



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Redes Móveis
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES E INFORMÁTICA
2021/2022

(Docente: Adriano Moreira)

7 de janeiro de 2021

Relatório

Inês Barreira Marques – a84913@alunos.uminho.pt

Rui Filipe Ribeiro Freitas - a84121@alunos.uminho.pt

Tiago João Pereira Ferreira - a85392@alunos.uminho.pt

Índice

Índice de figuras	3
Índice de tabelas.....	3
Introdução	4
1. Fundamentos.....	5
1.1. Métodos de acesso múltiplo	5
1.2. CDMA.....	6
1.3. Códigos de Walsh	6
1.4. Coeficiente de correlação de Spearman	7
2. Desenvolvimento.....	8
2.1. Transmissor	8
2.2. Canal	9
2.3. Recetor	10
3. Testes e discussão de resultados.....	11
Conclusão.....	16
Referências	17

Índice de figuras

Figura 1 - Métodos de acesso múltiplo e o seu recurso caraterístico.....	5
Figura 2 - Métodos de acesso múltiplo.	5
Figura 3 - CDMA.....	6
Figura 4 - Matriz Hadamard.....	7
Figura 5 - Códigos Walsh.	7
Figura 6 - Coeficiente de correlação de Spearman	7
Figura 7 - Arquitetura da solução pretendida.	8
Figura 8 - Fluxograma do transmissor.	8
Figura 9 - Ficheiro de configuração.	9
Figura 10 - Fluxograma do canal.....	9
Figura 11 - Fluxograma do recetor.	10
Figura 12 - Gráfico BER com códigos aleatórios.....	11
Figura 13 - Gráfico BER com códigos de Walsh.	11
Figura 14 - Gráfico BER para 1 sinal com código Walsh vs aleatório.	12
Figura 15 - Gráfico BER para 3 sinais com códigos Walsh vs aleatórios.....	12
Figura 16 - Gráfico com códigos aleatórios e variância 1.....	13
Figura 17 - Gráfico com códigos aleatórios e variância 0.....	13
Figura 18 - Gráfico com códigos de Walsh e variância 1.....	14
Figura 19 - Gráfico com códigos de Walsh e variância 0.....	14
Figura 20 - Gráficos com códigos aleatórios (3 sinais).	15
Figura 21 - Gráficos com códigos de Walsh (3 sinais).	15

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores de BER para códigos aleatórios.	11
Tabela 2 - Valores BER para códigos de Walsh.....	11
Tabela 3 - Coeficiente de Spearman com códigos aleatórios (1 sinal).....	13
Tabela 4 - Coeficiente de Spearman com códigos de Walsh (1 sinal).....	14
Tabela 5 - Coeficientes de Spearman para 3 sinais.	15

Introdução

No âmbito da Unidade Curricular de Redes Móveis foi-nos proposto criar um simulador de CDMA (*Code Division Multiple Access*), que teria de incluir transmissor, canal de ruído, recetor e analisador de dados. Isto, pois, o espectro de radiofrequência é um dos recursos mais escassos em telecomunicações e o uso eficiente do espectro requer técnicas de modulação avançadas de modo a aumentar a capacidade de rede e fornecer serviços com altas taxas de transmissão. Um dos métodos usados para fornecer múltiplo acesso em redes de telecomunicações é precisamente o CDMA.

Este projeto foi dividido em 3 fases iniciais que incluíram o desenvolvimento do código para o transmissor, para o canal e para o recetor e outras 2 fases que passaram pela análise e discussão dos resultados e pela elaboração do presente relatório.

De modo a sermos capazes de cumprir com os objetivos deste projeto semestral foi necessário colocar em prática conhecimentos adquiridos ao longo das aulas teóricas e práticas da unidade curricular de Redes Móveis. Estes conhecimentos foram fundamentais para perceber o que era pedido e assim conseguirmos chegar a uma solução bem conseguida.

1. Fundamentos

1.1. Métodos de acesso múltiplo

Um método de acesso múltiplo é uma técnica que é usada na partilha de recursos limitados entre vários utilizadores. Cada método aproveita como vantagem certas características de um sistema de comunicação de modo a dividir e alocar a largura de banda disponível. A seguinte tabela demonstra quais os métodos existentes assim como qual o recurso que cada um utiliza [1].

Multiple Access Method	Resource Characteristic
TDMA	Time
WDMA	Optical Wavelength
SCMA (FDMA)	Electrical Frequency
CDMA	Code

Figura 1 - Métodos de acesso múltiplo e o seu recurso característico.

Através da observação da tabela podemos observar que o método TDMA utiliza o tempo como característica, o WDMA utiliza o comprimento de onda ótico, o FDMA que utiliza a frequência elétrica e o CDMA código, mais especificamente códigos de espalhamento.

É importante realçar as principais diferenças entre estes métodos demonstrados na figura seguinte em que podemos retirar informação relativamente à utilização da largura de banda por parte destes [2]. Resumidamente podemos observar que no TDMA figura 2(a) os utilizadores partilham a mesma frequência em diferentes espaços de tempo, no FDMA figura 2 (b) em que diferentes bandas de frequência são atribuídas a diferentes fluxos de dados e no CDMA figura 2(c) em que a totalidade do espectro é utilizada para codificar a informação de todos os utilizadores em que estes são distinguidos pelos seus códigos de espalhamento.

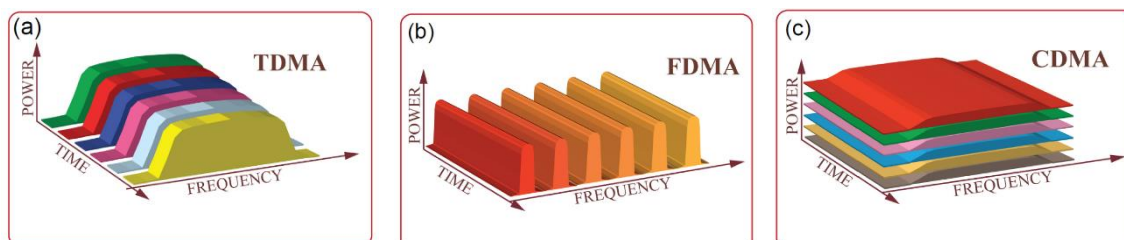


Figura 2 - Métodos de acesso múltiplo.

Neste projeto vamos dar especial atenção ao método CDMA visto ser este o requerido no enunciado do trabalho.

1.2. CDMA

O CDMA (Code Division Multiple Access) é uma tecnologia de múltiplo acesso em que todos os utilizadores podem transmitir na mesma banda de frequência ao mesmo tempo, utilizando uma técnica de espalhamento do espetro.

Como cada par transmissor-recetor tem um único código de pseudo-ruído para evitar interferência e garantir privacidade, isto faz com que haja um grande espaço para transferência de dados.

Na figura 3 podemos observar o que acontece quando pretendemos transmitir uma mensagem. Na primeira linha encontra-se o sinal da informação a transmitir, na segunda o código de pseudo-ruído que corresponde ao sinal e por fim a realização do XOR entre estes 2 sinais resultando assim um sinal transmitido privado e eficaz.

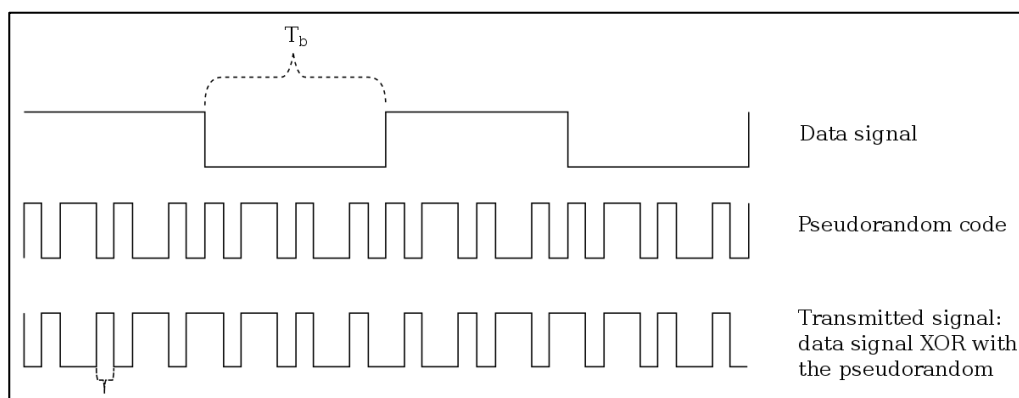


Figura 3 - CDMA.

Se o sinal recebido não for dirigido para o utilizador, a correlação será muito pequena pelo que este não será aceite, isto porque o código usado por cada utilizador é diferente. De forma que os sinais sejam diferentes, são utilizados códigos de Walsh pelo facto de serem ortogonais, permitindo assim que estes sejam o mais distintos possível uns dos outros.

1.3. Códigos de Walsh

Códigos de Walsh são por norma usados nas aplicações CDMA por serem códigos ortogonais. Estes códigos correspondem a linhas de uma matriz especial denominada de matriz Hadamard. Para um conjunto de códigos Walsh de comprimento M , este corresponde a uma matriz $M \times M$ em que cada linha contém um código Walsh.

De seguida temos 2 exemplos com $N=1$ e com $N=2$ em que podemos ver que com $N=1$ obtemos uma matriz 2×2 o que significa que temos 2 linhas de códigos de Walsh, no segundo exemplo obtemos uma matriz 4×4 o que significa que temos 4 linhas de códigos de Walsh demonstrado de seguida na figura 5 as respetivas linhas.

$$N=1 \rightarrow H_{2N} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$N=2 \rightarrow H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 4 - Matriz Hadamard.

$$H_0 = [-1 \ -1 \ -1 \ -1]$$

$$H_1 = [-1 \ 1 \ -1 \ 1]$$

$$H_2 = [-1 \ -1 \ 1 \ 1]$$

$$H_3 = [-1 \ 1 \ 1 \ -1]$$

Figura 5 - Códigos Walsh.

Os códigos Walsh são então um conjunto de códigos de espalhamento com boas propriedades de autocorrelação e fracas propriedades de correlação cruzada. São, por isso o aspeto principal dos sistemas CDMA e daí a sua utilização para a elaboração desses sistemas [3].

1.4. Coeficiente de correlação de Spearman

Na área da estatística, o coeficiente de correlação de Spearman consiste em medir a correlação entre um par de variáveis que tem por base a correlação de Pearson. No entanto, Pearson avalia as relações lineares entre as variáveis, enquanto a correlação de Spearman avalia as relações monótonas das mesmas [4].

O coeficiente de Spearman pode tomar valores entre -1, quando variáveis são diferentes e +1, quando os dados das duas variáveis são iguais.

Conclui-se então que quanto maior o valor do coeficiente maior é a relação entre as duas variáveis.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Figura 6 - Coeficiente de correlação de Spearman

2. Desenvolvimento

Em relação à solução desenvolvida esta tem em conta 3 fatores principais, o transmissor, o canal e o recetor. A figura seguinte demonstra o esquema que serviu de base para a solução pretendida.

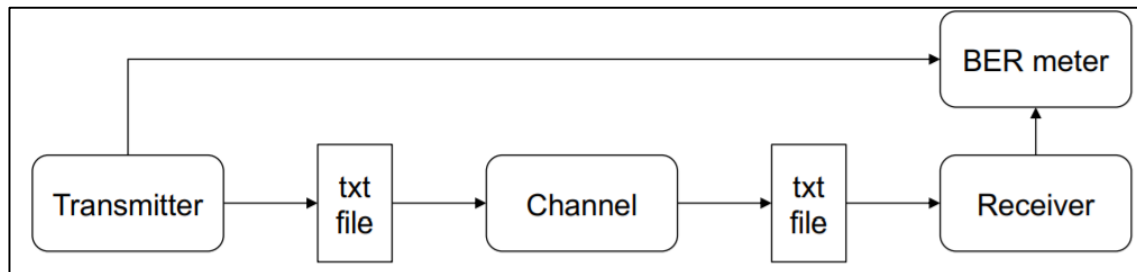


Figura 7 - Arquitetura da solução pretendida.

2.1. Transmissor

No que toca à parte do transmissor este tem como objetivo gerar e guardar o sinal CDMA num ficheiro de texto para que possa ser utilizado no canal.

Em primeiro lugar é gerada uma mensagem para ser transmitida, esta é constituída por uma sequência aleatória de bits, depois é gerado o chip, que pode ser gerado aleatoriamente ou através dos códigos de Walsh. Em seguida multiplica-se a mensagem pelo chip tendo em conta o fator de espalhamento escolhido previamente obtendo-se assim o sinal para ser introduzido no canal. Na figura x está representado um fluxograma simples do funcionamento do transmissor.

No final guarda-se num ficheiro de texto o sinal CDMA, a mensagem original, o chip utilizado e o fator de espalhamento escolhido pelo utilizador.

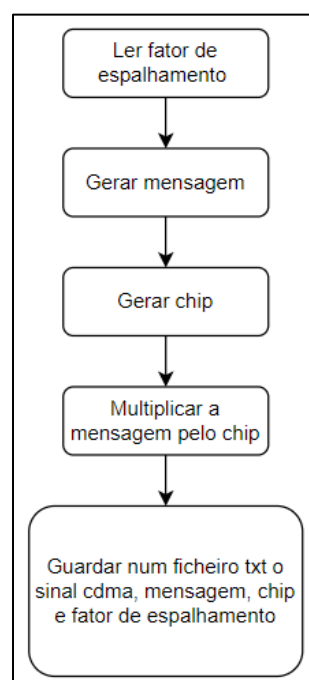


Figura 8 - Fluxograma do transmissor.

2.2. Canal

Quanto ao desenvolvimento do canal este começa por ler de um ficheiro de configuração os ficheiros a ler do transmissor, o nível de atenuação que vai colocar no sinal, o nome do ficheiro para onde vai escrever a solução com o sinal atenuado bem como os vários sinais recebidos, a variância do ruído e o tamanho do sinal do transmissor. De seguida é apresentada uma imagem com o conteúdo do ficheiro de configuração.

```
≡ configFile.txt
1 firstSignal.txt,secondSignal.txt
2 0.8,0.8
3 channel.txt
4 0.5
5 16000
```

Figura 9 - Ficheiro de configuração.

Após proceder à leitura do ficheiro de configuração, o canal realiza a leitura dos vários ficheiros provenientes do transmissor e guarda os valores e posteriormente atenua o sinal recebido e soma os vários sinais. Após ser realizada a soma de todos os sinais atenuados é adicionado ruído de forma a simular o mais próximo possível o que seriam situações reais. Com o ruído adicionado é realizada a escrita no ficheiro output do sinal atenuado com ruído e a informação dos vários sinais recebidos.

Na figura seguinte apresentamos um fluxograma que explica mais detalhadamente todo o processo que é realizado no canal por nós implementado.

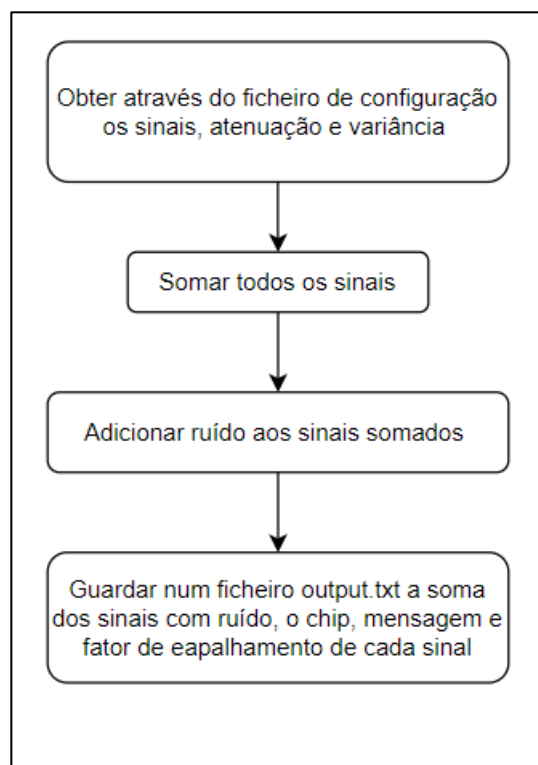


Figura 10 - Fluxograma do canal.

2.3. Recetor

Quanto ao último elemento da nossa solução, o recetor trata de ler o sinal proveniente do ficheiro output do canal e realizar a multiplicação deste pelo chip de cada sinal, após isso realiza o integral com o fator de espalhamento e compara a mensagem final com a original. Em seguida conta os erros de cada sinal e no final apresenta a média dos erros dos vários sinais.

Após ser realizada o integral com fator de espalhamento do chip multiplicado pelo sinal CDMA, foi também calculado o coeficiente de Spearman com auxílio da função *spearmanr* da biblioteca SciPy do Python. Este valor permite uma observação estatística do grau de correlação entre os sinais.

Na figura abaixo é apresentado um fluxograma simples que procura providenciar uma análise rápida da solução encontrada pelo grupo para o desenvolvimento do recetor.

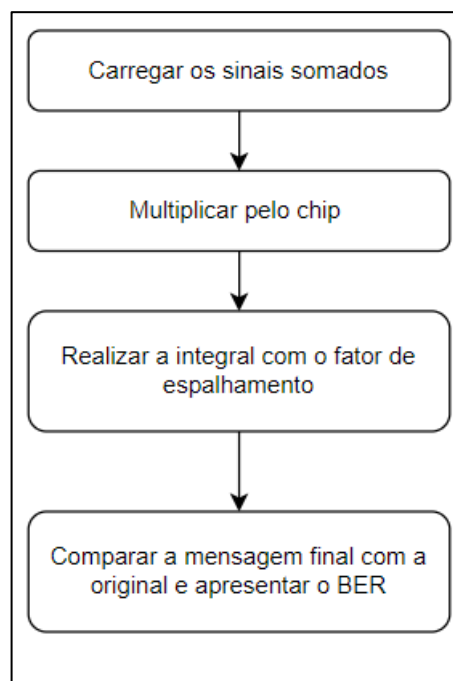


Figura 11 - Fluxograma do recetor.

3. Testes e discussão de resultados

De modo a comprovar a solução desenvolvida foi importante realizar vários testes de controlo. Primeiramente começamos por realizar o teste de 1 e mais sinais com códigos aleatórios demonstrado na forma de tabela e gráfico de seguida. A tabela contém os valores do BER (*bit error rate*) e o gráfico os valores do BER em relação ao inverso da variância.

Tabela 1 - Valores de BER para códigos aleatórios.

	1 sinal	2 sinais	3 sinais
0	0	0	0
10	0	0	0
20	0	0	0
50	0	0	0
1	0	0.006	0.01033
0.5	0.059	0.07	0.07233
0.2	0.265	0.268	0.27366
0.1	0.384	0.395	0.3983
0.05	0.445	0.4275	0.432
0.02	0.453	0.468	0.47466

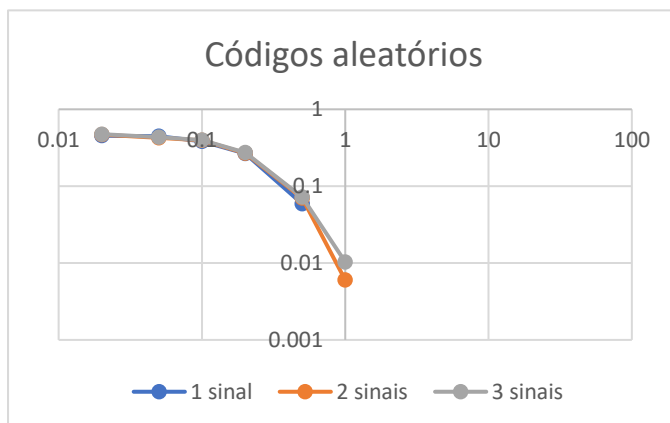


Figura 12 - Gráfico BER com códigos aleatórios.

Após os testes anteriores decidimos realizar os mesmos testes, mas com códigos de Walsh ao invés de aleatórios para verificar se existiam diferenças e se caso existissem se estas melhorariam os valores de erro. De seguida apresentamos os valores obtidos.

Tabela 2 - Valores BER para códigos de Walsh.

	1 sinal	2 sinais	3 sinais
0	0	0	0
10	0	0	0
20	0	0	0
50	0	0	0
1	0	0	0
0.5	0.055	0.0495	0.0543
0.2	0.26	0.2635	0.261
0.1	0.391	0.383	0.358
0.05	0.455	0.437	0.449
0.02	0.481	0.487	0.47

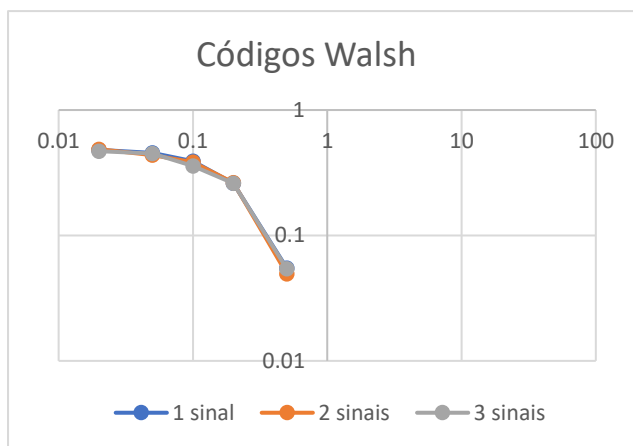


Figura 13 - Gráfico BER com códigos de Walsh.

Através da observação destes 2 conjuntos de dados podemos concluir que realmente ocorreu uma melhoria nos valores de erro. No entanto não se tratou de uma melhoria muito significativa, talvez pelo baixo número de valores testados, porventura se fossem feitos testes com mais valores seria possível analisar melhor as diferenças entre os gráficos.

Para uma melhor observação da diferença entre a utilização de ambos os códigos decidimos colocar lado a lado os valores com 1 sinal e os valores com 3 sinais. De seguida apresentamos os gráficos correspondentes.

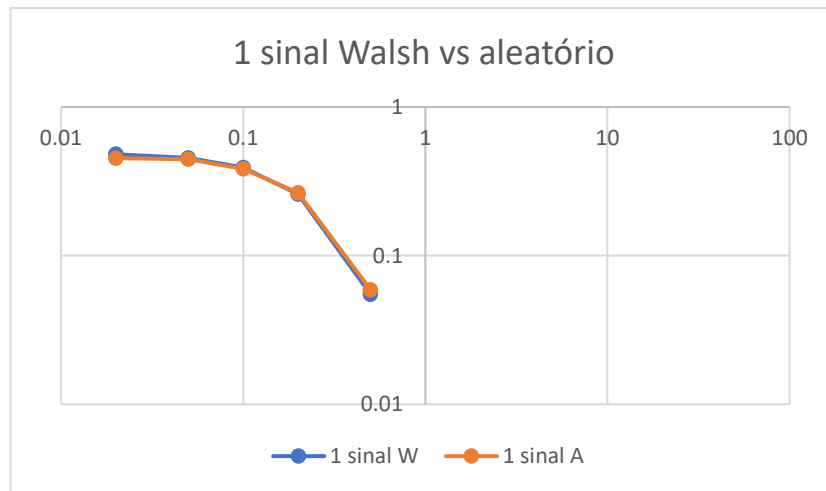


Figura 14 - Gráfico BER para 1 sinal com código Walsh vs aleatório.

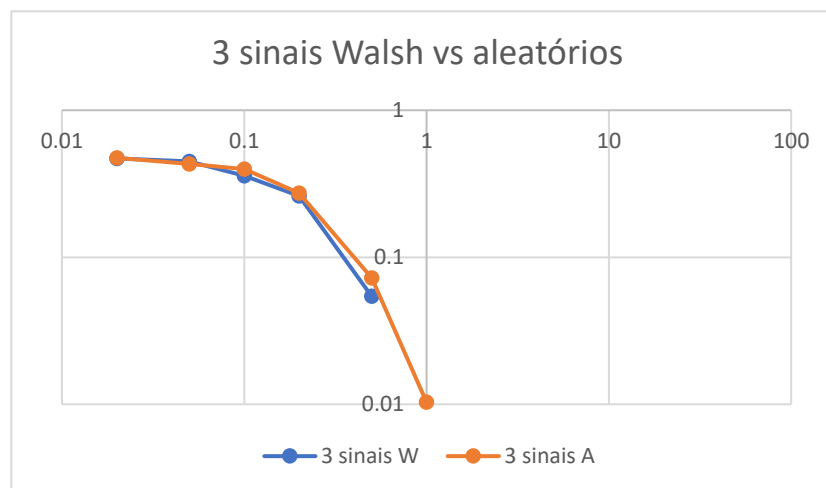


Figura 15 - Gráfico BER para 3 sinais com códigos Walsh vs aleatórios.

Após observar os gráficos pode concluir-se que realmente valores de BER utilizando os códigos Walsh são melhores pois as suas curvas encontram-se mais abaixo no gráfico. Isto significa que a taxa de erros é menor tendo em conta o aumento da variância. Esta melhoria é mais perceptível quando comparamos 3 sinais levando a querer que com o aumento do número de sinais o uso dos códigos Walsh quando comparados aos aleatórios é eficiente.

Um dos fatores mais importantes para este tipo de comunicação é a sincronização entre o sinal recebido e o código utilizado. Nas comunicações reais muitas vezes o sinal não vem sincronizado, nestes casos é preciso encontrar o código que melhor funciona com o sinal, para isto move-se o código uma posição até encontrar o sinal com o melhor coeficiente de Spearman.

Para testar este parâmetro foram realizados vários testes, primeiro realizou-se o teste para apenas um sinal no canal, com códigos aleatórios e com códigos de Walsh, tanto com ruído como sem. Na tabelas e gráficos abaixo encontram-se os resultados obtidos para um sinal com códigos aleatórios.

Tabela 3 - Coeficiente de Spearman com códigos aleatórios (1 sinal).

1 sinal - Aleatórios - Variância = 0			1 sinal - Aleatórios - Variância = 1		
	atraso	1ºSinal		atraso	1ºSinal
	0	1		0	1
	1	1		1	0,556
	2	-1		2	0,012
	3	-1		3	-0,602
	4	-1		4	-0,58
	5	-1		5	0,004
	6	-1		6	-0,006
	7	1		7	-0,006
	8	1		8	-0,544
	9	1		9	0,066
	10	1		10	-0,054
	11	-1		11	-0,062
	12	-1		12	-0,558
	13	-1		13	-0,568
	14	-1		14	0,024
	15	1		15	0,604

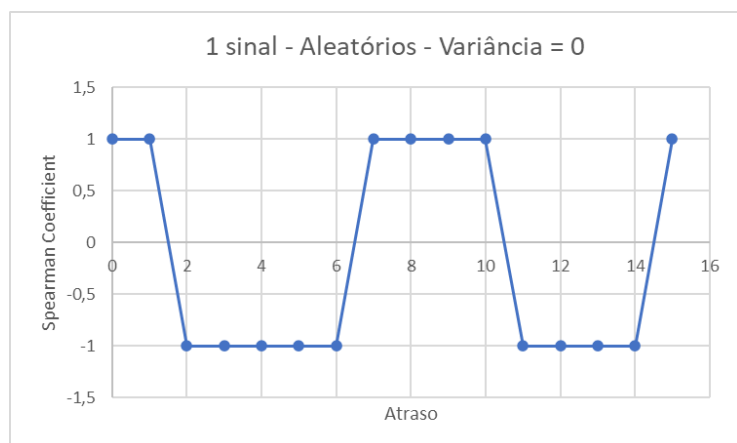


Figura 17 - Gráfico com códigos aleatórios e variância 0.



Figura 16 - Gráfico com códigos aleatórios e variância 1.

Com os dados obtidos podemos concluir que quando não existe ruído, certos valores de atraso obtém um coeficiente de 1, isto deve-se, provavelmente, ao facto do código se repetir. Já quando se insere ruído no canal, apenas quando o código está sincronizado se obtém um coeficiente 1.

Na tabelas e gráficos seguintes encontram-se os resultados obtidos para um sinal com códigos de Walsh utilizando a variância a 0 e 1.

Tabela 4 - Coeficiente de Spearman com códigos de Walsh (1 sinal).

1 sinal - Walsh Codes - Variância = 0			1 sinal - Walsh Codes - Variância = 1		
	atraso	1ºSinal		atraso	1ºSinal
	0	1		0	1
	1	-1		1	-1
	2	1		2	1
	3	-1		3	-1
	4	1		4	1
	5	-1		5	-1
	6	1		6	1
	7	-1		7	-1
	8	1		8	1
	9	-1		9	-1
	10	1		10	1
	11	-1		11	-1
	12	1		12	1
	13	-1		13	-1
	14	1		14	1
	15	-1		15	-1

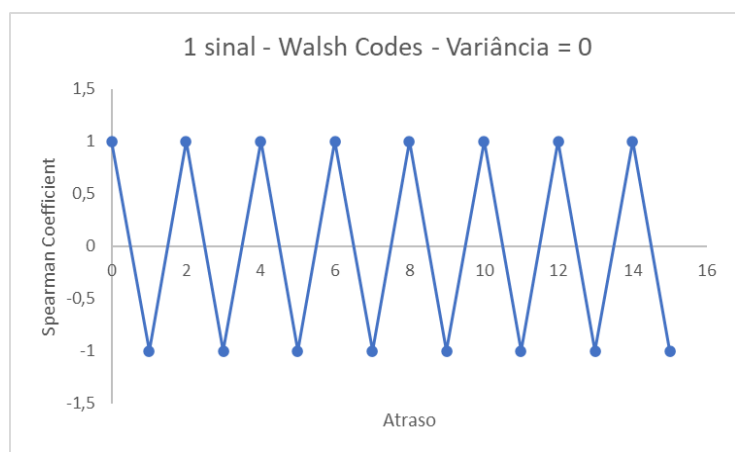


Figura 19 - Gráfico com códigos de Walsh e variância 0.

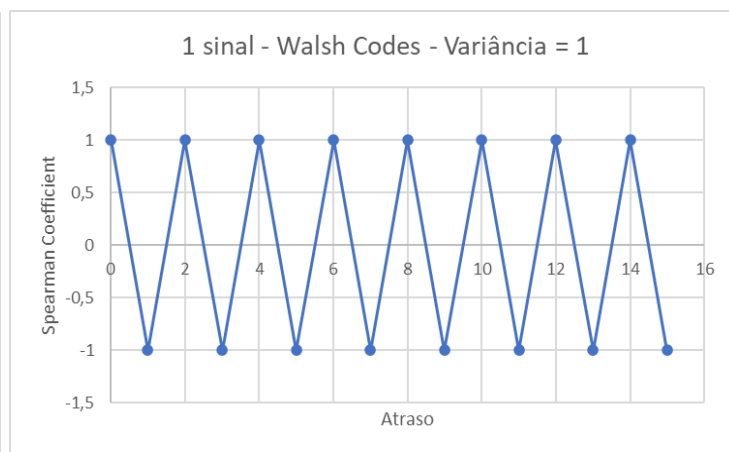


Figura 18 - Gráfico com códigos de Walsh e variância 1.

Através da análise das tabelas podemos observar que os valores obtidos são de apenas 1 e -1. Na prática obtemos a mesma informação tanto com os códigos Walsh como com os códigos aleatórios, a diferença é que com os primeiros obtemos apenas 2 valores diferentes, para quando estes são iguais ou diferentes, enquanto nos segundos os valores são decimais o que dificulta mais a sua análise. Relativamente aos gráficos conseguimos observar melhor essa mudança entre apenas 2 valores conseguindo assim retirar que os códigos de Walsh são substancialmente melhores nas comunicações.

Um último teste que decidimos realizar foi o de comparar 3 sinais com códigos de Walsh e códigos aleatórios e observar os coeficientes de Spearman. Estes testes estão ilustrados a seguir.

Tabela 5 - Coeficientes de Spearman para 3 sinais.

3 sinais - Walsh Codes - Variância = 0				3 sinais - Walsh Codes - Variância = 1				3 sinais - Aleatórios - Variância = 0				3 sinais - Aleatórios - Variância = 1			
atraso	1ºSinal	2ºSinal	3ºSinal	atraso	1ºSinal	2ºSinal	3ºSinal	atraso	1ºSinal	2ºSinal	3ºSinal	atraso	1ºSinal	2ºSinal	3ºSinal
0	1	1	1	0	1	0.998	1	0	1	1	1	0	0.998	0.994	0.996
1	-1	-0.014	0.014	1	-1	-0.067	0.065	1	-0.004	0.298	0.5	1	0.054	-0.018	0.007
2	1	-1	-1	2	1	-0.998	-1	2	-0.498	0.5	-0.48	2	-0.07	0.483	-0.007
3	-1	0.014	-0.014	3	-1	0.067	-0.065	3	-0.567	0.359	0.565	3	-0.762	-0.474	0.396
4	1	1	1	4	1	0.998	1	4	0.259	0.481	-0.021	4	-0.004	-0.008	0.788
5	-1	-0.014	0.014	5	-1	-0.067	0.065	5	0.498	-0.252	0.364	5	0.426	0.52	0.288
6	1	-1	-1	6	1	-0.998	-1	6	0.533	1	-0.48	6	0.018	-0.148	0.04
7	-1	0.014	-0.014	7	-1	0.067	-0.065	7	-0.264	0.487	0.034	7	-0.022	0.029	0.846
8	1	1	1	8	1	0.998	1	8	-0.014	0.5	1	8	-0.776	-0.958	0.017
9	-1	-0.014	0.014	9	-1	-0.067	0.065	9	-0.014	0.298	-0.034	9	-0.004	0.006	0.712
10	1	-1	-1	10	1	-0.998	-1	10	0.021	0.534	-0.785	10	0.02	-0.478	-0.027
11	-1	0.014	-0.014	11	-1	0.067	-0.065	11	1	-0.014	-0.021	11	0.4	0.311	0.447
12	1	1	1	12	1	0.998	1	12	0.218	-0.034	0.259	12	-0.002	0.002	0.86
13	-1	-0.014	0.014	13	-1	-0.067	0.065	13	-1	-0.562	0.021	13	-0.784	-0.516	0.411
14	1	-1	-1	14	1	-0.998	-1	14	-0.235	0.534	-0.48	14	-0.016	0.328	-0.075
15	-1	0.014	-0.014	15	-1	0.067	-0.065	15	-0.021	1	0.034	15	-0.002	-0.019	0

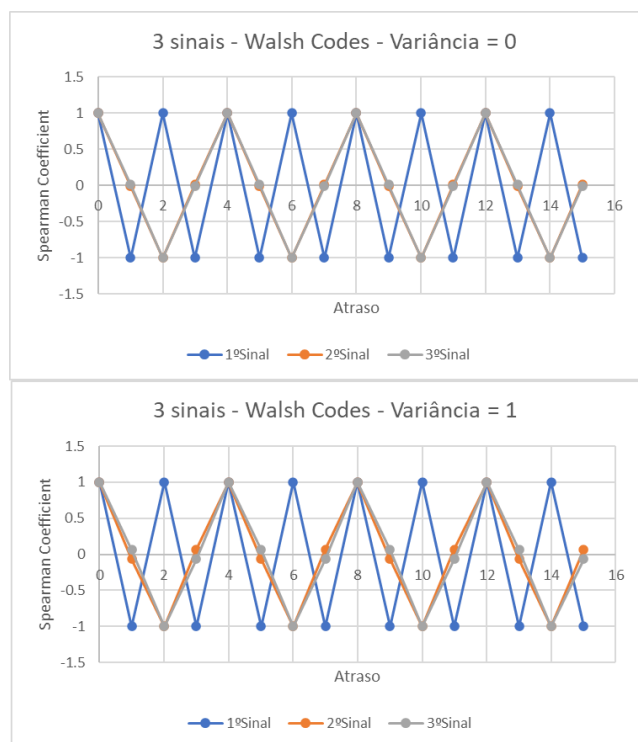


Figura 21 - Gráficos com códigos de Walsh (3 sinais).

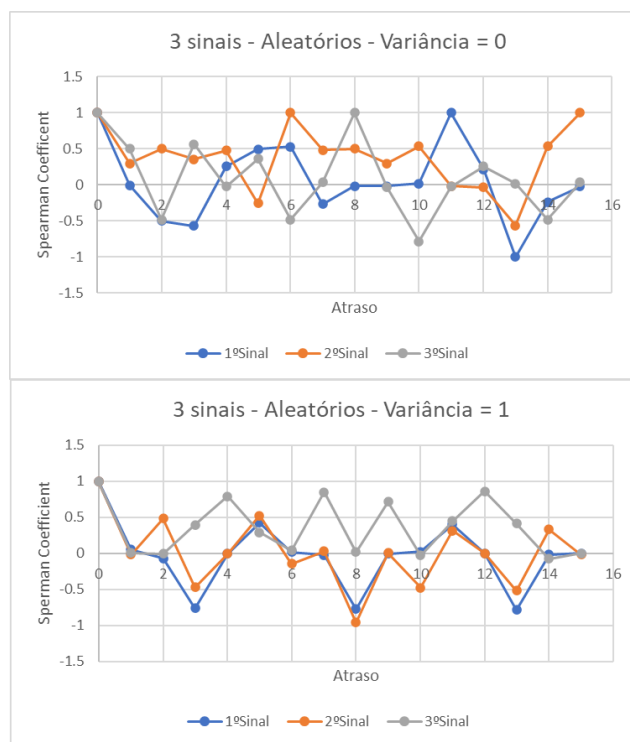


Figura 20 - Gráficos com códigos aleatórios (3 sinais).

Depois de analisar as tabelas e os gráficos fica claro o porquê de se utilizar os códigos de Walsh para este tipo de comunicações. Devido ao facto de os códigos serem ortogonais e repetitivos, consegue-se obter valores de 1 para o coeficiente de Spearman várias vezes.

Conclusão

Após a conclusão do projeto podemos afirmar que nos sentimos satisfeitos com o resultado e com o nosso desempenho uma vez que cumprimos com os objetivos propostos. Relativamente às dificuldades que foram surgindo ao longo da realização do trabalho estas foram ultrapassadas com sucesso apesar do desconhecimento inicial da tecnologia do CDMA.

Na elaboração do projeto a parte que consumiu mais tempo foi o desenvolvimento do código para o transmissor, canal e recetor, no entanto foi um trabalho conseguido com bastante eficácia graças ao comprometimento de todos os membros do grupo.

Acabamos assim este trabalho semestral felizes por termos implementado e testado tudo com a obtenção dos resultados que eram esperados e que achamos satisfatórios. Além disso adquirimos conhecimentos que nos irão certamente ajudar no nosso futuro.

Referências

- [1] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-322-82999-3_10
- [2] https://www.researchgate.net/figure/Illustration-for-different-multiple-access-methods-a-TDMA-the-users-share-the-same_fig3_249966256
- [3] https://www.tutorialspoint.com/cdma/cdma_techniques.htm
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Spearman%27s_rank_correlation_coefficient