

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

LETÍCIA DOS SANTOS

**Desinfecção autônoma de ambientes com
robô terrestre utilizando luz ultravioleta**

Monografia apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia da Computação

Orientador: Prof. Dr. Renan Maffei
Co-orientador: Prof. Dr. Mariana Kolberg

Porto Alegre
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Prof^a. Patricia Helena Lucas Pranke

Pró-Reitora de Graduação: Prof^a. Cíntia Inês Boll

Diretora do Instituto de Informática: Prof^a. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Diretora da Escola de Engenharia: Prof^a. Carla Schwengber Ten Caten

Coordenador do Curso de Engenharia de Computação: Prof. Walter Fetter Lages

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

Bibliotecária-chefe da Escola de Engenharia: Rosane Beatriz Allegretti Borges

“Procure uma necessidade e comece a ter ideias para atender essa necessidade. Uma ideia vai levar a outra e sem perceber... conseguiu!

Viu a necessidade? Atenda!”

— O GRANDE SOLDADOR, FILME ROBÔS (2005)

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus orientadores pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho de conclusão e pela oportunidade de participar do projeto JACI, que também engloba o presente trabalho. Também agradeço a empresa Instor Projetos e Robótica que faz parte do projeto. Esse projeto foi muito importante para mim, pois proporcionou o desenvolvimento do protótipo de um produto que pode ajudar a combater a pandemia de COVID-19. Os outros participantes do projeto, Mathias Mantelli, Lucas de Fraga e Giovanna Miotto, também foram fundamentais para o presente trabalho. Então, agradeço os meus colegas de projeto.

Agradeço a minha família, principalmente Neide Ribeiro dos Santos, Clair dos Santos e Arthur dos Santos, que proporcionaram estrutura durante a graduação para dedicar-me aos estudos. Especialmente durante a construção do presente trabalho, eles participaram dos desafios e sucessos que envolvem o aprendizado e desenvolvimento de conhecimento científico.

Sou grata também a todos os professores com quem já tive a honra de ser aluna e que através dos seus ensinamentos permitiram que hoje eu pudesse estar concluindo este trabalho; e aos amigos, sobretudo Izadora Dourado Berti e Adriano Gebert Gomes, pelo apoio e momentos de descontração.

RESUMO

A luz ultravioleta é capaz de desinfetar superfícies pois sabe-se que a energia acumulada de sua exposição elimina organismos patogênicos como bactérias e vírus. De fato, equipamentos capazes de emitir luz UV se popularizaram muito nos dias atuais. No entanto, a exposição a esse tipo de luz é prejudicial aos humanos. Logo, um robô terrestre autônomo contendo lâmpadas que emitem essa radiação pode desinfetar um ambiente de forma segura e eficiente. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é avaliar o impacto na eficiência da desinfecção que diferentes técnicas de exploração causam. Para tal foi utilizado um robô móvel contendo um conjunto de lâmpadas UV além de sensores para mapear o ambiente. Diferentes técnicas de navegação foram desenvolvidas juntamente com um modelo de mapeamento da emissão de luz UV. Experimentos em ambiente real e simulado atestaram a capacidade de desinfecção do sistema.

Palavras-chave: SLAM. Robótica. Robô autônomo. Robô móvel terrestre. Desinfecção luz UV.

Autonomous disinfection of environments with a ground robot using ultraviolet light

ABSTRACT

Ultraviolet light is capable of disinfecting surfaces as the accumulated energy of its exposure is known to eliminate pathogenic organisms such as bacteria and viruses. In fact, equipment capable of emitting UV light has become very popular nowadays. However, exposure to this type of light is harmful to humans. Therefore, an autonomous ground robot containing lamps that emit this radiation can safely and efficiently disinfect an environment. The aim of this course conclusion work is to evaluate the impact on the disinfection efficiency that different exploration techniques cause. For this purpose, a mobile robot containing a set of UV lamps and sensors was used to map the environment. Different navigation techniques were developed along with a UV light emission mapping model. Experiments in real and simulated environments attested to the system's disinfection capacity.

Keywords: SLAM, robotics, autonomous robot, ground mobile robot, UV light disinfection.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SLAM	<i>Simultaneous localization and mapping</i>
RBPF-SLAM	<i>Rao-Blackwellised particle filter SLAM</i>
BVP	<i>Boundary-value problem</i>
GVD	<i>Generalized Voronoi Diagram</i>
UV	Luz ultravioleta
UV-C	Luz ultravioleta C
RNA	Ácido ribonucleico
DNA	Ácido desoxirribonucleico

LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 2.1 Problemas fundamentais da Robótica Móvel (Mapeamento, Localização e Planejamento de Movimento) e suas interseções: (I) SLAM, (II) Exploração Clássica, (III) Localização Ativa, (IV) Exploração Integrada. Adaptada de (MAKARENKO et al., 2002).</p>	15
<p>Figura 2.2 Modelo gráfico do problema SLAM. Os nodos escuros são dados observáveis e os nodos em branco serão estimados. As setas indicam relações causais.</p>	16
<p>Figura 2.3 Comparação de um mapa construído utilizando apenas informações da odometria para estimar a pose do robô (topo) com o mapa construído usando SLAM (embaixo). O ambiente utilizado foi um andar de um prédio do Instituto de Informática da UFRGS para ambos os mapas. Extraído de (MAFFEI, 2013).</p>	17
<p>Figura 2.4 Mapa construído com gmapping do edifício ACES na Universidade do Texas. Extraído de (GRISSETTI; STACHNISS; BURGARD, 2007).</p>	18
<p>Figura 2.5 Série de diagramas que ilustram como funciona a abordagem de campos potenciais. O mapa é mostrado em (a). O objetivo, que possui potencial atrativo, gera o campo (b), com caimento para o canto superior direito. Os obstáculos, que possuem potencial repulsivo, geram o campo (c). A soma dos potenciais gera (d). (e) mostra as curvas equipotenciais e o caminho obtido quando o gradiente negativo é utilizado para orientar o robô do ponto inicial $q_{inicial}$ até o objetivo $q_{objetivo}$. (f) mostra a orientação do gradiente negativo sobre a área livre. Adaptado de (LATOMBE, 1991).</p>	19
<p>Figura 2.6 Diagrama do processo de exploração: trajetória seguida pelo robô (topo), com a janela de ativação. (a) - (d) mostram o campo (setas) e configurações de grade (quadrados cinza) para cada posição correspondente na trajetória.. Extraído de (Prestes e Silva et al., 2002).</p>	20
<p>Figura 2.7 Mapa com o conjunto de pontos do diagrama de Voronoi (em verde) no espaço livre (em branco), sendo que cada ponto está equidistante de dois ou mais obstáculos (em preto) mais próximos. Adaptado de (AL-DAHMAN; SCHMIDT, 2019).</p>	21
<p>Figura 3.1 Eficiência da desinfecção via luz UV é maior na banda C, entre 200 e 280 nm. Extraído de (KOWALSKI, 2010).</p>	23
<p>Figura 3.2 Radiação com intensidade I_e incidindo sobre ∂A. Distância r entre Luz e ∂A.</p>	23
<p>Figura 3.3 Danos no DNA causada por luz UV-C. Cada traço entre as bases nitrogenadas é uma ligação de hidrogênio. Então a ligação T-A é mais fraca que G-C e tende a ser destruída com maior facilidade na exposição de luz UV-C. Extraído de (KOWALSKI, 2010).</p>	24
<p>Figura 4.1 Robôs dos trabalhos relacionados.</p>	27
<p>Figura 5.1 Jaci é um robô de desinfecção desenvolvido por Instor (INSTOR. . . ,), possui 18 UV-C lâmpadas em dois níveis diferentes. (a) Jaci desligado. (b) Jaci em operação, desinfectando sala hospitalar.</p>	31

Figura 5.2 A dose UV-C depositada em uma determinada célula é calculada apenas se a célula estiver dentro da abertura da lâmpada, destacada em laranja. A lâmpada é representada por uma fonte de luz pontual em violeta, cuja posição é (x_l, y_l, z_l) em relação ao centro do robô. A distância r até a célula é calculada a partir da fonte de luz e considera a diferença de altura em relação ao plano do Mapa de radiação.	32
Figura 5.3 Representação gráfica do mapa de radiação para a organização de lâmpadas do Jaci. Resultado do Algoritmo 1 com robô parado durante $\Delta t = 1$ s, células do mapa em $z = 0$ m e cada lâmpada emite $\phi_e = 6,9$ W. (a) Lâmpada do nível superior ligada a direita e inferior a esquerda. (b) Resultado de todas as 18 lâmpadas ligadas.	32
Figura 5.4 Lâmpada em violeta com a posição (x_l, y_l) em relação ao centro do robô e direcionada para θ_l , abertura de θ_n até θ_p . A lâmpada também está a altura z_l do chão, porém o eixo z não está representado na imagem. Robô a velocidade v constante. Ponto $(0,0)$ onde será calculada a dose depositada em vermelho. θ_f é o ângulo final da lâmpada até o ponto, que está no chão.	34
Figura 5.5 Mapas de radiação resultantes para lâmpadas ligadas durante 2 minutos com o robô parado e em movimento. Dose ideal de 200 J/m ² . Área em verde com dose maior ou igual a ideal.	37
Figura 5.6 Diagrama ilustra como funciona a varredura. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto.	41
Figura 5.7 Diagrama ilustra como funciona a varredura. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto. Área com dose de pelo menos 80% da ideal em verde.	42
Figura 5.8 Diagrama ilustra como funciona movimentação seguindo parede. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto.	43
Figura 6.1 Análise do Mapa de Radiação em comparação com as doses de irradiação medidas por dosímetros UVC. Os mapas de irradiação de dois testes, considerando dose ideal de 50 mJ/cm ² , com as regiões desinfetadas em verde e quadriculado de 1 m x 1 m, são apresentados em (a) e (c). Os dosímetros UVC representando a dose medida a 50 cm do robô em cada teste são mostrados em (b) e (d).	48
Figura 6.2 Ambientes de teste.	48
Figura 6.3 Execuções do Voronoi com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.	50
Figura 6.4 Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções da navegação baseada em Voronoi. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.	51
Figura 6.5 Execuções do BVP guiado a fronteira com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.	54
Figura 6.6 Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções do BVP guiado a fronteira. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.	55

Figura 6.7	Execuções do BVP guiado a dose baixa com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.	57
Figura 6.8	Evolução da quantidade de células desinfectadas ao longo de execuções do BVP guiado a dose baixa. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.	58
Figura 6.9	Execuções da Varredura 1 m com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.....	61
Figura 6.10	Evolução da quantidade de células desinfectadas ao longo de execuções da Varredura 1 m. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.....	62
Figura 6.11	Execuções da Varredura 2 m com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.....	64
Figura 6.12	Evolução da quantidade de células desinfectadas ao longo de execuções da Varredura 2 m. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.....	65
Figura 6.13	Execuções do seguir parede com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.....	67
Figura 6.14	Evolução da quantidade de células desinfectadas ao longo de execuções do seguir parede. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.....	68
Figura 6.15	Gráficos da desinfecção nos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A. .	70
Figura 6.16	Gráficos com tempo para desinfecção dos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A.....	71
Figura 6.17	Gráficos da distância percorrida pelo robô para desinfecção nos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Dose de inativação necessária para diferentes organismos.	25
Tabela 4.1 Características principais dos trabalhos.....	26
Tabela A.1 Dados resultantes dos experimentos com dose ideal de 200 J/m ²	79
Tabela A.2 Dados resultantes dos experimentos com dose ideal de 2000 J/m ²	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 ROBÓTICA MÓVEL	15
2.1 <i>Simultaneous localization and mapping</i> - SLAM	16
2.2 Exploração de ambientes e movimentação utilizando campos potenciais	18
2.3 <i>Generalized Voronoi Diagram</i> - GVD	20
3 DESINFECÇÃO POR LUZ ULTRAVIOLETA	22
3.1 Modelo de radiação	22
3.2 Funcionamento da desinfecção	24
4 TRABALHOS RELACIONADOS	26
5 ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO PARA ROBÔ AUTÔNOMO DE DESINFECÇÃO COM LUZ UV	30
5.1 Mapa de radiação	30
5.2 Métodos de navegação aplicados a desinfecção	37
5.2.1 Voronoi utilizando dose desejada para restringir o movimento	37
5.2.2 BVP utilizando dose desejada como condição de contorno	38
5.2.3 Varredura	39
5.2.4 Seguir paredes	43
6 EXPERIMENTOS	46
6.1 Validação do mapa de radiação	46
6.2 Experimentos simulados	47
6.3 Análise da execução	49
6.3.1 Voronoi utilizando dose	52
6.3.2 BVP guiado a fronteira	53
6.3.3 BVP guiado a dose baixa	56
6.3.4 Varredura 1 m	60
6.3.5 Varredura 2 m	63
6.3.6 Seguir parede com velocidade controlada	66
6.4 Análise comparativa	69
7 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE A — DADOS BRUTOS	79

1 INTRODUÇÃO

A robótica é um campo que estuda o desenvolvimento de máquinas, chamadas de robôs, que podem ser configuradas de diversas formas para realizar uma sequência de ações (HALPERIN; KAVRAKI; LATOMBE, 1997). Nas últimas décadas, a pesquisa em robótica avançou o suficiente para permitir que robôs auxiliem na execução de tarefas tradicionalmente feitas por humanos. Um exemplo é a utilização de braços robóticos em indústrias, como montadoras de carros. Existem robôs com outras estruturas mecânicas para as mais diversas aplicações: semelhantes a braços, pernas e mãos; veículos com rodas também chamados de terrestres; robôs semelhantes a cobras; robôs aéreos e subaquáticos; e robôs em micro e nanoescalas (SICILIANO; KHATIB, 2016, Part B).

Atualmente estamos observando robôs autônomos inteligentes deixando gradualmente o chão de fábrica e passando a conviver com pessoas em suas casas e trabalhos. Segundo (SCHÖNER; DOSE; ENGELS, 1995), um agente autônomo possui o seu comportamento baseado na leitura do ambiente feita pelo mesmo. No caso dos robôs móveis terrestres, isso significa que robôs verdadeiramente autônomos são dotados da capacidade de se mover, sem supervisão, através de ambientes do mundo real. Robôs dotados de tal capacidade podem ser usados em uma enorme variedade de aplicações.

O desenvolvimento de soluções de robótica autônoma cresce de forma contínua, e isso aumentou consideravelmente com a crise sanitária de 2020, em que o isolamento e distanciamento social exigiram a criação de novas soluções para problemas do dia a dia das pessoas. Sistemas autônomos também estão sendo analisados para monitoramento de distanciamento social em áreas públicas, medição de temperaturas, etc. Na questão de higienização, muitas companhias vêm propondo o uso de robôs para desinfecção de superfícies.

Com isso em mente, este trabalho se insere em um projeto chamado JACI, desenvolvido pelo grupo de robótica móvel do Instituto de Informática da UFRGS em parceria com a empresa Instor Projetos e Robótica, que trata do desenvolvimento de um robô autônomo de desinfecção que utiliza iluminação UV-C e névoa ozonizada.

Com a pandemia de COVID-19, tornou-se necessário higienizar ambientes de forma prática e rápida. A luz ultravioleta pode ser utilizada nesse contexto, porém essa radiação causa danos a pele humana. Então o ideal é utilizar um robô para realizá-la.

A desinfecção é feita quando o robô visita as áreas livres do ambiente e as lâmpadas UV-C ligadas emitem radiação durante o processo buscando eliminar organismos

presentes nas superfícies irradiadas. O robô pode navegar pelo ambiente utilizando diferentes estratégias de navegação. Como um dos fatores que influencia a intensidade da radiação é a distância da lâmpada até a superfície, o trajeto percorrido influencia o resultado da desinfecção do ambiente.

O problema estudado neste trabalho consiste em comparar a eficiência da desinfecção por luz ultravioleta em ambientes quando utilizadas diferentes técnicas de navegação. Logo, destacam-se alguns objetivos para a realização dessa tarefa:

- Entender como a luz ultravioleta é capaz de desinfetar ambientes.
- Construir modelo de radiação e uma forma de mapeamento da dose depositada no ambiente.
- Utilizar técnicas de navegação que explorem diferentes formas de cobrir um ambiente.
- Realizar experimentos em vários ambientes visando eliminar organismos diferentes, ou seja, considerando diferentes doses desejadas de radiação UV-C.
- Avaliar os diferentes resultados de desinfecção e verificar quais as estratégias mais eficientes para as doses desejadas.

O presente trabalho de graduação está dividido da seguinte maneira. Os fundamentos da robótica móvel são apresentados no Capítulo 2. Em seguida, o Capítulo 3 apresenta a teoria de como funciona a desinfecção por luz ultravioleta, sendo que o comportamento da luz ultravioleta é apresentado na Seção 3.1 e a Seção 3.2 explica porque essa radiação desinfecta. O Capítulo 4 elenca trabalhos que utilizam robôs para desinfecção utilizando luz UV. O Capítulo 5 apresenta como a informação da luz é estruturada e os métodos propostos para a navegação no ambiente. Experimentos, o Capítulo 6. Por fim, o Capítulo 7 contém a conclusão.

2 ROBÓTICA MÓVEL

Para o funcionamento de um robô operando de forma autônoma é necessário conhecer o mapa do ambiente (obtido pelo **mapeamento**), saber a posição do robô dentro do mapa (**localização**) e planejar a **movimentação**. As tarefas destacadas e suas interseções estão representadas na Figura 2.1. Para robôs verdadeiramente autônomos, que são capazes de explorar e navegar em ambientes desconhecidos e dinâmicos, uma técnica de **SLAM** (i.e. Localização e Mapeamento Simultâneos) é fundamental (VIEIRA; DREWS; CAMPOS, 2014). O SLAM realiza simultaneamente a construção do mapa utilizando sensores para mapear o ambiente e a determinação da posição do robô em relação ao ambiente. A Seção 2.1 explica o problema detalhadamente.

Enquanto a estimativa do estado do sistema feita via SLAM é fundamental para um robô autônomo operando em ambientes reais, outra parte de igual importância é a definição das ações a serem tomadas pelo robô. A movimentação do robô no problema de desinfecção autônoma envolve a exploração do ambiente para construção do mapa, enquanto existirem áreas desconhecidas pelo robô, e estratégias de navegação por áreas já conhecidas.

Existem várias técnicas tradicionalmente usadas para exploração e varredura de ambientes, dentre as quais estão: campos potenciais, Seção 2.2, e métodos de *roadmap* baseados em Diagrama de Voronoi, que será apresentado na Seção 2.3;

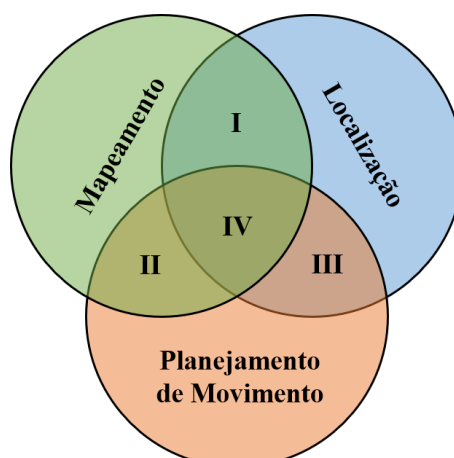


Figura 2.1 – Problemas fundamentais da Robótica Móvel (Mapeamento, Localização e Planejamento de Movimento) e suas interseções: (I) SLAM, (II) Exploração Clássica, (III) Localização Ativa, (IV) Exploração Integrada. Adaptada de (MAKARENKO et al., 2002).

2.1 Simultaneous localization and mapping - SLAM

O problema do SLAM é definido em (SICILIANO; KHATIB, 2016, Chapter 46) como: um robô móvel está em um ambiente desconhecido e começa na posição x_0 . Existe incerteza sobre a movimentação, tornando mais difícil determinar a posição atual, e o robô possui sensores com ruídos de leitura. Logo, o objetivo do SLAM é construir um mapa simultaneamente à determinação da posição do robô em relação ao mapa em meio a imprecisão de dados. A notação probabilística é a seguinte:

$$p(X_T, m | Z_T, U_T) \quad (2.1)$$

sendo que o tempo é denotado por $t = 1, 2, 3, \dots, T$, onde T é o tempo final; $X_T = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_T\}$ é o caminho ou sequência de posições do robô; $U_T = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_T\}$ é o movimento do robô; m é o mapa entre um instante e outro, geralmente dado por medidas de odometria com certo grau de incerteza e $Z_T = \{z_0, z_1, z_2, \dots, z_T\}$ são as leituras dos sensores. Os dados U_T e Z_T são observáveis e X_T e m devem ser estimados. A Figura 2.2 mostra uma representação gráfica do problema.

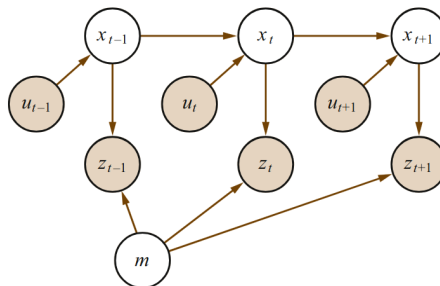


Figura 2.2 – Modelo gráfico do problema SLAM. Os nodos escuros são dados observáveis e os nodos em branco serão estimados. As setas indicam relações causais.

A escolha dos sensores e o uso de uma técnica de SLAM é importante para obter um mapa confiável e de boa qualidade, pois podem acontecer distorções quando é utilizada somente a odometria para construir o mapa sem efetuar correções baseadas nas observações feitas pelos sensores e nas estimativas prévias do mapa. A odometria é uma informação de posição do robô computada incrementalmente pelos movimentos relativos feitos pelo mesmo (ex: obtida a partir de sensores nas rodas). Analisando individualmente ela tem boa precisão, porém o acúmulo de pequenos erros leva a erros maiores ao longo do tempo. Sensores de alcance como LIDAR (sensores laser) ou sonares podem aprimorar a odometria. Mesmo assim, em ambientes reais a estimativa de posicionamento tende a sofrer com o acúmulo de erros locais, uma vez que todos os sensores possuem incerteza.

zas mesmo que pequenas. Por exemplo, o laser não consegue detectar janelas de vidro, pois a luz passa pelo vidro sofrendo pouca interferência, e sons ambientes podem interferir na leitura de sonares, que geralmente não possuem longo alcance. Os sensores das rodas também não informam a real distância percorrida pelo robô, pois se o robô patinar as rodas continuam girando mas o robô não sai do lugar.

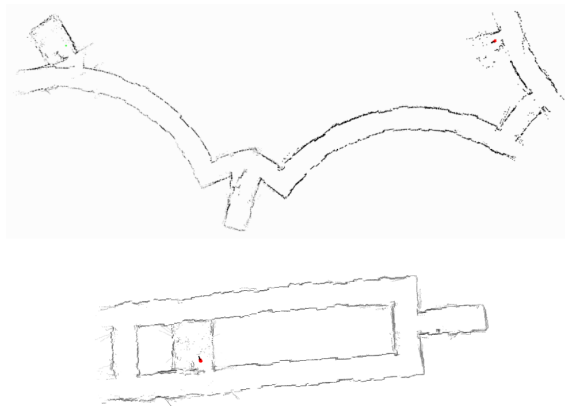


Figura 2.3 – Comparação de um mapa construído utilizando apenas informações da odometria para estimar a pose do robô (topo) com o mapa construído usando SLAM (embaixo). O ambiente utilizado foi um andar de um prédio do Instituto de Informática da UFRGS para ambos os mapas. Extraído de (MAFFEI, 2013).

A Figura 2.3 mostra os mapas construídos pelo robô Pioneer 3-DX utilizando um LIDAR (sensor laser) SICK-LMS 200. Em cima, temos um mapa apenas baseado em odometria, e embaixo SLAM com filtro-de-partículas para determinar a posição do robô. É notória a diferença entre eles e o que utiliza SLAM se aproximou mais do ambiente real. Pelas imagens, pode-se observar que erros locais dos sensores de odometria das rodas se acumularam e resultaram em um mapa totalmente distorcido, o que não acontece quando o SLAM é utilizado.

Uma técnica muito popular de SLAM é o chamado RBPF-SLAM (*Rao-Blackwellised particle filter SLAM*), que se trata de um método de estimativa de estado usando filtro de partículas e, geralmente, representa o ambiente usando grades de ocupação. Sua ideia básica consiste em gerar múltiplos mapas em paralelo, cada um criado por uma partícula do filtro, isto é, uma hipótese de caminho diferente. O filtro então avalia essas hipóteses, eliminando aquelas que apresentam erros de alinhamento na construção do mapa (GRISSETTI et al., 2010). Neste trabalho usaremos a implementação Gmapping deste tipo de SLAM, que é a forma mais popular de SLAM para robôs equipados com laser. Exemplo de mapa resultante em Fig. 2.4.

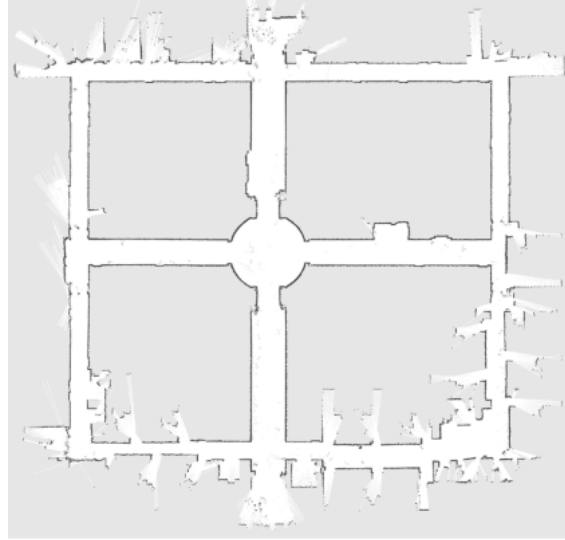


Figura 2.4 – Mapa construído com gmapping do edifício ACES na Universidade do Texas.
Extraído de (GRISSETTI; STACHNISS; BURGARD, 2007).

2.2 Exploração de ambientes e movimentação utilizando campos potenciais

No problema de exploração, cabe ao robô navegar pelo ambiente de forma autônoma enquanto constrói o mapa do ambiente, com o objetivo de que no final todas as áreas alcançáveis tenham sido visitadas. O mapa pode ser representado em *grid*, uma matriz com cada célula representando a ocupação de um espaço delimitado no ambiente real.

Uma técnica bastante utilizada para planejar a navegação de robôs é a de campos potenciais. A meta é guiar o robô até um objetivo, que exerce uma força atratora, enquanto os obstáculos no ambiente repelem o robô. Isso faz com que o robô sempre tenda a se manter afastado dos obstáculos, gerando caminhos seguros. Tal técnica pode ser facilmente adaptada para o problema de exploração definindo como objetivo todas as áreas desconhecidas.

Segundo (LATOMBE, 1991), quando são observados campos potenciais, o robô é uma partícula se movendo no espaço de um potencial artificial produzido pela distribuição de área livre e obstáculos do ambiente. Logo, o robô está em área livre; o objetivo está em área livre e possui potencial atrativo; e os obstáculos possuem potencial repulsivo. Então, define-se o gradiente negativo do campo potencial gerado como uma força artificial aplicada no robô para ele chegar no objetivo partindo de qualquer ponto no mapa. A Figura 2.5 exemplifica a aplicação de campos potenciais em um mapa simples.

Uma variação de campos potenciais muito interessante são os campos potenciais harmônicos, em que se especifica condições de contorno fixas (Dirichlet) e calcula-se o campo potencial no espaço restante utilizando a equação de Laplace. Este tipo de técnica

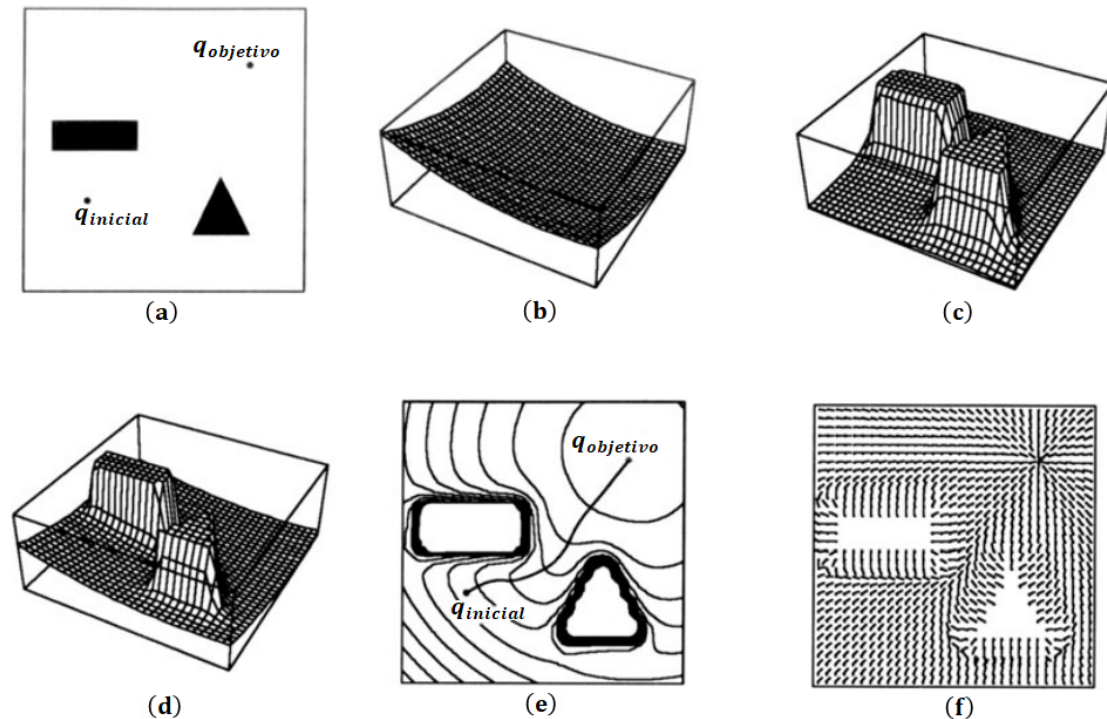


Figura 2.5 – Série de diagramas que ilustram como funciona a abordagem de campos potenciais.

O mapa é mostrado em (a). O objetivo, que possui potencial atrativo, gera o campo (b), com caimento para o canto superior direito. Os obstáculos, que possuem potencial repulsivo, geram o campo (c). A soma dos potenciais gera (d). (e) mostra as curvas equipotenciais e o caminho obtido quando o gradiente negativo é utilizado para orientar o robô do ponto inicial $q_{inicial}$ até o objetivo $q_{objetivo}$. (f) mostra a orientação do gradiente negativo sobre a área livre. Adaptado de (LATOMBE, 1991).

de campo potencial, também chamada de BVP (*boundary-value problem* ou problema de valor de contorno), é vantajosa por não possuir mínimos locais, que poderiam ocorrer na forma tradicional de campos potenciais, como mostrado na Fig. 2.5.

No entanto, por ser computada através da solução numérica da Equação de Laplace aplicada sobre um *grid*, a exploração BVP se torna custosa em ambientes grandes, mas funciona bem para ambientes menores, como salas.

Uma das principais características desse tipo de abordagem é que o robô sempre andará o mais longe possível das paredes e sempre buscará áreas ainda não observadas. Portanto, a estratégia tende a ter um dos menores tempos de exploração possíveis. Um exemplo é apresentado em Fig. 2.6. Pode-se observar que o robô iniciou no centro do corredor e dirigiu-se para (a) porque a parte inexplorada do ambiente possui potencial atrativo. Depois o robô continua a percorrer o ambiente, sempre buscando áreas desconhecidas.

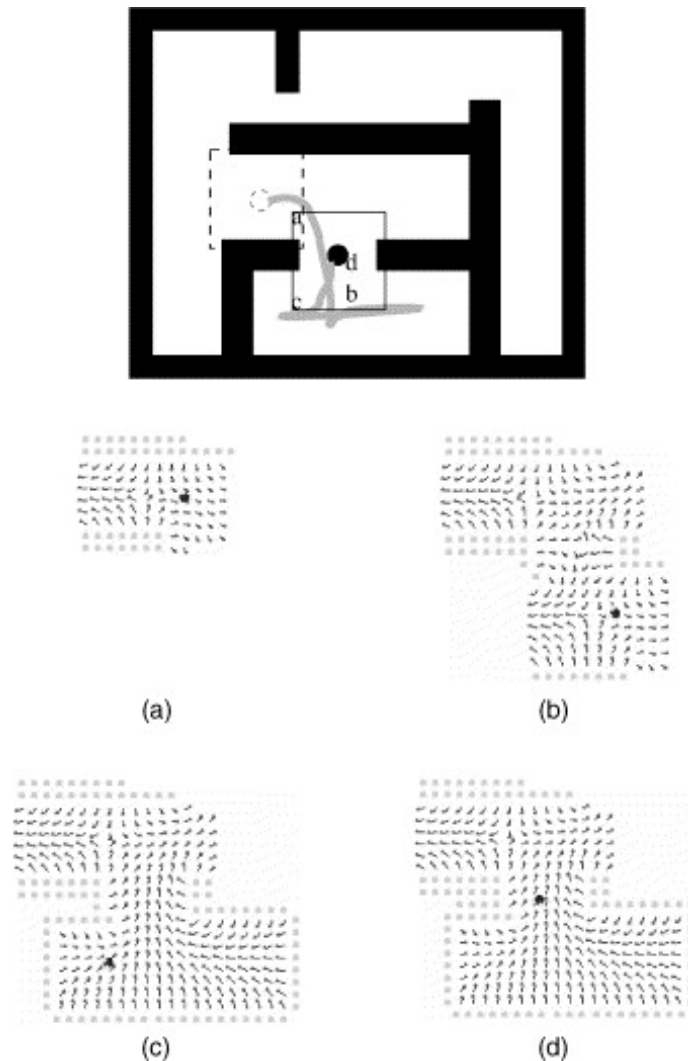


Figura 2.6 – Diagrama do processo de exploração: trajetória seguida pelo robô (topo), com a janela de ativação. (a) - (d) mostram o campo (setas) e configurações de grade (quadrados cinza) para cada posição correspondente na trajetória.. Extraído de (Prestes e Silva et al., 2002).

2.3 Generalized Voronoi Diagram - GVD

Uma abordagem muito utilizada em técnicas de planejamento de caminhos que visite todas as regiões livres do ambiente de forma segura é o diagrama de Voronoi. Segundo (CHOSSET et al., 2005), o diagrama de Voronoi é um conjunto de pontos do espaço livre, em que cada ponto está equidistante de dois ou mais obstáculos mais próximos. A Figura 2.7 mostra um exemplo. Esse algoritmo é muito utilizado para planejamento de caminho porque garante que o caminho está no centro do espaço livre entre obstáculos quando o robô caminha sobre o Voronoi, minimizando o risco do robô colidir com um obstáculo, e liga todas as áreas livres do mapa.

Uma diferença importante em relação à estratégia de campos potenciais BVP, citada anteriormente, é que o BVP, apesar de tender a levar o robô pelo centro do espaço

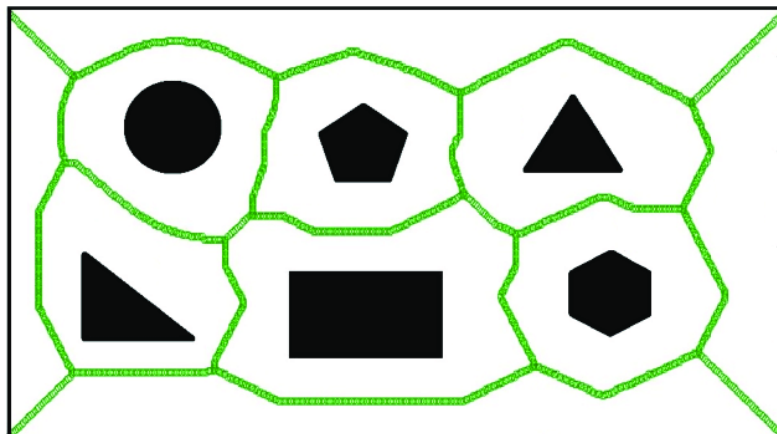


Figura 2.7 – Mapa com o conjunto de pontos do diagrama de Voronoi (em verde) no espaço livre (em branco), sendo que cada ponto está equidistante de dois ou mais obstáculos (em preto) mais próximos. Adaptado de (AL-DAHMAN; SCHMIDT, 2019).

livre, não faz isso de forma explícita. Além disso, não há garantia de que o robô passará em todos os caminhos possíveis no BVP, pois a passagem do robô pelo caminho depende da existência de um objetivo na extremidade do caminho, ou seja, um potencial atrator. De fato, o BVP tende a passar pela menor quantidade de caminhos capazes de observar todas as áreas originalmente inexploradas (ou seja, evita revisitas em áreas conhecidas). Em contrapartida, a navegação sobre o diagrama de Voronoi define explicitamente a região em que o robô deverá passar, isto é, pode-se garantir com que o robô cubra todos os caminhos situados no centro do espaço livre.

3 DESINFECÇÃO POR LUZ ULTRAVIOLETA

O presente trabalho utiliza a luz ultravioleta C (UV-C), banda de 200 até 280 nm, por causa de suas qualidades germicidas. Outras bandas como UVA (320 até 400) e UVB (280 até 320) também podem causar o mesmo efeito, porém o efeito é potencializado com a banda UV-C. A Fig. 3.1 mostra que a efetividade máxima contra a bactéria *E. coli* acontece dentro da banda do UV-C.

Na Seção 3.1 é apresentado o modelo de radiação e a Seção 3.2 explica como a luz ultravioleta é capaz de desinfetar .

3.1 Modelo de radiação

Nesse trabalho, o comportamento da luz UV, seguirá o modelo em que a luz apresenta um decaimento da intensidade radiante proporcional ao quadrado da distancia. Existem outros modelos mais precisos, como o utilizado em (TISENI et al., 2021), porém o escolhido se adapta bem ao intervalo de distâncias alvo, que é de cerca de 50 cm até 5 m, e possui um custo computacional aceitável para a computação em tempo real necessária para utilizar essa informação para a navegação. A distância máxima para calculo da energia foi definida como 5 m porque a quantidade de energia depositada é insignificante quando a distância é maior que o valor citado.

Uma lâmpada UV-C emite certa potência em forma de luz UV-C, chamada de potência emitida ou fluxo radiante $\phi_e = \partial Q_e / \partial t$ [W ou J/s]. A potência emitida é menor que o consumo da lâmpada, pois parte da potência se dissipa em calor ou é emitida em forma de luz dentro do espectro visível, que não possui efeito germicida.

A intensidade radiante I_e é descrita em função da variação do fluxo radiante ϕ_e sobre ângulo sólido, $I_e = \partial \phi_e / \partial \Omega$ [W/sr], como mostra a Eq. 3.1. Esterradiano (sr) é uma unidade de medida de ângulo sólido, tal que uma esfera completa possui 4π esterradianos. Como será considerado que a luz irradia para todas as direções, o fluxo radiante também pode ser descrito em função da distância até a superfície analisada. Não será considerada a orientação da superfície, pois será calculada a dose sobre pontos.

Existe a relação $\partial \Omega = \frac{\partial A}{r^2}$ ou $\frac{1}{\partial \Omega} = \frac{r^2}{\partial A}$, onde r é a distância da fonte de luz até a superfície que será analisada, como a Fig. 3.2 ilustra. Logo,

$$I_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial \Omega} = \frac{\partial \phi_e}{\partial A} r^2. \quad (3.1)$$

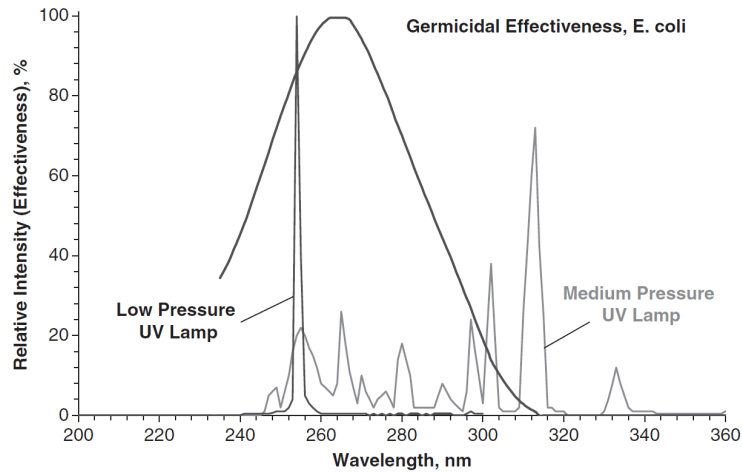


Figura 3.1 – Eficiência da desinfecção via luz UV é maior na banda C, entre 200 e 280 nm. Extraído de (KOWALSKI, 2010).

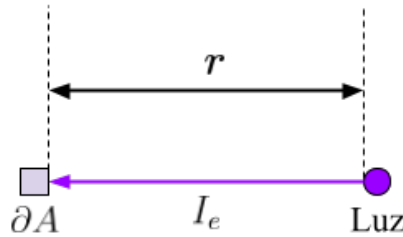


Figura 3.2 – Radiação com intensidade I_e incidindo sobre ∂A . Distância r entre Luz e ∂A .

A irradiância E_e é o fluxo radiante ϕ_e recebido na superfície e pode ser descrito em termos da intensidade radiante I_e , como

$$E_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial A} = \frac{I_e}{r^2}. \quad (3.2)$$

Portanto, a dose ξ depositada durante um período de tempo $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ pode ser descrita por

$$\xi = \int_{t_{i-1}}^{t_i} E_e dt. \quad (3.3)$$

A luz é considerada uma fonte pontual que irradia igualmente para todas as direções posicionada a partir do centro da lâmpada. Logo, a Eq. 3.1 pode ser reescrita como

$$I_e = \frac{\phi_e}{4\pi}. \quad (3.4)$$

Então, considerando que a fonte de luz está parada, ou seja, r constante e utilizando as Eq. 3.2 e 3.4, a Eq. 3.3 que descreve a dose depositada por uma pode ser reescrita

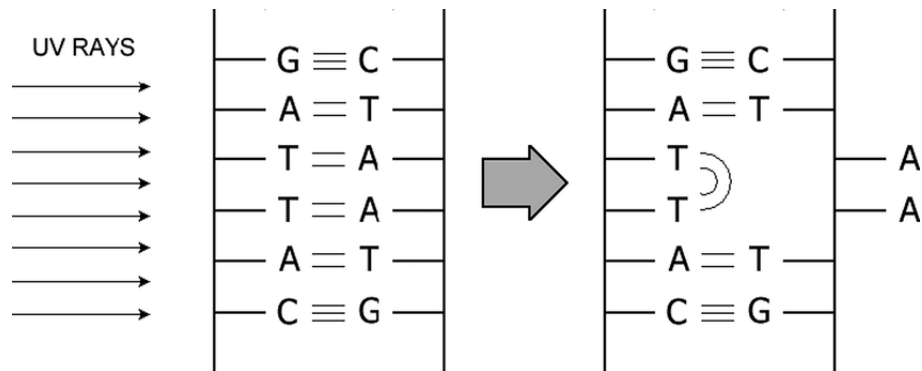


Figura 3.3 – Danos no DNA causada por luz UV-C. Cada traço entre as bases nitrogenadas é uma ligação de hidrogênio. Então a ligação T-A é mais fraca que G-C e tende a ser destruída com maior facilidade na exposição de luz UV-C. Extraído de (KOWALSKI, 2010).

como

$$\xi = E_e \Delta t = \frac{\phi_e \Delta t}{4\pi r^2}. \quad (3.5)$$

3.2 Funcionamento da desinfecção

Segundo (KOWALSKI, 2010), a luz UV-C é absorvida pelo núcleo da célula do organismo exposto a ela, que contém ácidos nucleicos. Vírus possuem ácido ribonucleico (RNA) ou ácido desoxirribonucleico (DNA). Já bactérias e fungos possuem DNA. Os ácidos nucleicos são responsáveis pela replicação e síntese de proteínas, logo, danos causados nessas moléculas resultam em inativação ou falha ao replicar.

O DNA é uma molécula composta por nucleotídeos e leva a informação genética da célula. Cada nucleotídeo possui uma base nitrogenada que pode ser timina (T), adenina (A), citosina (C) ou guanina (G), sendo que a timina se liga a adenina e a citosina se liga a guanina. A irradiação de UV-C causa a quebra de ligações T-A adjacentes ao depositar energia nas bases, como a Fig. 3.3 mostra, e forma um dímero. Essa mudança de estrutura causa a inativação do DNA que pode resultar na incapacidade de reprodução eficaz da célula.

Já o RNA é semelhante ao DNA, porém a uracila (U) que se liga a adenina. A ligação entre essas bases é mais forte, então é necessária uma dose maior de radiação para quebrar a ligação, formar um dímero e, conseqüentemente, inativar o organismo. A absorção da radiação também depende do meio e das características próprias do organismo observado.

A Tabela 3.1 mostra alguns valores de dose suficiente para a inativação de or-

Tabela 3.1 – Dose de inativação necessária para diferentes organismos.

Organismo	Tipo	Dose (J/m ²)	Meio	Fonte
<i>Escherichia coli</i>	Bactéria	20	Superfície	(QUEK; HU, 2008)
SARS-CoV-2	Vírus (RNA)	169	Solução	(BIASIN et al., 2021)
<i>Bacillus subtilisa</i>	Bactéria	2220	Solução	(HIJNEN; BEERENDONK; MEDEMA, 2006)

ganismos. De acordo com (MCGREGOR, 1999), a luz UV também pode danificar o DNA das células da pele humana. A longa exposição da pele à luz UV, de acordo com NOTA TÉCNICA N° 82/2020 publicada pela ANVISA (ANVISA/MS/BRASIL, 2020) pode causar doenças como câncer, queimaduras e problemas oculares. Por causa desses perigos, é inviável que um humano conduza uma lâmpada UV para realizar a desinfecção no ambiente. Logo, um robô é uma boa alternativa para realizar esse processo.

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Esse capítulo apresenta alguns trabalhos relevantes. A Tabela 4.1 destaca algumas características.

Tabela 4.1 – Características principais dos trabalhos.

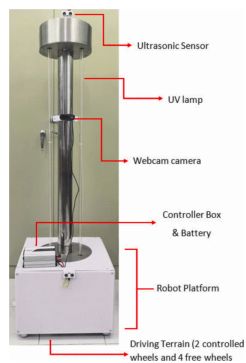
Trabalho	Movimentação	Modelo de radiação	Testes em ambiente real
(TISENI et al., 2021)	Algoritmo genético offline determina a trajetória	Fonte extensa	Sim
(CHANPRAKON et al., 2019)	Tele-operado por humano e evita obstáculos	Igual ao apresentado	Sim
(CONTE; LEAMY; FURUKAWA, 2020)	Tele-operado por humano	Semelhante, coeficientes ajustados depois de testes reais	Sim
(TAN et al., 2021)	Trajeto e outros parâmetros definidos por humano	Sem detalhes	Sim
(GUETTARI; GHARBI; HAMZA, 2021)	Manual ou modo automatizado	Sem detalhes	Não

Como é detalhado em (TAVAKOLI; CARRIERE; TORABI, 2020), robótica e outras tecnologias podem ser utilizadas para o enfrentamento da pandemia de COVID-19 e de outras possíveis situações que possam ser prejudiciais para humanos. A vantagem principal proporcionada pelo uso dessas tecnologias é reduzir o risco de infecção ao permitir que atividades sejam realizadas remotamente, ou seja, sem o contato com humanos. Os robôs autônomos e tele-operados estão nessa categoria. Além disso, no caso específico da desinfecção, o robô que utiliza luz UV para desinfecção diminui o risco de contaminação para quem transitar no ambiente posteriormente e não são utilizados agentes químicos.

O artigo (TISENI et al., 2021) apresenta otimização de caminho para um robô de desinfecção UV-C. Inicialmente, foi constatado por meio de experimentos reais que o robô, Fig. 4.1a, em movimento desinfecta uma área maior e a radiação é distribuída de forma mais uniforme. O modelo de radiação proposto considera todas as lâmpadas como uma única fonte de luz extensa e modela o ambiente como superfícies 3D discretas. Essas informações são utilizadas para gerar um campo potencial ajustável, variando os



(a) Extraído de (TISENI et al., 2021).



(b) Extraído de (CHANPRAKON et al., 2019).



(c) Extraído de (CONTE; LEAMY; FURUKAWA, 2020).



(d) Extraído de (TAN et al., 2021).



(e) Extraído de (GUETTARI; GHARBI; HAMZA, 2021).

Figura 4.1 – Robôs dos trabalhos relacionados.

coeficientes, que são ajustados usando um algoritmo genético. Esse processo resulta em uma trajetória otimizada. É importante notar que o algoritmo genético possui alto custo computacional e sua execução é offline. Além disso, todo o processo é realizado baseado em ambiente mapeado previamente, ou seja, qualquer mudança no ambiente invalida o que foi computado.

O artigo (CHANPRAKON et al., 2019) propõe um robô de esterilização ultravioleta para desinfecção, Fig. 4.1b. É utilizado o mesmo modelo de radiação apresentado neste trabalho de conclusão de curso. O robô é controlado remotamente por humano e evita colisões. Os autores propõem como trabalho futuro tornar a movimentação autônoma. Também são apresentados testes reais com o robô estático e culturas de bactérias, que demonstraram que a plataforma possui grande potencial.

Em (CONTE; LEAMY; FURUKAWA, 2020), é apresentado design e teleoperação de um robô para desinfecção de COVID-19 em ambientes internos complexos, Fig. 4.1c. O robô possui lâmpadas posicionadas de forma vertical e horizontal na corpo do robô além de uma lâmpada "spot" na extremidade de um braço robótico com 6 graus de liberdade. O ponto principal do trabalho é criar um mapa de desinfecção preciso. O modelo de radiação utilizado para a construção do mapa é semelhante ao apresentado neste trabalho de conclusão de curso porém foram feitas adaptações depois de comparar o modelo teórico com resultado de testes no mundo real. Um diferencial desse artigo é que braço permite desinfetar superfícies ortogonais ou de difícil acesso. O robô é teleoperado por humano.

O artigo (TAN et al., 2021) apresenta os resultados de uma pesquisa para a solução do SLAM para robô de desinfecção UVC, Fig. 4.1d. O objetivo principal do trabalho é propor uma localização precisa que pode ajudar a obter a informação do trajeto do robô no ambiente e, conseqüentemente, obter um cálculo mais confiável da dose depositada. É utilizado o robô Aimi-Robot UVC, que possui um spray desinfetante além das lâmpadas UV. Antes do robô iniciar a operação, precisam ser definidos tempo, trajeto, utilização de luz e/ou spray, entre outras configurações. Não são apresentados detalhes sobre o modelo de radiação. É importante destacar que os experimentos em ambiente real testaram somente a localização e não foram fornecidas informações sobre o desempenho da radiação.

Em (GUETTARI; GHARBI; HAMZA, 2021), é apresentado o robô i-Robot UVC, Fig. 4.1e. O artigo não descreve em detalhes o funcionamento do robô e apresenta outras técnicas de desinfecção, entre elas a utilização de gás ozônio. O robô se movimenta de forma manual ou automatizado, mas não são fornecidos detalhes.

Comparativamente, a proposta do trabalho de conclusão de curso assemelha-se aos artigos (CHANPRAKON et al., 2019) e (CONTE; LEAMY; FURUKAWA, 2020) pelo modelo de radiação. E assemelha-se ao artigo (GUETTARI; GHARBI; HAMZA, 2021) por ser autônomo. Porém, este trabalho é o único que compara o resultado da desinfecção utilizando várias estratégias de navegação.

5 ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO PARA ROBÔ AUTÔNOMO DE DESINFECÇÃO COM LUZ UV

O presente trabalho de conclusão de curso propõe avaliar o impacto na eficiência da desinfecção que diferentes técnicas de exploração causam. O robô móvel utilizado possui um conjunto de lâmpadas UV além de sensores para detectar e monitorar o ambiente.

Para os experimentos, foi utilizado o robô Jaci. Como pode ser observado nas Fig. 5.1a e 5.1b, o robô possui 18 lâmpadas UV-C em dois níveis diferentes e sensores, como LIDAR e câmera, para ler o ambiente.

De acordo com a Eq. 3.5 apresentada na Seção 3.1, a dose depositada depende da potência da luz, tempo de exposição e distância da fonte até o alvo. Durante o funcionamento do robô, é possível controlar o tempo e a distância. Logo, o trajeto e o tempo de execução influenciam a dose depositada no ambiente. Assim, diferentes algoritmos de movimentação foram utilizados para comparar o impacto de trajetos diferentes na desinfecção de ambientes.

Para utilizar a informação da dose depositada em tempo real durante a execução, é necessário transformar o modelo de radiação em informação estruturada útil para o robô, no caso, um mapa de radiação apresentado a seguir na Seção 5.1. Essa informação é fundamental para a execução dos métodos de navegação apresentados posteriormente na Seção 5.2.

5.1 Mapa de radiação

O processo de desinfecção deve levar em conta quão desinfectada está cada região do ambiente. Para tal estamos propondo a construção de uma mapa de radiação que descreve a dose de energia por área (J/m^2) acumulada desde o início do processo de desinfecção. Esse mapa é uma grade 2D computada em uma altura específica, como mostra a Fig 5.2, que considera o ambiente em que o robô está executando a desinfecção. A dose é computada em células que estão no espaço livre, ou seja, onde não foi detectado um obstáculo, e estão visíveis para o robô, ou seja, partindo da posição do robô, não existem obstáculos obstruindo a incidência da luz. O campo de visão é calculado partindo da posição do robô, o que não é o ideal, pois cada lâmpada possui um campo de visão



(a)



(b)

Figura 5.1 – Jaci é um robô de desinfecção desenvolvido por Instor (INSTOR. . .), possui 18 UV-C lâmpadas em dois níveis diferentes. (a) Jaci desligado. (b) Jaci em operação, desinfetando sala hospitalar.

Algoritmo 1 Atualização das doses no mapa de radiação

Entrada: Potência emitida, posição (x_l, y_l, z_l) e "abertura" de cada lâmpada; distância mínima e máxima entre célula e lâmpada; altura desejada do mapa de doses; mapa de doses anterior; e mapa de ocupação atual.

Saída: Mapa de doses em formato de grade.

- 1▶ **enquanto** lâmpadas estão ligadas **faça**
 - 2▶ Calcula a diferença de tempo desde a última atualização
 - 3▶ **para** toda célula visível ao redor do robô **faça**
 - 4▶ **para** todas as lâmpadas **faça**
 - 5▶ **se** célula dentro do campo de iluminação da lâmpada **então**
 - 6▶ Obtém a distância da lâmpada até a célula
 - 7▶ **se** distância está dentro do intervalo válido **então**
 - 8▶ Aumenta a dose UV-C da célula (usa Eq. 3.5)
 - 9▶ **fim se**
 - 10▶ **fim se**
 - 11▶ **fim para**
 - 12▶ **fim para**
 - 13▶ **fim enquanto**
-

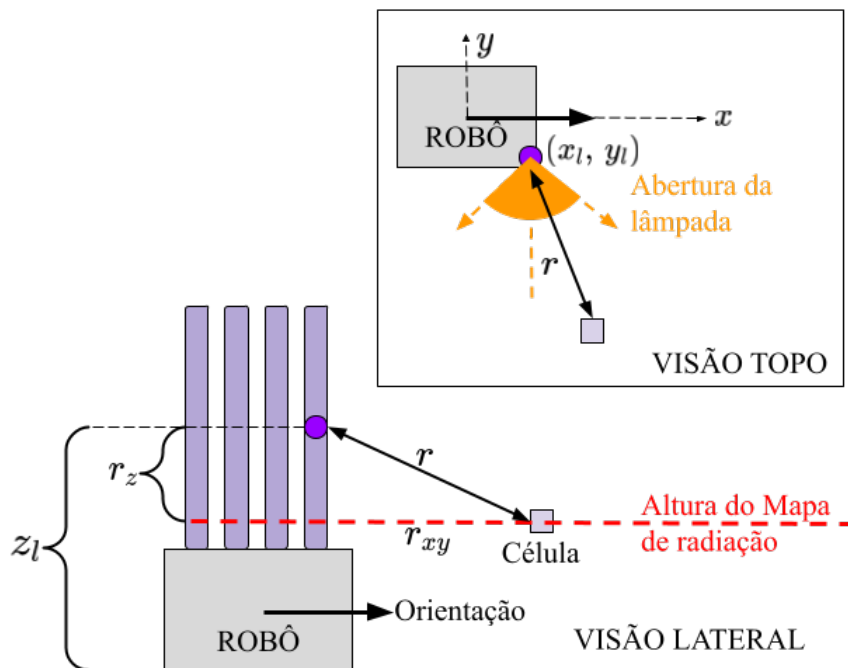


Figura 5.2 – A dose UV-C depositada em uma determinada célula é calculada apenas se a célula estiver dentro da abertura da lâmpada, destacada em laranja. A lâmpada é representada por uma fonte de luz pontual em violeta, cuja posição é (x_l, y_l, z_l) em relação ao centro do robô. A distância r até a célula é calculada a partir da fonte de luz e considera a diferença de altura em relação ao plano do Mapa de radiação.

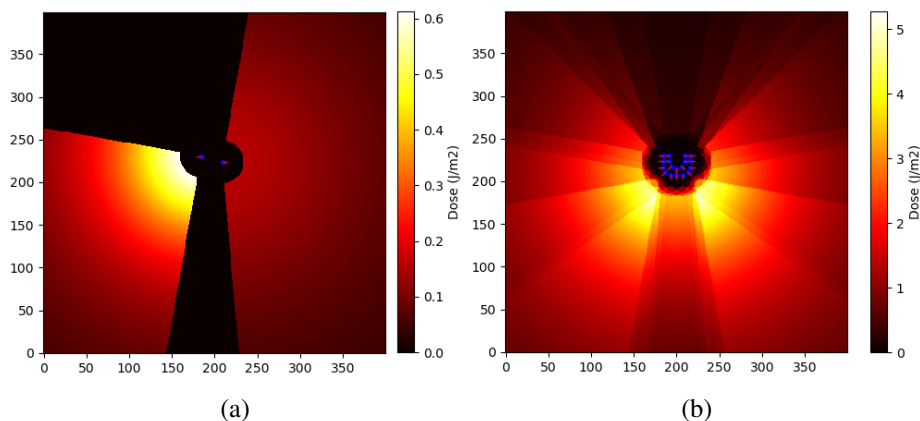


Figura 5.3 – Representação gráfica do mapa de radiação para a organização de lâmpadas do Jaci. Resultado do Algoritmo 1 com robô parado durante $\Delta t = 1$ s, células do mapa em $z = 0$ m e cada lâmpada emite $\phi_e = 6,9$ W. (a) Lâmpada do nível superior ligada a direita e inferior a esquerda. (b) Resultado de todas as 18 lâmpadas ligadas.

ligeiramente diferente. Essa aproximação foi utilizada porque calcular o campo de cada lâmpada iria elevar o custo computacional de forma que não justifica o pequeno ganho de precisão.

É importante destacar que são calculados somente os raios de luz que incidem diretamente na superfície analisada. Não são considerados raios refletidos e refratados pelos objetos do ambiente, porque seria extremamente custoso computacionalmente e também são necessárias mais informações sobre o ambiente, como a composição dos materiais, para identificar a intensidade e o caminho desses raios. Isso iria inviabilizar o cálculo em tempo real e a autonomia do robô. Outra característica dos raios refletidos e refratados é que eles geralmente possuem intensidade menor que os raios que incidem diretamente, pois é dispersada energia ao interagir com o objeto. Ou seja, considerando somente a incidência direta, estão sendo utilizados os raios com maior intensidade.

O Algoritmo 1 apresenta como é feita a atualização das doses no mapa. A posição (x_l, y_l, z_l) e abertura de iluminação, que estão indicadas na Fig. 5.2, de cada lâmpada no robô são conhecidas previamente, além da potência irradiada. A cada interação, a dose depositada nas células ao redor do robô é calculada. Inicialmente, é necessário obter a diferença de tempo desde a última atualização. Após, para as células visíveis, é calculada a dose recebida de cada lâmpada quando a célula está dentro do alcance da lâmpada, considerando tanto campo de iluminação quanto distância mínima e máxima entre a lâmpada e a célula. É necessário calcular a posição de cada lâmpada no mapa para verificar a condição de incidência, pois a posição informada como entrada é em relação ao centro do robô. A atualização da dose de UV-C é feita de acordo com a Eq. 3.5.

A altura do mapa é uma entrada configurável e, como pode ser visualizado na Fig. 5.2, também é considerada a distância vertical entre a célula alvo e o centro da lâmpada. Esse aspecto é importante para contemplar várias configurações de lâmpadas, pois o robô pode possuir lâmpadas em vários níveis.

Para uma estimativa mais conservadora do mapa de radiação para o robô Jaci parado, o robô da Fig. 5.1 que será utilizado para os experimentos, pode ser calculada a dose no chão, como é demonstrado na Fig.5.3 que apresenta o resultado do Algoritmo 1 para a configuração de lâmpadas do Jaci, potência emitida de cada lâmpada $\phi_e = 6,9 \text{ W}$, $\Delta t = 1 \text{ s}$ e células em $z = 0 \text{ m}$.

No caso do Jaci, o chão recebe pouca radiação do nível superior e, consequentemente, possui um valor baixo quando comparado com outras alturas. Essa diferença pode ser observada na Fig. 5.3a, pois a lâmpada a esquerda está no nível inferior e a lâmpada a

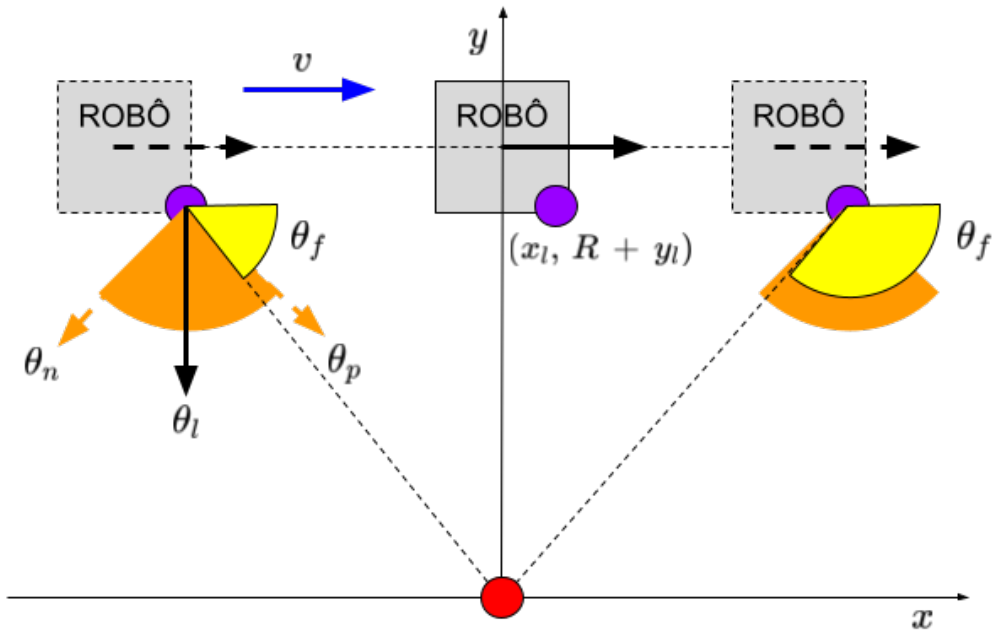


Figura 5.4 – Lâmpada em violeta com a posição (x_l, y_l) em relação ao centro do robô e direcionada para θ_l , abertura de θ_n até θ_p . A lâmpada também está a altura z_l do chão, porém o eixo z não está representado na imagem. Robô a velocidade v constante. Ponto $(0,0)$ onde será calculada a dose depositada em vermelho. θ_f é o ângulo final da lâmpada até o ponto, que está no chão.

direita está no nível superior. Outra diferença observada é a abertura das lâmpadas, pois a lâmpada no nível superior possui uma abertura maior devido ao design do robô. Fig. 5.3b ilustra o resultado de todas as lâmpadas ligadas. Novamente devido ao design do robô, as diagonais da frente recebem uma dose maior.

Já foi apresentado o resultado para o robô parado. Também é necessário observar o resultado do algoritmo para o robô em movimento e comparar com o ideal. Para o modelo ideal será considerado que o robô se move paralelamente a um ponto com velocidade constante, como pode ser observado na Fig. 5.4. A configuração de lâmpadas utilizada nesses testes difere um pouco do que foi utilizado em Fig. 5.3b porque o robô estava em outro estágio de desenvolvimento, porém isso não vai atrapalhar o comparação do ideal com o teste.

Observando a Fig. 5.4, pode-se constatar que a posição da lâmpada é $(x_l + vt, y_l + R, z_l)$. Logo,

$$\theta_f(t) = \arctan\left(\frac{y_l + R}{x_l + vt}\right) - \pi \quad (5.1)$$

Todo ângulo θ é considerado como $-\pi < \theta \leq +\pi$ nos cálculos realizados.

Utilizando as Eq. 3.2 e 3.4, a irradiância E_e no ponto $(0,0)$ para a lâmpada em

movimento é dado por:

$$E_e = \frac{\phi_e}{4\pi} \frac{1}{(x_l + vt)^2 + (y_l + R)^2 + (z_l)^2} \quad (5.2)$$

, onde ϕ_e é a potencia emitida pela lâmpada.

Portanto, a dose depositada pela lâmpada no ponto ao longo do tempo é dada por Eq. 5.3, sendo que E_e foi calculado em Eq. 5.2. A integral indefinida de E_e é calculada em Eq. 5.4.

$$\xi = \int_{t_{inf}}^{t_{sup}} E_e dt \quad (5.3)$$

$$\int \frac{\phi_e}{4\pi} \frac{1}{(x_l + vt)^2 + (y_l + R)^2 + (z_l)^2} dt = \frac{\phi_e}{4\pi v \sqrt{(y_l + R)^2 + (z_l)^2}} \arctan \left(\frac{x_l + vt}{\sqrt{(y_l + R)^2 + (z_l)^2}} \right) + c \quad (5.4)$$

Então, é preciso analisar quais serão os limites de integração de Eq. 5.3, ou seja, quando a luz começa a atingir o ponto, em t_{inf} ao $\theta_f(t_{inf}) = \theta_p + \theta_l$, e quando o ponto deixa de ser iluminado, em t_{sup} ao $\theta_f(t_{sup}) = \theta_n + \theta_l$. Lembrando que o robô está em $(0, R, 0)$ e a lâmpada em $(x_l, y_l + R, z_l)$ quando $t = 0$.

Todas as lâmpadas que possuem $\theta_n + \theta_l > 0$ e $\theta_p + \theta_l > 0$ não vão iluminar o ponto. Para o restante, os limites de tempo são calculados utilizando a Eq. 5.1:

- Limite inferior (t_{inf}):

- Quando $\theta_f(t_{inf}) = \theta_p + \theta_l \geq 0, t_{inf} \rightarrow -\infty$

- Caso contrário:

$$\theta_f(t_{inf}) = \arctan \left(\frac{y_l + R}{x_l + vt_{inf}} \right) - \pi = \theta_p + \theta_l \quad (5.5)$$

$$t_{inf} = \left(\frac{y_l + R}{\tan(\theta_l + \theta_p)} - x_l \right) \frac{1}{v} \quad (5.6)$$

- Limite superior (t_{sup}):

- Quando $\theta_f(t_{sup}) = \theta_n + \theta_l \geq 0, t_{sup} \rightarrow +\infty$

- Caso contrário:

$$\theta_f(t_{sup}) = \arctan\left(\frac{y_l + R}{x_l + vt_{sup}}\right) - \pi = \theta_n + \theta_l \quad (5.7)$$

$$t_{sup} = \left(\frac{y_l + R}{\tan(\theta_l + \theta_n)} - x_l\right) \frac{1}{v} \quad (5.8)$$

Logo, os limites de tempo para as lâmpadas que iluminam o ponto analisado são:

$$t_{sup} = \begin{cases} +\infty & \text{se } \theta_l + \theta_n \geq 0 \\ \left(\frac{y_l + R}{\tan(\theta_l + \theta_n)} - x_l\right) \frac{1}{v} & \text{demais casos} \end{cases} \quad (5.9)$$

$$t_{inf} = \begin{cases} -\infty & \text{se } \theta_l + \theta_p \geq 0 \\ \left(\frac{y_l + R}{\tan(\theta_l + \theta_p)} - x_l\right) \frac{1}{v} & \text{demais casos} \end{cases}$$

A simulação para comparar a discretização feita pelo mapa de radiação com o resultado ideal foi executada em ambiente de 3,5 m x 12 m. O robô testado possui 18 lâmpadas, cada uma emite 6,9 W. A distância mínima para calcular a dose depositada considera o tamanho do próprio robô e a distância máxima utilizada foi 10 m. O robô iniciou a execução em (0, 0), andou em linha reta e parou em (10, 0). O robô demorou 235,5 segundos para percorrer o trajeto e a velocidade média foi aproximadamente 0,04 m/s. A célula (5, -1) recebeu a dose de aproximadamente 170,56 J/m² segundo o algoritmo do mapa de radiação.

Para usar os valores do teste na versão ideal, foram estabelecidos $\phi_e = 6,9$ W; $t_{infmin} = -117,75$ s; $t_{supmax} = +117,75$ s; $R = 1$ m e $v = 0,04$ m/s. Após, são calculados os tempos limite para cada lâmpada que atinge o ponto, utilizando Eq. 5.9. Se os valores estiverem fora do intervalo $[t_{infmin}, t_{supmax}]$, é utilizado o valor mais próximo dentro do intervalo. Então, é calculada a dose que cada lâmpada deposita com Eq. 5.3. São somadas as doses, resultando em aproximadamente 169,34 J/m².

A diferença entre o ideal e o resultado do mapa de radiação foi aproximadamente 1,22 J/m². Ou seja, um valor muito pequeno. Logo, a discretização realizada pelo algoritmo do mapa de radiação mostrou-se uma boa aproximação para o valor computado analiticamente.

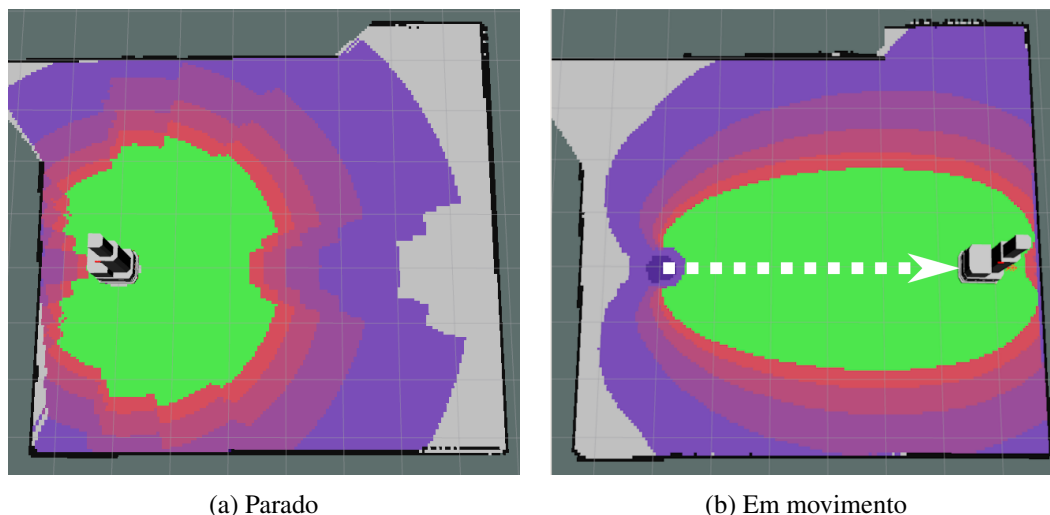


Figura 5.5 – Mapas de radiação resultantes para lâmpadas ligadas durante 2 minutos com o robô parado e em movimento. Dose ideal de 200 J/m^2 . Área em verde com dose maior ou igual a ideal.

5.2 Métodos de navegação aplicados a desinfecção

Ao utilizar uma fonte de luz estática para desinfecção com luz UV-C, a progressão da desinfecção em áreas distantes é lenta porque a dose depositada decai quadraticamente em termos da distância, como mostra a Eq. 3.5. Outros trabalhos, como (TISENI et al., 2021), já constataram que a fonte de luz em movimento é capaz de desinfetar mais rápido e distribuir a radiação de forma mais uniforme no ambiente. Essa diferença foi constatada comparando os mapas de radiação resultantes para o Jaci parado e andando em linha reta por 2 minutos, Fig 5.5. Houve um aumento de 45% de área desinfetada quando o robô estava em movimento. Logo, uma estratégia de navegação adequada é importante para desinfetar o ambiente.

Uma desvantagem de métodos tradicionais de exploração é que eles buscam cobrir o ambiente o mais rápido possível, o que não é adequado para desinfecção do ambiente, exceto se a dose desejada de energia for muito baixa. Por isso, estudou-se formas de guiar a navegação em função da dose acumulada no ambiente. A seguir, diferentes estratégias de navegação aplicadas a desinfecção são investigadas.

5.2.1 Voronoi utilizando dose desejada para restringir o movimento

O Voronoi é uma técnica que permite uma navegação segura e o caminho no centro do espaço livre permite iluminação de forma igual à direita e à esquerda do robô quando este possui lâmpadas simétricas. O Algoritmo 2 utiliza o Voronoi combinado com a in-

Algoritmo 2 Voronoi utilizando dose desejada

Entrada: Mapa Voronoi; Mapa de radiação.

Saída: Objetivo

- 1▶ **enquanto** não termina a desinfecção **faça**
 - 2▶ Procura a célula mais próxima sobre o Voronoi com dose depositada muito abaixo da ideal.
 - 3▶ **se** não achou célula **então**
 - 4▶ Termina a desinfecção.
 - 5▶ **senão**
 - 6▶ Atualiza objetivo para corresponder a célula.
 - 7▶ **fim se**
 - 8▶ **fim enquanto**
-

formação obtida pelo mapa de radiação para determinar a navegação do robô por meio de um objetivo que é atualizado durante o processamento. Foi utilizada uma implementação do algoritmo de Voronoi proposta em (GUO; HALL, 1989).

O Algoritmo 2 garante que todas as células sobre o Voronoi sejam visitadas, a não ser que antes disso, já tenham sido expostas a energia suficiente. No entanto, os demais espaços tenderão a não serem visitados.

5.2.2 BVP utilizando dose desejada como condição de contorno

Algoritmo 3 Calcula BVP utilizando dose desejada

Entrada: Mapa do ambiente com área livre e obstáculos, mapa de radiação, dose ideal, dose mínima, objetivo atual.

Saída: Próximo objetivo no ambiente.

- 1▶ **se** ponto de referência tem dose \geq ideal ou é obstáculo **então**
 - 2▶ Fixa potencial repulsivo nos obstáculos e atrativo em células com dose menor que a mínima.
 - 3▶ Atualiza o campo potencial.
 - 4▶ **se** campo possui potencial atrativo **então**
 - 5▶ Calcula novo objetivo como ponto de menor potencial ao redor do robô.
 - 6▶ **senão**
 - 7▶ Termina a desinfecção.
 - 8▶ **fim se**
 - 9▶ **senão**
 - 10▶ Mantém objetivo atual. ▷ Robô permanece parado
 - 11▶ **fim se**
-

A exploração utilizando o problema de valor de contorno para criar campos potenciais harmônicos pode ser adaptada para utilizar a informação do mapa de radiação e

realizar a desinfecção do ambiente. Como o objetivo é distribuir a dose em todo o ambiente, uma região de baixa dose atrai o robô. Dessa forma o BVP tradicional foi adaptado como mostra o Algoritmo 3.

Uma das diferenças do Algoritmo 3 quando comparado a abordagem tradicional é que o campo potencial é calculado somente quando o ponto de referência possui dose maior ou igual a ideal, caso não seja um obstáculo. O ponto de referência depende de como as lâmpadas estão posicionadas no robô e é um ponto fixo em relação a posição do robô que recebe pouca dose quando comparado ao restante da área visível próxima. Por exemplo, o robô deposita uma dose menor na frente, então o ponto de referência é 75 cm a frente da posição atual do robô. Dessa forma, é garantido que já foi depositada dose significativa e o potencial atrator está distante quando o ponto de referência possui dose maior ou igual a ideal.

Foi utilizado um ponto de referência, ou seja, informação de uma célula, invés de avaliar um arco ou semicírculo ao redor do robô porque funcionou em testes e possui baixo custo computacional quando comparado a analisar uma área com várias células.

Não foi utilizada dose acima do ideal como potencial repulsivo pois, como a dose maior é aplicada próxima ao robô, pode acontecer em algum momento da execução que o robô fique cercado de dose maior que a ideal. E, nesse caso, o campo não teria diferença de potencial ao redor do robô e a desinfecção terminaria mesmo com regiões distantes com dose abaixo da mínima.

5.2.3 Varredura

Uma técnica muito comum usada para limpeza de ambientes é a simples varredura em zigue-zague do espaço inteiro. Tal técnica de varredura consiste em determinar vários pontos igualmente espaçados na área livre do ambiente e direcionar o robô para percorrê-los. Essa técnica foi uma das escolhidas para desinfetar o ambiente pois garante a maior cobertura possível da área livre e já é utilizada por robôs domésticos para limpeza.

A Figura 5.6 exemplifica a execução da varredura em uma sala. Foram determinados objetivos de navegação e, utilizando uma preferência de direita ou esquerda do robô para determinar o próximo objetivo, o algoritmo resulta em uma trajetória em zigue-zague.

Visando o problema de desinfecção com luz UV-C, propõe-se uma adaptação desta técnica simples de varredura para considerar o mapa de radiação, resultando no Algo-

Algoritmo 4 Calcula objetivos varredura usando dose desejada

Entrada: Mapa de radiação; dose ideal; *Grid* com pontos equidistantes *MinDist*; *preferencia = direita*.

Saída: Objetivo.

```

1▶ enquanto existem pontos não visitados faça
2▶   se chegou próximo ao objetivo atual e dose suficiente então
3▶     Marca o objetivo atual como visitado.
4▶   se existe ponto não visitado na direção de preferencia do robô e achou primeira parede então
5▶     Coloca ponto como objetivo.
6▶   senão
7▶     se existe ponto não visitado a frente do robô então
8▶       Coloca ponto como objetivo.
9▶     senão
10▶      se ainda não havia achado a primeira parede então
11▶        ▷ agora achou primeira parede
12▶        se existe ponto não visitado à esquerda do robô então
13▶          Coloca ponto como objetivo e preferencia = direita.
14▶        senão
15▶          se existe ponto não visitado à direita do robô então
16▶            Coloca ponto como objetivo e preferencia = esquerda.
17▶          senão
18▶            retorne
19▶          fim se
20▶        senão
21▶          se existe ponto não visitado contra a preferencia do robô então
22▶            Coloca ponto como objetivo e inverte preferencia.
23▶          senão
24▶            Procura pontos não visitados com dose insuficiente
25▶            se não achou pontos então
26▶              Termina a desinfecção.
27▶            senão
28▶              Coloca ponto mais próximo como objetivo.
29▶            fim se
30▶          fim se
31▶        fim se
32▶      fim se
33▶    fim se
34▶  senão
35▶    se chegou próximo de um ponto qualquer (não objetivo) não visitado e com dose suficiente então
36▶      Marca ponto como visitado.
37▶    fim se
38▶  fim se
39▶ fim enquanto

```

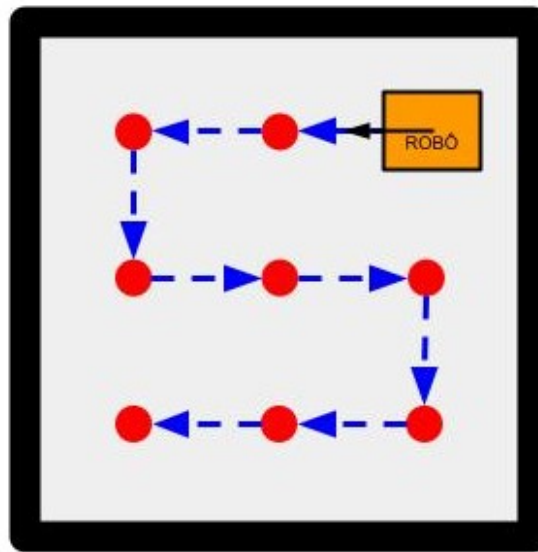


Figura 5.6 – Diagrama ilustra como funciona a varredura. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto.

Algoritmo 5 Função para verificar se dose é suficiente numa região

Entrada: Mapa de radiação; dose ideal; distância de verificação ($Dist$).

Saída: VERDADEIRO ou FALSO.

```

1▶ função VERIFICADOSE()
2▶   para células visíveis a frente do robô de  $-45^\circ$  até  $+45^\circ$  a distância de até
      0,5. $Dist$  faça
3▶     se dose menor que 80% da dose ideal então
4▶       retorne FALSO
5▶     fim se
6▶   fim para
7▶   retorne VERDADEIRO
8▶ fim função

```

ritmo 4. A Fig. 5.7 mostra como funciona o Algoritmo 4 implementado. Inicialmente, o robô percorre os pontos que estão na frente até encontrar um obstáculo. É importante salientar que o ponto é marcado como visitado somente quando o robô está próximo dele (i.e. a pelo menos 20% da distância entre os pontos) e as células alcançadas pela luz na frente do robô, destacadas em verde na Fig. 5.7, possuem pelo menos 80% da dose ideal. Ao não encontrar ponto a frente, ou seja, encontrou a parede, o robô escolhe o ponto não visitado à esquerda como objetivo e sua preferência de objetivo é à direita. Quando não há pontos não visitados à frente e à direita, o robô se direciona para o ponto não visitado à esquerda, inverte a preferência, e continua percorrendo os pontos à frente enquanto houverem pontos não visitados à esquerda. Quando não existem pontos não visitados adjacentes ao robô, o ponto não visitado mais próximo será o objetivo seguinte. A execução

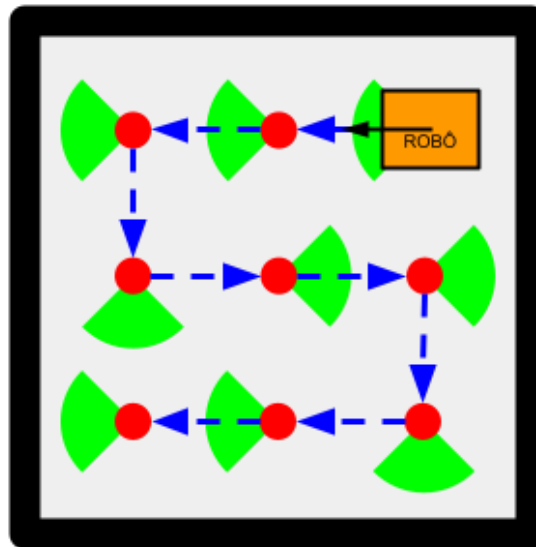


Figura 5.7 – Diagrama ilustra como funciona a varredura. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto. Área com dose de pelo menos 80% da ideal em verde.

termina quando todos os pontos forem visitados.

Apesar de parecer contraintuitivo inicialmente virar o robô para uma direção e colocar a direção oposta como preferencial, isto faz o robô ir reto contornando a parede (pois é impossível virar para dentro da parede), até que esta chegue ao fim. Neste ponto quando ele é obrigado a virar na direção contrária a da preferência, a preferência se inverte e o comportamento inverso é reproduzido. Dessa forma, a trajetória descreve um zigue-zague como mostrado nas Figuras 6.4 e 6.5. Caso a escolha da preferência fosse sempre a mesma do primeiro giro feito pelo robô, a trajetória tenderia a formar uma espiral ao invés de zigue-zague.

A condição de uma dose mínima a frente do robô, calculada utilizando o Algoritmo 5, para marcar o objetivo como visitado assume que a organização das lâmpadas UV proporcionam uma boa distribuição de radiação em torno do robô. Logo, o restante da área ao redor do robô também possui uma dose depositada alta e grande parte do ambiente receberá a dose ideal ao final da desinfecção.

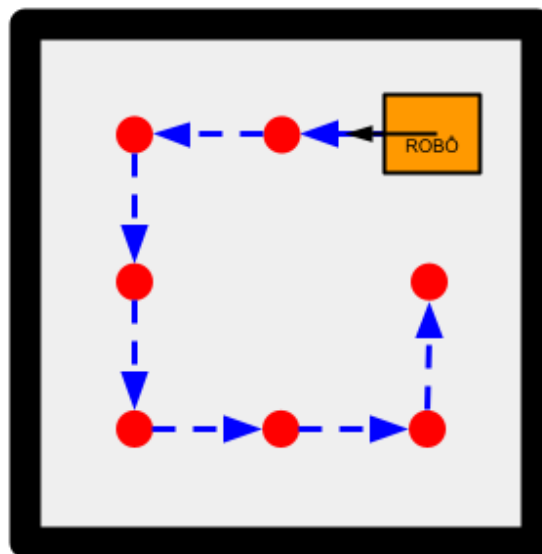


Figura 5.8 – Diagrama ilustra como funciona movimentação seguindo parede. Robô em laranja com seta indicando orientação. Trajetória em azul. Pontos/objetivos em vermelho. Área livre em cinza. Paredes/obstáculos em preto.

5.2.4 Seguir paredes

Por fim, apresentamos uma técnica de navegação¹ desenvolvida pelo grupo de pesquisa Phi-robotics Research Lab da UFRGS no projeto de desinfecção de ambientes junto a empresa Instor. A técnica consiste em determinar vários pontos próximos a paredes/obstáculos e direcionar o robô para percorrê-los. Essa técnica foi uma das escolhidas para desinfetar o ambiente pois é importante que o robô passe perto dos obstáculos para aplicar alta dose, pois a intensidade radiante é inversamente proporcional a distância. Além disso, às vezes pode nem ser interessante varrer totalmente uma área vazia, visto que nesse caso se passaria muito tempo desinfetando apenas o chão (que é algo que pode ser limpo de outras formas mais tradicionais e normalmente exige uma limpeza mais profunda).

A Figura 5.8 mostra a execução da estratégia de seguir paredes em uma sala. O robô inicia no canto superior direito e percorre os pontos vermelhos. Os objetivos são determinados pelo Algoritmo 6 e a informação do mapa de radiação será utilizada para determinar a velocidade do robô. Este controle de velocidade é um ponto muito importante na estratégia pois permite que o robô navegue sem precisar ficar andando, parando e esperando a dose se acumular suficientemente antes de seguir caminho.

¹Submeteu-se um artigo tratando dessa técnica de desinfecção desenvolvida junto a empresa Instor para o periódico *Robotics and Automation Letters* e aguarda-se revisão. O artigo chama-se "Autonomous Environment Disinfection Based on Dynamic UV-C Irradiation Map", de autoria de Mathias Mantelli, Letícia dos Santos, Lucas de Fraga, Giovanna Miotto, Augusto Bergamin, Etevaldo Cardoso, Miguel Serrano, Renan Maffei, Edson Prestes, João Netto e Mariana Kolberg.

Algoritmo 6 Calcula objetivos seguindo parede

Entrada: Mapa do ambiente com obstáculos e área livre; distância mínima da parede; mapa de radiação.

Saída: Objetivo.

- 1▶ Gera trajetória de possíveis objetivos contornando obstáculos na área livre a uma distância mínima das paredes.
 - 2▶ Filtra trajetória para manter com uma distância mínima entre os pontos.
 - 3▶ Exclui pontos da trajetória com dose maior ou igual a ideal.
 - 4▶ **enquanto** existem pontos na trajetória não visitados **faça**
 - 5▶ **se** chegou no objetivo **então**
 - 6▶ Marca ponto sob o robô como visitado.
 - 7▶ Calcula ponto da trajetória mais próximo ao robô
 - 8▶ **se** existem dois pontos equidistantes **então**
 - 9▶ O ponto mais próximo a orientação do robô é escolhido.
 - 10▶ **fim se**
 - 11▶ Coloca ponto como novo objetivo.
 - 12▶ **fim se**
 - 13▶ **fim enquanto**
-

A velocidade do robô \mathbf{r}_s é definida como

$$\mathbf{r}_s = \alpha v, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5.10)$$

onde v é a velocidade máxima do robô e α é o fator que ajusta a velocidade atual e depende da informação do mapa de radiação. O fator α é definido como

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\delta}{\xi}, & \text{caso } \delta < 0.9 \\ 1, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5.11)$$

onde ξ é a dose ideal desejada e δ é a dose média em um semicírculo posicionado na frente da posição atual do robô. δ é definido como

$$\delta = \frac{\sum_{i:\mathbf{r}_\gamma+\frac{\pi}{2}}^{\mathbf{r}_\gamma-\frac{\pi}{2}} D(r \cos i + \mathbf{r}_x, r \sin i + \mathbf{r}_y)}{\sum_{i:\mathbf{r}_\gamma+\frac{\pi}{2}}^{\mathbf{r}_\gamma-\frac{\pi}{2}} T(r \cos i + \mathbf{r}_x, r \sin i + \mathbf{r}_y)}, \quad (5.12)$$

onde \mathbf{r}_γ , \mathbf{r}_x e \mathbf{r}_y são a orientação e a posição do robô, respectivamente. A função $D(\cdot, \cdot)$ retorna a dose da célula e $T(\cdot, \cdot)$ retorna 1 se a célula está em área livre. O raio do semicírculo é definido por r . Logo, δ é a soma da dose das células contidas no semicírculo sobre o total de células.

Portanto, o fator α permite ajustar a velocidade para o robô se mover mais devagar e, conseqüentemente, passar mais tempo em regiões com baixa dose até a dose se apro-

ximar do ideal desejado. Por outro lado, o robô passa rapidamente em regiões com dose alta, pois essa região já possui dose suficiente para a desinfecção. Dessa forma, é evitada a distribuição desigual de dose no ambiente, regiões com dose muito acima do ideal e outras que não foram expostas a radiação.

Outra consequência do controle de velocidade apresentado é que α não sofre mudanças abruptas durante a desinfecção, pois seu valor depende da dose depositada que é um valor incremental que cresce de forma suave. Então, a velocidade também varia suavemente durante a execução.

6 EXPERIMENTOS

A Seção 6.1 verifica se o mapa de radiação funciona como o esperado. Então, os ambientes e configurações para as simulações são apresentadas na Seção 6.2. Após, é analisada a progressão da execução de cada estratégia na Seção 6.3 e os resultados comparativos são apresentados na Seção 6.4 .

6.1 Validação do mapa de radiação

A Instor conduziu testes com lâmpadas reais e medidores de radiação UV-C para validar o mapa de radiação. Inicialmente, foi constatado que o mapa de radiação calculado em Fig. 5.3 aproxima o comportamento da dose depositada pelas lâmpadas UV-C em teste real com o robô em um ambiente contendo Dosímetros UVC¹. Os dosímetros, Figs. 6.1b e 6.1d são indicadores coloríficos feitos de material sensível a exposição de raios UV-C. Ou seja, a cor do material muda após a exposição a radiação. Antes da exposição, o material é amarelo. Depois de ser depositada a dose 50 mJ/cm² (5 J/m²) ou 100 mJ/cm² (10 J/m²), a cor muda conforme o indicado no dosímetro.

Para constatar a eficiência do mapa de radiação em aproximar o comportamento da luz UV-C em ambiente real, foi realizado um teste onde o robô foi deixado parado com todas as lâmpadas ligadas e o dosímetro foi posicionado a 50 cm a frente do robô e a 1 m de altura. O mapa de radiação recebeu a dose ideal de 50 mJ/cm² como entrada e foi atualizado conforme a passagem do tempo. Depois de 130 segundos, as lâmpadas foram desligadas porque o mapa de radiação mostrou que regiões próximas ao robô atingiram a dose ideal, como mostra a área verde em Fig. 6.1a. Como pode ser observado na Fig. 6.1b, o dosímetro indica que foram depositados ao menos 50 mJ/cm² ao final do teste.

Então foi realizado outro teste com os mesmos valores de entrada para o mapa de radiação e mesma configuração do ambiente, porém com novo dosímetro e as lâmpadas ficaram acessas por 191 segundos. Foi possível desinfetar uma área maior que o teste anterior, como é mostrado na Fig. 6.1c. Conforme o esperado, o dosímetro recebeu uma dose maior, como pode ser observado em Fig. 6.1d, cerca de 100 mJ/cm², ou seja, o dobro

¹Dosímetros UVC são feitos com uma tecnologia patenteada de propriedade da Intellego Technologies. Research Institutes of Sweden (RISE) validaram e confirmaram o material fotocromico dos produtos em vários comprimentos de onda UV-C (222 nm, 254 nm, 265 nm e 278 nm) e verificaram a mudança de cor em níveis de doses específicos. Estudos anteriores, (ULTRAVIOLET-C. . . ,) mostraram que a mudança de cor do Dosímetro UVC de amarelo inicial para laranja e rosa escuro correlacionada a uma redução de 3 log (99,9%) de MRSA e C. Dif.

da dose ideal.

A análise visual do resultado do dosímetro não permite avaliar com alta precisão quanto o mapa de radiação é fidedigno ao comportamento real da luz UV-C, porém é possível constatar que o mapa de radiação subestima a dose depositada, o que é importantíssimo para a aplicação de desinfecção. Em outras palavras, é preferível que regiões desinfectadas no mundo real durante a operação do robô sejam retratadas como não recebendo dose suficiente pelo mapa de radiação, ou seja, não desinfectadas. Caso o mapa de radiação superestimasse a dose, regiões não desinfectadas no mundo real seriam indicadas como tendo recebido a dose ideal pelo mapa de radiação, ou seja, desinfectadas, o que poderia colocar os usuários do ambiente em risco.

A Instor, em parceria com outras instituições, também está realizando testes reais com patógenos expostos a luz UV emitida pelo robô e resultados preliminares apontaram que o robô foi capaz de eliminar os organismos com sucesso, desinfectando o região. Ou seja, o resultado do mapa de radiação mostrou-se adequado como indicativo da realidade do processo de desinfecção. Ressalta-se que, até o momento da escrita deste trabalho, seguimos aguardando a publicação destes resultados pela outra instituição parceira da empresa e que não incluímos mais detalhes neste trabalho por isso.

6.2 Experimentos simulados

O robô deve adaptar-se a qualquer tipo de ambiente, das mais variadas formas e tamanhos, contendo mobilhas diversas. Essa versatilidade é um requisito para atingir a autonomia. Então, foram utilizados os cenários apresentados na Fig. 6.2 para simulações.

O quarto de hospital retratado em Fig. 6.2a, é uma sala retangular de 6 m x 14 m com um pequeno banheiro de 1,5 m x 2,5 m. Esse ambiente possui vários objetos e áreas estreitas de difícil acesso para o robô. A desinfecção por UV-C pode ser útil nesse ambiente para complementar a limpeza já realizada por padrão por equipes hospitalares e aumentar a segurança sanitária, pois podem ser eliminados organismos que representam um risco para os trabalhadores responsáveis pela limpeza.

O escritório da Fig. 6.2b é outro ambiente retangular de 5 m x 10 m em que os objetos estão próximos a parede, logo a área livre concentra-se no centro. Nesse ambiente, o processo poderia ser realizado quando as pessoas estiverem ausentes, pois o robô poderia transitar no ambiente realizando a desinfecção e, dessa forma, prevenir a disseminação de doenças no ambiente de trabalho.

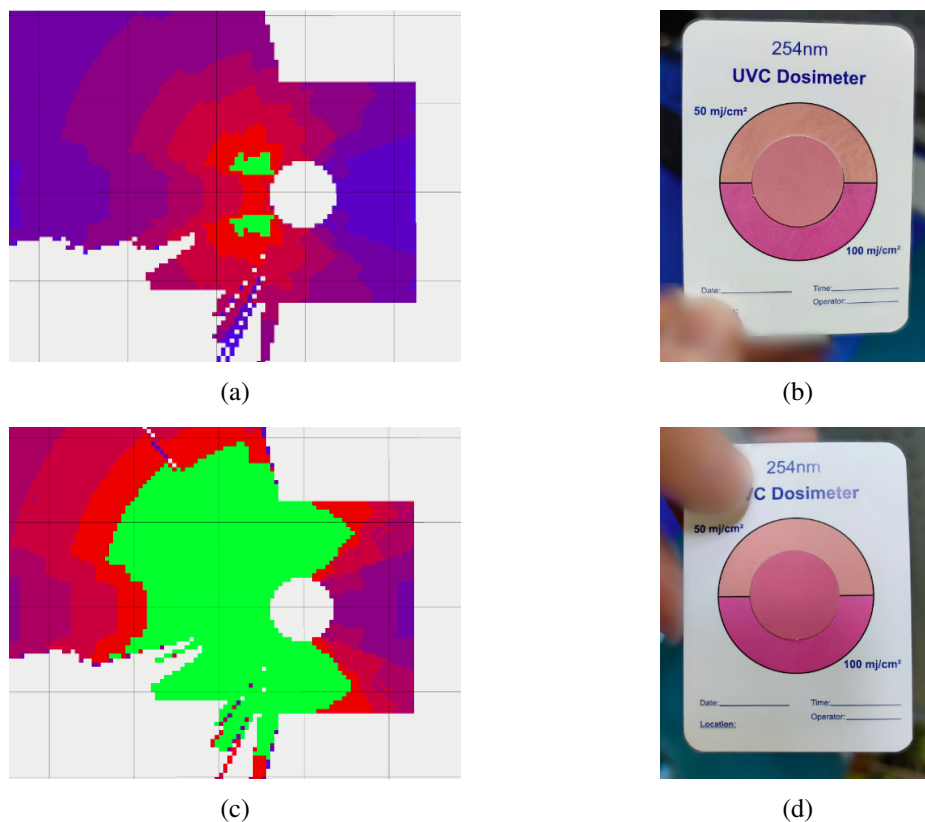


Figura 6.1 – Análise do Mapa de Radiação em comparação com as doses de irradiação medidas por dosímetros UVC. Os mapas de irradiação de dois testes, considerando dose ideal de 50 mJ/cm², com as regiões desinfetadas em verde e quadriculado de 1 m x 1 m, são apresentados em (a) e (c). Os dosímetros UVC representando a dose medida a 50 cm do robô em cada teste são mostrados em (b) e (d).

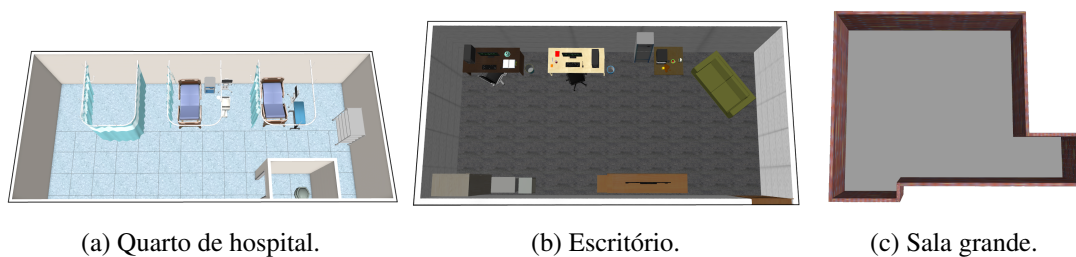


Figura 6.2 – Ambientes de teste.

Finalmente, a Fig. 6.2c retrata um ambiente grande com 70 m² e sem objetos, ou seja, possui uma área livre consideravelmente maior que os ambientes citados anteriormente e o único empecilho para a dispersão luz são as paredes. Esse ambiente também foi utilizado para o teste apresentado na Fig. 5.5.

Foram realizados experimentos utilizando dose ideal de 200 J/m² e 2000 J/m², que serão chamadas de dose baixa e alta, respectivamente. Esses valores foram escolhidos como se a desinfecção estivesse sendo feita para um vírus RNA como o SARS-CoV-2, que necessita de baixa dose de radiação para sua inativação (BIASIN et al., 2021), ou para uma bactéria, que precisa de alta dose de radiação (HIJNEN; BEERENDONK; MEDEMA, 2006; M MOHSENI M, 2021). Alguns valores de dose para inativação de organismos já foram apresentados em Tabela 3.1. Cada combinação de estratégia de navegação, ambiente e dose ideal foi repetida 5 vezes, totalizando 180 experimentos. É importante destacar que cada ambiente possui a posição inicial do robô fixa, independentemente do método de navegação e dose ideal utilizada, e a distância máxima para cálculo da dose depositada é 5 m a partir da lâmpada analisada.

Outro aspecto importante é que, antes de iniciar a navegação no ambiente, o robô sempre realiza um giro na posição inicial com as luzes já ligadas e, conseqüentemente, com o mapa de radiação já executando. Isso é feito porque os sensores usados para o mapeamento do ambiente (laser e câmeras RGB) são voltados para a frente do robô. Então, com o giro inicial é possível ter um panorama melhor do ambiente antes de começar a navegação.

6.3 Análise da execução

Dentre os cinco experimentos realizados com cada configuração, não houve grande diferença de comportamento e resultados destoantes entre as execuções de uma mesma configuração. Então, foi escolhida uma execução qualquer dentre cada configuração para mostrar as trajetórias percorridas pelo robô e a progressão da desinfecção para as execuções escolhidas.

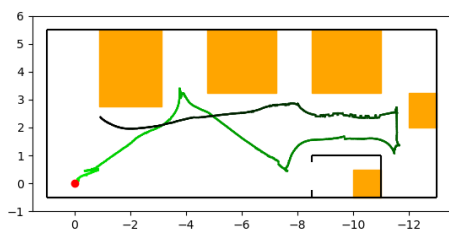
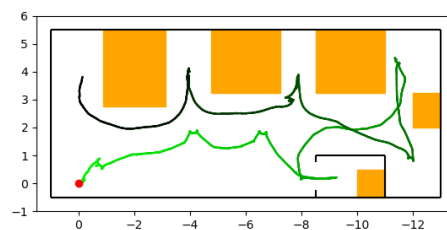
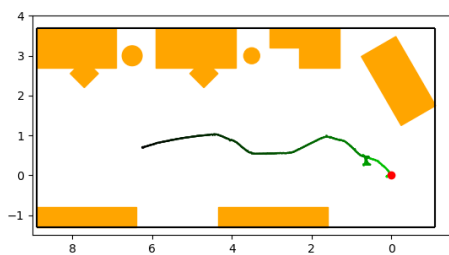
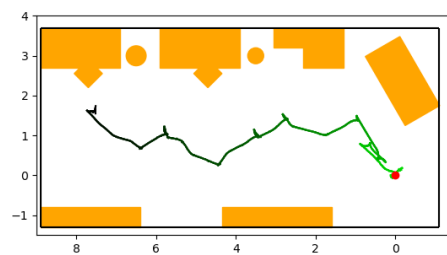
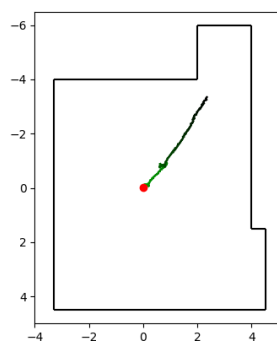
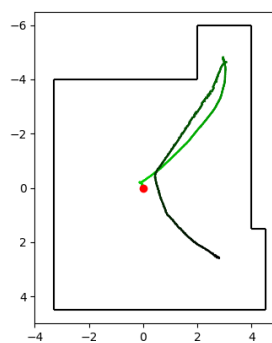
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.3 – Execuções do Voronoi com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.

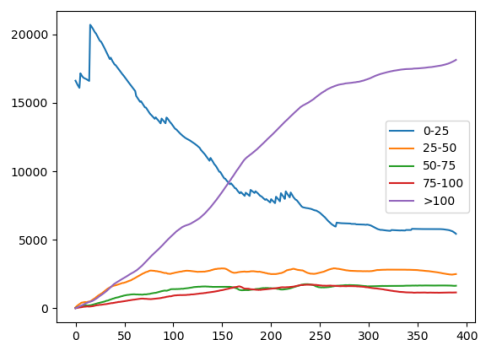
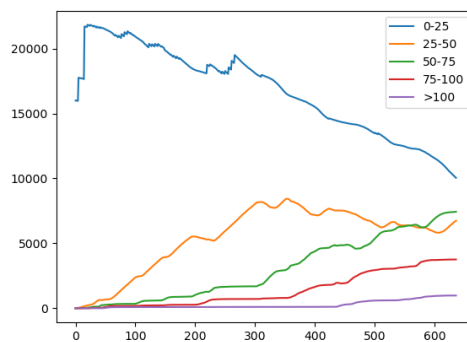
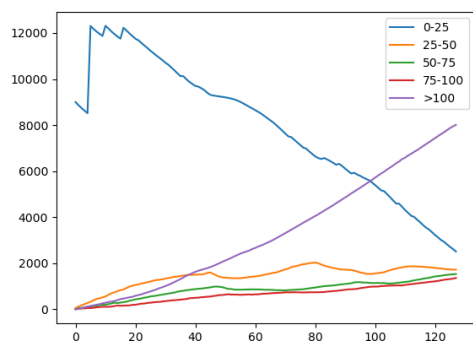
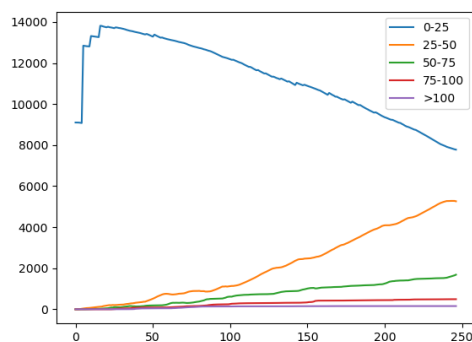
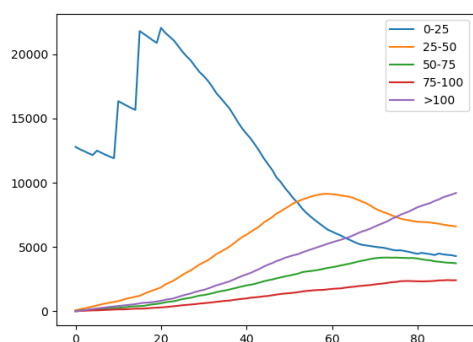
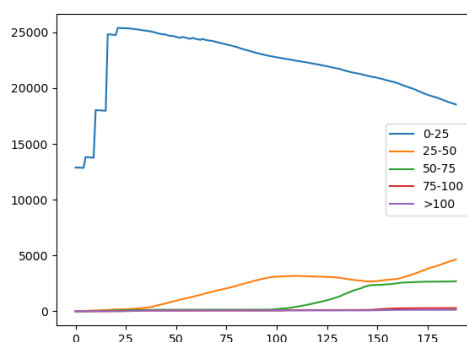
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.4 – Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções da navegação baseada em Voronoi. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

6.3.1 Voronoi utilizando dose

A estratégia baseada no diagrama de Voronoi busca a célula mais próxima no Voronoi que ainda não recebeu uma dose mínima baixa de UV-C. Um comportamento interessante do Voronoi utilizando dose é que um novo objetivo é calculado quando o objetivo anterior passa da dose mínima, ou seja, o robô não precisa necessariamente visitar o objetivo. Como consequência disso, o robô tende a andar em linha reta, pois a frente deposita menos dose que as laterais e as diagonais da frente, o que foi constatado em Fig. 5.3. Também é importante lembrar que o Voronoi garante que passagens estreitas não sejam ignoradas.

São apresentados em Fig. 6.3 e Fig. 6.4 detalhes da execução de alguns experimentos. Os trajetos retratados em Fig. 6.3 mostram que o algoritmo se comportou diferente com cada configuração. Em Fig. 6.3a o robô inicialmente dirigiu-se para um ponto entre a cortina fechada e o leito central. Essa área estreita foi escolhida pois a radiação emitida pelo robô foi bloqueada por uma cortina, e, conseqüentemente, recebeu menos dose que as áreas desobstruídas ao redor da posição inicial.

Ainda observando a Fig. 6.3a, o robô sai da área entre a cortina e o leito central e cruza o quarto até um ponto próximo a porta do banheiro, porém não entra no banheiro. Então, o robô visita o fundo do quarto e chega próximo as áreas estreitas, entretanto não entra, assim como aconteceu com o banheiro. Também aproxima-se da área entre o leito central e o leito da extremidade e não entra. Finalmente, aproxima-se da área entre a parede e a cortina fechada e termina a execução.

Quando é observado o trajeto em Fig. 6.3b, com dose desejada alta, está claro que o robô percorreu inicialmente a região central do quarto e dirigiu-se para as áreas estreitas depois. É possível observar que o robô visitou o banheiro e as outras áreas que o trajeto retratado em Fig. 6.3a não visitou, pois com a dose desejada mais alta essas regiões não receberam dose suficiente com o robô distante.

Ao analisar os trajetos de Fig. 6.3c e Fig. 6.3d no ambiente de escritório, pode-se observar que são semelhantes, porém o trajeto resultante da dose ideal 2000 J/m^2 é mais irregular porque a dose mínima é maior e o robô precisa fazer mais paradas.

Na sala grande, Fig. 6.3e e Fig. 6.3f, o robô inicialmente dirige-se para a extremidade da sala e depois volta para o centro. Para a dose ideal de 200 J/m^2 , isso foi o suficiente para aplicar uma dose acima da mínima sobre o Voronoi e terminar a execução. Já para a dose de 2000 J/m^2 , ainda foi necessário visitar outra extremidade da sala para

então terminar a execução.

Além de analisar as trajetórias desenvolvidas, também podemos analisar a progressão da desinfecção. Nos testes feitos, objetivos são escolhidos entre regiões com baixíssima dose de energia acumulada e, após escolhidos, só deixam de ser objetivos quando se atinge 20% da dose desejada.

É importante salientar que basta aumentar o tempo que o robô permanece naquela posição para aumentar a dose aplicada em cada ponto visitado pelo robô. No entanto, com a análise das trajetórias percebeu-se que a estratégia baseada no Voronoi cobre muito mal alguns ambientes. Ou seja, mesmo que o robô desinfectasse por completo as regiões visitadas, boa parte do mapa permaneceria contaminado.

A Fig. 6.4 mostra a progressão da desinfecção. O início de todas as execuções da imagem é semelhante, com degraus na linha de dose entre 0% e 25% da ideal e outros níveis partindo do zero. Em Fig. 6.4a as células desinfectadas são maioria ao final da operação, o que acontece novamente em Fig. 6.4c e Fig. 6.4e, porém a diferença entre dose igual ou acima do ideal e o restante dos níveis é menor.

Com a dose ideal alta, o desempenho da desinfecção em Fig. 6.4b, Fig. 6.4d e Fig. 6.4f foi insuficiente. Em Fig. 6.4b, a linha de dose 50% a 75% do ideal predomina, diferente de Fig. 6.4d e Fig. 6.4f, onde a linha de dose 25% a 50% do ideal predomina. Isso aconteceu porque o Voronoi no hospital é mais ramificado por causa dos objetos. Então, o robô demora mais para percorrer o ambiente e a dose depositada é maior.

O algoritmo apresentou uma desinfecção satisfatória somente com dose baixa, o que indica que com doses desejadas baixas não se mostra necessário cobrir o ambiente de forma detalhada porque uma pequena energia consegue alcançar distâncias razoáveis. O problema é quando precisa-se aplicar altas doses de energia (sem modificar a configuração de lâmpadas no robô).

6.3.2 BVP guiado a fronteira

O método de BVP guiado a fronteira é o único utilizado para os testes que não utiliza a informação do mapa de radiação como entrada. Esse aspecto possibilita observar como um método de exploração tradicional guiado a fronteiras se comporta quando não são feitas adaptações para o problema específico de desinfecção.

São apresentados em Fig. 6.5 e Fig. 6.6 detalhes da execução de alguns experimentos. Pode ser observado nos trajetos retratados em Fig. 6.5a, 6.5b, 6.5c e 6.5d que

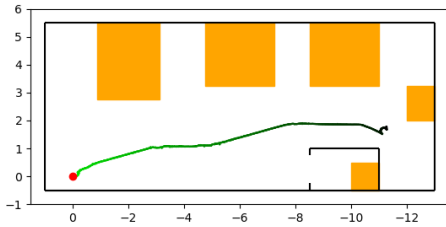
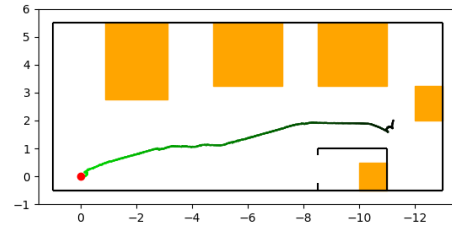
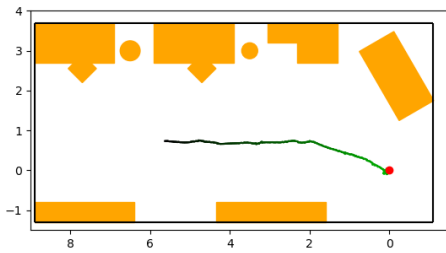
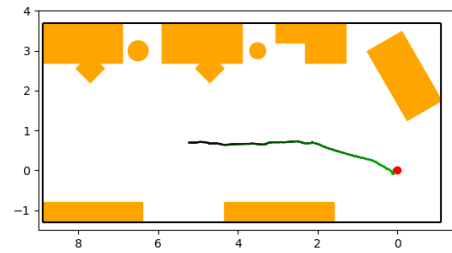
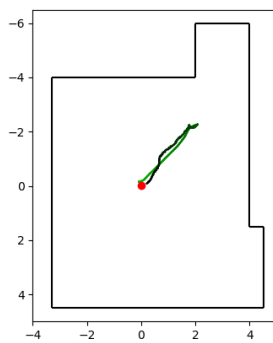
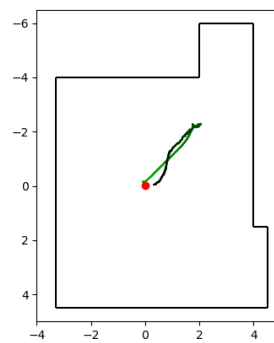
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.5 – Execuções do BVP guiado a fronteira com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.

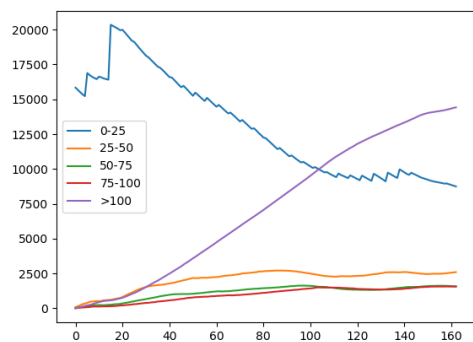
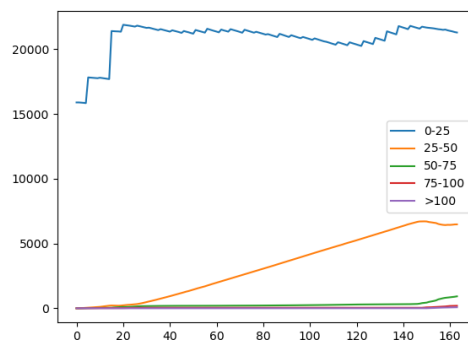
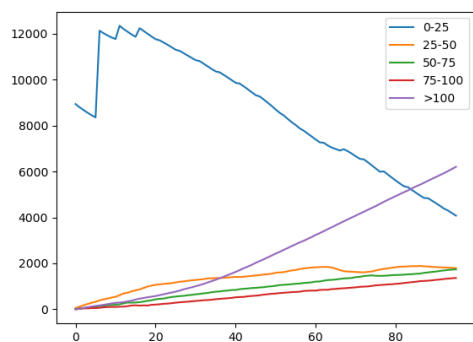
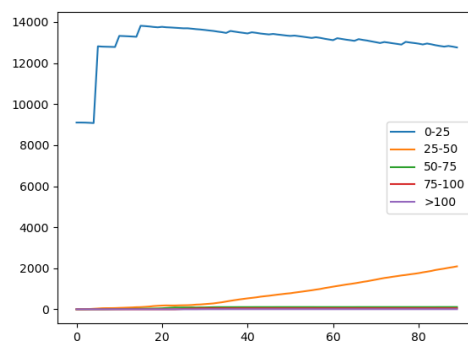
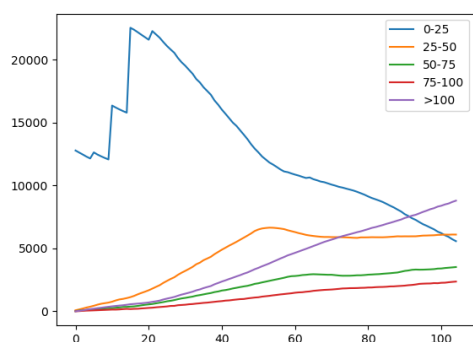
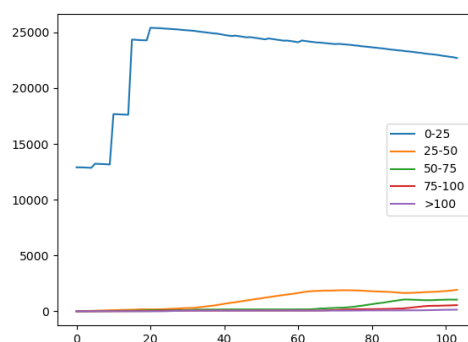
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.6 – Evolução da quantidade de células desinfectadas ao longo de execuções do BVP guiado a fronteira. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

o robô começou na posição inicial, em um canto do ambiente, e dirigiu-se ao outro lado da sala, finalizando a exploração. Essa área era desconhecida depois do giro inicial, pois obstáculos impediram a leitura do espaço e a área estava além do alcance dos sensores. Logo, inicialmente a região possui um potencial atrativo para o robô, que dirigiu-se para lá como esperado.

Quando testado na sala grande, Fig. 6.5e e 6.5f, o robô começou na posição inicial e dirigiu-se à área desconhecida na extremidade da sala. O espaço não foi totalmente mapeado após o giro inicial porque o ambiente é amplo, ou seja, algumas áreas estão além do alcance dos sensores. Depois de mapear a extremidade, o robô retornou ao centro da sala porque foi necessário um tempo adicional para estabilizar o campo potencial, devido a grande área livre da sala.

Também notou-se que os objetos não dificultaram a movimentação e o robô seguiu um trajeto suave passando pelo centro dos ambientes. Os trajetos exibidos em Fig. 6.5 são semelhantes quando é observado o mesmo ambiente, pois a dose ideal, que é uma entrada para o mapa de radiação, não interfere nessa estratégia de navegação.

A Fig. 6.6 retrata a progressão da desinfecção. Os degraus observados na linha dose entre 0% e 25% da ideal acontecem quando o robô descobre uma nova área. Essas variações abruptas não são observadas nos outros níveis de dose. É interessante constatar que a quantidade de células com dose entre 0% e 25% da dose ideal representa uma grande parcela do total de células ao final. Isso acontece principalmente quando a dose ideal é alta, o que já era esperado. Com a dose ideal baixa, a exploração tradicional em velocidade normal apresenta resultados um pouco melhores, com parte considerável do espaço sendo desinfetado simplesmente pela passagem do robô pelo local com as luzes acessas.

6.3.3 BVP guiado a dose baixa

O BVP guiado a dose baixa usa os obstáculos como potencial repulsivo e regiões com dose abaixo de um valor mínimo como potencial atrativo. Também é necessário estabelecer um ponto de referência, de acordo com o Algoritmo 3. Devido a organização das lâmpadas do Jaci, a frente do robô recebe menos dose que as diagonais da frente e laterais, como pode ser observado na Fig. 5.3b. Então, o ponto de referência está a frente do robô posicionado a 75 cm do centro do robô.

A dose mínima utilizada nos experimentos foi 80% da ideal para dose ideal 200

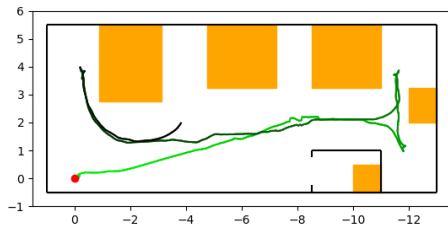
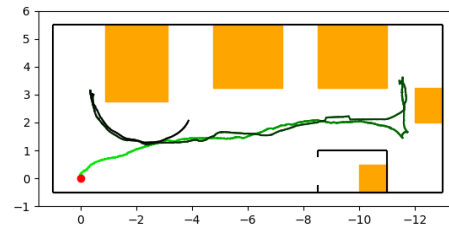
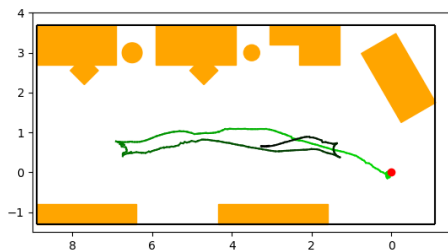
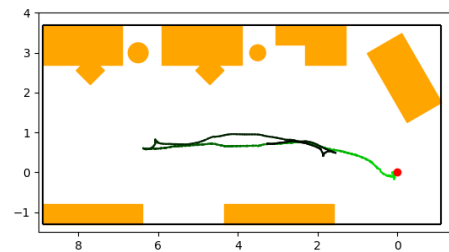
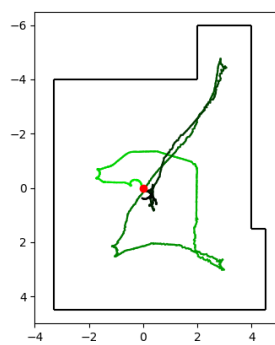
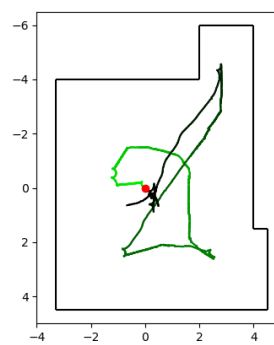
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.7 – Execuções do BVP guiado a dose baixa com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.

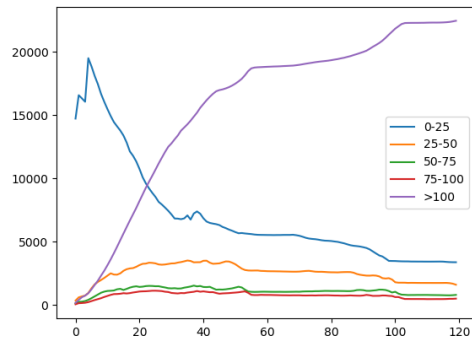
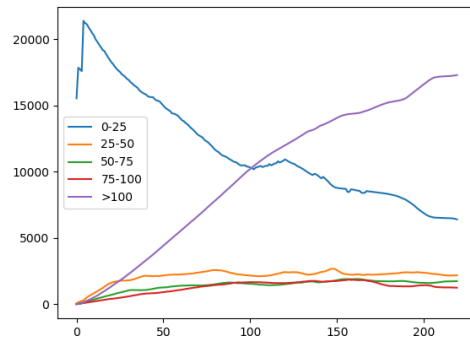
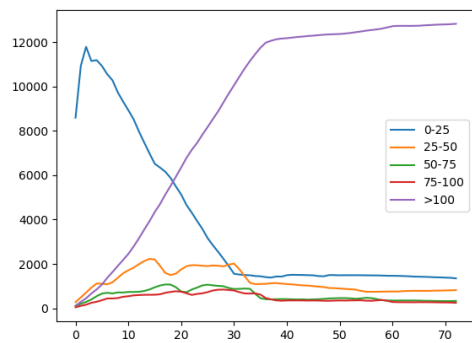
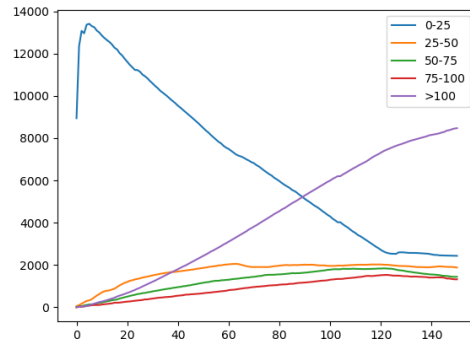
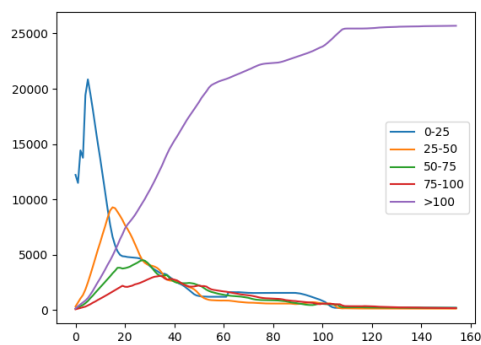
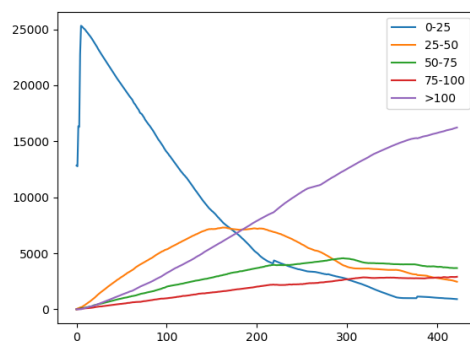
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.8 – Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções do BVP guiado a dose baixa. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

J/m² e 20% para 2000 J/m², ou seja, 160 J/m² e 400 J/m² respectivamente. Note que poderia ser usada uma porcentagem fixa alta como dose mínima em todos os testes, porém se a dose desejada é muito alta (como 2000 J/m²) o processo exploratório se torna excessivamente lento e o ganho de desinfecção não justifica tanto, conforme se verificou em testes preliminares.

Nas figuras Fig. 6.7 e 6.8 são apresentados detalhes da execução dos experimentos. Os trajetos retratados em Fig. 6.7 são semelhantes quando comparados o mesmo ambiente. O robô iniciou a operação e dirigiu-se a uma extremidade do ambiente que ainda existiam células desconhecidas, assim como aconteceu com o BVP, no quarto de hospital e no escritório. Entretanto ao chegar no fundo da sala, o comportamento das trajetórias do BVP guiado a dose baixa diferem consideravelmente quando comparados ao BVP, que inclusive terminou a desinfecção prematuramente nos ambientes citados.

As Figs. 6.7a e 6.7b diferem ligeiramente no trajeto percorrido pelo robô ao chegar no fundo do quarto de hospital. Isso aconteceu devido a diferença da dose mínima em relação a ideal, pois a dose mínima de 80% da dose ideal baixa produziu um potencial atrator maior na área atrás do banheiro. É importante notar que o robô não entrou no banheiro do quarto de hospital, provavelmente porque o potencial repulsivo da porta anulou e o potencial atrativo de dentro do banheiro.

Após, o robô dirige-se no quarto de hospital para a área com menor dose depositada, que fica próxima ao ponto inicial. Pode-se observar que o robô contorna a cortina fechada e termina a execução apontando para a área entre a cortina fechada e o leito central.

Observando os trajetos retratados em Fig. 6.7c e 6.7d, depois de chegar ao fundo do escritório, o robô voltou para uma área próxima a posição inicial. Esse comportamento aconteceu porque ainda existiam células com a dose abaixo da mínima que atraíram o potencial. Quando os trajetos são comparados aos trajetos do BVP no escritório, pode-se perceber que o trajeto do BVP guiado a dose é menos suave.

O comportamento do BVP guiado a dose na sala grande mostrado em Fig. 6.7e e 6.7f foi muito diferente do BVP tradicional. Inicialmente, o robô dirigiu-se para a área atrás da posição inicial. O que faz sentido, pois a área que recebe menos radiação é atrás do robô, como pode ser observado na Fig. 5.3b. Então, o robô transitou na sala até depositar uma dose acima da mínima na porção central do ambiente.

A progressão da desinfecção pode ser observada na Fig. 6.8. Inicialmente, há um pico na dose entre 0% e 25% em todos os casos porque o robô começou a transitar no

ambiente e descobriu uma nova área. É interessante observar que os gráficos de dose baixa apresentam quantidades constantes em cada faixa de dose ao final da execução. Isso indica que o campo potencial resultante dos obstáculos e dose depositada estabiliza ao longo tempo, assim como a movimentação final do robô.

Os resultados obtidos demonstraram que o método é efetivo para desinfecção com dose baixa e possui uma eficiência menor para dose alta, porém desinfecta bem melhor que os métodos testados até então.

6.3.4 Varredura 1 m

A varredura visita pontos em posições fixas no ambiente separados por uma distância fixa parametrizável. Nesta subseção, são apresentados resultados obtidos com distância de separação de 1 m. Os resultados são mostrados em Fig. 6.9 e Fig. 6.10.

Quando o robô realiza a desinfecção no quarto de hospital, Fig. 6.9a e Fig. 6.9b, o robô segue em frente até achar a parede. Na Fig. 6.9a a dose ideal já foi depositada próximo ao ponto inicial, então o robô dirige-se ao objetivo distante e continua em linha reta até o fundo do quarto. Isso aconteceu porque a preferência de parede é esquerda e os pontos a esquerda estão muito próximos ou são obstáculos. Já em Fig. 6.9b, não foi depositada a dose mínima próxima a posição inicial. Logo, o robô escolhe um objetivo próximo e percorre uma trajetória em forma de zigue-zague até o fundo do quarto.

Após o robô chegar no fundo do quarto de hospital, é definido um ponto na área estreita entre a cortina fechada e o leito central como próximo objetivo. Ao robô se aproximar, a execução termina porque os sensores percebem que o ponto está muito próximo a obstáculos e não existem outros pontos a serem visitados. É interessante notar que o robô não entrou no banheiro, pois o ponto que poderia ser um objetivo, estava muito próximo a obstáculos.

As Fig. 6.9c e Fig. 6.9d do trajeto no escritório são semelhantes. O robô inicia próximo à parede e faz um zigue-zague no ambiente até chegar ao fundo do ambiente.

Pode-se observar nas Fig. 6.9e e Fig. 6.9f que o robô andou para frente até achar a parede e continuou a execução com um objetivo a esquerda e preferência de parede à direita. Depois, escolheu um objetivo distante e prosseguiu com o zigue-zague. Uma diferença é que o trajeto de dose ideal alta ainda visita outra área que não atingiu a dose mínima antes de terminar a execução.

A Fig. 6.10 mostra a progressão da desinfecção. Os gráficos com dose ideal baixa

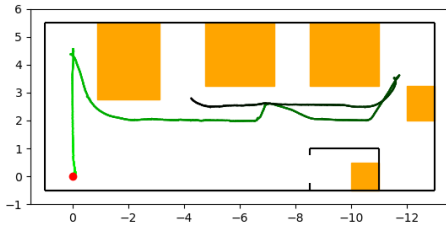
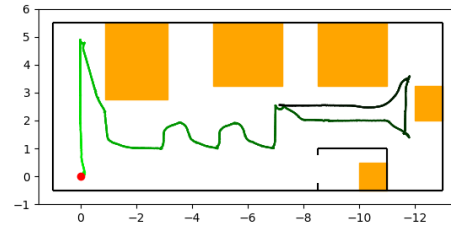
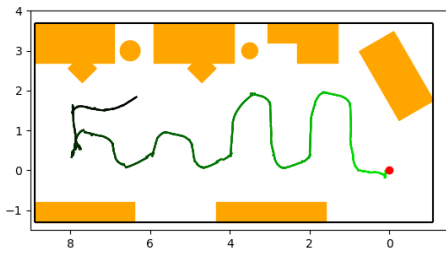
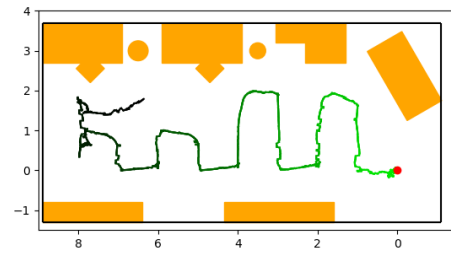
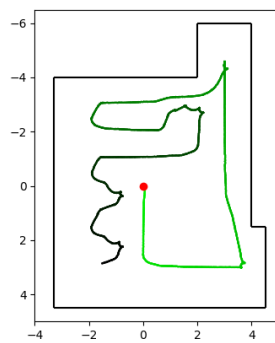
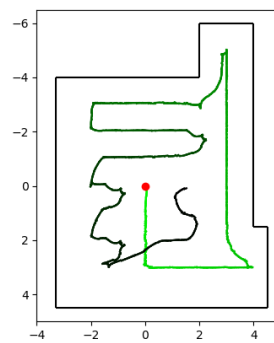
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.9 – Execuções da Varredura 1 m com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.

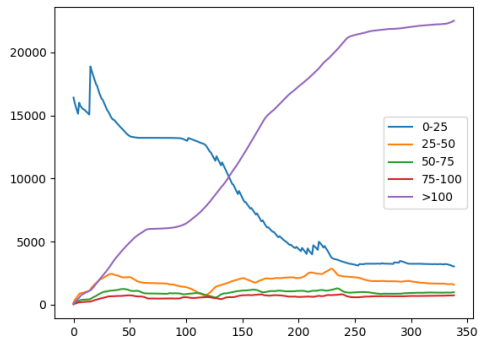
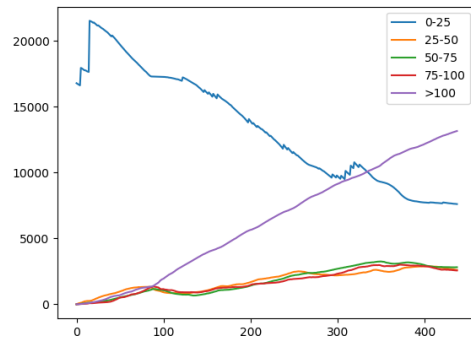
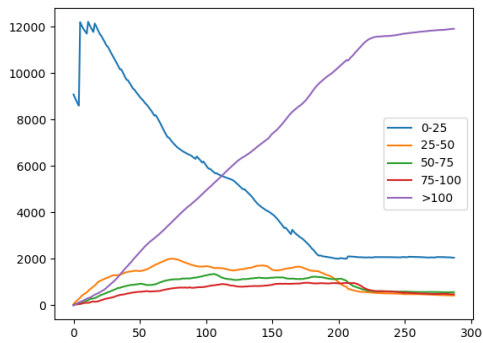
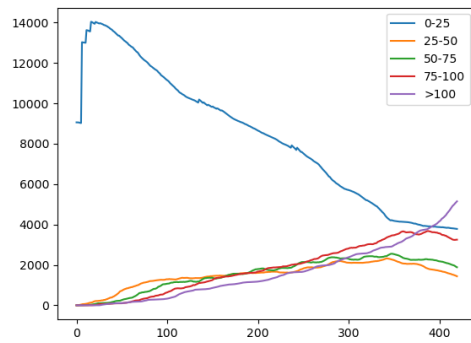
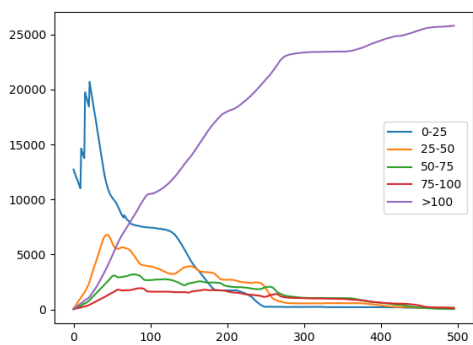
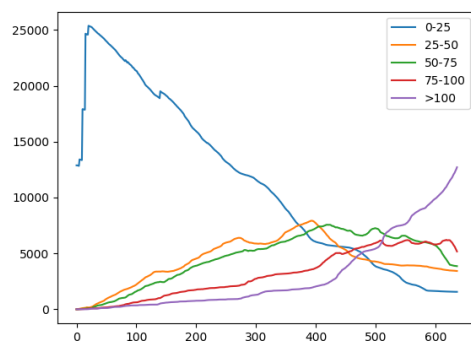
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.10 – Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções da Varredura 1 m. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

apresentam linhas praticamente constantes ao final da operação e a maioria das células foram desinfectadas. Já com dose ideal alta, a quantidade de células com dose ideal ou acima superou os outros níveis, porém a diferença não foi tão grande como aconteceu com a dose ideal baixa.

6.3.5 Varredura 2 m

Decidiu-se verificar quanto a distância entre os pontos selecionados impactam na qualidade de desinfecção. Os resultados de algumas execução com 2 m entre os objetivos são mostrados em Fig. 6.11 e Fig. 6.12.

Como a varredura determina pontos em posições fixas a serem visitados no ambiente, quanto maior o espaçamento entre pontos, mais difícil de gerar objetivos que caiam em espaço livre. Por isso, é possível perceber uma enorme dificuldade em cobrir o espaço todo com o espaçamento de 2 m. Inclusive, vale lembrar que durante a navegação o robô realiza o crescimento de obstáculos para manter uma margem de segurança que evite colisões, e isso atrapalha ainda mais na geração dos objetivos.

Alguns aprimoramentos no algoritmo poderiam ser feitos para, por exemplo, decidir qual é a melhor posição para iniciar a geração de pontos. No entanto, isso traria apenas melhorias superficiais, pois pode-se ver que espaçamentos grandes não geram boas coberturas, e espaçamentos suficientemente pequenos cobrem bem o ambiente, independentemente da posição inicial.

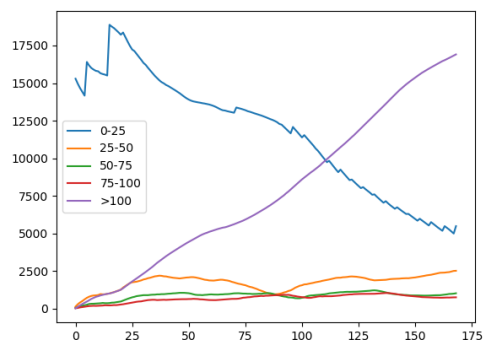
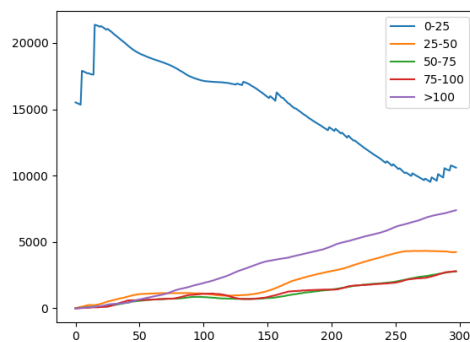
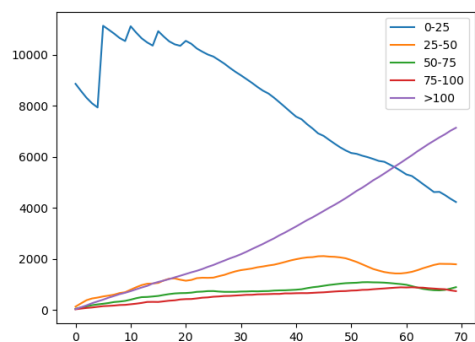
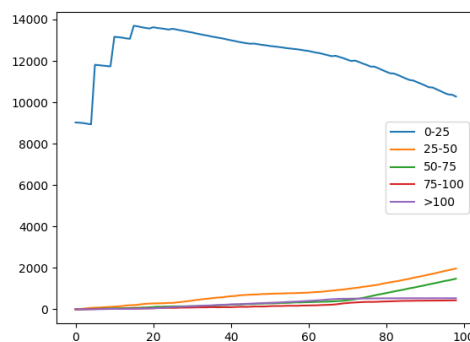
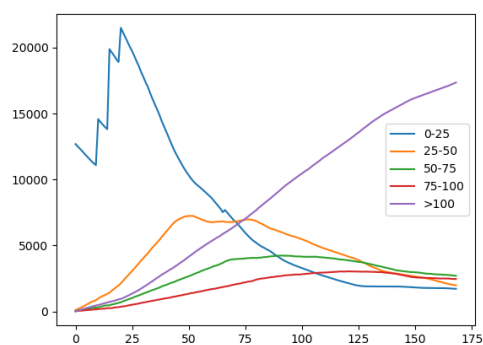
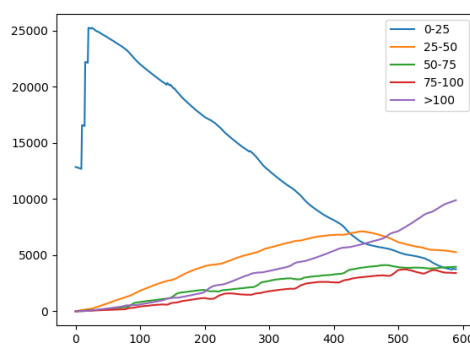
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.12 – Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções da Varredura 2 m. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

6.3.6 Seguir parede com velocidade controlada

A estratégia de seguir a parede utiliza a informação do mapa de radiação para definir os pontos candidatos a objetivos, conforme descrito pelo Algoritmo 6. A informação também é utilizada para controlar a velocidade, segundo a Eq. 5.10.

A execução detalhada de alguns experimentos é retratada em Fig. 6.13 e Fig. 6.14. As trajetórias da Fig. 6.13 são semelhantes quando o experimento é executado no mesmo ambiente.

Considerando os experimento no quarto de hospital, o robô inicialmente contorna todos os obstáculos seguindo a parede a direita até chegar ao espaço entre a parede e a cortina fechada. É importante notar que o robô entra no banheiro considerando a dose ideal alta, mostrado na Fig. 6.13b. Em Fig. 6.13a, o robô não entra no banheiro porque os pontos da trajetória naquela área já possuem dose acima da ideal e a desinfecção termina com o robô próximo a posição inicial.

Nas Fig. 6.13c e Fig. 6.13d o robô iniciou a operação contornando o sofá e, posteriormente, contornou os outros objetos até chegar próximo a posição inicial.

Quando o robô realizou a desinfecção na sala grande, Fig. 6.13e e Fig. 6.13f, a execução começou com a parede mais próxima e continuou até contornar todas as paredes. O trajeto com a dose ideal baixa terminou antes porque os pontos restantes da trajetória já possuíam dose acima da ideal, logo, não haviam objetivos a serem visitados.

Ao observar a progressão da desinfecção em Fig. 6.12, todas as execuções resultaram em maioria das células desinfetadas, principalmente quando é utilizada a dose ideal baixa. O melhor resultado para dose alta é Fig. 6.14b. Isso aconteceu porque o quarto de hospital possui objetos distribuídos pelo ambiente que formam passagens estreitas e a estratégia de seguir paredes, geralmente, passa duas vezes nessas áreas.

Com a dose ideal baixa em Fig. 6.14e, a dose depositada enquanto o robô fazia o giro inicial foi suficiente para o centro da sala. Com um comportamento diferente no mesmo ambiente, a desinfecção seguindo paredes com dose alta, mostrada na Fig. 6.14f obteve o pior desempenho dentre os apresentados porque o robô transitou perto das paredes e não depositou dose suficiente no centro. No entanto, como comentado anteriormente, isto é uma característica da estratégia, que foca somente na desinfecção próxima a obstáculos.

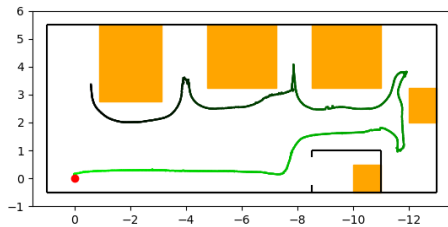
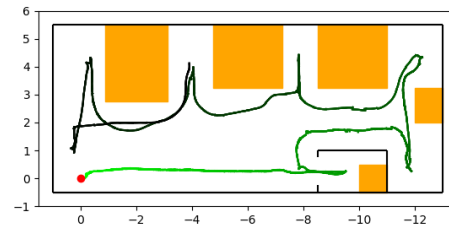
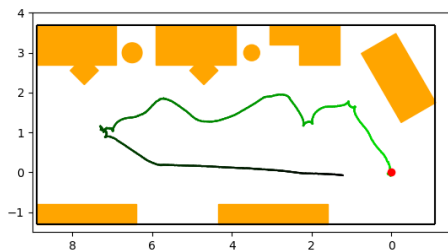
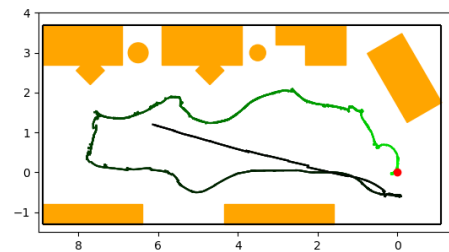
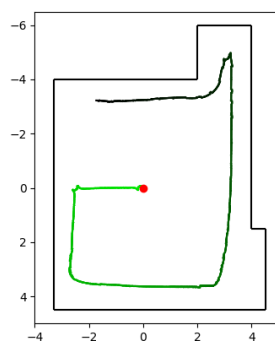
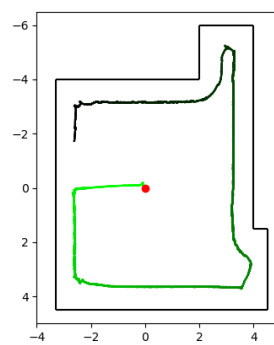
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.13 – Execuções do seguir parede com configurações diferentes. Trajeto do robô em degradê de verde até preto, posição inicial com ponto vermelho, paredes em preto, obstáculos em laranja.

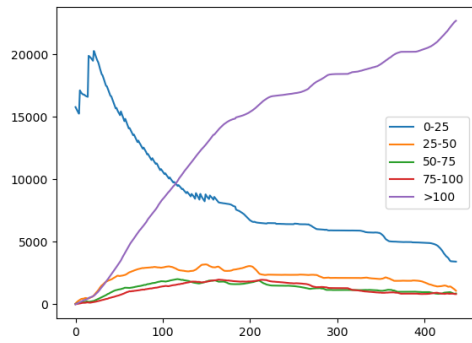
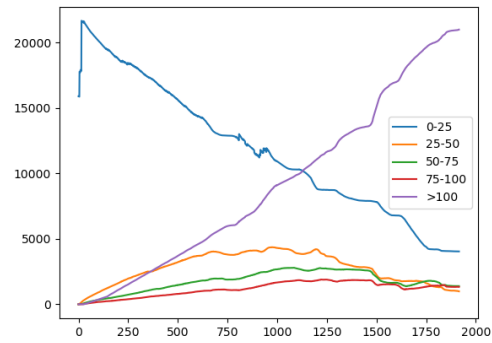
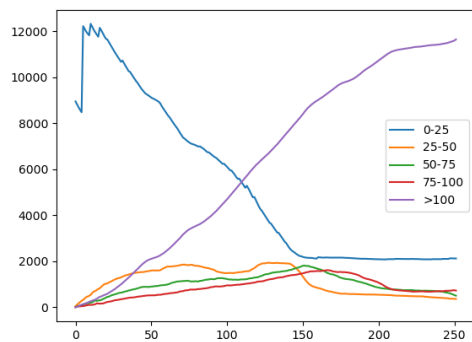
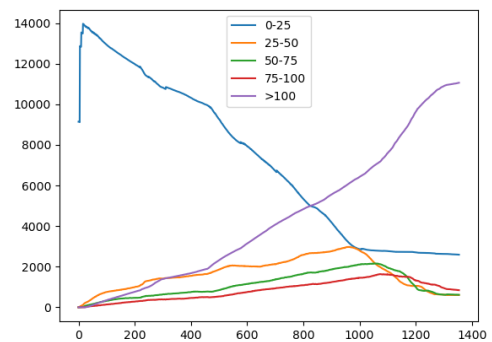
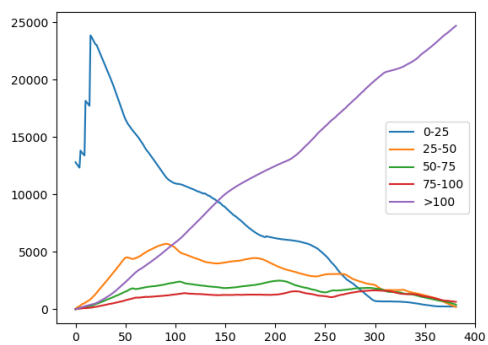
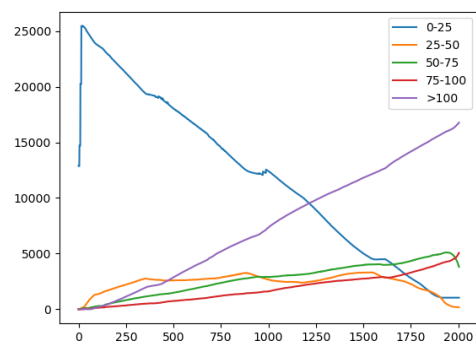
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.14 – Evolução da quantidade de células desinfetadas ao longo de execuções do seguir parede. O eixo vertical mostra a quantidade de células com até 25%, 50%, 75%, 100% e mais de 100% da dose ideal; e o eixo horizontal mostra as amostras coletadas durante a execução.

6.4 Análise comparativa

Os dados resultantes dos 180 experimentos realizados foram concentrados em gráficos comparativos. Em Fig. 6.15 foram analisadas quantas células foram desinfectadas, ou seja, receberam dose maior ou igual a ideal, em relação ao total de células livres possíveis em cada ambiente. Também foi analisado a porcentagem de células desinfectadas próximas a obstáculos, considerando células a até 50 cm de distância de obstáculos. Já Fig. 6.16 e Fig. 6.17 apresentam o tempo de operação e distância percorrida pelo robô, respectivamente.

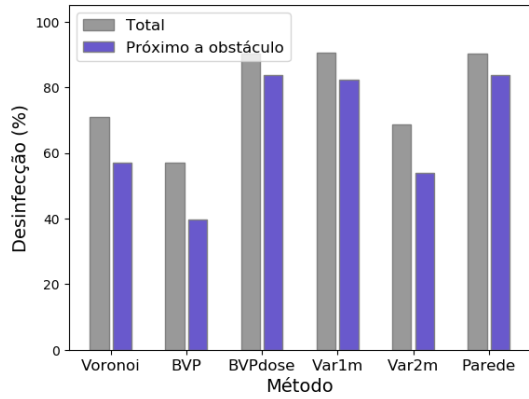
É importante avaliar a desinfecção próxima a obstáculos, pois os organismos patogênicos se concentram em obstáculos e, conseqüentemente, desinfecção pode ser considerado o suficiente para reduzir a contaminação do ambiente.

Os gráficos Fig. 6.15a, Fig. 6.15c e Fig. 6.15e, resultantes da dose ideal baixa, apresentaram melhor desempenho para desinfecção que os gráficos Fig. 6.15b, Fig. 6.15d e Fig. 6.15f de dose ideal alta.

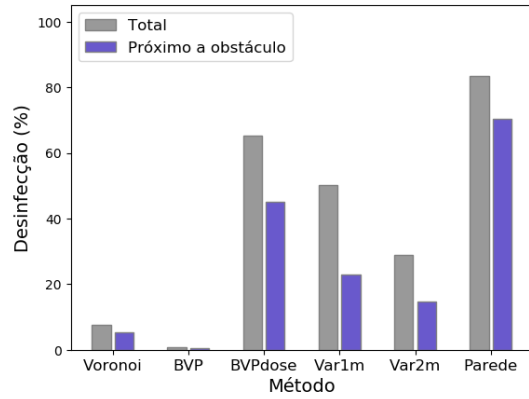
O BVP guiado a fronteira teve um resultado pior que os outros métodos em todos os gráficos de Fig. 6.15 porque ele foi o método mais rápido, como pode ser observado em Fig. 6.16, e com a menor distância percorrida, como mostrado na Fig. 6.17. Ou seja, o tempo não foi suficiente para depositar a dose e não foi coberto todo o ambiente. Esse resultado mostra que é necessário considerar a informação do mapa de radiação para obter uma desinfecção de ambientes eficiente.

Em Fig. 6.15a, Fig. 6.16a e Fig. 6.17a, Voronoi e varredura com espaço de 2 m obtiveram desempenho semelhante para a desinfecção, entretanto a varredura com espaço de 2 m demorou mais e a distância percorrida pelo robô foi menor, isto é, a dose foi distribuída de forma desigual. Ainda observando o mesmo conjunto de gráficos, BVP guiado a dose, varredura com espaço de 1m e navegação seguindo parede desinfetaram mais de 80% da área próxima a obstáculos e mais de 90% da área total, entretanto a navegação seguindo parede se destaca com o menor tempo de execução que corresponde a aproximadamente dois terços do tempo dos outros métodos com o desempenho semelhante.

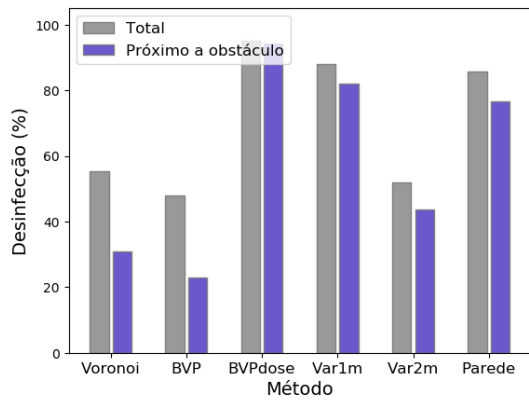
Em Fig. 6.15b, Fig. 6.16b e Fig. 6.17b, quando é desconsiderado o BVP guiado a fronteira, Voronoi foi o mais rápido e a varredura com espaço de 2 m foi o com o menor trajeto. Isso justifica o desempenho ruim para desinfecção dos métodos. A varredura com espaço de 1 m foi o método mais rápido com desinfecção total maior que 50%. BVP guiado a dose e navegação seguindo parede demoraram praticamente o dobro do tempo.



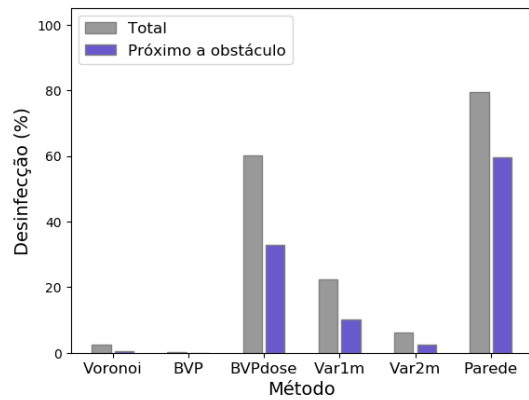
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².



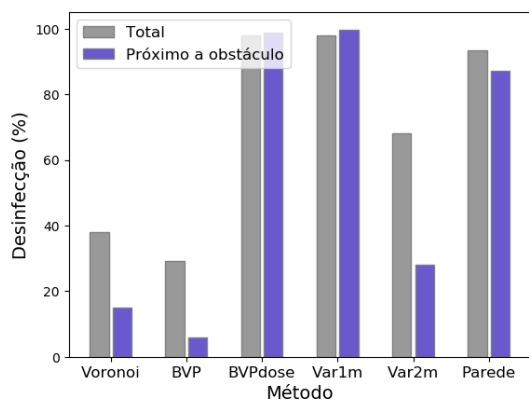
(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².



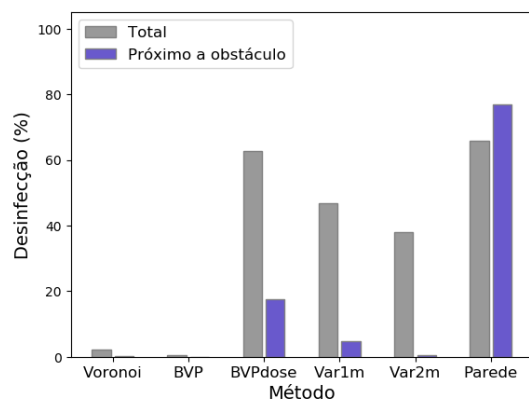
(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².



(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².



(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².



(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.15 – Gráficos da desinfecção nos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A.

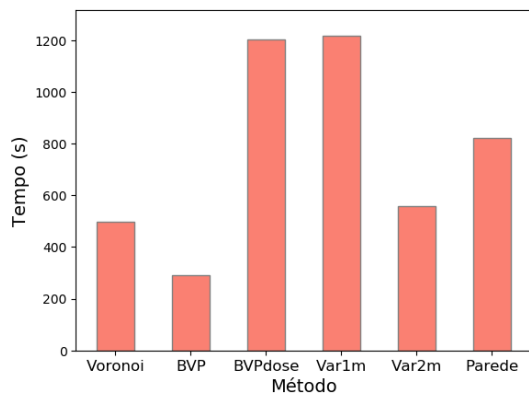
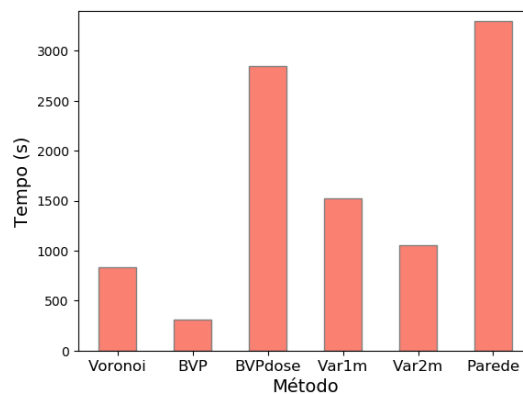
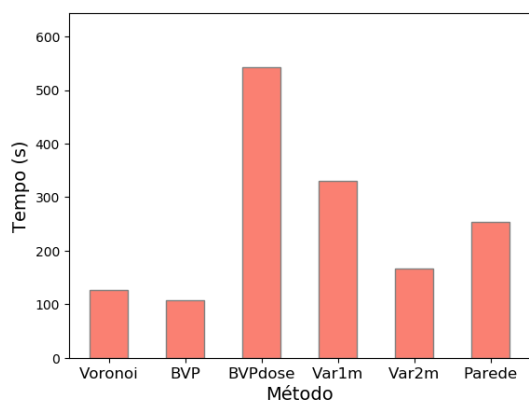
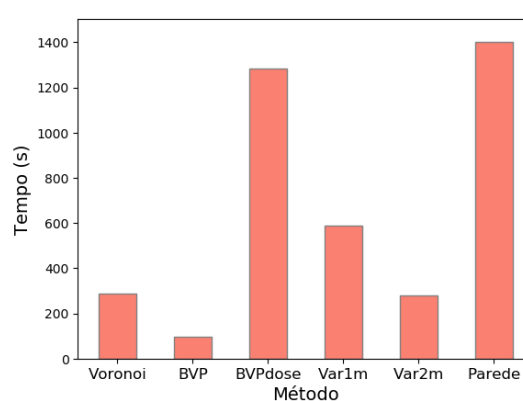
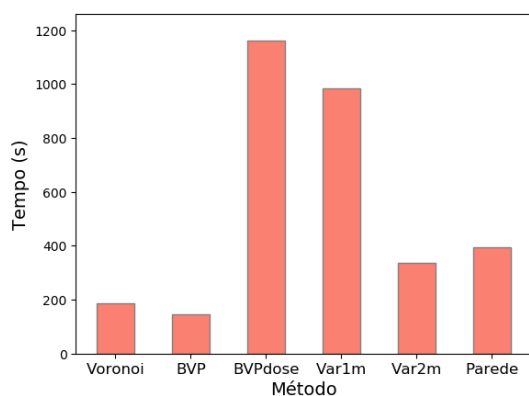
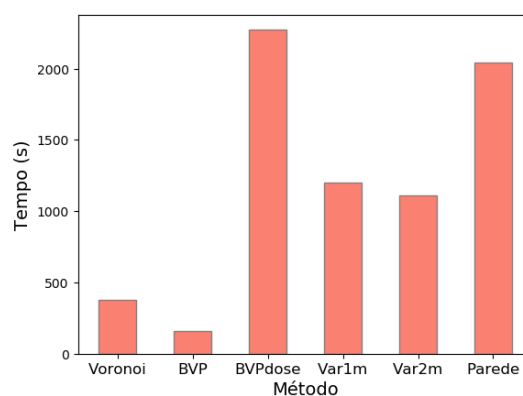
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.16 – Gráficos com tempo para desinfecção dos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A.

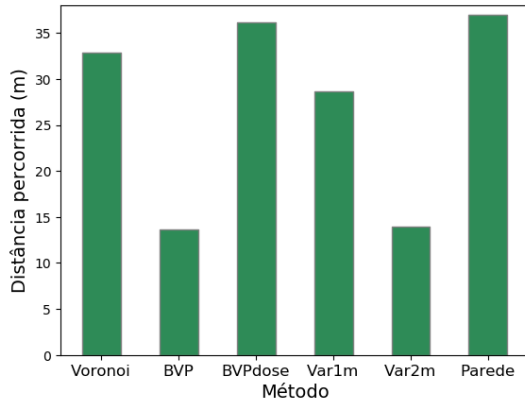
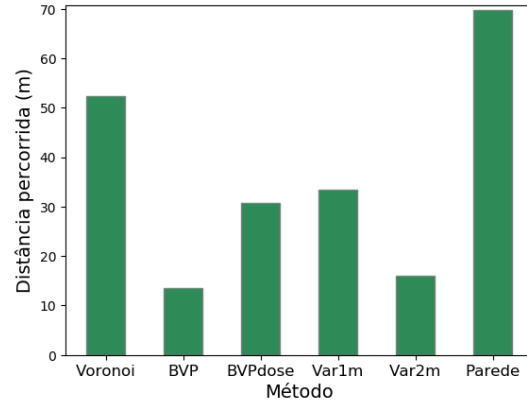
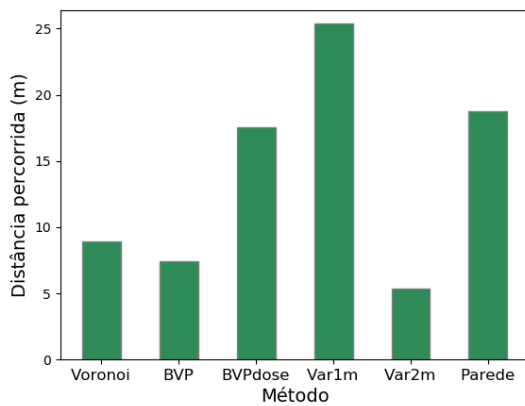
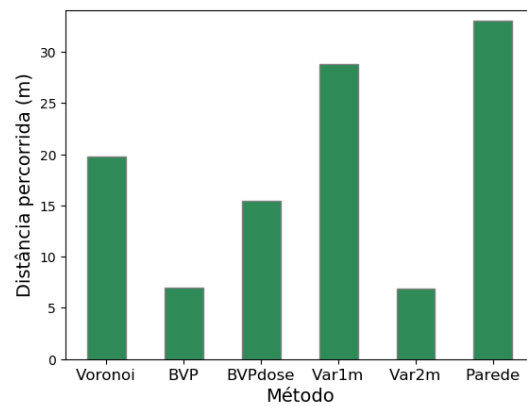
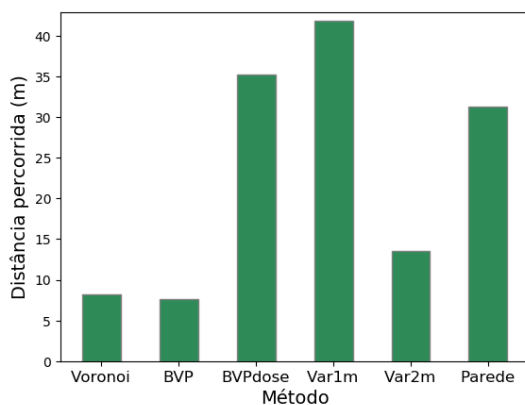
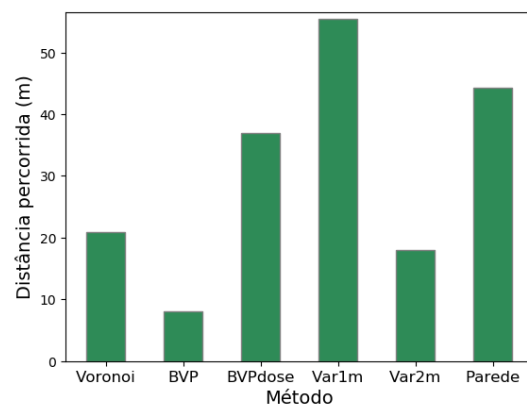
(a) Quarto de hospital, dose ideal 200 J/m².(b) Quarto de hospital, dose ideal 2000 J/m².(c) Escritório, dose ideal 200 J/m².(d) Escritório, dose ideal 2000 J/m².(e) Sala grande, dose ideal 200 J/m².(f) Sala grande, dose ideal 2000 J/m².

Figura 6.17 – Gráficos da distância percorrida pelo robô para desinfecção nos ambientes. Dados extraídos de Apêndice A.

Quando são observados os experimentos no quarto de hospital com dose ideal de 2000 J/m^2 , o robô utilizando o método de navegação seguindo parede percorreu a maior distância, mais de 10 m a mais que o Voronoi, e obteve o melhor desempenho em área total e em área próxima a objetos.

Em Fig. 6.15c, Fig. 6.16c e Fig. 6.17c, o melhor desempenho para desinfecção foi do BVP guiado a dose, que também foi o método mais lento. BVP guiado a fronteira, Voronoi e varredura com espaço de 2 m desinfectaram de forma semelhante porque a execução nesse ambiente foi parecida, o robô dirigiu-se ao centro do escritório e terminou a desinfecção. Já os métodos BVP guiado a dose e navegação seguindo parede fizeram o robô dar uma volta no escritório e varredura com espaço de 1 m fez um zigue-zague dentro do escritório, o que explica a maior distância percorrida.

Fig. 6.15d mostra que a navegação seguindo parede obteve o melhor resultado porque o algoritmo se adaptou melhor a dose ideal alta nesse ambiente. Em Fig. 6.15e, Fig. 6.16d e Fig. 6.17e, os métodos BVP guiado a dose e varredura com espaço de 1 m demoraram muito mais que os outros, o que resultou em desinfecção maior que 95% da área total e próxima a obstáculos. Já o navegação seguindo parede também obteve uma alta desinfecção e demorou aproximadamente 40% do tempo dos métodos citados anteriormente.

Observando o mesmo conjunto de gráficos da sala grande, houve grande diferença entre desinfecção total e próxima aos obstáculos quando são observadas as varreduras e BVP porque o robô não aproximou-se das paredes do ambiente. Também é possível notar que o Voronoi obteve um desempenho ruim porque o ambiente vazio e praticamente simétrico resultou em um diagrama de Voronoi muito simplificado. Então, o Voronoi terminou a operação rapidamente quando comparado aos métodos com desinfecção melhor.

Em Fig. 6.15e, Fig. 6.16e e Fig. 6.17e, somente a navegação seguindo parede atingiu uma alta desinfecção. O BVP guiado a dose atingiu a segunda melhor desinfecção nessa configuração, porém demorou mais que a navegação seguindo parede.

Os resultados mostraram que o navegação seguindo parede obteve o melhor desempenho de desinfecção. Dentre as características deste método, o controle de velocidade teve grande influência na desinfecção final, ou seja, foi mais efetivo controlar a velocidade em função da dose que parar até a região atingir uma dose alta, como varredura e BVP guiado a dose fazem.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso apresentou diversas estratégias para desinfecção autônoma de ambientes com robô terrestre utilizando luz ultravioleta. Um mapa de radiação dinâmico permite indicar a quantidade de energia depositada em cada região do ambiente e foi utilizado como entrada para algumas estratégias. A precisão do mapa de radiação em refletir o comportamento real da luz UV foi atestada em experimentos reais utilizando dosímetros UV-C. Foram realizados experimentos em múltiplos cenários com estratégias de navegação com diferentes características e adaptadas ao problema de desinfecção.

As principais contribuições do trabalho foram:

- Técnica de mapeamento de radiação 2D que funciona para doses de UV-C arbitrárias, enquanto considera as fontes de luz no espaço 3D;
- Adaptação de diversas estratégias de planejamento de alto nível para movimentação autônoma do robô no ambiente para considerar as informações do mapa de radiação, ou seja, adaptadas ao problema de desinfecção utilizando luz UV.
- Experimentos em vários ambientes simulados considerando doses desejadas diferentes, o que permitiu observar a eficiência das estratégias para realizar a desinfecção de forma autônoma.
- Análise detalhada da execução das estratégias, observando o trajeto percorrido, a progressão da desinfecção, a desinfecção final, tempo de execução e distância percorrida.

Os experimentos mostraram que a escolha do método de navegação não é crítica quando o objetivo é depositar uma baixa quantidade de energia, desde que o robô aproxime-se dos obstáculos a serem desinfetados. Entretanto, com valores de dose desejada maiores, a escolha do método é fundamental para alta cobertura da desinfecção.

É importante destacar que não é possível garantir a desinfecção completa de qualquer ambiente utilizando apenas luz UV-C. O robô sempre estará limitado em termos de navegação pela configuração de obstáculos no ambiente, lembrando que os obstáculos também geram oclusões para as fontes de luz. Em todo caso, o mapa de radiação pode ser utilizado para indicar regiões que precisam de outra estratégia para serem desinfetadas.

Como trabalho futuro, podem ser implementadas e testadas outras estratégias como o BVP com distorções locais dadas por preferências, que permite ajustar o campo

potencial para o robô andar mais próximo a obstáculos, porque foi observado que seguir paredes obteve um bom desempenho. Além disso, tendo em vista os resultados obtidos, é possível investigar a melhor forma de desinfetar um ambiente dadas as restrições de tempo (por exemplo, quando os períodos em que uma sala ficará vazia são muito curtos). Finalmente, outra ideia que está sendo estudada atualmente é medir a eficácia das estratégias em ambientes controlados contendo patógenos, o que seria a melhor validação experimental possível.

REFERÊNCIAS

AL-DAHMAN, M. R. H.; SCHMIDT, K. W. Safe and efficient path planning for omni-directional robots using an inflated voronoi boundary. **Çankaya Üniversitesi Bilim ve Mühendislik Dergisi**, v. 16, n. 2, p. 46–69, 2019.

ANVISA/MS/BRASIL. **Nota técnica nº 82/2020/SEI/COSAN/GHCOS/DIRE3/ANVISA : uso de luz ultravioleta (UV) para desinfecção de ambientes públicos e hospitalares**. 2020. <<http://bibliotecadigital.anvisa.ibict.br/jspui/handle/123456789/404>>. Acessado em 03-08-2021.

BIASIN, M. et al. Uv-c irradiation is highly effective in inactivating sars-cov-2 replication. **Scientific Reports**, Nature, v. 11, n. 6260, 2021.

CHANPRAKON, P. et al. An ultra-violet sterilization robot for disinfection. In: **IEEE International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)**. [S.l.], 2019.

CHOSSET, H. M. et al. **Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation**. [S.l.]: MIT press, 2005.

CONTE, D.; LEAMY, S.; FURUKAWA, T. Design and map-based teleoperation of a robot for disinfection of covid-19 in complex indoor environments. In: **2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)**. [S.l.: s.n.], 2020.

GRISSETTI, G. et al. A tutorial on graph-based slam. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 2, n. 4, p. 31–43, winter 2010. ISSN 1941-1197.

GRISSETTI, G.; STACHNISS, C.; BURGARD, W. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 23, n. 1, p. 34–46, Feb 2007. ISSN 1941-0468.

GUETTARI, M.; GHARBI, I.; HAMZA, S. Uvc disinfection robot. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 28, n. 30, p. 40394–40399, 2021.

GUO, Z.; HALL, R. W. Parallel thinning with two-subiteration algorithms. **Commun. ACM**, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 32, n. 3, p. 359–373, mar 1989. ISSN 0001-0782. Available from Internet: <<https://doi.org/10.1145/62065.62074>>.

HALPERIN, D.; KAVRAKI, L.; LATOMBE, J. claude. Robotics. In: **In Discrete and Computational**. [S.l.]: CRC Press, 1997.

HIJNEN, W.; BEERENDONK, E.; MEDEMA, G. Inactivation credit of uv radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. **Water Research**, v. 40, n. 1, p. 3–22, 2006. ISSN 0043-1354. Available from Internet: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313540500610X>>.

INSTOR PROJECTS AND ROBOTICS. <<https://www.instor.com.br/projeto/9>>. Acessado em 09-09-2021.

- KOWALSKI, W. **Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection**. [S.l.]: Springer science & business media, 2010.
- LATOMBE, J.-C. **Robot motion planning**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1991.
- M MOHSENI M, B. J. M. Sensitivity of bacteria, protozoa, viruses, and other microorganisms to ultraviolet radiation. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 126, n. 126021, 2021.
- MAFFEI, R. **Segmented DP-SLAM**. Dissertation (Master) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2013.
- MAKARENKO, A. et al. An experiment in integrated exploration. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 534–539 vol.1.
- MCGREGOR, W. G. Dna repair, dna replication, and uv mutagenesis. In: ELSEVIER. **Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings**. [S.l.], 1999. v. 4, n. 1, p. 1–5.
- Prestes e Silva, E. et al. Exploration method using harmonic functions. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 40, n. 1, p. 25–42, 2002. ISSN 0921-8890. Available from Internet: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889002002099>>.
- QUEK, P. H.; HU, J. Indicators for photoreactivation and dark repair studies following ultraviolet disinfection. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, Oxford University Press, v. 35, n. 6, p. 533, 2008.
- SCHÖNER, G.; DOSE, M.; ENGELS, C. Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 16, n. 2, p. 213–245, 1995. ISSN 0921-8890. Moving the Frontiers between Robotics and Biology. Available from Internet: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889095000496>>.
- SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Springer handbook of robotics**. [S.l.]: springer, 2016.
- TAN, X. et al. Research on graph-based slam for uvc disinfection robot. In: **2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1064–1069.
- TAVAKOLI, M.; CARRIERE, J.; TORABI, A. Robotics, smart wearable technologies, and autonomous intelligent systems for healthcare during the covid-19 pandemic: An analysis of the state of the art and future vision. **Advanced Intelligent Systems**, Wiley Online Library, v. 2, n. 7, p. 2000071, 2020.
- TISENI, L. et al. Uv-c mobile robots with optimized path planning: Algorithm design and on-field measurements to improve surface disinfection against sars-cov-2. **Robotics & Automation Magazine**, IEEE, 2021.
- ULTRAVIOLET-C (UV-C) Monitoring Made Ridiculously Simple: UV-C Dose Indicators for Convenient Measurement of UV-C Dosing. <<https://securerusercontent.com/104.238.71.109/1hp.63d.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/05/Dosimeters-ID-Week-2019.pdf>>. Acessado em 09-09-2021.

VIEIRA, A. W.; DREWS, P. L. J.; CAMPOS, M. F. M. Spatial density patterns for efficient change detection in 3d environment for autonomous surveillance robots. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 11, n. 3, p. 766–774, July 2014. ISSN 1558-3783.

APÊNDICE A — DADOS BRUTOS

Tabela A.1 – Dados resultantes dos experimentos com dose ideal de 200 J/m².

		Quarto de hospital					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	499,2	292,7	1.201,4	1.216,5	557,6	822,9
	DP	38,7	43,5	152,4	161,9	38,1	154,9
Distância (m)	média	32,9	13,6	36,2	28,7	14,0	37,0
	DP	2,3	0,3	0,8	2,4	0,3	3,2
Desinfecção (%)	média	70,9%	57,1%	90,4%	90,5%	68,7%	90,2%
	DP	4,6%	9,7%	0,7%	2,1%	1,0%	2,1%
Desinfecção obstáculos (%)	média	57,1%	39,7%	83,7%	82,2%	54,0%	83,7%
	DP	4,6%	11,0%	1,6%	3,6%	1,2%	4,0%
		Escritório					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	127,27	107,77	543,49	329,81	167,06	253,22
	DP	2,38	19,28	18,81	63,5	12,26	30,39
Distância (m)	média	8,89	7,41	17,55	25,38	5,31	18,78
	DP	0,33	0,55	1,18	2,22	0,54	2,17
Desinfecção (%)	média	55,3%	47,8%	95,1%	87,9%	51,9%	85,7%
	DP	1,8%	6,2%	1,2%	1,9%	4,8%	2,6%
Desinfecção obstáculos (%)	média	31,0%	23,0%	94,2%	81,9%	43,6%	76,5%
	DP	0,8%	8,1%	2,9%	2,6%	3,3%	5,7%
		Sala grande					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	187,5	146,0	1159,7	982,6	336,4	393,6
	DP	31,0	47,5	46,9	56,5	30,9	29,8
Distância (m)	média	8,2	7,6	35,2	41,9	13,5	31,3
	DP	2,7	3,6	2,1	1,4	0,4	1,4
Desinfecção (%)	média	38,1%	29,3%	97,9%	97,8%	68,2%	93,5%
	DP	6,1%	9,1%	0,1%	0,3%	3,2%	0,7%
Desinfecção obstáculos (%)	média	14,9%	5,8%	98,7%	99,6%	28,1%	87,1%
	DP	9,1%	7,1%	0,5%	0,8%	5,7%	1,2%

Tabela A.2 – Dados resultantes dos experimentos com dose ideal de 2000 J/m².

		Quarto de hospital					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	834,6	308,6	2.845,3	1.521,5	1059,2	3.297,7
	DP	97,2	73,6	320,3	111,8	7,0	118,8
Distância (m)	média	52,3	13,5	30,8	33,4	16,1	69,7
	DP	7,5	0,3	6,8	2,4	0,3	5,2
Desinfecção (%)	média	7,6%	0,9%	65,3%	50,1%	28,8%	83,4%
	DP	5,7%	1,3%	4,7%	2,7%	0,6%	1,2%
Desinfecção obstáculos (%)	média	5,3%	0,6%	45,0%	23,0%	14,6%	70,4%
	DP	3,8%	0,6%	5,5%	3,4%	0,4%	2,0%
		Escritório					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	288,83	94,63	1284,68	588,21	278,19	1402,94
	DP	20,54	1,7	32,24	71,93	43,86	155,68
Distância (m)	média	19,77	6,97	15,44	28,82	6,84	33,05
	DP	2,44	0,46	0,61	1,98	1,93	4,29
Desinfecção (%)	média	2,4%	0,1%	60,1%	22,3%	6,3%	79,4%
	DP	1,0%	0,0%	1,3%	9,4%	1,8%	1,8%
Desinfecção obstáculos (%)	média	0,5%	0,0%	33,0%	10,2%	2,6%	59,6%
	DP	0,7%	0,0%	1,7%	7,1%	1,2%	4,2%
		Sala grande					
		Voronoi	BVP	BVPdose	Var1m	Var2m	Parede
Tempo (s)	média	374,4	157,5	2276,2	1203,6	1111,7	2044,4
	DP	76,9	9,3	104,7	42,8	14,5	39,3
Distância (m)	média	20,9	8,0	36,9	55,5	18,0	44,3
	DP	4,0	0,2	1,7	1,5	0,3	4,9
Desinfecção (%)	média	2,1%	0,6%	62,6%	46,9%	37,9%	65,8%
	DP	1,7%	0,1%	1,1%	3,5%	1,1%	4,0%
Desinfecção obstáculos (%)	média	0,2%	0,0%	17,5%	4,7%	0,5%	76,8%
	DP	0,2%	0,0%	2,5%	0,9%	0,1%	2,6%