

Simulação a Nível de Sistema de Cenários de Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

Décio Manuel Brito Tavares

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Professor Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor
Catedrático,
ISCTE-IUL

Co-Orientador:

Professor Doutor Nuno Manuel Branco Souto, Professor Associado
com Agregação,
ISCTE-IUL

Outubro, 2022

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Simulação a Nível de Sistema de Cenários de Superfícies
Inteligentes Reconfiguráveis

Décio Manuel Brito Tavares

Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:

Professor Doutor Américo Manuel Carapeto Correia, Professor
Catedrático,
ISCTE-IUL

Co-Orientador:

Professor Doutor Nuno Manuel Branco Souto, Professor Associado
com Agregação,
ISCTE-IUL

Outubro, 2022

Agradecimentos

Primeiramente, começaria por agradecer aos meus pais por me terem proporcionado todas as condições para conseguir atingir os meus objetivos. Por terem me incentivado a seguir este caminho e por estarem sempre presentes em todos os momentos da minha vida, pois sem eles nunca conseguiria chegar onde estou hoje.

Aos meus avós, tios e outros familiares agradeço pelo apoio, não só durante este percurso, mas sim por tudo que me têm proporcionado ao longo dos anos.

Um agradecimento especial à minha namorada pelo apoio e por estar sempre presente em todas as fases da minha vida. Obrigado por tudo.

Gostaria de agradecer ao Professor Américo Correia, por aceitar ser meu orientador e fazer com que seja possível chegarmos ao resultado que temos hoje. Obrigado pela atenção, suporte e por ter disponibilizado o seu conhecimento.

Para finalizar, deixo um especial obrigado aos meus colegas, amigos e a todos os que estiveram comigo durante esta etapa.

Resumo

Uma vez que vivemos numa época em que a tecnologia tem sido o motor de tudo o que nos rodeia é extremamente importante estar cada dia a descobrir e a estudar soluções para dar resposta à demanda e ultrapassar as dificuldades que vêm sendo encontradas. As superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) têm sido apontadas como tecnologia crucial para as futuras gerações de redes sem fios. Esta dissertação desenrola-se à volta deste tema.

Para além dos RIS, foi abordado uma outra tecnologia que são os sistemas massivos com múltiplas entradas e múltiplas saídas (M-MIMO) que vêm sendo parte importante no mundo das telecomunicações e que tem sofrido constantes evoluções para acompanhar as sucessivas gerações de redes sem fio.

Para finalizar, foi utilizado um simulador a nível de sistema para ajudar na análise do desempenho das redes 5G NR. Foram realizadas diversas simulações, tendo em conta dois diferentes cenários, o *Indoor Open Office* e o *Urban Micro Truncated*.

Considerando os resultados relativamente ao *throughput* e à cobertura obtidos pode-se dizer que a integração das RIS e dos sistemas M-MIMO trarão ganhos enormes às redes sem fio das gerações vindouras.

Palavras-chave: Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS); Sistemas Massivos com Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (M-MIMO); Simulador a Nível de Sistema; Propagação em Rádio Móvel com e sem Linha de Vista; Redes sem fio.

Abstract

Since we live in an age where technology has been the engine of everything around us, it is extremely important to be discovering and studying solutions every day to meet the demand and overcome the difficulties that have been found. Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) have been identified as key technology for future generations of wireless networks. This thesis is built around this topic.

In addition to RIS, another technology was discussed, which is the massive multiple-input multiple-output (M-MIMO) systems that have been an important part of the telecommunications world and have undergone constant evolution to keep up with successive generations of wireless networks.

Finally, a system-level simulator was used to help analyze the performance of 5G NR networks. Several simulations were performed, with two different scenarios in mind, Indoor Open Office and Urban Micro Truncated.

Considering the results for throughput and coverage, we can be said that the integration of RIS and M-MIMO systems will bring great gains to the wireless networks of the next generations.

Keywords: Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Massive Multiple-Input Multiple-Output (M-MIMO) systems; System Level Simulator; Propagation in Mobile Radio with and without Line of Sight; Wireless Networks.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XV
INTRODUÇÃO	17
1.1) MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO	17
1.2) OBJETIVOS	18
1.3) MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO.....	18
1.4) ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO	18
ESTADO DA ARTE.....	21
2.1) EVOLUÇÃO DAS REDES DE COMUNICAÇÃO MÓVEL SEM FIO.....	21
2.2) SUPERFÍCIES INTELIGENTES RECONFIGURÁVEIS.....	23
2.2.1) RIS E A SUA ARQUITETURA.....	23
2.2.2) APLICAÇÕES DOS RIS	24
2.3) SISTEMA M-MIMO.....	25
2.3.1) SISTEMA MIMO ASSISTIDO POR RIS	27
IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR DE SISTEMA.....	29
3.1) DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DE SISTEMA.....	29
3.1.1) EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	33
3.1.2) CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO.....	34
RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	37
4.1) RESULTADOS <i>THROUGHOUT</i>	38
4.2) RESULTADOS DE COBERTURA (<i>COVERAGE</i>)	42
CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	47
5.1) CONCLUSÕES	47
5.2) TRABALHO FUTURO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

Índice de Figuras

Figura 1 - Comparação qualitativa entre comunicações 5G e 6G, retirado de [6]	22
Figura 2 - Arquitetura de uma RIS, adaptado de [9]	24
Figura 3 - Um caso típico de utilização de RIS, retirado de [10].....	25
Figura 4 - Comparação de um sistema M-MIMO com um sistema tradicional, retirado de [14]	26
Figura 5 - Um sistema MIMO assistido por RIS, adaptado de [17].....	27
Figura 6 - Interligação entre os simuladores de sistema e de ligação, retirado de [18]	29
Figura 7 - Interface gráfica da rede C-RAN do simulador de sistema	30
Figura 8 - Visão geral do simulador de sistema, retirado de [18]	31
Figura 9 - Cenário Indoor Open Office (IOO)	32
Figura 10 - Cenário Urban Micro Truncated (UMT)	33
Figura 11 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_c = 132$, $NRIS = 144$, $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	38
Figura 12 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_c = 132$, $N_{tx} = 256$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	39
Figura 13 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	40
Figura 14 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$, $N_s = 1$ e $N_c = 132$	40
Figura 15 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$ e $N_c = 132$	41
Figura 16 - Throughput vs. número de utilizadores para IOO, com $N_{tr} = 64$, $N_s = 2$ e $N_{rx} = 16$	41
Figura 17 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_c = 132$, $NRIS = 144$, $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	42
Figura 18 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_c = 132$, $N_{tx} = 256$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	43
Figura 19 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$	43
Figura 20 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$ e $N_c = 132$	44
Figura 21 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$, $N_s = 1$ e $N_c = 132$...	45

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Requisitos de 5G vs. 6G, retirado de [7]	22
Tabela 2 – Valores de SNR, TBS, N_c , N_{tx} e $NRIS$ considerados para o cenário UMT	37
Tabela 3 - Valores de N_c , N° de utilizadores por BS e N° de utilizadores por RIS considerados para o cenário UMT	37
Tabela 4 - Topologias utilizadas no cenário UMT	38

Lista Abreviaturas e Siglas

3D – Três Dimensões
3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
4G – Quarta Geração
5G – Quinta Geração
6G – Sexta Geração
AI – Inteligência Artificial
AoA – *Azimuth Angle of Arrival*
AP – *Acess Point*
BLER – *Block Error Rate*
BS – Estação Base
C-RAN – *Cloud Radio Access Network*
CSI – Informação do Estado do Canal
FPGA – *Field-Programmable Gate Array*
IOO – *Indoor Open Office*
IoT – *Internet of Things*
ISD – *Intersite Distance*
LOS – *Line-of-Sight*
MIMO – Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
M-MIMO – Massivo MIMO
mmWave – millimeter Wave
NLOS – *Non-LOS*
NR – *New Radio*
OFDM – *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*
PIN – Positivo-Intrínseco Negativo
RF – Frequência-rádio
RIS – Superfície Inteligente Reconfigurável
SE – *Spectral Efficiency*
SNR – Relação Sinal/Ruído
SP – Processamento de Sinal
TBS – *Transport Block Size*
TTI – *Transmission Time Interval*

UE – Equipamento do Utilizador

UM-MIMO – Ultra-Massivo MIMO

UMT – *Urban Micro Truncated*

WLAN – *Wireless Local Access Network*

Introdução

1.1) Motivação e Enquadramento

Atualmente, cada vez mais tem-se assistido ao aumento da taxa de transmissão de dados em comunicação sem fios. Prevê-se que o tráfego móvel total chegue aos 5015 exabytes por mês (EB/mês) em 2030, sabendo que em 2010 era de 7,462 EB/mês [1]. Segundo estudos, estima-se um aumento para 38,6 bilhões de dispositivos conectados em 2025 e cerca de 50 bilhões em 2030 com a proliferação do paradigma da Internet das Coisas (IoT) [2]. Este aumento mostra claramente a importância da evolução e do avanço das tecnologias de comunicação móvel e implica estar constantemente a trabalhar em novas tecnologias para suprir as necessidades dos utilizadores. Mesmo estando a quinta geração (5G) na sua fase inicial, a indústria e o meio académico começam a se debruçar sobre a próxima geração, a sexta (6G), pois, segundo projeções, a 5G não será capaz de suportar totalmente a crescente demanda por comunicação e as exigências das redes sem fio das próximas décadas [1], [2].

Pelo que se tem planeado, a 6G irá transformar e revolucionar o mundo das redes sem fio. A 6G irá além da internet móvel e será necessária para oferecer suporte a serviços de inteligência artificial (AI) onnipresente, desde o núcleo até os dispositivos finais da rede [3]. Aproveitará uma tecnologia importante da 5G que são as comunicações massivas de múltiplas entradas e saídas (M-MIMO), tecnologia esta, que explora o domínio espacial, edificando várias antenas para permitir a transmissão paralela aos vários utilizadores usando o mesmo bloco de recursos de frequência-tempo, melhorando significativamente a eficiência espectral. Mas a grande novidade da 6G será a utilização das superfícies inteligentes reconfiguráveis (RISs).

As RISs são apontadas como uma das principais tecnologias da 6G e surgem com potencial para a criação de ambientes rádio controláveis e inteligentes. Uma RIS é uma superfície plana composta por um grande número de elementos refletivos passivos de baixo custo controlada por software. Cada um dos elementos possui um tamanho menor que o comprimento de onda e tem capacidade de alterar a fase do sinal incidente, dando um certo controlo aos operadores de redes, criando ambientes rádios controláveis e inteligentes. Para além de disponibilizar um canal de propagação favorável entre o transmissor e o recetor de uma comunicação, as RISs apresentam uma solução eficiente em termos económicos e energético.

As RISs dão a possibilidade de criar um ambiente sem fio inteligente superando a natureza estocástica do meio de propagação, fazendo com que haja uma melhoria na qualidade de serviço e de conectividade. O ambiente de comunicação sem fio que costuma ser um fator dinâmico incontrollável passará a ser um dos parâmetros considerado no projeto das redes [1].

1.2) Objetivos

Este trabalho está focado na concepção de simulações a nível do sistema de cenários de Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS), a fim de encontrar configurações mais eficientes em termos energéticos e de custos para RIS em tempo real com a utilização total de elementos passivos. Neste trabalho serão identificados e estudados aplicações e casos de utilização de sistemas assistidos por RIS na sexta geração (6G) das redes sem fio e não só. Serão feitas avaliações de desempenho de sistemas mais promissores num simulador numérico de código aberto.

1.3) Métodos de Investigação

O processo de investigação da dissertação está dividido em 4 fases. Nomeadamente:

- **Definição dos objetivos:** Nesta fase será definido os objetivos, formulando problemas a solucionar tendo em conta os métodos a utilizar.
- **Revisão da literatura:** Esta fase consiste em fazer pesquisas bibliográficas sobre o estado da arte dos RIS em tempo real com elementos totalmente passivos.
- **Testes e Análise de Resultados:** Na terceira fase serão feitos testes e análises de resultados e possíveis alterações a efetuar para chegar ao resultado esperado.
- **Avaliação:** Nesta última fase será feita a avaliação dos sistemas existentes utilizando o simulador.

1.4) Estrutura e Organização

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos:

- No primeiro capítulo engloba-se o tema de estudo, a motivação, os objetivos e o modelo de metodologia de investigação utilizado no âmbito da dissertação

- No segundo, inclui-se a revisão bibliográfica, retratando um pouco o que já foi e o que se tem desenvolvido sobre o assunto em questão. Falar um pouco sobre as comunicações sem fios da sexta geração (6G) e as novas superfícies inteligentes configuráveis (RIS), recorrendo às referências de estudos já realizados.
- No terceiro capítulo, descreve-se o simulador de sistema com cenários de RIS.
- No quarto capítulo apresenta-se as diversas simulações realizadas com discussão dos resultados obtidos.
- Por fim, no quinto e último capítulo descreve-se as principais conclusões desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros, que se centram na descrição dos pontos de expansão e evolução do sistema.

Estado da arte

2.1) Evolução das Redes de Comunicação Móvel Sem Fio

O surgimento das redes de comunicação móvel sem fio mudou completamente o paradigma da comunicação de um modo geral. Tanto o ambiente social como comercial sofreram transformações com a chegada da primeira geração (1G) de redes de comunicação móvel em 1980. A 1G tinha como objetivo proporcionar a comunicação através de chamadas de voz atingindo velocidades de 2,4 kilobits por segundo (Kbps). Em 1990 apareceu a segunda geração (2G) que veio para acrescentar algumas outras funcionalidades que não estavam presentes na geração passada. Com uma velocidade de 64 Kbps ficou possível o envio de mensagens de texto, imagens e MMS (mensagem multimídia). Nos anos 2000 surgiu a terceira geração (3G) dando a possibilidade de acesso à internet, facultando serviços como videoconferência, sistema de posicionamento global e televisão móvel. A 3G atingia velocidades de até 2 Mbps. A quarta geração (4G) foi desenvolvida em 2010 com o intuito de aumentar a velocidade para até 100 Mbps e melhorar a qualidade dos serviços [4]. A quinta geração (5G) surge do aproveitamento dos mecanismos fundamentais da geração anterior, investindo mais em recursos espectrais e de hardware para obter ganhos de desempenho. Não existe uma tecnologia pioneira na 5G, embora este tenha adotado uma estratégia de evolução gradual que é capaz de prover muito mais e melhores serviços que a geração anterior. O início da discussão do que seria a 5G teve início em 2014 com a publicação do artigo [5] fazendo com que as principais empresas e operadoras comesçassem a planejar a construção das suas redes 5G. Porém, os serviços comerciais em grande escala começaram a ser implantados em 2020 [6].

Após a standardização e lançamento da 5G muitos investigadores já deram visões sobre a era pós-5G e já começaram uma série de atividades de planeamento de investigação avançada sobre a geração da década de 2030, a sexta geração (6G) [6]. Com a implantação da 5G viu-se que a premissa de ser a facilitadora da IoT não ficou cumprida e as limitações encontradas tem estimulado investigações um pouco por todo o mundo sobre a próxima geração de sistema sem fio [7].

Com a implementação da 6G espera-se muitas melhorias, como se pode ver na Tabela 1 [6]:

	5G	6G
Spectral and Energy Efficiency Gains	10x in bps/Hz/m2/Joules	1000x in bps/Hz/m3/Joules (volumetric)
Rate Requirements	1 Gbps	1 Tbps
End-to-End Delay Requirements	5 ms	< 1 ms
Radio-Only Delay Requirements	100 ns	10 ns
Processing Delay	100 ns	10 ns
End-to-End Reliability Requirements	99.999%	99.99999%

Tabela 1 - Requisitos de 5G vs. 6G, retirado de [7]

Comparando as duas gerações, 5G e 6G, em termos de segurança, sigilo e segurança, eficiência espectral e energética, inteligência e acessibilidade e personalização obtém-se o resultado da Figura 1 [6]:

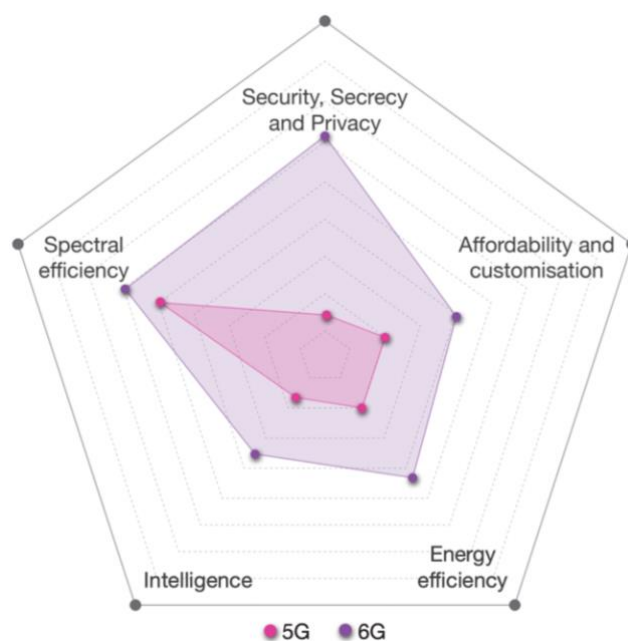


Figura 1 - Comparação qualitativa entre comunicações 5G e 6G, retirado de [6]

Segundo pesquisadores, o futuro da comunicação 6G passa muito pela utilização de superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS). As RISs aparecem como uma das potenciais tecnologias habilitadoras das redes 6G e esta dissertação abordará justamente este assunto.

2.2) Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

Desde sempre o meio de propagação das comunicações sem fios foi visto como um dos principais obstáculos por causa da sua interferência na qualidade do sinal trocado entre o transmissor e o recetor devido às interações incontroláveis das ondas de rádio transmitidas com os objetos circundantes. A chegada das superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) à comunicação sem fio permitirá aos operadores de rede terem um certo controlo sobre as características de dispersão, reflexão e refração das ondas de rádio, suprimindo as consequências negativas da propagação sem fio convencional. Estudos recentes têm mostrado que as RISs podem dar suporte realmente no controlo do ambiente nas comunicações sem fio, tornando possível, sem necessidade de recorrer a mecanismos complexos de codificação, descodificação e processamento de RF, controlar a frequência, a fase, a amplitude e até a polarização dos sinais [8].

2.2.1) RIS e a sua Arquitetura

É denominado por RIS uma superfície plana que é uma matriz de elementos passivos refletores que tem como objetivo impor, de forma independente, mudanças de fase pretendidas no sinal de entrada. Configurando cada um dos elementos é possível moldar o sinal refletido, propagando-o em direções pretendidas. Com a avanço da tecnologia dos meta-materiais é possível moldar o coeficiente de reflexão dos elementos em tempo real de acordo com o determinado ambiente.

Uma RIS, baseado na sua estrutura, pode ser classificada como antena ou como meta-material, sendo que neste trabalho o foco será neste último que também é conhecido por meta-superfície

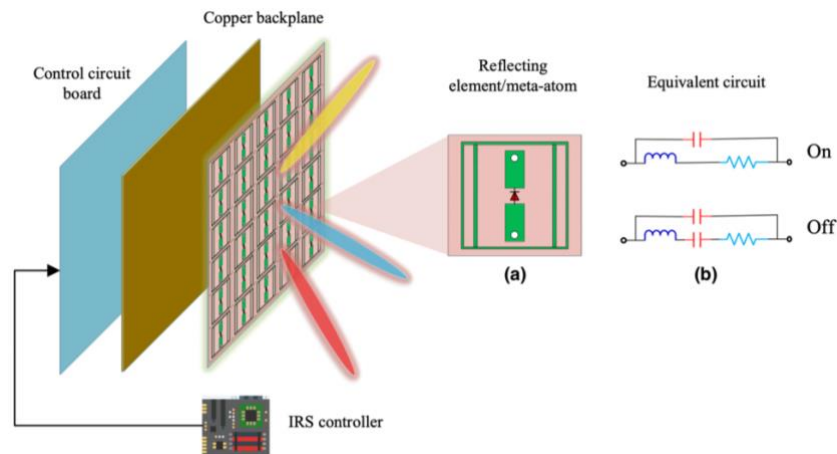


Figura 2 - Arquitetura de uma RIS, adaptado de [9]

Como pode-se identificar na Figura 2, uma arquitetura característica da RIS com meta-materiais consiste numa superfície plana de uma única ou múltiplas camadas e um controlador. Para uma superfície de três camadas, a camada externa possui uma grande quantidade de componentes refletivos impressos em um substrato dielétrico que interagem diretamente com os sinais de entrada. Já a camada intermédia é um painel de cobre responsável pelo controlo de perdas de sinal/energia. Para finalizar, existe uma camada que é uma placa de circuito que é utilizada para alinhar os coeficientes de reflexão das RIS, sendo este alinhamento feito por um controlador como o *field-programmable gate array* (FPGA). Os valores dos coeficientes de reflexão ótimos são calculados na BS e são enviados posteriormente, através de um link de feedback dedicado, ao controlador. O design dos coeficientes de reflexão depende da informação do estado do canal (CSI), então só são alterados quando houver alguma alteração no CSI.

Na Figura 2-(a) é possível ver a estrutura de um elemento refletor, em que fica embutido um diodo positivo-intrínseco negativo (PIN). Segundo a Figura 2-(b), é possível alterar o modo do PIN entre “ON” e “OFF”, controlando a tensão através da linha de polarização, para realizar mudanças de fase em radianos. Se se pretender aumentar o número de níveis de mudança de fase só é preciso acrescentar mais PINs em cada elemento refletor [7].

2.2.2) Aplicações dos RIS

Perspetiva-se muitos casos de uso para comunicações sem fios assistidas por RIS e um deles encontra-se ilustrado na Figura 3. Uma vez que as perdas de propagação causadas pela janela são inferiores às causadas pela espessa parede do edifício, no seu interior é instalado uma RIS para captar o sinal que atravessa a janela. Como as RIS são reconfiguráveis os feixes são

direcionados rumo ao recetor fazendo com que a relação sinal/ruído (SNR) seja melhorada drasticamente [11].

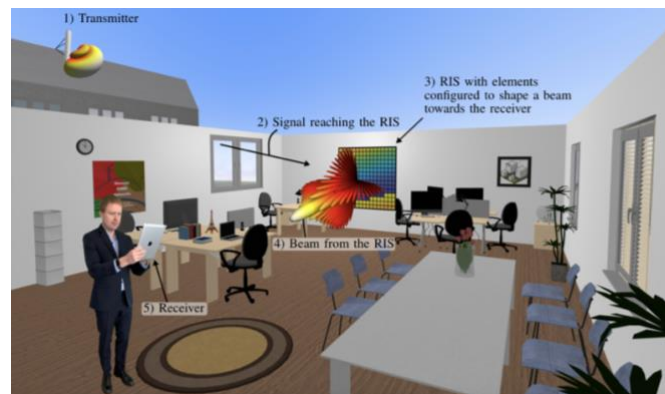


Figura 3 - Um caso típico de utilização de RIS, retirado de [10]

Para além da melhoria de cobertura a RIS traz muitos outros ganhos à comunicação sem fio. Com a sua utilização torna possível direccionar sinais para locais específicos para suprimir sinais indesejados que podem causar interferências com outros canais de comunicação, ou até alterar reflexão de sinais para locais ocupados por utilizadores não autorizados, aumentando o nível de segurança das redes [12].

As RISs traduzem-se facilmente em ganhos para cenários práticos. Um dos exemplos pode ser o facto das componentes refletoras refletirem passivamente os sinais incidentes, sem a necessidade de qualquer operação sofisticada de processamento de sinal (SP) descartado também a utilização de qualquer hardware transmissor de RF. Isto faz com que os RISs operem com menores custos de hardware e energia comparando com os transmissores ativos convencionais. Uma outra vantagem que a sua natureza passiva traz é a possibilidade de fabricar componentes leves e de pequenas espessuras que podem ser posicionadas em qualquer lugar. Por último, as RISs conseguem funcionar sem nenhum problema no modo full-duplex (FD) sem a introdução de ruído térmico ou auto-interferência, conseguindo apresentar uma maior eficiência espectral do que um Relay half-duplex (HD) ativo [10].

2.3) Sistema M-MIMO

Os sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) são parte integrante dos atuais sistemas sem fio, e nos últimos anos têm sido amplamente utilizados para auxiliar no alcance das tão desejadas elevadas eficiências espectral e energética nos sistemas de comunicação. Antes da sua entrada no mercado eram utilizadas, na sua maioria, sistemas de entrada e saída únicas

(SISO), que apresentavam um *throughput* muito baixo e não conseguiam funcionar com uma grande fiabilidade quando lidavam com um número de utilizadores considerável.

No entanto, com o aumento exponencial das exigências dos sistemas sem fio, as tecnologias MIMO associadas às gerações anteriores mostraram-se incapazes de lidar com o grande fluxo de tráfego gerado, assim para a 5G está sendo considerado um sistema MIMO massivo com uma tecnologia potencial a superar o problema criado pelos aumentos de utilizadores e de tráfego [13]. O sistema M-MIMO foi introduzido há mais de uma década, surgindo da evolução dos sistemas MIMO através de agrupamento de um grande número de antenas na BS, e atualmente vem sendo um ponto importante no funcionamento das redes sem fios 5G [13], [14]. As suas inúmeras vantagens fizeram com que os requisitos necessários fossem cumpridos para essa nova geração de sistemas de comunicação.

À medida que o número de antenas vem se aumentando o M-MIMO conseguirá criar feixes cada vez mais diretivos e com isso servir múltiplos utilizadores, utilizando os mesmos recursos de tempo e frequência, simultaneamente. Os feixes altamente diretivos fazem com que as BS concentrem energias para os utentes pretendidos, reduzindo assim a potência de transmissão, minimizando a interferência entre os utilizadores e aumentando a eficiência espectral [14].

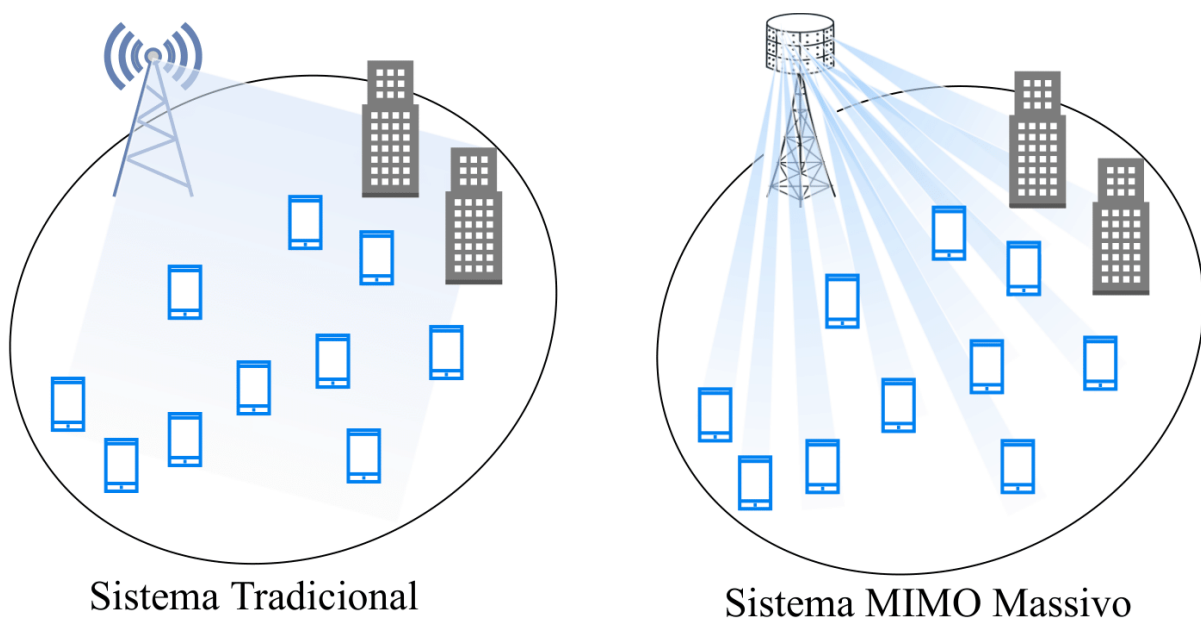


Figura 4 - Comparação de um sistema M-MIMO com um sistema tradicional, retirado de [14]

2.3.1) Sistema MIMO assistido por RIS

A RIS e a múltiplas entradas e as múltiplas saídas (MIMO) já tinham sido consideradas como duas tecnologias promissoras para as redes sem fio 5G, capazes de proporcionar um grande ganho de matrizes e multiplexação espacial multiutilizador. Sem a necessidade de exigir bandas de frequências adicionais, essas tecnologias oferecem melhorias significativas nas eficiências espectral e energética, atendendo simultaneamente uma grande quantidade de utilizadores [15]. E olhando para o que as tecnologias da 6G podem oferecer, a expansão do MIMO massivo, resultando em ultra-massivo de múltiplas entradas e saídas (UM-MIMO), aparenta ser o próximo passo natural. Os seus conceitos vêm sendo atualmente ampliados para que se torne parte integrante e fundamental das redes 6G [14], [16].

Matrizes de antenas e ambientes de propagação são fatores chaves que determinam fundamentalmente o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio e as comunicações MIMO massivas demonstraram que conseguem possibilitar o aumento da taxa de transferência de comunicação processando coerentemente muitos sinais de antena em cada BS em comparação com o número de utilizadores servidos. Cada elemento de antena de um sistema MIMO pode contribuir com um grau extra de liberdade para o processamento espacial que permite ao sistema obter um ganho em conjunto e suprimir interferências mútuas. O M-MIMO oferece melhorias sem precedentes, mesmo sob deficiências de hardware, explorando os diferentes canais para diferentes utilizadores [15].

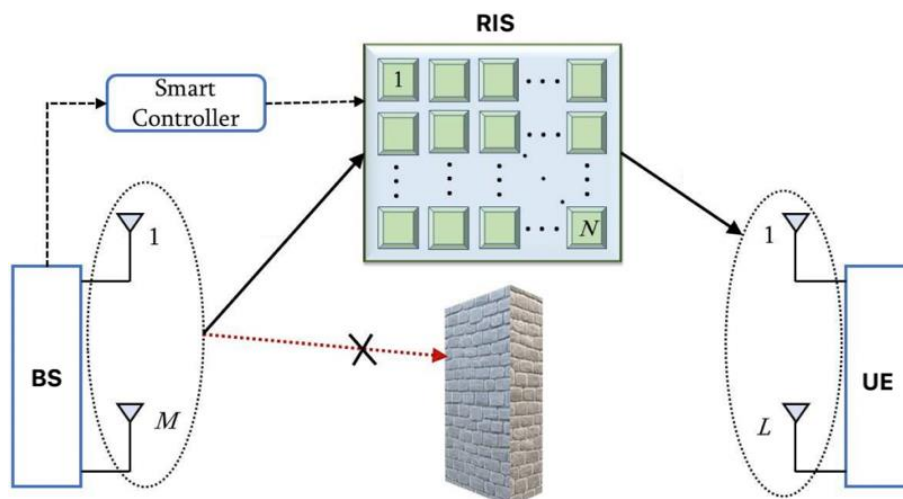


Figura 5 - Um sistema MIMO assistido por RIS, adaptado de [17]

A implementação dos sistemas MIMO assistido por RIS é uma técnica que é considerada como o futuro das comunicações 6G e, a título de exemplo, é apresentada a

estrutura desse tipo de sistema na Figura 5. Como se pode ver a BS e o equipamento do utilizador (UE) estão equipados com sistemas MIMO e estão separados por um obstáculo, estando perante um cenário de propagação sem linha de visão (NLOS), mas ambos estão ao alcance do RIS instalado.

Implementação do Simulador de Sistema

3.1) Descrição do Simulador de Sistema

Como parte importante desta dissertação foi utilizado um simulador de sistema com um modelo de simulação 3D que permitiu fazer avaliações exaustivas a redes 5G NR em diferentes cenários. O simulador de sistema, implementado em JAVA, possibilita o estudo de todo o comportamento entre as extremidades de uma rede, permite perceber a influência recíproca entre as BS e os UE durante a transmissão dos dados.

Para ajudar na análise da simulação de sistema foi utilizado um outro simulador, o simulador de ligação, que também possui um modelo de simulação 3D, que permite efetuar operações que determinam valores de SNR de uma ligação em que os valores alcançados podem ser utilizados na parametrização do simulador de sistema, como se pode ver na figura 6:

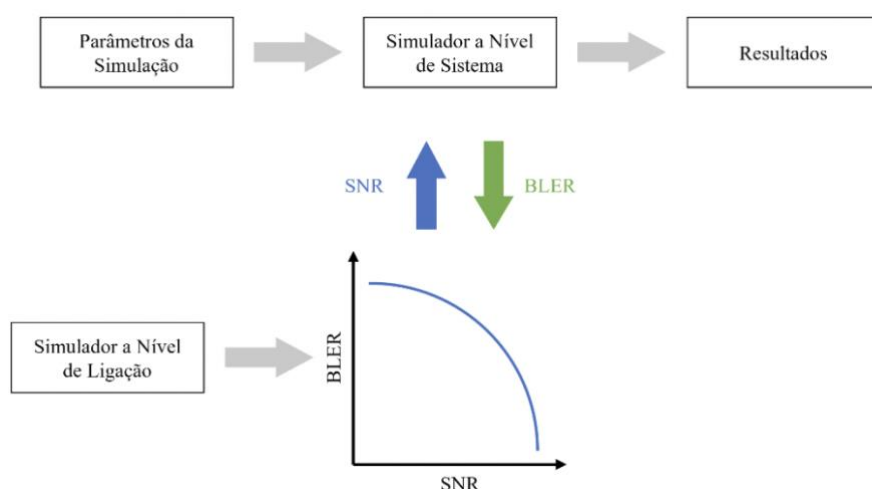


Figura 6 - Interligação entre os simuladores de sistema e de ligação, retirado de [18]

Para a análise do desempenho, o simulador de sistema considera uma rede de acesso rádio virtualizada (C-RAN), como a ilustrada na figura 7. A rede apresenta os três componentes importantes, as BSs (ambiente *outdoor*) ou os APs (ambiente *indoor*), representados pelos pontos azuis, as RIS representados pelos pontos pretos e os terminais móveis representados pelos pontos vermelhos. A cada BS/AP é atribuído um determinado número de terminais móveis automaticamente, sendo o número de elementos variável de acordo com cada cenário e número de subportadoras por terminal.

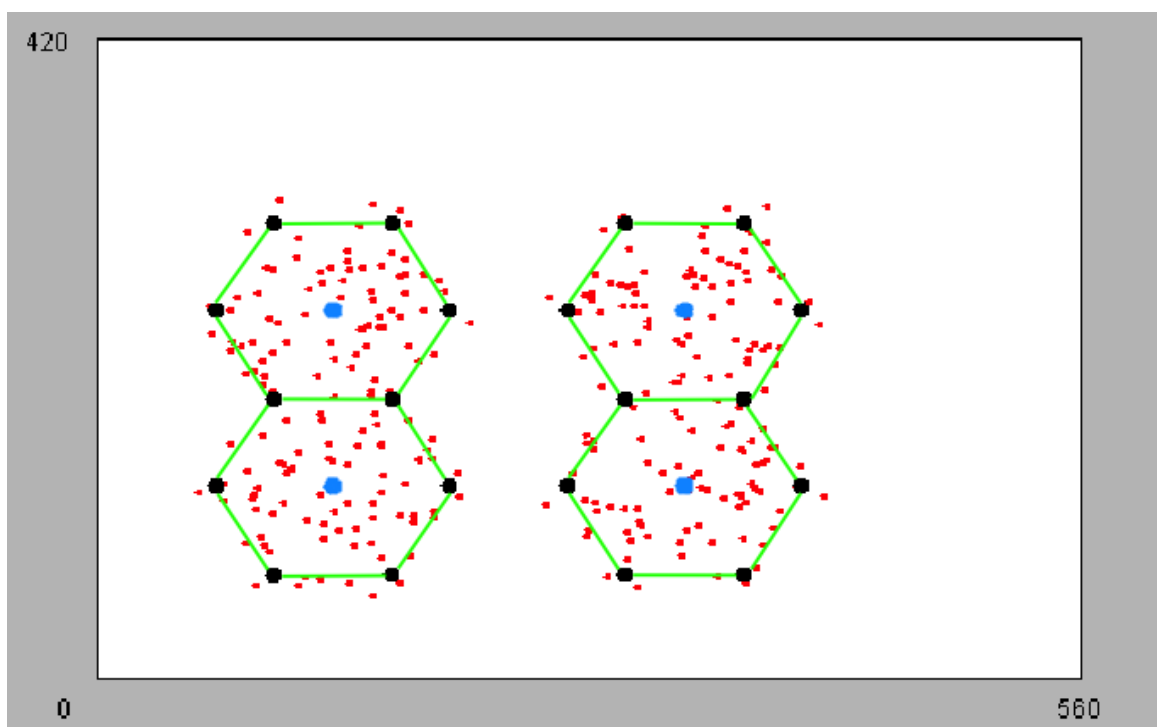


Figura 7 - Interface gráfica da rede C-RAN do simulador de sistema

Para se chegar à fase final pretendida, que é a fase de análise do desempenho do sistema, há algumas outras etapas intermédias. De certa forma, essas etapas encontram-se divididas em duas: fase de configuração e a derradeira que é a da simulação propriamente dita, como se pode observar na figura 8:

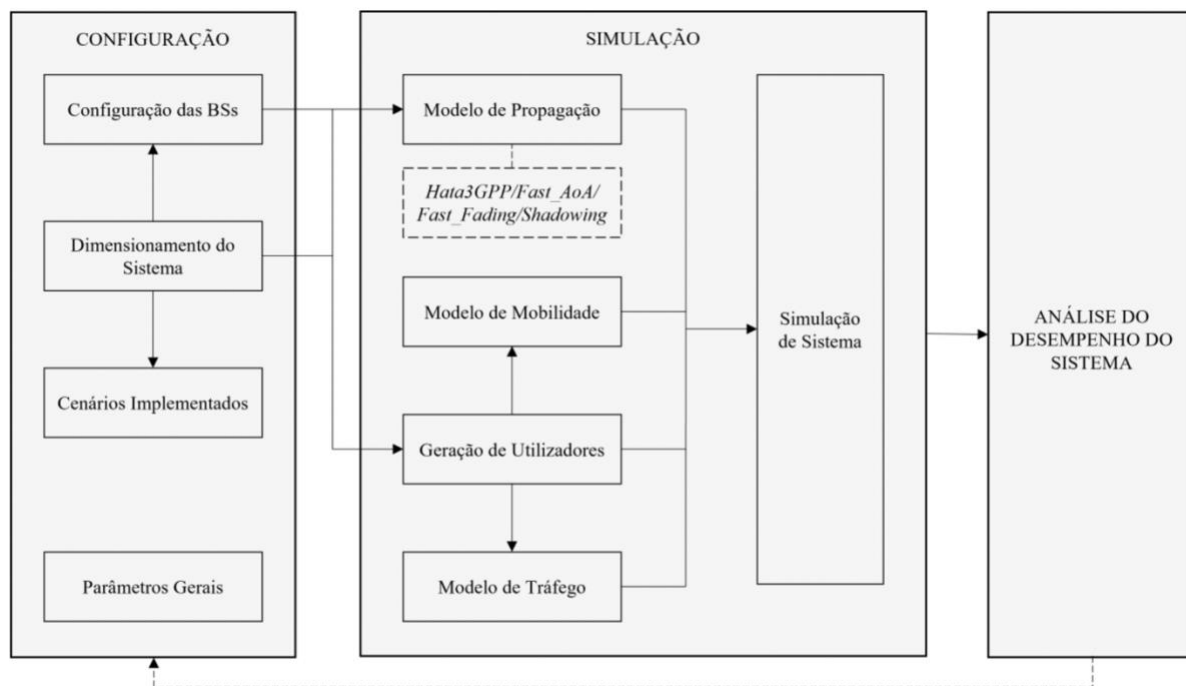


Figura 8 - Visão geral do simulador de sistema, retirado de [18]

Na fase de configuração, como o próprio nome indica, é feito todo o preparo necessário para o sistema estar pronto para ser utilizado. É tratado todo o processo de dimensionamento, como a configuração e a localização das BSs. É nesta fase também que se escolhe os cenários a serem utilizados e outras configurações que podem ser importantes para a execução da etapa seguinte.

A última etapa que é a de simulação é a fase onde são executados os modelos de propagação, mobilidade e de tráfego. O modelo de propagação é constituído pelas classes JAVA Fast_AoA, Fast_Fading e Shadowing que representam o desvanecimento e a classe Hata3GPP que representa as perdas de propagação. Nesta última, sendo referente às perdas de propagação, é feito o cálculo das perdas que os sinais sofrem provocadas pela distância entre os emissores e os recetores da rede. A classe Fast_AoA indica as variações do desvanecimento de variações rápida em curtos espaços de tempo e dependem do ângulo de chegada em azimuth (AoA) e a distribuição de probabilidade das suas variáveis. A classe Fast_Fading, por sua vez, representa o modelo de desvanecimento de *Rayleigh*, ou seja, o desvanecimento em pequena escala, enquanto a classe Shadowing representa o desvanecimento log-normal, desvanecimento em larga escala.

Após essas duas fases torna-se possível fazer a avaliação do sistema de forma minuciosa com base nas diferentes simulações efetuadas considerando os distintos cenários. Vai ser possível analisar diversos aspetos, como por exemplo o nível *throughput* e de cobertura da rede.

O simulador em questão baseia-se no sistema de comunicação M-MIMO exemplificado anteriormente na figura 5. Foram avaliados dois cenários ilustrados nas figuras 9. O primeiro (IOO) considera a banda de frequências de 100 GHz e baseia-se num ambiente interior onde os obstáculos circundantes podem facilmente atenuar ou mesmo obstruir ligações diretas entre equipamentos e os pontos de acesso (APs) e no segundo uma situação um pouco mais complexa que é uma combinação de ao ar livre e interior onde a BS no exterior dos edifícios servem os utilizadores, as distâncias são diferentes e com diferentes frequências de portadora (28 GHz). Em ambas situações são instaladas painéis com RIS para melhor tanto a comunicação como as LOS e as NLOS.

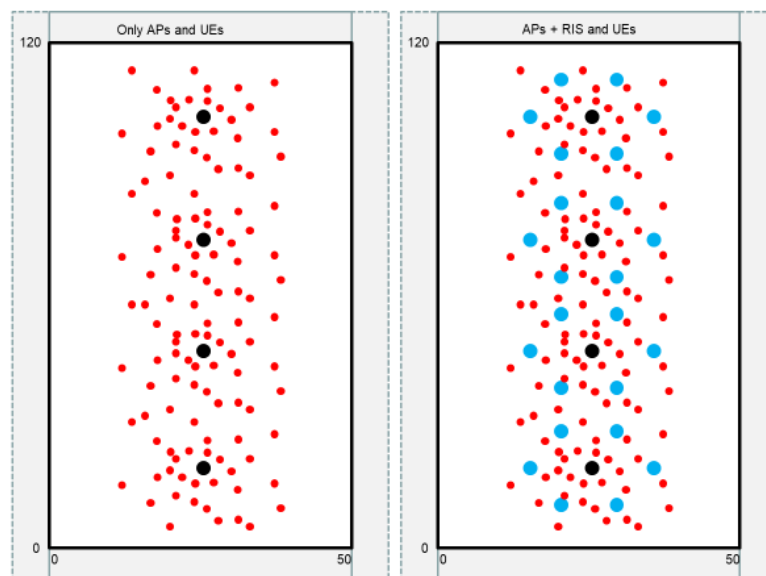


Figura 9 - Cenário Indoor Open Office (IOO)

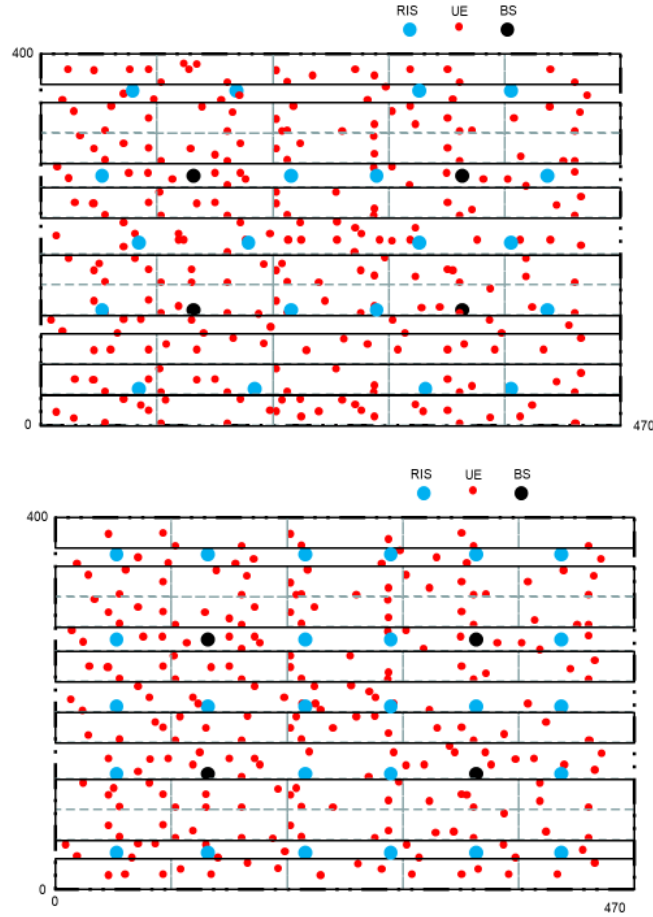


Figura 10 - Cenário Urban Micro Truncated (UMT)

3.1.1) Equações matemáticas

Das várias equações utilizadas por todo o sistema nas simulações convém destacar algumas, como por exemplo a do SNR. Para a sua obtenção foi utilizada a seguinte equação:

$$SNR [dB] = \frac{E_s}{N_0} + 10 \log \left(\frac{R_s}{B} \right) \quad (1)$$

em que $\frac{E_s}{N_0}$ corresponde, em dB, à relação entre a energia de símbolos e a densidade espectral de potência do ruído, obtidos através dos valores de BLER de referência conseguidos da simulação de nível de ligação, B representa a largura de banda em hertz e o R_s o ritmo de símbolos total, em símbolos por segundo, transmitidos por antena e por utilizador. O valor de R_s , por sua vez, é dado através da seguinte expressão:

$$R_s = \frac{R_b}{10 \log (\log_2 M)} \quad (2)$$

onde o R_b representa o ritmo binário e o M corresponde ao índice de modulação. O valor do ritmo binário, em segundos, é dado pela seguinte expressão:

$$R_b = \frac{TBS}{TTI} \quad (3)$$

em que TBS é o tamanho do bloco de bits transmitidos antes da codificação e a duração necessária para a transmissão total do bloco é dado por TTI. Os valores de TBS são obtidos da seguinte forma:

$$TBS = N_{sc} \times SE \times N_{símbolos\ OFDM} \quad (4)$$

onde o número de subportadoras com dados utilizado na multiplexagem ortogonal por divisão de frequência (OFDM) é dada pelo N_{sc} , SE, em número de bits por utilização de canal (bpcu), representa a eficiência espectral e o $N_{símbolos\ OFDM}$ represente o número de símbolos OFDM transmitidos em cada TTI.

3.1.2) Cenários de Implementação

Para a realização de todos os testes e simulações que posteriormente ajudaram na análise do comportamento do sistema foram levados em conta os dois cenários baseados em dois cenários 3GPP [19], o Indoor Open Office (IOO) e o Urban Micro Truncated (UMT) ilustrados na figura 9.

O ambiente do IOO corresponde ao tradicional cenário de escritórios com dimensões em torno de $120 \times 50m^2$ que concentram uma grande quantidade de pessoas, obstáculos como paredes e corredores no seu interior. Para este cenário foram considerados uma frequência de portadora e uma largura de banda de $f_c = 100GHz$ e $B = 0,4GHz$, respetivamente. Foram considerados duas situações distintas, uma em que os painéis com raios de cobertura dos utilizadores de 7 metros (m), foram colocados a 10 m dos AP, formando um raio total de 17 m

e uma outra em que não se desconsidera os RIS, mantendo o radio de cobertura dos AP nos 17 m.

O cenário UMT centra-se em microcélulas com um elevado número de utilizadores que geram uma grande quantidade de tráfego nos centros das cidades com uma área truncada de $470 \times 400m^2$ com densas áreas internas. Foi considerada uma frequência de portadora de $f_c = 28GHz$ e uma largura de banda de também $B = 0,4GHz$. A distância entre sítios *Intersite Distance* (ISD) da UMT é de 200 m, na qual existem 4 BS, cada uma com um raio de cobertura de 67 m, o que corresponde a um $ISD = 3R$. Cada painel RIS presente neste cenário encontra-se localizado a uma distância de 67 m da BS mais próxima, com um raio de cobertura de 18m, formando um raio de cobertura total de 85 m.

Resultados das Simulações

Este capítulo serve para apresentação dos resultados obtidos nas simulações efetuadas no simulador de sistema e análises aos mesmos. As análises serão efetuadas tendo em conta dois aspetos importantes para a verificação do desempenho de uma rede, o *throughput* e a cobertura. Esses requisitos serão avaliados para os dois cenários distintos como já se tinha referido nos capítulos anteriores e tendo em conta diferentes parâmetros, como o valor da relação sinal/ruído (SNR), o número de subportadoras por utilizador (N_c), o número de elementos RIS (N_{RIS}), o número de antenas de transmissão (N_{tx}), entre outros.

Embora sejam apresentados exemplos de resultados de *throughput* para o cenário IOO, esta secção vai ser direccionada um pouco mais para o cenário UMT. Nas tabelas 2 e 3 podem ser vistos os dados considerados para as simulações efetuadas relativamente a este cenário.

SNR [dB]	TBS [bits]	Nº subportadoras por utilizador (N_c)	Nº Antenas de transmissão (N_{tx})	Nº elementos RIS (N_{RIS})
12,2	57360 * 3.3	132	64	144
10,8	57360 * 3.3	132	256	576
9,6	57360 * 3.3	132	256	144
7,3	57360 * 3.3	132	256	576
10,9	57360 * 4.5	180	64	144
8,6	57360 * 4.5	180	64	576

Tabela 2 – Valores de SNR, TBS, N_c , N_{tx} e N_{RIS} considerados para o cenário UMT

Nº subportadoras por utilizador (N_c)	Número de utilizadores por BS	Número de utilizadores por RIS
132	20	1
	15	2
	10	3
180	13	1
	8	2

Tabela 3 - Valores de N_c , Nº de utilizadores por BS e Nº de utilizadores por RIS considerados para o cenário UMT

Topologia	Número de BS e RIS com UEs ativas	Número de RIS
1	24	20
2	30	26

Tabela 4 - Topologias utilizadas no cenário UMT

4.1) Resultados *Throughput*

Nesta secção são apresentados os resultados relativamente aos valores de *throughput* para as diversas situações analisadas. Os gráficos que vão ser apresentados apresentam a variação do *throughput* em função de número de utilizadores.

Primeiramente vai ser utilizado a topologia 1 em que as RIS estão equidistantes das BS e com número de *streams* (N_s) igual a 3. O número de N_{rx} ao longo dos testes vai ser sempre igual a 16.

Na figura 11 foi feita uma pequena comparação variando a percentagem de utilizadores que são associados às BS e às RIS. Pelo gráfico é possível verificar que aumentando a percentagem de utilizadores associados às BS há um aumento de ganho significativo. Isto acontece porque as RIS são elementos passivos e não possuem potência, logo não podem transmitir para muitos dispositivos como as BS normais o que faz que o desempenho piore. Há um aumento de *throughput* de cerca de 20% entre as curvas mais próximas sendo que o maior valor atingido é de 247,6 Gbps.

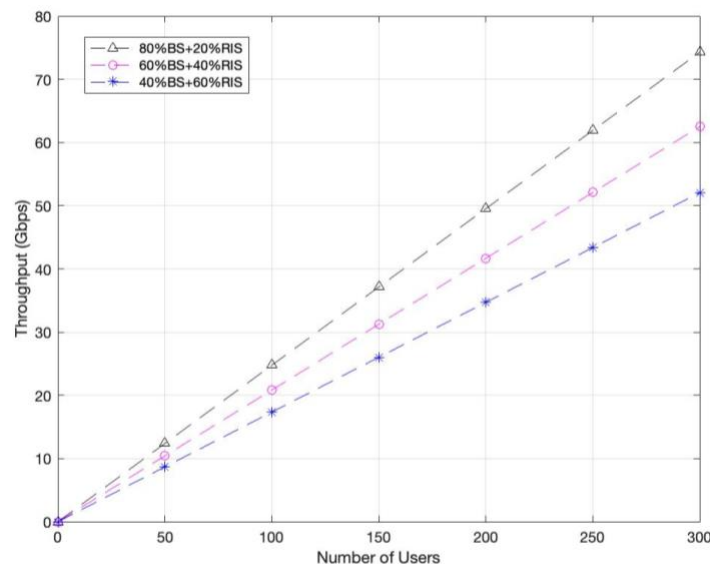


Figura 11 - *Throughput* vs. número de utilizadores para UMT, com $N_c = 132$, $N_{RIS} = 144$, $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

Com o objetivo de perceber o impacto dos números de RIS e da SNR foram realizados mais testes para verificar o impacto dos mesmos nas comunicações. Usando uma configuração

com $N_c = 132$, $N_{tx} = 256$, $N_s = 3$, fazendo variar N_{RIS} entre 144 e 576 pode-se ver na figura 12 que o aumento de número de elementos dos RIS faz com que haja uma melhoria no sinal. Os sinais azuis com $N_{RIS} = 576$ apresentam um ganho superior em relação ao azul com $N_{RIS} = 144$, chegando a apresentar um aumento de até 18%, dependendo do SNR. Também ainda é possível verificar o impacto do SNR nas ligações, que diminuindo provoca uma melhoria no *throughput*. Por exemplo, é possível ver que mantendo os outros dados todos e diminuindo o SNR de 10,8 dB para 7,3 dB, no caso dos sinais a azul há um aumento de cerca de 15% no *throughput*.

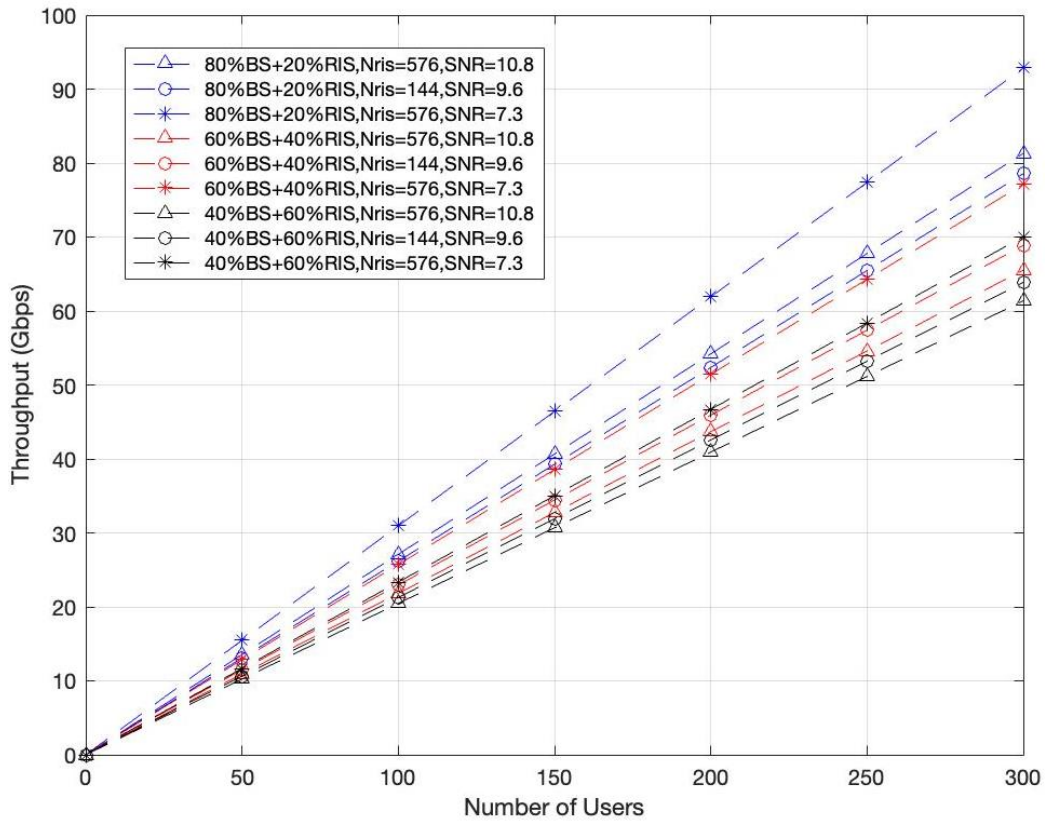


Figura 12 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_c = 132$, $N_{tx} = 256$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

A figura 13, por sua vez, apresenta uma configuração com $N_{tx} = 64$, $N_s = 3$, $N_{RIS} = 144$ ou 576 e $N_c = 132$ ou 180. Considerando $N_{RIS} = 144$, é possível ver que quando o valor de N_c for 132 os valores de *throughput* são consideravelmente melhores, chegando a ter o valor máximo no melhor caso superior em cerca de 40%.

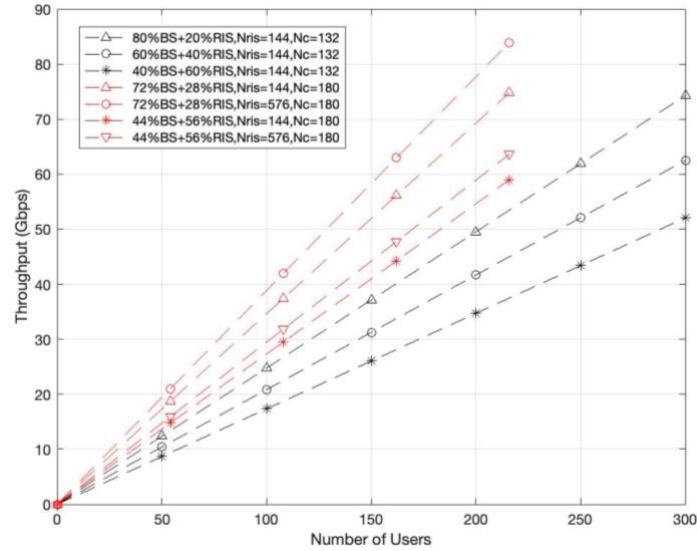


Figura 13 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

Analisando as figuras 12 e 13, para os casos com as mesmas distribuições de BS e RIS, os mesmos valores de N_c é possível verificar o impacto do número de antenas de transmissão. Pode-se ver que o valor de *throughput* é maior quando se aumenta o valor de N_{tx} .

Contrário aos testes que foram feitos anteriormente, consideramos agora o N_s igual a 1 em vez de 3, e foram feitas pequenas comparações entre uma rede com RIS e uma rede convencional. Pode-se ver na figura 14 que para o caso *standard* (linha continua vermelha) obteve-se um valor máximo de cerca de 22 Gbps, e que o valor de *throughput* aumenta cerca de 38% para o melhor cenário (80%BS+20%RIS, $N_{ris}=576$), o que torna evidente o quanto se ganha com a utilização de RIS.

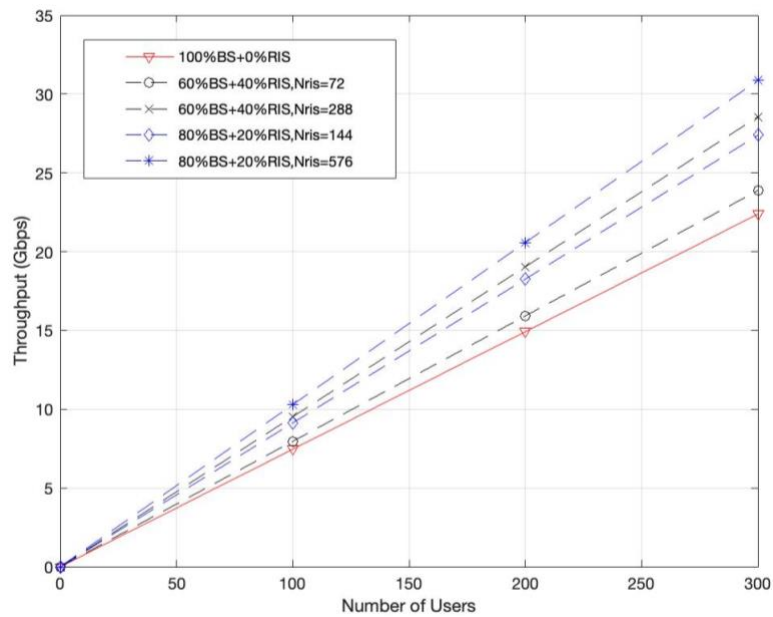


Figura 14 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$, $N_s = 1$ e $N_c = 132$

Passando o N_s novamente para 3, vai ser testado agora o comportamento para quando se muda topologia da rede (topologia 2). Vai ser considerado o caso em que as RIS estão a distâncias diferentes das BS. É possível verificar pela figura 15 que a mudança na disposição das BS e dos RIS e o aumento deste último fez com que os valores *throughput* tivessem uma queda. Isso acontece porque há RIS que vão ficar um pouco mais distantes das BS e há também mais utilizadores associados aos RIS. A diferença chega a ser por volta de 11% para o caso de $N_{tx} = 256$ e $N_{RIS} = 576$.

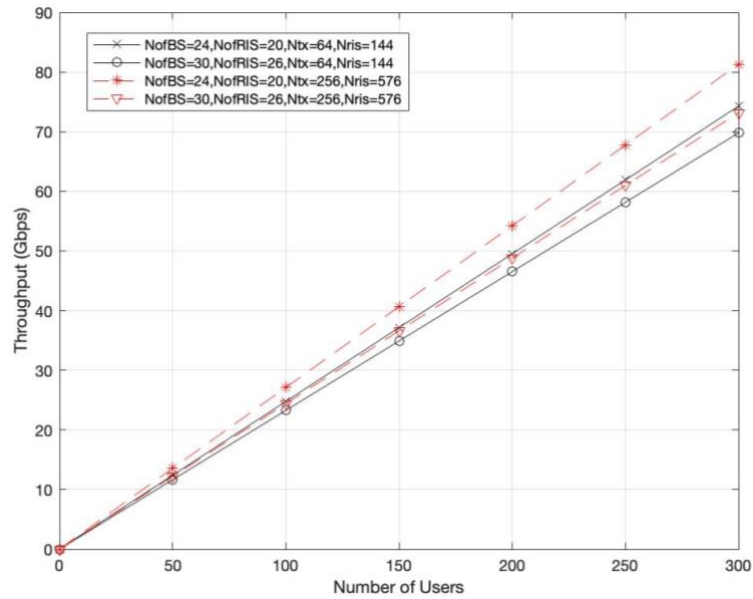


Figura 15 - Throughput vs. número de utilizadores para UMT, com $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$ e $N_c = 132$

Com o intuito de ter alguma noção sobre o comportamento perante o cenário IOO pode-se ver na figura 16 os resultados obtidos:

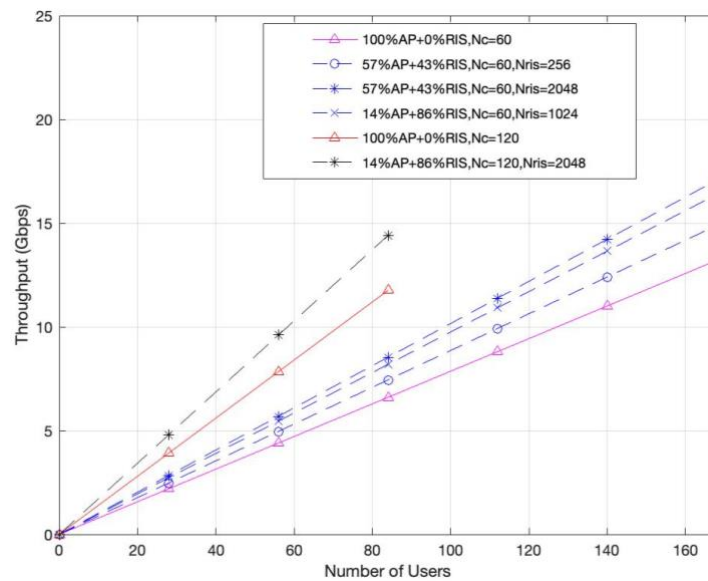


Figura 16 - Throughput vs. número de utilizadores para IOO, com $N_{tr} = 64$, $N_s = 2$ e $N_{rx} = 16$

Para este cenário foi considerado uma variação de elementos de RIS entre 256 e 2048, sendo possível verificar que o aumento de elementos de RIS leva a uma melhoria de performance da rede. As linhas preto e vermelho apresentam *throughput* para o caso de $N_c = 60$ e as linhas azuis e lilás apresentam para o caso de $N_c = 120$. É possível ver claramente os benefícios da utilização das RIS em ambientes interiores. O exemplo 57%AP + 43%RIS com $N_c = 60$ e $N_{RIS} = 2048$ que apresenta o maior valor de *throughput* possui um ganho de cerca de 30% em relação a uma ligação tradicional (assinalada a lilás).

4.2) Resultados de Cobertura (Coverage)

Nesta secção vão ser apresentados os resultados relativamente à percentagem de cobertura em função da percentagem de potência transmitida para o cenário UMT. Vão ser consideradas as mesmas situações analisadas no ponto 4.1.

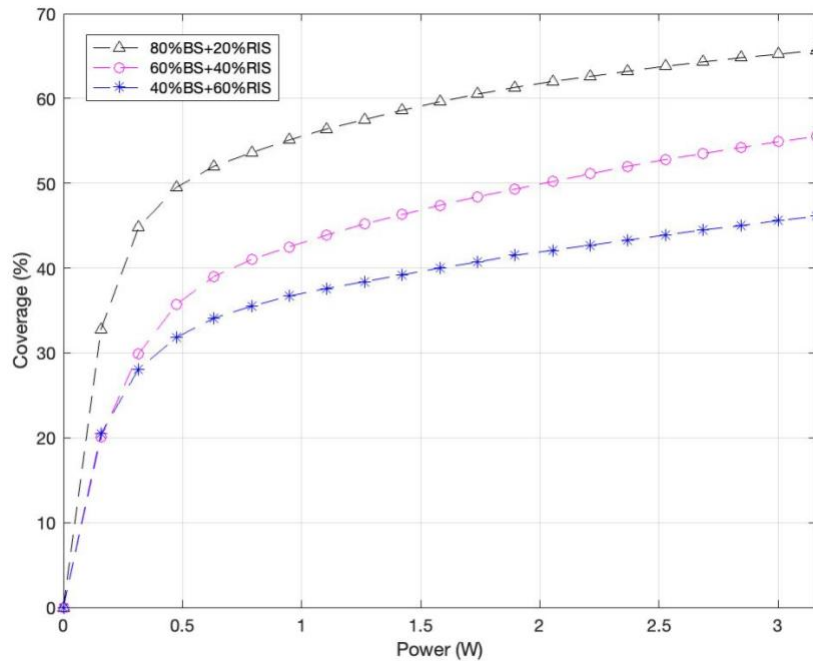


Figura 17 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_c = 132$, $N_{RIS} = 144$, $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

Analisando a figura 17 fica evidente que há maior cobertura para o caso em que há mais utilizadores associados às BS do que às RIS, isto pelos motivos que foram mencionados na secção 4.1. Há uma diferença de 19,6% de cobertura entre o pior (40%BS+60%RIS) e melhor caso (80%BS+20%RIS), sendo que este atinge o valor máximo de 65,7% de cobertura.

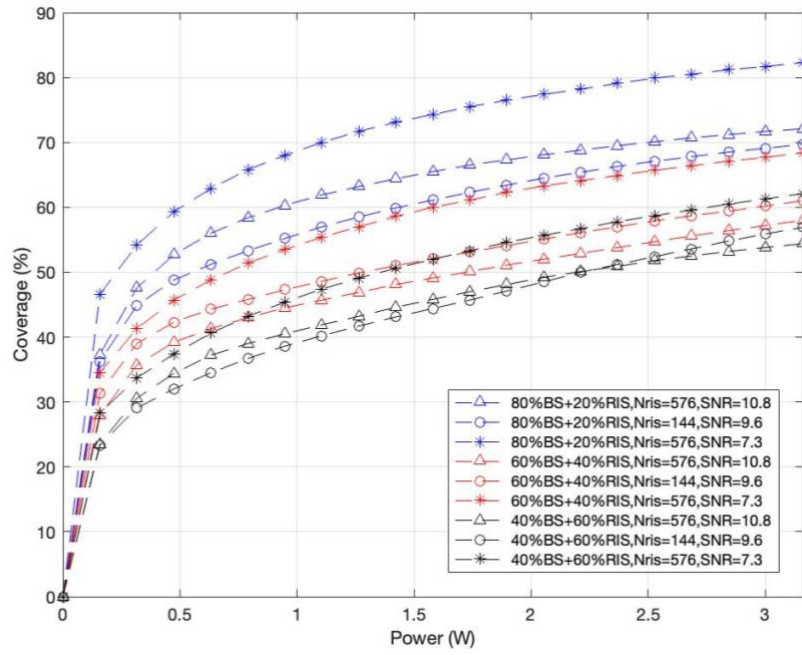


Figura 18 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_c = 132$, $N_{tx} = 256$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

Sobre a cobertura em relação ao N_{RIS} , pode-se ver pela figura 18 que o aumento de N_{RIS} provoca o acréscimo da percentagem de cobertura. É possível ver que para os casos de 80%BS+20%RIS os valores de cobertura para $N_{RIS} = 576$ aumentam 2,4% e 12,6% em relação ao caso de $N_{RIS} = 144$ para SNR igual a 10,8 dB e 7,3 dB, respetivamente, atingindo o valor máximo de 82,3%. Pode-se ver também que a diminuição de SNR provoca o aumento da cobertura do sinal.

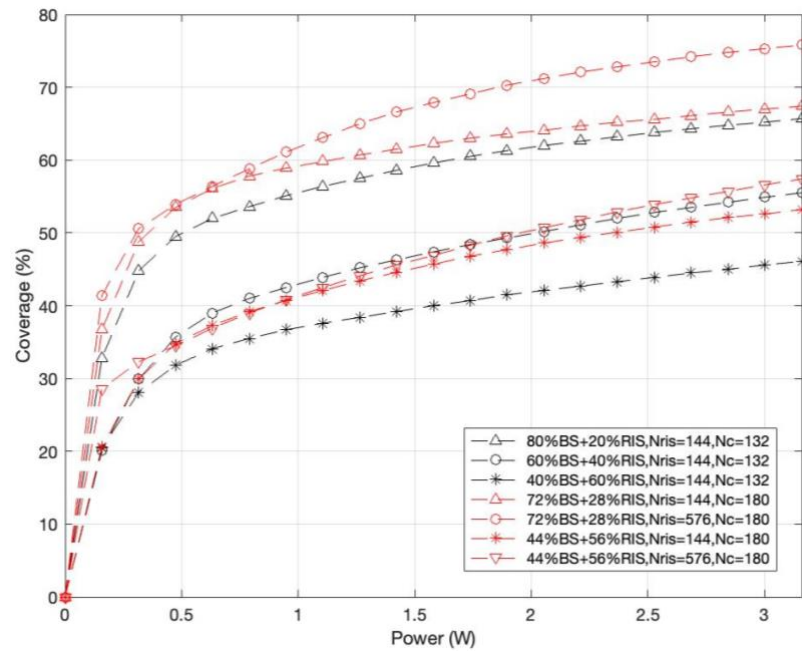


Figura 19 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$

Pela figura 19 é possível verificar que o aumento de N_c de 132 para 180 provoca também uma melhoria na percentagem de cobertura do sinal. Considerando o caso em que $N_{RIS} = 144$, há um aumento de 1,7% de cobertura quando o valor de N_c passa a ser 180. O caso 80%BS+20%RIS, $N_{ris}=144,N_c=132$ apresenta um valor máximo de 65,7 e o caso 72%BS+28%RIS, $N_{ris}=144,N_c=180$ tem o seu limite de 67,4%.

Tendo em contas as figuras 18 e 19 torna-se possível também medir o impacto do aumento do número de antenas de transmissão. A cobertura é maior quanto maior for o valor de N_{tx} .

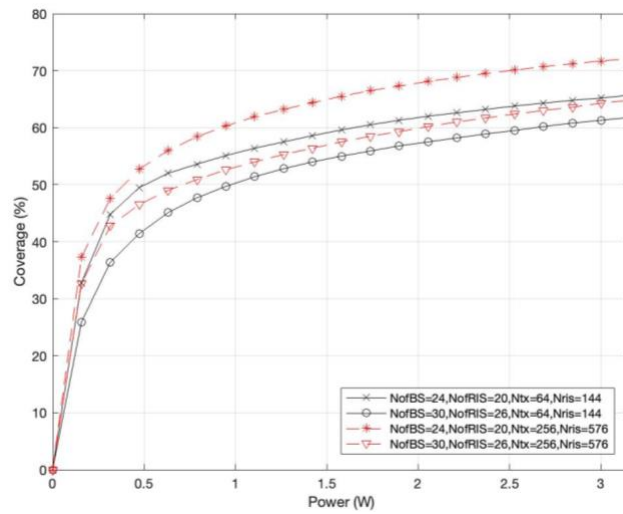


Figura 20 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{rx} = 16$ e $N_s = 3$ e $N_c = 132$

Como se pode ver pela figura 20, a disposição dos elementos de uma rede é um dos fatores que interfere na percentagem de cobertura de uma rede. O caso NofBS=30,NofRIS=26,Ntx=256,Nris=576 apresenta valor máximo de cobertura de 64,8% enquanto que o caso NofBS=24,NofRIS=20,Ntx=256,Nris=576 apresenta um valor máximo de 72,1%.

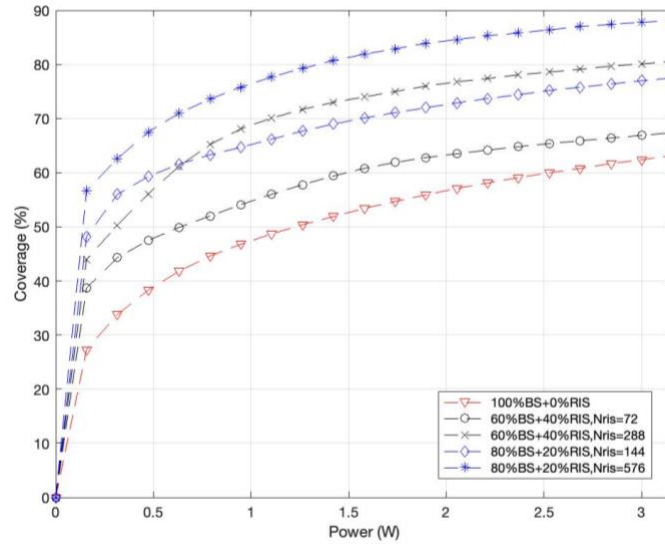


Figura 21 - Coverage vs. Power para UMT, com $N_{tx} = 64$, $N_{rx} = 16$, $N_s = 1$ e $N_c = 132$

A cobertura tal como o *throughput* aumenta com a utilização de RIS. Como se pode pela figura 21, há aumentos consideráveis quando se utiliza RIS na ligação. Esse aumento depende da quantidade de N_{RIS} utilizados e da quantidade de equipamentos que estão associados às RIS e às BS. Entre o pior (100%BS+0%RIS), quando não se utiliza RIS, e o melhor caso (80%BS+20%RIS, $N_{ris}=576$) há uma diferença de 24,9%, sendo que o valor máximo atingido é de 88,1%.

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1) Conclusões

Esta dissertação foi direcionada para o estudo da integração das RIS nas redes de telecomunicações sem fio futuras. Centrou-se na concepção de simulações a nível de sistema de cenários diversos. O principal objetivo era encontrar configurações mais eficientes energeticamente e de baixo custo para as RIS, com o intuito de melhorar o ambiente de comunicação sem fio que pode apresentar entraves.

No capítulo 2 começou-se por falar sobre a nova geração de redes sem fios (6G) e sobre a implementação das novas tecnologias emergentes, RIS e os sistemas M-MIMO que aparecem como as principais soluções para ultrapassar as obstáculos mencionadas anteriormente.

O terceiro capítulo ficou reservado para a descrição do simulador a nível de sistema que seria utilizado posteriormente. Introduziu-se o modo de funcionamento do simulador, explicando as principais partes da sua composição, os cenários de teste que seriam utilizados e algumas expressões matemáticas importantes.

No quarto capítulo apresentaram-se os resultados das simulações e as análises dos resultados obtidos para os cenários Indoor Open Office (IOO) e Urban Micro Truncated (UMT). Foram apresentados os resultados alcançados para diferentes situações em termos de *throughput* e cobertura que permitiram ter noção relativamente ao comportamento do sistema nos diferentes cenários testados. Foram utilizadas diferentes topologias, números de antenas de transmissão, número de subportadoras, número de RIS, entre outros dados. Os resultados obtidos mostraram claramente o ganho que se obteria caso fossem utilizadas as RIS nas redes de telecomunicações. Ficou evidente que a utilização dos mesmos traria ganhos enormes ao mundo das redes sem fio e conseguiria ultrapassar o problema de obstrução de sinais que sofremos devido aos obstáculos no meio de comunicação que atualmente são os principais entraves na qualidade da comunicação. Finalmente, pode-se dizer que os objetivos propostos foram cumpridos.

5.2) Trabalho Futuro

Para dar continuidade ao que se fez nessa dissertação pode-se desenvolver mais cenários de utilização e ter uma perspectiva do comportamento de redes em todo o tipo de situação. Continuar a melhoria do algoritmo com o intuito de cada vez mais obter resultados mais precisos e em menor tempo possível, ou seja, trabalhar na otimização do *software*.

No futuro poderá ser disponibilizado o *software* às operadoras de telecomunicações que o poderão utilizar como ferramenta de trabalho para o planeamento das suas redes.

Referências Bibliográficas

- [1] S. Basharat, S. A. Hassan, H. Pervaiz, A. Mahmood, Z. Ding, en M. Gidlund, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Potentials, Applications, and Challenges for 6G Wireless Networks”, *IEEE Wireless Communications*, vol 28, no 6, bll 184–191, Des 2021.
- [2] N. M. Karie, N. M. Sahri, en P. Haskell-Dowland, “IoT Threat Detection Advances, Challenges and Future Directions”, in *2020 Workshop on Emerging Technologies for Security in IoT (ETSecIoT)*, 2020, bll 22–29.
- [3] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, en Y.-J. A. Zhang, “The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol 57, bll 84–90, 2019.
- [4] S. Ayshath, Meril, M. Basthikodi, en A. Faizabadi, “Review: Comprehensive study of 5G and 6G Communication Network”, May 2019.
- [5] J. G. Andrews et al., “What Will 5G Be?”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 32, no 6, bll 1065–1082, 2014.
- [6] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, en M.-S. Alouini, “What should 6G be?”, *Nature Electronics*, vol 3, no 1, bll 20–29, Jan 2020.
- [7] W. Saad, M. Bennis, en M. Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems”, *IEEE Network*, vol 34, no 3, bll 134–142, 2020.
- [8] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, en R. Zhang, “Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces”, *IEEE Access*, vol 7, bll 116753–116773, 2019.
- [9] Q. Wu en R. Zhang, “Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network”, *arXiv*, arXiv:1905.00152v5, Aug 2019
- [10] C. Pan et al., “Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions”, *IEEE Communications Magazine*, vol 59, no 6, bll 14–20, Jun 2021.
- [11] E. Bjornson, O. Ozdogan, en E. G. Larsson, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Three Myths and Two Critical Questions”, *IEEE Communications Magazine*, vol 58, no 12, bll 90–96, Des 2020.

- [12] M. Di Renzo et al., “Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 38, no 11, bll 2450–2525, 2020.
- [13] R. Chataut και R. Akl, ‘Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction’, *Sensors*, τ. 20, τχ. 10, 2020.
- [14] F. A. Pereira de Figueiredo, “An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G”, *IEEE LAT AM T*, vol. 100, no. XXX, Feb. 2022.
- [15] T. Van Chien, H. Quoc Ngo, S. Chatzinotas, and B. Ottersten “Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Massive MIMO: Favorable Propagation, Channel Hardening, and Rank Deficiency,” *arXiv*, arXiv:2107.03434v2, Sep 2021
- [16] W. Tang et al., “MIMO Transmission Through Reconfigurable Intelligent Surface: System Design, Analysis, and Implementation”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 38, no 11, bll 2683–2699, Nov 2020.
- [17] G. T. de Araujo, A. L. F. de Almeida, en R. Boyer, “Channel Estimation for Intelligent Reflecting Surface Assisted MIMO Systems: A Tensor Modeling Approach”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol 15, no 3, bll 789–802, Apr 2021.
- [18] C. L. Gonçalves, “Simulação a nível de sistemas 5G através da utilização de ondas milimétricas”, Dissertação de mestrado, Iscte -Instituto Universitário de Lisboa, Novembro de 2021, Repositório do Iscte, <http://hdl.handle.net/10071/23654>.
- [19] 3GPP TR 38.901 V.14.0.0, “5G - Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz”, May 2017.