



# SAARIS: Um Simulador Aberto de Antenas e Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

Júlio César S. Fernandes<sup>1</sup>, Marcello Luiz R. de Campos<sup>2</sup> e Miguel Elias M. Campista<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>GTA-PEE/COPPE-DEL/Poli, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

<sup>2</sup>SMT-PEE/COPPE-DEL/Poli, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

{juliocsf, miguel}@gta.ufrj.br, campos@smt.ufrj.br

**Abstract.** *Signal propagation simulation in dense urban scenarios is challenging. This work presents SAARIS, an interactive simulator for mobile network planning with reconfigurable intelligent surfaces (RIS). The tool combines 3D geometric modeling of the environment with analytical propagation models, enabling heatmap generation and direct manipulation of antennas and RIS elements. SAARIS supports the import of urban meshes from OpenStreetMap and provides quantitative coverage metrics. The experiments validate the tool against analytical models and demonstrate its ability to mitigate shadowed regions through RIS placement.*

**Resumo.** *A simulação de propagação de sinais em cenários urbanos densos é desafiadora. Este trabalho apresenta o SAARIS, um simulador interativo para planejamento de redes móveis com superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS). A ferramenta combina modelagem geométrica 3D do ambiente de simulação com modelos analíticos de propagação, permitindo a geração de mapas de calor e a manipulação direta de antenas e superfícies RIS. O SAARIS permite a importação de malhas urbanas do OpenStreetMap, além de apresentar métricas quantitativas de cobertura. Os experimentos validam a ferramenta em comparação com modelos analíticos e demonstram a sua capacidade de mitigação de regiões de sombra com o posicionamento de uma superfície RIS.*

## 1. Introdução

A análise da cobertura do sinal de radiofrequência (RF) constitui um dos desafios centrais da engenharia de telecomunicações. Ferramentas abertas de simulação de cobertura frequentemente exigem um processo iterativo de ajuste de parâmetros e posicionamento até que se atinja a configuração desejada. Em contrapartida, softwares comerciais, como o [Forsk 2024] e o [NetSpot 2024], voltados ao planejamento de RF, geram resultados que consistem em representações estáticas ou visualizações bidimensionais de mapas de calor, que não capturam adequadamente os efeitos do ambiente urbano, especialmente em situações de obstrução física.

\*Este trabalho recebeu apoio do CNPq (310234/2025-5, 407304/2025-8, 408255/2023-4, 405940/2022-0 e 312145/2023-3); da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e 88887.954253/2024-00; da FAPERJ (E-26/200.438/2026, E-26/210.778/2025, E-26/210.157/2023 e E-26/200.363/2026) e da FAPESP (2023/00673-7 e 2023/00811-0).

Este trabalho propõe o SAARIS (Simulador Aberto de Antenas e RIS), uma ferramenta de exploração espacial interativa para o posicionamento de superfícies refletoras inteligentes (*Reconfigurable Intelligent Surfaces* – RIS) e análise visual da cobertura RF. O objetivo da ferramenta é auxiliar o projetista na avaliação do impacto do posicionamento de antenas e de superfícies refletoras no ambiente urbano, permitindo experimentação rápida diretamente em um cenário tridimensional. O SAARIS adota uma abordagem híbrida, combinando um paradigma geométrico determinístico (cenário 3D) com modelos analíticos de propagação recomendados pela ITU [International Telecommunication Union 2019]. O simulador segmenta o plano de simulação em pequenas áreas, modeladas computacionalmente como células (ou *pixels*) e emprega a técnica de disparo de raios (*ray shooting*) para cada segmento de área, com o objetivo de detectar interseções com obstáculos, utilizando, em seguida, modelos determinísticos de propagação para estimar as perdas de potência associadas a cada raio [Yun and Iskander 2015]. A interface gráfica interativa do SAARIS torna o processo de experimentação mais intuitivo. A manipulação tridimensional de componentes, como antenas e RIS, bem como a importação direta de malhas urbanas reais a partir de arquivos `.osm`, acelera a prototipagem de um espaço geográfico de interesse. Adicionalmente, o SAARIS fornece métricas quantitativas, como o percentual de área coberta e o estado operacional das superfícies RIS, auxiliando na escolha de configurações adequadas. A implementação do SAARIS baseia-se na *game engine* Godot 4, que permite a abstração eficiente do cálculo de colisões com obstáculos e a execução em tempo real, mantendo o caráter de código aberto e extensível [Godot Engine Contributors 2024]. Dessa forma, o SAARIS apresenta-se como uma ferramenta voltada à prototipagem e à análise de sistemas de comunicação em cenários urbanos, preenchendo uma lacuna atual de pesquisa e desenvolvimento.

## 2. Fundamentação Teórica

Para análise de RF, a ferramenta de código aberto Sionna [Hoydis et al. 2022] revolucionou a pesquisa na camada física ao integrar o suporte nativo a redes neurais e a aceleração por GPU. Contudo, existe uma evidente restrição prática no planejamento topológico: a construção de cenários e a alocação de dispositivos ocorrem de maneira estritamente programática, carecendo de uma abstração visual. Em ambientes complexos, a busca pelo posicionamento ótimo de elementos como RIS torna-se um processo contraintuitivo de tentativa e erro por meio de scripts. A modelagem física do RIS torna o desafio de alocação espacial ainda mais complexo. Diferentemente de um espelho passivo convencional, o RIS é capaz de manipular a fase das ondas incidentes para realizar uma reflexão anômala. Isso permite que o feixe refletido seja direcionado para uma região específica, como a área de um receptor (RX), independente da lei de reflexão de Snell. De acordo com [Özdoğan et al. 2020], o regime de operação do RIS pode variar entre campo próximo (*near-field*) e campo distante (*far-field*), dependendo da configuração geométrica do sistema. O regime de campo próximo ocorre em situações específicas nas quais a superfície refletora encontra-se muito próxima ao transmissor (TX), permitindo que o RIS direcione o sinal num feixe colimado que reduz as perdas por dispersão existentes na propagação do ambiente. No contexto deste trabalho, considera-se exclusivamente o regime de campo distante (*far-field*), visto que a modelagem de campo próximo para superfícies RIS ainda representa uma fronteira de pesquisa na literatura, carecendo de modelos analíticos para integração em ferramentas de planejamento. Além

disso, na maioria dos cenários de planejamento urbano de redes móveis, a cobertura é tipicamente provida por antenas com padrão de radiação amplo, como antenas omnidirecionais ou setoriais, cujo objetivo é distribuir energia no ambiente de forma abrangente. Neste contexto, o RIS atua como um elemento de redirecionamento de energia em escala macroscópica, com maior aplicabilidade por maior integração com o espaço urbano, podendo compor no futuro fachada de prédios e outras construções que estão estrategicamente próximas de regiões de sombra. Nesse regime, a onda espalhada diverge de forma cônica e a atenuação obedece à proporção multiplicativa  $1/(d_1 \cdot d_2)^2$ . A potência recebida é penalizada adicionalmente pelo fator  $\cos^2(\theta_i)$ , que reflete a redução da área efetiva de captura do sinal baseada no ângulo de incidência  $\theta_i$  em relação à normal do painel. A abstração dos cálculos de fase fundamenta-se na distinção entre o desvanecimento de larga escala (*large-scale fading*) e o desvanecimento rápido (*fast-fading*). Como o SAARIS é voltado para o planejamento de cobertura territorial, o dado de interesse é a potência média recebida. Flutuações de fase em escala sub-comprimento de onda, embora críticas para o nível de enlace, são tratadas como efeitos estatísticos mitigados por técnicas de diversidade nos terminais, tornando o modelo baseado no módulo da potência suficiente para a avaliação das zonas de sombra. Dessa forma, a simulação reduz-se a formulação geométrica de conservação de energia, englobando tanto a propagação em espaço livre quanto a interação com o RIS, conforme o modelo de Özdogan et al.

### 3. SAARIS: Arquitetura e Modelos

O SAARIS foi desenvolvido sobre o motor gráfico tridimensional Godot 4, usando a linguagem GDScript para a lógica de propagação e as ferramentas nativas de renderização 3D e física para a manipulação da malha urbana. Essa plataforma foi escolhida por sua eficiência computacional e simplicidade arquitetural, além de abstrair a complexidade algébrica da física de colisões espaciais. Adicionalmente, o Godot 4 permite a integração direta de *shaders* customizados, elementos fundamentais para a principal característica visual do simulador: a renderização do mapa de calor em tempo real, simultaneamente aos cálculos de propagação. A arquitetura do SAARIS é estruturada em quatro camadas logicamente desacopladas, porém interligadas por um barramento de sinais (*signals*), como visto na Figura 1. A Interface de Usuário (UI) recebe as entradas e emite sinais de requisição que representam alterações desejadas no sistema. Esses sinais são recebidos pelo Gerente, em roxo, que atua como mediador central, mantendo acessível o mecanismo de comunicação entre os diferentes módulos e encaminhando as requisições para a camada de dados, em verde. Nesta camada, as requisições são traduzidas em modificações no cenário de simulação, incluindo a importação de arquivos `.osm`, cujo fluxo se inicia com um sinal de requisição e resulta na construção do ambiente 3D e na emissão de um sinal de confirmação de carregamento (*handshakes*), garantindo a consistência entre o estado interno do simulador e sua representação na interface. Por fim, o Motor de Simulação, em vermelho, executa os cálculos de propagação e informa seu progresso por meio de sinais assíncronos *callbacks*, além de gerar estatísticas ao término da simulação. Durante os cálculos, o motor envia os parâmetros referentes ao mapa de calor para o *shader*, como detalhado na próxima subseção.

#### 3.1. Motor Híbrido e Rasterização do Receptor

Para viabilizar a simulação de extensas áreas geográficas com múltiplos obstáculos, o SAARIS discretiza o plano de solo em uma malha de resolução confi-

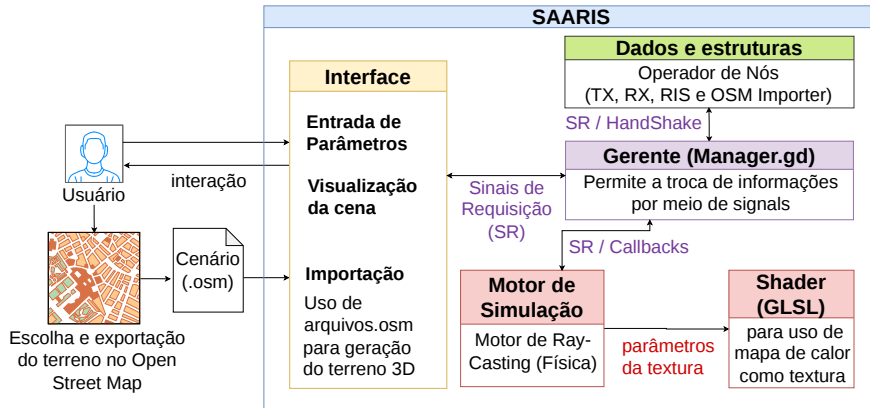


Figura 1. Arquitetura modular do SAARIS evidencia o fluxo de dados e o controle entre a Interface, o Controlador Central e o Motor de Simulação.

gurável. O centro geométrico de cada pequena área atua como um receptor virtual independente. Para cada *pixel* da simulação, o simulador dispara um raio (*ray-cast*) a partir de cada antena transmissora da simulação para verificar a existência de linha de visada (*Line of Sight* - LOS) ou a ocorrência de obstruções físicas. Cada contribuição de sinal atenuado é processada e acumulada em uma matriz bidimensional de potência (Watts) no domínio linear, possibilitando a soma com contribuições de origens diferentes. Durante o ciclo de processamento, essa matriz serve de entrada para o cálculo da textura do mapa de calor. Já o gradiente de cor é definido por meio da escolha de três valores em dBm de potências referenciais: potência máxima, crítica e mínima. Um *shader* (*OpenGL Shading Language* - GLSL) dedicado, configurado com esses três parâmetros, interpola os valores de potência no mapa e gera a transição visual do terreno com variações suaves de intensidade.

### 3.2. Modelagem do RIS e Métricas

O SAARIS simplifica a modelagem do RIS adotando o modo de operação *far-field* [Özdoğan et al. 2020] (ver Seção 2) para todos os cálculos de reflexão. O sinal refletido ilumina toda a extensão do receptor sem considerar perdas extras por variação do ângulo de saída. Em cenários típicos, a variação angular entre as extremidades da área de recepção e o eixo central de reflexão pequena, resultando em flutuações de potência desprezíveis que não justificam o aumento de custo computacional da renderização em tempo real. No regime *far-field* ( $d_2 \geq d_r$ ), tem-se que  $\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{G_{TX}G_{RX} \cos^2(\theta_i)}{(4\pi)^2} \left(\frac{A_{RIS}}{d_1 d_2}\right)^2$ , onde  $P_{RX}$ ,  $P_{TX}$ ,  $G_{RX}$  e  $G_{TX}$  são as potências de recepção e transmissão, e os ganhos da antena de recepção e transmissão, respectivamente. Além disso,  $A_{RIS}$  representa a área física total da superfície;  $(\theta_i)$  é o ângulo de incidência; e  $d_1$  e  $d_2$  correspondem às distâncias do RIS ao transmissor e receptor, respectivamente. A partir desse modelo, observa-se que a ineficácia da iluminação de zonas sombreadas depende criticamente da geometria do cenário. Para que a contribuição do RIS seja relevante, a superfície deve obrigatoriamente possuir linha de visada direta (*Line-of-Sight*) tanto para o transmissor quanto para o receptor. Caso contrário, a obstrução em qualquer um dos percursos ( $d_1$  ou  $d_2$ ) anularia a transferência de energia passiva. Adicionalmente, a ferramenta permite ao usuário ajustar a eficiência do painel e o número de células, parâmetros que escalam a área efetiva  $A_{RIS}$  e, conseqüentemente, o ganho percebido na área iluminada.

### 3.3. Importação do OSM

O processo de construção do ambiente no SAARIS baseia-se na extração de metadados de arquivos `.osm`, formato do OpenStreetMap no qual dados geoespaciais são representados em XML. Como bases de dados públicas frequentemente carecem de informações completas de volumetria, o simulador utiliza uma lógica de geração procedural. Caso a altura de uma edificação não esteja definida no metadado original, o motor estima a altura com base em regras predefinidas de densidade urbana, garantindo que pontos bidimensionais do mapa sejam convertidos em obstáculos 3D funcionais para os cálculos de obstrução e difração.

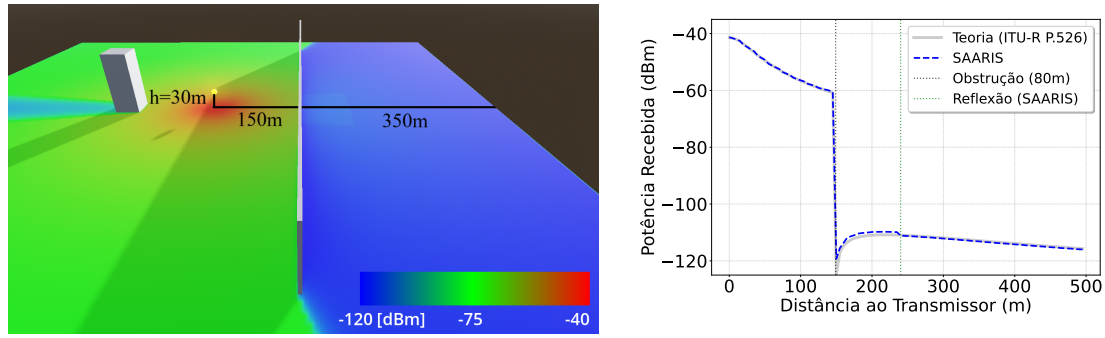
## 4. Avaliação do SAARIS

De forma resumida, o SAARIS oferece as seguintes funcionalidades: (i) análise visual da cobertura de radiofrequência (RF) a partir do posicionamento manual de componentes, como antenas e superfícies RIS; (ii) análise visual da cobertura RF a partir da importação de malhas urbanas reais por meio de arquivos `.osm` do OpenStreetMap; e (iii) cálculo de métricas quantitativas, como o percentual de área coberta e o estado operacional das superfícies RIS.

### 4.1. Análise Visual da Cobertura RF com Posicionamento Manual

A precisão do motor híbrido do SAARIS foi validada por meio da comparação entre resultados numéricos extraídos do simulador e um modelo analítico de referência implementado em Python. Este primeiro cenário consiste em um transmissor posicionado a 30 m de altura, com potência de 40 dBm e frequência de 2,4 GHz. A antena encontra-se centralizada em um plano de 1000 m  $\times$  1000 m, no qual um obstáculo vertical (muro) de 80 m de altura e 800 m de comprimento está posicionado a 150 m da antena ao longo do eixo  $X$ . A Figura 2(a) apresenta a visualização do cenário obtido com o SAARIS após a simulação, em que o mapa de calor representa a potência recebida em dBm, utilizando uma escala de cores na qual tons quentes (vermelho/amarelo) indicam maiores níveis de potência, enquanto tons frios (entre verde e azul) representam regiões de baixa cobertura. A esfera amarela é o transmissor, com um raio imaginário de 5 m para facilitar a visualização. As dimensões do obstáculo foram escolhidas com o objetivo de aproximar o cenário ao modelo de difração por aresta (*knife-edge*), isto é, com largura muito superior à altura, de modo a tornar desprezíveis os efeitos de difração lateral.

A validação teórica apresentada na Figura 2(b) utiliza o modelo log-distância para espaço livre, parametrizado com um expoente de perda de 2.8 para refletir o ambiente urbano. Para o cálculo da zona de sombra, usou-se o modelo de difração (*knife-edge*) conforme a recomendação ITU-R P.526-15 [International Telecommunication Union 2019], utilizando o parâmetro de Fresnel  $v$  para determinar a atenuação em função da altura efetiva do obstáculo. Enquanto o script analítico exige entrada manual de constantes geométricas (posição e altura do obstáculo), o SAARIS obtém esses parâmetros de forma automática por meio do *ray-cast* no ambiente tridimensional. A análise estatística entre o simulador e o modelo analítico resultou em um Erro Quadrático Médio (RMSE) de 0,76 dB, confirmando a aderência do SAARIS aos padrões internacionais de propagação. A Figura 2(b) mostra que as curvas obtidas são coincidentes, com divergência pontual após o obstáculo. Essa diferença pode ser atribuída à presença de componentes refletidas



(a) Visualização do cenário de validação.

(b) Resultados do SAARIS em comparação com o modelo teórico de propagação.

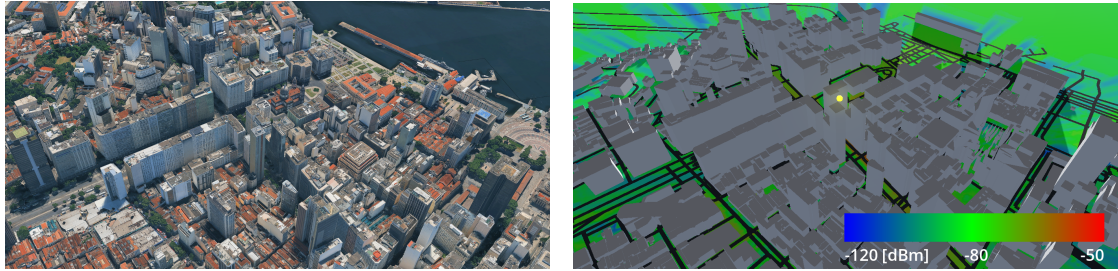
**Figura 2. Validação do SAARIS.**

do sinal no obstáculo (prédio), que não são consideradas no modelo analítico simplificado. Parte desse sinal refletido sofre difração adicional ao contornar o obstáculo, contribuindo para um pequeno aumento da potência em uma região localizada. A extensão dessa contribuição pode ser estimada geometricamente, resultando em uma região de influência que se estende até aproximadamente  $x = 240\text{ m}$ , ponto cujo efeito combinado de reflexão e difração deixa de impactar a potência recebida. Essa comparação valida a precisão do simulador na modelagem da propagação de potência e evidencia sua capacidade de reproduzir efeitos emergentes de cenários complexos a partir apenas da configuração geométrica, sem a necessidade de parametrização explícita das interações.

#### 4.2. Análise Visual da Cobertura RF com Importação de Malhas Urbanas Reais

Esta seção apresenta a aplicação do SAARIS na análise de uma região de sombra nas proximidades da Igreja da Candelária, no centro da cidade do Rio de Janeiro. Trata-se de uma área estratégica próxima à costa e ao centro turístico, caracterizada por um intenso fluxo de pedestres e usuários de redes móveis. O cenário foi obtido a partir de um arquivo `.osm` do OpenStreetMap, sendo a área de interesse delimitada e exportada para utilização no SAARIS. Para este experimento, utilizou-se a frequência de 3,5 GHz (banda n78), condizente com as implementações de redes 5G NR de alta capacidade em um cenário que cobre uma área de aproximadamente  $2100 \times 1920\text{ m}$ . Para analisar a escalabilidade computacional, avaliou-se o tempo de execução em função da resolução da malha de discretização. Observou-se crescimento quadrático com o número de pontos amostrados (*pixels*):  $128 \times 128$  (32 s),  $256 \times 256$  (1 min 57 s),  $512 \times 512$  (8 min 06 s),  $1024 \times 1024$  (39 min e 22 s). Todos os tempos de execução se referem a uma máquina equipada com processador Intel Core i5-10300H, 8 GB de memória RAM e uma placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 1650. Apesar do tempo de processamento, observa-se que a ferramenta pode ser executada em computadores com restrições de hardware. Para cenários de maior complexidade, a escalabilidade é assegurada pelo *Bounding Volume Hierarchies* (BVH). Implementado nativamente na Godot 4 para testar as colisões, o BVH mantém a viabilidade da ferramenta em malhas urbanas diversas ao apresentar uma complexidade  $O(n \log_2(n))$ , onde  $n$  representa o número de obstáculos. As Figuras 3(a) e 3(b) comparam a visualização fotorrealista tridimensional da região com o modelo simulado gerado pelo SAARIS. O mapa de calor segue a mesma convenção de cores descrita anteriormente, permitindo a identificação direta de regiões de sombra (cores próximas do azul

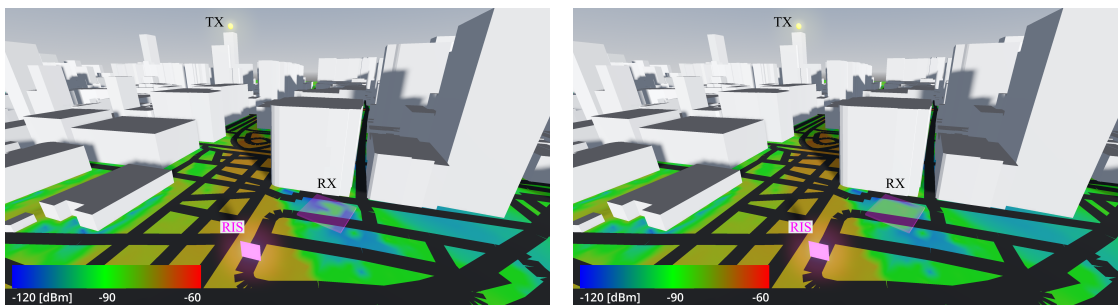
puro) e áreas adequadamente iluminadas.



(a) Visualização fotorrealista 3D da região da Candelária [Google 2026]. (b) Modelo simulado no SAARIS (Resolução 512x512 pixels).

**Figura 3. Comparação entre a representação real e o modelo simulado da região da Candelária.**

Na exploração iterativa, utilizou-se a ponteira de precisão da interface para identificar uma zona de sombra de interesse, isto é, uma região perto da costa e do centro turístico com circulação de muitos pedestres. Sem a presença do RIS, a potência na região foi de  $-110$  dBm (áreas em azul escuro), nível abaixo do limiar desejável das comunicações móveis. Para mitigar esse problema, inseriu-se um painel RIS para iluminar a área do receptor, delimitada pela caixa rosa na Figura 4(a). Ao manipular interativamente o posicionamento do RIS até alcançar uma configuração adequada, foi possível adicionar um ganho de aproximadamente 21 dB no RX (em verde na Figura 4(b)) Esse ganho de potência restabelece a cobertura da região, elevando o nível de sinal para uma faixa operacional compatível com serviços móveis. A fundamentação quantitativa desse ganho e o diagnóstico das métricas de alinhamento são detalhados a seguir.



(a) RIS desativado: formação de sombra gerada devido à obstrução por edificações. (b) RIS ativado: redirecionamento do sinal e mitigação da região de sombra.

**Figura 4. Comparação do mapa de calor antes e após ativação e ajuste do RIS.**

### 4.3. Cálculo de Métricas Quantitativas

O SAARIS fornece métricas operacionais em tempo real por meio de um painel de diagnóstico (Figura 5) que auxilia o projetista na busca pelo posicionamento ótimo do RIS. As métricas baseiam-se em três critérios fundamentais: (i) existência da linha de visada desobstruída entre o transmissor e o painel (LOS TX-RIS); (ii) visada direta entre o painel e a área do receptor (LOS RIS-RX); e (iii) o ângulo de incidência ( $\theta_i$ ). A ferramenta utiliza esses indicativos para orientar o ajuste da superfície, buscando minimizar o ângulo

$\theta_i$ . Conforme discutido na Seção 3.2, a potência refletida é proporcional ao  $\cos^2(\theta_i)$ , de modo que ângulos elevados degradam a eficiência da reflexão. Na simulação da Candelária, a região de interesse inicialmente apresentava potência média de  $-110$  dBm, aferida pela ponteira de potência da ferramenta. Este valor situa-se abaixo do limiar de sensibilidade para serviços móveis, que, conforme as especificações do 3GPP para RSRP (*Reference Signal Received Power*), estabelecem que conexões abaixo de  $-100$  dBm a  $-105$  dBm são consideradas instáveis ou de péssima qualidade [3GPP 2023]. Ao posicionar e orientar o RIS buscando o diagnóstico de status “EFICAZ (OK)”, observou-se uma melhoria significativa no mapa de calor. A potência na zona de sombra aumentou para  $-89$  dBm. Sob a ótica de usabilidade, o RIS transformou uma região sem sinal em uma área de cobertura classificada como de nível médio a bom, permitindo o tráfego de dados estável para dispositivos móveis.

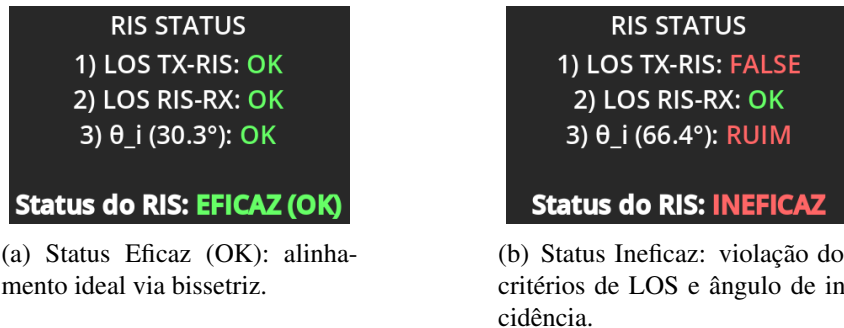


Figura 5. Diagnóstico operacional do RIS no ambiente 3D.

#### 4.4. Disponibilização de Uso

O SAARIS e a sua documentação estão disponíveis em um repositório no GitHub (<https://github.com/julioxcsf/SAARIS>). O repositório contém um arquivo README.md com os artefatos necessários para a execução da ferramenta e dos experimentos desta seção. Para a demonstração no SBRC, será utilizado um notebook próprio com suporte à aceleração gráfica e acesso à Internet, não sendo necessários equipamentos adicionais do evento.

### 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, almeja-se a transição do atual motor de *ray-shooting*, executado de forma sequencial, para uma arquitetura de paralelismo massivo via *Compute Shaders* (GPGPU). Ao transpor a lógica de intersecção e os modelos da ITU-R para a GPU, o crescimento quadrático do tempo de execução observado na Seção 4.2 será mitigado pelo processamento simultâneo de milhares de threads sob o modelo SIMT (*Single Instruction, Multiple Threads*). A eficiência dessa transição será garantida pelo uso de BVH, reduzindo a complexidade de busca de obstáculos de linear para logarítmica. Estima-se que essa abordagem reduza o tempo de processamento em ordens de grandeza, permitindo que malhas de alta resolução, como  $1024^2$  pixels, sejam computadas com alto desempenho, consolidando a escalabilidade do SAARIS para cenários urbanos densos.

## Referências

- 3GPP (2023). NR; Requirements for support of radio resource management. [https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38\\_series/38.133/38133-h00.zip](https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.133/38133-h00.zip). TS 38.133 V17.0.0.
- Forsk (2024). Atoll: Radio Network Planning and Optimization Software. Disponível em <https://www.forsk.com/atoll>. Acessado em 17-03-2026.
- Godot Engine Contributors (2024). Godot Engine. Disponível em <https://godotengine.org>. Acessado em 17-03-2026.
- Google (2026). Google Earth Pro: Vista aérea do Centro, Rio de Janeiro. Disponível em <https://earth.google.com/web/>. Acessado em 16-03-2026.
- Hoydis, J., Cammerer, S., Ait Aoudia, F., et al. (2022). Sionna: An open-source library for next-generation physical layer research. *arXiv preprint arXiv:2203.11854*.
- International Telecommunication Union (2019). Propagation by Diffraction. Technical Report Recommendation ITU-R P.526-15, ITU-R. Disponível em <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>.
- NetSpot (2024). NetSpot Wi-Fi Site Survey Software. Disponível em <https://www.netspotapp.com>. Acessado em 17-03-2026.
- Özdoğan, Ö., Björnson, E., and Larsson, E. G. (2020). Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(5):581–585.
- Yun, Z. and Iskander, M. F. (2015). Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications. *IEEE Access*, 3:1089–1100.