



HARDWARE SIMULADOR DE DETECÇÃO A ELEMENTOS RADIOATIVOS PARA USO EM SIMULAÇÃO DE RESPOSTA À EMERGÊNCIA RADIOLÓGICA

Clovis Jose Prudencio Filho¹, Fernando Pedro Henriques de Miranda².

Resumo: Este artigo aborda o desenvolvimento de um equipamento eletrônico capaz de simular a proximidade a uma fonte radioativa para ser usado em treinamentos de simulação de resposta à emergência radiológica. O desenvolvimento do produto visa projetar um equipamento capaz de medir distâncias e convertê-las em níveis equivalentes de radiação. Dentre os requisitos principais o produto deverá emitir alarmes de aproximação e fornecer a leitura visual dos níveis equivalentes de radiação. O equipamento também deverá ser capaz de fornecer a noção da lei do inverso do quadrado da distância. O sensor de distância é o elemento crítico no desenvolvimento, então foram consideradas diferentes opções de solução (ultrassom, óptica e radiofrequência). Foram realizadas também as provas de conceito e as medidas em campo com os diferentes tipos de sensores; os resultados definiram a escolha. O sensoriamento por radiofrequência se mostrou o mais adequado para esta aplicação. A conclusão do trabalho aponta também algumas limitações da tecnologia utilizada e sugere o desenvolvimento de uma tecnologia de radiofrequência proprietária.

Palavras-chave: Medidor de Distância. Simulação de Acidente radiológico. Segurança em Treinamento de Radiação.

Abstract: *This paper discusses the development of electronic equipment capable of simulate the proximity to a radioactive source to be used in radiological emergencies training simulation. The development of the product is design equipment capable of measuring distances and converting them to equivalent levels of radiation. Among the main requirements, the product must emit approach alarms and provide a visual reading of equivalent radiation levels. The equipment also must be able to provide the notion of the inverse square law. The proximity sensor is the critical element in the development, so for each sensor, different solution are considered (ultrasound, optics and radio-frequency). Prototypes and measurements in the field were also carried out with the different types of sensors; the results defined the choice. Radio-frequency sensing proved to be the most suitable for this application. The conclusion also points out some limitations in the applied technology and suggests the development of a proprietary radio frequency technology.*

Keywords: *Distance Meter. Radiologic Accident Simulation. Radiation Safety Training.*

¹Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, IFSC Florianópolis, Clovis Jose Prudencio Filho <clovisjp@icloud.com>.

²Mestre em Engenharia Elétrica, USP São Paulo, Professor do Departamento Acadêmico de eletrônica (DAELN), IFSC Florianópolis, <Fernando.mioranda@ifsc.edu.br>.

1 INTRODUÇÃO

A radiação é invisível insípida e inodora, ela está constantemente à nossa volta - a radiação natural no ar, os raios cósmicos, e dos materiais radioativos artificiais da radioterapia médica e combustíveis nucleares usados em usinas

nucleoelétricas. As leis modernas de saúde e segurança exigem que todos os locais potencialmente radioativos pratiquem regularmente as simulações de emergência. De acordo com as informações publicadas no site da agência de proteção à saúde do Reino Unido, a cada ano acontece ao menos um acidente radioativo grave e que resulta em morte no mundo. A exposição a altos

níveis de radiação não é algo que possamos esperar no nosso dia-a-dia, mas num caso de acidente radioativo os socorristas devem estar bem treinados em segurança da radiação (ARGON, 2014). Treinamentos realizados com o uso de fontes radioativas seladas (JNMT, 2004) e um detector de Geiger-Muller (REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR, 2014) minimizam a chance de contaminação. Todavia, fontes seladas ainda podem apresentar um risco de exposição dependendo das propriedades do radioisótopo e de sua atividade (IOWA STATE UNIVERSITY).

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um simulador de presença de radiação com um comportamento idêntico aos detectores reais, possibilitando aos socorristas concluir um treinamento de acidente radiológico sem estarem expostos às radiações. No desenvolvimento do produto buscou-se seguir a metodologia de projeto de Pahl & Beitz (C. R. ZARDO, A. O. BARBISAN, N. BERTICELLI). Foram concebidos três módulos principais para compor o produto: um sensor, um controlador e saídas para o operador. As seções subsequentes descrevem o desenvolvimento dos três módulos: a seção 2 é o projeto informacional que lista os requisitos do projeto e inclui alguns modelos existentes no mercado. A seção 3 é o projeto conceitual que faz a comparação entre tecnologias que podem ser aplicadas aos sensores. A seção 4 é o projeto preliminar que descreve com mais detalhes como será o produto final e apresenta os testes realizados em campo com diferentes provas de conceito dos diferentes sensores. A seção 5 é o projeto detalhado, mostrando a prototipagem, as considerações de propagação no espaço livre e os gráficos dos resultados finais do protótipo de radiofrequência (RF). A seção 6 traz as considerações sobre as tecnologias empregadas, seus resultados, suas limitações e aponta alguns caminhos para um desenvolvimento futuro. As referências usadas neste trabalho estão na seção 7.

2 PROJETO INFORMACIONAL

No Projeto Informacional são levantadas as informações necessárias para o desenvolvimento do produto. Esta etapa também situa o produto no contexto da aplicação, apresenta condições de mercado e elenca os requisitos necessários que vão nortear as outras etapas do desenvolvimento.

2.1 Cenário de aplicação

O cenário para aplicação do produto é um treinamento de acidente radiológico. O treinamento de simulação de emergência radiológica é uma

imersão em um ambiente criado cenograficamente. A simulação inclui roteiros e atores conforme ilustrado na Figura 1 (IFSC, 2019). A cena se inicia com a simulação de um acidente em que há liberação de material radioativo, seguida da encenação das vítimas e das equipes de socorro. Após a cena das vítimas, um outro ator mede o ambiente e anuncia medidas de intensidade de radiação como se estivesse lendo um instrumento real.



Figura 1 – Treinamento SIREX_IFSC_(2019). Fonte: o Autor.

2.3 Mercado

Não foram encontrados equipamentos com estas funcionalidades no mercado nacional. Equipamentos similares são encontrados no mercado internacional, inclusive com muitas variantes de aplicações, com modelos específicos para simulação de acidentes envolvendo simuladores *HazMat* (materiais tóxicos e perigosos) bem como simuladores *CBRN* (químicos, biológicos, radiológicos e nucleares).

A Safe Trainig Systems Ltd (STS) foi o único fabricante que forneceu cotação por email. Foi cotada uma maleta com o kit contendo um simulador de medidor de radiação, uma fonte simulada e o manual do usuário. No Reino Unido, a STS cota esta maleta em £4495.00 com custo de envio de £200.00 para o Brasil (R\$ 35.000,00 – out/2020). O pagamento deve ser adiantado para que a STS inicie a fabricação. O prazo de entrega é de seis semanas. A maleta com o kit é mostrado na Figura 2 e suas características na primeira linha da Tabela 1.



Figura 2 - Survey Safe Simulated Meter. STS Ltd.

Tabela 1 - Simulador-características. Fonte: o Autor.

Modelo	Tecnologia	Display	Botões	Uso de luvas	Bateria ¹	Alarme	Escala ²	Alcance
STS Survey Safe	STS-RF detection	65x35mm backlight LCD	4 membrana	sim	COTS / 10 hs	Áudio + LED	nSv/h mR/h	20m
Argon RadEye	Radiofrequência	LCD	4	sim	COTS / 80 hs	Áudio + vibração	Sv/h Rem CPS	60m
Argon FH40	Radiofrequência	LCD	4 comum	-	COTS	Áudio	µSv/h	30m

COTS¹ - *Commercial off-the-shelf* (produto de prateleira), refere-se à bateria não recarregável.

Escala²- a) mR/h = *mili-Roentgen por hora*, em homenagem a Wilhelm Roentgen (THE NOBEL PRIZE) - b) µSv/h = *micro-Sievert por hora*, em homenagem a Rolf Maximilian Sievert, (RADIOPAEDIA) - c) Rem = *roentgen equivalent man*, unidade no sistema CGS, foi substituída por Sievert (RADIOPAEDIA) - d) CPS = *counts per second*, contagem por segundo, usada na detecção de vazamentos de radiação ionizante (IONACTIVE) - e) mGy/h = *mili gray por hora*, em homenagem a Louis Harold Gray (RAKUTEN KOBO).

2.4 Requisitos

Os requisitos baseiam-se em reuniões com professores da área de radiologia do IFSC e percepção das demandas existentes nos treinamentos de acidentes radiológicos. A Comissão Nacional de Energia Nuclear do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, estabelece um limite de dose anual público de 1 mSv (1000 µSv). Para os profissionais atuantes na área de radiologia a dose limite é 20 mSv por ano, considerando uma média de 5 anos, além de estabelecer por ano a não extrapolação da dose ao valor de 50 mSv. Neste contexto, os professores que atuam na área de radiologia, por se tratar de uma instituição de ensino no qual os alunos devem permanecer o mínimo possível expostos a doses de radiação, sentem a necessidade de um produto no mercado que evite o contato aos elementos radioativos, mesmo que em pequenas doses, em seus treinamentos e aulas práticas.

2.4.1 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais descrevem em linhas gerais as funcionalidades esperadas do equipamento.

RF1: Detectar a proximidade do simulacro radioativo.

RF2: Emitir sinal sonoro de aproximação.

RF3: Fornecer leitura visual dos níveis equivalentes de radiação.

RF4: Possuir atuador de saída mecânico de vibração.

RF5: Obedecer à Lei do Inverso do Quadrado da Distância.

RF6: Fornecer o tempo de exposição a determinada dose.

RF7: Facilidade de uso.

RF8: Ser equipamento portátil podendo ser operado por uma das mãos.

RF9: Ajuste do valor/nível de dose.

RF10: Robustez.

2.4.2 Requisitos Não Funcionais

Os requisitos não funcionais tratam de detalhar o modo com que os requisitos funcionais serão implementados, fornecendo algumas informações mensuráveis.

RNF1: Utilizar um sensor de aproximação para leituras à distâncias até 20 metros.

RNF2: Produzir efeito sonoro por meio de um transdutor acústico.

RNF3: O motor de vibração deve ser compacto, com dimensões máximas de 3,0 mm x 15,0 mm.

RNF4: Possuir *display OLED* ou equivalente, com características suficientes (linhas e colunas) para informar os parâmetros de interesse ao operador.

RNF5: Implantação de um contador de tempo no mostrador indicando o tempo de exposição a cada intervalo de nível de dose, zerando a contagem na próxima dose.

Tabela 2 - Matriz Morfológica das unidades do produto

Função	Subfunção	Solução 1	Solução 2	Solução3
Detectar proximidade		Ultrassom	Óptica	Rádio Frequência
Receber e tratar sinais do sensor e Alimentar as saídas para o operador	Ler o Sensor	Microcontrolador		
	Converter as Unidades			
	Alimentar as Saídas			
Saídas para o operador		Visual	Sonora	Mecânica

RNF6: O Software embarcado será usado para converter as leituras de distância em níveis de dosagens radioativas equivalentes.

RFN7: O software embarcado deverá ajustar os níveis de dosagem de acordo com a Lei do Inverso do Quadrado da Distância.

RNF8: Possuir atuação por meio de botoeira para: ligar e desligar, converter as unidades de mR/h para Gy/h (1Gy = 114R) e para calibrar o nível de dose de acordo com os multiplicadores 0,1; 1,0; 10,0 e 100,0.

RNF9: Possuir dimensões máximas de 8cm de largura, 12 cm de altura, 2,5 cm de profundidade e alimentação através de bateria.

RNF10: Ser equipamento robusto, encapsulamento em plástico ABS com grau de proteção IP-65.

3 PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual descreve as funções do produto, os conceitos básicos de cada solução, exibe a matriz morfológica das unidades do produto e a matriz de avaliação das alternativas. A matriz morfológica nada mais é do que uma tabela na qual se insere os parâmetros do produto ou as subfunções. A matriz de avaliação estabelece critérios de seleção para o produto. A seleção da melhor ideia se dá pela somatoria das notas, e a que obtiver maior total (CARPES JR., WIDOMAR, 2014). Será apresentada a Matriz Morfológica das funcionalidades do produto está na Tabela 2 e a Matriz de Avaliação dos sensores na Tabela 3.

A Figura 3 é uma ilustração da reflexão ultrassônica. Pode-se notar que quanto mais se afasta o objeto reflexivo, mais difícil a sua localização devido ao efeito de perspectiva óptica.

Pequenas mudanças de ângulo podem forçar o operador a desviar a atenção da leitura do equipamento para tentar localizar o alvo. A Figura 5 ilustra um sensor óptico, que além de também sofrer o efeito de perspectiva óptica, necessita de um

ângulo de aproximadamente 90 graus para possibilitar a reflexão. A Figura 6 mostra a distribuição de potência de uma antena de rádio. Os efeitos de perspectiva e ângulo citados nas tecnologias ultrassom e óptica não se aplicam à radiofrequência, pois não há a necessidade de reflexão e sim a detecção do sinal emissor. Apesar da ilustração se referir a uma antena polarizada com característica direcional, ainda se observa um ângulo de aproximadamente 120 graus no lóbulo frontal, o que possibilita ao operador mais liberdade para se concentrar na leitura do equipamento.

Tabela 3 - Matriz de Avaliação dos sensores

	Deteccção	Maior alcance	Precisão na medida	Total
Relev.	5	4	5	-
Sonar	1	1	6	39
Óptica	3	3	6	57
RF	6	6	3	69

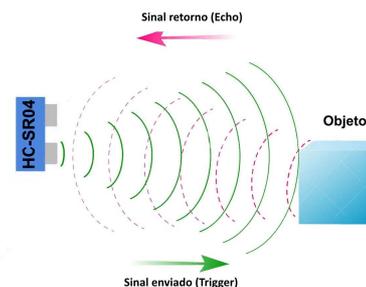


Figura 3 - Reflexão ultrassom. Fonte: o Autor.

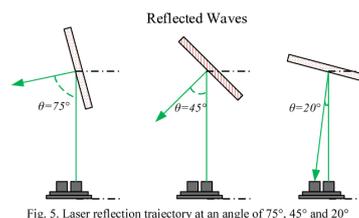


Fig. 5. Laser reflection trajectory at an angle of 75°, 45° and 20°

Figura 5 - Reflexão óptica. Fonte: o Autor.

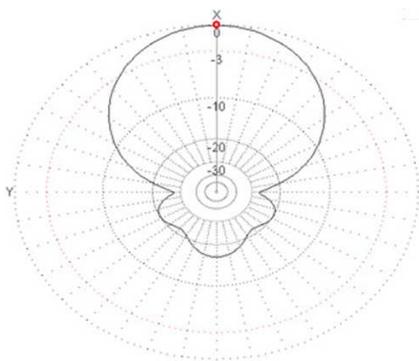


Figura 6 - Distribuição de potência de antena RF.
Fonte: o Autor.

A Tabela 3 é uma matriz de avaliação dos diversos tipos de sensores levando-se em conta itens importantes e específicos para o projeto, tendo como critério de relevância de 1 a 5 pontos para o projeto e multiplicando por peso de 1 a 6 para cada solução. Relevância 1: pouco relevante; relevância 5: muito relevante. Pesos: Facilidade de detectar elemento - com facilidade: peso 6; relativa facilidade: peso 3; com dificuldade: peso 1. Maior alcance - até 20m: peso 6, até 10m: peso 3, até 5,0m: peso 1. Precisão na medida com relação à medida real - precisa: peso 6; aproximada: peso 3; imprecisa: peso 1.

4 PROJETO PRELIMINAR

O projeto preliminar apresenta as características de funcionamento do produto e a seleção dos materiais a serem usados. Esta etapa pode ser utilizada na confecção do protótipo. Para o sensor será adotada a tecnologia de radiofrequência (RF). O produto terá duas unidades distintas. A unidade emissora fará o simulacro da fonte radioativa e contará com o transmissor RF, um microcontrolador e uma bateria. A unidade receptora contará com um receptor RF, um microcontrolador, um display, uma unidade sonora, um motor de vibração, botões de comando e uma bateria. As leituras de potência das unidades RF serão convertidas em níveis RSSI, variável que é disponibilizada pelo módulo receptor chamada *Received Signal Strength Indicator*, *RSSI* (indicador de intensidade do sinal recebido). Os níveis RSSI serão lidos pelo microcontrolador e transformados na unidade equivalente de dose de radiação.

4.1 Esboço do produto

Fornecer uma noção de como o produto poderá se parecer. Este conceito prevê a utilização de duas unidades. Uma unidade será a emissora (*case* de tamanho menor), e a outra unidade será a

receptora (*case* de tamanho maior) a qual efetuará a leitura do sinal emitido. O *layout* provisório das duas unidades pode ser observado no esboço da Figura 7.

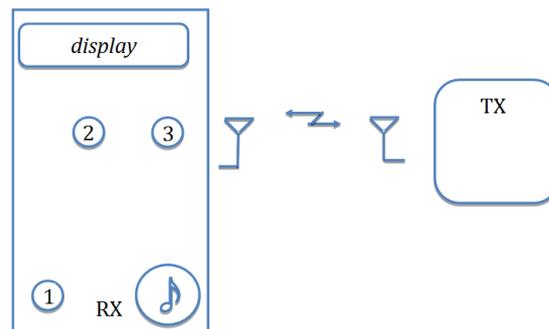


Figura 7 – Esboço do produto. Fonte: o Autor.

4.2 Projeto da interface com o usuário

O projeto da interface com o usuário é aplicado somente ao receptor, porque é a unidade que estará nas mãos do operador. Conforme os requisitos do projeto, o equipamento deverá ser capaz de converter as unidades de dosagem, bem como calibrar os níveis de uso. O projeto de interface foi desenvolvido considerando-se a rotina de uso do equipamento a partir do Diagrama de Modos (Figura 8) e da Análise de *Link*, (análise dos elos ou ligações) *Link Analysis* (C. A LESTER, M.A CHUI) na Figura 9. Como resultado da análise dos *links* (movimentos humanos) chegou-se a conclusão que somente três botões seriam necessários para operar a o equipamento: liga-desliga (botão 1), conversor de unidades (botão 2) e calibração de dose (botão 3). O Diagrama de Modos se refere aos diferentes modos tanto da interface quanto do estado interno da máquina. O modo padrão de uso tem as seguintes características: dose em mR/h, distância em metros, tempo em segundos e calibração x1.

Na análise de *link* as linhas tracejadas descrevem os movimentos dos olhos e as linhas contínuas descrevem os movimentos das mãos. O botão 3 foi posicionado mais à direita, pois durante o tempo que o equipamento estiver ligado, os *links* mais frequentes estão entre o botão 3 e o *display*, levando em consideração que a maioria das pessoas é destra. A sequência básica de uso pode ser descrita desta forma: *stroke* botão 1 (pressionar e soltar o botão 1) para ligar - verificar o *display*. *Stroke* botão 2 para converter a unidade - verificar o *display*. *Stroke* botão 3 para calibrar o nível de dose - verificar o *display* - operar o equipamento. *Stroke* botão 1 para desligar - verificar o *display*.

Poderá acontecer alguma variação no modo de uso, visto que temos duas unidades de dosagem para converter e três modos de ajuste para calibrar.

O Diagrama de Modos ilustra as possibilidades de uso.

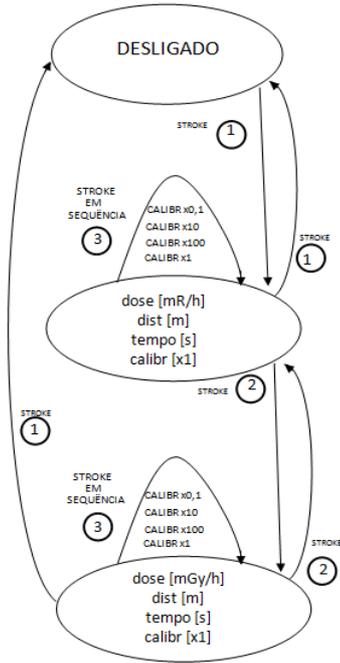


Figura 8 - Diagrama de Modos. Fonte: o Autor.

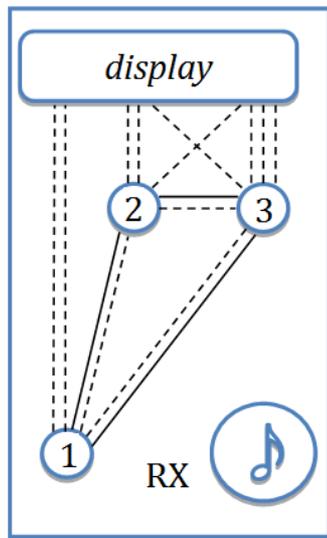


Figura 9 - Análise de link. Fonte: o Autor.

4.3 Arquitetura do produto

O projeto arquitetural pode servir de base para o projeto detalhado. O projeto arquitetural está descrito por um diagrama de blocos na Figura 10.

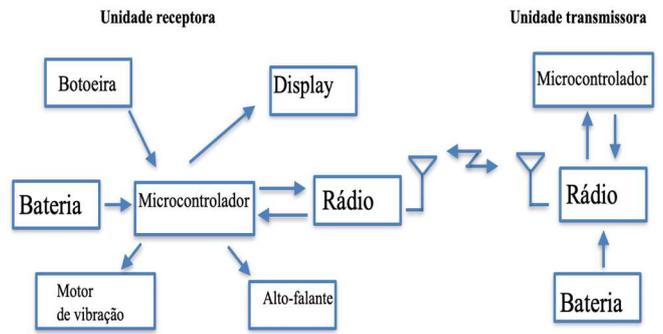


Figura 10 - Arquitetural. Fonte: o Autor.

4.4 Sensor RF

Verificando um transceptor RF para esta aplicação e considerando que não há necessidade de se transmitir dados, o protocolo de aplicação não seria relevante. Seria necessário apenas estabelecer o enlace de rádio e medir os níveis da potência recebida.

Alguns itens foram levados em conta:

- Economia de energia;
- Disponibilidade de leitura direta dos níveis de potência RSSI;
- Atendimento ao requisito de alcance de até 20 metros;
- Precisão na medida;
- Facilidade de aquisição: este item reúne baixo preço, tempo de fornecimento, garantia do produto e disponibilidade no mercado a curto prazo;

Neste caso um *transciever* (transmissor-receptor) que forneça a leitura digital de RSSI poderá ser usado; um *transciever* que trabalhe na faixa de 2.4 GHz ou mesmo na faixa Sub_GHz será adequado para a aplicação. Podem ser usados o CC2500 2,4 GHz (Texas Instruments), o SX-1276 915 MHz (Semtech) ou o BL653 2,4 GHz (Laird connectivity).

4.5 Microcontrolador

Quanto ao microcontrolador os seguintes itens foram levados em conta:

- Economia de energia;
- Atendimento aos requisitos: neste ponto o projeto em si não requer muitos recursos do microcontrolador visto que o equipamento não visa a transmissão de dados em alta velocidade, não necessita de muitas interfaces seriais tampouco de modulação por largura de pulso nem muitas portas de entrada e saída;

Tabela 4 – Seleção dos materiais

	Unidade	Qtdd	Descrição	Apresentação
Sensor	SX-1276	2	Transceptor LoRa 915 MHz	CI embarcado em módulo com antena
Microcontrolador	Atmega328P-PU	2	Microcontrolador Microchip 8 bits 20MHz	CI com encapsulamento PDIP 28 pinos
Saídas	Display	1	Display 1602 LCD 16x2 com interface I2C	Chipset controlador HD44780 embarcado em módulo com display
	Alto-falante	1	Mini alto-falante 8,0 ohm x 1,0 Watt	Unidade isolada dimensões 4,0 cm x 2,0 cm x 0,7 cm
	Motor de vibração	1	Mini motor de Vibracall	Modelo 1027 9000 RPM dimensões 1,0 cm x 0,3 cm

- Facilidade de aquisição: este item reúne baixo preço, tempo de fornecimento, garantia do produto e disponibilidade no mercado a curto prazo;

Para a aplicação objeto deste estudo, qualquer um destes microcontroladores podem ser usados: STM32 (ST Microelectronics), ESP32 (Espressif sistemas), Atmega328 (Microchip), ESP8266 (Espressif sistemas) e MSP430 (Texas Instruments).

4.6 Saídas para o operador

O receptor contará com as seguintes saídas para operador: uma indicação visual através de um *display* LCD 16 x 2 ou um *display* OLED, uma sinalização sonora fornecida por um alto-falante ou por um *buzzer*, a atuação de um motor de vibração e contará com botões de liga-desliga, de ajuste e calibração de dose. A escolha dos itens anteriores será feita dependendo da disponibilidade de aquisição no mercado.

4.7 Seleção dos materiais

Para a escolha dos materiais foram adquiridos componentes de maior presença no mercado brasileiro, componentes que possuem baixo custo e facilidade de aquisição. O intuito é atender a primeira fase do produto que é a confecção de protótipos. Uma relação mais detalhada dos componentes selecionados para o desenvolvimento do produto está relacionada na Tabela 4.

4.8 Otimização do Projeto Preliminar e Testes do produto

Para a otimização do projeto preliminar decidiu-se realizar testes em campo para cada solução, completando três provas de conceito. Estavam disponíveis para testes dois sensores ultrassom diferentes e um sensor RF. São citadas apenas as características do sensor óptico, pois o mesmo não estava disponível para testes. Como houve a opção pela tecnologia de radiofrequência, é apresentado também o consumo de corrente do protótipo RF.

4.8.1 Sensores ultrassom

O sensor HC-SR04 utiliza um emissor e um receptor e tem alcance de até quatro metros e abertura de 30 graus, ilustrado na Figura 11.

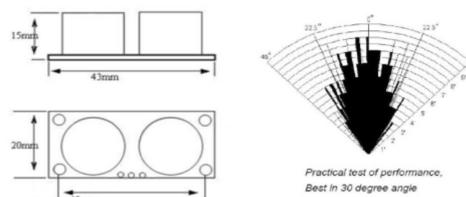


Figura 11 - HC-SR04. Cytron Technologies



Figura 12 - JNC-SR04t. DHGate.com.

O sensor JSN-SR04t, ilustrado na Figura 12, tem a vantagem de ser uma peça única pois utiliza apenas um elemento piezoelétrico para efetuar a emissão e a recepção. O transdutor é à prova d'água, tem alcance de 4,5 metros e ângulo de 50 graus. A Tabela 5 mostra os resultados dos testes em campo. Foi possível medir até 5,0 m com o HC-SR04 e até 6,0 m com o JNC-SR04t, apontando-os para um alvo de dimensões 45 cm por 55 cm na cor branca em visada direta na mesma cota horizontal.

Tabela 5 – Sensores ultrassom

Distância (ref)	HC-SR04	JNC-SR04t
1m	1,06m	1,00m
2m	2,05m	1,99m
3m	3,07m	2,98m
4m	4,06m	3,99m
5m	5,09m	5,00m
6m	22,99m*	5,98m
7m	22,99m*	10,25m*

*Fundo de escala

4.8.2 Sensor óptico

A tecnologia óptica LIDAR - *Light Detection and Ranging* (detecção e medição através da luz), Figura 13, é empregada em mapeamento de superfície (NORBERT HAALA ET AL, 2008).



Figura 13 - Lidar-Lite v3. Garmin™

4.8.3 Sensor SX-1276

Os transceptores SX1276/77/78/79 apresentam o modem de longo alcance LoRa®, que fornece comunicação de amplo espectro de ultralongo alcance e alta imunidade a interferências, minimizando o consumo de corrente. Usando a técnica de modulação LoRa® patenteada pela Semtech, pode-se atingir uma sensibilidade acima de -148 dBm usando um cristal oscilador de baixo custo. A alta sensibilidade combinada com o amplificador de potência de + 20dBm integrado, o torna ideal para qualquer aplicação que requeira alcance e robustez. LoRa® também oferece vantagens significativas tanto no bloqueio quanto na seletividade em relação às técnicas de modulação

convencionais, resolvendo um compromisso de design tradicional entre alcance, imunidade a interferências e consumo de energia (SEMTECH PRODUCTS).

Foi montado um protótipo de uma unidade transmissora com o SX-1276 (Figura 15). A Figura 14 traz imagens do *display* com a relação entre distância em metros, RSSI em dBm e dosagem em mR/h.



Figura 14 - Distância, RSSI; Dosagem. Fonte: o Autor.

4.8.4 Consumo do Transmissor

Foi colhida a forma de onda na alimentação do transmissor ilustrada na Figura 16 usando um *shunt* de corrente. Observando a Figura 16 obteve-se as leituras aproximadas de tempo de transmissão de 36ms, os tempos de *standby* de 200ms, a corrente de transmissão de 83 mA e a corrente de *standby* de 13 mA. Aplicando-se as Equações 1e 2 (Fonte: o Autor), o valor médio da corrente do transmissor foi de 23,68 mA. Deste modo, para 10 horas de funcionamento contínuo pode-se especificar a bateria do transmissor para 250 mAh.

$$Corrente_{m\u00e9dia\ TX} = \frac{(Corrente_{TX} * Tempo_{TX})}{Tempo_{total\ ciclo}} + \frac{(Corrente_{standby} * Tempo_{standby})}{Tempo_{total\ ciclo}} \quad [1]$$

$$\begin{aligned} \text{Corrente}_{\text{média TX}} &= \frac{83\text{mA} * 36\text{ms}}{236\text{ms}} \\ &+ \frac{13\text{mA} * 200\text{ms}}{236\text{ms}} = 23,68\text{mA} \end{aligned} \quad [2]$$



Figura 15 - Transceptor SX-1276. Semtech. Fonte: o Autor.

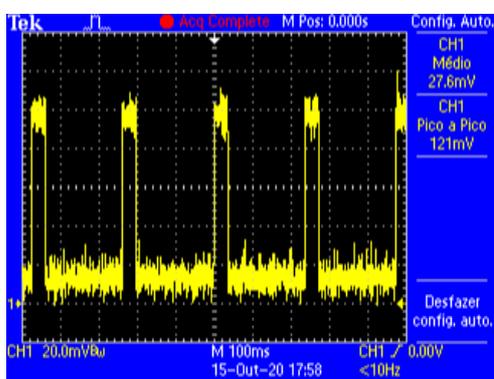


Figura 16 - Medição de corrente da unidade transmissora. Fonte: o Autor.

4.8.5 Consumo do Receptor

A autonomia da bateria para o receptor não é tão crítica quanto para o transmissor, pois o receptor não deverá ficar ligado todo o tempo, sendo usado apenas nas cenas de aproximação. O microcontrolador neste caso além de atender ao SX-1276 terá continuamente que realizar os ciclos de leitura e escrita no display. Podemos então considerar a máxima corrente no microcontrolador, que de 14 mA. O controlador HD4478 do display consome em média 1,5 mA. Ainda com relação ao display, haverá um acréscimo de 50 mA devido ao acionamento da iluminação LED. A corrente no receptor então terá uma média de 65 mA. A bateria para o receptor, considerando o mesmo funcionando a 20% do tempo de treinamento, poderia ser de 150 mAh. Caso se queira manter o equipamento ligado, deve-se providenciar uma bateria de 700 mAh.

5 PROJETO DETALHADO

Neste capítulo serão apresentados os resultados do projeto definitivo e as placas de circuito impresso para a produção das primeiras unidades. Serão também mostrados os gráficos com os resultados finais em campo, a perda no espaço livre e o gráfico do nível de dosagem versus distância.

5.1 Prototipagem

As placas de circuito impresso das unidades receptora e transmissora foram projetadas conforme podemos observar nas Figura 17 e 18. As dimensões da placa transmissora são: 1350 MIL x 3150 MIL (3,4 cm x 8,0 cm) e as dimensões da placa receptora são: 2200 MIL x 3200 MIL (5,6 cm x 8,1 cm).

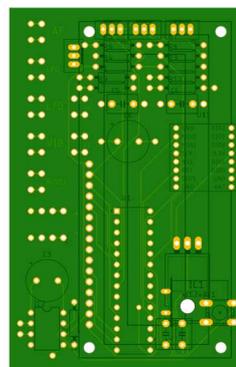


Figura 17 - PCI Unidade Receptora

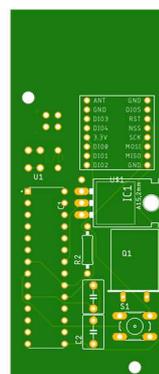


Figura 18 - PCI Unidade Transmissora.

5.2 Propagação no espaço livre

Considerando uma antena transmissora qualquer, de ganho GT, com sua irradiação máxima apontando na direção da antena receptora, tem-se a equação fundamental para o cálculo de rádio enlaces, também conhecida como fórmula de Friis para o espaço livre, conforme Equação 3. A potência pode ser calculada por (ALEXANDRE FERREIRA DOS SANTOS, 2016):

$$PR = PT * GT * GR \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad [3]$$

Onde: PR - potência do sinal recebido em watts; PT - potência transmitida em watts; GT - ganho da antena transmissora; GR - ganho da antena receptora; λ - comprimento de onda em metros; d - distância entre as antenas em metros. A Equação 3 mostra que a potência recebida cai conforme o quadrado da distância entre o transmissor e o receptor. Se PR e PT forem expressos em dBm, e os ganhos em dB, a fórmula de Friis para a perda de propagação no espaço livre pode ser dada pela Equação 4:

$$PR = PT + GT + GR + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad [4]$$

A perda de percurso (L) entre o transmissor e o receptor pode ser expressa pela Equação 5:

$$L = 32,5 + 20 \log(d) + 20 \log(f) - 10 \log(GT) - 10 \log(GR) \quad [5]$$

Onde: L – perda de propagação; d - distância (Km); f - frequência (MHz); Gt - ganho da antena TX; Gr - ganho da antena RX.

5.3 Tomada das medidas em campo.

Foi posicionado o transmissor sobre o solo (exceto no Terr-3) e anotadas as leituras diretas dos níveis RSSI fornecidas pelo receptor para cada metro de distância percorrida. Estas medidas foram plotadas diretamente no gráfico da Figura 19. Para efeito de comparação foi inserido no gráfico a curva da perda de propagação no espaço livre Log-Frequência obtida pela Equação 5 considerando o ganho de antena unitário. Foi adicionada uma constante de ganho na curva Log-Frequência para melhor comparar com os valores lidos, visto que o equipamento fornece uma leitura 60 dBm a 1,0 m de distância.

5.4 Gráfico da Perda de propagação versus distância

A Figura 19 mostra as diversas leituras realizadas em campo, considerando os diferentes ambientes usados para a medição.

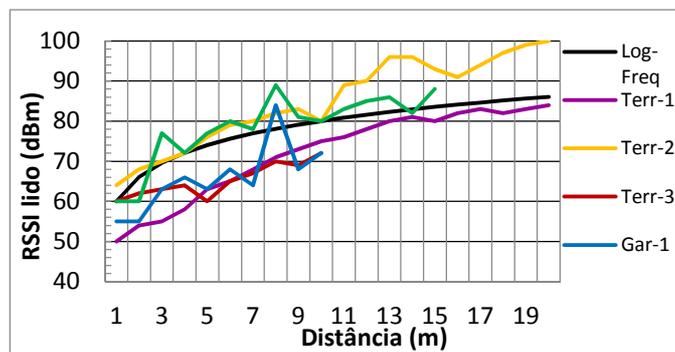


Figura 19: Perda de propagação versus distância.
Fonte: o Autor.

Terr-1: Terreno baldio com vegetação rasteira ladeado por pavimentação asfáltica. Transmissor posicionado no solo a 1,0m para o interior do terreno e medidas tomadas sobre a via.

Terr-2: Terreno baldio com vegetação rasteira ladeado por pavimentação asfáltica. Transmissor posicionado no solo a 1,0m para o interior do terreno e medidas tomadas no interior do terreno.

Terr-3: Terreno baldio com vegetação alta em média 1,0m de altura contendo arbustos. Transmissor posicionado no interior do terreno em uma pequena árvore a 1,0m de altura do solo e medidas tomadas no interior do terreno.

Gar-1: Garagem de edifício com a presença de automóvel. Transmissor posicionado no piso e medidas tomadas no interior da garagem.

Gar-2: Garagem de edifício sem a presença de automóvel. Transmissor posicionado no piso e medidas tomadas no interior da garagem.

As fotos dos Ambientes usados nas leituras estão nas Figuras 20 e 21.



Figura 20 - Terr-1 e Terr-2. Fonte: o Autor.



Figura 21 - Terr-3. Fonte: o Autor.

5.5 Nível de dosagem radioativa equivalente

Para o cálculo do nível de dosagem radioativa equivalente chegou-se às Equações 6 e 7, (Fonte: o Autor) que dão uma boa aproximação para esta aplicação, considerando os vários problemas que se tem ao relacionar RSSI com a distância (C. FENG, W. AU, S. VALAEE, AND Z. TAN). As dosagens equivalentes foram calculadas pela Equação 7, proporcionais ao inverso do quadrado das distâncias equivalentes, (N. W. LIMA, G. HOFF) e foram plotadas na Figura 22. As distâncias equivalentes foram calculadas considerando a perda de propagação no espaço livre, usando a Equação 6 (obtida com base na Equação 5), pelo o logaritmo inverso do nível de potência RSSI medida em campo e considerando os ganhos de antena unitários. Foram feitos alguns ajustes de escala, com o objetivo de construir uma escala de dosagem compatível com a escala de Roentgen, conforme a orientação da área de radiologia.

$$d = 10^{\left(\frac{-RSSI - 60,75 - 20\log(915)}{20}\right)} * 1000 \quad [6]$$

Onde: RSSI: Potência lida (dBm em valores negativos); 60,75: Ajuste de escala.

$$Dose = \frac{102}{d^2} \quad [7]$$

Onde: 102: – Ajuste de escala.

Como parâmetro inicial adotou-se que os valores de dosagem às distâncias menores ou iguais a 1,0 m seriam de 100 mR/h. Pode-se notar que a dosagem que mais convergiu em distância no gráfico da Figura 22 foi a 10 metros, com um valor em torno de 1,0 mR/h.

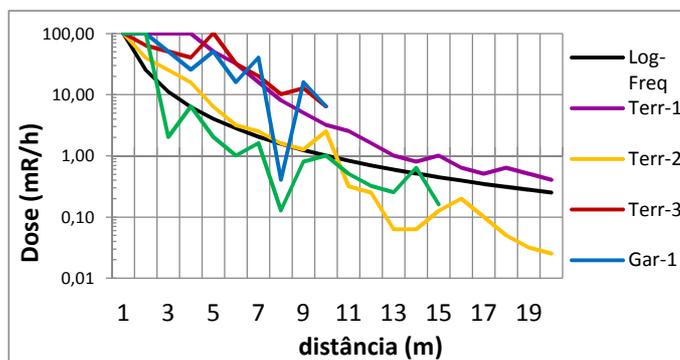


Figura 22 - Dosagem versus distância. Fonte: o Autor.

6 CONCLUSÕES

A concepção de medir a distâncias e convertê-las em níveis equivalentes de radiação se mostrou válida. A sequência do trabalho levou à varias conclusões a respeito de qual seria o melhor sensor para embarcar no produto Para isso foram construídas algumas provas de conceito e realizadas medidas em campo. Isto foi necessário pela falta de um equipamento similar acessível no mercado nacional, por não se conhecer o comportamento de algo similar. A metodologia de Pahl & Beitz (C. R. ZARDO, A. O. BARBISAN, N. BERTICELLI) forneceu a linha de desenvolvimento. As matrizes de avaliação seguem pela somatória das notas e a que obtiver maior total (CARPES JR., WIDOMAR, 2014). À partir das provas de conceito concluiu-se que a opção do sensor RF se mostrou mais adequada e por isto foi dada uma ênfase maior para esta opção.

6.1 Considerações sobre os sensores utilizados

Segundo (SUVANKAR BARAI ET AL, 2017), “...existem muitas técnicas para determinar a distância entre dois nós, como por exemplo, *Time of Arrival (TOA)*(tempo de chegada), *Time difference of Arrival (TDOA)* (diferença entre tempos de chegada) ou *Received Signal Strength (RSS)* (indicador da potência do sinal recebido)”. As tecnologias Ultrassom e Óptica se baseiam no tempo de voo de um sinal refletido. Os sensores ultrassom são ótimos instrumentos para montagem fixa e distâncias curtas. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que os sensores ultrassônicos apresentados possuem uma boa precisão, mas não garantem retorno de medidas para distâncias maiores do que 4,0 m ou 4,5 m. Deve-se também considerar a instabilidade na operação devido ao efeito de perspectiva óptica. O sensor Lidar estático por sua vez utiliza um único feixe de luz concentrada, que além de também sofrer o efeito de perspectiva óptica, deve possuir um anteparo reflexivo perpendicular. A tecnologia RF necessita

de um transmissor e de um receptor, mas a detecção da fonte simulada é imediata, permite uma maior liberdade para o operador e tem um espectro maior de aplicação em treinamentos.

6.2 Considerações sobre a tecnologia de radiofrequência

O RSSI é uma indicação do nível do sinal recebido e cada fabricante compõe sua tabela de RSSI. O padrão IEEE 802.11 especifica que o RSSI pode estar dentro de uma escala de 0 até 255 e que cada fabricante pode definir seu próprio “RSSI_Máximo”. A Cisco, por exemplo, usa a escala de 0-100, enquanto Atheros usa de 0 a 60. Depende totalmente do fabricante, por isso que o RSSI é um índice relativo, mas é correto pensar que quanto maior o valor do RSSI, melhor é o sinal (METAGEEK). Então o RSSI não é um valor de potência absoluta, haja vista, por exemplo, que conforme o fabricante Semtech o módulo SX-1276 possui saída de +20dBm (SEMTECH PRODUCTS) e no entanto seu maior nível RSSI medido no protótipo é de 0dBm.

O gráfico da Figura 19 indica que o comportamento da distribuição de potência por distância varia conforme o ambiente de teste. Esta variação deve ser levada em consideração, mas isto não significa que a indicação RSSI não possa ser usada. Apenas não é a mais adequada. De acordo com (K. KAEMARUNGS, P. KRISHNAMURTHY), “...muitos pesquisadores ignoram as propriedades dos sinais de rádio”.

Deve-se ressaltar que o equipamento está usando frequência na faixa de sub-gigahertz, com cortes de frequência, espalhamento espectral, sequência de espalhamento (sequência direta ou salto de frequência), controle de ganho compoendo a tabela de RSSI e antenas com características próprias. O espalhamento espectral está presente na tecnologia LoRa®, na tecnologia WiFi® e na tecnologia Bluetooth® ou BLE®. Com várias frequências envolvidas, tem-se maior quantidade de reflexões e refrações que terminam por afetar o sinal na antena receptora. Com tamanha engenharia de modulação e controle de potência, não seria de bom agouro supor que se possa mimetizar perfeitamente o comportamento de uma radiação ionizante natural, a qual não possui modulação e está em uma frequência muitas vezes maior, na faixa do Exa-hertz.

6.3 Projetos futuros

Se considerarmos a direcionalidade e/ou localização da fonte simulada importantes para o treinamento, podemos lançar mão de antenas

direcionais, mas para que tenhamos uma antena de dimensões compatíveis com um equipamento portátil, necessitaríamos rever a frequência de trabalho. Na frequência que estamos operando, somente para ilustrar, uma antena Yagi direcional operando em 915MHz teria de ter a dimensão longitudinal de 1400mm. Uma antena helicoidal pode também ser direcional se o seu diâmetro for na ordem de λ/π (comprimento de onda dividido por PI) e para a frequência de 915 MHz o diâmetro teria que ser em torno de 100mm Figuras 23 e 24).



Figura 23 - Antena Yagi.
Fonte: o Autor.

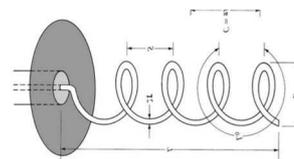


Figura 24 - Antena Helicoidal. Fonte: o Autor.

Esta linha de produtos simuladores de detectores de radiação é um elemento novo no mercado nacional, bem como a sua utilização em treinamentos de acidente radiológicos. O resultado do comportamento desses primeiros protótipos vai fornecer o caminho para a pesquisa de uma tecnologia que poderá ser empregada em escala de produção. Como continuidade deste trabalho sugere-se que se desenvolva um simulador de detecção a elementos radioativos com tecnologia de radiofrequência proprietária e em seguida se procure obter um depósito de patente.

7 REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE FERREIRA DOS SANTOS. **Caracterização de Cobertura de Sinais em Ambientes Internos com mais de um Pavimento na Faixa de 700 MHz.** João Pessoa, BRASIL, 2016. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/299842899.pdf>>. Acesso em setembro 2020.
- ARGON. **The symptoms of radiation exposure.** Luton, UK, 2014. Disponível em:

<<https://www.argonelectronics.com/blog/the-symptoms-of-radiation-exposure>>. Acesso em abril 2020.

C. A LESTER, M.A CHUI. **Using Link Analysis to Explore the Impact of the Physical Environment on Pharmacist Tasks**. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4826624/>>. Acesso em novembro 2020.

C. FENG, W. AU, S. VALAEE, AND Z. TAN. **Compressive sensing based positioning using rss of wlan access points**. Infocom, 2010 Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5461981>>. Acesso em novembro 2020.

C. R. ZARDO, A. O. BARBISAN, N. BERTICELLI, **Como Desenvolver Rapidamente Produtos**. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/174>>. Acesso em novembro 2020.

CARPES JR., WIDOMAR. **Introdução ao Projeto de Produtos**. 1. ed., BRASIL, Bookman, 2014. IFSC, **Campus Florianópolis faz simulação de acidente radiológico**. IFSC, 2017. Disponível em: <<https://linkdigital.ifsc.edu.br/2017/12/08/ifscvtv-campus-florianopolis-faz-simulacao-de-acidente-radiologico/>>. Acesso em agosto 2020.

IONACTIVE. **Monitoring for Ionising Radiation**. Disponível em: <<https://www.ionactive.co.uk/resource-hub/technical-guidance/radiation-protection-rules-of-thumb/monitoring-for-ionising-radiation>>. acesso em novembro 2020.

IOWA STATE UNIVERSITY. **Sealed Sources / Equipment Containing Sources**. Ames, US. Disponível em: <<https://www.ehs.iastate.edu/research/radiation/sealed-sources-and-equipment>>. Acesso em agosto 2020.

JNMT. **Journal of Nuclear Medicine Technology**. Reston, US, 2004. Disponível em: <<http://tech.snmjournals.org/content/32/1/22.short>>. Acesso em agosto 2020.

K. KAEMARUNGS, P. KRISHNAMURTHY. **Properties of indoor received signal strength for wlan location fingerprinting**. Mobiquitous, 2004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1331706>>. Acesso em novembro 2020.

METAGEEK, **Understanding RSSI**. Disponível em: <<https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html>>. Acesso em 27 set. 2020.

N. W. LIMA, G. HOFF, **Aplicabilidade da Lei do Inverso do Quadrado da Distância em Radiologia Convencional e Mamografia**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277943746_Aplicabilidade_da_Lei_do_Inverso_do_Quadrado_da_Distancia_em_radiologia_convencional_e_mamografia>. Acesso em agosto 2020.

NORBERT HAALA, MICHAEL PETERA, JENS KREMBERG, GRAHAM HUNTER, **Mobile Lidar Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test**. Stuttgart, DE, 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.184.3711&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em agosto 2020.

RADIOPAEDIA, **Sievert SI Unit**. Disponível em: <<https://radiopaedia.org/articles/sievert-si-unit>> - **Rem Unit**. Disponível em: <<https://radiopaedia.org/articles/rem-unit>>. Acesso em novembro 2020.

RAKUTEN KOBO, **Louis Harold Gray**, Disponível em: <<https://www.kobo.com/us/en/ebook/louis-harold-gray>>. Acesso em novembro 2020.

REVISTA DE CIÊNCIA ELEMENTAR, **Contador de Geiger-Müller**. Oeiras, PORTUGAL, 2014. Disponível em: <https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_2_num_4_113_art_contadorGeigerMuller.pdf>. Acesso em janeiro 2020.

SEMTECH PRODUCTS, **SX1276 - 137 MHz to 1020 MHz Long Range Low Power Transceiver**. Disponível em: <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1276>>. Acesso em agosto 2020.

SUVANKAR BARAI, DEBAJYOTI BISWAS, BUDDHADEB SAU, **Estimate Distance Measurement using NodeMCU ESP8266 based on RSSI Technique**. Kolkata, INDIA, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322877438_Estimate_distance_measurement_using_NodeMCU_ESP8266_based_on_RSSI_technique>. Acesso em agosto 2020.

THE NOBEL PRIZE, **Wilhelm Conrad Röntgen**. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/roentgen/biographical/>>. Acesso em outubro 2020.