

# Plataforma móvel Robótica-UV para desinfecção de ambientes: uma solução no combate à COVID-19 e outros agentes patogênicos

Fabio Suim Chagas<sup>1</sup>, Erick Bezerra de Carvalho<sup>1</sup>, José L. O. Schramm<sup>1</sup>, Gabriel M. Lima<sup>1</sup>, Emanuel Mendes Soares<sup>1</sup>, Onias Castelo Branco Silveira<sup>1</sup>, Clarisse da Costa Rufino<sup>1</sup>, Viviane Silva Souza Freitas<sup>1</sup>, João Guilherme Oliveira Carvalho de Melo<sup>1</sup>, Jauvane Cavalcante de Oliveira<sup>2</sup>, Carlos Nelson Elias<sup>1</sup>, Paulo Fernando Ferreira Rosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)  
Praça Gen. Tibúrcio, 80, Urca – Rio de Janeiro - RJ – Brazil

<sup>2</sup>Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC)  
Av. Getúlio Vargas, 333, Quitandinha – Petrópolis – RJ – Brazil

fsuim@yahoo.com.br, ebcarvalho17@gmail.com, lauroschramm@hotmail.com, gabrielmartinslima@gmail.com, mendes.emanuel.eng@gmail.com, oniascbs@gmail.com, clarisse.rufino@ime.eb.br, viviane.ime@gmail.com, jgocm@cin.ufpe.br, jauvane@lncc.br, elias@ime.eb.br, rpaulo@ime.eb.br

**Abstract.** *In this paper, we propose the development of a robot to assist in combating Coronavirus disease (COVID-19), which will act in the sterilization of indoor environments such as classrooms, hospitals, gyms, offices, and restaurants. Based on studies dating back a decade, the emission of ultraviolet (UV) light may be one of the main allies in combating COVID-19. The system consists of constructing a robot capable of taking a walk in a structured environment, carrying built-in ultraviolet ray emission lamps. In addition, the robot will be equipped with a teleoperation system, considering the danger of ultraviolet rays to human beings. To conclude, we present a series of experiments with the prototype to validate the platform.*

**Resumo.** *Neste trabalho, propomos o desenvolvimento de um robô para auxiliar no combate à COVID-19, e outros agentes patogênicos. O robô atuará na esterilização de ambientes internos como salas de aula, hospitais, academias, escritórios e restaurantes. Com base em estudos que datam de uma década, a emissão de luz ultravioleta classe C (UVC) pode ser um dos principais aliados no combate à COVID-19. O sistema consiste na construção de um robô capaz de passear em um ambiente estruturado, carregando lâmpadas de emissão de raios ultravioleta embutidas. Além disso, o robô será equipado com um sistema de teleoperação, considerando o perigo dos raios ultravioleta para os seres humanos. Para concluir, apresentamos uma série de experimentos com o protótipo para validar a plataforma.*

## 1. Introdução

A doença COVID-19 causada pelo vírus SARS-CoV-2 [Lana et al. 2020] causou milhares de mortes em todo planeta [Our World in Data 2021]. Felizmente, o esforço conjunto de cientistas de todo o mundo possibilitou a disponibilização de vacinas em poucos

meses após o começo da pandemia em 2020. Mesmo com o surgimento das vacinas, precisamos nos preocupar com as variantes, pois o vírus tem a capacidade de realizar mutações [Altmann et al. 2021], e este fato aumenta a periculosidade. Além disso, o surgimento da vacina faz com que a população relaxe nas medidas sanitárias, e isso é um problema, pois a transmissão do vírus se dá pelo ar, por meio de gotículas que podem ser expelidas durante o contato humano-humano [Fisher and Heymann 2020]. Isso inviabiliza diversas atividades em grupo, como aulas presenciais, plantões de emergência hospitalar, entre outros. Diante do exposto, é necessário investigar e implementar medidas que auxiliem no combate e redução do risco de contaminação. O vírus SARS-CoV-2 pode incubar em humanos por 2 a 10 dias [Kampf et al. 2020]. Durante esse período, as gotículas expelidas podem cair em diferentes superfícies, ou o vírus pode se espalhar ao tocar a mão da pessoa infectada que tocou a boca e depois algum objeto. Outro fator problemático é o tempo que o vírus permanece ativo fora do corpo, pois o SARS-CoV-2 foi detectado na forma infecciosa 72 horas em plástico, 48 horas em aço inoxidável, 4 horas em cobre e até 24 horas em papelão [van Doremalen et al. 2020]. Boas práticas de higiene, uso de máscara, vacina e isolamento social são as formas mais eficazes de evitar a contaminação. Outra opção para auxiliar na desinfecção é a adoção da radiação UVC [Johnson 2016, Beck et al. 2014]. O uso desta técnica foi investigado em [Darnell et al. 2004, Duan et al. 2003] e a radiação UVC no comprimento de onda de  $254\text{ nm}$  mostrou-se eficaz na inativação do SARS-CoV-1. Consequentemente, devido à semelhança entre os vírus SARS-CoV-1 e SARS-CoV-2 [Zhou et al. 2020], estudos indicam que a radiação é eficaz para este último. A radiação UVC atua no vírus em nível molecular, danificando o DNA/RNA e inibindo a replicação [Tseng and Li 2005]. Um fator importante para a aplicação da radiação UV é a dosagem necessária para inativar o vírus. A sugestão de dosagem para o SARS-CoV-2 é de  $58\text{ J.m}^{-2}$  [Kowalski et al. 2020].

Com base neste cenário, propomos o desenvolvimento de um robô para desinfecção de ambientes internos, com foco inicial em salas de aula. O robô deve operar por um controle misto, autônomo, e pela intervenção de um operador. Além disso, o robô deve otimizar a caminhada para esterilizar o maior número possível de espaços e conseguir identificar a presença de humanos, pois a radiação é prejudicial a eles. Este artigo está organizado como segue, inicialmente são feitas as considerações sobre a modelagem do problema; a seção 3 aborda o projeto do robô; a seção 4 diz respeito aos experimentos e resultados e para finalizar na seção 5 trata da conclusão e trabalhos futuros.

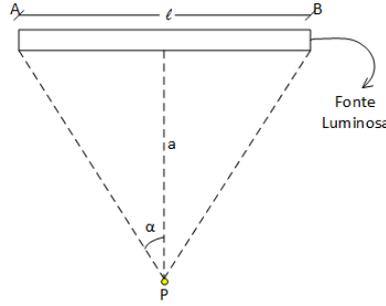
## 2. Considerações iniciais

Esta seção possui o propósito de definir os sensores de emissão de radiação, tempo de desinfecção e velocidade de operação do robô. Para tal, O primeiro passo para a especificação do robô é calcular a quantidade de radiação necessária para inativar o vírus. Algumas considerações devem ser feitas como: (i) determinar o modelo matemático para o cálculo da dosagem UVC; (ii) cálculo do tempo de radiação e (iii) especificação da fonte de radiação.

### 2.1. Modelo matemático

A Figura 1 mostra uma fonte de radiação UVC tubular.

$E$ , dado pela equação 1, é a irradiação em uma pequena superfície no ponto  $P$  por uma fonte  $AB$  de comprimento  $l$ .



**Figura 1. Fonte Luminosa irradiando um ponto  $P$  a uma distância  $a$ . Adaptado de [B.V 2006]**

$$E = \frac{\varphi}{2\pi^2 l a} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (1)$$

Onde  $\varphi$  é o fluxo total de irradiação em Watts ( $W$ ) e  $\alpha$  é o ângulo congruente formado pela bissetriz do triângulo  $A\hat{P}B$ . Para uma distância grande da lâmpada, usa-se a equação 2. Para distâncias onde o valor de  $a$  é menor que a metade do comprimento de  $l$  usa-se a equação 3. O cálculo da dose de radiação é calculada através do produto da intensidade de radiação UV fornecida  $E$  pelo tempo de exposição  $t_{Exp}$ , conforme a equação 4.

$$E = \frac{\varphi}{\pi^2 a^2} \quad \dots \quad (a \gg l) \quad (2)$$

$$E = \frac{\varphi}{2\pi^2 l a} \quad \dots \quad (a < 0.5l) \quad (3)$$

$$Dose_{UV} = Et_{Exp} \quad (4)$$

## 2.2. Cálculo do tempo de dosagem

O tempo de dosagem ou tempo de exposição é dado pela equação 5. Ele é obtido pela combinação das equações 2, 3 e 4.

$$Se \begin{cases} a \gg l & t = \left(\frac{\varphi}{\pi^2 a^2}\right)^{-1} Dose_{UV} \\ a < 0.5l & t = \left(\frac{\varphi}{2\pi l a}\right)^{-1} Dose_{UV} \end{cases} \quad (5)$$

## 2.3. Especificação da fonte de radiação

Para especificar a fonte de radiação, a opção foi utilizar a distância  $a$  igual a um metro, isso leva à utilização da equação 2. É necessário escolher um valor de  $\varphi$  de forma cautelosa, pois para tornar o projeto viável é necessário pesquisar os catálogos de fornecedores comerciais. Tomando por base os requisitos anteriormente citados, a escolha do valor de  $\varphi$  de  $25W$  com um aproveitamento de  $85\%$  é razoável, pois há fontes luminosas no mercado que fornecem essa potência UVC a um custo acessível. Usando os valores supracitados e aplicando-os à equação 2, tem-se:

$$E = \frac{25 \times 0.85}{\pi^2 \times (100)^2} \approx 220 \times 10^{-6} \approx 220 \mu W.cm^{-2} \quad (6)$$

### 3. Projeto do Robô

O projeto do Robô-UV foi concebido sob três aspectos principais: (a) o projeto mecânico, (b) o projeto de sistema embarcado e firmware, e (c) o projeto de software. Para primeira versão deste projeto, foi adotado um sistema semi-autônomo e remotamente controlado, que atuará em um ambiente semi-estruturado.

A Figura 2 mostra a visão panorâmica do robô. Ele é constituído de uma plataforma de quatro rodas composta por dois módulos: (i) Base do robô e, (ii) módulo de esterilização - composto por um sistema e seis lâmpadas controladas por um manipulador de 1 (um) grau de liberdade. As Figuras 3(a) e 3(b) mostram as vistas da base do robô. A estrutura da base é composta por dois andares: (i) o andar retangular e, (ii) o andar hexagonal. O andar retangular tem a altura limitada pela altura da caixa de redução dos motores de locomoção. Além dos motores de locomoção, estão alocados neste compartimento a bateria recarregável, que pode ser facilmente substituída pelo acesso lateral, e os componentes eletrônicos essenciais para o funcionamento da plataforma robótica. O andar hexagonal, por sua vez, tem o limite de altura limitado apenas pelo momento de inércia do centro de massa do robô como um todo, para evitar tombamentos. Sendo assim, esse andar hexagonal pode ser expandido conforme a necessidade de alocação de espaço, ou ainda, ter múltiplas camadas. Nesta aplicação, foram alocados em seu interior o motor de passo, os componentes eletrônicos necessários para o funcionamento das lâmpadas, bem como os inversores e o driver do motor de passo. Sobre a base hexagonal estão as lâmpadas UV e a guia linear para o movimento das lâmpadas.

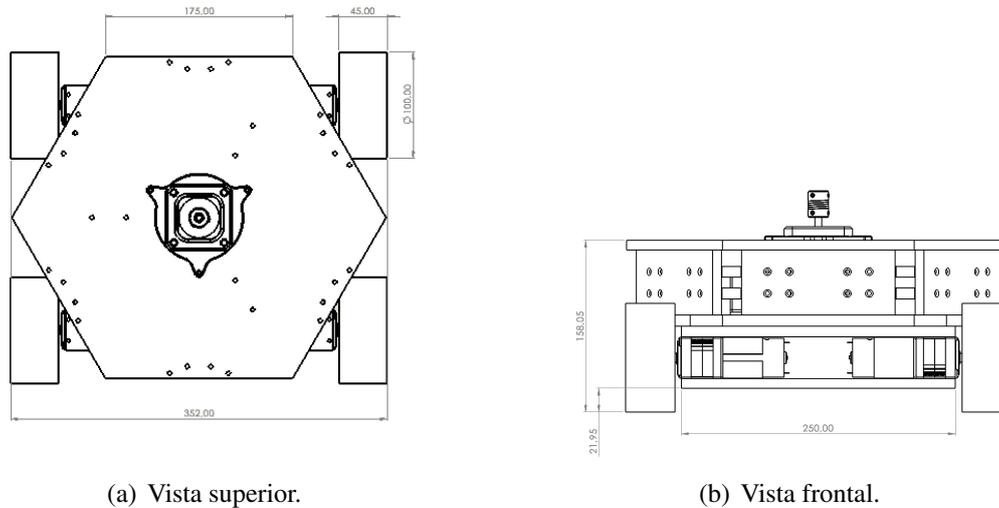


(a) Vista isométrica, hastes recolhidas.

(b) Vista isométrica, hastes abertas.

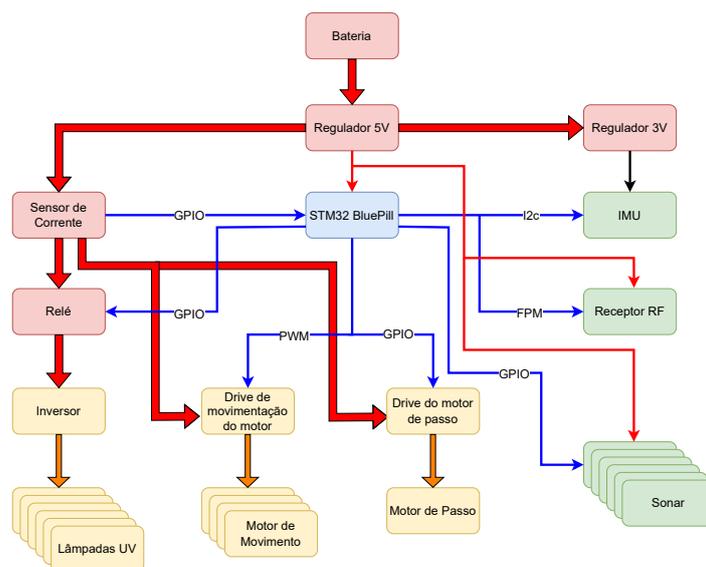
**Figura 2. Robô-UV em várias vistas.**

A Figura 4 mostra a arquitetura da eletrônica do robô, composta por seis blocos principais: conjunto de baterias, receptor de RF, placa mãe, *Drivers* para Motor, conversores de potência para as fontes de radiação UV e placa auxiliar. O conjunto de baterias fornecerá potência para os componentes eletrônicos. O receptor de RF transmitirá os dados enviados do rádio-controle à placa mãe para serem processados. A placa mãe embarca o microcontrolador, responsável pelo processamento dos dados sensoriais e pela atuação sobre os *drivers* dos motores e das fontes luminosas. Os reguladores de tensão



**Figura 3. Vistas superior e frontal da base.**

são responsáveis por dar suporte à alimentação do sistema lógico; unidade IMU (*Inertial Measurement Unit*) — utilizada para garantir a precisão de movimento durante o deslocamento do robô; conectores para os sensores ultrassônicos — essenciais para evitar a colisão física do robô com outras superfícies dispostas no ambiente; conectores para interfaceamento com o processador e a câmera USB. Os *drivers* para Motor são utilizados para controle de velocidade através de sinais de PWM. Os conversores de potência possuem uma etapa inversora seguida de um reator que faz a conversão de CC para AC, para acionamento de cada uma das lâmpadas UV. A potência é transferida da bateria para os conversores mediante o acionamento de relés mecânicos instalados entre a bateria e os elementos conversores.



**Figura 4. Arquitetura Geral da Eletrônica Embarcada do Robô**

O robô é operado remotamente por um operador humano, mas o projeto já prevê modularidade para a adaptação para a modalidade autônoma. Dessa forma, o software deve permitir o envio do *feedback* visual das câmeras e a manobrabilidade do robô. Os módulos a serem desenvolvidos são: (i) módulo de operação (envio de comandos de navegação para o robô); (ii) módulo de telemetria; e (iii) protocolo de transmissão de imagens do robô para uma central de comando,

- i O módulo de operação será responsável por receber os comandos e transmiti-los ao *firmware* que fará o interfaceamento direto com o hardware.
- ii O módulo de telemetria deverá prover dados dos componentes do robô como baterias, sensores e lâmpadas.
- iii Protocolo de transmissão: a troca de mensagens será feita através de um sistema cliente-servidor que transmite imagens e mensagens e outro que as recebe. Sendo assim o sistema já proverá a comunicação do Raspberry Pi (RPI) com o computador que vai controlar o robô.

#### 4. Experimentos e Resultados

A Figura 5 mostra um rascunho da planta baixa da sala em questão. O grafo orientado indica o caminho a ser seguido pelo robô; os nós indicam o local onde o robô abre as hastes com o objetivo de aproximar a fonte de radiação do objeto esterilizado. O experimento foi realizado numa sala de aula com  $40m^2$ , com quatorze mesas de estudante e uma mesa de professor. As mesas de estudante possuem as dimensões de  $0,9m$  de comprimento,  $0,6m$  de largura e  $0,75m$  de altura. Já a mesa de professor possui  $1,6m$  de comprimento,  $0,7m$  de largura e  $0,75m$  de altura. As distâncias entre as mesas de estudante é de  $0,6$  metros e as fileiras possuem  $0,9$  metros de distância. Inicialmente o robô parte do ponto A e segue a orientação ABCDEFGHIJ. Ao chegar no nó J ele revisita o nó F e executa a sequência FJBA. Ao chegar no nó A ele completa a esterilização. Um operador humano executa o processo de operar o robô à uma distância segura e usando equipamentos de Equipamento de Proteção Individual (EPI). A Tabela 1 mostra a equivalência entre o tempo de esterilização e a quantidade de lâmpadas agindo na superfície de interesse. Os valores do tempo foram calculados com base nos dados da Tabela 2 pela aplicação da equação 2. Para calcular o tempo de esterilização, consideramos apenas quatro lâmpadas agindo sobre a superfície da lâmpada por vez. O percurso entre dois nós foi feito em 20 segundos e ao chegar em um nó o robô foi parado e as hastes abertas por 10 segundos. A Figura 6 ilustra o processo de esterilização, a área de interesse para a esterilização é a superfície das mesas, que somam um total de  $8,68m^2$ . A esterilização completa foi feita em 8 minutos.

#### 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi proposto o desenvolvimento de uma plataforma robótica móvel tele-operada para atuação em missões de desinfecção em um ambiente estruturado. A motivação do projeto está relacionada à pandemia causada pelo SARS-CoV-2. A desinfecção foi feita utilizando a técnica UVGI (Ultraviolet Germicidal Irradiation), como já é largamente utilizado na desinfecção em ambientes hospitalares e tratamento de água e esgoto. Como trabalho futuro pretendemos estender a capacidade de locomoção da plataforma de maneira que ela se torne autônoma. Dessa forma, o robô estará apto a fazer uma ronda em um ambiente não estruturado sem a presença de um operador humano.

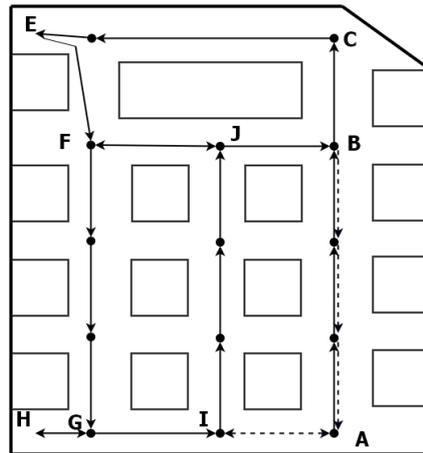


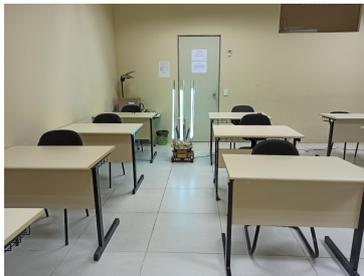
Figura 5. Esquema da sala de aula, os quadrados representam as mesas de estudante, o retângulo a mesa de professor as setas indicam a direção do robô.

Tabela 1. Estimativa de tempo em relação ao número de lâmpadas.

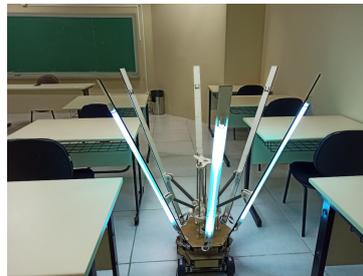
Número de Lâmpadas	Tempo de exposição (s)
1	26.94
2	13.45
3	8.98
4	6.73
5	5.39
6	4.49

Tabela 2. Dados de entrada.

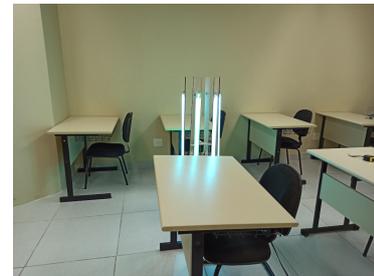
Descrição	Dado
a (cm)	100
l (cm)	90
$\varphi$ (W)	25
Ganho % de $\varphi$	0.85
Dose ( $mW s/cm^2$ )	5.8



(a) Robô no início do processo de esterilização.



(b) Robô posicionado entre quatro mesas com as hastes abertas.



(c) Robô transitando entre duas mesas com as hastes recolhidas.

Figura 6. Processo de esterilização de uma sala de aula.

## Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Processo 88881.505193/2020-01 e Código 001.

## Referências

Altmann, D. M., Boyton, R. J., and Beale, R. (2021). Immunity to SARS-CoV-2 variants of concern. *Science*, 371(6534):1103–1104.

- Beck, S., Wright, H., Hargy, T., Larason, T., and Linden, K. (2014). Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (uv) systems. *Water research*, 70C:27–37.
- B.V, P. L. (2006). Ultraviolet purification application information. Technical report, PHILLIPS, Zwaanhoefstraat 2 4702 LC Roosendaal The Netherlands.
- Darnell, M., Subbarao, K., Feinstone, S., and Taylor, D. (2004). Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, sars-cov. *Journal of virological methods*, 121:85–91.
- Duan, S.-M., Zhao, X.-S., Wen, R.-F., Huang, J.-J., Pi, G.-H., Zhang, S.-X., Han, J., Bi, S.-L., Ruan, L., and Dong, X.-P. (2003). Stability of sars coronavirus in human specimens and environment and its sensitivity to heating and uv irradiation. *Biomedical and environmental sciences : BES*, 16:246–55.
- Fisher, D. and Heymann, D. (2020). Q&a: The novel coronavirus outbreak causing covid-19. *BMC Medicine*, 18:57.
- Johnson, A. (2016). An evaluation of the ultra-vtm (ultra-violet) decontamination system as an adjunct to cleaning in a district general hospital. *Journal of Hospital Infection*, 94.
- Kampf, G., Todt, D., Pfaender, S., and Steinmann, E. (2020). Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and its inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection*, 104.
- Kowalski, W., Walsh, T., and Petraitis, V. (2020). 2020 covid-19 coronavirus ultraviolet susceptibility. -.
- Lana, R. M., Coelho, F. C., Gomes, M. F. d. C., Cruz, O. G., Bastos, L. S., Villela, D. A. M., and Codeço, C. T. (2020). The novel coronavirus (sars-cov-2) emergency and the role of timely and effective national health surveillance. *Cad. Saúde Pública [online]*, 36.
- Our World in Data (2021). Coronavirus pandemic (covid-19) – the data. <https://ourworldindata.org/coronavirus-data>. Accessed: 2021-11-11.
- Tseng, C.-C. and Li, C.-S. (2005). Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Science and Technology - AEROSOL SCI TECH*, 39:1136–1142.
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D., Holbrook, M., Gamble, A., Williamson, B., Tamin, A., Harcourt, J., Thornburg, N., Gerber, S., Lloyd-Smith, J., Wit, E., and Munster, V. (2020). Aerosol and surface stability of sars-cov-2 as compared with sars-cov-1. *New England Journal of Medicine*, 382.
- Zhou, P., Yang, X., Wang, X.-G., Hu, B., Zhang, L., Zhang, W., Si, H.-R., Zhu, Y., Li, B., Huang, C.-L., Chen, H.-D., Chen, J., Luo, Y., Guo, H., Jiang, R.-D., Liu, M.-Q., Chen, Y., Shen, X.-R., and Wang, X. (2020). A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin. *Nature*, 579.