

**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Teste de campo e Análise de desempenho em rede LoRa WAN para IoT

Comunicações sem fio

Arthur Cadore Matuella Barcella
Gabriel Luiz Espindola Pedro
Gusto Paulo
Matheus Pires Salazar
Rhenzo Hideki Silva Kajikawa

23 de Dezembro de 2024

Engenharia de Telecomunicações - IFSC-SJ

Sumário

1. Introdução	3
2. Fundamentação Teórica	3
2.1. Tecnologia LoRa	3
2.2. Modelo simplificado de perda de percurso	3
3. Análise Prempitiva e Teste em Campo	3
3.1. Simulação dos locais de medição	4
3.1.1. Ponto 0 (Inicio):	4
3.1.2. Ponto 1:	5
3.1.3. Ponto 2:	6
3.1.4. Ponto 3:	8
3.1.5. Ponto 4:	9
3.1.6. Ponto 5:	10
3.1.7. Ponto 5 (Torre do IFSC):	12
3.2. Resultados Medidos em Campo	13
3.2.1. Ponto 0 (Inicio):	14
3.2.2. Ponto 1:	14
3.2.3. Ponto 2:	15
3.2.4. Ponto 3:	15
3.2.5. Ponto 4:	16
3.2.6. Ponto 5 (Torre do IFSC):	16
3.3. Mapa de Calor	17
4. Conclusão	17

1. Introdução

Este relatório apresenta os resultados e análises obtidos durante as atividades de simulação e medições de enlaces Lora (Long Range). Técnologia essa que é tem sido utilizada em sistemas de comunicação de baixa potência e longo alcance.

Foram realizadas medições do sinal RSSI (Received Signal Strength Indicator) utilizando uma ESP32 da Robocore com módulo LoRa, disponibilizado pelo professor. Além disso, foi utilizada o software Radio Mobile para calcular os valores teóricos para cada ponto medido, comparando com os resultados medidos em campo.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Tecnologia LoRa

LoRa é uma tecnologia de rede de baixa potência e alto alcance, baseada em espalhamento espectral e técnicas de modulação derivadas da chirp spread spectrum (CSS), assim o Lora pode chegar até 10km em condições ideais.

RSSI é uma métrica que indica a potência do sinal recebido em dBm. Em comunicações, o valor do RSSI é fundamental para analisar a qualidade do enlace e calcular o expoente de perda no canal de propagação.

2.2. Modelo simplificado de perda de percurso

A perda de sinal em um canal é modelada por:

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1)$$

- d : distância transmissor-receptor;
- d_0 : distância de referência;
- n : expoente de perda de percurso;

3. Análise Preemptiva e Teste em Campo

Para determinar o desempenho do enlace LoRa, foram realizadas medições de RSSI em diferentes pontos próximos do campus do IFSC-SJ. Os pontos de medição foram escolhidos de maneira a cobrir diferentes distâncias e obstáculos, permitindo avaliar a variação do sinal em função da distância e da presença de obstáculos.

Inicialmente, foi realizada uma simulação do enlace LoRa utilizando o software Radio Mobile, que permite calcular a perda de percurso esperada para diferentes distâncias e expoentes de perda. Em seguida, foram realizadas medições de RSSI em campo, utilizando uma ESP32 com módulo LoRa.

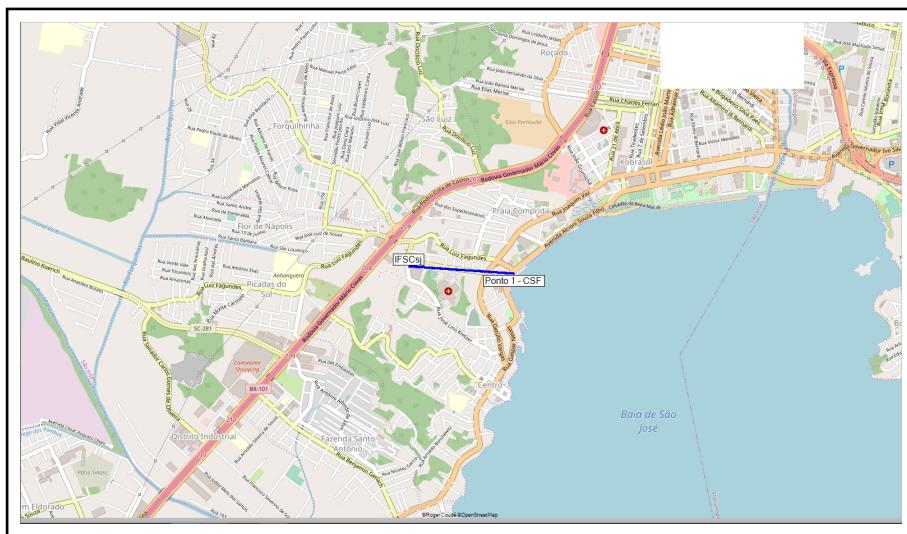
3.1. Simulação dos locais de medição

Para cada ponto de medição, foi calculada a perda de percurso esperada utilizando o Radio Mobile. Os resultados teóricos foram comparados com os dados medidos em campo, permitindo avaliar a precisão do modelo de perda de percurso.

3.1.1. Ponto 0 (Inicio):

Inicialmente, definimos sua localização no software apontando através de sua latitude e longitude. Em seguida, calculamos um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

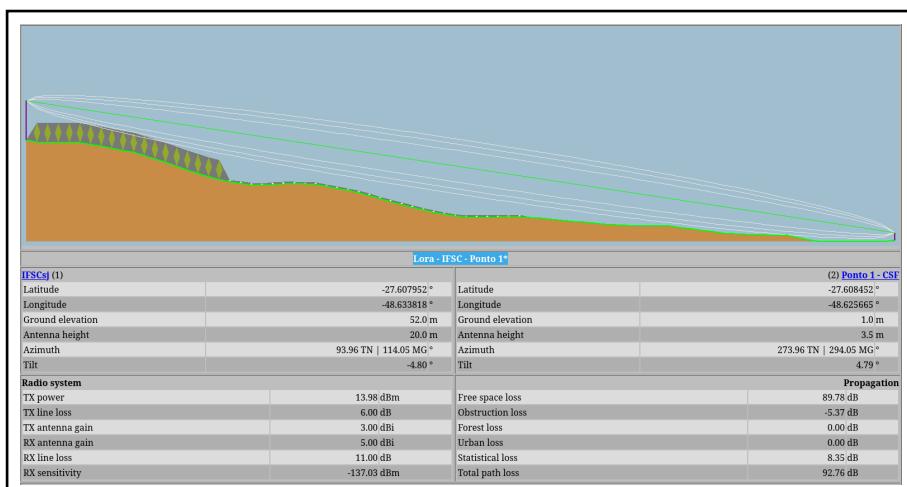
Figura 1: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 2: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 3: Elaborada pelo Autor

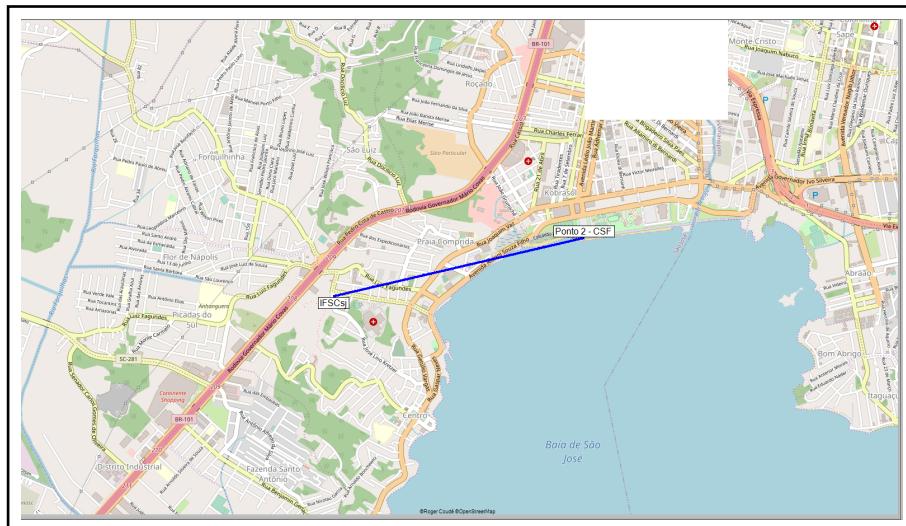
Performance	
Distance	0.805 km
Precision	9.9 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-87.78 dBm
Received Signal	9.14 μ V
Fade Margin	45.24 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.2. Ponto 1:

Em seguida, repetimos o processo para o ponto 1. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

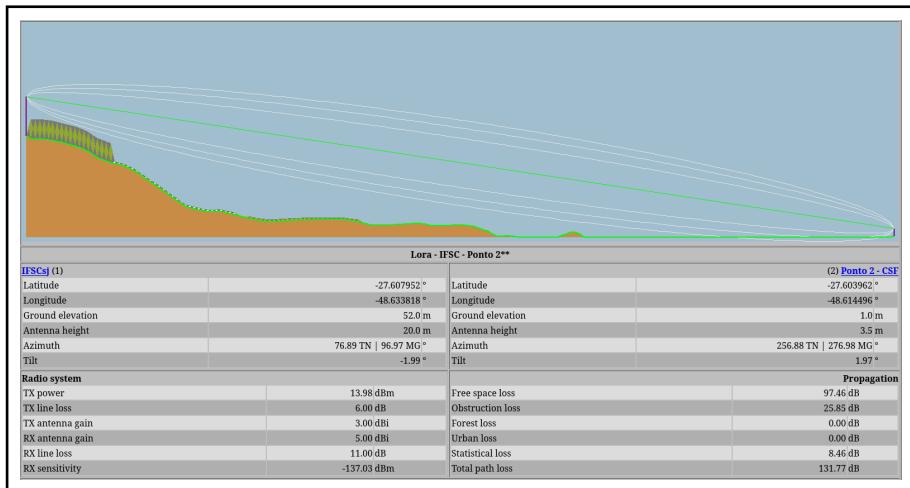
Figura 4: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 5: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 6: Elaborada pelo Autor

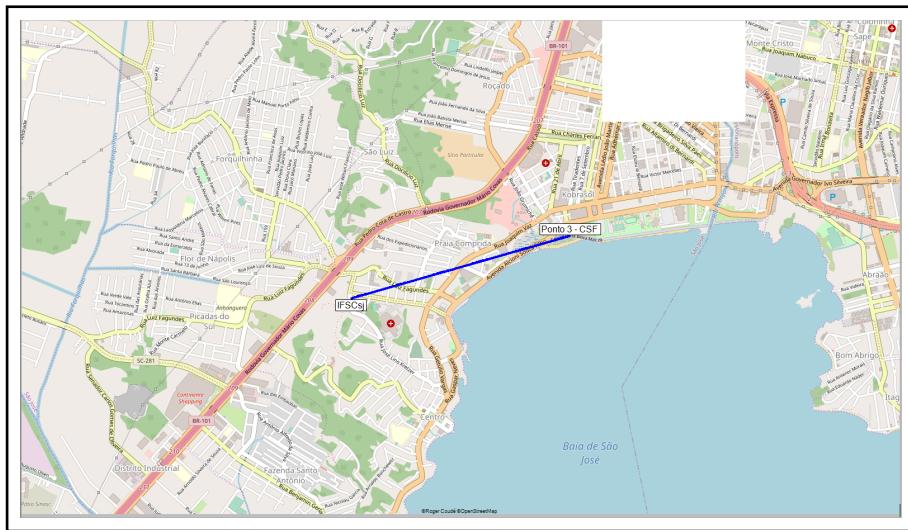
Performance	
Distance	1.955 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-126.79 dBm
Received Signal	0.10 µV
Fade Margin	6.23 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.3. Ponto 2:

Em seguida, repetimos o processo para o ponto 2. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

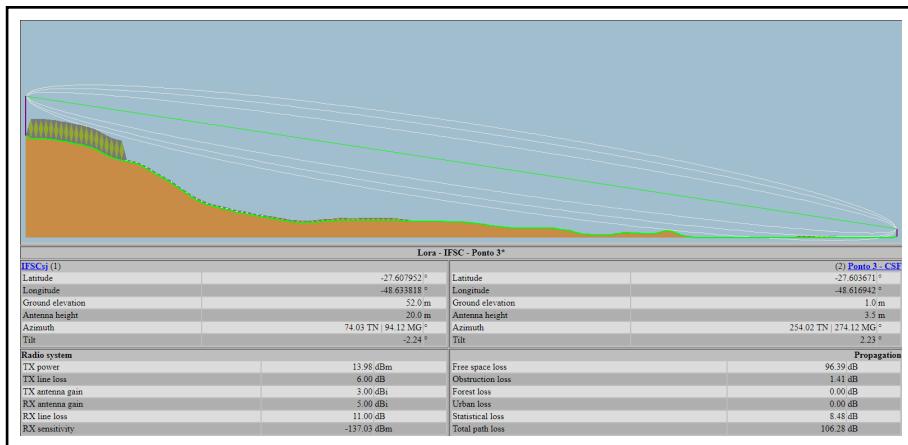
Figura 7: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 8: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 9: Elaborada pelo Autor

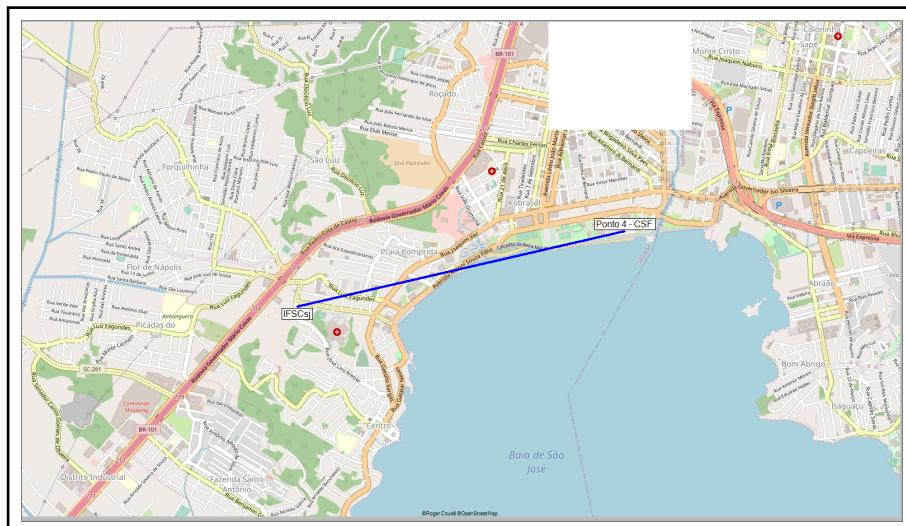
Performance		
Distance		1.730 km
Precision		10.0 m
Frequency		915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power		0.013 W
System gain		138.00 dB
Required reliability		75.000 %
Received Signal		-101.30 dBm
Received Signal		1.93 µV
Fade Margin		31.72 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.4. Ponto 3:

Em seguida, repetimos o processo para o ponto 3. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

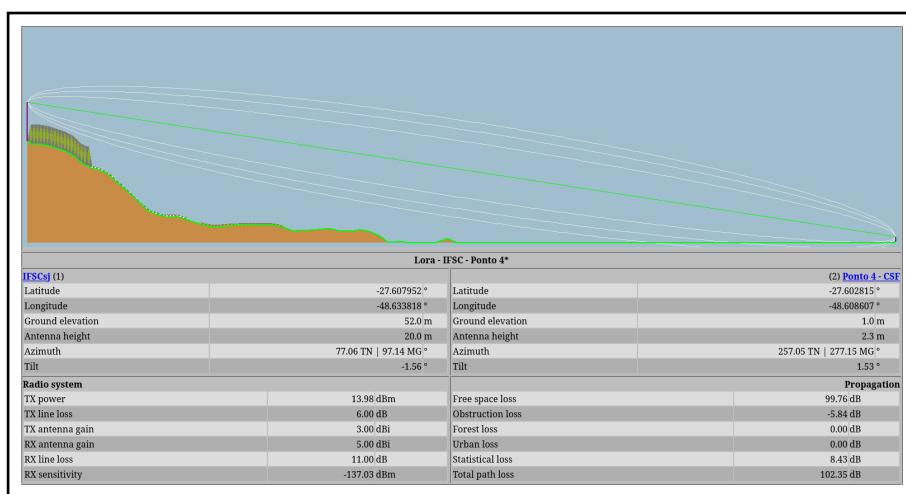
Figura 10: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 11: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 12: Elaborada pelo Autor

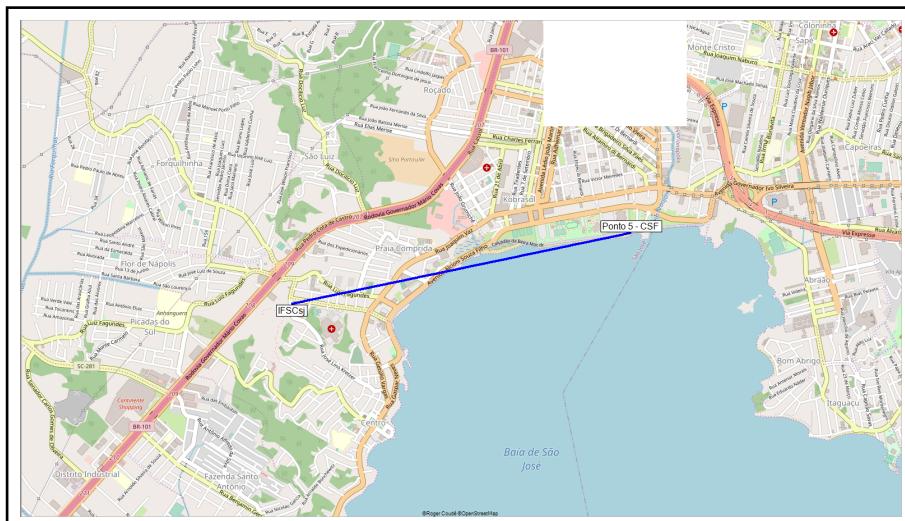
Performance	
Distance	2.549 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-97.37 dBm
Received Signal	3.03 μ V
Fade Margin	35.65 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.5. Ponto 4:

Em seguida, repetimos o processo para o ponto 4. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

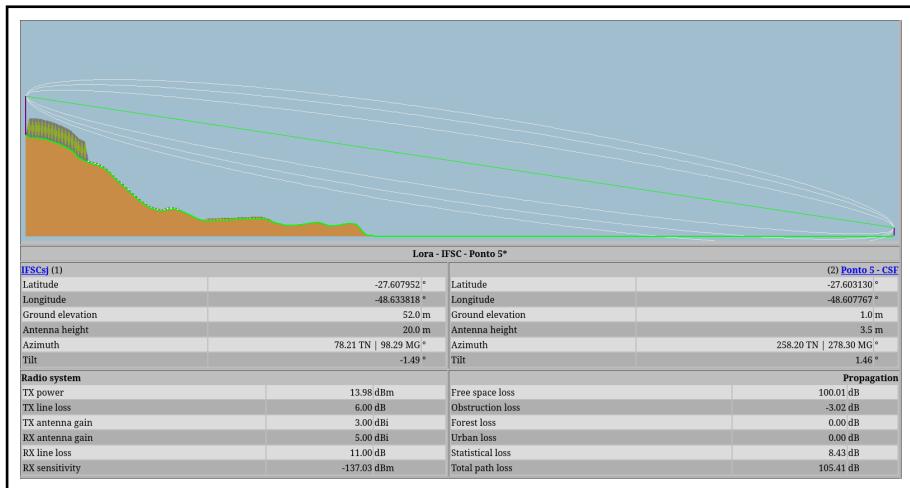
Figura 13: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 14: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 15: Elaborada pelo Autor

Performance	
Distance	2.622 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-100.43 dBm
Received Signal	2.13 µV
Fade Margin	32.59 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.6. Ponto 5:

Em seguida, repetimos o processo para o ponto 5. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

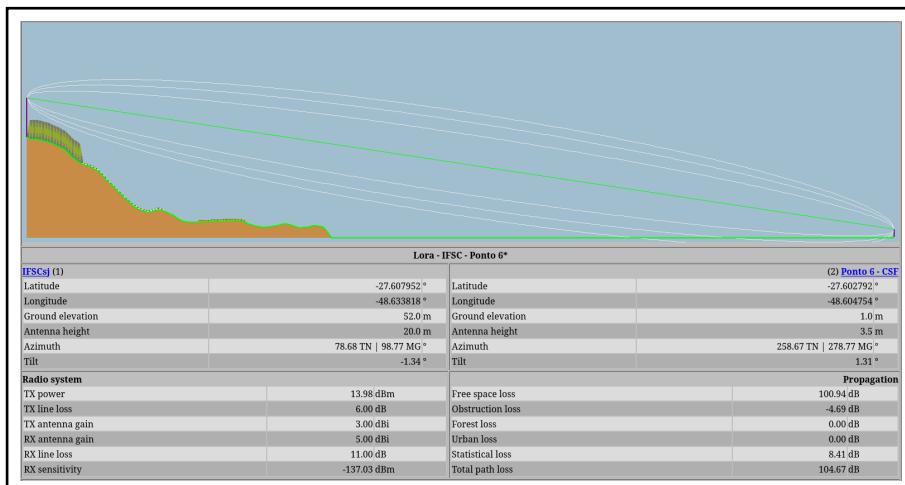
Figura 16: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 17: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 18: Elaborada pelo Autor

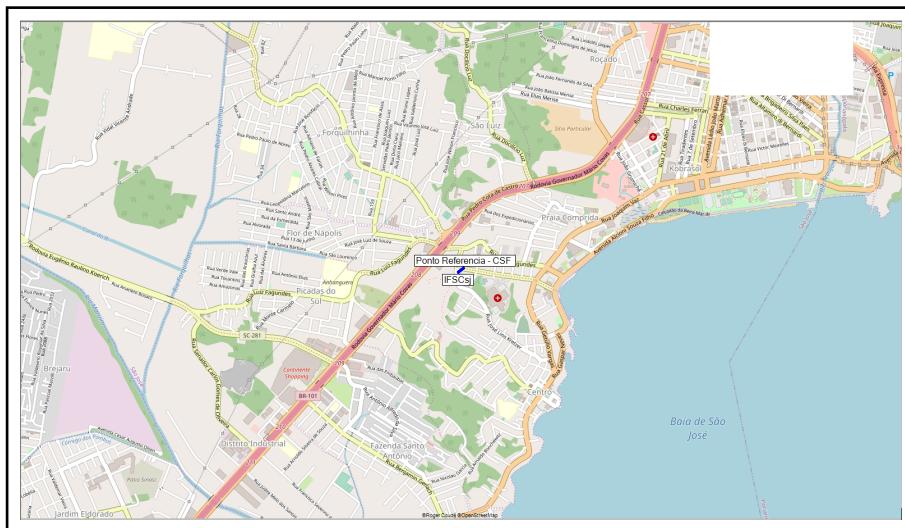
Performance	
Distance	2.921 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-99.69 dBm
Received Signal	2.32 µV
Fade Margin	33.33 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.1.7. Ponto 5 (Torre do IFSC):

Por fim, repetimos o processo para o ponto 5, a referencia proxima a torre do IFSC. Calculando um enlace P2P entre o ponto de medição e a torre do IFSC, com uma altura de 10 metros. Abaixo está uma representação do P2P em questão:

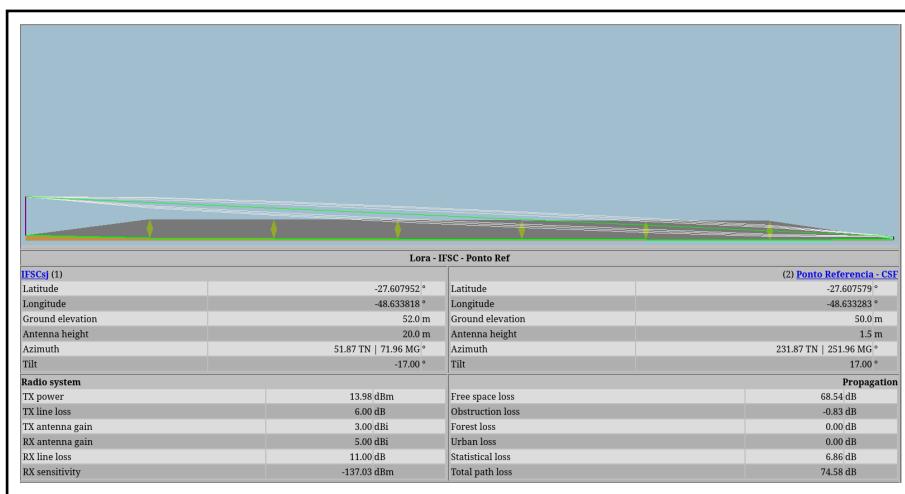
Figura 19: Elaborada pelo Autor



Localização do ponto de medição

Abaixo, é apresentado um corte transversal do enlace P2P, com a altura de 10 metros (torre do IFSC) e 1 metro (ponto de medição) em relação ao solo. Note que o corte permite avaliar a obstrução da zona de Fresnel entre os pontos de transmissão e recepção, permitindo avaliar a presença de obstáculos no enlace.

Figura 20: Elaborada pelo Autor



Cálculo teórico através do Rádio Mobile

Os resultados do enlace estão dispostos abaixo em forma de tabela, note o nível de sinal esperado e a perda de percurso esperada.

Figura 21: Elaborada pelo Autor

Performance	
Distance	0.067 km
Precision	9.6 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-69.60 dBm
Received Signal	74.14 µV
Fade Margin	63.42 dB

Cálculo teórico através do Rádio Mobile

3.2. Resultados Medidos em Campo

Após a saída de campo, os resultados amostrados foram triados por horário, de maneira a determinar quais coletas correspondem a cada ponto de coleta. Em seguida, foi aplicado um script para cada conjunto de dados para determinar a média e variância das amostras coletadas.

Abaixo, segue o código utilizado para realizar essa análise:

```

1  :
2  def calcular_estatisticas_rssi(nome_arquivo):
3      try:
4          with open(nome_arquivo,
5                  mode='r',
6                  newline='',
7                  encoding='utf-8-sig') as arquivo:
8              leitor_csv = csv.reader(arquivo)
9              rssi_valores = []
10
11             for linha in leitor_csv:
12                 rssi_valor = linha[0].strip()
13                 rssi_valores.append(int(rssi_valor))
14
15             if rssi_valores:
16                 # Cálculo da média
17                 media_rssi = sum(rssi_valores) / len(rssi_valores)
18
19                 # Cálculo da variância
20                 variancia_rssi = (
21                     sum((x - media_rssi) ** 2 for x in rssi_valores)
22                     / len(rssi_valores))
23
24                 print(f"Média da RSSI: {media_rssi:.2f}")
25                 print(f"Variância da RSSI: {variancia_rssi:.2f}")
26             else:
27                 print("O arquivo está vazio.")
28         except FileNotFoundError:
29             print(f"O arquivo '{nome_arquivo}' não foi encontrado.")
30         except IndexError:
31             print("Erro ao acessar as colunas do arquivo.")
32         except ValueError as e:
33             print(f"Erro ao processar valores de RSSI: {e}")

```

Abaixo, segue a análise dos dados coletados em cada ponto de amostragem:

3.2.1. Ponto 0 (Inicio):

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	08:36:44.150	-105
2024-12-13	08:36:59.166	-99
2024-12-13	08:37:21.113	-89
2024-12-13	08:37:43.092	-105
2024-12-13	08:38:05.330	-109
2024-12-13	08:38:34.166	-97
2024-12-13	08:38:49.083	-100
2024-12-13	08:39:11.139	-95
2024-12-13	08:39:47.212	-102
2024-12-13	08:39:55.082	-103
2024-12-13	08:40:17.105	-101
2024-12-13	08:40:39.089	-100
2024-12-13	08:41:01.102	-101
2024-12-13	08:41:30.167	-109
2024-12-13	08:41:52.146	-112

¹ Média da RSSI: **-94.27**

3.2.2. Ponto 1:

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	08:45:25.119	-100
2024-12-13	08:45:47.231	-99
2024-12-13	08:46:09.095	-99
2024-12-13	08:46:31.081	-99
2024-12-13	08:46:53.097	-99
2024-12-13	08:47:15.105	-96
2024-12-13	08:47:37.092	-99
2024-12-13	08:47:59.154	-101
2024-12-13	08:48:28.174	-97
2024-12-13	08:48:43.087	-96
2024-12-13	08:49:05.125	-95
2024-12-13	08:49:34.148	-97
2024-12-13	08:49:49.087	-96
2024-12-13	08:50:11.100	-113
2024-12-13	08:50:33.109	-111

¹ Média da RSSI: -99.75

3.2.3. Ponto 2:

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	08:59:50.143	-97
2024-12-13	09:00:05.083	-94
2024-12-13	09:00:27.108	-99
2024-12-13	09:00:49.079	-96
2024-12-13	09:01:11.170	-103
2024-12-13	09:01:40.172	-95
2024-12-13	09:01:55.120	-101
2024-12-13	09:02:24.189	-93
2024-12-13	09:02:39.212	-96
2024-12-13	09:03:08.191	-99
2024-12-13	09:03:23.082	-95

¹ Média da RSSI: -96.83

3.2.4. Ponto 3:

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	09:05:42.158	-94
2024-12-13	09:06:04.167	-91
2024-12-13	09:06:19.071	-89
2024-12-13	09:06:41.072	-89
2024-12-13	09:07:10.145	-93
2024-12-13	09:07:25.089	-90
2024-12-13	09:07:47.094	-84
2024-12-13	09:08:16.135	-88
2024-12-13	09:08:31.124	-87
2024-12-13	09:08:53.229	-90
2024-12-13	09:09:15.149	-90
2024-12-13	09:09:44.231	-90
2024-12-13	09:09:59.135	-90
2024-12-13	09:10:21.136	-113
2024-12-13	09:10:57.276	-113

¹ Média da RSSI: -93.00

3.2.5. Ponto 4:

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	09:17:41.125	-105
2024-12-13	09:18:03.124	-99
2024-12-13	09:18:25.136	-99
2024-12-13	09:18:47.122	-99
2024-12-13	09:19:09.151	-97
2024-12-13	09:19:27.172	-93
2024-12-13	09:19:42.086	-99
2024-12-13	09:20:04.082	-97
2024-12-13	09:20:33.194	-90
2024-12-13	09:20:48.090	-97
2024-12-13	09:21:17.144	-97
2024-12-13	09:21:32.078	-99
2024-12-13	09:22:01.204	-112

¹ Média da RSSI: -99.71

3.2.6. Ponto 5 (Torre do IFSC):

Index	Descrição	Necessidade de LAB
2024-12-13	09:46:28.071	-77
2024-12-13	09:46:50.083	-73
2024-12-13	09:47:12.086	-72
2024-12-13	09:47:41.142	-72
2024-12-13	09:48:03.122	-70
2024-12-13	09:48:18.065	-67
2024-12-13	09:48:47.201	-69
2024-12-13	09:49:02.073	-71
2024-12-13	09:49:24.148	-69
2024-12-13	09:49:53.142	-65
2024-12-13	09:50:08.080	-67
2024-12-13	09:50:30.128	-65

¹ Média da RSSI: -69.85

Dessa forma, obetivemos os seguintes valores analisando todos os pontos:

Medições	Distância (km)	rssi (dBm)
----------	----------------	------------

Ponto 1	0.805	-93.1
Ponto 2	1.955	-100.5
Ponto 3	1.730	-98
Ponto 4	2.549	-96.8
Ponto 5	2.622	-90.14
Ponto 6	2.921	-98.76
Ponto Referência	0.0678	-69.84

3.3. Mapa de Calor

A partir dos dados coletados em campo, e também das simulações realizadas no Radio Mobile, foi possível gerar um mapa de calor da potência do sinal recebido (RSSI) em função da distância. O mapa de calor permite visualizar a distribuição espacial do sinal LoRa, identificando áreas com maior e menor potência de sinal.

Abaixo é apresentado o mapa de calor gerado a partir dos dados coletados em campo:

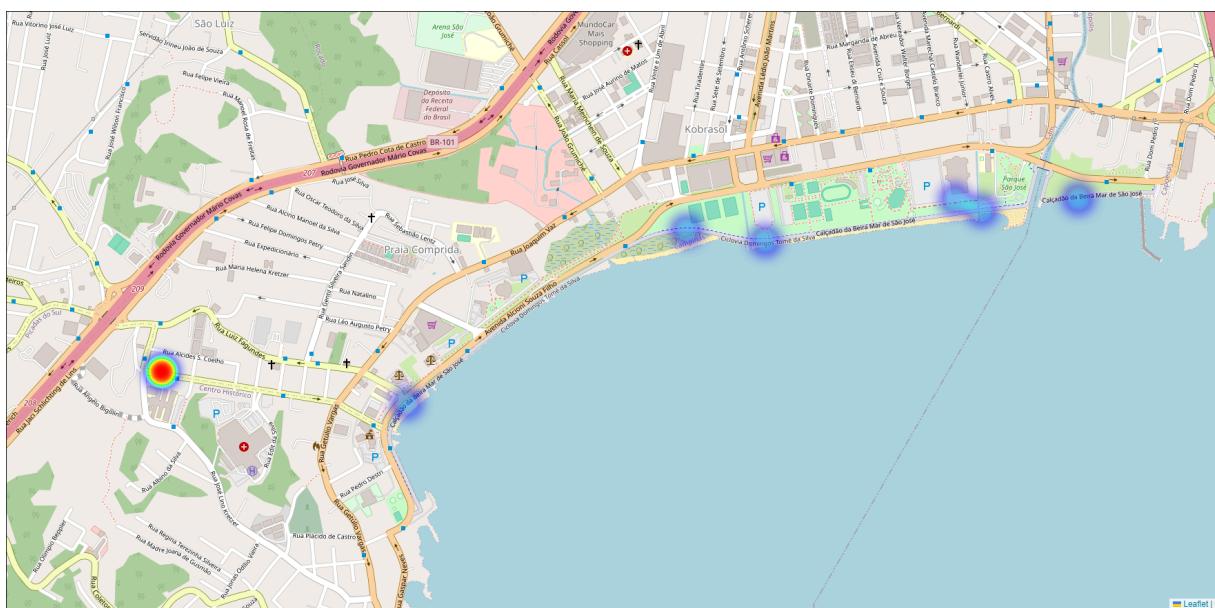


Figura 22: Mapa de calor baseado na potência do sinal recebido

Fonte: Elaborada pelo autor

Note que a região do IFSC apresenta uma maior potência de sinal, representada por uma área do mapa mais aquecida, enquanto as regiões mais distantes apresentam uma menor potência de sinal. Isso é esperado, uma vez que a perda de percurso aumenta com a distância, resultando em uma menor potência de sinal recebido.

4. Conclusão

Neste relatório, foram analisados os resultados teóricos e experimentais das medições do sinal LoRa. Utilizando o Radio Mobile, foram calculadas as perdas de caminho esperadas e observado os resultados ideais.

Os dados coletados em campo foram utilizados para determinar o expoente de perdas, confirmando a adequação do modelo log-distância para o ambiente estudado. Com base nesse expoente, foi gerado um Heatmap da potência do sinal, permitindo visualizar a distribuição espacial do RSSI.

Os resultados mostram que o sinal LoRa apresenta boa cobertura, mas com perdas significativas à medida que se aumenta a distância.