

**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

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Fundamentação Teórica .....</b>	<b>3</b>
2.1. Tecnologia LoRa .....	3
2.2. Modelo simplificado de perda de percurso .....	3
<b>3. Análise Prempitiva e Teste em Campo .....</b>	<b>3</b>
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
<b>4. Conclusão .....</b>	<b>17</b>

# **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.

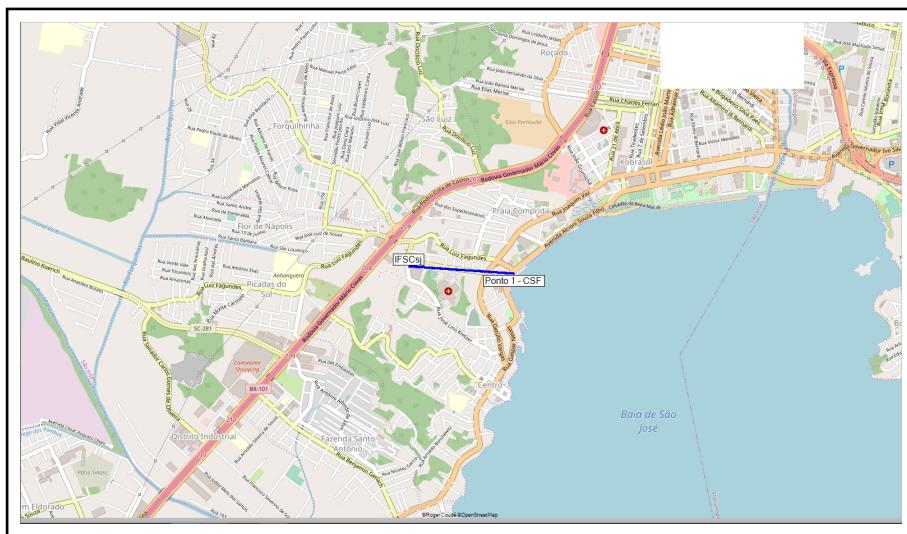
### 3.1. Simulação dos locais de medição

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:

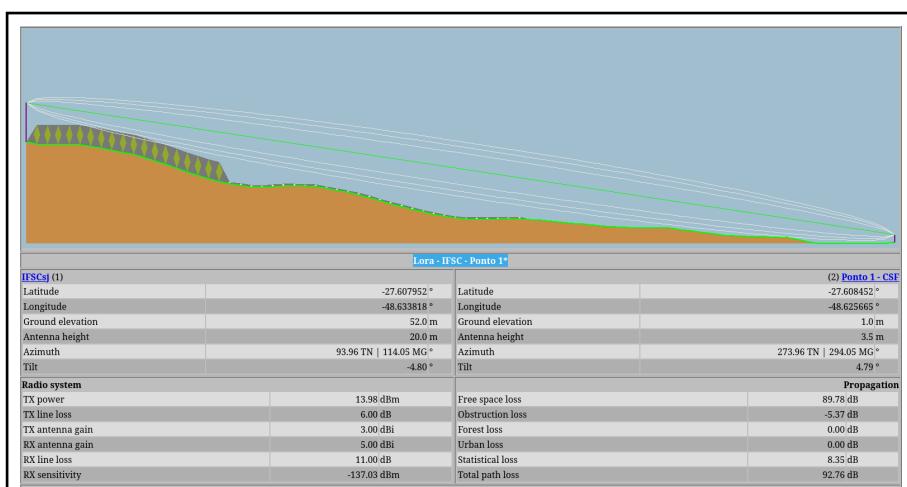
Figura 1: Elaborada pelo Autor



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

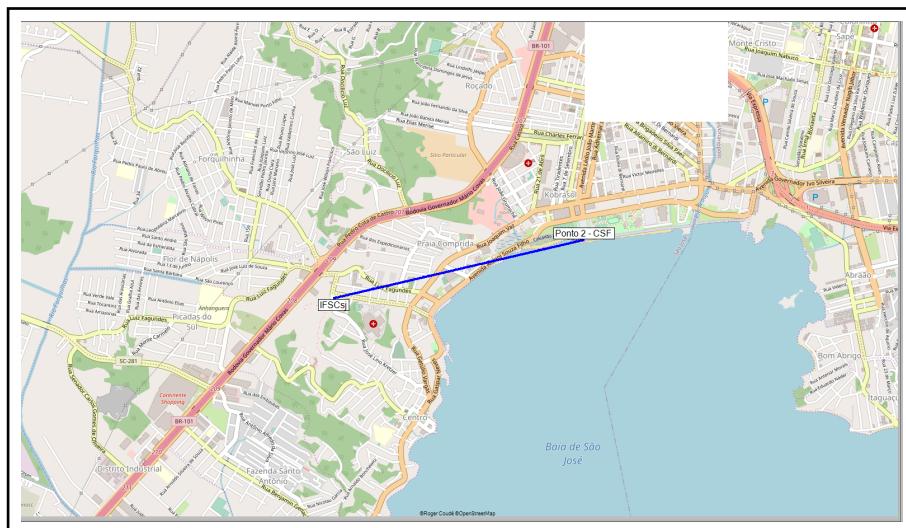
Performance	
Distance	0.805 km
Precision	9.9 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-87.78 dBm
Received Signal	9.14 $\mu$ V
Fade Margin	45.24 dB

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:

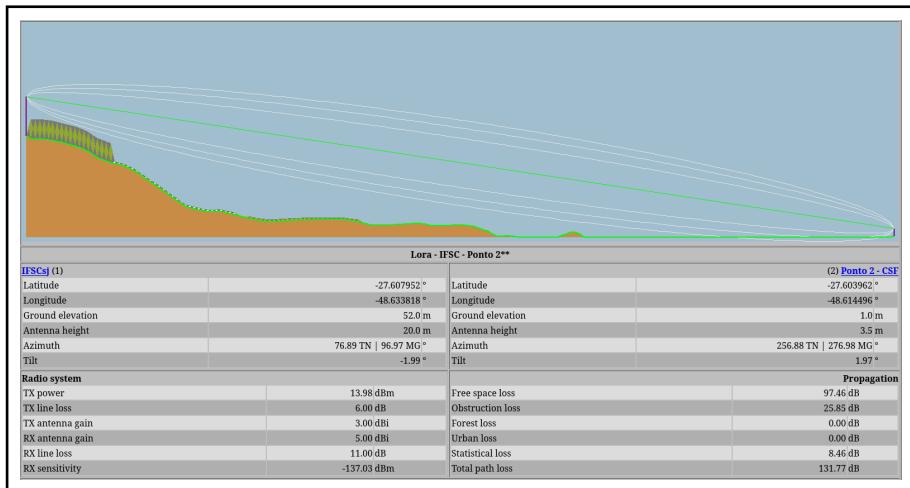
Figura 4: Elaborada pelo Autor



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

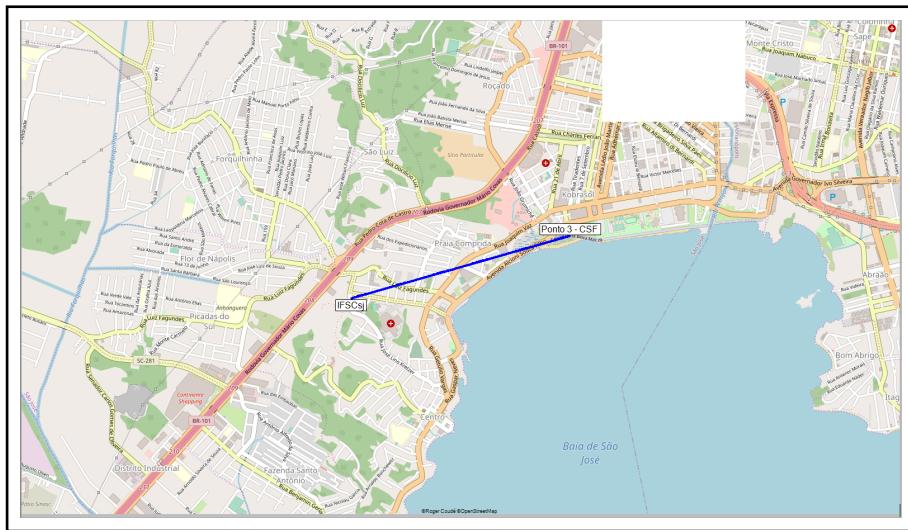
<b>Performance</b>	
<b>Distance</b>	1.955 km
<b>Precision</b>	10.0 m
<b>Frequency</b>	915.000 MHz
<b>Equivalent Isotropically Radiated Power</b>	0.013 W
<b>System gain</b>	138.00 dB
<b>Required reliability</b>	75.000 %
<b>Received Signal</b>	-126.79 dBm
<b>Received Signal</b>	0.10 µV
<b>Fade Margin</b>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

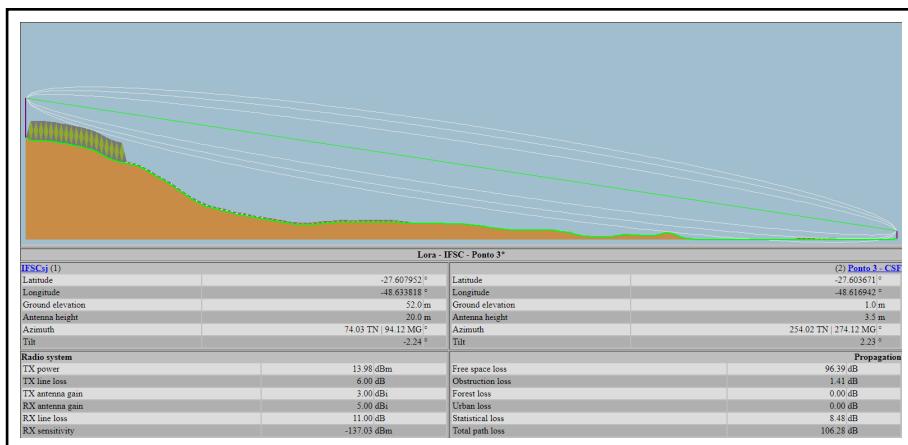
Figura 7: Elaborada pelo Autor



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

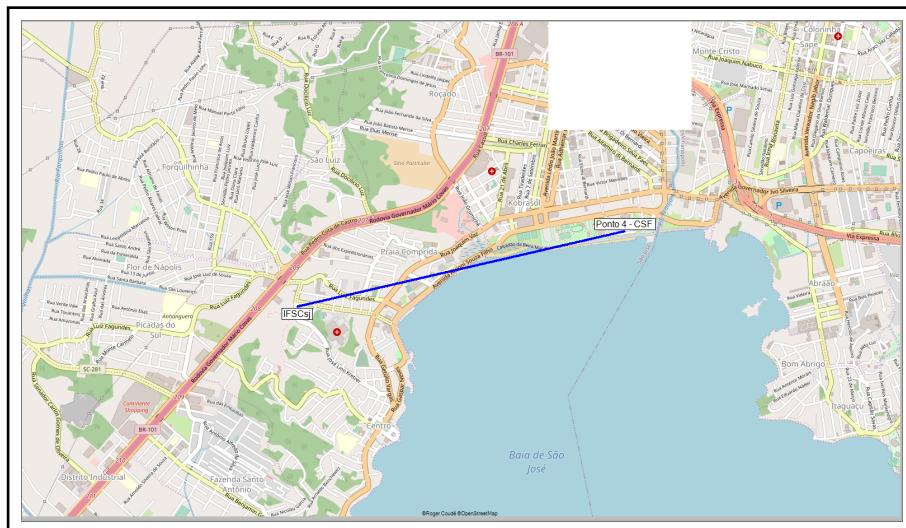
Performance		
Distance		1.730 km
Precision		10.0 m
Frequency		915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power		0.013 W
System gain		138.00 dB
Required reliability		75.000 %
Received Signal		-101.30 dBm
Received Signal		1.93 µV
Fade Margin		31.72 dB

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:

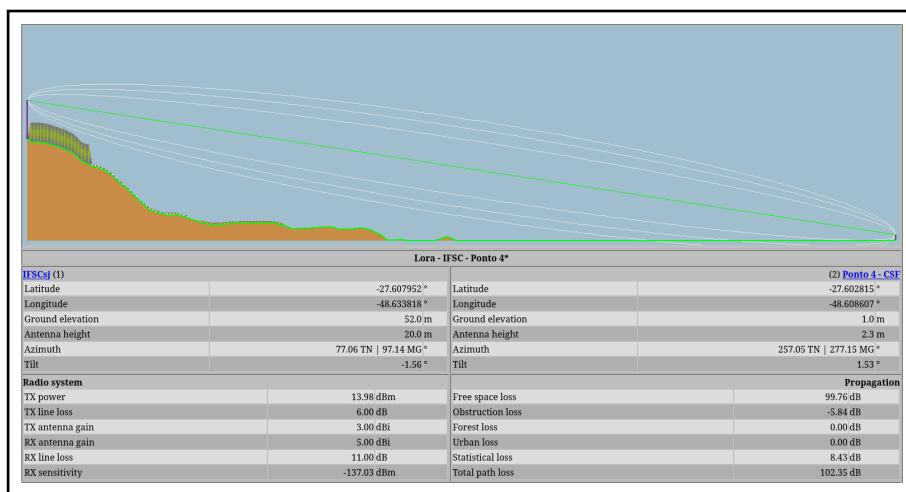
Figura 10: Elaborada pelo Autor



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

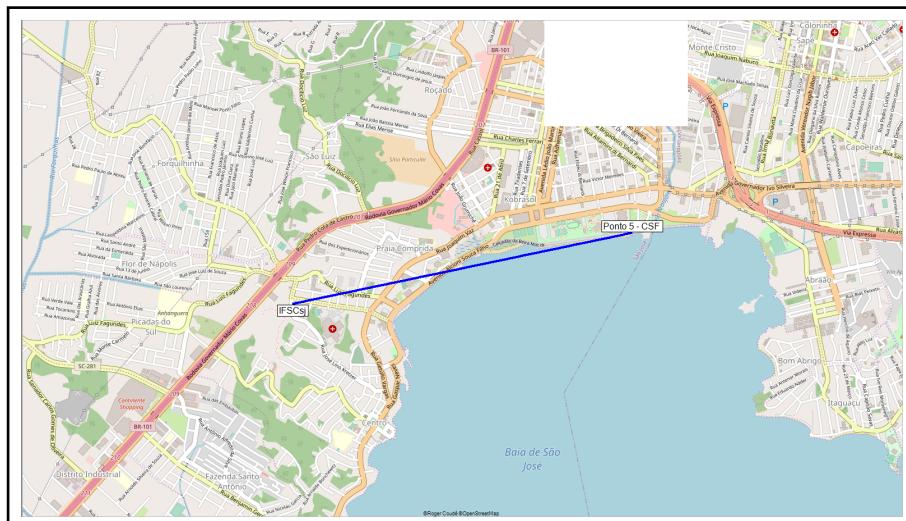
Performance	
Distance	2.549 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-97.37 dBm
Received Signal	3.03 $\mu$ V
Fade Margin	35.65 dB

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:

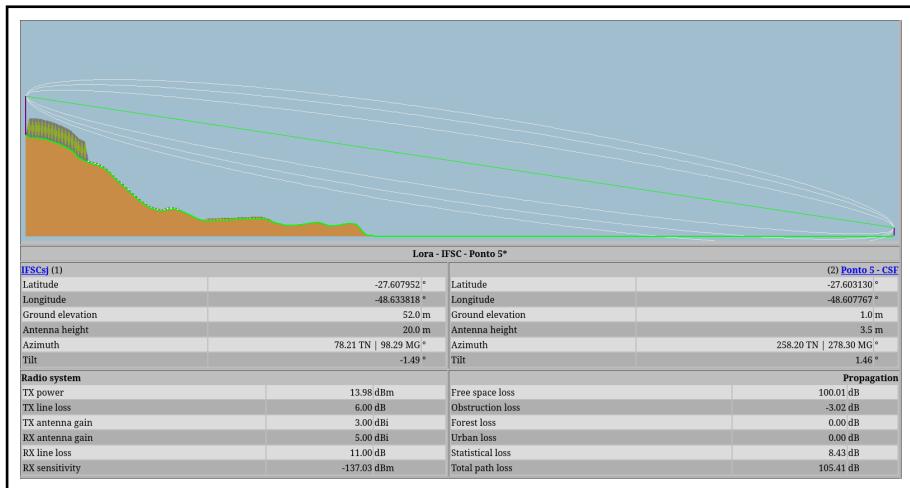
Figura 13: Elaborada pelo Autor



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:

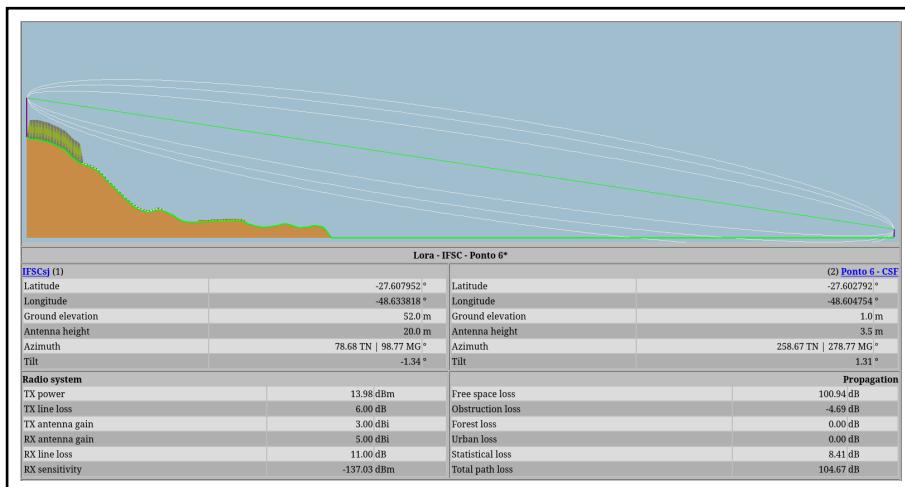
Figura 16: Elaborada pelo Autor



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

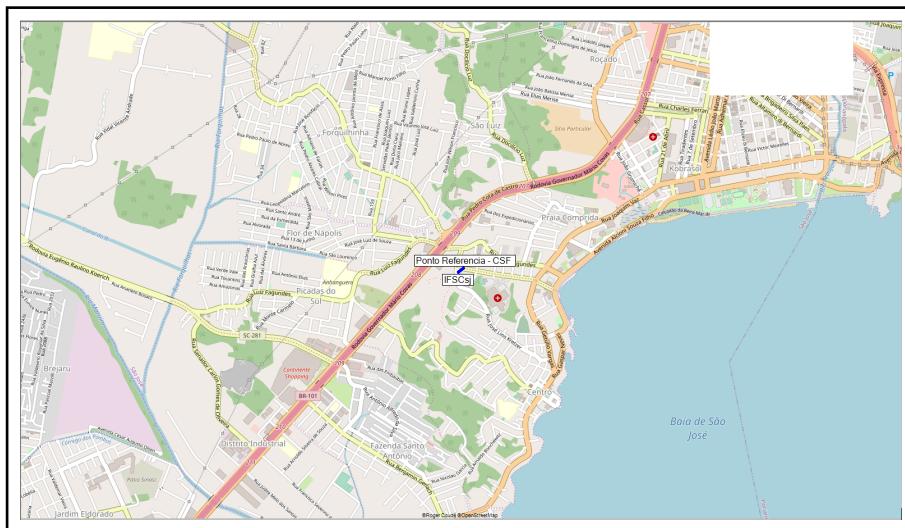
Performance	
Distance	2.921 km
Precision	10.0 m
Frequency	915.000 MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	0.013 W
System gain	138.00 dB
Required reliability	75.000 %
Received Signal	-99.69 dBm
Received Signal	2.32 µV
Fade Margin	33.33 dB

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:

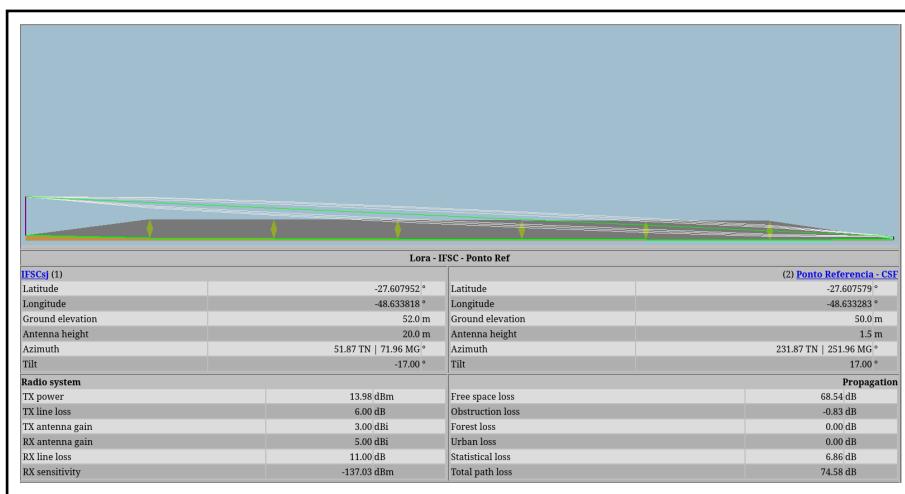
Figura 19: Elaborada pelo Autor



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

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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:

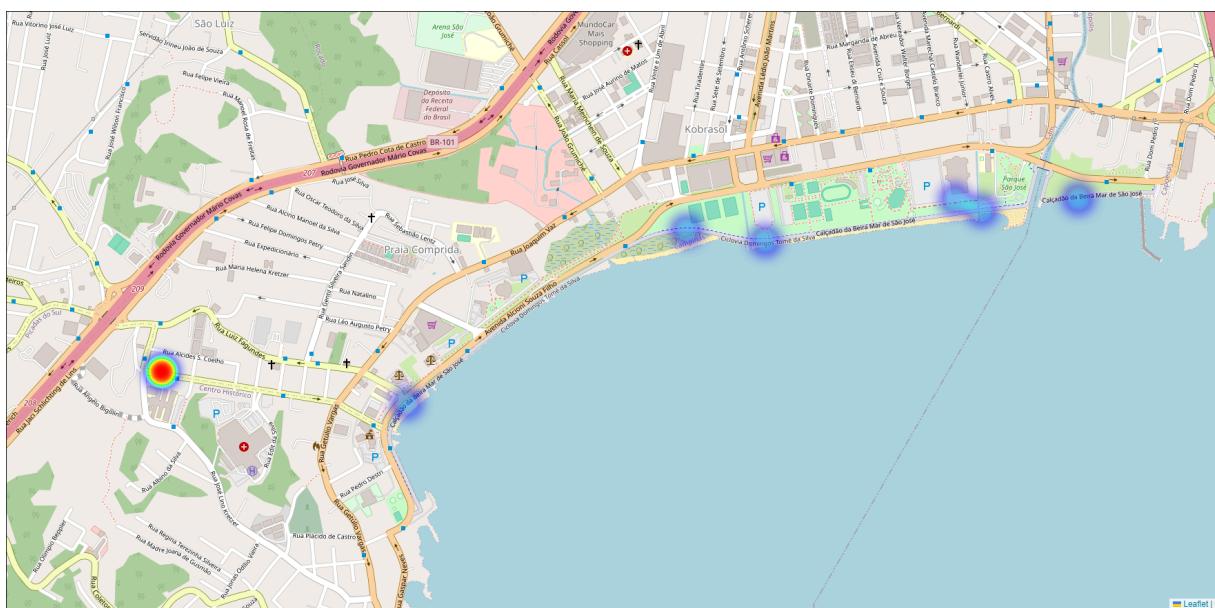


Figura 22: Mapa de calor baseado na potência do sinal recebido

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.