



Engenharia de Telecomunicações e Informática

**Sistemas e Redes de Comunicação para Móveis Avançado**

**Operador de Telecomunicações Móveis 5G NR**

João Rabuge | 98509

Bernardo Assunção | 98616

**Docente:**

Américo Manuel Carapeto Correia

**Ano curricular: 4º**

**Semestre: 1º**

**Semestre 2023/2024**

## Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Teoria e Conceitos Básicos .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Resultados .....</b>	<b>7</b>
3.1. 'Throughput' vs Número de UE's .....	8
3.2. 'Throughput' vs Percentagem Potência.....	10
3.3. Cobertura vs Percentagem Potência.....	11
3.4. 'Throughput' vs Tempo.....	13
3.5. Eficiência Espectral .....	14
<b>4. Discussão.....</b>	<b>15</b>
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>17</b>
<b>6. Bibliografia.....</b>	<b>19</b>
 <b>Tabela 1 - Comparação entre 4G e 5G NR .....</b>	 <b>4</b>
<b>Tabela 2 - Parâmetros dos Cenários Utilizados.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabela 3 - 'Throughput' Mínimo e Máximo. ....</b>	<b>9</b>
<b>Tabela 4 - Throughput Mínimo e Máximo, Potência de Transmissão .....</b>	<b>11</b>
<b>Tabela 5 - Cobertura Mínima e Máxima, Potência de Transmissão .....</b>	<b>12</b>
<b>Tabela 6 - Throughput Médio Mínimo e Máximo ao longo da Simulação.....</b>	<b>14</b>
<b>Tabela 7 - Eficiência Espectral [Mbps/Hz].....</b>	<b>14</b>
 <b>Figura 1 - Arquitetura 5G NR.....</b>	 <b>5</b>
<b>Figura 2 - Transmissão de Pacotes 5G NR .....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 3 - - 'Throughput' vs Número de UE's diferente número de UE's .....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 4 - 'Throughput' vs Percentagem Potência.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 5 - Cobertura vs Percentagem Potência .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 6 - Throughput vs Tempo.....</b>	<b>13</b>

## 1. Introdução

O **5G New Radio (5G NR)** representa a próxima geração de **redes móveis**, garantindo **velocidades de download e upload** significativamente **mais rápidas**, **latência** muito **menor** e capacidade para conectar muitos mais dispositivos **simultaneamente** do que as redes móveis anteriores. Desenvolvido pelo **3rd Generation Partnership Project (3GPP)**, o 5G NR é uma evolução das tecnologias de rede existentes, projetadas para atender às crescentes demandas de uma sociedade cada vez mais conectada.

No entanto, para isto ser atingido, é essencial que os operadores de **telecomunicações** móveis compreendam profundamente e sejam capazes de **otimizar** o desempenho do **5G NR** numa variedade de cenários. Em particular, a avaliação dos serviços de transmissão de pacotes - o método pelo qual os dados são formatados para transmissão e, em seguida, transmitidos pela rede - é de grande importância. Uma compreensão detalhada do desempenho da transmissão de pacotes pode ajudar os operadores a melhorar a **eficiência da rede**, a **qualidade do serviço** e a experiência geral do utilizador.

Neste projeto, o objetivo é realizar uma **avaliação** de serviços de **transmissão de pacotes** em diferentes cenários 5G NR. Especificamente, em dois cenários: **InFSH (Indoor Factory with High BS and Sparse Clutter)** e **Std (Stadium)**.

Iremos focarmos-nos na avaliação da **numerologia 2** usando esquemas de **Massive MIMO**. A numerologia 2, com **fc=28Mhz**, **Bt=100Mhz** e **tempo de simulação de 50s**. Esperamos que, ao avaliar o desempenho deste esquema em **diferentes cenários**, possamos fornecer **insights** valiosos que possam ajudar na otimização do **5G NR** para a transmissão de pacotes.

## 2. Teoria e Conceitos Básicos

Esta seção do trabalho procura explicar os **conceitos fundamentais** necessários para entender a **avaliação de serviços de transmissão de pacotes** nos **diferentes cenários 5G NR**.

**5G New Radio (5G NR):** O 5G NR é a nova norma para redes sem fio desenvolvida pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Ele foi projetado para suportar uma variedade de dispositivos e serviços, oferecer melhor desempenho, eficiência e custo, e atender às crescentes demandas por maior capacidade de dados e conectividade.

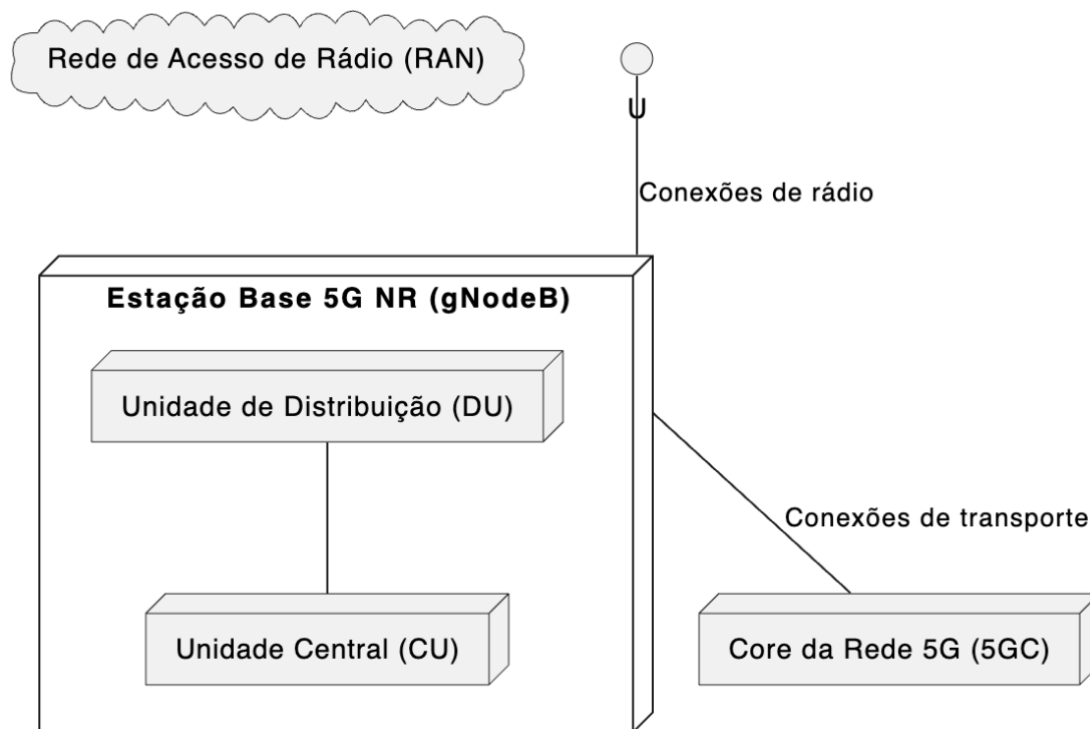
**Comparação 4G e 5G NR:** Para ilustrar as diferenças e avanços entre a tecnologia 4G e 5G NR, veja a **Tabela 1** abaixo.

*Tabela 1 - Comparação entre 4G e 5G NR*

Característica	4G LTE	5G NR
<b>Velocidade de Download</b>	Até 100 Mbps	Até 20 Gbps
<b>Latência</b>	Em torno de 50 ms	< 1 ms
<b>Densidade de Conexão (dispositivos por km<sup>2</sup>)</b>	100.000 dispositivos	1.000.000 dispositivos
<b>Frequência de Espectro</b>	Até 6 GHz	Até 100 GHz
<b>Tecnologia de Transmissão</b>	MIMO (Multiple Input Multiple Output)	Massive MIMO
<b>Padrão de Codificação</b>	OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing)	FDM (Frequency division multiplexing)
<b>Mobilidade (velocidade a que ainda pode fornecer conexão)</b>	Até 350 km/h	Até 500 km/h

**Transmissão de Pacotes:** Na comunicação de dados, a informação é geralmente dividida em pacotes - pequenos blocos de dados que são transmitidos através da rede. Cada pacote contém uma parte dos dados, bem como informações adicionais, como o endereço do destinatário. Na chegada, os pacotes são reagrupados para recriar os dados originais.

**Arquitetura 5G NR:** A *Figura 1* mostra a arquitetura padrão de uma rede 5G NR.



*Figura 1 - Arquitetura 5G NR*

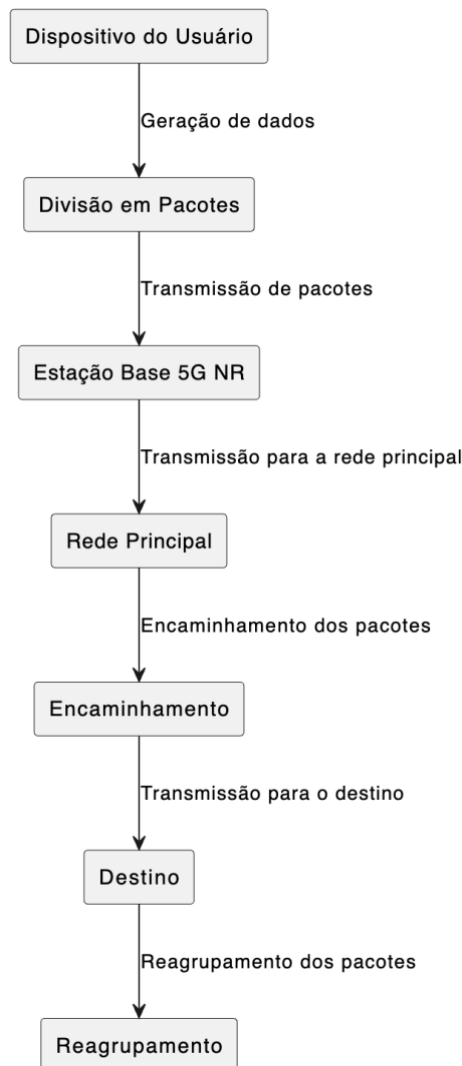
**Massive MIMO:** MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) é uma tecnologia que usa vários transmissores e recetores para melhorar a comunicação dos dados. O Massive MIMO, utiliza um grande número de antenas para aumentar ainda mais a capacidade e a eficiência da rede que leva a que a comunicação de dados seja muito melhor.

**Numerologia no 5G NR:** Numerologia é um termo usado no 5G NR para se referir a diferentes configurações de parâmetros de transmissão, incluindo a largura da banda de subportadora ( $\Delta f$ ) e o número de símbolos OFDM por intervalo de tempo. Neste trabalho,

focaremos na numerologia 2, que tem  $\Delta f=60\text{kHz}$  transmite-se 56 símbolos OFDM em cada 1.0 ms.

**Cenários InFSH e Std:** Esses são dois dos cenários em que a 5G NR pode ser usada. InFSH (Indoor Factory with High BS and Sparse Clutter) refere-se a um ambiente de fábrica interna com uma estação base alta e obstáculos esparsos. Std (Stadium) refere-se a um estádio, onde a rede deve suportar uma grande quantidade de usuários num espaço relativamente pequeno.

**Transmissão de Pacotes 5G NR:** A *Figura 2* apresenta um diagrama simplificado de como a transmissão de pacotes ocorre no 5G NR.



*Figura 2 - Transmissão de Pacotes 5G NR*

Esses conceitos formam a **base teórica** para o **trabalho**, permitindo-nos avaliar efetivamente os serviços de **transmissão de pacotes** em diferentes cenários **5G NR**.

### 3. Resultados

Antes de prosseguirmos para os resultados irei apresentar na **Tabela 2.** abaixo os parâmetros dos dois cenários utilizados neste projeto, o **Std** e **InFSH**.

*Tabela 2 - Parâmetros dos Cenários Utilizados.*

Cenário	BS Ativas	NumberFlows (UE)	Raio (m)	Pot. Transm. (W)
<b>Std</b>	12	10	17	0.25
<b>InFSH</b>	18	10	24	0.25

Nesta discussão de resultados iremos abordar os resultados destes dois cenários, em relação a:

- ‘Throughput’ vs Número de UE’s, para 1 RL e 3 RL,
- ‘Throughput’ vs Percentagem Potência para 1 RL e 3 RL,
- Cobertura vs Percentagem Potência para 1 RL e 3 RL,
- ‘Throughput’ vs Tempo,
- Eficiência Espectral.

### 3.1. 'Throughput' vs Número de UE's

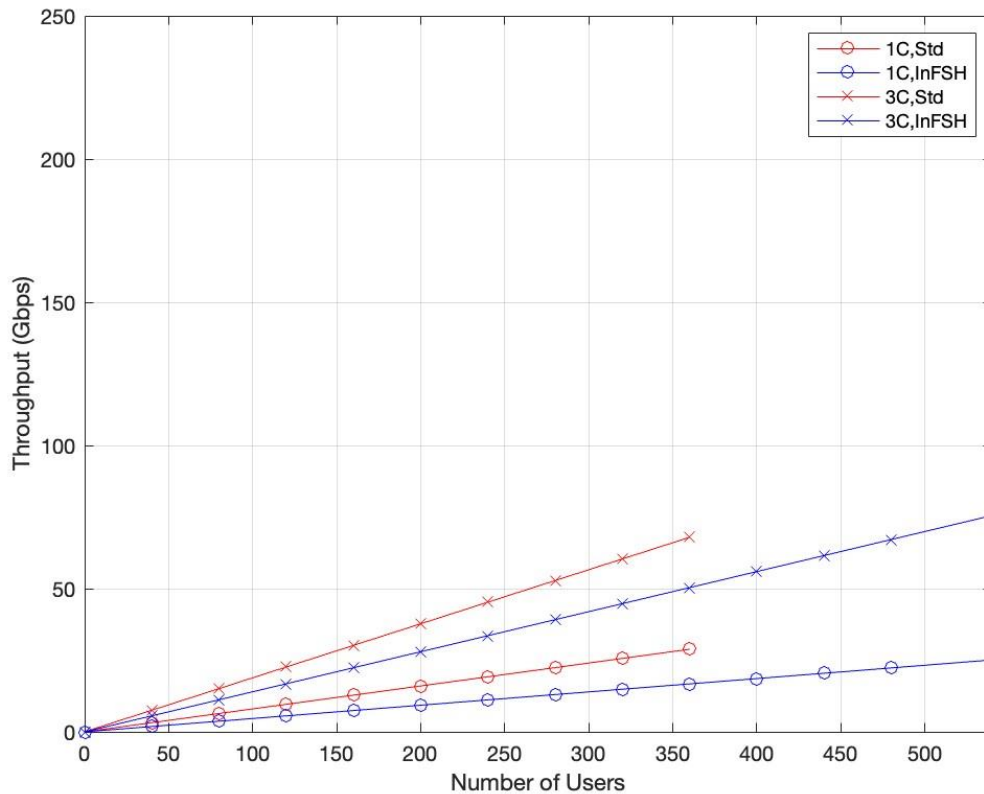


Figura 3 - - 'Throughput' vs Número de UE's diferente número de UE's

Ao observar a **Figura 4.** acima, consegue constatar-se o seguinte:

- Os cenários mantêm uma **linearidade direta** entre o aumento de UE's e o **aumento do throughput**. Quanto **maior** for o **número de users**, **maior** será o **throughput** em ambos os cenários;
- O cenário do **estádio (Std)**, tem **maior throughput** do que o cenário da **fábrica (InFSH)** até ao ponto de 485 UE's com 3 RL, onde o cenário Std (que só possui throughput até a um máximo de **360 EU's**) é ultrapassado em throughput pelo cenário da fábrica. Para **3 RL throughput Std > throughput InFSH**,  $[0, 485[$  EU, e **throughput InFSH > throughput Std**,  $[485, 540]$ ;
- Para **1 RL**, mesmo que só haja throughput para o Std **até 360 EU's**, o cenário InFSH **não consegue** ultrapassar nunca o throughput do estádio.



- O **throughput** é mais **elevado** com **3 RL** do que com **1 RL** independentemente do cenário.

Na *Tabela 3* abaixo é possível observar os valores **mínimos** e **máximos** de **throughput** tendo em conta o **número de EU's** em cada.

*Tabela 3 - 'Throughput' Mínimo e Máximo.*

Cenário	Throughput Mínimo [Gbps]	Throughput Máximo [Gbps]
Std 1 RL	3.2	28.8
Std 3 RL	7.6	67.9
InFSH 1 RL	1.9	25.2
InFSH 3 RL	5.6	75.6

Para melhor compreensão, considera-se **throughput mínimo** quando **Number of Users** = **40** e **máximo** quando **Number of Users** = **540** para InFSH e **360** para Std.

### 3.2. 'Throughput' vs Percentagem Potência

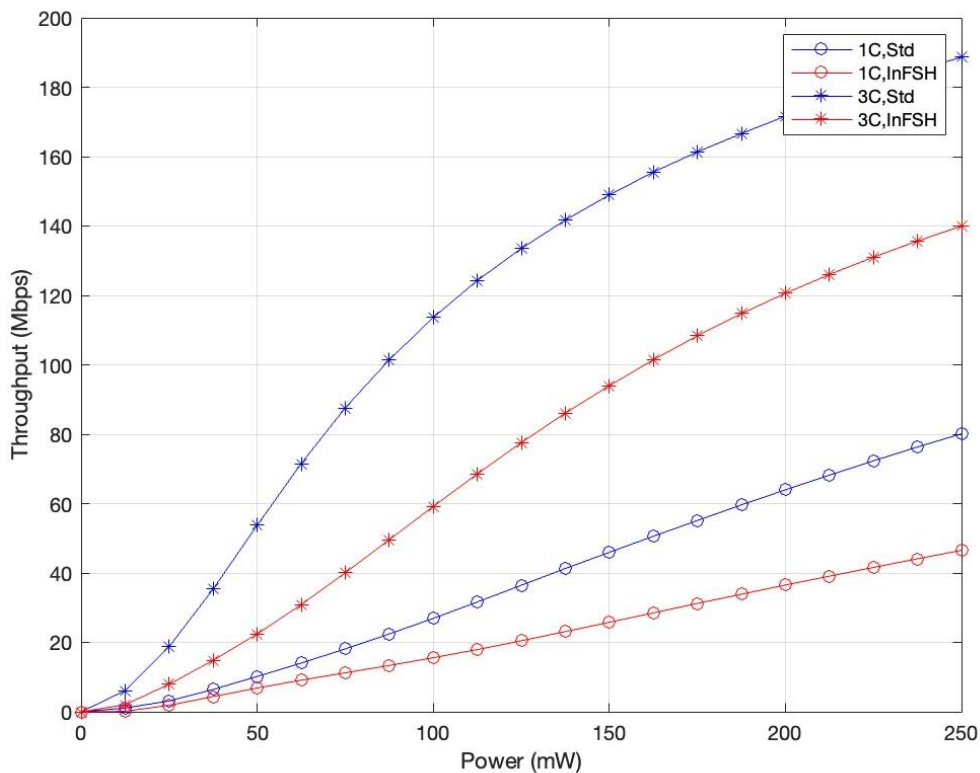


Figura 4 - 'Throughput' vs Percentagem Potência

Ao observar a **Figura 4.** acima, consegue constatar-se o seguinte:

- Quanto **maior** for a **potência de transmissão**, **maior** será o **throughput**;
- O cenário do **estádio (Std)**, tem **maior throughput** do que o cenário da **fábrica (InFSH)** em cada uma das **RL**. Para **3** e **1 RL** **throughput Std > throughput InFSH**, independentemente da **potência de transmissão**;
- O **throughput** é mais **elevado** com **3 RL** do que com **1 RL** independentemente do **cenário**.

Na **Tabela 4** abaixo é possível observar os valores **mínimos** e **máximos** de **throughput** tendo em conta a **potência de transmissão** em cada.

Tabela 4 - Throughput Mínimo e Máximo, Potência de Transmissão

Cenário	Throughput Mínimo [Mbps]	Throughput Máximo [Mbps]
Std 1 RL	10.2	80.1
Std 3 RL	53.7	188.7
InFSH 1 RL	6.8	46.5
InFSH 3 RL	22.4	139.9

Para melhor compreensão, considera-se **throughput mínimo** quando **potência = 50 mW** e **máximo** quando **potência = 250 mW**.

### 3.3. Cobertura vs Percentagem Potência

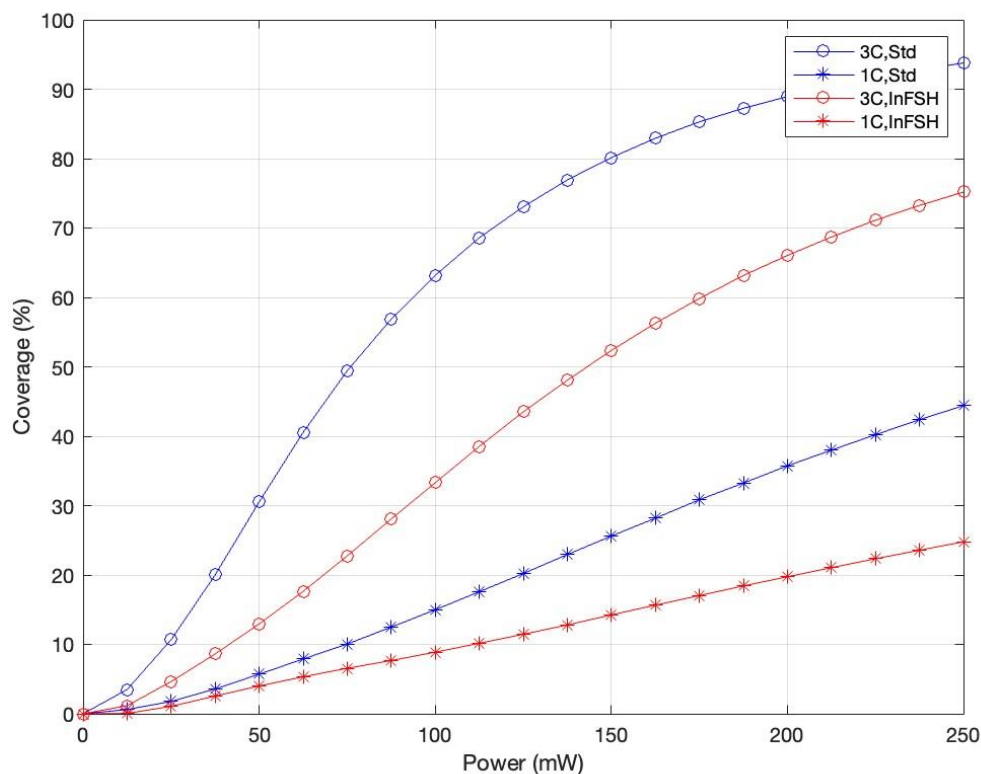


Figura 5 - Cobertura vs Percentagem Potência

Ao observar a **Figura 5.** acima, consegue constatar-se o seguinte:

- Quanto **maior** for a **potência de transmissão**, **maior** será a **cobertura**;

- O cenário do **estádio (Std)**, tem **maior cobertura** do que o cenário da **fábrica (InFSH)** em cada uma das **RL**. Para **3 e 1 RL** **cobertura Std > cobertura InFSH**, independentemente da **potência de transmissão**;
- A **cobertura** é mais **elevada** com **3 RL** do que com **1 RL** independentemente do **cenário**.

Na **Tabela 5** abaixo é possível observar os valores **mínimos** e **máximos** de **cobertura** tendo em conta a **potência de transmissão** em cada.

*Tabela 5 - Cobertura Mínima e Máxima, Potência de Transmissão*

<b>Cenário</b>	<b>Percentagem Cobertura Mínima [%]</b>	<b>Percentagem Cobertura Máxima [%]</b>
<b>Std 1 RL</b>	5.7	44.4
<b>Std 3 RL</b>	30.6	93.8
<b>InFSH 1 RL</b>	4.0	24.8
<b>InFSH 3 RL</b>	12.9	75.2

Para melhor compreensão, considera-se **cobertura mínima** quando **potência = 50 mW** e **máxima** quando **potência = 250 mW**.

### 3.4. 'Throughput' vs Tempo

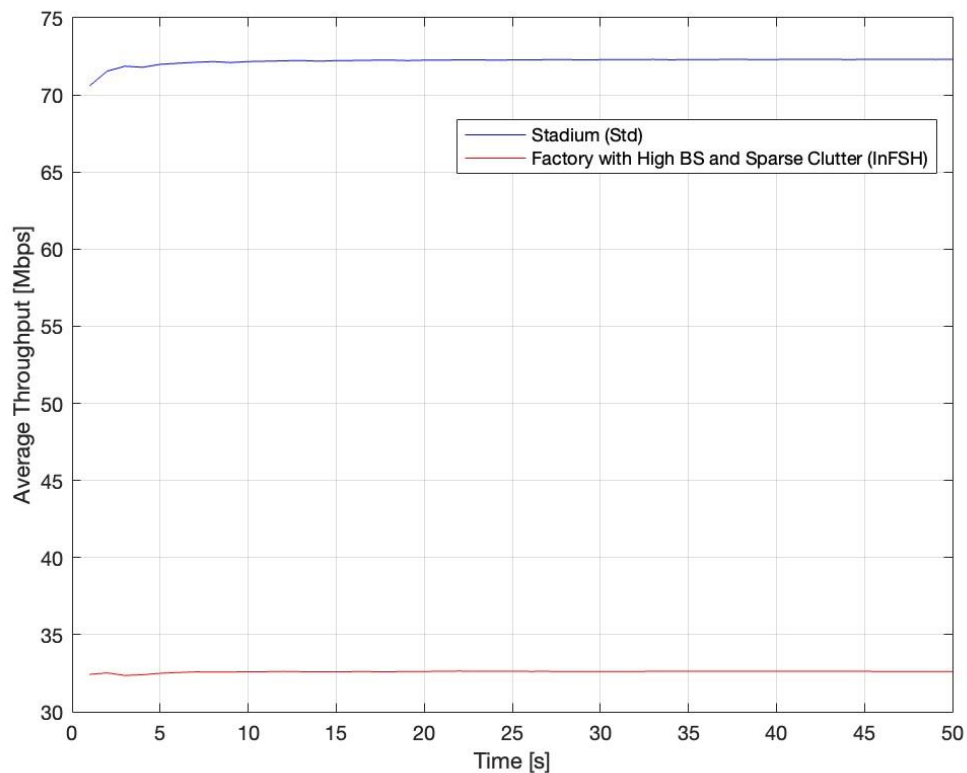


Figura 6 - Throughput vs Tempo

Ao observar a **Figura 6.** acima, consegue constatar-se o seguinte:

- O **estádio (Std)** tem um **throughput** em **média superior** à **fábrica (InFSH)** **independentemente do tempo da simulação**
- Os valores de **throughput** mantêm-se mais ou menos **constant**es ao longo dos 50 segundos de simulação.
- Ambos os cenários têm **throughput** relativamente **baixos** comparativamente aos **cenários modelo** fornecidos pelo professor.

Na **Tabela 6** abaixo é possível observar os valores **mínimos** e **máximos** de **throughput** tendo em conta a **o tempo da simulação** em cada.

*Tabela 6 - Throughput Médio Mínimo e Máximo ao longo da Simulação*

Cenário	Throughput Mínimo [Gbps]	Throughput Máximo [Gbps]
Std	70.6	72.3
InFSH	32.4	32.7

É possível assim verificar que o cenário da **fábrica (InFSH)** acaba por ser ainda mais **constante** que o do **estádio (Std)** nos **50 segundos de simulação**, devido ao facto de o estádio ter uma **pequena oscilação** nos primeiros instantes da simulação.

### 3.5. Eficiência Espetral

A **eficiência espectral** é uma medida da eficácia com que um **sistema de comunicação** utiliza o **espectro de frequências disponível**. É calculada dividindo o **throughput máximo** pela **largura de banda**, o que nos fornece uma medida da **quantidade de dados que podem ser transmitidos por hertz** de largura de banda disponível.

Tendo em conta os valores de **eficiência espectral** demonstrados na **Tabela 7**, abaixo para os cenários **Std** e **InFSH**, para **1 RL** e **3 RL**, podemos chegar a várias conclusões:

*Tabela 7 - Eficiência Espetral [Mbps/Hz]*

Cenário	Throughput Máximo [Mbps]	Largura de Banda [MHz]	Eficiência Espetral [Bps/Hz]
Std 1 RL	80.1	100	0.8
Std 3 RL	188.7	100	1.89
InFSH 1 RL	46.5	100	0.47
InFSH 3 RL	139.9	100	1.4

Estes valores sugerem que a **eficiência espectral** é maior no cenário **Std** em comparação com o cenário **InFSH**, independentemente do número de **RL**. Além disso, a **eficiência espectral** é maior para **3 RL** em comparação com 1 RL em **ambos os cenários**.

Esta análise sugere que o cenário **Std**, com a sua maior **densidade de utilizadores**, é capaz de utilizar o **espectro de frequências** disponível de forma **mais eficiente** do que o **cenário InFSH**. Além disso, o uso de **múltiplas camadas de transmissão (3 RL)** parece

melhorar a **eficiência espectral** em comparação com uma única camada de transmissão (1 RL).

## 4. Discussão

Os **resultados** apresentados nos dados examinados providenciam evidências significativas da existência de uma **correlação** entre o **número de UE's (utilizadores)** e o **throughput**. Esta tendência é observada em ambos os **cenários** analisados, o do **estádio (Std)** e o da **fábrica (InFSH)**. De particular interesse é a constatação de que o cenário do **estádio consistentemente superou** o cenário da **fábrica** em termos de **throughput**, **independentemente** do **número de utilizadores** envolvidos. Adicionalmente, a comparação entre **1 RL** e **3 RL** indicou consistentemente que **3 RL** resulta num **maior throughput** em **ambos os cenários**.

A análise também revelou que a **potência de transmissão** está **positivamente** correlacionada com o **throughput**. Em particular, o cenário do **estádio** superou mais uma vez o cenário da **fábrica** em todos os níveis de **potência de transmissão** examinados. Esta tendência foi observada tanto para **1 RL** como para **3 RL**, reforçando a conclusão anterior de que **3 RL** proporciona um **throughput superior** em relação a 1 RL.

Outro aspeto crucial dos resultados é a **relação direta** entre a **potência de transmissão** e a **cobertura**. Semelhante às tendências observadas na análise do **throughput**, o cenário do **estádio** superou consistentemente o cenário da **fábrica** em todos os níveis de **potência de transmissão**, independentemente do número de **RL**. Mais uma vez, **3 RL** mostrou uma **cobertura** superior em comparação com **1 RL** em **ambos os cenários**.

Os **dados** apresentados na análise do comportamento do **throughput ao longo do tempo** revelam que o cenário do **estádio**, em **média**, produziu um **throughput superior** ao do cenário da **fábrica**, independentemente do **período de simulação examinado**. Apesar dos valores de **throughput** terem permanecido relativamente **estáveis** ao longo dos **50 segundos de simulação**, houve uma ligeira variação no cenário do **estádio** durante os primeiros instantes desta.

Relativamente à **eficiência espectral** nos cenários **Std** e **InFSH** para 1 RL e 3 RL. Os resultados indicaram que a **eficiência espectral** é **maior** no cenário **Std** em comparação com o cenário **InFSH**, independentemente do número de **RL**, e que a eficiência espectral é maior para **3 RL** em comparação com **1 RL** em ambos os cenários. Isto sugere que o **cenário do estádio**, com a sua **maior densidade** de utilizadores, é capaz de **utilizar o espectro de frequências disponível de forma mais eficiente** do que o cenário da **fábrica**. Além disso, a utilização de **múltiplas camadas de transmissão (3 RL)** parece melhorar a **eficiência espectral** em comparação com uma única camada de transmissão (1 RL).

No entanto, é importante salientar que, embora as tendências observadas sejam **consistentes**, os valores de **throughput** em ambos os cenários foram **relativamente baixos** quando comparados com os **cenários modelo fornecidos**. Em suma, os resultados sugerem que **fatores** como o número de **UE's**, a **potência de transmissão** e o **tipo de cenário (estádio vs fábrica)** têm um impacto **significativo** no desempenho da rede. No entanto, são necessários estudos futuros para explorar estas relações em maior profundidade e para entender por que os valores de throughput observados são mais baixos do que os dos cenários modelo fornecidos.



## 5. Conclusão

Este estudo teve como objetivo avaliar o **desempenho da transmissão de pacotes** em diferentes cenários **5G NR**, especificamente em cenários de **estádio** e **fábrica**, utilizando a **numerologia 2** e esquemas de **Massive MIMO**. A análise dos dados revelou várias tendências significativas.

Em primeiro lugar, o cenário do estádio **superou consistentemente** o cenário da **fábrica** em termos de **throughput** e **cobertura**, independentemente do **número de utilizadores** ou do **nível de potência de transmissão**. Isto sugere que o **ambiente do estádio**, com a sua **alta densidade de utilizadores** e **relativa falta de obstruções**, é mais adequado para a **transmissão de pacotes 5G NR** do que um **ambiente de fábrica**, onde a presença de **equipamentos e estruturas** pode **interferir com os sinais**.

Em segundo lugar, foi observado que a utilização de **3 RL** resultou **num maior throughput** e **cobertura** em comparação com **1 RL** em ambos os cenários. Isto indica que a utilização de **múltiplas camadas de transmissão (múltiplos Radio Link)** pode **melhorar significativamente o desempenho da rede**, permitindo uma **maior capacidade** e uma **melhor qualidade de serviço**.

Os resultados mostraram uma **correlação positiva** entre a **potência de transmissão** e tanto o **throughput** como a **cobertura**. Isto sugere que o **aumento da potência de transmissão** pode ser uma estratégia eficaz para **melhorar o desempenho** da rede.

Por outro lado, a **eficiência espectral** mostrou-se **maior** no cenário **Std** em comparação com o cenário **InFSH**, independentemente do **número de RL**. O cenário **Std**, com a sua maior **densidade de utilizadores**, parece ser capaz de utilizar o **espectro de frequências disponível** de forma mais **eficiente** do que o cenário **InFSH**.

No entanto, é importante notar que os valores de **throughput** observados foram **relativamente baixos** quando comparados com os **cenários modelo fornecidos**. Isto sugere que podem existir **outros fatores** não considerados neste estudo que podem estar a impactar o **desempenho da rede**.

Em conclusão, este estudo fornece **insights** valiosos sobre o **desempenho do 5G NR** em **diferentes cenários** e destaca **áreas potenciais para otimização futura**. No entanto, são necessários mais estudos para entender completamente os fatores que afetam o **desempenho da rede** e para desenvolver estratégias para maximizar a **eficiência da transmissão de pacotes 5G NR**.

## 6. Bibliografia

1. 3GPP. (2020). 5G NR (New Radio) Specifications. Retrieved from <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/160-5g-new-radio>
2. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C. (2014). What Will 5G Be?. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065-1082.
3. Buzzi, S., Chih-Lin, I., Klein, T. E., Poor, H. V., Yang, C., & Zappone, A. (2017). A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 697-709.
4. Chih-Lin, I., Rowell, C., Han, S., Xu, Z., Li, G., & Ye, Z. (2014). Toward Green and Soft: A 5G Perspective. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 66-73.
5. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2020). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. Academic Press.
6. Fettweis, G., & Alamouti, S. (2014). 5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 140-145.
7. Ge, X., Huang, J., Wang, C. X., Hong, X., & Yang, G. (2016). Capacity Analysis of a Multi-Cell Multi-Antenna Cooperative Cellular Network with Co-Channel Interference. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(10), 3298-3309.
8. Miao, G., Himayat, N., Li, Y., & Swami, A. (2010). Cross-Layer Optimization for Energy-Efficient Wireless Communications: A Survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(4), 529-542.
9. Slides Aulas