

Sistema de Localização Baseado em Comunicação por Luz Visível Utilizando a Técnica de Impressão Digital

Priscilla Flores do Santos

Universidade Federal do Pampa

Alegrete, RS - Brasil

priscillasantos.aluno@unipampa.edu.br

Bruno Boessio Vizzotto

Universidade Federal do Pampa

Alegrete, RS - Brasil

brunovizzotto@unipampa.edu.br

Fabiano Tondello Castoldi

Universidade Federal do Pampa

Alegrete, RS - Brasil

fabianocastoldi@unipampa.edu.br

ABSTRACT

This paper proposes an indoor localization system for Visible Light Communication (VLC) systems, using LED lamps as light sources to determine the position of a receiver. The proposed method is based on the fingerprinting technique, which uses prior measurements of patterns in the environment and compares them with real-time measurements to determine the location of a receiver. Specifically, the proposal uses multiple light irradiation patterns, one for each lamp, to improve accuracy and reduce ambiguities in position determination. The preliminary results presented in this paper demonstrate the effectiveness of the method, while the proposed implementation reduces the computational complexity involved in the search process.

KEYWORDS

Indoor localization, visible light communication (VLC), fingerprinting, LED lamps, localization techniques.

1 INTRODUÇÃO

A Comunicação por Luz Visível (CLV) é uma tecnologia sem fio que utiliza o espectro visível, abrangendo frequências de 789,5 THz a 384,6 THz, até 10 mil vezes maior que o espectro de radiofrequência. A criação das lâmpadas LED (Light-Emitting Diode) revolucionou a área, permitindo transmitir dados junto com iluminação, já que LEDs podem ser chaveados em altas frequências para modular sinais luminosos.

A CLV apresenta grande potencial para localização em ambientes internos, superando desafios de interferência e imprecisão da RF, sendo útil em locais como shoppings, hospitais e aeroportos [1], [2]. Recentemente, sistemas de localização por VLC têm sido amplamente estudados, incluindo técnicas clássicas e inovadoras [3], [4]. Métodos como trilateração baseada em *Time of Arrival* (TOA) [5] ou *Angle of Arrival* (AOA) [6] demandam sistemas complexos e sincronização entre transmissores e receptores. Entretanto, técnicas de impressão digital (*fingerprint*) são mais eficientes e dispensam sincronismo, focando na intensidade luminosa em pontos referência [3], [7].

Este trabalho propõe melhorias na localização por CLV com impressão digital, buscando maior robustez a ruídos e menor complexidade computacional. O artigo está estruturado em quatro seções: Conceitos de Impressão Digital Algoritmo Proposto; Resultados Prévios; e Considerações Finais, com

síntese dos resultados, prós e contras do método e sugestões de estudos futuros.

2 CONCEITOS DE IMPRESSÃO DIGITAL EM VLC

A técnica de impressão digital em sistemas VLC utiliza características específicas do sinal emitido por fontes de luz, como lâmpadas LED, para criar um "mapa de impressões digitais" do ambiente. Esse mapa armazena a intensidade de sinal em diferentes pontos do espaço, cada um com um perfil único de sinal. A intensidade do sinal recebida por um fotodetector é convertida para potência, P_r , a qual pode ser modelada matematicamente como descrito na equação 1.

$$P_r = \frac{(n+1)A_{esc}}{2\pi d^2} \cos(\theta) \cos^n(\phi) P_t \quad (1)$$

Desta equação, pode-se verificar claramente a dependência da potência recebida em relação aos fatores relacionados ao transmissor e receptor. No transmissor temos que a intensidade luminosa é gerada considerando a potência utilizada pela lâmpada, P_t , o ângulo de emissão da luz em relação ao eixo normal da lâmpada, ϕ , e também a forma como a intensidade luminosa é irradiada, n , pelo LED utilizado. Já no receptor, sua posição em relação a lâmpada, d , e as características de área de captação de luz, A_{esc} , e o ângulo de incidência entre o feixe de luz e a superfície do fotodetector, θ , são necessários. A Figura 1 demonstra um cenário de iluminação, apresentando as variáveis discutidas acima.

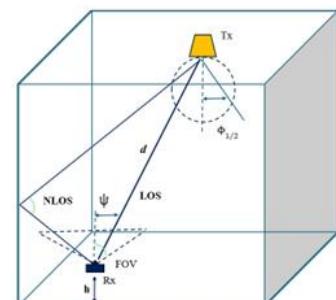


Figura 1: Sistemas VLC com visadas e parâmetros.

Observa-se que pode haver mais de um percurso em que a iluminação pode percorrer. Entretanto, na maioria dos cenários a reflexão em paredes têm pouca influência na potência irradiada no ponto do receptor, sendo assim neste

trabalho é apenas considerada a linha de visada direta (LOS) e desconsiderando os demais percursos da luz (NLOS).

Para exemplificar como padrão de intensidade luminosa funciona, em relação a potência recebida, a Figura 2 ilustra a distribuição das intensidades luminosas de uma lâmpada, centralizada no ambiente, obtidas por um fotodetector com variações das dimensões de largura e comprimento de um ambiente, onde altura foi considerada constante para cada ponto. Pode-se verificar um comportamento de espalhamento das intensidades luminosas similar a círculos, com diferentes raios para diferentes intensidades, em relação ao ponto onde a lâmpada se encontra.

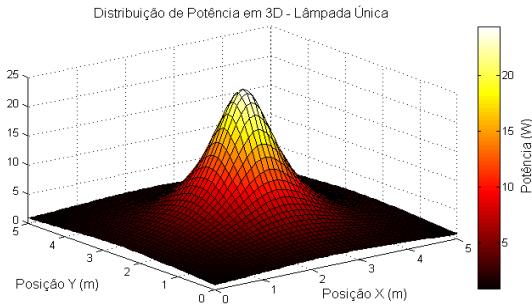


Figura 2: Distribuição de Potência do LED.

Quanto mais lâmpadas são adicionadas à intensidade luminosa total, os padrões tornam-se únicos para pontos específicos do ambiente, permitindo que o método de impressão digital convencional funcione adequadamente. Entretanto, é possível obter padrões de irradiação das intensidades luminosas de cada lâmpada independentemente, determinando os pontos mais prováveis para a posição do fotodetector. Embora essa técnica seja mais complexa computacionalmente, ela proporciona uma melhor distinção dos possíveis locais em um ambiente, sendo a escolhida para este trabalho.

Na fase offline, as intensidades luminosas P_r de cada lâmpada são mapeadas, considerando uma divisão uniforme do ambiente; o espaçamento escolhido afeta a precisão do sistema de localização. Este mapa serve como base de dados de "impressões digitais" do ambiente, utilizado na fase online pelo receptor para determinar sua localização através de comparações entre os valores medidos e os armazenados. Idealmente, a correspondência dos dados permite determinar a posição exata do receptor.

Cabe salientar que, embora intensidades luminosas sejam o principal dado em sistemas de impressão digital, outros dados como Ângulo de Chegada ou Tempo de Chegada podem ser usados isoladamente ou em conjunto para aprimorar a precisão do sistema de localização [8]. Além disso, quando o número de lâmpadas é baixo, metodologias alternativas podem ser exploradas para melhorar o banco de impressões digitais, como algoritmos de interpolação [9] ou estimativa progressiva de padrões com inteligência artificial [10].

3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Para aprimorar a precisão do sistema de localização, o algoritmo proposto utiliza múltiplas impressões digitais luminosas, uma para cada lâmpada LED, explorando variações de intensidade características de cada fonte. Essa abordagem diferencia posições no ambiente de forma mais precisa, reduz ambiguidades na estimativa e oferece maior redundância nos dados. Durante a fase de treinamento (offline), o sistema constrói um banco de dados com assinaturas luminosas específicas para cada lâmpada, capturando intensidades medidas em diferentes pontos do ambiente.

No sistema, cada lâmpada LED emite luz modulada em uma frequência única, permitindo ao receptor distinguir as fontes por técnicas espetrais. Na fase online, o fotodetector separa as componentes de frequência usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), comparando as intensidades medidas com as assinaturas no banco de dados. Essa comparação segue uma lógica hierárquica, reduzindo as regiões de busca gradualmente.

A Figura 3 ilustra o funcionamento do sistema, mostrando a disposição das lâmpadas LED, a área de localização e o movimento do receptor, além das frequências moduladas atribuídas a cada lâmpada (representadas por diferentes cores).

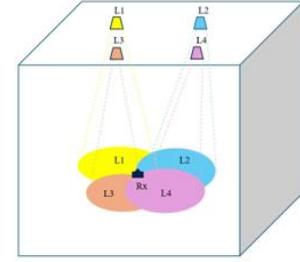


Figura 3: Funcionamento do sistema.

O algoritmo de localização proposto aplica uma técnica de interseção progressiva entre as intensidades luminosas detectadas, priorizando as lâmpadas que apresentam maior intensidade no receptor. Esse processo baseia-se no princípio de que as lâmpadas mais próximas do receptor possuem maior intensidade luminosa recebida e, consequentemente, devem possuir uma maior razão entre potência do sinal e do ruído ambiente. O processo de interseção é descrito nas etapas seguintes:

- 1. Detecção da Lâmpada com Maior Intensidade:** O sistema inicia identificando a lâmpada que emite a maior intensidade luminosa recebida pelo receptor. Esse valor ajuda a delimitar as regiões prováveis onde o receptor se encontra, uma vez que as áreas mais próximas dessa lâmpada terão intensidades mais elevadas. O algoritmo, então, mantém apenas as posições que correspondem a esse perfil de irradiação.
- 2. Interseção Progressiva com Outras Lâmpadas:** Em seguida, o algoritmo compara os pontos de intensidade obtidos anteriormente com as intensidades das demais lâmpadas, em ordem decrescente. A localização é refinada conforme os pontos restantes são confrontados com as assinaturas das lâmpadas subsequentes. Apenas os pontos

que correspondem ao perfil de intensidade das lâmpadas avaliadas são mantidos, até que todas tenham sido consideradas.

3. **Determinação Final da Posição:** Após o passo anterior, o algoritmo determina um único ponto de localização, correspondente à convergência das impressões digitais luminosas de cada lâmpada.

Essa técnica de interseção progressiva permite aumentar a precisão da localização, ao utilizar múltiplos padrões de impressão digital, ao mesmo tempo que reduz iterativamente o conjunto de pontos possíveis de procura até que reste um único ponto de localização. Com isso, o algoritmo simplifica os cálculos e reduz o custo computacional, mantendo a precisão.

4 RESULTADOS PRÉVIOS

Para avaliar o funcionamento e desempenho do sistema proposto, simulações foram realizadas considerando uma sala com dimensões de 5 m de largura, 5 m de comprimento e 3 m de altura. São consideradas presentes quatro lâmpadas LED, cada uma com uma potência óptica de 10W e um semiângulo de meia potência de 60º, as quais estão instaladas a uma altura de 2,3 metros do chão. Além disso, cada lâmpada LED emite luz em frequência distinta em relação às outras, como especificado anteriormente. Assume-se que a altura do receptor é fixa ao longo de qualquer posição da sala, que as medidas para o banco de dados são realizadas com espaçamento uniforme de 10 cm, em cada direção.

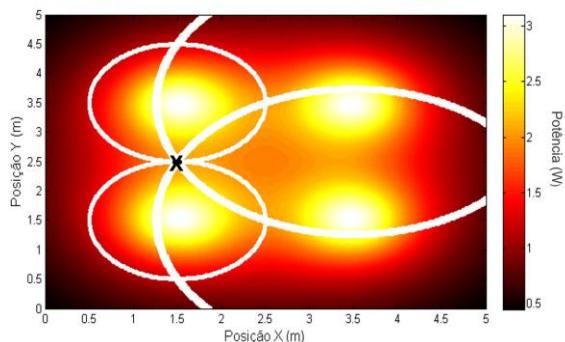


Figura 4: Posição estimada do fotodetector e interseções das potências recebidas das lâmpadas.

Nos parâmetros apresentados, os espaçamentos, apesar de ser relativamente grande para algumas aplicações, é considerado razoável para localização de pessoas se movimentando em um ambiente. Não foram considerados, nesse momento, efeitos de ruído e outros tipos de interferências nas simulações. Os resultados obtidos demonstram um desempenho preciso e promissor do algoritmo, encontrando perfeitamente a posição do fotodetector. A Figura 4 exibe uma realização do método, onde podemos observar a posição estimada do fotodetector no ambiente simulado, ilustrada pelo ponto destacado, além das

áreas de interseção dos círculos de potência gerados pelas lâmpadas.

Analizando as medições, observou-se que as regiões de maior intensidade de luz, representadas pelos círculos de interseção, foram fundamentais para determinar a localização precisa do fotodetector. Cada círculo reflete uma área de maior probabilidade de localização, com base na potência do sinal recebido pelas lâmpadas. A Figura 4 ilustra a sobreposição dos círculos de potência das lâmpadas, evidenciando a robustez do método e dispensando técnicas adicionais, como a trilateração.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vantagens do VLC para localização interna incluem segurança e precisão, embora possa sofrer interferências. Este trabalho apresentou um sistema VLC baseado no método de impressão digital, com implementação simples, baixo custo e pouca demanda computacional, exigindo mínimas alterações na iluminação.

Apesar de desafios, como a criação de um banco confiável e testes simulados, os resultados indicaram precisão e baixa sensibilidade a ruídos. O método de interseção mostrou-se vantajoso, pois intensidades luminosas próximas são pouco afetadas por pequenas interferências. Os próximos passos incluem testes com ruídos, iluminação dinâmica e receptores em movimento, além da investigação de trilateração para melhorar o desempenho e ampliar a aplicação do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Brown and B. Green, "Applications of VLC in restricted environments," *International Journal of Wireless Communications*, vol. 39, no. 2, pp. 98–110, 2021. [Online]. Available: <https://example.com/vlc-restricted-environments>.
- [2] C. White and D. Black, "Security aspects of visible light communication systems," *Telecommunications Review*, vol. 50, no. 1, pp. 45–58, 2023. [Online]. Available: <https://example.com/vlc-security>.
- [3] M. HUYNH, P.; YOO, "Sistema de posicionamento baseado em VLC para um ambiente interno usando um sensor de imagem e um sensor acelerômetro," *Sensors*, vol. 16, no. 6, 2016.
- [4] P. P. C. S. G. Z. F. LI, L.; HU, "Epsilon: Um sistema de posicionamento baseado em luz visível," in *Proceedings of the 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*. USENIX Association, 2014, pp. 331–343.
- [5] S.-Y. Jung, S. Hann, and C.-S. Park, "Tdoa-based optical wireless indoor localization using led ceiling lamps," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1592–1597, 2011.
- [6] Y. e. o. HOU, "A rss/aoa based indoor positioning system with a single led lamp," in *Proceedings of the 2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, 2015, pp. 1–4.
- [7] L. M. S. P. S. WANG, X.; GAO, "Impressão digital baseada em csi para localização interna: uma abordagem de aprendizagem profunda," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 763–776, 2017.
- [8] D. Shi, X. Zhang, A. Vladimirescu, L. Shi, Y. Huang, and Y. Liu, "Um método de identificação de dispositivo baseado em impressão digital de led para sistema de comunicação de luz visível." Nova York, NY, EUA: Associação para Máquinas de Computação, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3407023.3409214>.
- [9] H. WEI, H.; YAO, "Indoor visible light location algorithm based on virtual fingerprint database," in *Proceedings of the 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2017, pp. 2412–2415.
- [10] V. P. Rekkas, L. A. Iliadis, S. P. Sotirodakis, A. D. Boursianis, P. Sarigiannidis, D. Plets, W. Joseph, S. Wan, C. G. Christodoulou, G. K. Karagiannidis, and S. K. Goudos, "Artificial intelligence in visible light positioning for indoor iot: A methodological review," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 2838–2869, 2023.