Microsoft. O propósito disso é permitir uma visão em primeira pessoa pelo robô, facilitando a operação manual através do Supervisor. A escolha do aplicativo Skype para o feed de vídeo se deve ao fato de que é um aplicativo popular, de forma que em muitos casos não seja necessária nenhuma instalação adicional. A posição horizontal do celular faz com que a câmera aponte para baixo; esse problema foi resolvido utilizando um periscópio em 90 graus para câmera de celular, permitindo observar à frente.



Figura. 12 – Montagem do suporte para celular. Note que há um aparelho celular montado, com o periscópio instalado.

- 4. Camada do Detector Geiger-Müller** - O quarto e último andar carrega o detector Geiger-Müller. O detector utilizado é uma versão disponível no mercado de prototipação, modelado para fazer interface com Arduino. Utilizando um tubo M4011, pode detectar raios gama entre 20mR/h e 120mR/h.



Figura. 13 – Detector Geiger-Müller equipado com tubo GM M4011.

Na Figura 14 pode ser visto o diagrama geral do protótipo exibindo os componentes usados na sua construção ordenados por funcionalidade e basicamente seguindo a ordem física da montagem, salvo exceções. De cima para baixo:

- O Shield do detector Geiger-Müller vai diretamente conectado ao Arduino, em uma porta de interrupção. A alimentação desse Shield é fornecida pelo Arduino;
- O aparelho celular deve ser fixado no suporte, e equipado com o periscópio;
- O NodeMCU é ligado à uma porta Serial do Arduino, através da qual ambos trocam mensagens;
- O pack de baterias alimenta diretamente o Arduino e os Shields LM2596, reguladores de tensão do tipo Step-Down. Um deles é definido para 3.3V e é encarregado de alimentar o NodeMCU, já o outro é definido em 5V para alimentar o Shield Ponte H L298N.
- O Shield L298N recebe as instruções do Arduino para controlar os motores DC. Então de acordo com a instrução ele alimenta os motores através de PWM.

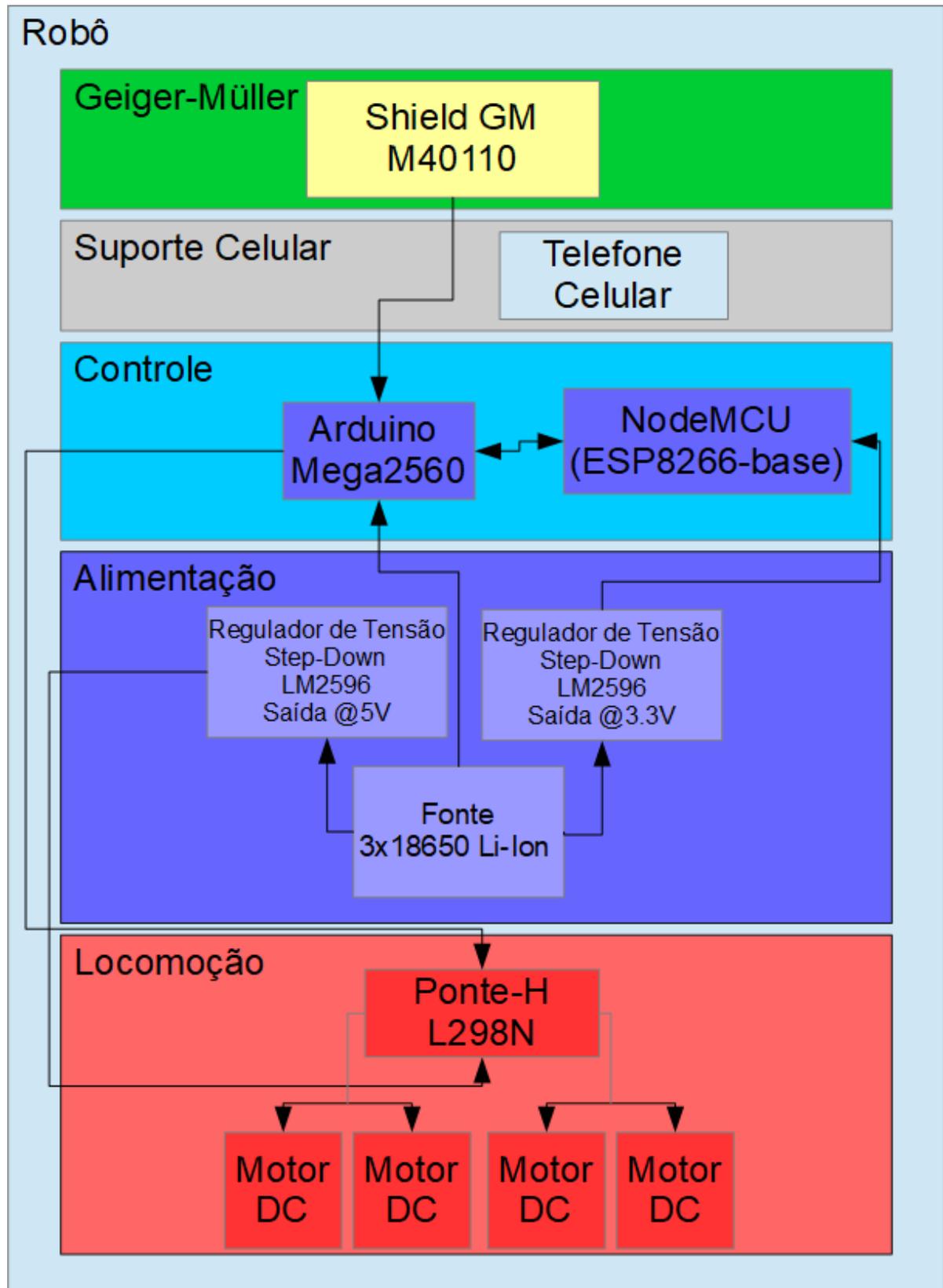


Figura. 14 – Diagrama Geral do Robô.

3.2. PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO NO ROBÔ

De uma maneira geral, os códigos-fonte carregados no Arduino foram modularizados de acordo com funcionalidades para fácil manutenção do código e para permitir o desenvolvimento de novas funcionalidades. Uma porta de interrupção foi programada para obter as variações de tensão no terminal correspondente ao detector Geiger-Müller, tornando possível a contagem de radiação. No intervalo de tempo pré-determinado essa contagem é transmitida para o NodeMCU via porta Serial, em formato de bytes. O Arduino é encarregado de obter as instruções que foram enviadas pelo Supervisor e recebidas no NodeMCU, e convertê-las em ações a serem realizadas no robô. Isso é feito através da conversão da instrução recebida na sua porta Serial em formato de bytes para uma atividade a ser executada. Quando é recebida uma instrução para locomoção, o Arduino polariza com sinal de PWM os pinos correspondentes à ponte H de acordo com a direção solicitada.

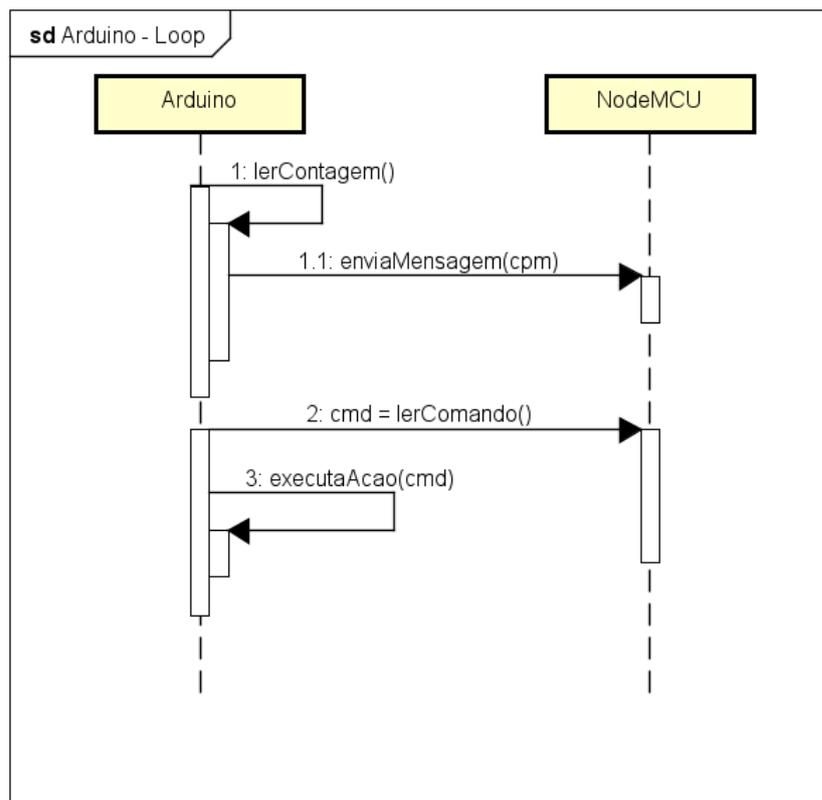


Figura. 15 – Diagrama de sequência do Loop do Arduino.

3.3. DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO SUPERVISÓRIO

O Supervisório foi elaborado para permitir o controle remoto do robô e supervisão dos dados por ele monitorados, além de permitir a programação de funções autônomas simples. Desenvolvido em cima da plataforma Windows, tendo como linguagem de programação o VB.Net por facilitar a criação de telas simples e funcionais de maneira rápida e por existir bastante conteúdo para consulta na internet. Foi pensada numa interface que permitisse a visualização textual e gráfica dos dados que fossem enviados pelo robô e ter espaço para a tela do Skype e habilitar a visualização em primeira pessoa. O protocolo de comunicação utilizado é o UDP, por ser rápido em não precisar de confirmação da recepção ou entrega de dados. A configuração da rede, a caráter de desenvolvimento, se deu através do Access Point iniciado no próprio telefone celular embarcado no robô, mas pode ser alterado para utilizar a rede WiFi do local onde será utilizado. Na Figura 16 podem ser vistos os elementos da tela do Supervisório, e logo adiante a descrição de cada um dos elementos.

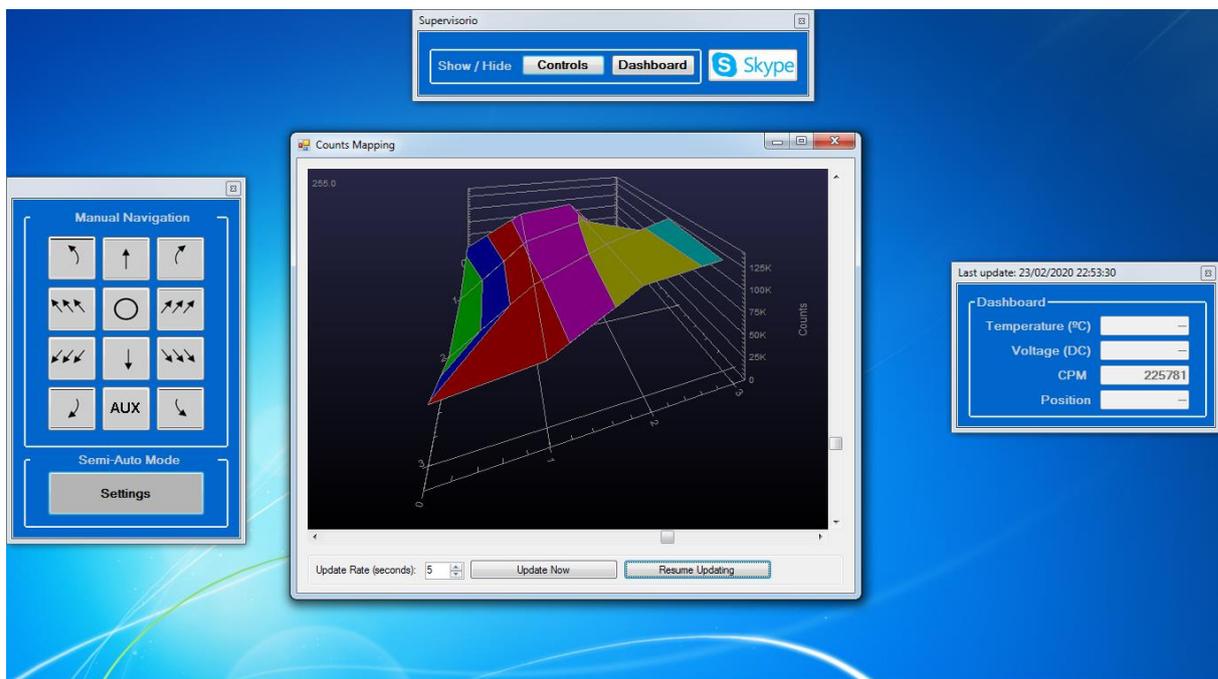


Figura. 16 – Telas do Supervisório.

- **CONTROLE DE EXIBIÇÃO DAS TELAS**

Ao iniciar o Supervisório essa é uma das primeiras telas a surgir. Utilizado para exibir/esconder as telas do controle manual, o dashboard e serve para abrir o aplicativo Skype permitindo a realização da chamada de vídeo para o celular que será embarcado.



Figura. 17 – Tela do Controle de Exibição das Telas.

- **TELA DO CONTROLE MANUAL**

Essa tela permite ao usuário enviar comandos para o robô que são traduzidos em instruções para movimentar-se. Os movimentos programados são para andar para frente ou para trás, girar no próprio eixo para esquerda ou para a direita, andar para frente ou para trás fazendo leve curva para direita ou para esquerda. Através dessa tela é possível configurar o modo semiautônomo do robô.



Figura. 18 – Tela do Controle Manual do robô.

- **TELA DE CONFIGURAÇÃO DO MODO SEMIAUTÔNOMO**

Através dessa tela o usuário pode definir os parâmetros para a execução do modo semiautônomo de monitoração de área, que é definida pelo mapeamento de uma matriz de posições nas quais o robô ficará parado monitorando a contagem naquele ponto, e depois irá para o próximo. No decorrer das leituras, o gráfico de contagem será preenchido. Na Figura 19 pode ser vista a tela com os valores padrão selecionados, o que indica que o robô realizará por quatro vezes o ato de obter a contagem do ponto que está e irá se deslocar para frente aproximadamente 25 centímetros. Ao receber a quarta contagem deve girar para a direita, caminhar mais 25 centímetros e girar novamente, agora realizando o caminho inverso. No exemplo será uma matriz de tamanho 4x4.

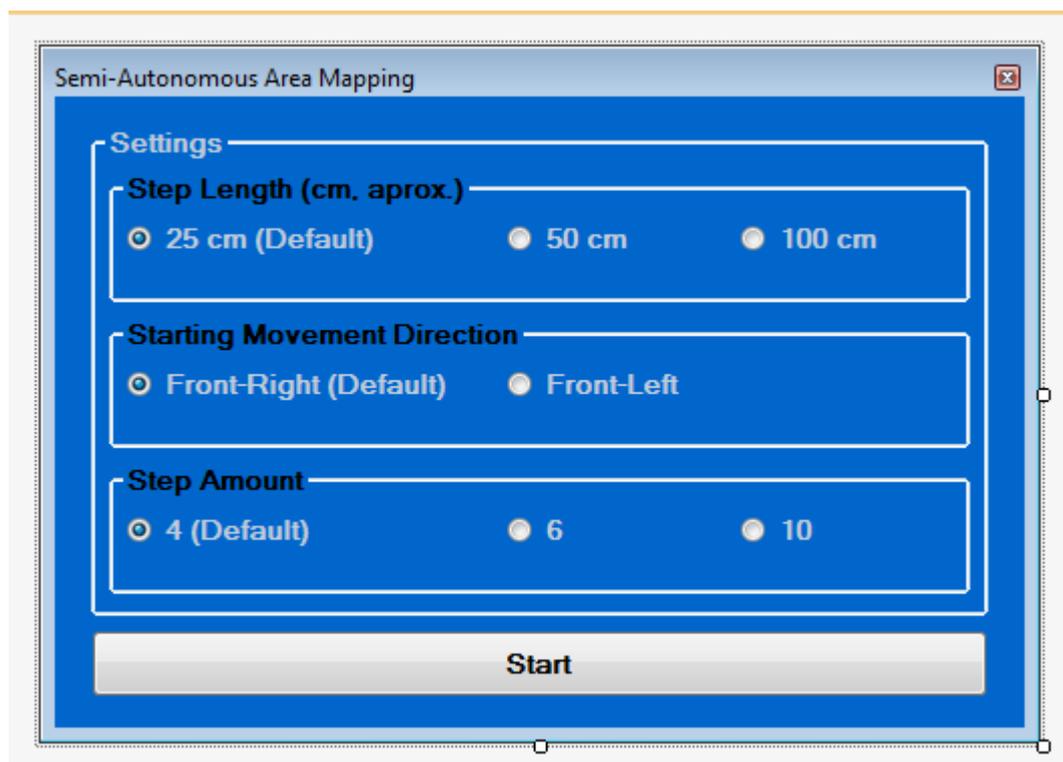


Figura. 19 – Tela de configuração do Modo Semiautônomo.

- **GRÁFICO DO MAPEAMENTO DE ÁREA**

Durante a execução do modo semiautônomo, os valores das contagens de doses dos pontos monitorados serão impressos no gráfico para visualização pelo usuário. As configurações na tela permitem alterar o intervalo de atualização do gráfico.

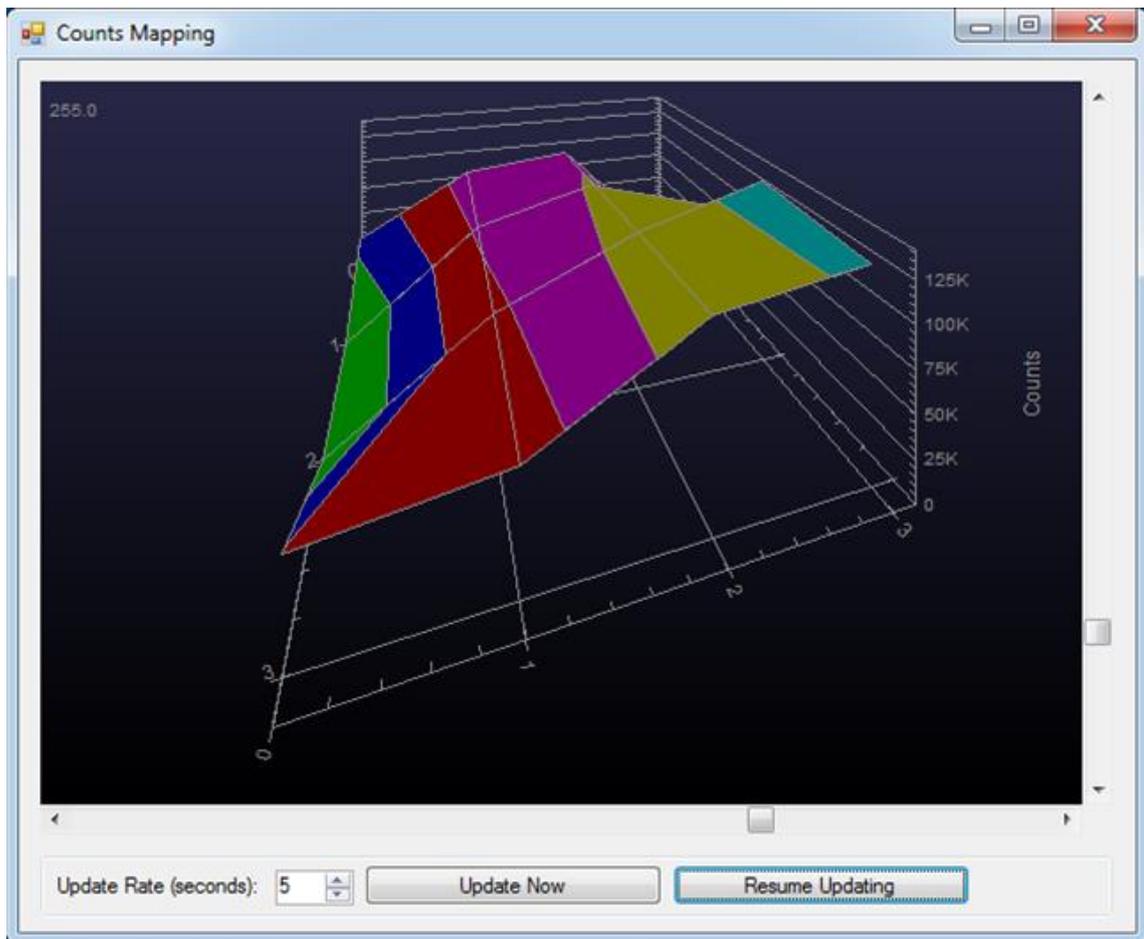


Figura. 20 – Gráfico do Mapeamento de Área.

- **TELA DO DASHBOARD**

Tela desenvolvida para exibir algumas variáveis provenientes do robô. No estágio atual de desenvolvimento apenas o valor das contagens será exibido. Em futuras implementações podem ser incluídos sensores de temperatura e outros facilmente obtidos no mercado.

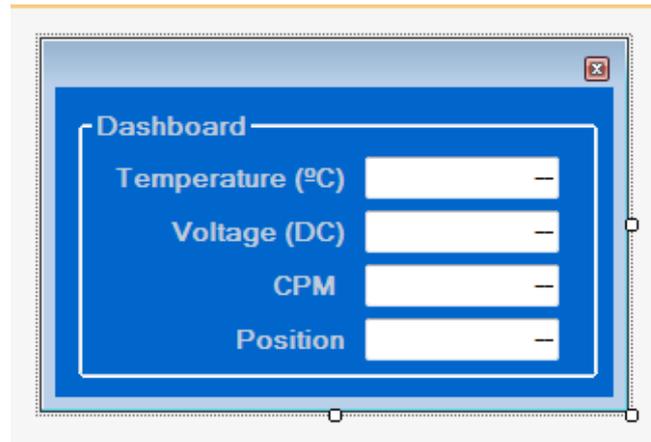


Figura. 21 – Tela do Dashboard.

- **TELA DO FEED DE VÍDEO**

O Supervisor foi desenvolvido com a possibilidade de inicializar uma instância do aplicativo Skype® para realizar uma chamada de vídeo para o celular que for embarcado no robô. O mesmo deve ser equipado com um periscópio em sua câmera principal para que este possa, mesmo em posição horizontal, mostrar o que há à frente do robô, facilitando a navegação manual por parte do operador.

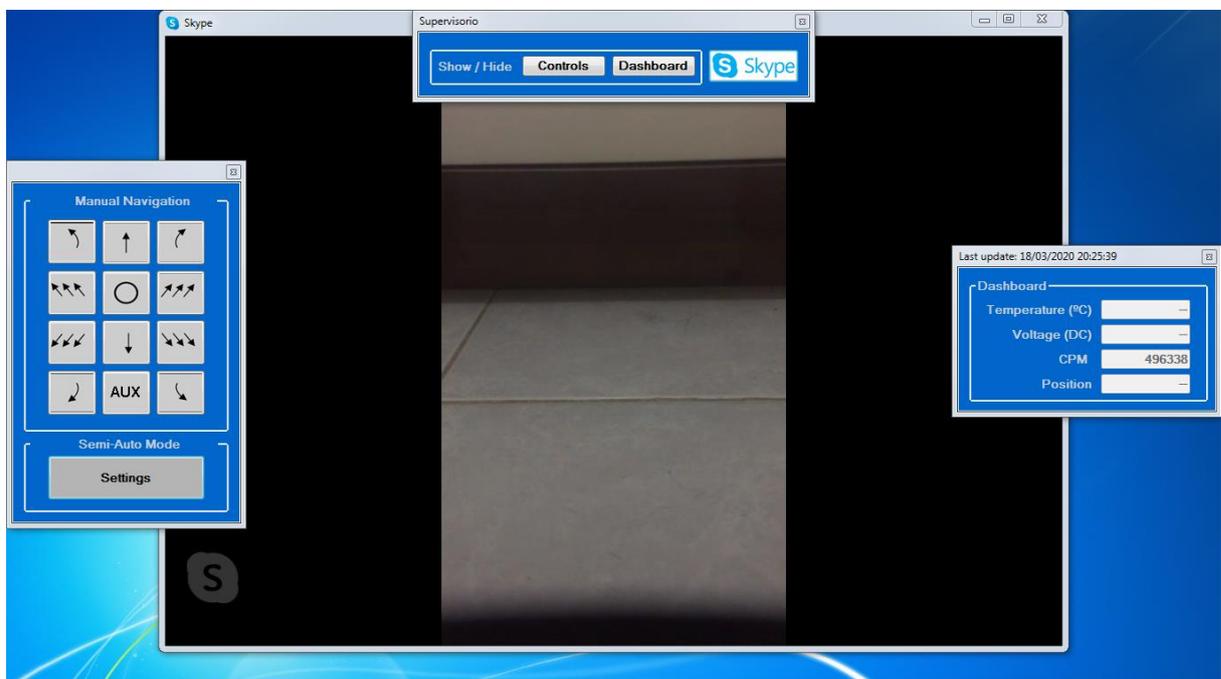


Figura. 22 – Tela do Supervisor com feed de vídeo habilitado através do Skype.

3.4. COMUNICAÇÃO ENTRE SUPERVISÓRIO E ROBÔ

A comunicação entre o Supervisor e a Facility se dá através do protocolo UDP. Cada comando ou mensagem recebido no destinatário é um caractere ou sequencia de caracteres convertidos dos bytes enviados pelo remetente. Tudo começa com a necessidade de um *handshake* – uma sinalização de disponibilidade entre as partes. O Arduino espera o NodeMCU enviar uma frase indicando que está presente. Quando isso acontece o Arduino envia de volta para o NodeMCU a sua indicação de presença. O NodeMCU tenta estabelecer conexão com a rede WiFi. O NodeMCU envia para o Supervisor a sua indicação de presença e espera o Supervisor enviar sua indicação de presença. O NodeMCU finaliza enviando mais uma vez para o Arduino uma mensagem, indicando sua presença. Na atual situação todos os dispositivos estão disponíveis e prontos para operação.

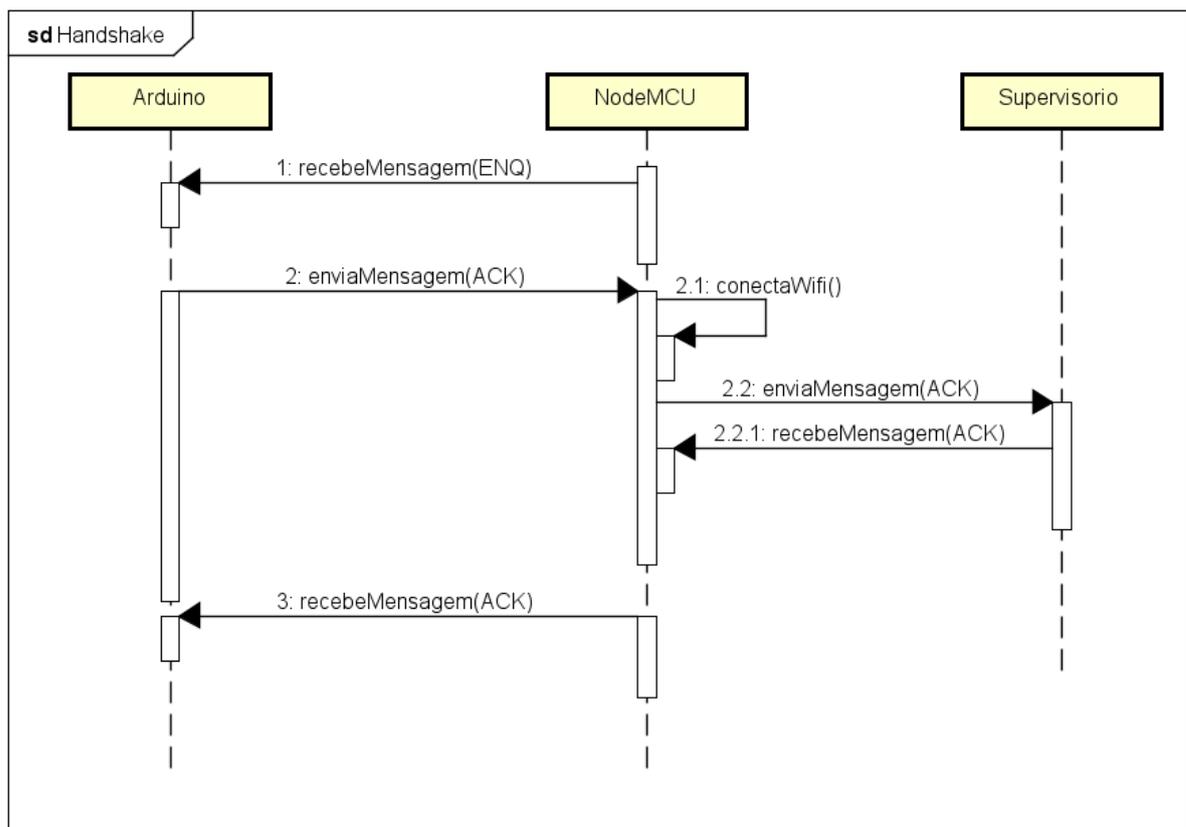


Figura. 23 – Diagrama de sequência do Handshake feito entre as partes.

4. TESTE DO PROTÓTIPO

De um modo geral, o robô foi concebido pensando numa utilização indoor, ou seja, a sua proposta é voltada para ambientes com solo bem definido e plano. Não foi elaborado um sistema de suspensão ativa, tampouco alguma contramedida no caso de tombamento. Levando esse detalhe em consideração, o ambiente de teste escolhido foi uma área com piso nivelado e com característica antiderrapante que diminui a patinação das rodas do robô.

Os seguintes testes foram realizados no Instituto de Engenharia Nuclear, nas dependências do Laboratório de Desenvolvimento de Instrumentação Nuclear. Tomadas devidas precauções, foi utilizada uma amostra de Césio 137 (Cs-137) de modo que fossem obtidas leituras acima das observadas na radiação de fundo.

Para a realização dos testes foi ativada a rede WiFi do próprio aparelho celular embarcado no robô, onde foram feitas as conexões do laptop executado o Supervisor e o NodeMCU do robô. A distância que o robô poderá se afastar do laptop varia de acordo com as características do ambiente, ou seja, se houverem obstáculos, paredes, se o robô for para outros cômodos que não aquele onde se encontra o laptop, o mesmo pode ficar inoperante. Essa característica é facilmente contornável utilizando-se de uma conexão WiFi que cubra a área desejada.

O robô foi programado para retornar as leituras obtidas a cada cinco segundos para facilitar a realização dos testes.

4.1. TELE OPERAÇÃO

A tele operação permite que o Operador controle manualmente o deslocamento do robô através do envio de comandos de movimentação disponíveis no aplicativo Supervisor. O robô inicia nesse modo permitindo que o Operador possa direcioná-lo conforme desejar. Deve-se levar em consideração que o robô faz a transmissão de suas leituras apenas quando está parado. Os testes demonstraram que o robô atende rapidamente aos comandos enviados pelo Supervisor, onde o mesmo recebeu diversos comandos de movimentação. O formato compacto do robô auxilia na sua agilidade, sendo possível manobra-lo facilmente. Nos momentos em que fica parado, o mesmo transmite para o Supervisor a contagem obtida, com intervalos predefinidos. A operação do robô fora do campo de visão do Operador foi possível através do feed de vídeo pela vídeo-chamada do Skype®. No teste realizado, o robô retornou ao Supervisor leituras de aproximadamente 100 pulsos a cada 5 segundos numa distância de ± 30 cm da amostra radioativa, e 15 pulsos ao afastar-se um metro da fonte.

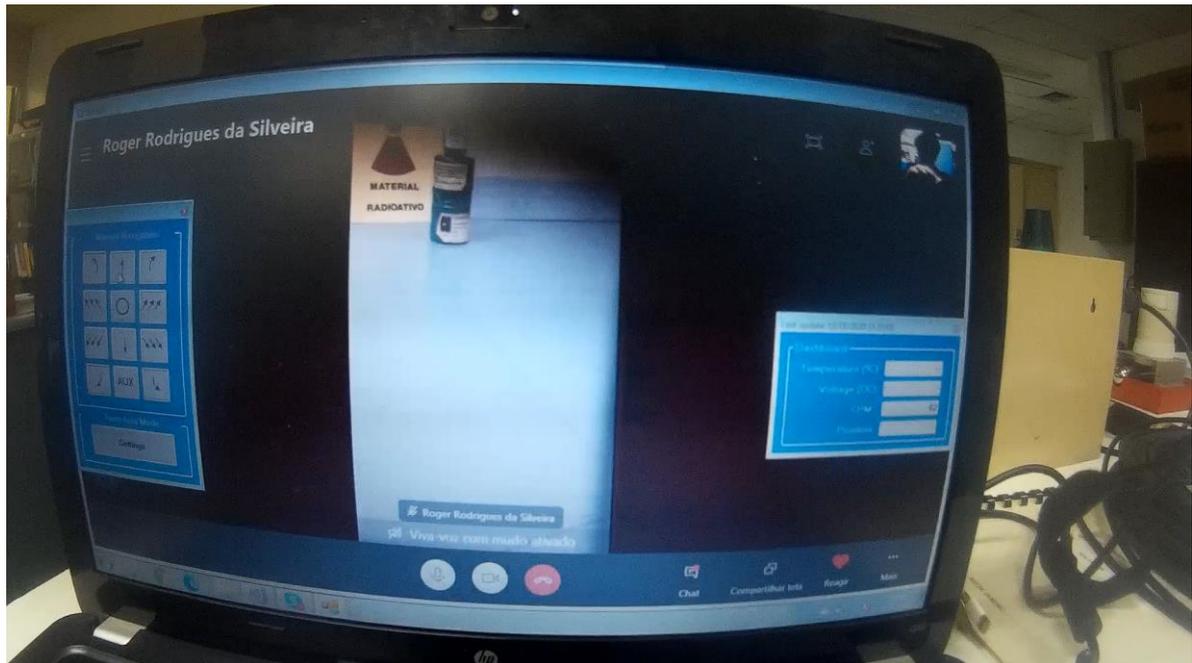


Figura. 24 – Foto tirada demonstrando o laptop executando o aplicativo Supervisor e a chamada de vídeo do Skype®.



Figura. 25 – Robô sendo deslocado através da tele operação.

4.2. OPERAÇÃO SEMIAUTÔNOMA

A operação semiautônoma foi concebida de modo que o protótipo percorra um circuito pré-determinado e no final do trajeto haverá uma matriz de valores das contagens que serão exibidas na tela correspondente no Supervisório. No teste realizado a amostra foi disposta ao nível do solo e o protótipo foi posicionado de maneira que sua trajetória coincidissem com a posição da amostra, salvo ± 30 centímetros de distância. O modo semiautônomo foi configurado para percorrer quatro passos espaçados por ± 25 centímetros, até que o robô faça o caminho de volta, curvando para a direita ao fim dos primeiros quatro passos. A operação se repete até que 16 valores sejam retornados e a área tenha sido mapeada. A figura 26 mostra a rota padrão tomada pelo robô com as configurações acima citadas, onde cada ponto representa uma parada para leitura da contagem e seu envio ao Supervisório.

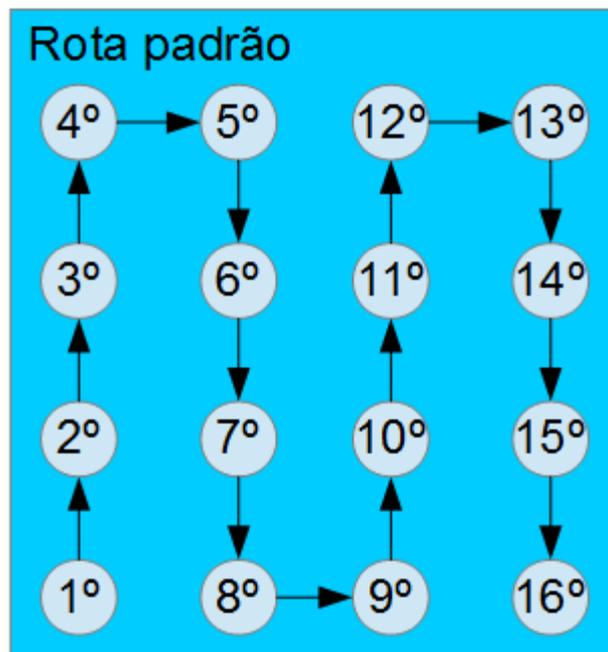


Figura. 26 – Rota padrão utilizada no teste.

O teste demonstrou a capacidade do protótipo em detectar uma amostra numa área ao imprimir na tela uma súbita elevação na contagem no ponto em que esteve mais perto da amostra. Entretanto há margem para aprimoramentos no mecanismo de orientação, visto que o mesmo tem como base apenas o tempo em que o robô gira em seu próprio eixo, causando em determinados momentos um leve desvio da rota padrão, principalmente nos pontos em que

o robô executa uma manobra de retorno. Esses desvios foram ocasionados por patinação das rodas. As figuras a seguir exibem algumas etapas do teste.

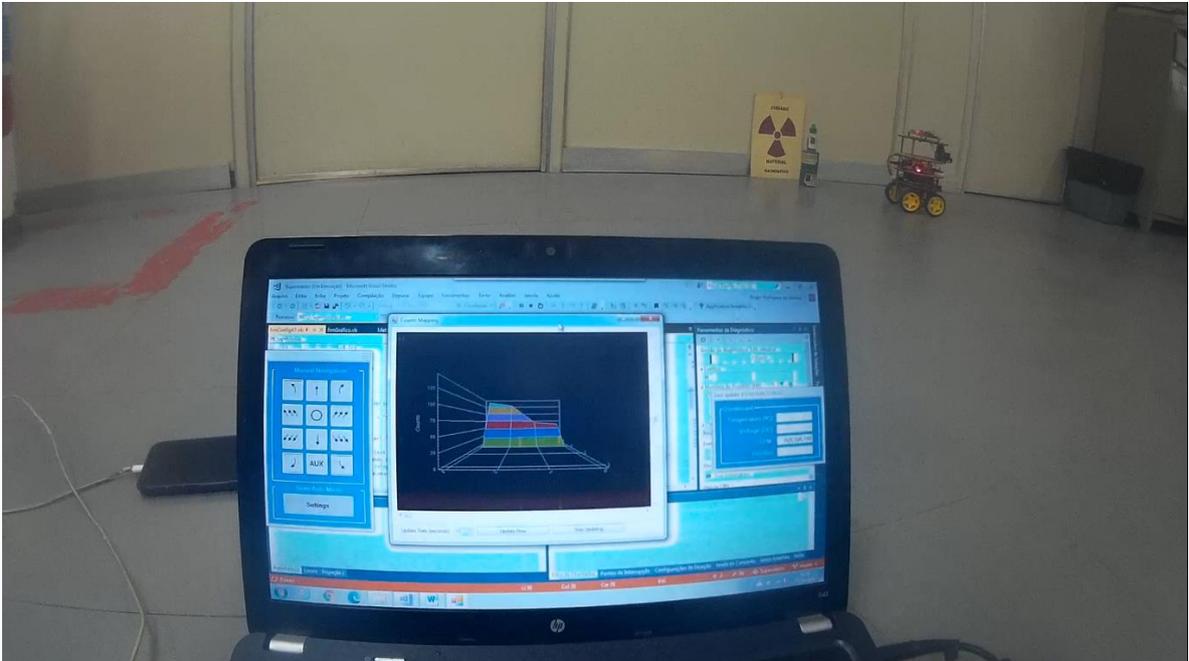


Figura. 27 – Representação de uma elevação na contagem momentos depois de ter se aproximado da amostra.



Figura. 28 – Gráfico demonstrando a diminuição na contagem de acordo com o afastamento da fonte.

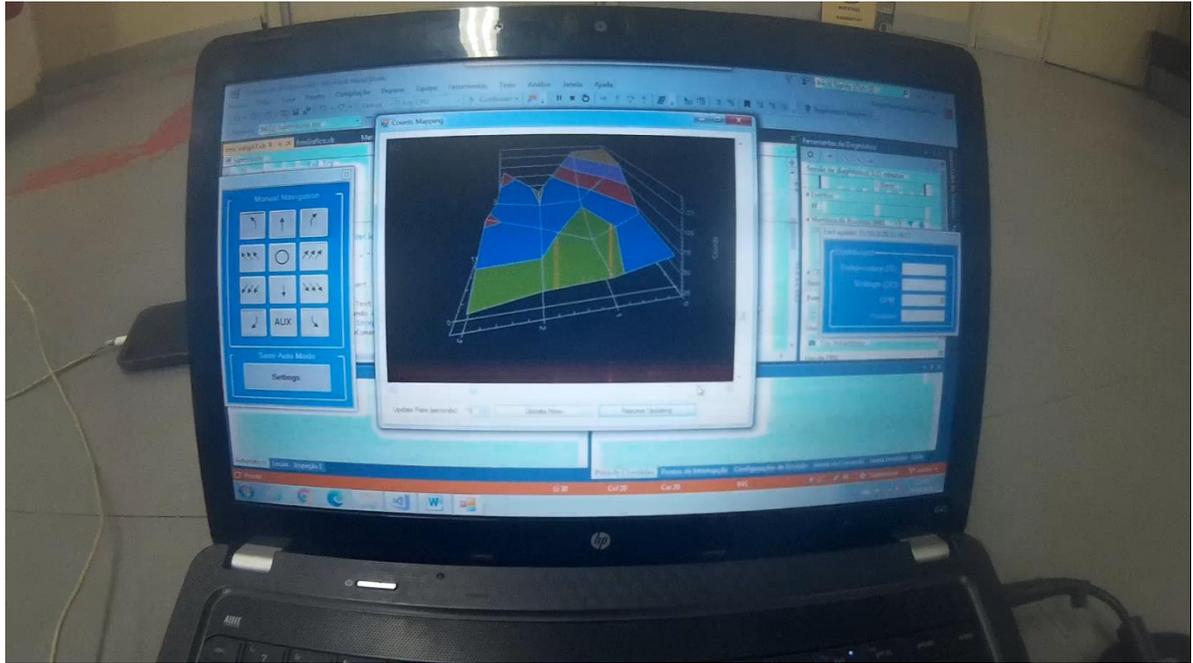


Figura. 29 – Gráfico representando o mapeamento da área ao final do teste. Repare no pico de contagens no ponto referente à amostra.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho serviu para demonstrar o desenvolvimento de um protótipo de robô de baixo custo portador de um detector de radiação habilitado a ser operado remotamente e retornar ao Operador a uma estimativa de contagem das interações radioativas que lhe alcançam. O baixo custo permitirá a replicação do mesmo, tornando possível uma abordagem voltada à concepção de enxames robóticos.

No que tange a capacidade deste robô substituir a presença humana no ato da busca de uma amostra radioativa, sendo pelo modo de operação manual ou semiautônomo, os testes foram bem sucedidos, pois foram capazes de retornar via supervisorio, através de números absolutos ou gráficos, aumento na contagem de acordo com a distância dele para a amostra radioativa.

Vale lembrar que o mesmo não conta com aparatos que lhe forneçam proteção radiológica, restringindo seu uso em aplicações de baixa radiação.

Numa versão futura podem ser aplicadas regras de conversão de contagem por minuto para dose, fazendo uso de detalhes disponibilizados pelo fabricante do detector, de modo a agregar maior usabilidade para o robô.

O mecanismo de orientação do robô precisa ser revisto para minimizar ou solucionar o problema de desvio da rota padrão no modo de operação semiautônomo, utilizando algum sistema de correção que não somente dependa do tempo de rotação das rodas.

Imprescindível para a habilitação da operação em enxames, uma sugestão de trabalho futuro seria a elaboração de um mecanismo de triangulação que permita que cada componente do enxame saiba sua localização em um ambiente. Para locais fechados pode ser utilizado alguma espécie de emissor, infravermelho, bluetooth, dentre outros. Para utilização outdoor o sistema de GPS já poderia ser um ponto de partida.

Desenvolver e integrar um sistema de câmera para feed de vídeo sem a utilização de um celular e transmitido direto para o supervisorio.

Pode ser necessário o desenvolvimento de uma interface que facilite a carga de programas no Arduino a fim de facilitar testes por aqueles que não familiarizados com o ambiente de desenvolvimento proprietário.

REFERÊNCIAS

1. Tauhata, L., Salati, I. P. A., Di Prinzio, R., Di Prinzio, M. A. R. R. "Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos", IRD/CNEN, Rio de Janeiro, 2013, p. 246-258.
2. R. M. Vázquez-Cervantes and F. J. Ramirez-Jiménez, "6-Wheel Terrestrial Robot for Radiation Detection," *2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, Atlanta, GA, 2017, pp. 1-5.
3. T. Jilek, "Radiation intensity mapping in outdoor environments using a mobile robot with RTK GNSS," *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015*, Brno, 2015, pp. 1-7.
4. K. Ohno, S. Kawatsuma, T. Okada, E. Takeuchi, K. Higashi and S. Tadokoro, "Robotic control vehicle for measuring radiation in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, Kyoto, 2011, pp. 38-43.
5. CNEN-NN-3.01, "Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica", 2014.
6. CNEN-PR-3.01/004, "Restrição de Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas", 2011.
7. Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, Abuja, 2014, pp. 1-4.
8. ARDUINO, "What is Arduino?", 2020. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/>>. Acesso em: 10 de fev. de 2020.

9. Carlye A. Lauff, Daniel Knight, Daria Kotys-Schwartz, Mark E. Rentschler, "The role of prototypes in communication between stakeholders", *Design Studies*, 2020.
10. Schwartz, M., "ESP8266 internet of Things Cookbook", Packt Publishing Ltd., Birmingham, 2017.
11. Paulo R. Silveira, Danilo de F. Naiff, Claudio M.N.A. Pereira, Roberto Schirru, "Reconstruction of radiation dose rate profiles by autonomous robot with active learning and Gaussian process regression", *Annals of Nuclear Energy*, Volume 112, 2018, p. 876-886.
12. ARDUINO, "Arduino UNO R3", 2020. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3/>>. Acesso em: 17 de mar. de 2020.
13. ARDUINO, "Arduino Mega 2560 Rev3", 2020. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3/>>. Acesso em: 17 de mar. de 2020.
14. ARDUINO, "Arduino Nano", 2020. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano/>>. Acesso em: 17 de mar. de 2020.