

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

**Implementação de um banco de correlatores
para atenuação dos efeitos de um canal
multipercurso**

Autor: Pedro Lucas Pinheiro de Souza
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF
2019



Pedro Lucas Pinheiro de Souza

Implementação de um banco de correladores para atenuação dos efeitos de um canal multipercurso

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Brasília, DF

2019

Pedro Lucas Pinheiro de Souza

Implementação de um banco de correladores para atenuação dos efeitos de um canal multipercurso/ Pedro Lucas Pinheiro de Souza. – Brasília, DF, 2019-
57 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Aguayo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2019.

1. Multipercurso. 2. Correlator. I. Prof. Dr. Leonardo Aguayo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Implementação de um banco de correladores para atenuação dos efeitos de um canal multipercurso

CDU 02:141:005.6

Pedro Lucas Pinheiro de Souza

Implementação de um banco de correladores para atenuação dos efeitos de um canal multipercurso

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Prof. Dr. Leonardo Aguayo
Orientador

Prof. Dr. Wellington Avelino do Amaral
Convidado 1

Prof. Dr. Adoniran Judson de Barros Braga
Convidado 2

Brasília, DF
2019

Dedico este trabalho à Deus que permitiu a chegada até esse ponto e à todos que, direta ou indiretamente, se envolveram nessa caminhada.

Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus pela oportunidade de enfrentar o dia a dia com determinação até esse ponto. Agradeço aos meus pais, Alfredo e Margarida, que me apoiaram de todas as formas e não mediram esforços para possibilitar a melhor educação e instrução. À minha namorada, Luana, que em um momento delicado da minha história soube lidar da melhor maneira possível com demonstrações de carinho e afeto. Ao Professor Dr. Leonardo Aguayo pela oportunidade concedida, e mesmo com todos os problemas encontrados, procurou os melhores caminhos para a conclusão deste trabalho. Aos amigos Thiago de Oliveira, Jackson Paz, Oziel da Silva e Heleno Silva que andaram lado a lado nessa longa e árdua jornada até o presente momento.

*Por isso, eu te digo: tu és Pedro, e sobre esta pedra edificarei minha Igreja,
e as forças do Inferno não poderão vencê-la.
(Bíblia Sagrada, Mateus 16, 18)*

Resumo

Obstáculos no canal de propagação do sinal podem gerar desvanecimentos, reflexões e refrações de modo que este perca potência ou tenha sua fase alterada de forma que os sinais secundários gerados pelo meio acabem por gerar interferências destrutivas, reduzindo a potência do sinal. O efeito multipercurso de um canal pode ser reduzido e até aproveitado para ampliar a potência do sinal recebido através de diferentes ferramentas. Uma delas é *Equal-Gain Combining* ou EGC, que utiliza as características do canal multipercurso para melhorar a recepção do sinal ampliando a potência média deste. Este tipo de receptor faz uso da correlação, uma ferramenta matemática capaz de identificar a diferença de fase entre dois sinais. Após identificada, esta diferença é retirada e o sinal é somado com uma cópia dele mesmo. Este trabalho busca aplicar esta ferramenta num protótipo com a utilização de um microcontrolador como plataforma para a implementação desta solução. Os resultados mostram como esta tecnologia é uma forma vantajosa de se resolver um problema recorrente em canais de transmissão sem fio podendo ser aperfeiçoada para se obter o máximo desempenho quando necessário.

Palavras-chaves: Multipercurso. Correlação. Microcontrolador.

Abstract

Obstacles in the signal propagation channel may generate fading, reflections and refractions so this loses power or has its phase altered so that the secondary signals generated by the environment eventually generate destructive interference, mitigating the signal. The multipath effect of a communication channel can be reduced and even harnessed to increase the signal strength received through different appliances. The Equal-Gain Combining is one of them and uses multipath channel characteristics to improve signal reception. This type of receiver makes use of correlation, a mathematical appliance capable of identifying the phase difference between two signals. After identified, this difference is removed and the signal is added with a copy of itself. This paper seeks to apply this tool to a prototype using a microcontroller as platform for implementing this solution. The results show how this technology is an advantageous way to solve a recurring problem on wireless transmission channels and can be refined for maximum performance when needed.

Key-words: Multipath. Correlation. Microcontroller.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de um canal multipercorso (PARSONS; GARDINER, 1989). . .	24
Figura 2 – Receptor EGC (<i>Equal-Gain Combining</i>) com M fingers (SHUKLA, 2016). . .	26
Figura 3 – Esquemático simples de um <i>Equal-Gain Combining</i> (PARSONS; GARDINER, 1989).	27
Figura 4 – Diagrama de blocos de um receptor utilizando um conjunto de antenas.	28
Figura 5 – Microcontrolador ESP32.	31
Figura 6 – Esquemático para simulação do sinal multipercorso.	33
Figura 7 – Sinais após sofre o efeito multipercorso.	35
Figura 8 – Esquemático do sistema de um banco de correlatores.	35
Figura 9 – Microcontrolador T4MC123G <i>Texas Instruments</i>	37
Figura 10 – Sinais enviados através de um microcontrolador em 4 bits com um bit sinal.	37
Figura 11 – Diagrama to protótipo do receptor.	37
Figura 12 – Somatória dos sinais com e sem o tratamento com correlatores.	40
Figura 13 – Sistema dinâmico de análise de um correlator.	40
Figura 14 – Sinais somados de um sistema dinâmico com e sem tratamento por correlação.	41
Figura 15 – Protótipo de transmissor e receptor para análise do código de correlação.	42
Figura 16 – Sinal referência e sinal tratado pelo correlator em microcontrolador.	42

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Estrutura do trabalho	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Canal de Rádio-Propagação	23
2.1.1	Efeito Multipercurso	24
2.2	Uso de correlatores em receptores	26
2.3	Correlatores	28
2.3.1	Autocorrelação	29
2.3.2	Correlação cruzada	29
2.4	Microcontroladores	30
2.4.1	Microcontrolador ESP32	30
2.5	Matlab	31
3	PROJETO DO SISTEMA	33
3.1	Cálculo dos sinais multipercurso	33
3.2	Banco de Correlatores	34
3.3	Transmissor multipercurso	36
3.4	Receptor multipercurso	37
4	TESTES DO SISTEMA	39
4.1	Metodologia	39
4.1.1	Protótipo do receptor	39
4.2	Simulação	39
4.3	Teste do protótipo	41
5	CONCLUSÃO	43
5.1	Trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIAS	45

APÊNDICES	47
APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO DE CORRELAÇÃO EM C	49
APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO DO PROTÓTIPO EM C	53

1 Introdução

1.1 Contextualização

A transmissão de dados através das ondas eletromagnéticas é uma das principais formas de comunicação nos dias atuais, especialmente em grandes centros urbanos em que a quantidade de obstáculos pode ser prejudicial à comunicação realizada entre as antenas de transmissão e seus receptores. Sinais de rádio e televisão, até mesmo os sinais de celulares são impactados pela presença de obstáculos observados nas cidades sejam eles prédios ou estruturas de grande porte que podem interferir de alguma forma no sinal transmitido.

Um dos fatores que podem interferir negativamente na transmissão de um sinal é a propagação por um canal multipercurso. Este tipo de propagação ocorre devido a presença de objetos que refletem ou espalham o sinal transmitido, fazendo com que o receptor observe o mesmo sinal com amplitudes e fases diferentes. Esse efeito é amplamente observado quando o receptor encontra-se em movimento como rádios de automóveis ou aparelhos de telefonia celular (BRANQUINHO, 1991).

Existem diversas formas de amenizar o efeito multipercurso. Uma delas é utilizando o recurso da correlação entre sinais. Ao fazer a correlação de dois sinais, a chamada correlação cruzada, é possível encontrar o valor da diferença de fase existente entre os sinais que chegam ao receptor afetados pelo efeito do multipercurso, uma vez que o sinal observado pelo receptor difere apenas em amplitude e fase. O valor encontrado na correlação cruzada dos sinais representa a diferença de fase existente entre estes e é utilizado para cancelar esta diferença, tornando possível realizar a interferência construtiva (soma dos sinais observados) que amplia a potência recebida, logo melhorando a qualidade dos dados recebidos (BOTTOMLEY; OTTOSSON; WANG, 2000).

Um circuito capaz de realizar essa operação de correlação entre sinais é chamado *rake receiver*, que nada mais é que um conjunto de antenas que recebe os sinais defasados que passam por um banco de correladores responsáveis por encontrar a diferença entre as fases destes sinais recebidos que sofreram com a propagação por um canal multipercurso, remove esta diferença e soma os sinais ao final da operação, tendo como resultado um sinal com as potências de todos os sinais recebidos somados em um único sinal (BOTTOMLEY; OTTOSSON; WANG, 2000).

Existem diversas plataformas capazes de realizar esse banco de correladores, dentre elas FPGAs e microcontroladores. Cada uma dessas plataformas possuem suas vantagens e desvantagens possibilitando ao projetista escolher a plataforma que preenche os requisitos

de acordo com o projeto.

Entre as vantagens de se projetar utilizando uma FPGA, existe a paralelização dos cálculos necessários para a implementação do projeto, o que acelera o processamento. Outra vantagem é a facilidade de programação devido as linguagens existentes (Verilog e VHDL) que permitem a fácil implementação e testes de sistemas embarcados de uma maneira geral. As desvantagens de uma FPGA em relação ao microcontrolador são observadas principalmente quando se trata de preço. O elevado custo de uma FPGA pode aumentar o valor final a ser desembolsado em um projeto, muitas vezes tornando inviável a elaboração deste com base em uma FPGA (SASS; SCHMIDT, 2010).

Os microcontroladores, assim como as FPGAs, possuem uma grande versatilidade em sua programação podendo ser programado sequencialmente em diferentes linguagens o que acabando facilitando na concepção do projeto. A grande vantagem em relação as FPGAs é o baixo custo, que viabiliza a elaboração de grandes projetos a um preço menor se comparado com um projeto desenvolvido em FPGAs. Uma das desvantagens de um microcontrolador em relação à uma FPGA é a forma de programação sequencial onde os cálculos necessários ao projeto são realizados um por vez e isso diminui a velocidade do processamento de uma maneira geral (TOCCI; AMBROSIO; LASKOWSKI, 2002).

1.2 Objetivos

Este trabalho procura apresentar uma forma de atenuar os efeitos de um canal multipercurso utilizando a ferramenta citada anteriormente, o *rake receiver*. O sinal transmitido que sofre com o efeito multipercurso é recebido através de diferentes antenas dispostas no aparelho receptor. Uma das antenas é selecionada para que a operação de correlação cruzada com as outras antenas, fazendo com que o sistema possua sempre o mesmo referencial. Após a operação de correlação obtêm-se o quanto um sinal está atrasado ou adiantado em relação ao referencial escolhido, e utilizando um *buffer* circular realiza-se a operação de rotação adiantando ou atrasando o sinal que foi correlacionado com o referencial colocando-os em fase e tornando a soma destes uma interferência construtiva, aumentando a potência do sinal na saída do circuito.

O projeto do circuito teve como principal objetivo realizar os cálculos de correlação de maneira rápida e simples para que a resposta pudesse se obtida com o mínimo de perdas de informações. A forma utilizada para a realização desses cálculos foi elaborar os componentes necessários numa plataforma digital flexível, o microcontrolador, capaz de receber os sinais que sofreram com o efeito multipercurso, remover as diferenças de fases advindas deste impacto e somar os sinais de forma que a potência média do sinal de saída seja ampliada.

1.3 Estrutura do trabalho

A organização do trabalho consiste em quatro capítulos. Cada capítulo é direcionado a um tema específico do trabalho partindo da forma como foi projetado, os conhecimentos necessários para a confecção dos componentes utilizados, até o protótipo final e os testes de validação.

- Capítulo 1: Introdução ao problema de sinais multipercurso e as soluções possíveis para tal problema, englobando a razão e os objetivos para a concepção deste trabalho.
- Capítulo 2: Fundamentos necessários para a confecção do projeto de suavização do efeito multipercurso em sinais de rádio;
- Capítulo 3: Recursos utilizados para projetar um sistema capaz de amenizar o efeito multipercurso em sinais de rádio;
- Capítulo 4: Simulação e análise do projeto elaborado;
- Capítulo 5: Conclusão e sugestões para melhorias no projeto confeccionado;

2 Fundamentação Teórica

2.1 Canal de Rádio-Propagação

Nos dias de hoje o número de aparelhos que utilizam comunicação sem fio crescem cada vez mais devido à portabilidade destes. O avanço da tecnologia em chips e microchips vem permitindo que aparelhos cada vez menores o que oferece mobilidade aos seus usuários. Com isso, aparecem problemas relacionados aos sistemas de comunicação móveis sem fio que vão desde atenuação da potência do sinal até alterações aleatórias na fase deste. Todos esses fatores decorrem da característica do canal que é utilizado (BARROS, 2005).

Para mitigar os problemas relacionados ao canal de rádio-propagação, inicialmente é necessário caracterizar este canal que possui natureza aleatória e dependente da faixa de frequência na qual o sinal será transmitido. A modelagem deste canal é complexa e requer estudos teóricos um pouco mais aprofundados e dados estatísticos (BARROS, 2005).

A caracterização de um sinal deve considerar os mecanismos de propagação que são responsáveis pela perda média de potência no sinal que atravessa um determinado canal e pode ser observado pelo nível médio do sinal recebido e os efeitos de propagação que causam variações aleatórias neste nível médio do sinal. Na faixa de frequência utilizada em sistemas celulares, os principais mecanismos de propagação são visibilidade, reflexão e difração. Multipercurso é o mais significativo efeito de propagação pois é o responsável pela forma como o sinal chega ao receptor, sendo uma composição de diferentes versões do sinal original transmitido que percorreram diversos caminhos ao longo do canal. Outro efeito de propagação existente é o sombreamento. Este é decorrente do bloqueio causado por obstruções de relevo natural ou artificial. Isto faz com que o nível do sinal sofra flutuações que causam alteração no sinal recebido pelo aparelho (BARROS, 2005).

O estudo relacionado à esses mecanismos e efeitos de propagação é necessário para a estimativa do desempenho e correção de distorções do sistema e cálculos para a otimização dos aparelhos de transmissão e recepção a fim de suavizar tais efeitos (JUNIOR et al., 2004).

O modelo de propagação mais básico é aquele no qual o nível médio do sinal recebido atravessa o canal num caminho direto entre transmissor e receptor, livre de obstáculos. Este modelo é chamado de propagação no espaço livre e considera que o sinal recebido é uma composição entre o ganho das antenas, perdas do canal e potência do sinal no transmissor (CARVALHO, 2008).

Esta perda de espaço livre pode ser definida em dB pela fórmula de Friis:

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2. \quad (2.1)$$

A equação 2.1 considera que a potência do sinal que foi transmitido diminui 20 dB por década da distância percorrida. Então na equação 2.1 têm-se L como sendo a perda de espaço livre em dB, d a distância entre receptor e transmissor e λ o comprimento de onda em metros obtido através da equação 2.2 (CARVALHO, 2008).

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.2)$$

sendo c a velocidade da luz no meio ($3 \cdot 10^8 m/s$ no vácuo), e f a frequência do sinal em Hertz (CARVALHO, 2008).

2.1.1 Efeito Multipercurso

O efeito multipercurso possui a probabilidade da existência de um caminho direto entre receptor e transmissor quase nula devido ao grande número de obstáculos móveis ou fixos entre estes (JUNIOR et al., 2004).

Um sinal ao ser enviado através de uma antena pode percorrer diferentes caminhos até sua recepção. Essa passagem por múltiplas direções faz com que o sinal transmitido chegue até o receptor através de reflexões em objetos que estejam entre qualquer ponto neste caminho, o que acarreta mudanças na fase e na amplitude do sinal que foi enviado (BRANQUINHO, 1991).

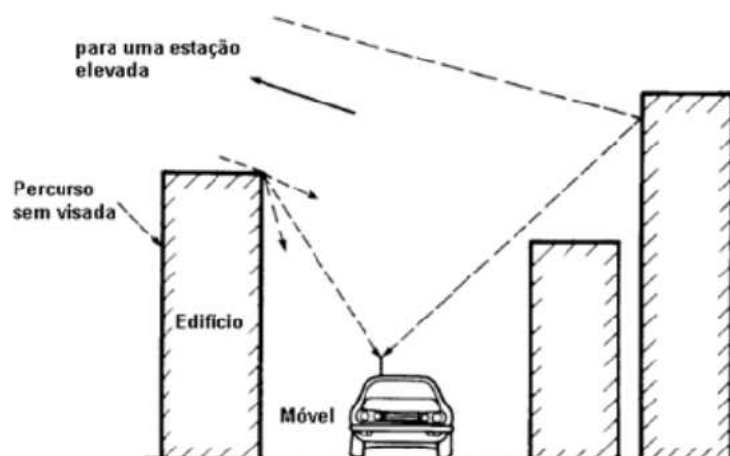


Figura 1 – Exemplo de um canal multipercurso (PARSONS; GARDINER, 1989).

Na Figura 1 pode-se observar alguns possíveis caminhos multipercurso onde o sinal enviado é refletido e refratando antes de chegar ao receptor com fases e amplitudes diferentes.

As reflexões de um sinal transmitido são importantes para garantir a comunicação entre transmissor e receptor uma vez que em caso de não haver um caminho direto entre estes, a comunicação se dará através dessas reflexões em diferentes objetos no caminho da transmissão. Contudo, esse efeito de reflexão pode dificultar ou até mesmo impossibilitar a comunicação. Isso ocorre por causa da aleatoriedade dos obstáculos no caminho entre uma antena e um receptor, que pode gerar interferência tanto construtiva quanto destrutiva. Essa aleatoriedade se deve aos obstáculos, móveis ou fixos, espalhado ao longo do caminho que o sinal deverá percorrer. Obstáculos fixos podem ser objetos ou construções, já os móveis podem ser veículos ou pessoas que se movem com direção e velocidade aleatórias entre o transmissor e o receptor tornando o canal entre estes também aleatório e variante no tempo (CARVALHO, 2008).

Como o canal multipercurso é caracterizado pela aleatoriedade na amplitude e na fase da composição de sinais no receptor, é possível a caracterização deste canal através de sua resposta impulsiva equivalente em banda base (JUNIOR et al., 2004):

$$h(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \delta(t - \tau_k), \quad (2.3)$$

onde N é o número de obstáculos presentes no canal, α_k corresponde às variações de amplitude do sinal e τ_k os atrasos decorrentes das reflexões e refrações do sinal apresentado.

Uma forma de se analisar o efeito multipercurso é explorar separadamente os diferentes eventos que estão associados a este (BRANQUINHO, 1991). Existem diversos fenômenos que ocorrem devido ao número de obstáculos presentes entre transmissor e receptor, a velocidade em que o aparelho móvel percorre, ao ângulo de incidência da onda que foi ou não refletida e até mesmo a presença ou não de um caminho direto entre a antena transmissora e o receptor (CARVALHO, 2008). Neste projeto não foi considerado este caminho direto, também conhecido como linha visada (BRANQUINHO, 1991).

Um desses fenômenos é conhecido como desvanecimento que possui diversas variantes e é definido a partir do tipo de causa deste evento. O fenômeno do desvanecimento é uma distorção que ocorre no sinal transmitido devido à variações no ambiente em que o sinal se propaga e é dependente dos parâmetros deste sinal (largura de banda e tempo de *bit*) e dos parâmetros do canal como a resposta em frequência (CARVALHO, 2008).

Uma das variantes do desvanecimento é resultado do sombreamento por grandes objetos, considerando-se o comprimento de onda do sinal, que ocorre quando o aparelho receptor passa por trás de objetos que obstruem total ou parcialmente o caminho direto

entre uma antena e o receptor. Esta variante é conhecida como desvanecimento em grande escala e sua duração depende da velocidade com qual o receptor passa por trás do obstáculo. Este desvanecimento pode atuar de maneira construtiva ou destrutiva em relação à perda média do sinal por agir sobre a perda de percurso de uma localidade particular qualquer (YANGH; PAHLAVAN, 1994).

Outro tipo de desvanecimento é o de pequena escala. Esta variante é consequência do efeito *Doppler* que causa uma modulação aleatória em frequência no sinal. O efeito *Doppler* aparece devido a movimentação do receptor ou dos obstáculos entre a antena e o receptor que altera o ângulo de incidência do sinal enviado (CARVALHO, 2008).

Existe também um tipo de desvanecimento conhecido como *Rayleigh* onde o sinal sofre com flutuações rápidas devido à adição vetorial dos componentes, porém sem distorções pois a característica deste tipo de desvanecimento é que a largura de banda do sinal transmitido é menor que a banda passante do canal (SALEH; VALENZUELA, 1991).

2.2 Uso de correlatores em receptores

O uso de correlatores em receptores tem por objetivo buscar uma forma de tirar proveito das propriedades da interferência multipercurso de forma a tentar obter uma melhora na relação sinal-ruído de um receptor (BOTTOMLEY; OTTOSSON; WANG, 2000).

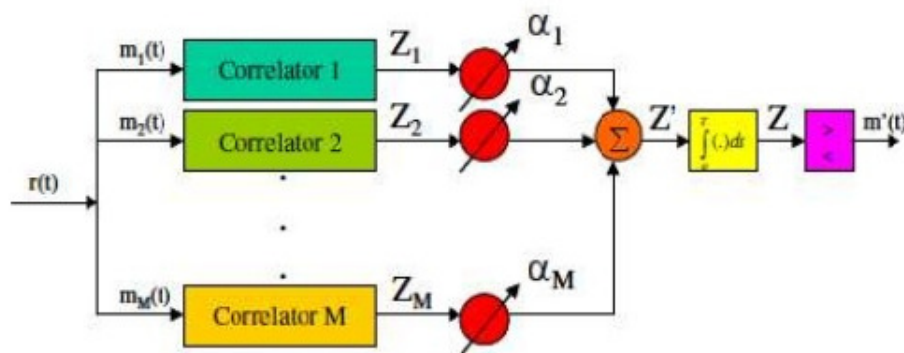


Figura 2 – Receptor EGC (*Equal-Gain Combining*) com M fingers (SHUKLA, 2016).

A Fig. 2 representa a ideia básica de um receptor utilizando correlatores com M entradas, onde cada entrada é responsável pelo tratamento de uma parte do sinal distorcido. Neste receptor, os sinais percebidos em cada antena são tratados por um correlator, responsável por remover as fases presentes entre os sinais, depois são somadas e por fim passam por um integrador e um comparador em caso de sinais digitais para realizar a decisão do bit.

A relação sinal-ruído é uma forma quantitativa de analisar os efeitos da potência transmitida em relação ao efeito causado pela interferência de ruído. É a comparação entre o nível de sinal desejado com o nível de ruído apresentado e é normalmente descrita na forma decibéis (HAYKIN; MOHER, 2008).

Um receptor EGC (*Equal-Gain Combining*) procura aumentar esta relação sinal-ruído removendo as diferenças entre as fases causadas pelo efeito multipercurso e por fim, combinando os sinais em fase, aumentando a potência média na entrada do aparelho demodulador.

Um receptor *rake* é utilizado amplamente pelo sistema CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Código). Nesta estrutura os sinais complexos são transmitidos ortogonalmente (utilizando senos e cossenos) através de códigos especialmente concebidos para este tipo de estrutura que por sua vez possibilita ao receptor *rake* estimar a estrutura do canal multipercurso e assim aprimorar o desempenho do sistema (KHALAJ; PAULRAJ; KAILATH, 1994).

Neste trabalho foi utilizada uma outra construção similar ao receptor *rake* que não utiliza o sistema CDMA de recepção devido a complexidade de elaboração do código de estimação do canal. A estrutura proposta emprega um conjunto de antenas separadas por uma distância pré-determinada para que possa ser observado na saída das antenas ambos os efeitos temporais e espaciais gerados pelo canal multipercurso (KHALAJ; PAULRAJ; KAILATH, 1994).

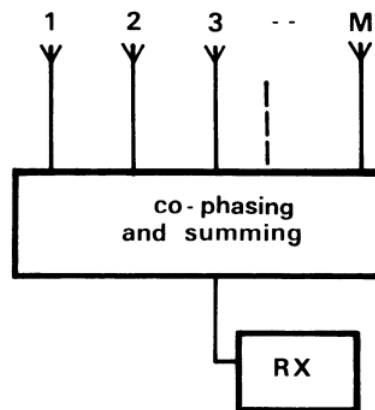


Figura 3 – Esquemático simples de um *Equal-Gain Combining* (PARSONS; GARDINER, 1989).

Equal-Gain Combining é uma das formas de mitigar os efeitos de um canal multipercurso utilizando vários ramos de recepção do sinal. Diferentemente de outras topologias (como o MRC¹) que empregam o ponderamento dos ramos, o EGC possui uma implementação mais simples sem ponderação dos ramos (PARSONS; GARDINER, 1989).

¹ *Maximum Ratio Combining* utiliza vários ramos ponderados para a recepção e tratamento de sinais distorcidos por canais multipercurso.

A soma final dos sinais de um EGC pode ser descrita de maneira simples conforme a equação 2.4:

$$r_{EGC} = \sum_{k=1}^M r_k. \quad (2.4)$$

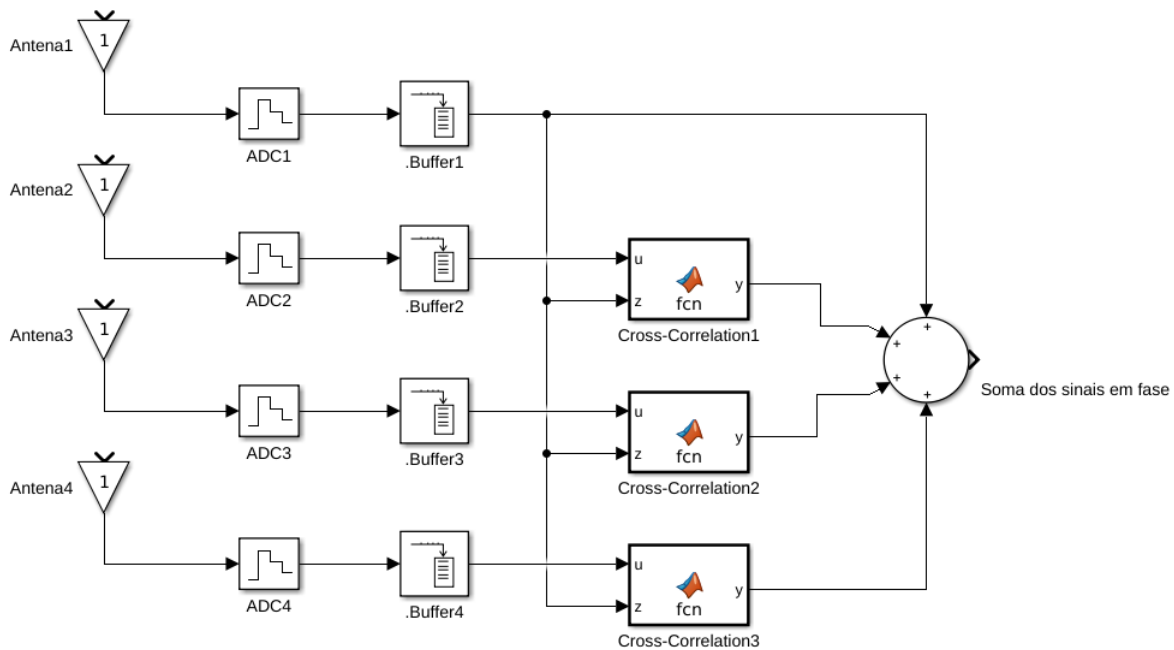


Figura 4 – Diagrama de blocos de um receptor utilizando um conjunto de antenas.

Na Fig. 4 observa-se um receptor EGC utilizando quatro antenas para a recepção do sinal que sofreu com os efeitos do multipercurso. Neste diagrama, uma das antenas é utilizada como referência para que os sinais recebidos pelas outras antenas possam estar em fase com o mesmo referencial, e então os sinais na saída dos correladores (responsáveis pela remoção da fase do sinal) são somados (KHALAJ; PAULRAJ; KAILATH, 1994).

2.3 Correladores

A operação de correlação entre sinais é a forma de medir a similaridade entre estes (HAYKIN; MOHER, 2008). Um correlador é uma forma de utilizar esta operação matemática no mundo real, ou seja, através de um equipamento como um microcontrolador ou uma FPGA por exemplo, cria-se uma função que realiza esta operação (HARRIS; ZMUIDZINAS, 2001).

Receptores *rake* e similares utilizam em suas ramificações correladores que são responsáveis por identificar a diferença de fase dos sinais recebidos em decorrência do canal multipercurso. Essa identificação pode ser feita através de dois métodos, a autocorrelação e a correlação cruzada (BOTTOMLEY; OTTOSSON; WANG, 2000).

2.3.1 Autocorrelação

A função autocorrelação de um sinal $x(t)$ é a medida da similaridade de um sinal com ele mesmo em sua forma atrasada de um intervalo de tempo τ . Esta função pode ser utilizada para encontrar padrões de repetição em sinais que sofreram de interferência externa como ruído. Também é utilizada para analisar sinais no domínio do tempo. Esta função pode ser descrita através de um sinal genérico complexo $x(t)$ com um atraso τ da seguinte forma (HAYKIN; MOHER, 2008):

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x^*(t - \tau)dt, \quad (2.5)$$

onde x^* é o complexo conjugado de x .

Dessa forma, se o atraso τ observado na Eq. 2.5 for igual a zero, obtêm-se o valor da energia do sinal $x(t)$:

$$R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (2.6)$$

Um autocorrelator pode ser utilizado para obter a frequência fundamental de um sinal corrompido por ruído e harmônicas indesejadas. Com isso, pode ser aplicado em diferentes aparelhos receptores, aprimorando a leitura de um sinal, contribuindo para a melhoria da relação sinal-ruído do sistema (KHALAJ; PAULRAJ; KAILATH, 1994).

Em sistemas digitais, a aplicação de sinais discretos implica a utilização também da correlação em tempo discreto:

$$r_{xx}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(n)x(n - l), \quad (2.7)$$

onde $x(n)$ é um sinal discreto no tempo.

2.3.2 Correlação cruzada

Diferentemente da autocorrelação que mede a similaridade de um sinal com uma versão atrasada deste mesmo, a correlação cruzada é uma medida da semelhança entre um sinal $x(t)$ e uma versão atrasada de um segundo sinal $y(t)$ (ambos sinais complexos genéricos):

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y^*(t - \tau)dt, \quad (2.8)$$

onde y^* é o complexo conjugado de y .

Desta forma, se os sinais $x(t)$ e $y(t)$ forem semelhantes de alguma forma, a correlação cruzada entre eles será finita no intervalo de τ onde essa semelhança existir (HAYKIN; MOHER, 2008).

Uma outra forma de se representar a função de correlação cruzada dos mesmos sinais complexos $x(t)$ e $y(t)$ é a seguinte:

$$R_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x^*(t - \tau)dt \quad (2.9)$$

E a partir destas definições de correlação cruzada, é possível observar que:

$$R_{xy}(\tau) = R_{yx}^*(-\tau) \quad (2.10)$$

De maneira geral, a operação de correlação cruzada não é comutativa, em outras palavras, $R_{xy}(\tau) \neq R_{yx}(\tau)$ (HAYKIN; MOHER, 2008).

A equação de correlação cruzada também pode ser escrita no tempo discreto com o intuito de ser empregada em sistemas digitais como microcontroladores:

$$r_{yx}(l) = \sum_{-\infty}^{\infty} y(n)x(n - l), \quad (2.11)$$

onde $x(n)$ e $y(n)$ são sinais reais discretos no tempo.

Neste trabalho, a correlação cruzada é utilizada recebendo como um dos sinais de entrada uma antena de referência e o outro sinal, uma antena que será correlacionada para que a potência média das antenas seja somada ao final do processo (Tsalapatas; Moraitis, 1989).

2.4 Microcontroladores

Microcontroladores são dispositivos constituídos de uma unidade central de processamento, memória e dispositivos periféricos de entrada e saída de dados. A construção destes microcontroladores é feita em um único chip de circuito integrado, ou seja, não é necessário a utilização de componentes externos para o funcionamento do microcontrolador diferentemente do microprocessador em que há a necessidade de periféricos e memória externa (TOCCI; AMBROSIO; LASKOWSKI, 2002).

Um microcontrolador possui a vantagem da programação de seus periféricos serem relativamente simples, podendo ser feita em linguagens de programação elevado, acelerando o processo de confecção de projetos. Outro ponto positivo é o custo relativamente baixo em relação a outros tipos de sistemas (TOCCI; AMBROSIO; LASKOWSKI, 2002).

2.4.1 Microcontrolador ESP32

Neste projeto, foi necessário encontrar um microcontrolador capaz de realizar as operações de correlação com velocidade suficiente para que o processamento dos sinais

recebidos fosse o mais rápido possível. Para este projeto, foram utilizados sinais com frequências de aproximadamente 1 MHz e uma frequência de amostragem de sinal em torno de 5 MHz. Com isso, o microcontrolador a ser escolhido deveria receber os sinais advindos dos conversores analógico-digitais, processá-los e posteriormente enviá-los ao receptor responsável pela utilização do sinal tratado.



Figura 5 – Microcontrolador ESP32.

A escolha da ESP32 foi feita a partir da necessidade do projeto de uma ampla memória para armazenamento de dados, velocidade de processamento, versatilidade de programação e acessibilidade do microcontrolador para o projeto. A ESP32 possui uma central de processamento com 32 bits, 240 MHz de *clock* principal e diversos periféricos de entrada e saída para o auxílio da confecção do projeto (ESPRESSIF, 2018).

2.5 Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) é um *software* direcionado ao cálculo numérico matricial. Tais cálculos podem envolver diferentes finalidades como processamento de sinais, trajetórias orbitais e tantas outras. É um *software* que permite o cálculo numérico e a construção de gráficos de maneira simples e rápida empregando uma linguagem própria de programação, o que torna este processo mais fácil em relação a outras linguagens de como C ou FORTRAN (MOORE, 2017).

O *software* Matlab possui diversas ferramentas internas que facilitam a programação específica em cálculos matemáticos complexos, além de ferramentas que são capazes de implementar funções próprias do *software* em outras linguagens de programação. Devido a esta versatilidade, o Matlab possui amplo uso tanto acadêmico quanto em empresas (MOORE, 2017).

Uma das ferramentas existentes no Matlab é o Simulink, um *software* interativo baseado na construção de modelos utilizando blocos personalizáveis. É uma ferramenta capaz de modelar, simular e permitir a análise de sistemas dinâmicos através destes blocos.

Este *software* possui ampla utilização em teoria de controle e processamento digital de sinais (utilizados neste projeto) (MOORE, 2017).

Esta ferramenta facilita a compreensão de sistemas complexos como o descrito nesse projeto. Além de ser possível criar funções personalizadas de acordo com a necessidade de cada projeto. O Simulink permite a simples combinação dos blocos através de setas e a realização de simulações em tempo "infinito", como se fosse um sistema dinâmico em funcionamento (MOORE, 2017).

3 Projeto do Sistema

Para simular um sinal que sofreu com o efeito de um canal multipercurso observado através de quatro antenas, foi utilizado um sinal senoidal com a frequência de 1 MHz¹ e a partir desse sinal inicial, foram criados outros sinais de mesma frequência porém com atrasos que simulam efeitos de reflexão ou refração do sinal.

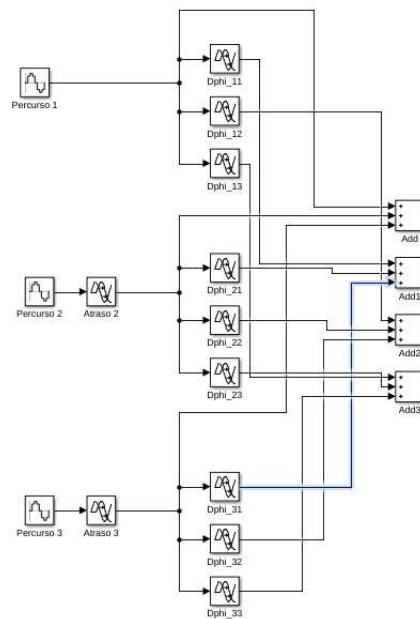


Figura 6 – Esquemático para simulação do sinal multipercurso.

Na Fig. 6 os blocos iniciais geram sinais com mesma frequência porém com amplitudes diferentes enquanto os blocos subsequentes simulam obstáculos por onde os sinais irão passar e sofrer reflexões e conseqüentemente variações de fase. Por fim, os blocos de soma recebem uma composição dos sinais da mesma forma que uma antena recebe uma composição dos sinais transmitidos.

3.1 Cálculo dos sinais multipercurso

Os efeitos de um canal multipercurso apresentados neste trabalho mostram sinais que sofreram de alterações aleatórias na fase devido aos diversos percursos percorrido pelo sinal até sua observação pela antena e o desvanecimento do sinal que reduz a potência que chega à antena devido aos percursos percorridos.

¹ O valor de 1 MHz foi escalonado para o teste que seria realizado com um conversor analógico-digital de frequência de amostragem de 5MHz.

Para este trabalho foi implementado um receptor com 4 antenas espaçadas de $d = \frac{c}{f}$ entre si, onde f é a frequência do sinal senoidal e c a velocidade da luz. Porém a distância para a frequência de 1 MHz seria de aproximadamente a 300 metros, impossibilitando a construção. Para uma distância menor, seria necessário um sinal de frequência muito mais alta, o que não é possível devido ao conversor analógico-digital cuja frequência máxima de amostragem (aproximadamente 40 MHz) não é suficiente para um sinal que teria de funcionar em torno de 1 GHz. Assim sendo, o espaçamento foi utilizado apenas na simulação do sinal. Para os sinais observados à entrada de cada antena conforme o diagrama em 6, obteve-se as equações específicas de cada um abaixo:

- Antena 1: $s_1(t) = \sin(\omega_c t) + 0.7 \sin(\omega_c(t - 10^{-4})) + 0.5 \sin(\omega_c(t - 1.5 \cdot 10^{-4}))$;
- Antena 2: $s_2(t) = \sin(\omega_c(t - (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{20}))) + 0.7 \sin(\omega_c(t - 10^{-4} - (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{4}))) + 0.5 \sin(\omega_c(t - 1.5 \cdot 10^{-4} - (\frac{1}{f}) + (\frac{d}{c})(\sin(11 \cdot \frac{\pi}{6}))))$;
- Antena 3: $s_3(t) = \sin(\omega_c(t - 2 \cdot (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{20}))) + 0.7 \sin(\omega_c(t - 10^{-4} - 2 \cdot (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{4}))) + 0.5 \sin(\omega_c(t - 1.5 \cdot 10^{-4} - (\frac{1}{f}) + (\frac{d}{c})(\sin(11 \cdot \frac{\pi}{6}))))$;
- Antena 4: $s_4(t) = \sin(\omega_c(t - 3 \cdot (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{20}))) + 0.7 \sin(\omega_c(t - 10^{-4} - 3 \cdot (\frac{d}{c}) \cdot \sin(\frac{\pi}{4}))) + 0.5 \sin(\omega_c(t + 1.5 \cdot 10^{-4} + (\frac{1}{f}) + 3 \cdot (\frac{d}{c})(\sin(11 \cdot \frac{\pi}{6}))))$.

Nas equações 3.1, a frequência do sinal é dada em radianos: $\omega_c = 2\pi f$ rad, o valor da velocidade da luz é dado aproximadamente por $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ e por fim, a frequência do sinal testado de $f = 10^6$ Hz.

As equações 3.1 foram retiradas da Fig. 6, onde os primeiros blocos descritos como percursos 1, 2 e 3 são a variante em amplitude do sinal e os blocos subsequentes até antes da entrada do somatório são os percursos que defasam o sinal inicial. Os blocos de soma (blocos finais da Fig. 6) representam as antenas que recebem a composição dos sinais que sofreram com perda de amplitude e defasagem.

Após sofrer com o efeito multipercurso, os sinais observados em cada antena são descritos na Fig. 7:

3.2 Banco de Correlatores

Para encontrar o quanto um sinal se encontra defasado em relação a outro, foi utilizado o método da correlação cruzada entre sinais. Para isso, foi utilizado a ferramenta matemática correlação cruzada, onde os sinais a serem correlacionados foram escolhidos de acordo com a Fig. 8:

Na Fig. 8 é possível observar que uma das antenas foi escolhida arbitrariamente como referência de fase para que os sinais advindos das outras três antenas pudessem

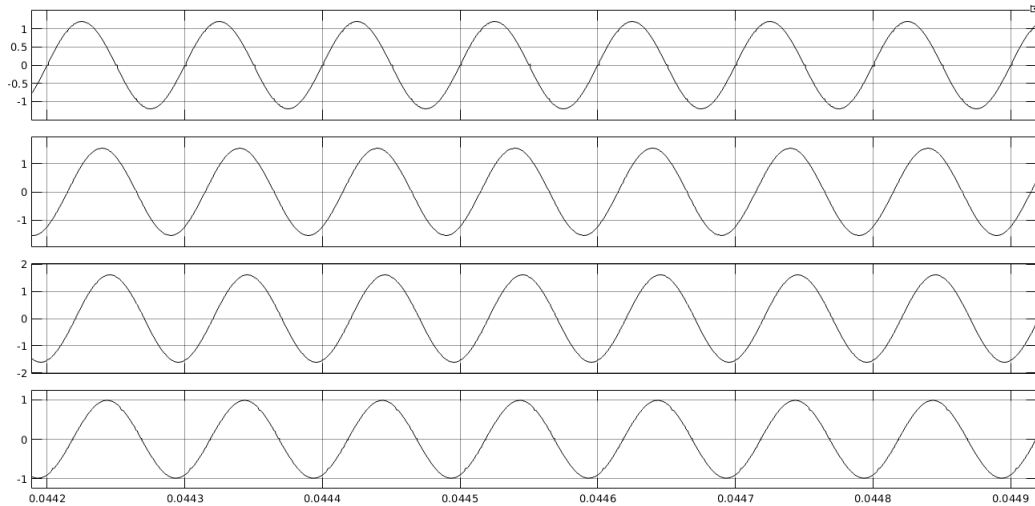


Figura 7 – Sinais após sofre o efeito multipercurso.

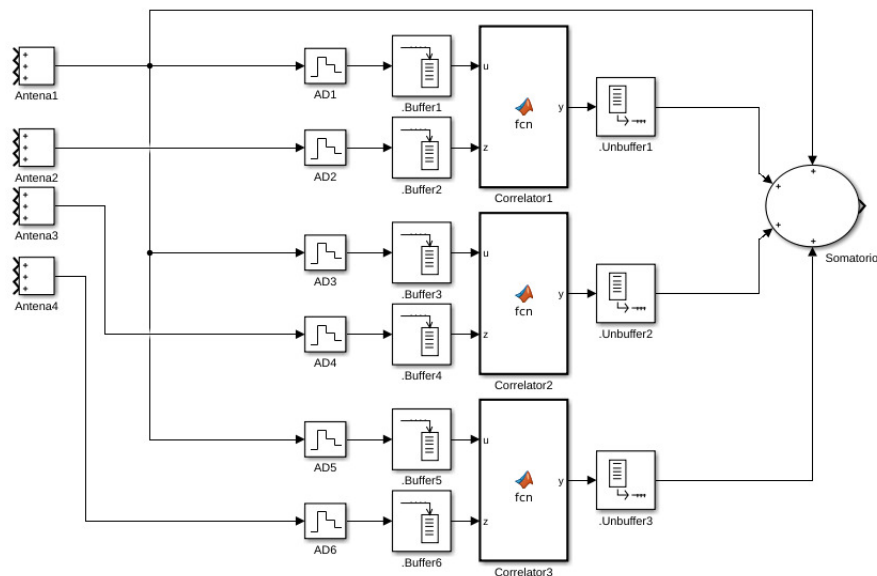


Figura 8 – Esquemático do sistema de um banco de correlatores.

sempre estar com uma fase semelhante, próxima o bastante para que a soma dos sinais gerasse uma interferência construtiva.

Os sinais descritos nas equações 3.1 são observados nas saídas dos blocos de antenas da Fig. 8, ou seja, o somatório de diferentes sinais que foram distorcidos pelo canal multipercurso.

Por se tratar de um sinal continuamente recebido, foi necessário a utilização de uma janela no tempo de forma que o sinal pudesse ser tratado de forma finita. Para isso foram utilizados *buffers* que realizaram esse janelamento do sinal.

A função concebida em simulink na Fig. 8 é responsável por encontrar o valor de

pico do resultado da função de correlação cruzada² e o índice deste valor é o tanto que um sinal se encontra defasado do outro. Este valor, por se tratar de um sinal digital, indica a quantidade de amostras que um sinal está em relação ao outro, assim sendo, é utilizado um *buffer* circular que rotaciona um sinal para que entre em fase com o sinal de referência. Após essa rotação, os sinais são somados.

3.3 Transmissor multipercurso

Um sinal enviado através de um canal multipercurso sofre, entre outros efeitos, a defasagem de sinal que pode levar a uma interferência destrutiva causando perda de amplitude do sinal. Assim sendo, foi necessário projetar um sistema que enviasse sinais defasados de alguma forma para a observação do desempenho do receptor proposto.

Inicialmente foi pensado um aparelho transmissor capaz de enviar uma senoide com frequência de 1 MHz através de um ambiente capaz de gerar multipercurso. Isso se daria através das reflexões e refrações em paredes e até mesmo em obstáculos existentes no ambiente teste. Devido à atrasos na entrega dos componentes necessários para a confecção do receptor como conversor analógico-digital e do transmissor (componente para a amplificação de potência do sinal), esta abordagem se tornou inviável devido ao prazo restante do projeto. Assim sendo, foi necessário o desenvolvimento de uma transmissão de sinais para que o protótipo pudesse ser desenvolvido e apresentado. A solução encontrada foi gerar sinais a partir de outro microcontrolador para que a validação do projeto pudesse ocorrer.

O microcontrolador escolhido foi o T4MC123G, Fig. 9 devido a quantidade de portas existentes, além do *launchpad kit* contar com botões pré-alocados, que facilitam na programação de um botão de sincronização entre os dois microcontroladores (transmissor e receptor), além da quantidade de pinos que permite o envio dos dados necessários ao receptor e velocidade de funcionamento suficiente para que o transmissão dos dados seja executada da melhor forma possível.

Para a transmissão destes sinais defasados, foi descrito um *software* responsável por enviar dois sinais de 4 *bits* (incluindo o *bit* de sinal) defasados em quatro amostras através das portas digitais de um microcontrolador. Os sinais na forma de rampa foram escolhidos para a melhor visualização do funcionamento do protótipo desenvolvido e podem ser observados na Fig. 10.

² Este valor representa onde os sinais de entrada possuem maior similaridade(HAYKIN; MOHER, 2008).

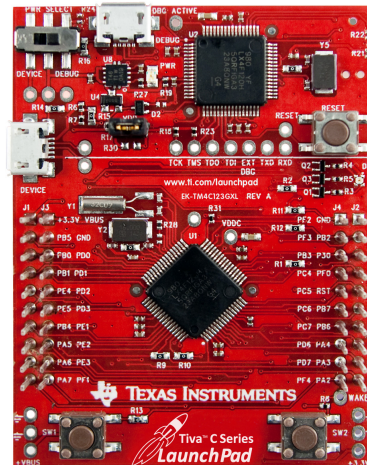


Figura 9 – Microcontrolador T4MC123G *Texas Instruments*.

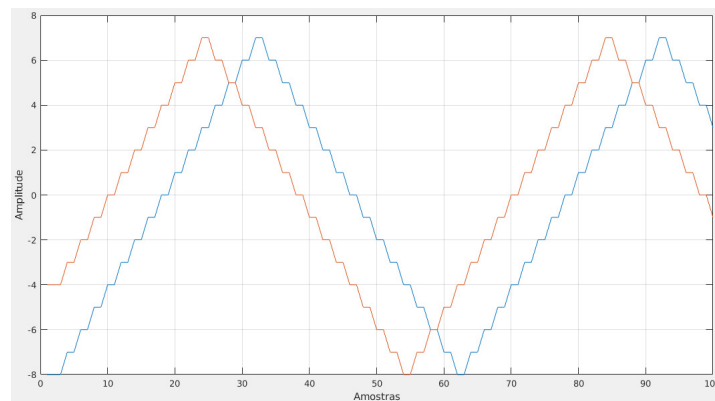


Figura 10 – Sinais enviados através de um microcontrolador em 4 *bits* com um *bit* sinal.

3.4 Receptor multipercurso

Para receber o sinal que sofreu com efeito multipercurso, foi desenvolvido um *software* para o microcontrolador ESP32, na Fig. 5, que recebe dois sinais de 4 *bits*, utiliza uma função de correlação e retorna o vetor defasado rotacionado de maneira a adequar os valores recebidos defasados.

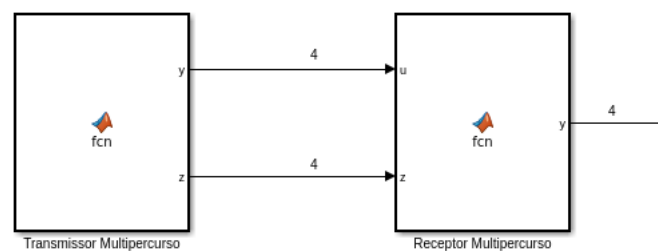


Figura 11 – Diagrama do protótipo do receptor.

A função que calcula a correlação cruzada entre dois sinais foi desenvolvida a partir

do *software* Matlab, onde foi descrito uma função que encontra o valor de pico da correlação cruzada e o índice de rotação e posteriormente rotaciona o vetor recebido, gerando um vetor que esteja em fase com o vetor referencial. A partir deste código é possível através da ferramenta *codegen* existente no Matlab transformar a linguagem de programação de ".m" (específica para o *software* Matlab) para a linguagem C de programação em microcontroladores, tendo a possibilidade de especificar as características do microcontrolador a ser utilizado.

4 Testes do Sistema

4.1 Metodologia

Inicialmente foram realizadas simulações que comprovassem o funcionamento do projeto utilizando os valores a serem testados em protótipos:

- Frequência do sinal em 1 MHz;
- Frequência de amostragem em 100 MHz¹;
- Modelagem do canal de transmissão conforme as equações apresentadas em 3.1;
- Transmissão apenas da portadora.

Estas simulações foram realizadas no *software* simulink, que permite a análise e observação dos sinais em tempo contínuo.

Após a conclusão das simulações via *software*, foi realizado a montagem de um protótipo que pudesse simular a transmissão e recepção de um sinal através de um canal multipercurso. Devido a atrasos na entrega dos componentes necessários para a confecção completa do protótipo, não foi possível realizar todos os testes.

4.1.1 Protótipo do receptor

No receptor, a sincronização da leitura dos sinais digitais é feita através da utilização de um *timer* interno do microcontrolador, uma vez que a função de leitura é assíncrona. Como existe a necessidade da utilização de um *buffer* para cada sinal de entrada, o código principal do receptor foi dividido em dois, um para que os *buffers* pudessem ser preenchidos por completo e assim, a função de correlação² pudesse ser chamada. Na segunda parte do código, os *buffers* que são correlacionados funcionam como uma espécie de fila onde o primeiro valor que entra é o primeiro a ser descartado, e cada vez que ocorre a troca de valores nos *buffers*, a correlação é calculada novamente.

4.2 Simulação

A simulação do receptor foi feita seguindo os cálculos apresentados pelas equações 3.1, o banco de correladores apresentado na figura 8 e por fim, a apresentação do resultado pode ser feita pela ferramenta *scope* presente no simulink conforme a Fig. 12:

¹ Valor escolhido para a visualização da forma de onda no *software* Matlab

² Esta função necessita que o *buffer* de entrada esteja completo.

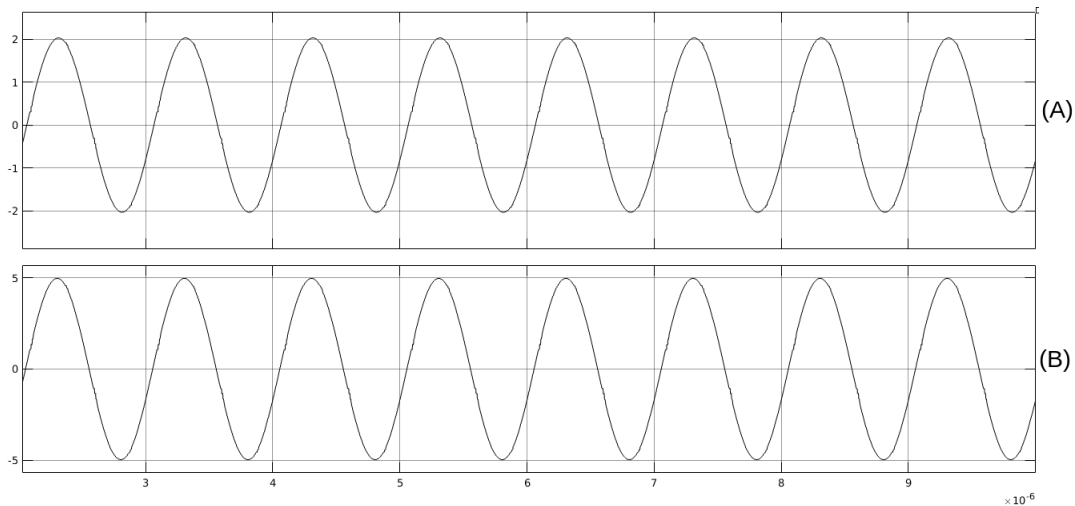


Figura 12 – Somatória dos sinais com e sem o tratamento com correlatores.

Na Fig. 12 (A) observa-se a somatória dos sinais que sofreram com o efeito multi-percurso e depois em (B) a somatória dos sinais após o tratamento realizado pelo receptor. A diferença nas amplitudes dos sinais mostra o funcionamento do receptor EGC, onde as fases dos diferentes sinais é removida, e posteriormente na soma, a potência do sinal é ampliada.

Foi realizada também uma simulação com um sistema de duas entradas para a validação do projeto em caso de um sistema dinâmico. Em uma das entradas deste sistema foi colocado uma senoide frequência de fixa igual a 5Hz enquanto na segunda entrada foi colocado um sistema de fase variável com um VCO (oscilador controlado por tensão).

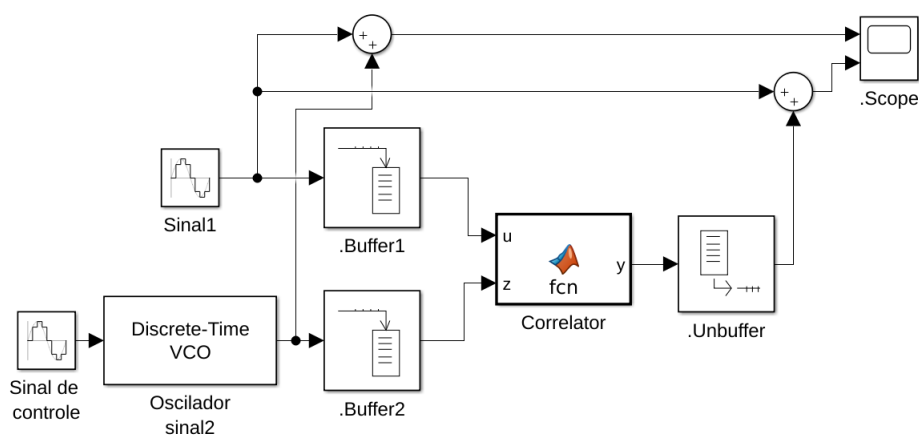


Figura 13 – Sistema dinâmico de análise de um correlator.

Na Fig. 13, o VCO recebe um sinal de controle que varia a tensão na entrada do oscilador que por sua vez gera um sinal senoidal de frequência fixa igual a 5 Hz porém com a fase variando aproximadamente de $-\pi$ até π dinamicamente já que o sinal de entrada é uma senoide de baixa frequência para facilitar a observação do sistema em funcionamento.

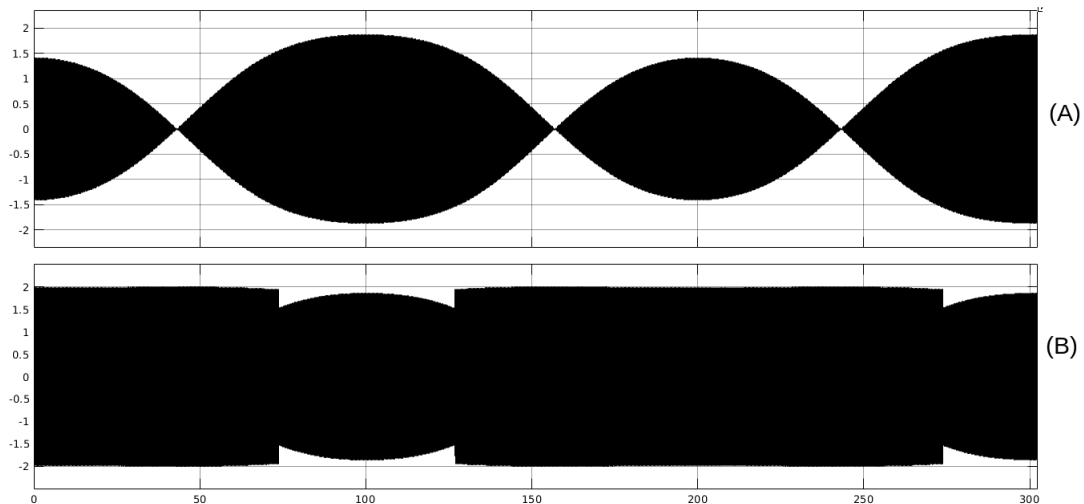


Figura 14 – Sinais somados de um sistema dinâmico com e sem tratamento por correlação.

Na Fig. 14 o sinal observado em (A) é a somatória dos sinais fixo e dinâmico gerados na Fig. 13. Quando a fase do sinal dinâmico é igual a π em relação ao sinal fixo, a somatória torna-se zero, pois os sinais gerados possuem mesma amplitude e frequência. Já em (B), que passou pelo tratamento de correlação, a somatória dos sinais permanece quase sempre constante e em valor de pico maior do que o observado no quadro superior.

No intervalo entre 75 e 125 segundos na Fig. 14 o resultado da somatória dos sinais com e sem tratamento por correlação são praticamente idênticos devido ao fato de que o cálculo realizado para a detecção da diferença de fase entre os sinais de entrada gera um valor para a rotação quase nulo pois a correlação, neste intervalo, não possui a precisão necessária para realizar o cálculo que encontra a defasagens dos sinais.

Este sistema faz referência ao movimento que um receptor pode sofrer ao ser deslocado em um aparelho celular ou num automóvel. Assim observa-se a eficácia da correção de fase utilizando a ferramenta de correlação tanto em sistemas fixos quanto em sistemas móveis evitando a complexidade por não fazer uso de realimentação em sua construção.

4.3 Teste do protótipo

Para testar o sistema proposto, foi confeccionado inicialmente uma função em linguagem C que calculasse a correlação entre dois sinais e depois realizasse a rotação de um destes para que entrasse em fase com o sinal referencial escolhido. Os sinais transmitidos foram arbitrariamente defasados conforme a Fig. 10 para possibilitar a observação da função de correlação e rotação em funcionamento.

Na Fig. 15 foi montado o protótipo físico com microcontroladores responsáveis por testar o envio e a recepção de sinais defasados em amostras. As conexões foram feitas atra-

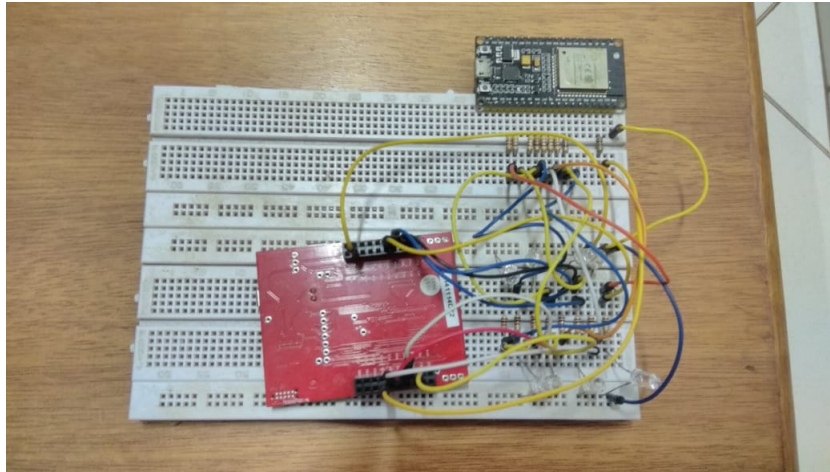


Figura 15 – Protótipo de transmissor e receptor para análise do código de correlação.

vés de fios e, devido a compatibilidade entre as tensões de entrada dos microcontroladores não foi necessário a realização de ajuste.

Depois foi elaborado um código também em linguagem C que empregou a função de correlação e rotação juntamente com os *buffers* de entrada.

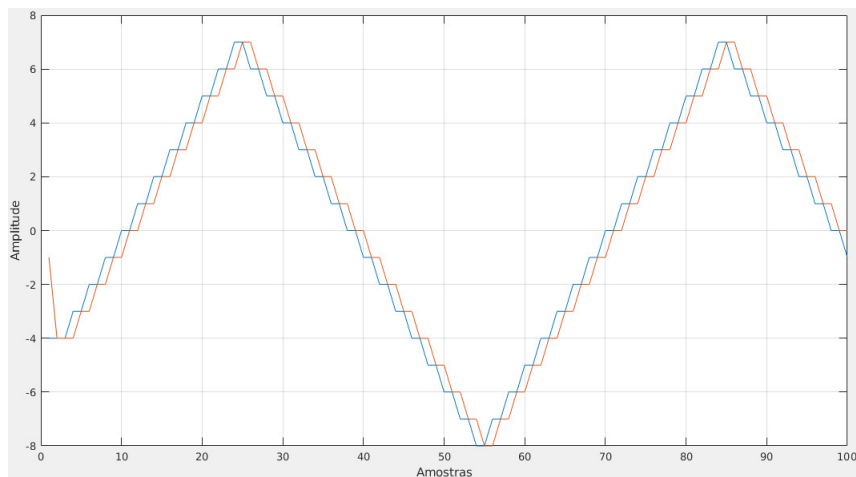


Figura 16 – Sinal referência e sinal tratado pelo correlator em microcontrolador.

Na Fig. 16 percebe-se que o sinal rotacionado se aproximou bastante do sinal de referência. A diferença de fase entre os dois sinais de entrada antes era de 8 amostras e após o tratamento com a função de correlação caiu para uma amostra de defasagem.

5 Conclusão

O objetivo deste trabalho se concentrou no desenvolvimento de uma maneira de amenizar os efeitos causados por um canal multipercurso onde um sinal observado em um aparelho receptor sofre diferentes problemas como perda de potência e alteração de fase empregando a ideia de um receptor com múltiplas antenas e um banco de correlatores.

A abordagem utilizada mostrou-se positiva nas simulações realizadas ao longo do trabalho e também com o protótipo confeccionado apresentando resultados satisfatórios quanto a detecção e remoção da diferença de fase entre os sinais recebidos.

Uma das principais limitações de um receptor construído utilizando um microcontrolador como base é a quantidade de antenas empregadas no receptor uma vez que o código descrito é sequencial (executado comando após comando). Com um número maior de antenas, o receptor acabaria perdendo amostras do sinal prejudicando o projeto como um todo.

A qualidade do receptor varia de acordo com os componentes empregados na elaboração do projeto, ou seja, para aumentar a faixa de frequência é necessário que a taxa de amostragem dos sinais aumente proporcionalmente, trazendo a necessidade de componentes melhores e elevando os custos do projeto.

Apesar das limitações encontradas, esta tecnologia possui ampla utilização em diversas áreas da telecomunicação, e ainda há muito espaço para melhorias no sistema atual.

5.1 Trabalhos futuros

O projeto possui várias formas de melhoras como a precisão da correlação ou a velocidade para o tratamento dos sinais recebidos. Cada uma dessas formas possui diferentes abordagens para serem solucionadas.

Num primeiro momento, a escolha da melhor antena como referência para as outras pode ser feito escolhendo a que o sinal recebido com maior potência média e não uma escolha arbitrária. Também pode ser verificado o desempenho do receptor para diferentes níveis de ruído para aprimoramento dos resultados.

No caso da precisão de um correlator, a quantidade de *bits* influencia diretamente o resultado, ou seja, quanto mais *bits* utilizados na digitalização do sinal recebido, melhor a precisão dos resultados reduzindo assim, o erro de cálculo da operação de correlação entre os sinais.

Uma forma de acelerar os cálculos de correlação entre dois sinais é a utilização de operações capazes de transformar um cálculo complexo em algo mais simples. A transformada rápida de *Fourier* torna esses cálculos mais rápidos em termos computacionais, acelerando a operação de correlação.

Por fim, com o intuito de acelerar ainda mais os processos de recepção e tratamento dos sinais, a paralelização pode ser uma saída simples e eficiente. O emprego de uma FPGA como plataforma neste projeto possibilitaria o uso de diferentes processos funcionando paralelamente para realizar os cálculos e rotações dos sinais recebidos, tornando o processamento desses mais rápido já que todos os sinais seriam tratados ao mesmo tempo.

Referências

- BARROS, F. J. B. Medidas e Análise da Dispersão Temporal do Canal de Propagação UWB *Indoor* em Vários Tipos de Ambientes. Rio de Janeiro, Brasil, 2005. Citado na página 23.
- BOTTOMLEY, G. E.; OTTOSSON, T.; WANG, Y. E. A Generalized RAKE Receiver for Interference Supression. p. 10, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 19, 26 e 28.
- BRANQUINHO, O. A. Simulador de Efeito de Multipercurso em Canal de Rádio Móvel. Campinas, SP, p. 105, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 19, 24 e 25.
- CARVALHO, A. D. Caracterização Experimental da Rádio-Propagação no Interior de Edifícios. São Paulo, Brasil, p. 188, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 26.
- ESPRESSIF. *ESP32 Technical Manual Reference*. Shanghai, China, 2018. 669 p. Citado na página 31.
- HARRIS, A. I.; ZMUIDZINAS, J. A wideband lag correlator for heterodyne spectroscopy of broad astronomical and atmospheric spectral lines. *Review of Scientific Instruments*, v. 72, n. 2, p. 1531–1538, 2001. Citado na página 28.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. Introdução aos Sistemas de Comunicação. p. 512, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30 e 36.
- JUNIOR, H. D. M. et al. Caracterização de Canais Rádio-Móvel em Ambientes Exteriores: Uma Abordagem utilizando Filtros Digitais. Pará, Brasil, p. 8, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 25.
- KHALAJ, B. H.; PAULRAJ, A.; KAILATH, T. 2D RAKE Receivers for CDMA Cellular Systems. p. 5, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- MARTOYO, I. et al. Low Complexity CDMA Downlink Receiver Based on Frequency Domain Equalization. p. 5, 2003. Nenhuma citação no texto.
- MOORE, H. *MATLAB for Engineers (3rd Edition)*. 3rd. ed. [S.l.]: Pearson, 2017. ISBN 0134589645, 9780134589640. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- PARSONS, J. D.; GARDINER, J. G. *Mobile Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 1989. 28 p. Citado 3 vezes nas páginas 15, 24 e 27.
- SALEH, A. A. M.; VALENZUELA, R. A. Statistical Model fo Indoor Multipath Propagation. p. 128, 1991. Citado na página 26.
- SASS, R.; SCHMIDT, A. G. Embedded Systems Design with Platform FPGAs. Massachusetts, USA, p. 409, 2010. Citado na página 20.
- SHUKLA, D. Rake Receiver. 2016. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/DivyaShukla25/rake-reciever-ppt/5>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 26.
- TOCCI, R. J.; AMBROSIO, F. J.; LASKOWSKI, L. P. Microprocessors and Microcomputers. p. 573, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 30.

Tsalapatas, H. A.; Moraitis, C. S. A real time microcontroller-based clipped auto- and cross-correlator with applications in ltv. In: *International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilitie*. [S.l.: s.n.], 1989. Citado na página 30.

YANGH, G. N.; PAHLAVAN, K. Sector Antenna and DFE Modens for High Speed Indoor Radio Communications. p. 925, 1994. Citado na página 26.

Apêndices

APÊNDICE A – Implementação do código de correlação em C

Abaixo encontra-se o código que calcula a correlação e rotaciona um sinal de acordo com a diferença de fase encontrada:

```
#include <string.h>
#include "cross_correlation.h"

void cross_correlation(const signed char s1[100],
    const signed char s2[100],
    signed char y[100])
{
    signed char c1[199];
    int k;
    signed char s;
    int i0;
    int i;
    int ns;
    static const unsigned char uv0[101] = {
        98U, 99U, 100U, 101U, 102U, 103U, 104U, 105U,
        106U, 107U, 108U, 109U, 110U, 111U, 112U, 113U,
        114U, 115U, 116U, 117U, 118U, 119U, 120U, 121U,
        122U, 123U, 124U, 125U, 126U, 127U, 128U, 129U,
        130U, 131U, 132U, 133U, 134U, 135U, 136U, 137U,
        138U, 139U, 140U, 141U, 142U, 143U, 144U, 145U,
        146U, 147U, 148U, 149U, 150U, 151U, 152U, 153U,
        154U, 155U, 156U, 157U, 158U, 159U, 160U, 161U,
        162U, 163U, 164U, 165U, 166U, 167U, 168U, 169U,
        170U, 171U, 172U, 173U, 174U, 175U, 176U, 177U,
        178U, 179U, 180U, 181U, 182U, 183U, 184U, 185U,
        186U, 187U, 188U, 189U, 190U, 191U, 192U, 193U,
        194U, 195U, 196U, 197U, 198U };

    bool shiftright;
    signed char unusedU0[50];
    memset(&c1[0], 0, 199U * sizeof(signed char));
```

```
for (k = 0; k < 100; k++) {
    s = 0;
    i0 = 99 - k;
    for (i = 0; i <= i0; i++) {
        ns = s2[i] * s1[k + i];
        if (ns > 127) {
            ns = 127;
        } else {
            if (ns < -128) {
                ns = -128;
            }
        }
    }

    ns += s;
    if (ns > 127) {
        ns = 127;
    } else {
        if (ns < -128) {
            ns = -128;
        }
    }

    s = (signed char)ns;
}

c1[k + 99] = s;
}

for (k = 0; k < 99; k++) {
    s = 0;
    i0 = 98 - k;
    for (i = 0; i <= i0; i++) {
        ns = s2[(k + i) + 1] * s1[i];
        if (ns > 127) {
            ns = 127;
        } else {
            if (ns < -128) {
                ns = -128;
            }
        }
    }
}
```

```
    }

    ns += s;
    if (ns > 127) {
        ns = 127;
    } else {
        if (ns < -128) {
            ns = -128;
        }
    }

    s = (signed char)ns;
}

c1[98 - k] = s;
}

i = -1;
s = c1[98];
for (k = 0; k < 100; k++) {
    if (s < c1[uv0[k + 1]]) {
        s = c1[k + 99];
        i = k;
    }

    y[k] = s2[k];
}

ns = i + 2;
shiftright = true;
if (i + 2 > 100) {
    ns = 1;
}

if (ns > 50) {
    ns = 100 - ns;
    shiftright = false;
}
```

```
for (i0 = 0; i0 < 50; i0++) {
    unusedU0[i0] = 0;
}

if (ns > 0) {
    if (shiftright) {
        for (k = 0; k < ns; k++) {
            unusedU0[k] = s2[(k - ns) + 100];
        }

        i0 = ns + 1;
        for (k = 100; k >= i0; k--) {
            y[k - 1] = y[(k - ns) - 1];
        }

        memcpy(&y[0], &unusedU0[0],
            (unsigned int)(ns * (int)sizeof(signed char)));
    } else {
        memcpy(&unusedU0[0], &s2[0],
            (unsigned int)(ns * (int)sizeof(signed char)));
        i0 = 99 - ns;
        for (k = 0; k <= i0; k++) {
            y[k] = y[k + ns];
        }

        for (k = 0; k < ns; k++) {
            y[(k - ns) + 100] = unusedU0[k];
        }
    }
}
}
```

APÊNDICE B – Implementação do código do protótipo em C

```

#include <Arduino.h>
#include "cross_correlation.c"

#define NUM_BITS 100
#define QTD_IN 4
#define BOTAO 22
#define LED_TESTE 23

volatile boolean inicio = false;
const int ent[QTD_IN] = {19, 18, 5, 17};
const int ent2[QTD_IN] = {16, 4, 2, 15};
char sinal1[NUM_BITS][QTD_IN];
char sinal2[NUM_BITS][QTD_IN];
char s1[NUM_BITS][QTD_IN+1];
char s2[NUM_BITS][QTD_IN+1];
int bufCont;
signed char cor1[NUM_BITS];
signed char cor2[NUM_BITS];
signed char y[NUM_BITS];

void inter(){
    static unsigned long last_interrupt_time = 0;
    unsigned long interrupt_time = millis();

    if (interrupt_time - last_interrupt_time > 200)
    {
        if(inicio){
            inicio = false;
            digitalWrite(LED_TESTE, LOW);
        }else{
            inicio = true;
            digitalWrite(LED_TESTE, HIGH);
        }
    }
}

```

```
    }
    last_interrupt_time = interrupt_time;
}

int convStoF(int n){

    int num = n;
    double dec_value = 0;

    int base = 1;

    int temp = num;
    while (temp) {
        int last_digit = temp % 10;
        temp = temp / 10;

        dec_value += last_digit * base;

        base = base * 2;
    }

    return dec_value;
}

void setup() {

    Serial.begin(500000);

    for(int i=0;i<QTD_IN;i++){
        pinMode(ent[i], INPUT_PULLDOWN);
        pinMode(ent2[i], INPUT_PULLDOWN);
    }

    pinMode(BOTAO, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(BOTAO, inter, RISING);

    for(int i=0;i<NUM_BITS;i++){
        for(int j=0;j<QTD_IN;j++){
            sinal1[i][j] = '0';
        }
    }
}
```

```

        sinal2[i][j] = '0';
    }
    cor1[i] = 0;
    cor2[i] = 0;
    y[i] = 0;
}

bufCont = 0;

pinMode(LED_TESTE, OUTPUT);
digitalWrite(LED_TESTE, LOW);

}

void loop() {
    if(inicio){
        if(bufCont<NUM_BITS){
            for(int j=0;j<NUM_BITS;j++){ //Leitura da primeira entrada digital
                for(int i=0;i<QTD_IN;i++){
                    sinal1[j][i] = digitalRead(ent[i]) + '0';
                    sinal2[j][i] = digitalRead(ent2[i]) + '0';

                    s1[j][i] = sinal1[j][i];
                    s2[j][i] = sinal2[j][i];

                    if (i==QTD_IN-1)
                    {
                        s1[j][i+1] = '\\0';
                        s2[j][i+1] = '\\0';
                    }

                    if(!inicio)
                        break;
                }

                cor1[j] = (convStoF(atoi(s1[j]))) + '0';
                cor2[j] = (convStoF(atoi(s2[j]))) + '0';

                delay(50);

```

```
        if(!inicio)
            break;

        bufCont++;
    }
}
else{

    cross_correlation(cor1, cor2, y);

    for (int i = 0; i < NUM_BITS; i++)
    {
        Serial.print( (int8_t) y[i]);
        Serial.print(" ");
    }

    Serial.print("\n\n\n");

    for (int i = 0; i < NUM_BITS; i++)
    {
        Serial.print( (int8_t) cor1[i]);
        Serial.print(" ");
    }

    Serial.print("\n\n\n");

    for (int i = 0; i < NUM_BITS; i++)
    {
        Serial.print( (int8_t) cor2[i]);
        Serial.print(" ");
    }

    Serial.print("\n\n\n");

    for(int i=0;i<QTD_IN;i++){
        sinal1[0][i] = digitalRead(ent[i]) + '0';
        sinal2[0][i] = digitalRead(ent2[i]) + '0';

        s1[0][i] = sinal1[0][i];
```

```
s2[0][i] = sinal2[0][i];

if (i==QTD_IN-1)
{
    s1[0][i+1] = '\0';
    s2[0][i+1] = '\0';
}

if(!inicio)
    break;
}

for(int i = NUM_BITS-1;i>0;i--)
{
    cor1[i] = cor1[i-1];
    cor2[i] = cor2[i-1];
}

cor1[0] = (convStoF(atoi(s1[0])) + '0');
cor2[0] = (convStoF(atoi(s2[0])) + '0');

delay(50);
}
}
```