



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 sensoramento 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 solutions are considered (ultrasound, optics and radiofrequency). 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.

¹ Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, IFSC/Florianópolis <clovisjp@icloud.com>.

² Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), IFSC/Florianópolis <Fernando.miranda@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 núcleo-elétricas. 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 (PIKE, 2014). Treinamentos realizados com o uso de fontes radioativas seladas (SCHLEIPMAN; GERBAUDO; CASTRONOVO, 2004) e um detector de Geiger-Muller

(RIBEIRO, 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, 2020).

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um simulador de presença de radiação com um comportamento idêntico aos detectores reais, possibilitando aos socorristas concluírem um treinamento de acidente radiológico sem estar expostos às radiações. No desenvolvimento do produto buscou-se seguir a metodologia de projeto de Pahl & Beitz (ZARDO; BARBISAN; BERTICELLI, 2016). 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 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 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 ao final do artigo.

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. 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, 2017).



2.2 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 Training Systems Ltd (STS) foi o único fabricante que forneceu cotação por e-mail. 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 £4.495,00 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 mostrada na Figura 2 e suas características na primeira linha da Tabela 1.

Figura 2 – Survey Safe Simulated Meter, da STS Ltd.**Tabela 1 – Simulador-características.**

	STS Survey Safe	Argon RadEye	Argon FH40
Tecnologia	STS-RF <i>detection</i>	Radiofrequência	Radiofrequência
Display	65 x 35 mm <i>backlight</i> LCD	LCD	LCD
Botões	4 (membrana)	4	4 (comum)
Uso de Luvas	Sim	Sim	-
Bateria¹	COTS / 10 horas	COTS / 80 horas	COTS
Alarme	Áudio + LED	Áudio + Vibração	Áudio
Escala²	nSv/h mR/h	Sv/h Rem CPS	μSv/h
Alcance	20 m	60 m	30 m

2.3 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 (1.000 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.

2.3.1 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.

2.3.2 Requisitos Não Funcionais

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

¹ **COTS:** *Commercial Off-The-Shelf* (produto de prateleira), refere-se à bateria não recarregável.

² As unidades de medidas são:

- **mR/h:** miliroentgen por hora, em homenagem a Wilhelm Roentgen;
- **μSv/h:** microsievert por hora, em homenagem a Rolf Maximilian Sievert;
- **Rem:** *roentgen equivalent man*, unidade no sistema CGS, foi substituída por Sievert (Sv);
- **CPS:** *counts per second*, contagem por segundo, usada na detecção de vazamentos de radiação ionizante;
- **mGy/h:** miligray por hora, em homenagem a Louis Harold Gray.

- RNF1: Utilizar um sensor de aproximação para leituras a distâncias de 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.
- RNF6: O *software* embarcado será usado para converter as leituras de distância em níveis de dosagens radioativas equivalentes.
- RNF7: 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 ($1 \text{ Gy} = 114 \text{ R}$) 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 8 cm 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 somatória das notas, e a que obtiver maior total (CARPES JR., 2014). A Tabela 2 apresenta a Matriz Morfológica das funcionalidades do produto e a Matriz de Avaliação dos sensores é apresentada na Tabela 3.

Tabela 2 – Matriz Morfológica das unidades do produto.

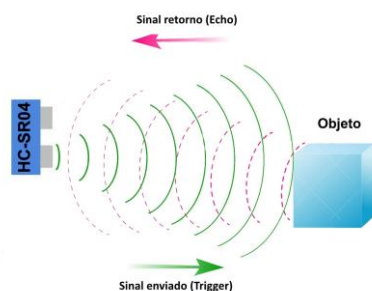
Função	Subfunção	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Detectar proximidade		Ultrassom	Óptica	Radiofrequência
Receber e tratar sinais do sensor e alimentar as saídas para o operador	Ler o Sensor Converter as Unidades Alimentar as Saídas		Microcontrolador	
Saídas para o operador		Visual	Sonora	Mecânica

Tabela 3 – Matriz de Avaliação dos sensores.

	Deteção	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

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.

Figura 3 – Reflexão ultrassom.



Pequenas mudanças de ângulo podem forçar o operador a desviar a atenção da leitura do equipamento para tentar localizar o alvo. A Figura 4 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 5 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.

Figura 4 – Reflexão óptica.
Reflected Waves

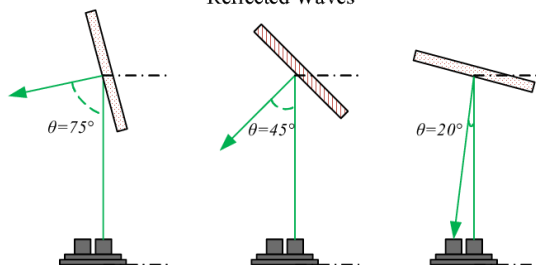
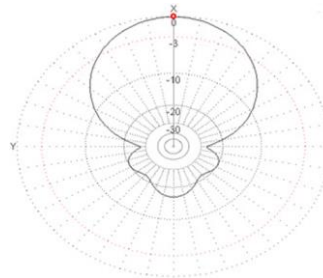


Fig. 5. Laser reflection trajectory at an angle of 75°, 45° and 20°

Figura 5 – Distribuição de potência de uma antena RF.



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 para o projeto (1 a 5 pontos) e multiplicando pelo peso (1 a 6) para cada solução.

- Relevância:
 - 1: pouco relevante, até
 - 5: muito relevante.
- Peso (facilidade de detectar elemento):
 - 6: com facilidade;
 - 3: com relativa facilidade;
 - 1: com dificuldade.
- Maior alcance:
 - 6: até 20 m;
 - 3: até 10 m;
 - 1: até 5 m.
- Precisão na medida com relação à medida real:
 - 6: precisa;
 - 3: aproximada;
 - 1: imprecisa.

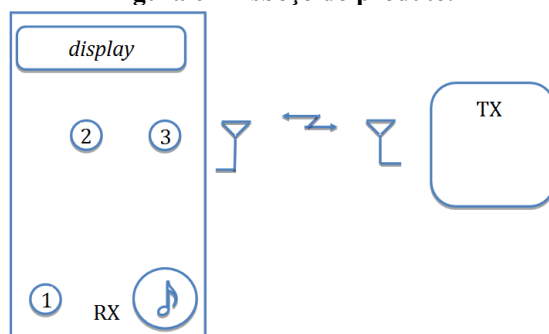
4 PROJETO PRELIMINAR

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 através de uma variável disponibilizada pelo módulo receptor chamada RSSI (*Received Signal Strength Indicator* – 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

O esboço do produto sugere como o produto poderá se parecer. Este conceito prevê a utilização de duas unidades: uma unidade emissora (*case* de tamanho menor), e outra 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 6.

Figura 6 – Esboço do produto.



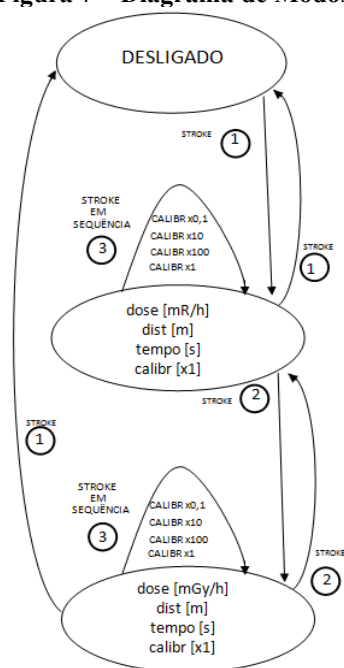
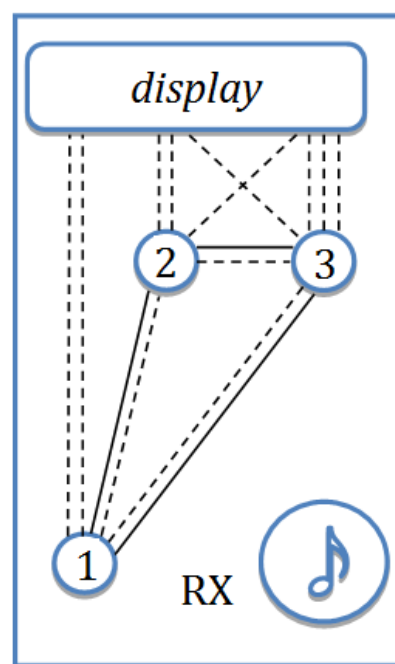
4.2 Projeto da interface com o usuário

O projeto da interface com o usuário é aplicado somente na unidade que estará nas mãos do operador, ou seja, a unidade receptora. 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 7) e da Análise de *Link*, (*Link Analysis* – Análise dos Elos ou Ligações) (LESTER; CHUI, 2016) na Figura 8. Como resultado da análise dos *links* (movimentos humanos) chegou-se à conclusão de que somente três botões seriam necessários para se operar o equipamento:

- Botão 1: Liga-desliga;
- Botão 2: Seletor de unidades;
- Botão 3: Calibração de dose.

Figura 7 – Diagrama de Modos.

Figura 8 – Análise de *link*.

O Diagrama de Modos se refere aos diferentes modos tanto da interface quanto do estado interno da máquina. O modo padrão de uso possui as características: dose (mR/h), distância (m), tempo (s) 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:

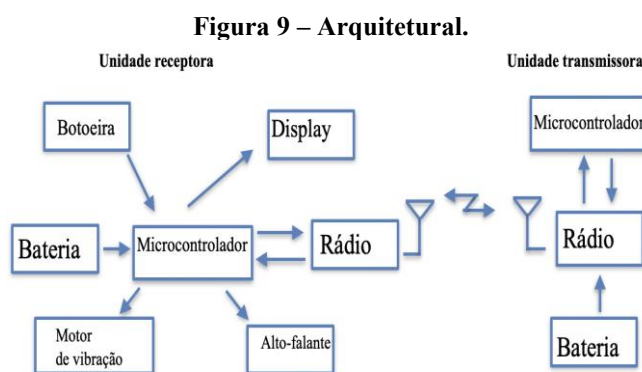
- Pulsar (pressionar e soltar – *stroke*) o botão 1 para ligar;

- verificar o *display*.
- Pulsar o botão 2 para selecionar a unidade;
- verificar o *display*.
- Pulsar o botão 3 para calibrar o nível de dose;
- verificar o *display*;
- operar o equipamento.
- Pulsar o botão 1 para desligar;
- verificar o *display*.

Variações no modo de uso poderão acontecer, visto que há duas unidades de dosagem para conversão e três modos de ajuste para calibração.

4.3 Arquitetura do produto

O projeto arquitetural pode servir de base para o projeto detalhado; ele é descrito no diagrama de blocos da Figura 9.



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. Os itens levados em conta foram:

- 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 custo, tempo de fornecimento, garantia e disponibilidade no mercado a curto prazo.

Para a aplicação, poderia ser utilizado qualquer *transciever* (módulo transmissor-receptor) que fornecesse a leitura digital de RSSI, e operasse tanto na faixa de 2,4 GHz, quanto na faixa sub-GHz. Alguns exemplos são o CC2500 2,4 GHz (Texas Instruments), o SX-1276 915 MHz (Semtech Corporation) ou o BL653 2,4 GHz (Laird Connectivity).

4.5 Microcontrolador

Para o microcontrolador, consideraram-se as seguintes características:

- economia de energia;
- atendimento aos requisitos: os requisitos são poucos, visto que não haverá transmissão de dados em alta velocidade, poucas interfaces seriais ou modulação por largura de pulso, nem muitas portas de entrada e saída;
- Facilidade de aquisição: este item considera custo, tempo de fornecimento, garantia e disponibilidade no mercado a curto prazo.

Para a aplicação objeto deste projeto, qualquer um destes microcontroladores pode ser usado: STM32 (ST Microelectronics), ESP32 (Espressif Systems), Atmega328 (Microchip Technologies), ESP8266 (Espressif Systems) e MSP430 (Texas Instruments).

4.6 Saídas para o operador

O receptor contará com as seguintes saídas para operador:

- uma indicação visual através de *display* LCD alfanumérico 16x2 ou *display* OLED;
- uma sinalização sonora fornecida por um alto-falante ou por um *buzzer* piezelétrico;
- um motor de vibração;
- botões (liga-desliga, seleção de unidade; 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.

Tabela 4 – Seleção dos materiais.

	Unidade	Quantidade	Descrição	Apresentação
Sensor	SX-1276	2	Transceptor LoRa 915 MHz	CI embarcado em módulo com antena
Microcontrolador	Atmega328P-PU	2	Microcontrolador AVR 8 bits 20 MHz	CI com encapsulamento PDIP-28
	<i>Display</i>	1	<i>Display</i> LCD 16x2 com interface I ² C	CI controlador HD44780 embarcado em módulo com <i>display</i>
Saídas	Alto-falante	1	Mini alto-falante 8 Ω / 1 W	Unidade isolada (4,0 cm x 2,0 cm x 0,7 cm)
	Motor de vibração	1	Mini motor de <i>Vibracall</i>	Modelo 1027 9.000 RPM (1,0 cm x 0,3 cm)

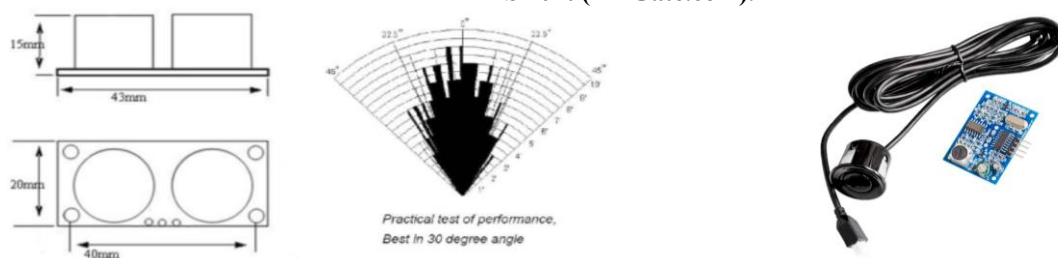
4.8 Otimização do Projeto Preliminar e Testes do produto

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 ele 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 de ultrassom

O sensor HC-SR04 utiliza um emissor e um receptor e tem alcance de até 4,0 metros e abertura de 30 graus, ilustrado na Figura 10(a). Entretanto, o sensor JSN-SR04t, ilustrado na Figura 10(b), tem a vantagem de ser composto por uma única peça, pois utiliza apenas um elemento piezoelétrico para efetuar tanto a emissão, quanto a recepção. O JSN-SR04t é resistente à água, tem alcance de 4,5 metros e ângulo de 50 graus.

Figura 10 – Sensores de distância ultrassônicos: (a) HC-SR04 (Cytron Technologies) e (b) JNC-SR04t (DHGate.com).



A Tabela 5 mostra os resultados dos testes em campo. Foi possível medir até 5,0 metros com o HC-SR04 e até 6,0 m com o JNC-SR04t, apontando-os para um alvo de dimensões 45 x 55 cm na cor branca em visada direta na mesma cota horizontal.

Tabela 5 – Sensores ultrassom.

Distância de Referência [m]	Distância lida no HC-SR04 [m]	Distância lida no JNC-SR04t [m]
1,00	1,06	1,00
2,00	2,05	1,99
3,00	3,07	2,98
4,00	4,06	3,99
5,00	5,09	5,00
6,00	22,9 (F.S.)	5,98
7,00	22,9 (F.S.)	10,25 (F.S.)

F.S.: Full Scale (Fundo de Escala).

4.8.2 Sensor óptico

A tecnologia óptica LIDAR (*Light Detection and Ranging* – Detecção e Medição Através da Luz), Figura 11, é empregada em mapeamento de superfície (HAALA *et al.*, 2008).

Figura 11 – Lidar-Lite v3 (Garmin).

4.8.3 Sensor SX-1276

Os *transceptores* SX1276, SX1277, SX1278 e SX1279 apresentam o *modem* de longo alcance LoRa, que fornece comunicação de amplo espectro, de ultralongo alcance e com alta imunidade a interferências, minimizando o consumo de corrente. Usando a técnica de modulação LoRa patenteada pela Semtech Corporation, pode-se atingir uma sensibilidade de até -148 dBm usando um cristal oscilador de baixo custo. A alta sensibilidade, combinada com o amplificador de potência de 20 dBm 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 CORPORATION, 2020).

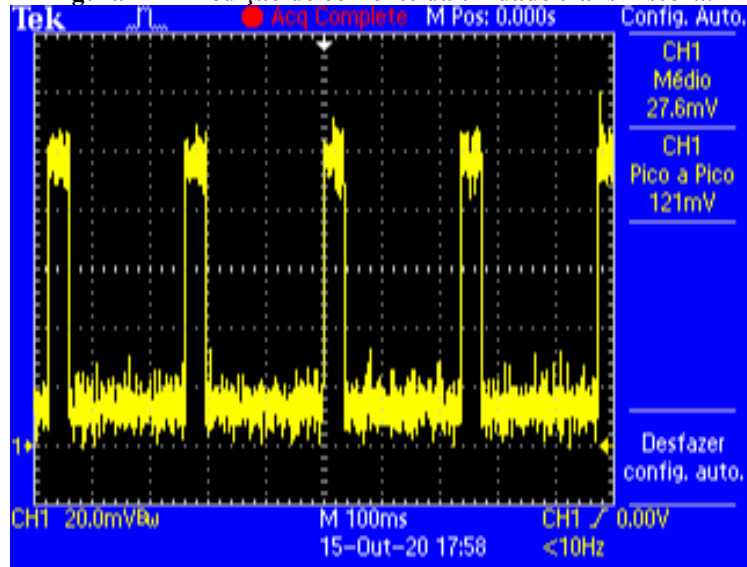
Foi montado um protótipo de uma unidade transmissora com o *transceptor* SX-1276 (Figura 12). As imagens do *display* com a relação entre distância (m), RSSI (dBm) e dosagem (mR/h) são apresentadas na Figura 13.

Figura 12 – Transceptor SX-1276. Semtech.**Figura 13 – Distância, RSSI.**

4.8.4 Consumo do Transmissor

Foi adquirida a forma de onda da corrente de alimentação do transmissor usando um resistor *shunt* (Figura 14).

Figura 14 – Medição de corrente da unidade transmissora.



Através da Figura 14, obteve-se as leituras aproximadas de tempo de transmissão (36 ms), tempo de *standby* (200 ms), corrente de transmissão (83 mA) e corrente de *standby* (13 mA). Aplicando-se a Equação 1, 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 mA·h.

$$i_{TX(med)} = \frac{i_{TX} \cdot t_{TX} + i_{standby} \cdot t_{standby}}{t_{total}} \quad (1)$$

$$i_{TX(med)} = \frac{(83 \cdot 10^{-3}) \cdot (36 \cdot 10^{-3}) + (13 \cdot 10^{-3}) \cdot (200 \cdot 10^{-3})}{236 \cdot 10^{-3}}$$

$$i_{TX(med)} = \frac{83 \cdot 36 + 13 \cdot 200}{236}$$

$$i_{TX(med)} = 23,68 \text{ mA}$$

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 que realizar continuamente os ciclos de leitura e escrita no *display*. Pode-se, então, considerar o consumo como sendo a máxima corrente no microcontrolador (14 mA). O controlador HD44780 do *display* consome, em média, 1,5 mA, com acréscimo de 50 mA no consumo devido ao acionamento da iluminação de fundo. A corrente no receptor, então, será de aproximadamente 65 mA, em média. A bateria para o receptor, considerando-o funcionando a 20% do tempo de treinamento, poderia possuir pelo menos 150 mA·h de carga. Caso seja necessário manter o equipamento ligado o tempo todo, deve-se providenciar uma bateria de 700 mA·h.

5 PROJETO DETALHADO

Nesta sessão, 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 em campo, a perda no espaço livre e o gráfico do nível de dosagem *versus* distância.

5.1 Prototipagem

Os *layouts* das placas de circuito impresso das unidades receptora e transmissora são ilustrados na Figura 15. A placa da unidade receptora (Figura 15(a)) possui 5,6 x 8,1 cm (2.200 x 3.200 mil) e a placa da unidade transmissora (Figura 15(b)) possui 3,4 x 8,0 cm (1.350 x 3.150 mil).

Figura 15 – Layout da placa de circuito impresso: (a) da unidade receptora e (b) da unidade transmissora.



5.2 Propagação no Espaço Livre

Considerando uma antena transmissora qualquer, de ganho G_T , com sua irradiação máxima apontando na direção da antena receptora, tem-se a equação fundamental para o cálculo de rádio enlaces, também conhecida como equação de Friis para o espaço livre (SANTOS, 2016), apresentada na Equação 2,

$$P_R = P_t \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (2)$$

, onde:

- P_R é a potência do sinal recebido em watts;
- P_T é a potência transmitida em watts;
- G_T é o ganho da antena transmissora;
- G_R é o ganho da antena receptora;
- λ é o comprimento de onda em metros;
- d é a distância entre as antenas em metros.

A Equação 2 mostra que a potência recebida cai conforme o quadrado da distância entre o transmissor e o receptor. Se P_R e P_T forem expressos em dBm, e os ganhos em dB, a equação de Friis para a perda de propagação no espaço livre pode ser dada pela Equação 3:

$$P_R = P_t + G_T + G_R + 20 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right) \quad (3)$$

A perda de percurso (L) entre o transmissor e o receptor pode ser expressa pela Equação 4:

$$L = 32,5 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f) - 10 \cdot \log(G_T) - 10 \cdot \log(G_R) \quad (4)$$

, onde:

- L é a potência do sinal recebido em watts;
- d é a distância em quilômetros;
- f é a frequência em mega-hertz;
- G_T é o ganho da antena transmissora;
- G_R é o ganho da antena receptora.

5.3 Tomada das Medidas em Campo

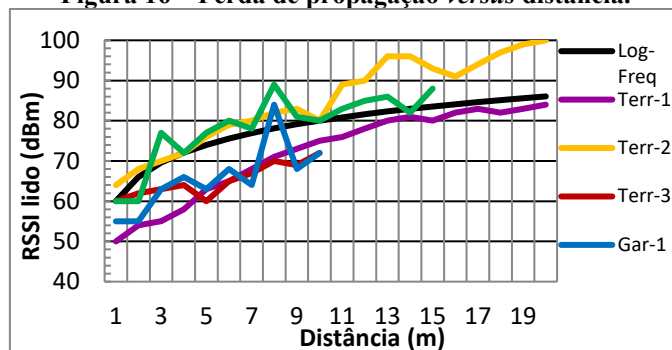
Foram realizados ensaios em cinco locais distintos:

- Terr-1: Terreno baldio com vegetação rasteira ladeado por pavimentação asfáltica; o transmissor foi posicionado no solo a 1,0 m para o interior do terreno e as medidas foram tomadas sobre a via.
- Terr-2: Terreno baldio com vegetação rasteira ladeado por pavimentação asfáltica; o transmissor foi posicionado no solo a 1,0 m para o interior do terreno e as medidas foram tomadas no interior do terreno.
- Terr-3: Terreno baldio com vegetação alta (em média, 1,0 m de altura) contendo arbustos; o transmissor foi posicionado no interior do terreno em uma pequena árvore, a 1,0 m de altura do solo e as medidas foram tomadas no interior do terreno.
- Gar-1: Garagem de edifício com a presença de automóvel; o transmissor foi posicionado no piso e as medidas foram tomadas no interior da garagem.
- Gar-2: Garagem de edifício sem a presença de automóvel; o transmissor foi posicionado no piso e as medidas foram tomadas no interior da garagem.

Após o posicionamento do transmissor no local de teste, foram anotadas as leituras diretas dos níveis RSSI fornecidas pelo receptor para cada metro de distância percorrida; plotadas diretamente no gráfico da

Figura 16. Para efeito de comparação, a curva da perda de propagação no espaço livre Log-Frequência, obtida pela Equação 4, foi inserida no gráfico considerando o ganho de antena unitário. Também foi adicionada uma constante de ganho na curva Log-Frequência para melhor comparar com os valores lidos, visto que o equipamento fornece leitura de 60 dBm a 1,0 m de distância.

Figura 16 – Perda de propagação versus distância.



5.4 Nível de Dosagem Radioativa Equivalente

Para o cálculo do nível de dosagem radioativa equivalente, chegou-se às Equações 5 e 6, que dão uma boa aproximação para esta aplicação, considerando os vários problemas que se tem ao relacionar RSSI com a distância (FENG *et al.* 2010).

$$d = 10^{\frac{-\text{RSSI} - 60,75 - 20 \cdot \log(915)}{20}} \cdot 1.000 \quad (5)$$

, onde:

- RSSI é a potência lida em dBm;
- 60,75 é um ajuste de escala.

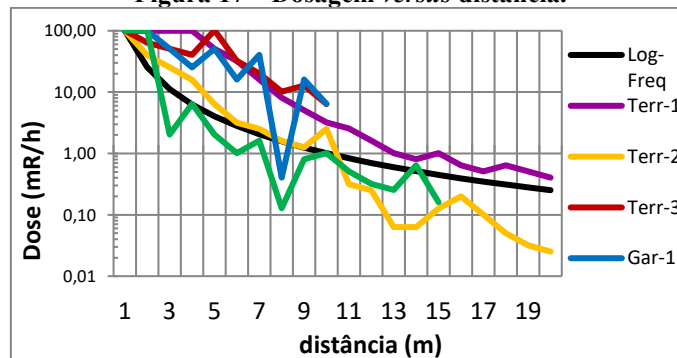
$$\text{Dose} = \frac{102}{d^2} \quad (6)$$

, onde:

- 102 é um ajuste de escala.

As dosagens equivalentes foram calculadas pela Equação 6, proporcionais ao inverso do quadrado das distâncias equivalentes, (LIMA; HOFF, 2015) e foram plotadas na Figura 17. As distâncias equivalentes foram calculadas considerando a perda de propagação no espaço livre, usando a Equação 5 (obtida com base na Equação 4), pelo 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 dos profissionais especializados da área de radiologia consultados.

Figura 17 – Dosagem versus distância.



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 17 foi a 10 metros, com um valor em torno de 1,0 mR/h.

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 várias 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, e por não se conhecer o comportamento de algo similar. A metodologia de Pahl & Beitz forneceu a linha de desenvolvimento. As matrizes de avaliação seguem pela somatória das notas e a que obtiver maior total. A 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 Barai, Biswas e Sau (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 Indicator* (RSSI – Indicador da Potência do Sinal Recebido)”. As tecnologias de ultrassom e óptica baseiam-se no tempo de voo de um sinal refletido. Sensores de ultrassom são instrumentos adequados para montagem fixa e medições em curtas distâncias. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que os sensores ultrassônicos apresentam boa precisão, mas não garantem retorno confiável de medidas para distâncias superiores a 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, requer um anteparo reflexivo perpendicular. A tecnologia RF necessita de um transmissor e de um receptor; no entanto, a detecção da fonte simulada é imediata, permite maior liberdade ao operador e apresenta um espectro mais amplo 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 define sua própria escala. O padrão IEEE 802.11 especifica que o RSSI pode variar dentro de uma escala de 0 a 255, permitindo que cada fabricante estabeleça seu próprio valor de “RSSI máximo”. A Cisco, por exemplo, utiliza uma escala de 0 a 100, enquanto a Atheros adota uma escala de 0 a 60. Embora o RSSI seja um índice relativo, dependente do fabricante, é correto afirmar que, quanto maior seu valor, melhor será a qualidade do sinal (METAGEEK, 2020).

Entretanto, o RSSI não representa um valor de potência absoluta. Por exemplo, segundo a Semtech Systems (2020), o módulo SX1276 possui saída de até 20 dBm; no entanto, o maior nível de RSSI medido no protótipo foi de 0 dBm.

O gráfico da Figura 16 indica que o comportamento da distribuição de potência em função da distância varia conforme o ambiente de teste. Essa variação deve ser considerada, mas não implica que a indicação de RSSI não possa ser utilizada – apenas que ela não é a mais adequada em todos os casos. De acordo com Kaemarungsi e Krishnamurthy (2004), “[...] muitos pesquisadores ignoram as propriedades dos sinais de rádio”.

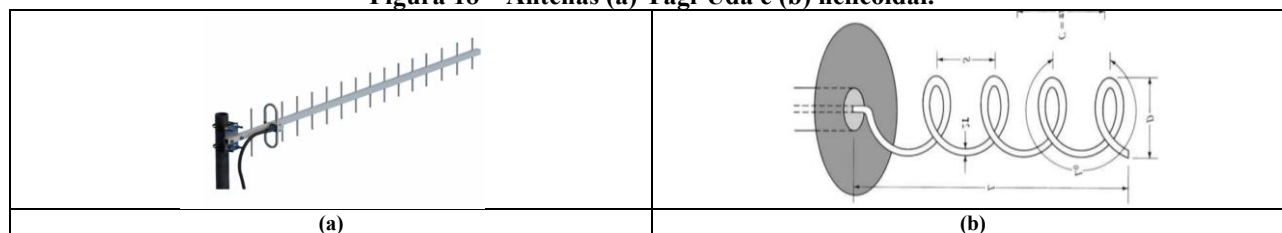
Deve-se ressaltar que o equipamento opera em frequências na faixa de sub-gigahertz, envolvendo cortes de frequência, espalhamento espectral, sequências de espalhamento (direto ou por salto de frequência), controle de ganho na composição da tabela de RSSI e antenas com características próprias. O espalhamento espectral está presente em tecnologias como LoRa, Wi-Fi e Bluetooth *Low Energy*.

Com múltiplas frequências envolvidas, há maior incidência de reflexões e refrações, o que afeta o sinal na antena receptora. Diante dessa complexidade de modulação e controle de potência, não é razoável supor que se possa mimetizar perfeitamente o comportamento de uma radiação ionizante natural, a qual não possui modulação e opera em frequências muito mais elevadas, na faixa do exahertz.

6.3 Projetos futuros

Caso se considere a direcionalidade e/ou a localização da fonte simulada como fatores importantes para o treinamento, pode-se recorrer ao uso de antenas direcionais. No entanto, para que essas antenas apresentem dimensões compatíveis com um equipamento portátil, seria necessário rever a frequência de operação. Na frequência atualmente utilizada, a título de ilustração, uma antena Yagi-Uda (Figura 18(a)), operando em 915 MHz, teria um comprimento longitudinal da ordem de 1,4 m. Uma antena helicoidal (Figura 18(b)) também pode apresentar características direcionais, desde que seu diâmetro seja da ordem de λ/π ; para a frequência de 915 MHz, esse diâmetro seria aproximadamente 1,0 m.

Figura 18 – Antenas (a) Yagi-Uda e (b) helicoidal.



Essa linha de produtos – simuladores de detectores de radiação – constitui um elemento relativamente novo no mercado nacional, assim como sua aplicação em treinamentos de acidentes radiológicos. O desempenho desses primeiros protótipos tende a orientar futuras pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias passíveis de aplicação em escala produtiva.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o desenvolvimento de um simulador de detecção de elementos radioativos com tecnologia de radiofrequência proprietária, seguido da busca por proteção intelectual por meio de depósito de patente.

REFERÊNCIAS

BARAI, SUVANKAR; BISWAS, DEBAJYOTI; SAU, BUDDHADEB. *Estimate distance measurement using NodeMCU ESP8266 based on RSSI technique*. 2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Tsukuba, Japan, 2017, pp. 170-173, DOI: 10.1109/CAMA.2017.8273392. Acesso em agosto 2020.

CARPES JR., WIDOMAR. *Introdução ao projeto de produtos*. 1ª ed., Bookman, 2014.

FENG, CHEN; AU, WAIN SY ANTHEA; VALAEE, SHAHROKH; TAN, ZHENHUI. *Compressive Sensing Based Positioning Using RSS of WLAN Access Points*. 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, San Diego, CA, USA, 2010, pp. 1-9, DOI: 10.1109/INFOCOM.2010.5461981.

HAALA, NORBERT; PETER, MICHAEL; KREMER, JENS; HUNTER, GRAHAM. *Mobile LiDAR Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test*. Proceedings of XXXIst ISPRS congress, 3-11 July 2008, Beijing, China, p. 1119--1124, 2008. Disponível em <https://isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/191.pdf>.

IFSC. *Campus Florianópolis faz simulação de acidente radiológico*. 2017. Disponível em: <<https://linkdigital.ifsc.edu.br/2017/12/08/ifsc-tv-campus-florianopolis-faz-simulacao-de-acidente-radiologico/>>. Acesso em agosto 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.

KAEMARUNGSI, K.; KRISHNAMURTHY, P.. *Properties of indoor received signal strength for WLAN location fingerprinting*. The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004., Boston, MA, USA, 2004, pp. 14-23, DOI: 10.1109/MOBIQ.2004.1331706.

LESTER, COREY A.; CHUI, MICHELLE A.. *Using link analysis to explore the impact of the physical environment on pharmacist tasks*. Research in Social and Administrative Pharmacy, v. 12, n. 4, p. 627--632, 2016. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2015.09.011>>.

LIMA, NATHAN WILLIG; HOFF, GABRIELA. *Aplicabilidade da Lei do Inverso do Quadrado da Distância em radiologia convencional e mamografia*. Brazilian Journal of Radiation Sciences, v. 3, n. 1A (Suppl.), 2015.

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

PIKE, STEVEN. *The symptoms of radiation exposure*. Argon Electronics (UK) Ltd, 2014. Disponível em: <<https://www.argonelectronics.com/blog/the-symptoms-of-radiation-exposure>>. Acesso em abril 2020.

RIBEIRO, D. *Contador de Geiger-Müller*. Revista de Ciência Elementar, v. 2, n. 4, p. 37, 2014. DOI: <<http://doi.org/10.24927/rce2014.087>>.

SANTOS, ALEXANDRE FERREIRA DOS. **Caracterização de Cobertura de Sinais em Ambientes Internos com Mais de Um Pavimento na Faixa de 700 MHz.** (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, IFPB, 2016.

SCHLEIPMAN, A. ROBERT; GERBAUDO, VICTOR H.; CASTRONOVO, FRANK P.. ***Radiation Disaster Response: Preparation and Simulation Experience at an Academic Medical Center.*** *Journal of Nuclear Medicine Technology*, v. 32, n. 1, p. 22--27, 2004. Disponível em <<https://tech.snmjournals.org/content/32/1/22>>.

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.

ZARDO, CLAITON ROGÉRIO; BARBISAN, AILSON OLDAIR; BERTICELLI, NILSON. **Como desenvolver rapidamente produtos.** *Revista Tecnológica*, v. 5, n. 2, p. 41--53, dec. 2016. ISSN 2358-9221. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/view/174>>. Acesso em novembro 2020.