

Universidade de Brasília – UnB
Campus Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

**SIMULAÇÃO DO PROTOCOLO MAC
ALOHA NOMA APLICADO A REDE DE SENSORES
IoT COM TECNOLOGIA SWIPT INTEGRADA
MARIANA BORGES SAMPAIO AMARO DE BRITO**

Orientador: PROF. DR. DANIEL MAURICIO MUÑOZ ARBOLEDA



UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FGA – FACULDADE GAMA

ENGENHARIA ELETRÔNICA

SIMULAÇÃO DO PROTOCOLO MAC ALOHA NOMA APLICADO A
REDE DE SENSORES IOT COM TECNOLOGIA SWIPT INTEGRADA

MARIANA BORGES SAMPAIO AMARO DE BRITO

ORIENTADOR: PROF. DR. DANIEL MAURICIO MUÑOZ ARBOLEDA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA ELETRÔNICA

BRASÍLIA/DF, FEVEREIRO DE 2023

UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA – FACULDADE GAMA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

SIMULAÇÃO DO PROTOCOLO MAC ALOHA NOMA APLICADO A
REDE DE SENSORES IOT COM TECNOLOGIA SWIPT INTEGRADA

MARIANA BORGES SAMPAIO AMARO DE BRITO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À FACULDADE UNB GAMA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

APROVADA POR:

Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda
(Orientador)

Prof. Dr. Daniel Costa Araújo
(Examinador)

Prof. Dr. Gilmar Silva Beserra
(Examinador)

FICHA CATALOGRÁFICA

BRITO, MARIANA B. S. A. DE

Simulação do Protocolo MAC ALOHA NOMA

Aplicado a Rede de Sensores IoT com Tecnologia SWIPT Integrada, [Distrito Federal], 2023.

70p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, 2023).

Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade UnB Gama, Engenharia Eletrônica

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. Aloha-NOMA | 2. SWIPT |
| 3. IoT | 4. Acesso Aleatório |
| I. FGA UnB/UnB. | |

REFERÊNCIA

BRITO, MARIANA B. S. A. DE (2023). Simulação do Protocolo MAC ALOHA NOMA Aplicado a Rede de Sensores IoT com Tecnologia SWIPT Integrada. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Eletrônica, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

SESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Mariana Borges Sampaio Amaro de Brito

TÍTULO: Simulação do Protocolo MAC ALOHA NOMA Aplicado a Rede de Sensores IoT com Tecnologia SWIPT Integrada

GRAU: Bacharel em Engenharia Eletrônica

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

marianabsamaro@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

“ ‘Trabalho’ intelectual é uma expressão errada. Não é trabalho, é prazer, dissipação. É,
em si, a maior recompensa. ”

Mark Twain

Dedico este trabalho à minha família e, principalmente, ao meu amado avô materno, que, apesar de não estar mais entre nós, sempre foi meu fã número um.

AGRADECIMENTOS

A caminhada até aqui, mais de uma vez, não foi a mais prazerosa de todas. Se estou onde cheguei, foi graças ao incontável número de pessoas maravilhosas que me carregaram nos ombros quando estive cansada, que enxugaram minhas lágrimas em momentos de frustração e que estenderam suas mãos sempre que precisei de ajuda.

Aos meus pais e avós, que também tiveram suas próprias caminhadas. Se fui mais longe, foi pelo esforço deles, que vieram antes de mim e me garantiram um melhor ponto de partida.

A todos os excelentes professores e educadores que fizeram parte da minha vida acadêmica, em particular meu orientador, professor Daniel Muñoz, pelo acompanhamento e compreensão durante a elaboração deste trabalho.

Ao querido amigo, companheiro de projeto e também orientador honorário, Elpídio Araújo, pelas incontáveis revisões deste documento e pelas conversas bem-humoradas, principalmente nos momentos de cansaço. Você tornou este processo todo muito mais leve.

Ao meu namorado, Tiago, por sempre ser o companheiro mais fiel, por nunca medir esforços para me apoiar no que eu preciso, por proteger minha sanidade nos momentos de agitação, pelas comidas deliciosas e por acreditar em mim. E também por ter revisado este texto quase tantas vezes quanto eu.

Obrigada.

RESUMO

A Internet das Coisas possui vastas possibilidades de aplicações no cotidiano, de telecomunicações a cidades inteligentes, agricultura, automação industrial, dentre outros. Com a ascensão do 5G, a sua popularidade explodiu ainda mais e espera-se que estes dispositivos alcancem a marca de 29,3 bilhões, em 2023. Além da aceitação popular à tecnologia, este aumento quantitativo ocorre também pelo número, crescente, de dispositivos individuais integrados a uma única solução.

O abastecimento energético de dispositivos IoT, devido a este aumento, torna-se um desafio, pois são usualmente equipamentos sem fio alimentados por bateria. Gerenciar a manutenção e troca dessas baterias, para redes cada vez maiores, é uma tarefa complexa. Além disso, um volume tão grande de aparelhos compartilhando um espectro escasso pede por novas abordagens a nível de protocolo de comunicação e alocação de recursos de canal, de forma que consigam atender a todos satisfatoriamente. Uma solução para aumentar a vida útil das baterias é a integração de técnicas de SWIPT aos equipamentos. Esta integração também traz consigo exigências em relação aos protocolos de comunicação empregados, que precisam ser energeticamente eficientes.

A alternativa proposta para sanar as questões explicitadas referentes à comunicação é a utilização do protocolo híbrido de controle de acesso ao meio ALOHA NOMA, o qual foi simulado no presente trabalho. Esta técnica reúne a simplicidade do protocolo ALOHA e utiliza o protocolo NOMA em conjunto, de forma a diminuir o número de colisões de pacotes de dados. O documento conta com uma breve explicação a respeito dos conceitos necessários para o desenvolvimento do protocolo, bem como simulações da modulação dos sinais ao início do processo de transmissão, simulações do protocolo ALOHA em seus três cenários passíveis de ocorrer e um sistema de cancelamento sucessivo de interferências (SIC), necessário para a resolução das colisões de pacotes.

A modulação proposta foi a ASK, utilizando onda quadrada como entrada de dado. Foi possível realizar, para a porção ALOHA, a simulação dos três cenários passíveis de ocorrer. São eles o caso de o pacote ser decodificado na primeira tentativa, o de o pacote não ser decodificado na primeira tentativa e a eventualidade de o pacote não ser decodificado. O SIC obtido é capaz de decodificar até três sinais que possuam níveis de potência distintos e apresenta imperfeições em seu cancelamento originárias da banda de transição selecionada para os filtros inseridos no processo, que não pôde ser aperfeiçoada em virtude de limitações computacionais.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) has vast possibilities for applications in the everyday life, from telecommunication to smart cities, agriculture, industrial automation, among others. With the rise of 5G, its popularity has exploded even further and these devices are expected to reach the 29.3 billion mark by 2023. In addition to the popular acceptance of the technology, this quantitative increase is also due to the growing number of devices integrated into a single solution.

The power supply of IoT devices, due to this increase, becomes a challenge, as they are usually wireless devices powered by batteries. Managing the maintenance and replacement of these batteries, for increasingly larger networks, is a complex task. In addition, such a large volume of devices sharing a scarce spectrum calls for new approaches in terms of communication protocols and channel resource allocation, so that the system is able to function satisfactorily. One solution to increase battery life is the integration of SWIPT techniques into the equipment. This integration also has requirements regarding the communication protocols used, which need to be energetically efficient.

The alternative proposed to solve the raised communication issues is the application of the medium access control (MAC) hybrid protocol ALOHA NOMA, which was simulated in this work. This technique brings together the simplicity of the ALOHA protocol and uses the NOMA protocol together with it in order to reduce the number of data packet collisions. This document contains a brief explanation of the concepts necessary for the development of the protocol, as well as simulations of signal modulation at the beginning of the transmission process, simulations of the ALOHA protocol in its three possible scenarios and a successive interference cancellation system (SIC), necessary for the resolution of packet collisions.

The proposed modulation was ASK, with a square wave as data input. It was possible to carry out, for the ALOHA portion, the simulation of the three scenarios likely to occur. They are the event of the packet being decoded on the first attempt, the event of the packet not being decoded on the first attempt, and the event of the packet not being decoded at all. The SIC obtained is capable of decoding up to three signals that have different power levels and presents imperfections in its cancellation originated from the transition bandwidth selected for the filters inserted in the process, which could not be improved due to computational limitations.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Proposta de Pesquisa	3
1.2	Objetivo Geral	3
1.2.1	Objetivos Específicos	4
1.3	Organização do Trabalho	4
2	Fundamentação teórica e Estado da Arte	5
2.1	Energy Harvesting (EH)	5
2.1.1	Separação Temporal	7
2.1.2	Divisão de Potência	8
2.1.3	Alternância de Antenas	8
2.1.4	Separação Espacial	8
2.2	Protocolos MAC para IoT	8
2.2.1	Acesso Aleatório	9
2.2.1.1	Detecção de Portadora	9
2.2.1.2	Blind Access	10
2.2.2	Acesso Programado	10
2.2.2.1	Alocação Fixa (Canalização)	10
2.2.2.2	Alocação Dinâmica	11

2.2.3	Acesso Híbrido	11
2.2.3.1	<i>Duty-Cycled</i>	11
2.2.3.2	Programado + Aleatório	12
2.3	O Protocolo ALOHA	12
2.3.1	ALOHA Puro	12
2.3.2	<i>Slotted</i> ALOHA	15
2.4	O Protocolo NOMA	17
2.4.1	SIC	20
2.4.2	Capacidade do Canal	21
2.5	O Protocolo ALOHA NOMA	22
2.5.1	Teste de Hipóteses	24
2.6	Tecnologias de Comunicação Utilizadas em IoT	25
3	Materiais e Métodos	27
3.1	Fluxograma de Metodologia	27
3.2	Ferramentas Computacionais	28
3.3	Parâmetros de Projeto	28
3.4	Modulação	31
3.5	Sinal de Aviso e Subfase de Estimativa ALOHA Puro	34
3.6	Segunda Subfase de Estimativa: SIC	37
3.6.1	SIC	37
3.7	Empacotamento de IDs e Retransmissão	43
4	Resultados e Discussões	45
4.1	Modulação	45

4.2	Sinal de Aviso e Subfase ALOHA Puro	48
4.2.1	Transmissão Bem-sucedida na Primeira Tentativa	48
4.2.2	Transmissão Bem-sucedida, mas não na Primeira Tentativa	49
4.2.3	Transmissão não Realizada	49
4.3	Subfase de Estimativa: SIC	50
4.3.1	SIC	50
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	59
5.1	Trabalhos Futuros	60
A	ALOHA Puro	69

LISTA DE TABELAS

2.1	Características de fontes de EH. Adaptado de [1].	6
2.2	Resumo comparativo entre ALOHA puro e <i>slotted</i> ALOHA	17
2.3	Resumo de algumas das principais características para tecnologias de curtas distâncias. [2]	25
2.4	Tecnologias sem fio para comunicação a longas distâncias.[2]	26
2.5	Tecnologias sem fio para comunicação que necessite de baixa latência e alta taxa de transferência de dados.[2]	26
3.1	Os principais parâmetros do projeto para <i>Uplink</i> e <i>Downlink</i> . <i>Downlink</i> é a transmissão de dados e energia da microbase ao sensor e <i>uplink</i> é, portanto, a transmissão de dados dos sensores à microbase.	31
3.2	Valores dos parâmetros do bloco de portadora	33
3.3	Valores de parâmetros do sinal a ser modulado	33
3.4	Valores de parâmetros do bloco Frequency Xlating FIR Filter	34
3.5	Valores de parâmetros do filtro passa-baixas	34
4.1	Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão bem-sucedida na primeira tentativa	48
4.2	Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão de pacotes de dados sem <i>payload</i> . O pacote transmitido foi de 00111110	49
4.3	Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão de pacotes de dados sem <i>payload</i> . O pacote não transmitido foi de 10010101	50

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama esquemático de um nó IoT adaptado para EH. O foco deste trabalho será na unidade de comunicação, camada MAC. Adaptado de [1].	5
2.2	Quatro formas de se desenvolver um dispositivo SWIPT. Conceito das imagens retiradas de [3].	7
2.3	Classificação dos protocolos MAC de acordo com a forma como acessam o meio. As abordagens de interesse para a compreensão do protocolo ALOHA NOMA encontram-se destacadas, assim como o caminho direto até ele, segundo a classificação proposta. Adaptado de [1].	9
2.4	Usuários transmitindo seus dados a um <i>gateway</i> comum. <i>Frames</i> que sofrem colisões, em vermelho, não são decodificados. Para o protocolo ALOHA Puro, o tempo de colisão entre <i>frames</i> não é constante. Imagem criada com base em [4, 5].	13
2.5	No início, K recebe o valor de zero. Após o envio do pacote, o nó aguarda $2 \times T_p$ antes de retransmitir ou preparar um novo. Caso receba um sinal ACK, o nó prepara outro pacote para transmissão. Caso não o receba, K é incrementado e, se não o valor não for superior ao máximo, aguardará por uma quantidade de tempo aleatória e retransmitirá seu pacote.[5] . . .	14
2.6	Em ALOHA puro, dois <i>frames</i> só são capazes de colidir um com o outro dentro de um intervalo equivalente a duas vezes o seu período de duração.	15
2.7	As transmissões podem ocorrer apenas ao início de uma nova janela temporal e caso os nós possuam pacotes a enviar. Nesta configuração, quando há colisões, as mesmas serão completas.	16
2.8	Como os pacotes só podem ser transmitidos ao início de cada janela temporal, o período de vulnerabilidade cai pela metade em relação ao apresentado na seção 2.3.1. Isso ocorre porque não há mais colisões parciais.	16

2.9	Representação gráfica de como é feita uma alocação em tempo e em frequência nas abordagens OMA. Adaptado de [6].	18
2.10	Esquema de transmissão <i>downlink</i> , no qual uma base transmissora, ou gateway, envia mensagem contendo informações destinadas a ambos os nós.	18
2.11	O nível de potência atribuído à porção de informação de cada destinatário é distinta. A mensagem destinada ao nó mais próximo do gateway será enviada a um nível de potência mais baixo e a mensagem destinada ao nó mais afastado será enviada a um nível de potência maior, comparativamente. Adaptado de [6].	19
2.12	O nó mais afastado decodifica o sinal sobreposto e assume que o resultado contém os seus dados. O nó mais próximo decodifica o sinal NOMA para extrair os dados do nó mais afastado, reconstrói ambos os sinais e subtrai um do outro. A decodificação do resultado da subtração será o sinal de interesse.	19
2.13	À transmissão de sinais do gateway aos nós se dá o nome de <i>downlink</i> , enquanto a comunicação dos nós transmitindo para o gateway é denominada <i>uplink</i>	20
2.14	Modelo de apresentação das cinco etapas características do protocolo híbrido ALOHA NOMA.	23
3.1	27
3.2	ADALM-PLUTO AD9363. Rádio definido por software voltado para o aprendizado de fundamentos de SDR [7].	28
3.3	Esquemático do sistema final que serviu de estudo de caso para o presente documento. Ele apresenta um conjunto de microbases que servem de <i>gateway</i> e fonte de energia aos sensores. Essas microbases, após receberem os dados transmitidos pelos sensores, os encaminharão a uma base central.	29
3.4	Subsistemas presentes nas microbases e nos módulos receptores, com sensores integrados. O fluxo de dados ocorrerá em ambas as direções, dos módulos receptores à microbase e da microbase aos módulos receptores. A transmissão de energia ocorrerá em apenas uma das direções (<i>downlink</i>).	30
3.5	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para uma modulação BASK/OOK	32

3.6	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para uma demodulação BASK/OOK. A demodulação de um único sinal é feita dessa forma. . . .	32
3.7	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a transmissão de dois sinais simultâneos que serão entregues ao SIC para demodulação. . .	38
3.8	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de dois sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste primeiro estágio, o sinal de maior potência é demodulado.	39
3.9	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de dois sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste segundo estágio, o sinal de menor potência é demodulado.	39
3.10	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a modulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC para demodulação.	40
3.11	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, demodula-se o sinal sobreposto e considera-se que o resultado seja também a demodulação do sinal de maior potência.	41
3.12	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, o sinal demodulado ainda é um sinal sobreposto, sendo a soma de dois outros sinais. Considera-se que o resultado seja também a demodulação do sinal de segunda maior potência.	41
3.13	Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, o último sinal, de menor potência, é demodulado.	42
4.1	Forma de onda obtida a partir do esquemático da Figura 3.5. Sua amplitude diz respeito ao peso inserido de valor 0,866 W. Trata-se de uma onda quadrada modulada em ASK.	45
4.2	Forma de onda resultante do esquemático da Figura 3.6. Corresponde à demodulação da onda quadrada. As mudanças de nível de sinal ocorrem a pouco mais de 90° devido a configurações de filtro.	46
4.3	Forma de onda transmitida pelo SDR Pluto. Modulação ASK	47

4.4	Forma de onda recebida pelo SDR Pluto. Percebe-se níveis de ruído maiores do que o próprio sinal enviado, que possui amplitude 1	47
4.5	Forma de onda ao início da recepção em decorrência da transmissão de dois sinais simultâneos. Representa também a forma de onda do sinal transmitido, pois não foram incluídos efeitos de canal no sistema.	51
4.6	Sinal sobreposto demodulado. Pelo fato de um dos sinais possuírem maior amplitude (o de 0,866 W), este resultado é considerado como sendo a sua demodulação.	51
4.7	Sinal maior remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de amplitude.	52
4.8	Resultado da subtração entre o sinal da Figura 4.5 e o sinal da Figura 4.7. Aponta não sincronia entre os sinais, causada pelo processamento do sinal da Figura 4.7.	52
4.9	Resultado da demodulação dos sinais dessincronizados. Além de picos causados pela subtração imperfeita, a amplitude obtida está bem abaixo do esperado, de 0,5 W.	53
4.10	Inserir Time Sink no diagrama para auxiliar na correção da defasagem de sinal. Bloco delay teve seu valor alterado de modo a encontrar a melhor forma de onda possível para o resultado da subtração dos sinais.	53
4.11	Sinais de entrada e sobreposto processado colocados em conjunto no gráfico para análise de defasagem.	54
4.12	Resultado da subtração dos sinais após a inserção do Delay. Corresponde ao sinal menor modulado e possui a amplitude esperada, de 0,5 W.	54
4.13	Última forma de onda do processo de SIC para decodificação de dois sinais. Corresponde ao demodulado do sinal menor.	55
4.14	Forma de onda ao início da recepção em decorrência da transmissão de três sinais simultâneos. Representa também a forma de onda do sinal transmitido, pois não foram incluídos efeitos de canal no sistema.	55
4.15	Sinal sobreposto demodulado. Como no caso de recepção de dois sinais, é considerado o resultado da demodulação do sinal de maior amplitude, no caso 0,837 W	56

4.16 Sinal maior remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de amplitude.	56
4.17 Sobreposição entre os sinais de amplitude 0,447 W e 0,316 W	57
4.18 Demodulação da sobreposição entre os sinais de amplitude 0,447 W e 0,316 W. É tido como o resultado da demodulação do sinal de potência intermediária (0,447 W).	57
4.19 Sinal intermediário remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de potência.	57
4.20 Sinal de amplitude 0,316 W modulado obtido pela subtração dos sinais das Figuras 4.19 e 4.17. Já houve a correção de defasagem.	58
4.21 Última forma de onda do processo de SIC para decodificação de três sinais. Corresponde ao demodulado do sinal menor (0,316 W).	58

1 INTRODUÇÃO

A internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) é definida como sendo o paradigma no qual capacidade de conexão e atividades computacionais são aplicadas a qualquer tipo de objeto concebível [8]. É utilizada em áreas como saúde, dispositivos vestíveis, cidades inteligentes, telecomunicações, agricultura, automação industrial, iluminação pública, manutenção, gerenciamento, dentre outras [9, 10, 11, 12, 13]. De acordo com [14], espera-se que o número de dispositivos IoT alcance a marca de 29,3 bilhões, em 2023.

Este aumento quantitativo, além da popularização da tecnologia, tem por causa a expansão das redes IoT, ou seja, a ampliação no total de nós pelos quais são formadas. Tal ampliação traz consigo a necessidade de atender os seus também crescentes requisitos de abastecimento energético. Dispositivos IoT normalmente possuem baterias, ou seja, dispõem de um abastecimento energético limitado. O fornecimento energético é especialmente crítico em redes sem fio, nas quais os dispositivos são autoconfiguráveis, auto-organizáveis e não se utilizam de intervenção humana [15].

Nos casos em que os equipamentos operam em áreas de difícil acesso, é necessário que cooperem com outros dentro de seu alcance para implementar tarefas de monitoramento a fim de estabelecer uma comunicação com a estação base responsável por coletar todas as informações obtidas [16]. Em decorrência da alimentação a bateria, redes com grande quantidade de nós necessitam de um controle ainda maior de gerenciamento energético [17].

Quando as baterias se descarregam, os nós deixam de funcionar e o tempo de vida útil do sistema é reduzido [18]. A logística relacionada à recarga ou substituição dessas baterias, considerando seu ciclo de vida finito, transforma-se em uma tarefa onerosa. Assim, é necessário encontrar alternativas que permitam que grandes redes sem fio possuam maior vida útil e eficiência energética na transmissão, dado que considerável parte da energia é consumida nesta etapa [19, 20].

Outra preocupação é a demanda por mínimos impactos ambientais, pois o aumento

de aparelhos integrados a uma rede resulta em maior descarte periódico de baterias e de agentes poluentes do meio ambiente [1].

Por conta das limitações citadas em relação à alimentação por bateria, surgiram mais estudos referentes a estratégias que visam a diminuição do consumo energético. Fazem parte deles a implementação de protocolos de comunicação de baixo custo energético, a utilização de transceptores de baixa potência e também a técnica de *Energy Harvesting* (EH), caso a necessidade energética do sistema permita [1].

EH denota o modo pelo qual um sistema torna-se capaz de capturar energia a partir de fontes locais e externas a ele. São possíveis fontes o sol [21], o vento e a água [22, 23]. A energia fornecida por EH nem sempre será suficiente para alimentar os dispositivos IoT, devido ao fato de as fontes mais utilizadas serem geralmente limitadas e intermitentes. Portanto, é importante selecionar meios físicos de comunicação e protocolos econômicos com baixos impactos no desempenho geral [1].

Uma outra fonte disponível para EH são os sinais de radiofrequência (RF), interessantes por não dependerem de fatores aleatórios e intermitentes causados pelo ambiente, como é o caso de energia solar e eólica [10, 13, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. Varshney, em 2008, introduziu o conceito de Transferência Simultânea de Energia e Informação (SWIPT) [13, 31], aproveitando a característica de sinais RF possuírem simultaneamente energia e informação. Em redes sem fio, os nós podem, por meio de tecnologia SWIPT, colher energia a partir do mesmo sinal RF que utilizam para receber informações. Essa possibilidade pode equilibrar a distribuição energética e fornecer um maior ciclo de vida útil à rede [19].

Para a alimentação de redes IoT, a tecnologia SWIPT apresenta-se como boa opção por permitir o uso de dispositivos sem a necessidade de cabos ou baterias, sendo uma vantagem importante em locais onde há restrição de conexões físicas.

Um outro desafio decorrente do incremento em quantidade de dispositivos conectados é a escassez de espectro para alocação dos mesmos [13], pois a rede possui uma quantidade máxima de aparelhos aos quais consegue atender [32]. Como possíveis soluções, existem algumas abordagens a nível de protocolos de controle de acesso ao meio (MAC) capazes de contornar a situação. Em comunicações sem fio, operações realizadas na camada MAC são os processos mais dispendiosos em termos de gastos energéticos [1]. Desta forma, faz-se necessário, para este tipo de aplicação, que o protocolo selecionado esteja de acordo com a exigência de baixo consumo.

É possível focar em outras camadas de comunicação, que não a MAC, com o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas de acordo com seus requisitos. Entretanto,

no presente trabalho, estes melhoramentos são estudados e realizados na camada MAC apenas, pois é nela que normalmente ocorre o gerenciamento de acesso ao canal de comunicação por parte dos dispositivos.

Na camada MAC também se desenrolam a temporização dos pacotes de transmissão. É, portanto, a camada que costuma gastar a maior parte do *energy budget* das comunicações sem fio, pois precisa lidar com a colisão de dados, o *overhead* dos pacotes de controle, os nós de rede ociosos que gastam energia e ocupam espaço nas alocações de recursos de comunicação, a sincronização dos pacotes, dentre outras questões. Dessa forma configura-se a importância de fazer uso de um protocolo MAC que demande um baixo consumo energético [1].

1.1 Motivação e Proposta de Pesquisa

O aumento na quantidade de dispositivos dentro de uma rede IoT tem na escassez do espectro para a comunicação um de seus principais desafios. As abordagens mais tradicionais de alocação de espectro, por exemplo o Acesso Múltiplo Ortogonal (OMA) por divisão de frequência, lidam com a distribuição, ou endereçamento, de porções do mesmo entre os dispositivos que desejam transmitir. Entretanto, esses métodos limitam a quantidade de dispositivos na rede e podem fazer um uso ineficiente de espectro, visto que a parcela destinada a um dispositivo é reservada a ele apenas, mesmo que não existam pacotes transmitidos em determinado momento. Uma forma de contornar a situação é implementar um protocolo de comunicação a nível de camada MAC de forma que o aproveitamento de espectro seja maior. Nesse contexto, o presente trabalho contempla a simulação da implementação de um protocolo ALOHA NOMA a nível de camada MAC, como interface de comunicação entre uma rede de sensores IoT com sistema SWIPT integrado.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente trabalho é simular o protocolo de controle de acesso ao meio (MAC) ALOHA NOMA para aplicação na comunicação de sistema com tecnologia SWIPT integrada.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Implementar uma modulação de sinal para a comunicação capaz de comportar as demandas da estratégia de SIC definida;
- Simular, em Matlab, o protocolo ALOHA;
- Desenvolver, em GNU Radio, um sistema de cancelamento sucessivo de interferências que permita detectar três sinais distintos (NOMA);

1.3 Organização do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, incluindo conceitos sobre *energy harvesting*, SWIPT, protocolos MAC de modo geral e sobre os protocolos ALOHA, NOMA e ALOHA NOMA.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia para o desenvolvimento do trabalho, bem como os parâmetros de projeto a serem utilizados e os desenvolvimentos em si.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir do que foi desenvolvido e discussões relacionadas.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e uma breve elucidação de atividades futuras que podem ser realizadas no âmbito deste projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

2.1 Energy Harvesting (EH)

Como mencionado anteriormente, EH é o processo pelo qual a energia proveniente de fontes externas é capturada e armazenada por pequenos dispositivos autônomos sem fio, como os utilizados em redes de sensores [33]. A Figura 2.1 fornece um esquemático de nó IoT adaptado para ser capaz de realizar EH.

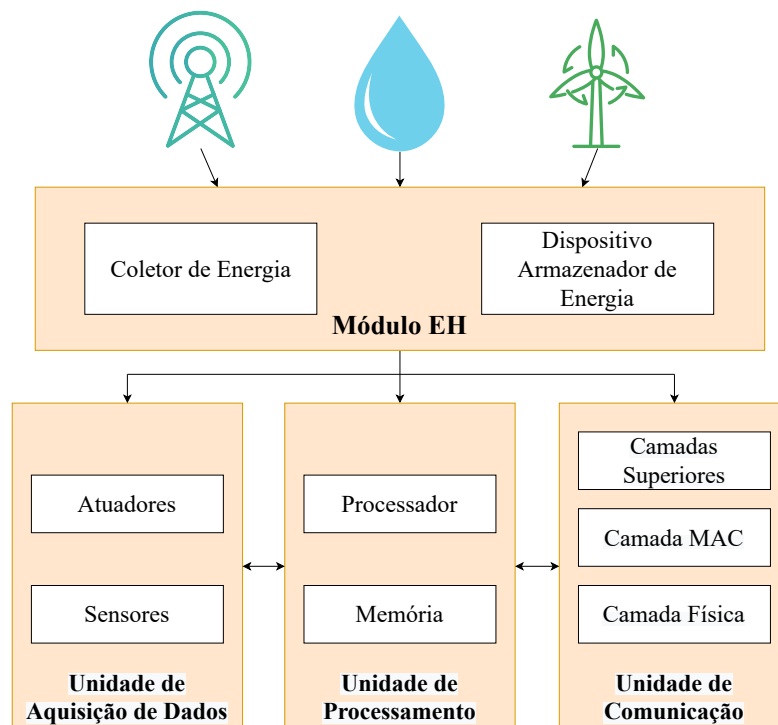


Figura 2.1. Diagrama esquemático de um nó IoT adaptado para EH. O foco deste trabalho será na unidade de comunicação, camada MAC. Adaptado de [1].

Em EH de baixa potência aplicado a redes de sensores, um sistema de EH transfere a energia armazenada para um capacitor que depois a transmite para uma bateria ou outro dispositivo armazenador. Essa energia pode, subsequentemente, ser utilizada para alimentar microprocessadores [34] ou para a transmissão de dados [35], capaz de ocorrer

com ou sem fio.

A Tabela 2.1 apresenta algumas possíveis fontes de energia para EH e suas principais características.

Tabela 2.1. Características de fontes de EH. Adaptado de [1].

Fonte de Energia	Vida Útil	Custo	Manutenção	Confiabilidade	Escalabilidade	Ambiente Adequado
Radiação Solar	Alta	Médio	Média	Baixa	Baixa	Externo
Força Mecânica	Média/ Baixa	Médio/ Alto	Alta	Média	Alta	Interno/ Externo
Fluido Dinâmico	Alta	Alto	Baixa	Média/ Baixa	Baixa	Externo
Termoelétrica	Média	Alto	Baixa	Alta	Alta	Áreas industriais
Ruído Acústico	Baixa	Médio/ Alto	Alta	Média	Baixa	Aeroportos/ Ferrovias
RF	Alta	Médio	Baixa	Alta	Alta	Áreas Urbanas

Uma das grandes vantagens da utilização de mecanismos de EH é o aumento da vida útil que eles proporcionam a dispositivos móveis.

Sinais RF podem ser usados com sucesso para a captura de energia em áreas urbanas, pois são locais densamente providos de antenas utilizadas para telecomunicações e estações de televisão. Dessa forma, esta fonte de energia torna-se abundante nestes meios [1].

Uma forma de aproveitar a energia de sinais RF para alimentar sistemas é por meio da Transmissão de Energia Sem Fio (WPT, em inglês *Wireless Power Transfer*). Em sistemas WPT, a energia pode ser captada por sinais RF que oportunamente encontrem-se no ambiente, ou por uma fonte dedicada, de maneira controlada [3].

Inicialmente, a WPT foi utilizada para fornecer energia a grandes distâncias e com alta potência, mas a preocupação com questões de saúde girando em torno da incidência de um alto nível de radiação e a baixa eficiência energética obtida fizeram com que o foco das pesquisas se voltasse para aplicações mais destinadas a transmissão de energia a pequenas distâncias. SWIPT é a unificação dos aspectos de transmissão de energia e de informação. Sobrepor estes dois fenômenos gera melhorias em eficiência espectral, atraso temporal, consumo energético, e gerenciamento de interferências [3].

Estudos iniciais sobre SWIPT assumiram que um mesmo sinal pode transportar energia e informação sem sofrer perdas [31, 36]. Entretanto, na prática, este fenômeno não ocorre, pois o processo de EH realizado destrói o conteúdo da informação. Portanto, uma

forma de desenvolver um sistema SWIPT eficiente, é considerar que o sinal RF precisará ser repartido em duas porções distintas, uma destinada à captação de energia, outra à decodificação da informação contida [3].

Em [3], são discutidas algumas formas de dividir o sinal recebido. A Figura 2.2 apresenta os esquemáticos para os quatro casos abordados, descritos a seguir.

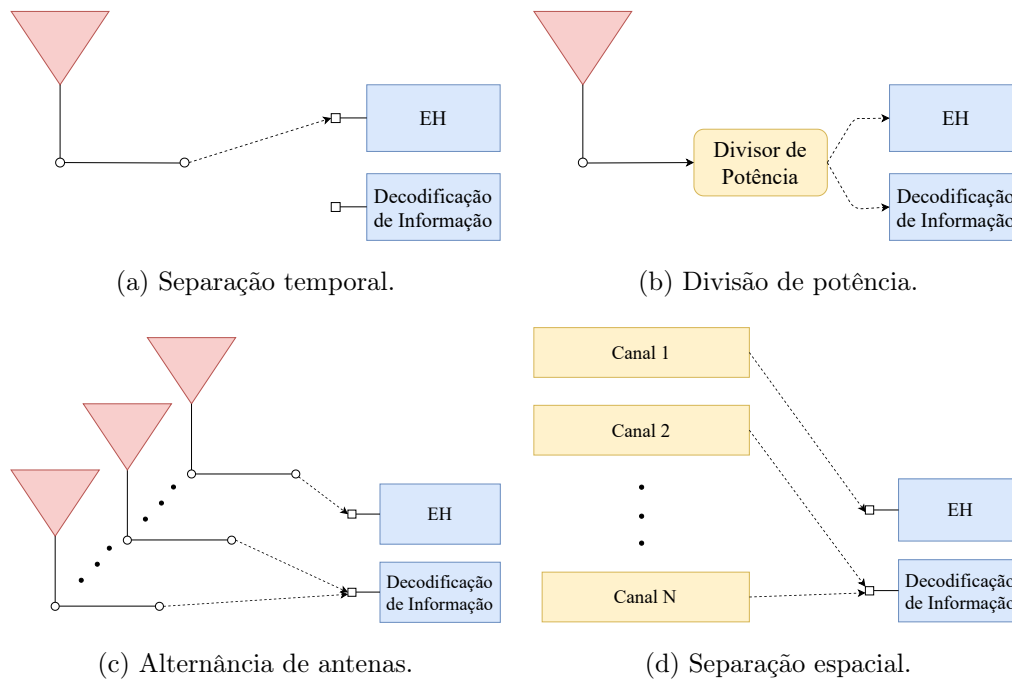


Figura 2.2. Quatro formas de se desenvolver um dispositivo SWIPT. Conceito das imagens retiradas de [3].

2.1.1 Separação Temporal

Na separação temporal, o receptor alterna no tempo entre recepção de sinal para decodificação de informação e para captação de energia [37]. A divisão, neste caso, ocorre no domínio do tempo, portanto, todo o sinal recebido em uma determinada janela temporal é utilizado ou para decodificação dos dados enviados, ou para captação energética. Os dois processos não ocorrem simultaneamente. A separação temporal permite um método simples de implementação, porém requer uma sincronização precisa e planejamentos adicionais.

2.1.2 Divisão de Potência

Nesta técnica, o sinal recebido é dividido em dois sinais com níveis de potência distintos por intermédio de um divisor de potência. Um dos sinais é enviado à rectenna, para EH, e o outro é decodificado, para extração de informação [37]. Esta solução incute no receptor um maior nível de complexidade, quando comparado a um receptor que emprega a separação temporal. Entretanto, uma vantagem deste método é que ele fornece um SWIPT instantâneo, pois um sinal recebido será simultaneamente utilizado para extração tanto de energia quanto de potência. Isso o torna mais adequado em aplicações nas quais o tempo é um fator crítico [3].

2.1.3 Alternância de Antenas

É possível projetar um sistema SWIPT com dois (ou mais) arranjos de antenas, nos quais um arranjo será utilizado para decodificar a informação e o outro para captar e armazenar a energia [38, 37]. Esta técnica requer a solução de um problema de otimização relacionado à escolha de quais elementos do arranjo disponibilizar para decodificação de informação e quais elementos utilizar em EH [3].

2.1.4 Separação Espacial

A separação espacial explora os diversos graus de liberdade do canal de interferência [39]. Por meio de decomposição em valores singulares de um canal MIMO, os elos de comunicação são transformados em canais superpostos e paralelos. Na saída de cada canal há uma chave que direciona o sinal resultante para a decodificação de dados ou para a absorção de energia. Esta técnica envolve um problema complexo de otimização não-linear e combinatorial [3].

2.2 Protocolos MAC para IoT

Os autores em [1] apresentam uma comparação de tecnologias para aplicações IoT com base no consumo energético, e também discutem sobre a compatibilidade de comunicações em sistemas que utilizam EH.

A figura 2.3 mostra a classificação dos protocolos MAC proposta em [1]. A categorização foi realizada a partir da forma como cada técnica acessa o meio. A imagem foi

modificada de modo a deixar sua análise mais interessante para o contexto deste projeto.

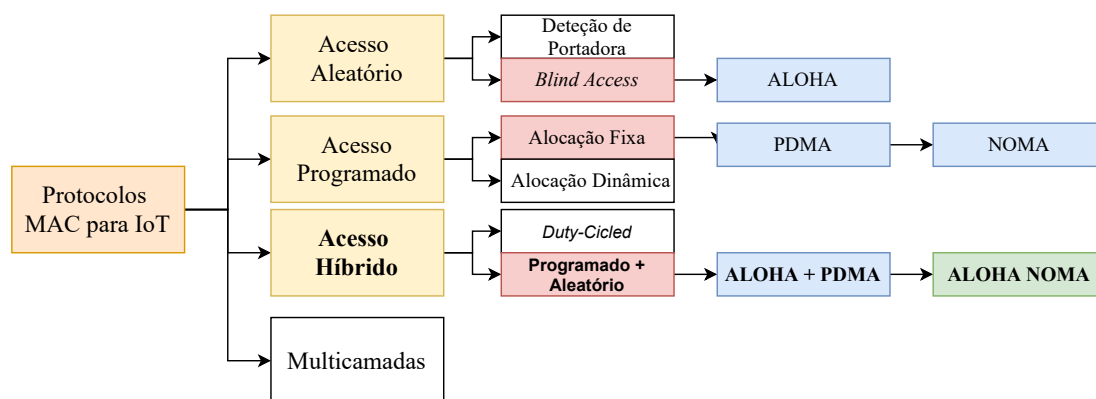


Figura 2.3. Classificação dos protocolos MAC de acordo com a forma como acessam o meio. As abordagens de interesse para a compreensão do protocolo ALOHA NOMA encontram-se destacadas, assim como o caminho direto até ele, segundo a classificação proposta. Adaptado de [1].

2.2.1 Acesso Aleatório

O acesso aleatório é a categoria de acesso ao meio na qual não há uma entidade organizadora responsável por programar a transmissão. Os nós podem iniciá-la no momento em que desejarem.

Existem duas formas de se realizar um acesso aleatório, sendo a primeira delas efetuada por detecção de portadora, e a segunda denominada *Blind Access* [40, 4]. Também existem protocolos que fazem uso combinado de ambas as formas de acesso aleatório ao meio.

2.2.1.1 Detecção de Portadora

O método envolvendo detecção de portadora exige que cada nó transmissor presente na rede seja capaz de identificar os sinais de portadora dos demais. A partir disso, ocorre a decisão de transmitir sua própria mensagem ou de aguardar que outro nó finalize a transmissão primeiro. A identificação de sinais é realizada como estratégia para evitar ou detectar colisões de pacotes de informação, importante para que não haja gasto energético desnecessário. Dentro desta categoria, encontram-se o Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora (CSMA, do inglês *Carrier Sensing Multiple Access*) e suas variações. Um detalhamento maior sobre este protocolo é dado em [40].

2.2.1.2 Blind Access

Neste conjunto de abordagens, não há mecanismo de escuta ao meio compartilhado, ou seja, os nós não possuem a capacidade de detectar outros que estejam utilizando o canal para transmissão. Se comparado com o CSMA, protocolos dessa categoria apresentam uma maior taxa de colisões. Por este motivo, o consumo energético também é maior.

Nesta categoria, encontram-se o protocolo ALOHA e suas variantes, como é o exemplo do *Slotted* ALOHA. Ambos os protocolos serão explicados em maiores detalhes na seção 2.3.

2.2.2 Acesso Programado

Nas ferramentas de acesso programado, os pacotes de dados são transmitidos de maneira ordenada. Cada nó transmissor tem para si reservada uma parcela de recurso de comunicação (potência, tempo, código, frequência) que o diferencia dos demais. Esta parcela é fixa e designada para auxiliar na transmissão de dados apenas do nó específico. Cada nó transmite de acordo com a sua fatia predefinida ou obedece a um sistema gerenciador. Em [40] e [41], discute-se este tipo de acesso ao meio em maiores detalhes.

2.2.2.1 Alocação Fixa (Canalização)

A Alocação Fixa, ou canalização, diz respeito às estratégias que dividem o meio compartilhado em uma quantidade fixa de recursos de canal, sejam eles tempo, frequência, potência, dentre outros. É permitido a cada nó utilizar apenas as porções de recursos designadas a ele, de forma que não compita com outros nós alocados em outras porções. Estão nesta categoria os protocolos de Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA, do inglês *Code Division Multiple Access*) [42], Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) [43], Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*) [44] e Acesso Múltiplo por Divisão de Potência (PDMA, do inglês *Power Domain Multiple Access*) [45].

Neste trabalho, um dos métodos de interesse é o PDMA. O PDMA consiste em alocar potências de transmissão específicas para cada nó [1]. É desta categoria que faz parte o protocolo de Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA, do inglês *Non Orthogonal Multiple Access*), melhor explicado na seção 2.4 deste trabalho. Nele, o procedimento de divisão de potência é simplificado de forma ainda a satisfazer os requisitos de qualidade de serviço da transmissão, de cancelamentos de interferências e de recepção simultânea bem-sucedida

dos pacotes [46]. Outra operação possível dentro do PDMA é o OPDMA (Acesso Múltiplo Ortogonal por Divisão de Potência - do inglês *Orthogonal Power Division Multiple Access* [45]).

Também existem estratégias que combinam mais de uma dessas técnicas de canalização. Maiores detalhes podem ser encontrados em [47], [48] e [49].

2.2.2.2 Alocação Dinâmica

Em técnicas que envolvem um acesso controlado, o gerenciamento do meio é realizado por intermédio de uma espécie de mensagem de controle contida nos pacotes de informação. A transmissão é controlada por meio da existência desta mensagem nos pacotes. Isso pode ocorrer por meio da transmissão de um token [50, 51] ou por *polling* [52, 53].

2.2.3 Acesso Híbrido

Segundo [1], protocolos de acesso híbrido são aqueles que combinam certas características vantajosas das ferramentas disponíveis em acesso aleatório, que podem incluir o bom aproveitamento dos recursos de canal e a sua natureza distribuída, com outras vantagens presentes em acesso programado. A junção desses dois tipos de técnicas também diminui, ou elimina, as desvantagens que cada uma das categorias separadamente apresenta. A divisão para acesso híbrido é realizada de duas formas: *duty-cycled* e junções de técnicas de acessos aleatório e programado.

2.2.3.1 *Duty-Cycled*

Protocolos dentro desta categoria são os mais utilizados quando o foco é conservar a transmissão de energia para aplicações em sistemas IoT, segundo [1]. Isso é feito ajustando o tempo em que os nós permanecem ativos e inativos. Estão nessa categoria protocolos que combinam CSMA e *Polling* [54], ALOHA e *Polling* [1] e CSMA e TDMA [54]. Apesar deste último caso ser constituído por um protocolo de acesso aleatório em conjunto com um protocolo de acesso programado, faz parte da categoria de *duty-cycle* por conta da característica de ajuste de tempo de atividade dos nós.

2.2.3.2 Programado + Aleatório

Métodos nesta classe tendem a se adaptar às condições de tráfego de forma mais ágil, otimizam o mecanismo de acesso ao canal e reduzem o consumo energético. As estruturas de acesso híbrido são capazes de garantir qualidade do serviço, controle de atraso e também reduzem a taxa de colisão de pacotes.

Uma desvantagem desses protocolos é que aumentam o nível de complexidade dos mecanismos de controle de acesso ao meio, se comparados com sistemas que se valem apenas de acesso aleatório ou acesso programado [1]. Alguns exemplos de protocolos de acesso híbridos são CDMA com ALOHA [55], TDMA com ALOHA [56, 57], CSMA com TDMA [58], dentre outros.

- ALOHA + PDMA (NOMA)

Trata-se do protocolo a ser implementado neste trabalho e será descrito detalhadamente na seção 2.5. Em [59], é apresentado o funcionamento de um *Slotted* ALOHA NOMA, mas em [60, 61] há uma abordagem seguindo a estrutura de ALOHA puro em conjunto com NOMA. Este protocolo combina a simplicidade do ALOHA e é integrado com NOMA de forma a melhorar a alta taxa de colisões.

2.3 O Protocolo ALOHA

O protocolo ALOHA é um protocolo de acesso aleatório proposto em 1970 com o intuito de compartilhar um único canal com diversos nós de forma dessincronizada. Em uma estrutura de ALOHA puro, caso o nó tenha dados a enviar, ele o fará a qualquer momento [62]. As discussões, diagramas e imagens da presente seção foram baseados em [4], [62] e [5].

2.3.1 ALOHA Puro

Nesta configuração, os dados transmitidos são organizados por meio de *frames*, que são pacotes, ou agrupamentos, de bits. O sistema é formado por diversos nós e a transmissão ocorre sempre que há dados a serem enviados.

A partir da Figura 2.4, é possível identificar as colisões de *frames* que ocorrem como consequência da liberdade de transmissão que os nós possuem. À medida que a quanti-

dade de nós aumenta, o número de colisões também cresce.

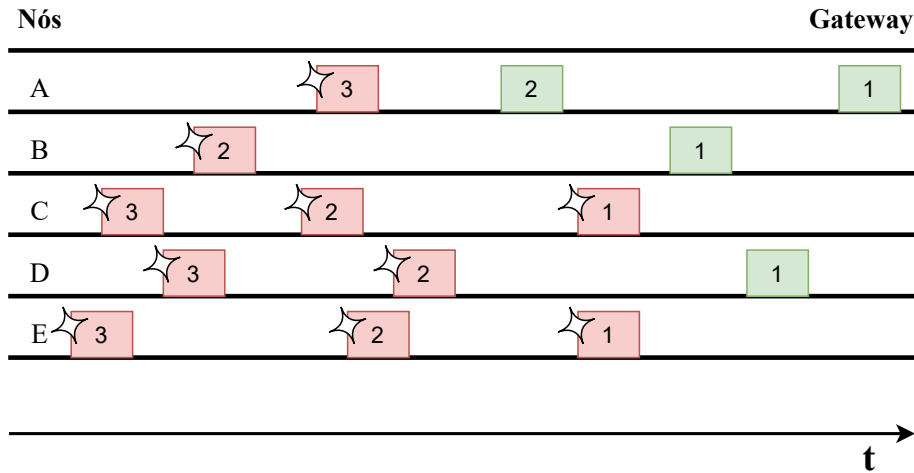


Figura 2.4. Usuários transmitindo seus dados a um *gateway* comum. *Frames* que sofrem colisões, em vermelho, não são decodificados. Para o protocolo ALOHA Puro, o tempo de colisão entre *frames* não é constante. Imagem criada com base em [4, 5].

Esses choques são problemáticos, uma vez que os *frames* nos quais ocorrem não poderão ser decodificados. É importante salientar que, para ALOHA puro, as colisões não são uniformes, ou seja, se quaisquer *frames* coincidirem, em qualquer espaço de tempo, um com o outro, o pacote não será decodificado. É possível notar, na Figura 2.4 que os pacotes de número 2 dos usuários C, D e E colidem entre si, todos por quantidades de tempo distintas.

Como consequência, o protocolo ALOHA apresenta uma taxa de transferência de dados consideravelmente reduzida e um gasto energético expressivo empregado em retransmissões. A Figura 2.5 apresenta um diagrama detalhado de como o protocolo funciona. K representa um índice iterativo cujo valor máximo pode variar e é definido em projeto. Este índice caracteriza o número de vezes em que um mesmo pacote de dados é transmitido. Após enviar o pacote, o nó espera por $2 \times T_p$ antes de tomar a decisão de reenviá-lo ou transmitir um novo, caso possua.

T_p representa o tempo máximo de propagação que será necessário para o pacote de dados viajar do nó ao receptor, ou *gateway*. Caso a transmissão seja bem-sucedida, o *gateway* enviará um sinal de confirmação ao nó, representado no diagrama por *ACK*. Em teoria, o tempo necessário para o pacote viajar até o *gateway* somado ao tempo necessário para o sinal de *ACK* ser recebido pelo nó é de $2 \times T_p$.

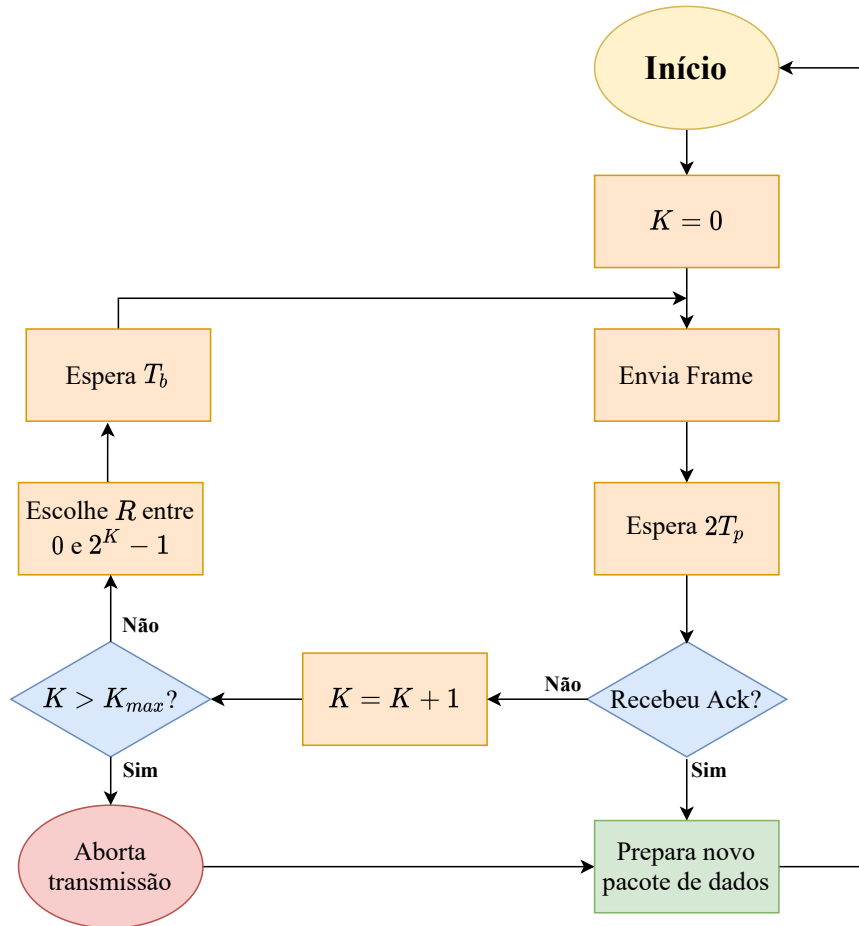


Figura 2.5. No início, K recebe o valor de zero. Após o envio do pacote, o nó aguarda $2 \times T_p$ antes de retransmitir ou preparar um novo. Caso receba um sinal ACK, o nó prepara outro pacote para transmissão. Caso não o receba, K é incrementado e, se não o valor não for superior ao máximo, aguardará por uma quantidade de tempo aleatória e retransmitirá seu pacote.[5]

Após este período, na condição de não ter recebido o sinal *ACK*, o nó se prepara para retransmitir os mesmos dados. O índice K é incrementado e, caso o sistema não tenha atingido o limite de quantidade de retransmissões, o nó selecionará aleatoriamente um número R entre 0 e $2^K - 1$. Este valor R será, então, utilizado para calcular o período de *backoff*, T_b , que representa o intervalo de tempo até o nó retransmitir os dados. Ele é calculado como $R \times T_p$ e é utilizado como tentativa de impedir uma nova colisão. O processo se repete até que K retorne um valor maior do que o seu máximo.

No protocolo ALOHA, se define o conceito denominado período de vulnerabilidade, T_v . Ele representa o requisito que garante que não haja colisão entre os dados. Como apontado pela Figura 2.6, o seu valor é equivalente ao dobro do tempo necessário para a transmissão de um *frame*, ou seja, $T_v = 2 \times T_{fr}$. Também pode ser calculado como $T_v = 2 \times T_p$. Este valor é fixado, pois não há a possibilidade de dois *frames* colidirem para um valor igual ou superior.

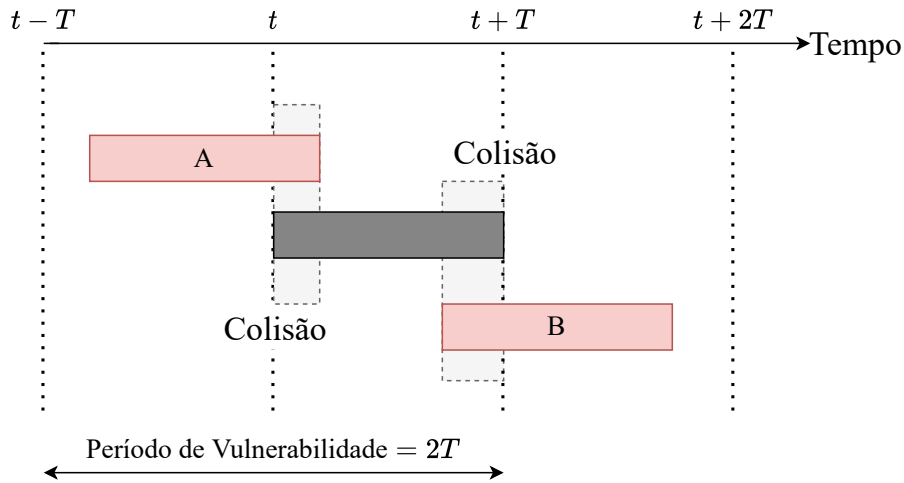


Figura 2.6. Em ALOHA puro, dois *frames* só são capazes de colidir um com o outro dentro de um intervalo equivalente a duas vezes o seu período de duração.

A taxa de transferência de dados S para o ALOHA puro é dada por

$$S = G \times e^{-2G}, \quad (2.1)$$

onde G representa a média de *frames* transmitidos durante um T_{fr} . O valor máximo para a taxa de transferência de dados se dá quando $G = \frac{1}{2}$. Isso ocorre porque T_v assume o dobro do valor de T_{fr} . Desta forma, para $G = \frac{1}{2}$, $S_{max} = 0,184$.

2.3.2 Slotted ALOHA

O protocolo *Slotted ALOHA* é uma variação do ALOHA puro desenvolvida para obter uma maior taxa de transferência.

O período T_p do canal é dividido em janelas temporais equivalentes ao valor de T_{fr} , como demonstrado na Figura 2.7. Diferente do exposto na subseção 2.3.1, a transmissão não ocorrerá sempre que os nós possuam pacotes a enviar. Uma transmissão só poderá ser realizada ao início de cada nova janela de tempo.

A vantagem desta modificação é que T_v recebe um valor menor, quando comparado ao ALOHA puro. Pelo fato de haver janelas temporais com o valor de T_{fr} e de as transmissões ocorrerem apenas ao início delas, ou haverá colisão completa dos *frames*, ou não haverá colisão alguma. Isso implica dizer que o tempo de colisão agora sempre será constante e valerá T_{fr} , diferença demonstrada visualmente na Figura 2.8.

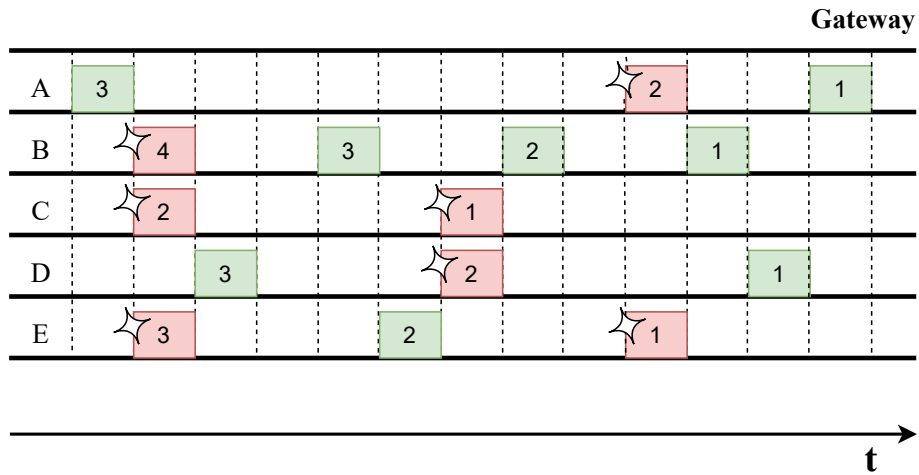


Figura 2.7. As transmissões podem ocorrer apenas ao início de uma nova janela temporal e caso os nós possuam pacotes a enviar. Nesta configuração, quando há colisões, as mesmas serão completas.

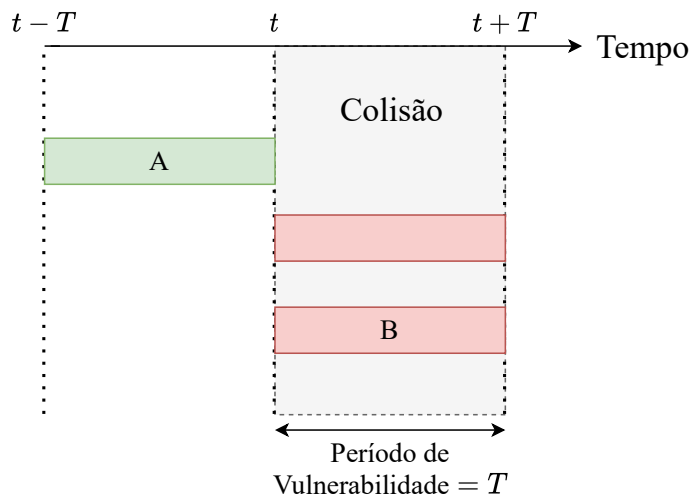


Figura 2.8. Como os pacotes só podem ser transmitidos ao início de cada janela temporal, o período de vulnerabilidade cai pela metade em relação ao apresentado na seção 2.3.1. Isso ocorre porque não há mais colisões parciais.

A diminuição do valor de T_v impacta diretamente na taxa de transferência de dados do protocolo. O S_{max} terá o dobro do valor que assume em configuração de ALOHA puro, ou seja, 0,368, e S obedecerá a Equação 2.2.

$$S = G \times e^{-G} \tag{2.2}$$

O aumento da taxa de transferência obtido, contudo, traduz-se em maior complexidade de projeto, pois agora o sistema demandará uma boa sincronização entre os nós para

que funcione apropriadamente. A tarefa torna-se gradativamente mais árdua à medida que se acrescenta mais nós aos quais o canal deve atender [63].

A Tabela 2.2 apresenta um resumo comparativo dos dois mecanismos elucidados.

Tabela 2.2. Resumo comparativo entre ALOHA puro e *slotted* ALOHA

Características	ALOHA	<i>Slotted</i> ALOHA
Transmissão	A qualquer momento	Ao início de cada janela temporal
Tempo	Contínuo, não sincronizado globalmente	Discreto, sincronizado globalmente
T_v	$2T_{fr}$	T_{fr}
Probabilidade S de sucesso na transmissão	$G \times e^{-2G}$	G^{-G}
Eficiência máxima	18,4% ($G = 0,5$)	36,8% ($G = 1$)
Maior vantagem	Implementação simples	Dobra eficiência e reduz número de colisões pela metade.

2.4 O Protocolo NOMA

O protocolo NOMA surgiu para suprir a necessidade de se ter mais dispositivos conectados às redes, visto que técnicas de acesso programado baseadas em ortogonalidade (TDMA e FDMA) muitas vezes não fornecem uma utilização ótima dos recursos de canal [2].

Os procedimentos do NOMA são tidos como não ortogonais porque, neste protocolo, os sinais compartilham o mesmo tempo e frequência. Ou seja, é permitido que haja interferência entre os sinais transmitidos. A Figura 2.9 representa o esquema usual de alocação de recursos em aplicações OMA, enquanto as Figuras 2.10 e 2.11 apresentam, respectivamente, o visual de um sistema de transmissão e um gráfico de alocação de recursos, ambos em contexto NOMA. O esquema NOMA proposto é realizado no domínio da potência [64], embora existam outras maneiras de gerar um acesso múltiplo não ortogonal.

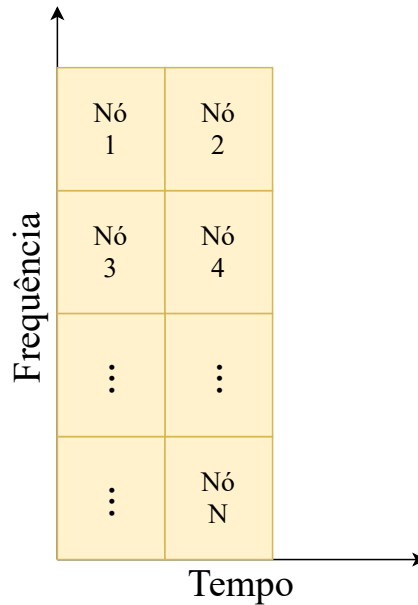


Figura 2.9. Representação gráfica de como é feita uma alocação em tempo e em frequência nas abordagens OMA. Adaptado de [6].

NOMA com PDMA emprega uma superposição na qual diversos sinais são transmitidos por um canal compartilhado por todos a diferentes níveis de potência [2].

Ao tomar o exemplo da Figura 2.10, para dois nós, a potência transmitida será dividida entre eles. O sinal destinado ao nó receptor mais próximo receberá uma baixa potência, e o nó mais afastado receberá uma alta potência. Ressalta-se que os termos alta potência e baixa potência são utilizados meramente para diferenciar os dois receptores e não dizem respeito ao real nível da potência do sinal transmitido. Este conceito pode ser generalizado para qualquer quantidade de receptores [6], desde que sejam respeitadas as limitações da aplicação.

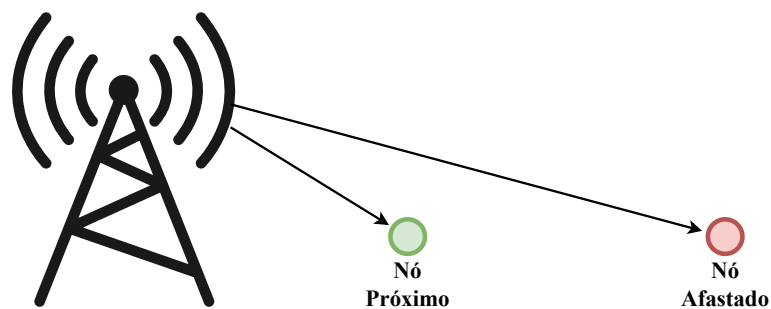


Figura 2.10. Esquema de transmissão *downlink*, no qual uma base transmissora, ou gateway, envia mensagem contendo informações destinadas a ambos os nós.

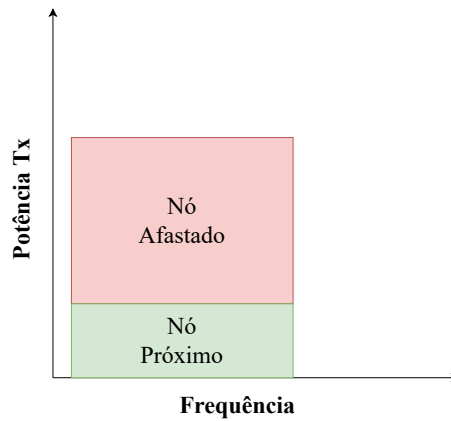


Figura 2.11. O nível de potência atribuído à porção de informação de cada destinatário é distinta. A mensagem destinada ao nó mais próximo do gateway será enviada a um nível de potência mais baixo e a mensagem destinada ao nó mais afastado será enviada a um nível de potência maior, comparativamente. Adaptado de [6].

A Figura 2.12 demonstra a forma como a decodificação acontece para os dois sinais em questão.

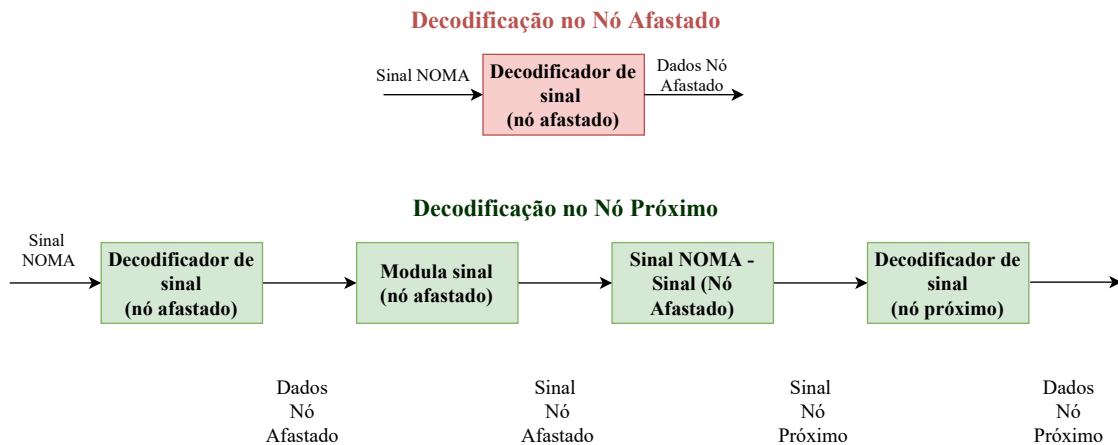


Figura 2.12. O nó mais afastado decodifica o sinal sobreposto e assume que o resultado contém os seus dados. O nó mais próximo decodifica o sinal NOMA para extrair os dados do nó mais afastado, reconstrói ambos os sinais e subtrai um do outro. A decodificação do resultado da subtração será o sinal de interesse.

Segundo [2, 64, 6], o transmissor compartilha com ambos os nós receptores o fator de potência de cada sinal. Ao considerar uma distância suficiente, pode-se deduzir que o sinal que chega ao nó mais afastado sofre pouca interferência do sinal do nó próximo, devido às perdas de caminho. Porém, o nó próximo sofre interferência considerável oriunda do sinal do nó afastado. Para obter o seu sinal, o nó próximo decodificará primeiro o sinal referente ao nó afastado, pois este chega a uma potência mais elevada.

Após a decodificação deste sinal, o nó próximo reconstruirá o sinal NOMA original para subtrair dele o resultado da decodificação. Com este novo sinal, o nó realiza uma segunda decodificação e assume que este resultado diz respeito ao sinal originalmente endereçado a ele. Este esquema de subtração de sinais é denominado SIC.

A utilização de um SIC para o nó mais afastado não é necessária. A decodificação nele é feita assumindo que o sinal sobreposto recebido já configura aquele que contém a sua mensagem.

2.4.1 SIC

A Figura 2.13 apresenta as direções da comunicação. Informações transmitidas do gateway aos nós são tidas como *downlink* e transmissões dos nós até o gateway são *uplink*.

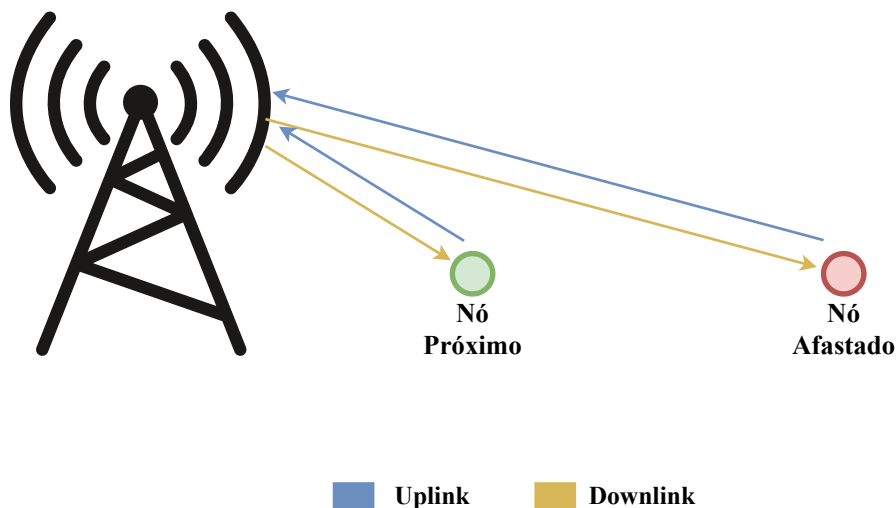


Figura 2.13. À transmissão de sinais do gateway aos nós se dá o nome de *downlink*, enquanto a comunicação dos nós transmitindo para o gateway é denominada *uplink*.

Segundo [2, 65], para os casos em que há grande interferência entre os sinais, faz-se necessário o uso de um SIC. Denotando s_1 e s_2 , respectivamente, como os sinais dos nós próximo e afastado, e a potência de transmissão como P_k , com $k = 1, 2$, o sinal recebido pelo nó próximo, em comunicação no sentido de *downlink*, é dado pela Equação 2.3.

$$y_1 = h_1(\sqrt{P_1}s_1 + \sqrt{P_2}s_2) + n_1 \quad (2.3)$$

O termo h_1 representa o coeficiente de atenuação do canal e n_1 , o ruído. Para que o processo de decodificação funcione corretamente, $P_1 \ll P_2$. Ao considerar inicialmente s_1 como interferência, é possível decodificar s_2 e, em seguida, removê-lo do sinal.

$$\tilde{y} = y_1 - h_1 \sqrt{P_2} \hat{s}_2 \quad (2.4)$$

Na Equação 2.4, \hat{s}_2 representa o valor estimado de s_2 , obtido a partir da decodificação de y_1 ao considerar a porção referente a s_1 como parte do ruído do sinal. Se $\hat{s}_2 = s_2$, $\tilde{y} = h_1 \sqrt{P_1} \hat{s}_1 + n_1$.

2.4.2 Capacidade do Canal

A capacidade do canal, para a decodificação bem-sucedida de s_1 e s_2 no nó próximo, é dada, respectivamente, pelas equações 2.5 e 2.6 [2, 64, 65].

$$R_1 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_2}{N_0} \right) \quad (2.5)$$

$$R_2 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_2}{N_0 + |h_1|^2 P_1} \right) \quad (2.6)$$

O símbolo N_0 representa a variância do ruído.

No nó mais afastado, o sinal recebido é descrito segundo a Equação 2.7.

$$y_2 = h_2 (\sqrt{P_1} s_1 + \sqrt{P_2} s_2) + n_2 \quad (2.7)$$

De forma semelhante ao sinal recebido no nó próximo, h_2 representa o coeficiente de atenuação do canal e n_2 representa o ruído, ambos referentes ao nó afastado. Como, neste caso, não há emprego do SIC, a condição para a decodificação bem-sucedida de s_2 é dada pela Equação 2.8.

$$R_2 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{N_0 + |h_2|^2 P_1} \right) \quad (2.8)$$

O caso analisado diz respeito ao *downlink*, com o gateway enviando mensagem a dois nós receptores, todavia os mesmos conceitos podem ser aplicados ao *uplink*, no qual vários nós transmissores enviam dados ao gateway [2].

Para este caso, o sinal recebido obedecerá a Equação 2.9.

$$y = h_1\sqrt{P_1}s_1 + h_2\sqrt{P_2}s_2 + n \quad (2.9)$$

No caso do *uplink*, o SIC será sempre empregado para diminuir a complexidade da decodificação dos sinais. Se $|h_1|^2 P_1 \gg |h_2|^2 P_2$, o sinal s_1 será decodificado primeiro e s_2 será considerado interferência. Assim sendo, s_1 é eliminado e s_2 é decodificado por meio da expressão $y - h_1\sqrt{P_1}s_1$. Por conseguinte, R_1 e R_2 serão obtidos, respectivamente, pelas equações 2.10 e 2.11.

$$R_1 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{N_0 + |h_2|^2 P_2} \right) \quad (2.10)$$

$$R_2 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{N_0} \right) \quad (2.11)$$

A soma de R_1 e R_2 torna-se, então

$$R_1 + R_2 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1}{N_0 + |h_2|^2 P_2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P_2}{N_0} \right) \quad (2.12)$$

$$R_1 + R_2 \leq \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P_1 + |h_2|^2 P_2}{N_0} \right) \quad (2.13)$$

2.5 O Protocolo ALOHA NOMA

O ALOHA NOMA é um protocolo a nível de camada MAC que combina a simplicidade do ALOHA e utiliza o NOMA para diminuir sua taxa de colisões de pacotes de dados transmitidos e, por consequência, aumentar a taxa de transferência, o que diminui o consumo energético.

Trata-se de um protocolo de acesso híbrido ao meio que tem sua estrutura periódica e dinâmica de *frames* composta por cinco fases explicitadas na Figura 2.14.

Ao início da comunicação, o *gateway* sinaliza aos nós transmissores que está apto a receber dados. Os nós que tenham dados a enviar encaminham de volta ao *gateway* um sinal sem pacotes de dados, contendo de informação apenas suas IDs de identificação, que são individuais para cada nó. Esta etapa é realizada exatamente como ocorre em ALOHA

puro. É importante salientar que o nível de potência dos sinais enviados por cada módulo receptor é, a princípio, diferente. Esta etapa é importante pois, a partir dela, o *gateway* realizará uma estimativa de quantos módulos receptores desejam transmitir seus dados. A estimativa é feita por meio de uma análise estatística de múltiplas hipóteses [66].

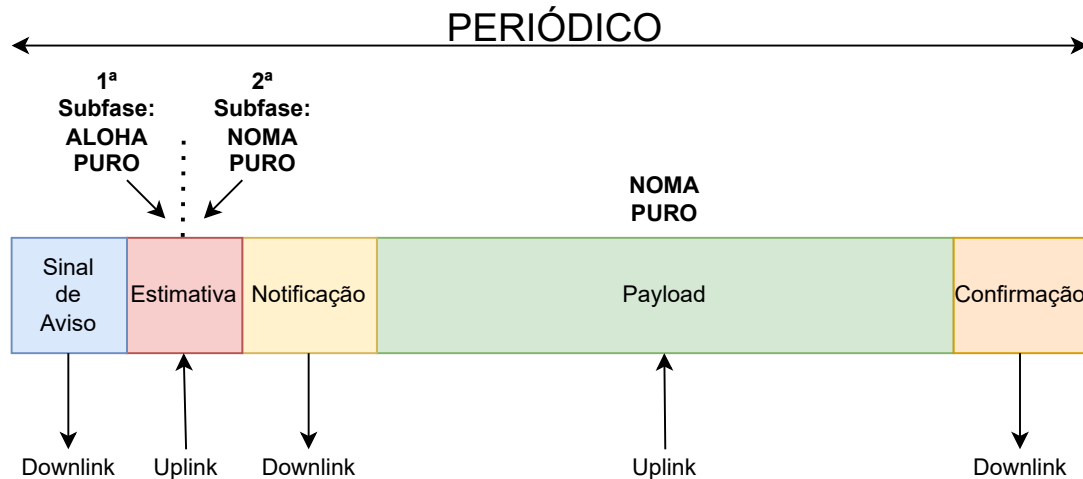


Figura 2.14. Modelo de apresentação das cinco etapas características do protocolo híbrido ALOHA NOMA.

Ao fim da análise estatística e em posse da estimativa do número total de dispositivos que desejam transmitir informação, os sinais são decodificados por um receptor de cancelamento sucessivo de interferências (SIC), explicado em 2.4.1, integrado ao *gateway*. Esta etapa ocorre como em NOMA.

É possível realizar uma implementação mais simples, sem a utilização do teste de hipóteses, caso o *gateway* conheça a quantidade de nós na rede, porém, caso esta rede seja grande, a fase de controle aumenta consideravelmente e a taxa de transferência, em conjunto com o tamanho do payload, diminuiriam. O teste de múltiplas hipóteses é explicado em 2.5.1.

Uma vez que N , total de nós que desejam realizar transmissão, é obtido pelo teste de múltiplas hipóteses, o receptor SIC decodifica o sinal N mais forte.

Na terceira fase do protocolo, após a decodificação dos sinais de identificação, o *gateway* envia aos nós um pacote de dados contendo todos os IDs detectados por ele durante o processo, juntamente com o valor de N .

Caso os nós identifiquem seus IDs na mensagem enviada pelo *gateway*, eles transmitirão seus reais pacotes de dados selecionando a potência tendo como base o esquema em [67].

O nível de potência é selecionado por meio da expressão $n\Delta$, na qual n é um valor aleatório entre $-N$ e N e Δ é um valor predeterminado. Portanto, cada dispositivo seleciona aleatoriamente um valor n e modifica a sua potência de transmissão de modo a melhorar o desempenho do SIC.

O envio dos pacotes de dados é representado pela porção em verde na Figura 2.14, denominada *payload*. Os nós que não identificarem seus IDs na mensagem de notificação do *gateway* não transmitirão seus dados no período corrente. Eles selecionarão novamente uma potência para transmissão de seus sinais e aguardarão a chegada do próximo sinal de aviso.

Na quarta etapa, à chegada dos pacotes de dados completos, o *gateway*, com o auxílio de seu SIC integrado, decodificará os sinais. Esta etapa também pode ser compreendida como NOMA.

Na quinta e última etapa, o *gateway* enviará aos módulos receptores uma confirmação de que a transmissão foi bem-sucedida.

Como mencionado anteriormente, todo este processo é periódico e pode se repetir por tempo indeterminado. O processo todo foi descrito em [63].

A explanação acerca do funcionamento do protocolo é baseada apenas em [63] pois trata-se de uma técnica recente, com poucos estudos publicados e em sua maioria comparando a técnica a outras disponíveis, ou propondo melhorias à arquitetura. Isso se deve também ao fato de ambos os protocolos ALOHA e NOMA já serem bem documentados em literatura. Um outro artigo semelhante, porém aplicado a multicanais é [68].

2.5.1 Teste de Hipóteses

O teste de hipóteses é feito por meio de desigualdades de Bonferroni [66]. O procedimento consiste no teste para M hipóteses nulas e independentes H_1, H_2, \dots, H_M em que H_i diz respeito ao evento da existência de um i -ésimo usuário. Cada hipótese terá um valor p correspondente (p_1, p_2, \dots, p_M) . Estes valores p_i são variáveis gaussianas aleatórias com média E_i e variância σ^2 . E_i é o valor médio da potência do sinal.

O número N , com $N \leq M$, representa a quantidade total de hipóteses nulas que retornaram um valor verdadeiro, ou seja, idealmente, será a quantidade total de dispositivos que desejam transmitir informações. O valor de N é desconhecido pelo *gateway* e estimado por meio de probabilidade.

A probabilidade de existirem N dispositivos no meio é dada pela Equação 2.14.

$$P(N) = (1 - \alpha)^N \alpha^{M-N} \quad (2.14)$$

Na equação, α é determinado por meio da desigualdade de Bonferroni dada pela Equação 2.15.

$$P\left(\bigcup_{n=1}^M \left(p_i \leq \frac{\alpha}{M}\right)\right) \leq \alpha \quad (2.15)$$

2.6 Tecnologias de Comunicação Utilizadas em IoT

Algumas aplicações IoT são referentes a sistemas que oferecem uma pequena área de cobertura (comunicações a curtas distâncias). As conexões mais usuais feitas por este tipo de utilização são efetuadas por tecnologias sem fio de curtas distâncias como Bluetooth, Zigbee, WiFi e OWC (*Optical Wireless Communication*) [69, 70]. A Tabela 2.3 apresenta algumas das principais características dessas tecnologias.

Tabela 2.3. Resumo de algumas das principais características para tecnologias de curtas distâncias. [2]

	Bluetooth	Zigbee	WiFi	OWC
Protocolo	TDMA/FDMA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA TDMA/CDMA
Modulação	GFSK/DQPSK/DPSK	BPSK/OQPSK	BPSK/QPSK/QAM	OOK/OFDM
Taxa de transferência de dados	Clássico: 3 Mbps BLE: 2 Mbps	250 kbps	7 Gbps	LED: 10 Gbps LD: 100 Gbps
Distância de cobertura	Clássico: 100 m BLE: 240 m	100 m	Conv.: 100 m 802,11ah: 1 km	200 m

Aplicações que envolvem a necessidade de coberturas maiores (alcances mais longos), entretanto, são mais numerosas e demandam outras tecnologias de conexão sem fio. Sensores que coletam dados em áreas externas e veículos aéreos não tripulados são dois exemplos que requerem uma conexão de maior alcance para acessar as redes [2].

Como resultado desta demanda, também existem várias tecnologias para este tipo de comunicação. Sigfox [71] e LoRa [72] são duas possibilidades plausíveis, caso as aplicações aceitem baixas taxas de transferência de dados e tenham baixo consumo em potência [2].

Outras possibilidades para comunicação a longas distâncias são LTE (*Long-Term Evolution*) e suas variantes, NB-IoT (*IoT de banda estreita*) e LTE-M, adaptada para aplicações de comunicação *machine to machine* [2]. Essas tecnologias são apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Tecnologias sem fio para comunicação a longas distâncias.[2]

	Sigfox	LoRa	LTE-M	NB-IoT
Protocolo	ALOHA	ALOHA/ Slotted ALOHA	Slotted ALOHA	Slotted ALOHA
Tipo de modulação	GFSK/DBPSK	CSS	QPSK/QAM	BPSK/QPSK
Frequência	Banda ISM	Banda ISM	Bandas LTE licenciadas	Bandas LTE licenciadas
Largura de banda	100 Hz	125 kHz 250 kHz	1,4 MHz	200 kHz
Bidirecionalidade	Limitado/Half-duplex	Half-duplex	Full/half-duplex	Half-duplex
Link Budget	156 dB	164 dB	153 dB	164 dB
Taxa máxima de transferência de dados	100 bps	50 kbps	1 Mbps	250 kbps
Comprimento máximo de payload	12 bytes	243 bytes	1000 bits	1000 bits
Cobertura	10 km (urbano) 50 km (rural)	5 km (urbano) 20 km (rural)	Poucos km	1 km (urbano) 10 km (rural)
Imunidade a interferência	Muito alta	Alta	Baixa	Baixa
Vida útil da bateria	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos
Mobilidade	Não	Sim	Sim	Sim

Para casos em que é necessário um diminuído período de latência e uma alta taxa de transferência de dados, 5G e LTE são as tecnologias mais indicadas (Tabela 2.5).

Tabela 2.5. Tecnologias sem fio para comunicação que necessite de baixa latência e alta taxa de transferência de dados.[2]

	LTE/LTE-A	5G
Latência	15 ms	1 ms
Máxima taxa de transferência de dados	1 Gbps	20 Gbps
Espectro disponível	3 GHz	30 GHz
Largura de banda do canal	20 MHz	100 MHz abaixo de 6 GHz 400 MHz acima de 6 GHz
Frequência de banda	600 MHz a 5,925 GHz	600 MHz a 80 GHz
Forma de onda de uplink	SC-FDMA	Opção para CP-OFDM

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Fluxograma de Metodologia

Para a elaboração do presente trabalho, foi estruturado o fluxograma da Figura 3.1, a fim de auxiliar no desenvolvimento do projeto. O planejamento e ordem de execução das tarefas foi todo pensado com base neste fluxograma.

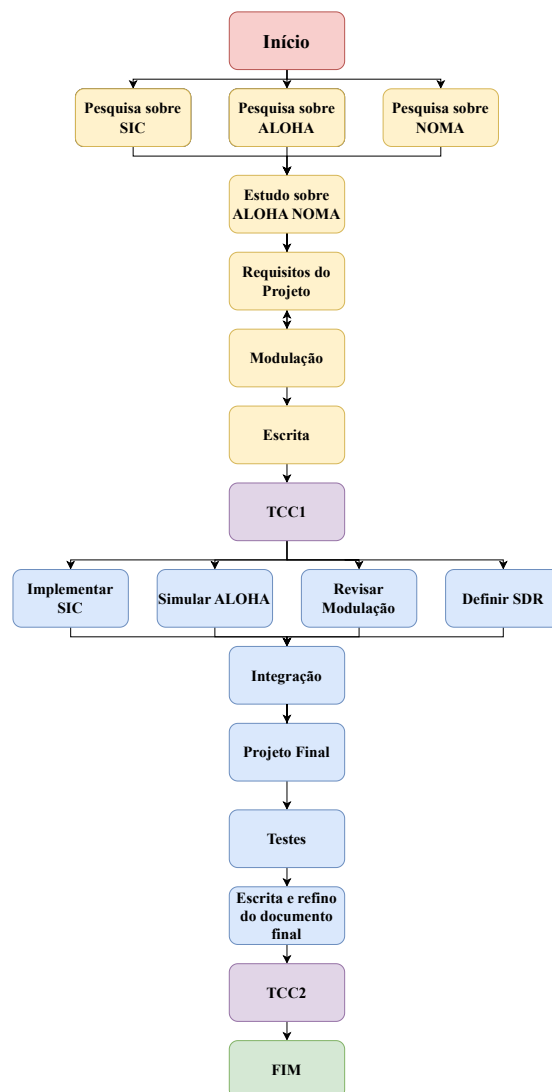


Figura 3.1

3.2 Ferramentas Computacionais

Uma das ferramentas computacionais utilizadas para a realização de parte das simulações deste trabalho foi o software GNU Radio v.3.9.2, executado em máquina com sistema operacional macOS Big Sur 11.6.3, processador 6-Core Intel Core i5 2.9GHz e 16GB de memória RAM.

A outra ferramenta foi o software MatlabTM R2020a, executado em máquina Dell Inspiron 5448, Intel Core i7-5500U 2.4 GHz, com sistema operacional Windows 10.

O SDR ADALM-PLUTO AD9363 (Figura 3.2), da Analog Devices[©], foi utilizado brevemente na tentativa de iniciar a implementação do trabalho em hardware. Pretendia-se começar o processo pela modulação do sinal. O projeto não foi bem-sucedido e a sua retomada implicaria em um aumento de complexidade em relação ao inicialmente proposto, motivo pelo qual não foram realizadas novos experimentos.



Figura 3.2. ADALM-PLUTO AD9363. Rádio definido por software voltado para o aprendizado de fundamentos de SDR [7].

3.3 Parâmetros de Projeto

A ideia é que o protocolo apresentado neste trabalho seja implementado em um projeto cujo estudo de caso é o monitoramento remoto de corpos d'água. No Distrito Federal, muitas destas localidades, que precisam de acompanhamento e fiscalização, não permitem o livre acesso e a livre circulação de pessoas, fazendo com que a logística de deslocamento de equipes até elas, para este fim, se torne uma tarefa complexa. Isso pode ocorrer por dificuldades de ordem geográfica ou pelo fato de essas fontes hídricas estarem situadas em áreas tidas como privadas.

Desta forma, é útil o estudo e a concepção de um sistema que não necessite de intervenção humana constante. Uma implementação de SWIPT permite que as baterias tenham uma vida útil mais longa, maximizando, assim, a longevidade da solução. Para a comunicação, é importante buscar abordagens de baixo custo energético, visto que este é um recurso escasso para a aplicação. O protocolo aplicado precisa, portanto, ser simples (ALOHA) e ao mesmo tempo impedir que seja gasta muita energia com retransmissões (SIC do NOMA).

A Figura 3.3 é uma representação esquemática de um possível resultado final.

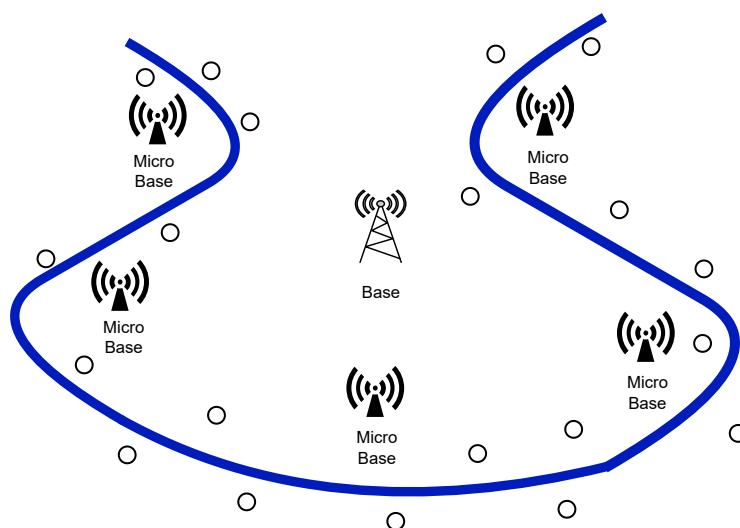


Figura 3.3. Esquemático do sistema final que serviu de estudo de caso para o presente documento. Ele apresenta um conjunto de microbases que servem de *gateway* e fonte de energia aos sensores. Essas microbases, após receberem os dados transmitidos pelos sensores, os encaminharão a uma base central.

O sistema é dividido em três grupos: O primeiro é composto por módulos transceptores que recebem dados e energia das microbases e transmitem a elas os dados coletados dos sensores. As microbases, para esta aplicação, seriam os gateways e se comunicam com vários transceptores utilizando o protocolo ALOHA NOMA. Além disso, enviam energia sem fio que abastece as baterias dos módulos. A base principal comunica-se e gerencia as microbases, coletando os dados e enviando informações utilizando o protocolo LoRa.

A microbase é composta por três subsistemas, apresentados na Figura 3.4: O primeiro deles é o módulo LoRa, que realiza a comunicação a uma frequência de 915 MHz, contexto no qual poderá ser realizada a quilômetros de distância. O segundo é um módulo transceptor, que envia dados e energia simultaneamente aos transceptores SWIPT e esses, por sua vez, enviam à microbase os dados coletados das redes de sensores, formando assim o sistema SWIPT. A energia é transmitida na frequência central de 2,45 GHz e os

dados são enviados pela microbase a uma frequência de 2,47 GHz e recebidos a 2,42 GHz. O terceiro subsistema é o microcontrolador, responsável por gerenciar o fluxo de dados a serem transmitidos para a base principal e da base principal para os módulos receptores. As microbases terão alimentação própria.

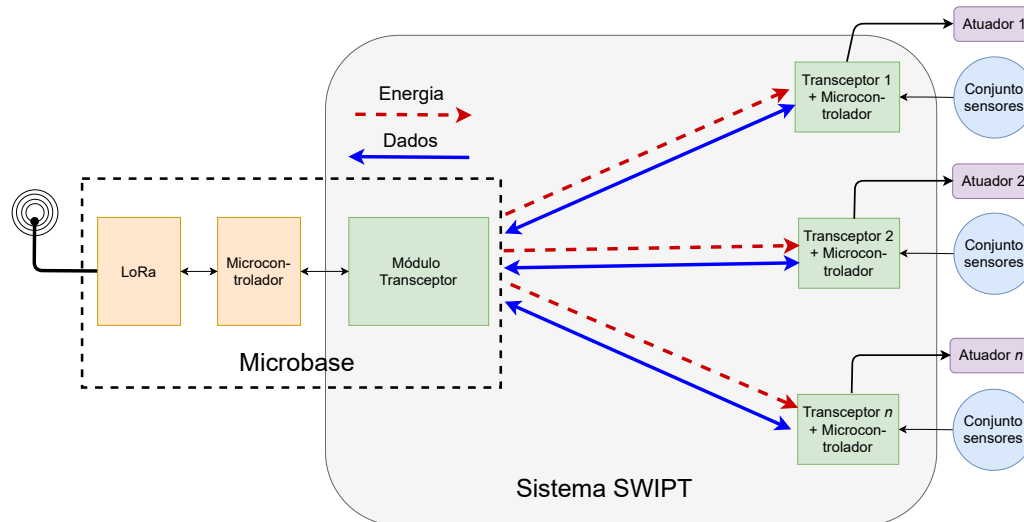


Figura 3.4. Subsistemas presentes nas microbases e nos módulos receptores, com sensores integrados. O fluxo de dados ocorrerá em ambas as direções, dos módulos receptores à microbase e da microbase aos módulos receptores. A transmissão de energia ocorrerá em apenas uma das direções (*downlink*).

A estrutura final consiste em um conjunto de microbases, cada uma responsável por atender um determinado grupo de sensores, representados na Figura 3.3 por pequenas circunferências. As microbases fornecerão energia por meio de seus sinais RF e cumprirão o papel de *gateway* entre os transceptores e a base principal. Elas serão então responsáveis por enviar à base central o conjunto de dados coletados por todos os sensores pelos quais é responsável.

Os parâmetros de interesse para o desenvolvimento do protocolo encontram-se na Tabela 3.1. Assim como na seção 2.4.1, *downlink* representa as transmissões da microbase aos sensores e *uplink* representa transmissões dos sensores à microbase.

Os dados informados ainda não levam em consideração os efeitos de ruídos e interferências e foram coletados tomando por base o envio de três símbolos na modulação. Na coluna de *uplink*, ao campo de potência transmitida, foi incorporado o valor de $2mW$. Isso ocorreu apenas como demonstrativo, para que os outros parâmetros fossem calculados.

Tabela 3.1. Os principais parâmetros do projeto para *Uplink* e *Downlink*. *Downlink* é a transmissão de dados e energia da microbase ao sensor e *uplink* é, portanto, a transmissão de dados dos sensores à microbase.

Parâmetros de Projeto	Downlink	Uplink
Frequência [GHz]	2,47	2,42
Banda [kHz]	150	150
Potência de Transmissão [mW]	1000	2
Modulação	ASK/PSK	ASK/PSK
SNR [dB]	98,53	89,09
Capacidade do Canal [Mbps]	1,58	1,58
Taxa de Símbolos (símbolos/segundos)	167000	167000
$\frac{E_b}{N_0}$ [dB]	41,54	32,10
Distância [m]	10	10

A potência de transmissão não representa valor único, para este caso, e sim uma faixa de valores entre -2 dBm e 2 dBm. A taxa de símbolos foi calculada supondo uma modulação que gere três símbolos distintos, entretanto a solução final do presente trabalho utiliza uma modulação de dois símbolos.

3.4 Modulação

Foi implementada, no projeto, uma modulação ASK conforme a Figura 3.5, que apresenta o esquemático, em ambiente GNU Radio.

Os três primeiros blocos interligados representam a fase de modulação do sinal. Após o bloco *Virtual Sink*, inicia-se o processo de demodulação, explicitado na Figura 3.6.

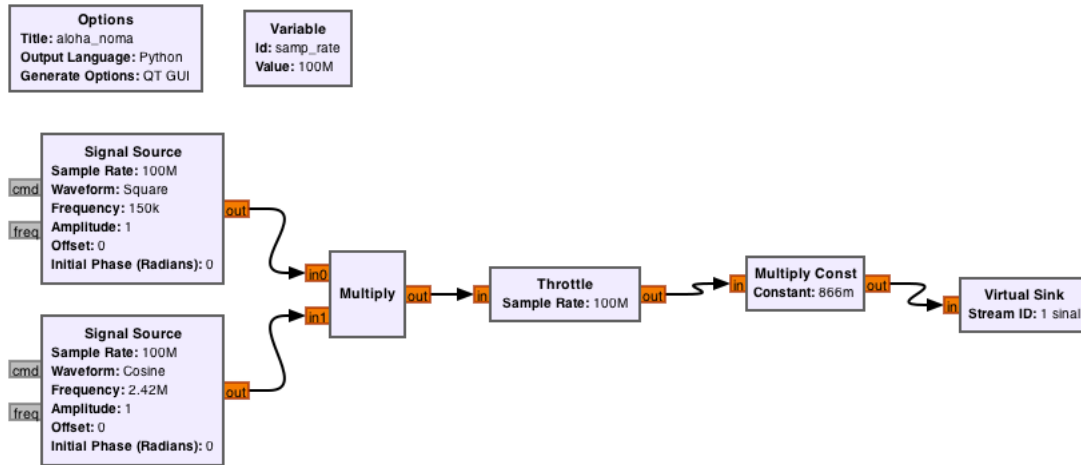


Figura 3.5. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para uma modulação BASK/OOK

de um sinal.

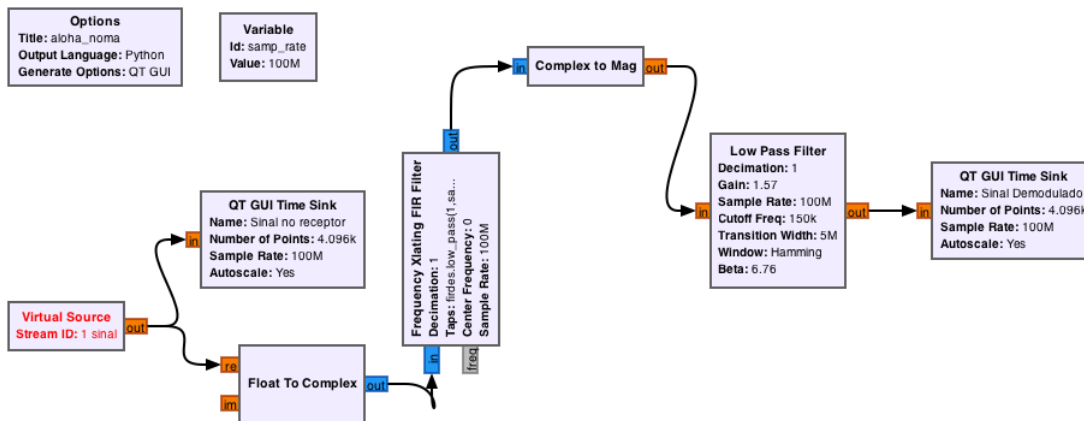


Figura 3.6. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para uma demodulação BASK/OOK. A demodulação de um único sinal é feita dessa forma.

- **Signal Source**

Este bloco foi utilizado para computar as entradas da modulação. Os campos precisam ser preenchidos com taxa de amostragem, forma de onda de saída, frequência, amplitude de sinal e *offset*. É importante se atentar para a taxa de amostragem e a frequência definida. Se a frequência no bloco for definida como maior do que metade da taxa de amostragem, ocorrerá o fenômeno de espalhamento. O sinal de maior frequência, de $2,42\text{MHz}$, deveria ter o valor em frequência de $2,42\text{GHz}$. Ele foi alterado por limitações computacionais.

Um dos blocos da solução corresponde ao sinal da portadora e o outro representa o sinal a ser modulado por ela. Os valores incluídos em cada um são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2. Valores dos parâmetros do bloco de portadora

Parâmetro de Bloco	Valor inserido
Tipo de saída	float
Forma de onda	coseno
Frequência	2420000
Amplitude	1
Offset	0
Fase inicial (radianos)	0

Tabela 3.3. Valores de parâmetros do sinal a ser modulado

Parâmetro de Bloco	Valor inserido
Tipo de saída	float
Forma de onda	quadrada
Frequência [Hz]	150000
Amplitude	1
Offset	0
Fase inicial (radianos)	0

- ***Throttle***

Este bloco limita a taxa de dados ao valor definido pela taxa de amostragem. Isso impede que o GNU Radio sequestre todo o poder de processamento da CPU. Este bloco não é necessário quando o software faz interface com um hardware externo. O valor definido para a taxa de amostragem foi de $100MHz$.

- ***Float to Complex***

Este bloco marca o início da demodulação do sinal e trata-se de uma interface entre uma entrada real e uma saída complexa. Eles são colocados em preparação para o bloco de translação em frequência, cuja entrada é complexa.

- ***Frequency Xlating FIR Filter***

Este bloco combina uma translação de frequência e um filtro FIR *anti-aliasing*, que filtra altas frequências. Ele foi empregado pela falta de um elemento que retorne o sinal para banda base. O parâmetro *Decimation* representa a razão entre a taxa de amostragem dos sinais de entrada e saída. Taps foram calculados por comando fornecido pelo GNU Radio.

- ***Complex to Mag***

Bloco responsável por coletar a parte positiva do sinal.

- ***Low Pass Filter***

O filtro passa-baixas foi utilizado como detector de envoltória. Os valores inseridos encontram-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.4. Valores de parâmetros do bloco Frequency Xlating FIR Filter

Parâmetro de Bloco	Valor inserido
Decimação	1
Taps	<code>firdes.low_pass(1,samp_rate, samp_rate/2,5000000)</code>
Frequência Central[Hz]	0
Taxa de Amostragem [MHz]	100
Fase inicial (radianos)	0

Tabela 3.5. Valores de parâmetros do filtro passa-baixas

Parâmetro de Bloco	Valor inserido
Tipo FIR	Float ->Float (Decimating)
Decimation	1
Ganho	1,57
Frequência de Corte [Hz]	150000
Banda de transição [MHz]	5
Janela	Hamming

- ***QT GUI Time Sink***

Blocos utilizados para gerar o resultado gráfico Amplitude x Tempo da simulação.

Não foram acrescentados blocos para correção de relógio entre transmissor e receptor, nem para a correção de alterações do sinal originários do efeito de canal, pois tais fenômenos foram desconsiderados nas implementações realizadas neste trabalho. A modelagem e correção dessas questões precisa ser realizada em melhorias futuras do projeto, antes da implementação em hardware, para que todos os processos descritos funcionem corretamente.

3.5 Sinal de Aviso e Subfase de Estimativa ALOHA Puro

A lógica referente à porção inicial do ALOHA NOMA, composta pela etapa de aviso e pela primeira subfase - a porção do processo de estimativa que envolve ALOHA puro - da Figura 2.14, é definida conforme o Algoritmo 1, realizado no software *Matlab*. Para que

a lógica de acesso, fortemente embasada em ALOHA, seja futuramente integrada ao SIC, será necessário migrar o algoritmo para uma linguagem que converse satisfatoriamente com o GNU Radio, ferramenta utilizada para o desenvolvimento da porção referente ao NOMA, neste trabalho (python, por exemplo).

O sinal de aviso nada mais é do que um pacote de bits de valor pre-definido e reservado a ser modulado em ASK à frequência de $2,47GHz$. É possível adotar o esquema da Figura 3.5 para gerar a modulação.

Optou-se por realizar a lógica da subfase ALOHA em *Matlab* pela maior facilidade em criar os laços e condicionais necessários ao protocolo.

Pelo fato de a modulação já ter sido discutida e desenvolvida em ambiente GNU Radio, a representação do sinal de aviso incluída no algoritmo para o ALOHA puro foi simplificada. No código, ele é representado pela *flag aviso*, com valores um ou zero. Zero representa a ausência de sinal de aviso, ou seja, a microbase não autorizou o início do processo de transmissão dos transceptores SWIPT. O valor um, então, representa o momento em que os transceptores SWIPT identificam o aviso e iniciam de fato a transmissão de sua mensagem, a princípio um pacote vazio de bits (sem *payload*) contendo de informação relevante unicamente os valores de identificação individuais de cada transceptor.

O algoritmo se inicia com a definição de valor mínimo e máximo para o contador K . Caso o transceptor SWIPT não receba um sinal de confirmação após o envio de seus dados, K é incrementado e é realizada nova tentativa de transmissão do mesmo pacote. O sistema realiza K_{max} repetições de transmissão e, caso receba o sinal de confirmação, encerra o processo e aguarda novo sinal de aviso.

Como não há interface com nenhum hardware transmissor, os sinais de aviso e confirmação são representados por meio das *flags aviso* e *confirma*, respectivamente. O valor 1 nas *flags* significa que o transceptor SWIPT recebeu os sinais. No caso de *confirma*, o valor um representa a presença dos bits de identificação do transceptor no sinal de confirmação. Na inicialização, $aviso = 1$ e $confirma = 0$.

Para um único pacote de dados, realiza-se duas transmissões, pois, da primeira vez, a transmissão é realizada contendo um pacote vazio, ou seja, sem *payload*. Essa transmissão acontece com o intuito de permitir que a microbase descubra a quantidade de transceptores SWIPT que desejam estabelecer comunicação naquele determinado momento e selecione o número de cancelamentos sucessivos necessários para a decodificação de todas as mensagens.

Salienta-se que, na segunda transmissão, é fundamental que o sinal mantenha o

Algorithm 1 ALOHA puro

Require: $K, K_{max}, c, limite, n, bits, aviso, confirma, P, P_{selecionada}$ ▷ Entrada

Ensure: $senal$ ▷ Saída

Início

while $aviso = 1$ **do** ▷ Inicializa a transmissão dos pacotes vazios

if $K \leq K_{max}$ and $confirma = 0$ **then**

if $c < limite$ **then**

 Calcula T_b a partir de K

 Aguarda T_b

 Obtém $P_{selecionada}$ a partir de P e $bits$

 Obtém $senal$ a partir de $bits$ e $P_{selecionada}$

 Transmite $senal$

 Incrementa c

else

 Define $confirma$ como sendo 1

end if

 Incrementa K

end if

if $K > K_{max}$ ou $confirma = 1$ **then**

 Define $aviso, K$ e c como 0

▷ Encerra laço

end if

end while

while $confirma = 1$ **do** ▷ Transmite pacote com payload

if $KK_{max} > limite$ **then**

 Gera novo conjunto de bits

 Multiplica $senal$ pela potência previamente selecionada

 Transmite $senal$

end if

 Define $confirma = 0$ e $aviso = 1$

end while

mesmo nível de potência que o selecionado durante a primeira. Caso não seja recebida a confirmação, o valor de payload é mantido e o nível de potência é selecionado novamente. Só é possível selecionar níveis de potência K_{max} vezes para um mesmo *payload*.

Quando $aviso = 1$, para simular que em um determinado momento houve a recepção de um sinal de confirmação no qual consta os bits de identificação do transceptor de interesse, definiu-se um contador c e seu valor *limite* máximo. Antes de atingir o *limite*, a transmissão ocorre e se repete quantas vezes forem necessárias, respeitando o critério K_{max} . Quando $c > limite$, *confirma*, inicialmente nula, recebe o valor 1. Isso encerra a transmissão do pacote sem *payload*. Para o caso $K_{max} < limite$, o pacote com *payload* não poderá ser transmitido e os dados são perdidos.

Para compor os dados a serem transmitidos, foi gerado um conjunto de n bits aleatórios. Além destes, também há uma lista P contendo os níveis de potência que o transceptor pode selecionar. Essa seleção acontece de modo aleatório. No momento da transmissão, após definir um pacote com *payload* contendo os dados de bits, o transceptor seleciona a potência, definida como $P_{selecionada}$. Este valor é multiplicado pelos bits a fim de demonstrar o nível no qual o sinal modulado resultante será enviado.

A lista P contém três valores distintos, $0,7 W$, $0,2 W$ e $0,1 W$, selecionados arbitrariamente. Eles respeitam os dois quesitos necessários para que o cancelamento de interferências seja bem-sucedido: $P_1 > P_2 > P_3$ e $P_1 > P_2 + P_3$. Foram selecionados apenas três valores para que o tamanho da lista refletisse a ordem do SIC projetado.

3.6 Segunda Subfase de Estimativa: SIC

3.6.1 SIC

O SIC proposto é capaz de decodificar entre um e três sinais distintos e simultâneos. A quantidade de ciclos de cancelamentos sucessivos vai variar a depender da quantidade de sinais identificada por análise de hipóteses. É importante salientar que o modelo neste trabalho não leva em consideração as perturbações de sinal causadas por ruídos de canal e de componentes eletrônicos. Também não foram levadas em consideração as atenuações de potência decorrentes da distância entre transmissores e receptores.

Para o caso da identificação de um único sinal recebido, não é necessário realizar nenhum cancelamento, portanto os esquemáticos são idênticos aos apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6.

A Figura 3.7 apresenta a modulação de dois sinais distintos. O bloco de soma é utilizado a fim de simular a junção dos mesmos pelo canal. Para este caso, utiliza-se uma etapa de cancelamento, conforme apresentado nas Figuras 3.8, onde ocorre a demodulação do sinal de maior potência, e 3.9, onde, de fato, acontece a subtração dos sinais.

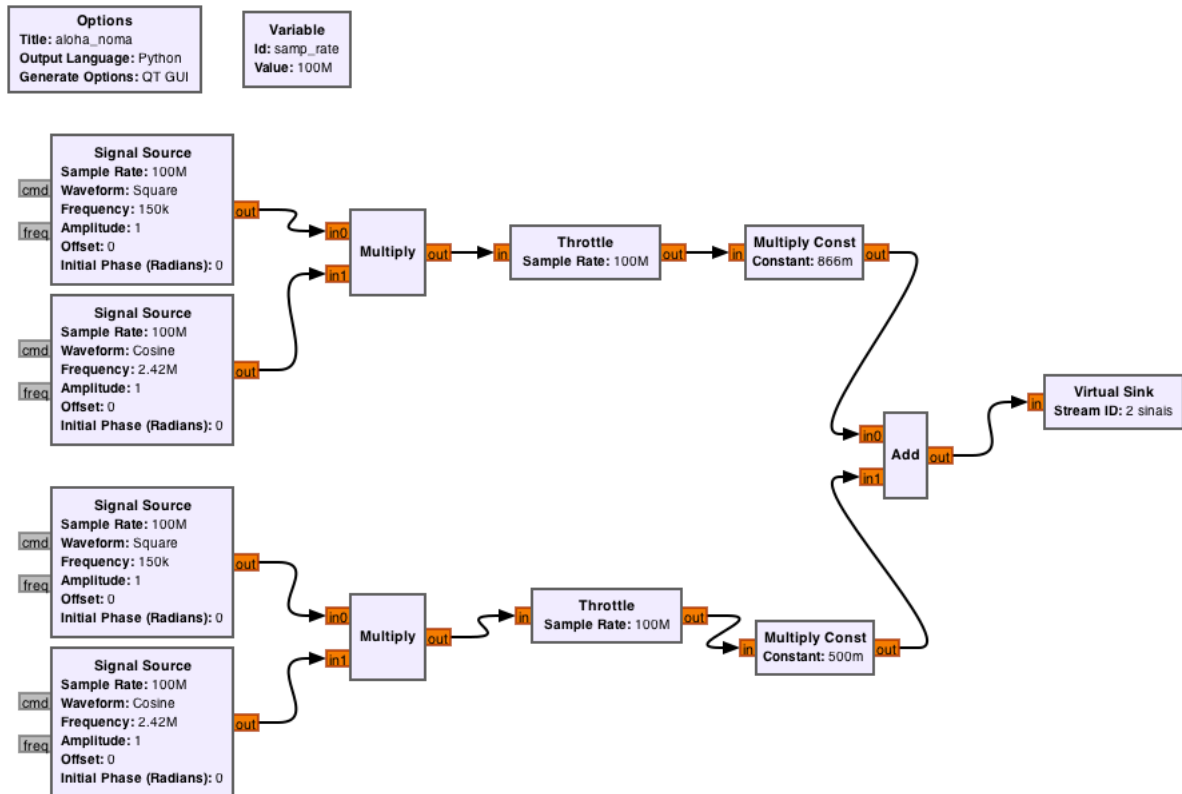


Figura 3.7. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a transmissão de dois sinais simultâneos que serão entregues ao SIC para demodulação.

O mesmo processo acontece na transmissão de sinais do esquemático representado na Figura 3.10, para o caso de três sinais. As Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 evidenciam as etapas necessárias para a separação completa de sinais.

Os primeiros blocos interligados no início dos esquemáticos das Figuras 3.7 e 3.10 já foram previamente explicados na seção 3.4.

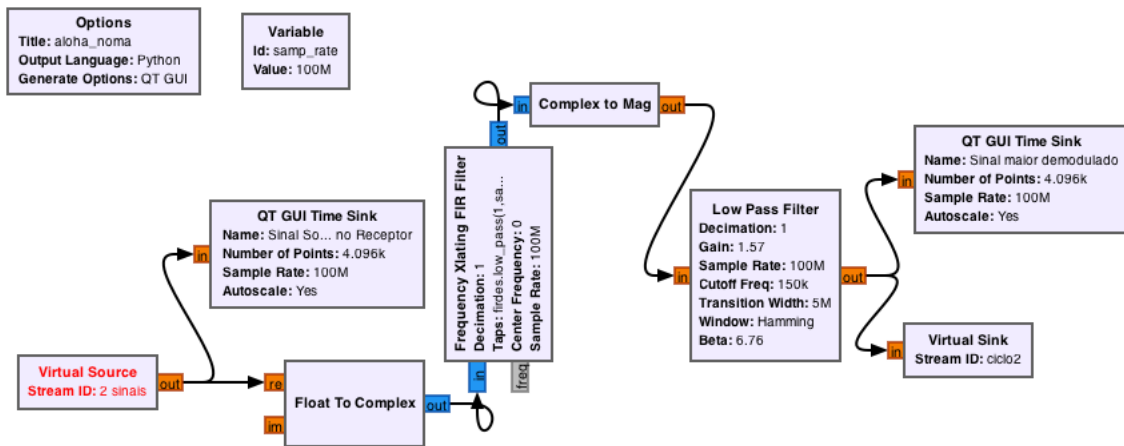


Figura 3.8. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de dois sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste primeiro estágio, o sinal de maior potência é demodulado.

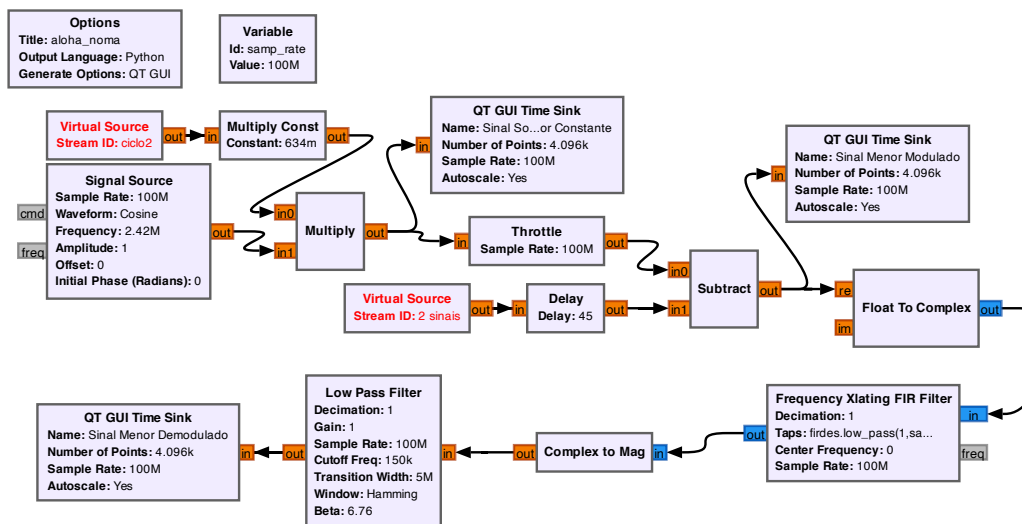


Figura 3.9. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de dois sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste segundo estágio, o sinal de menor potência é demodulado.

Independentemente da quantidade de sinais a serem demodulados, os blocos são os mesmos para todos os casos.

- **Multiply Const**

Este bloco foi inserido a fim de atribuir aos sinais de entrada as amplitudes de potência desejadas. Para o caso de dois sinais a serem transmitidos, na Figura 3.7, os valores escolhidos foram de 0,5 W para o sinal 1, que representa o valor de 0,25 W e 0,866 W para o sinal 2, que representa o valor 0,75 W. Para a transmissão da figura 3.10, os valores foram de 0,837 W, para 0,7 W, 0,447 W, para 0,2 W e

0, 316, para 0, 1 W. O bloco simplesmente multiplica a entrada conectada a ele por uma constante selecionada. É possível atribuir o valor de potência diretamente aos blocos *Signal Source*, entretanto optou-se por essa estratégia primária para que a sua substituição por um bloco de escolha de potência não necessite de manipulações em outros blocos.

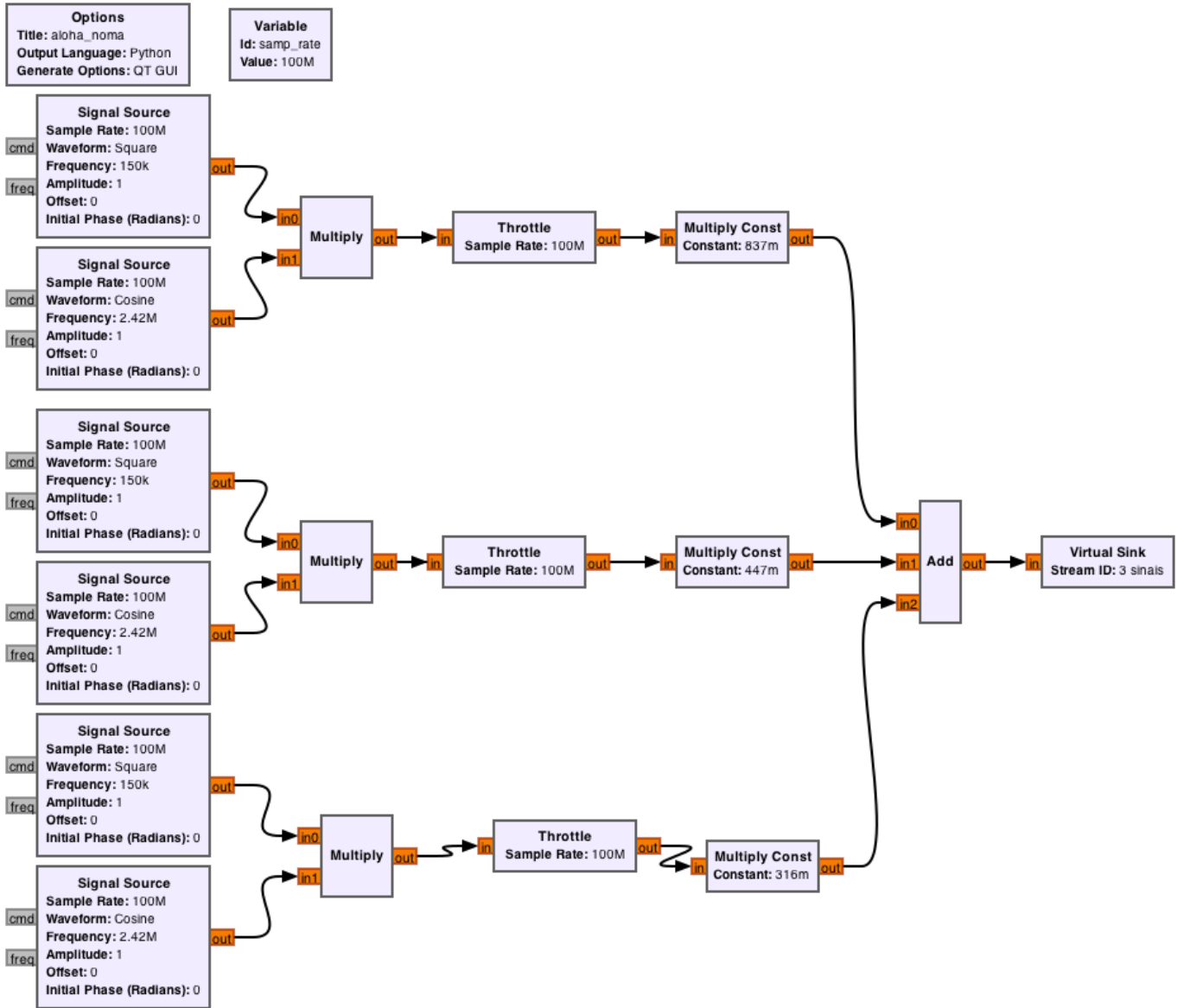


Figura 3.10. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a modulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC para demodulação.

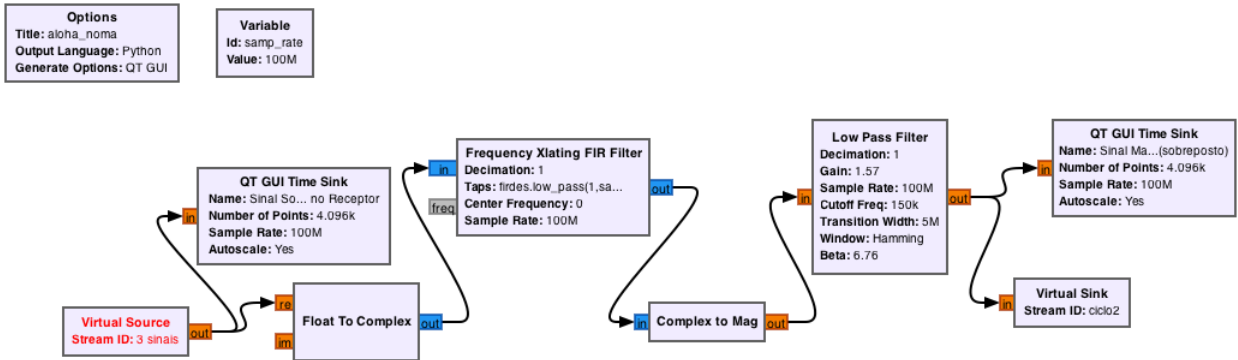


Figura 3.11. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, demodula-se o sinal sobreposto e considera-se que o resultado seja também a demodulação do sinal de maior potência.

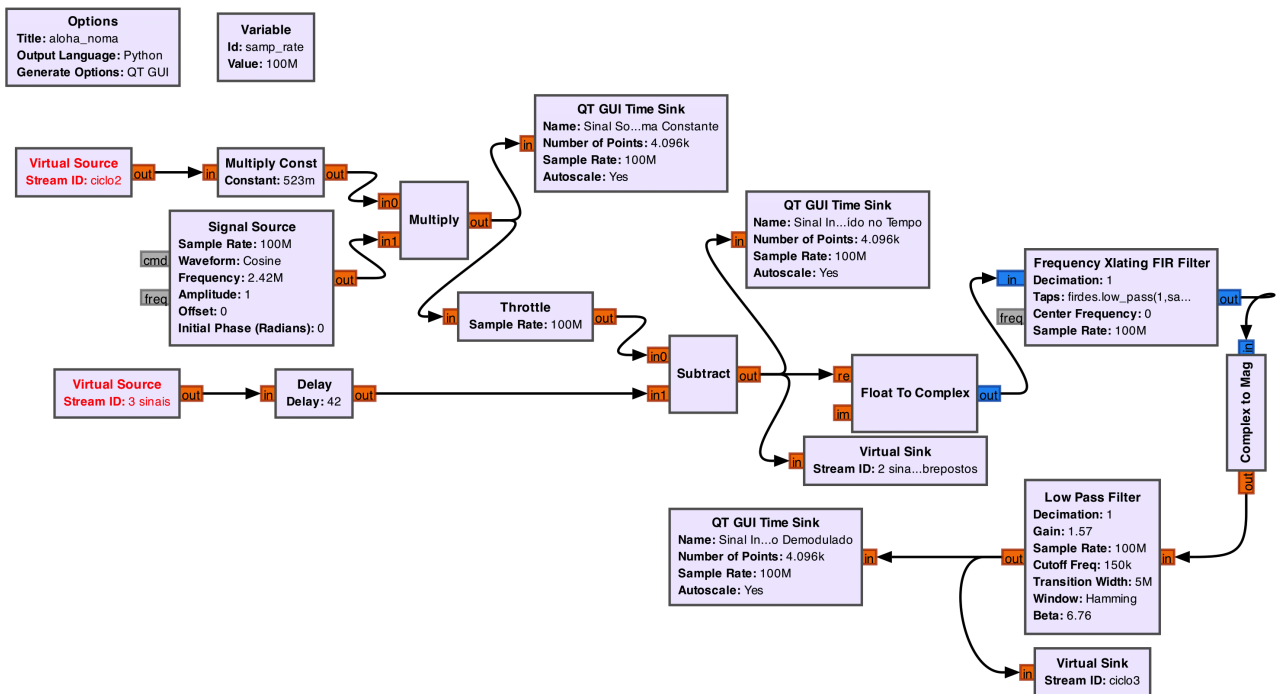


Figura 3.12. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, o sinal demodulado ainda é um sinal sobreposto, sendo a soma de dois outros sinais. Considera-se que o resultado seja também a demodulação do sinal de segunda maior potência.

- **Add**

O bloco de soma simplesmente soma os sinais de entrada com o intuito de simular a sobreposição dos mesmos que ocorre no canal.

- **Virtual Sink**

Funciona como conexão e foi utilizado em conjunto com o bloco *Virtual Source* para auxiliar na organização do esquemático. Conecta-se à saída dos blocos.

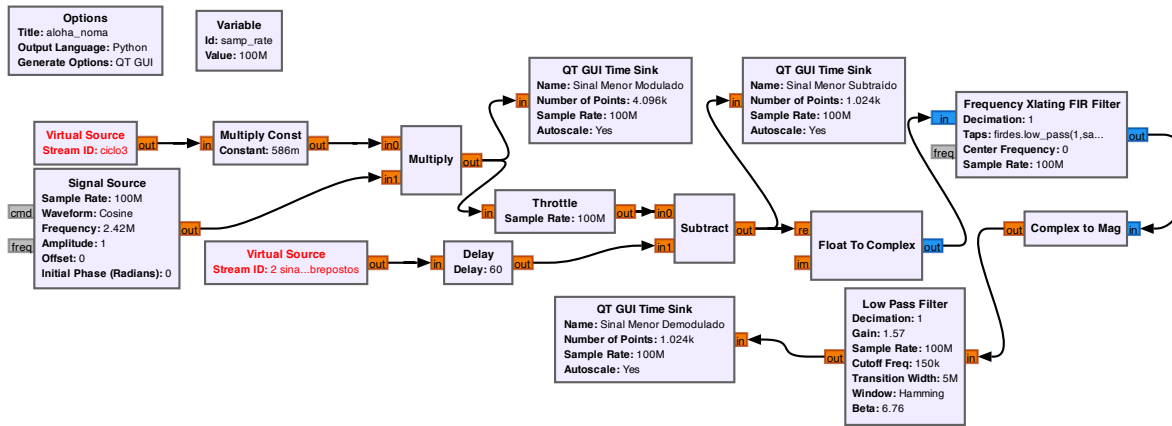


Figura 3.13. Diagrama esquemático em ambiente GNU Radio para a demodulação de três sinais simultâneos entregues ao SIC. Neste estágio, o último sinal, de menor potência, é demodulado.

- *Virtual Source*

Funciona como conexão e foi utilizado em conjunto com o bloco *Virtual Sink* para auxiliar na organização do esquemático. Conecta-se à entrada dos blocos.

- *Delay*

Incluído no esquemático para compensar o atraso de sinal causado por blocos de filtragem. Acrescenta o número desejado de amostras de valor zero ao início do sinal a ele conectado.

- *Subtract*

O bloco de subtração, que consiste em uma subtração simples entre dois sinais de entrada, foi empregado para separar do sinal sobreposto a porção referente aos sinais subsequentes.

A partir do primeiro bloco *Virtual Source*, inicia-se o processo de demodulação, cujos principais blocos já foram apresentados na Figura 3.6. Ao final deste processo, entende-se que o sinal obtido é o de maior potência, a ter seus bits interpretados a partir de limiar de decisão, mesmo que ele, na verdade, seja o sinal sobreposto contendo todos os outros. É possível fazer esta suposição pelo fato de a escolha das potências obedecer aos critérios $P_1 > P_2 > P_3$ e $P_1 > P_2 + P_3$.

Em seguida, acrescenta-se um bloco multiplicador ao resultado, com o peso m necessário para obter o valor original da maior potência alocada.

$$m = \frac{P_{original}}{P_{sobreposto}} \quad (3.1)$$

Este resultado é novamente modulado e subtraído do sinal original recebido no receptor. A saída desta subtração representa o sinal de menor potência modulado (ou o sinal de segunda maior potência, para o caso em que se tenha três sinais). Após a subtração, o sinal resultante é demodulado mais uma vez e a sua onda final é obtida. Para o cancelamento envolvendo três sinais distintos, este processo é novamente repetido, com a diferença de que o sinal base para a segunda subtração é o modulado do sinal de segunda maior potência, ou seja, o sobreposto dos sinais sem o sinal de maior potência.

Para que o cancelamento ocorra corretamente, faz-se sempre necessário que o sinal de entrada do estágio anterior seja compartilhado com o estágio seguinte, haja vista que ele servirá de base para a subtração que ocorrerá posteriormente.

3.7 Empacotamento de IDs e Retransmissão

A fase de empacotamento de IDs é realizada no transceptor da microbase e não foi contemplado no presente trabalho. Entretanto, nesta seção, elucida-se como este processo deve funcionar.

O empacotamento é realizado por um algoritmo após a decodificação das mensagens realizada pelo SIC. Com as mensagens devidamente decodificadas e os pacotes *bits* sem *payload* (transmitidos à microbase pelos transceptores SWIPT e discutidos na Seção 3.5) recuperados e armazenados em vetores ou matrizes, é necessário realizar o processamento responsável pela localização dos bits de identificação do dispositivo.

Para tal, define-se que a localização e o número de bits de identificação são sempre padronizados. Assim, basta isolar os bits e armazená-los em novo vetor, que será empacotado e transmitido de volta para os transceptores SWIPT.

Na Seção 3.5 foi explicado que, para transmitir um único pacote de dados, conforme as regras do protocolo, é necessário que o transceptor SWIPT realize duas transmissões distintas. A primeira diz respeito à transmissão de pacotes vazios. O intuito não é armazenar ou redirecionar o *payload*, e sim disponibilizar ao SIC da microbase os bits de identificação. Esta primeira transmissão é necessária para que seja realizado o empacotamento de IDs.

A retransmissão é como foi denominado, neste trabalho, o início da segunda transmissão realizada pelos transceptores SWIPT. Em posse do pacote contendo todos os IDs dos transceptores que tiveram suas mensagens devidamente decodificadas, a microbase o envia aos transceptores.

Se o transceptor identifica, neste sinal, o seu ID, *confirma* = 1, que, por sua vez, resulta em *aviso* = 0. Assim, é preparada a segunda transmissão, com um pacote contendo o real *payload*. Se o transceptor não identifica seu ID, mas a confirmação existe, *confirma* segue sendo nulo e ele continuará transmitindo o mesmo pacote vazio, mudando apenas o valor de potência selecionado, até que receba seu ID no sinal de confirmação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modulação

A simulação do esquemático exposto na Figura 3.5 retornou as formas de onda das figuras 4.1 e 4.4. A onda quadrada empregada como entrada teste do sistema simula infinitos bits que se alternam entre zero e um entrando para a modulação. A opção por escolher esta abordagem se deu pela simplicidade de visualização das diversas manipulações pelas quais as formas de onda passam. A Figura 4.1 mostra o resultado da modulação deste sinal. A resposta exprime intervalos de tempo em que se transmite uma senoide, e intervalos em que não há transmissão de nenhum sinal.

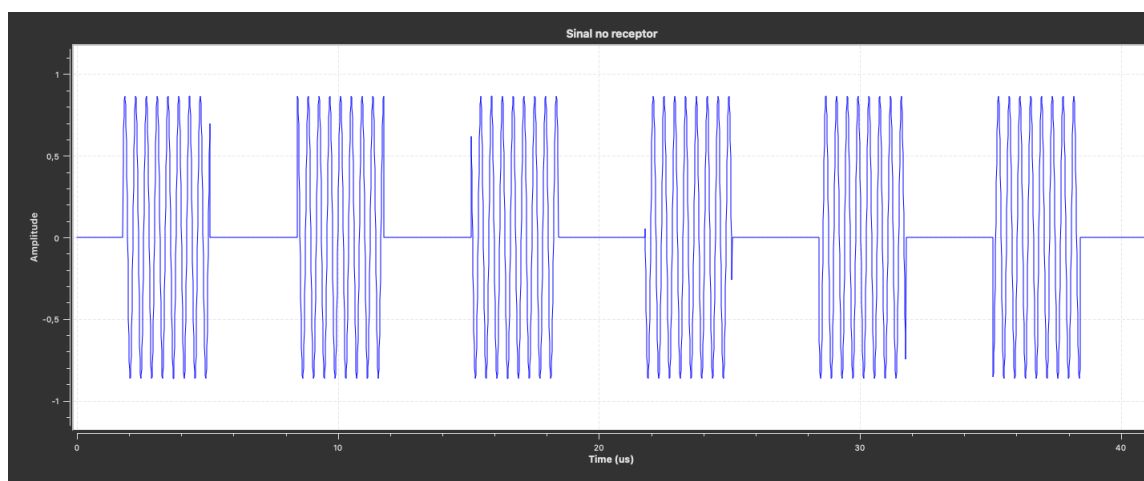


Figura 4.1. Forma de onda obtida a partir do esquemático da Figura 3.5. Sua amplitude diz respeito ao peso inserido de valor 0,866 W. Trata-se de uma onda quadrada modulada em ASK.

A Figura 4.4 apresenta o gráfico do sinal obtido pelo esquemático da Figura 3.6. O resultado não representa uma onda quadrada perfeita. O decaimento não ocorre a 90° em decorrência do tamanho da banda de transição selecionada no bloco de filtro passa-baixas, localizado ao final do processo de demodulação.

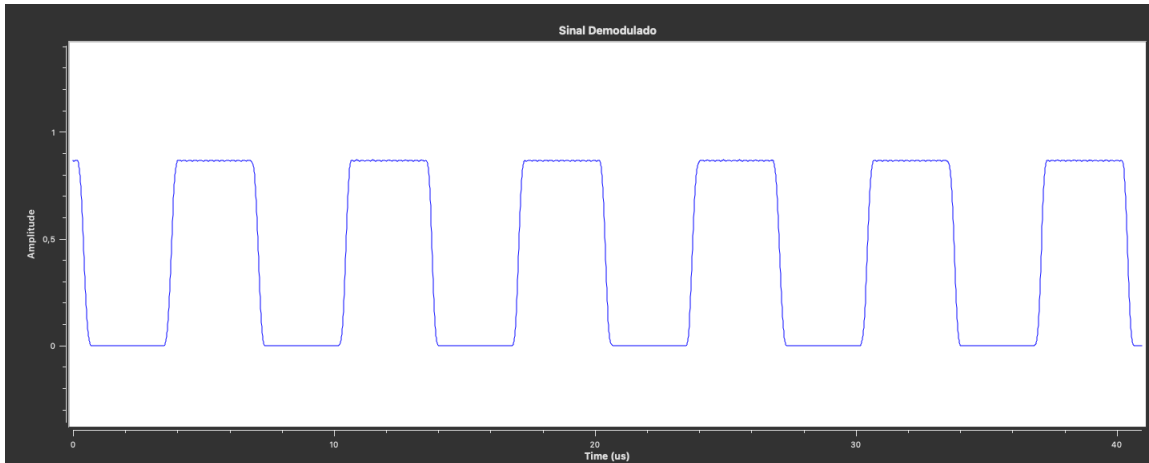


Figura 4.2. Forma de onda resultante do esquemático da Figura 3.6. Corresponde à demodulação da onda quadrada. As mudanças de nível de sinal ocorrem a pouco mais de 90° devido a configurações de filtro.

Inicialmente, o filtro passa-baixas foi utilizado com um valor de ganho unitário, entretanto, percebeu-se certa degradação de amplitude de sinal referente ao processo de filtragem. Por esta razão, o valor final para o ganho deste bloco tornou-se 1,57.

A modulação de todos os transceptores é realizada utilizando a lógica dos esquemáticos apresentados, com a diferença de valores de frequência de portadora. Ao passo que em *downlink* a frequência possui valor de $2,47GHz$, o *uplink* é realizado a uma frequência de $2,42GHz$. Os valores simulados encontram-se na ordem de MHz por limitação computacional.

A banda de transição para os blocos de filtragem foi definida com o valor de $5MHz$ por ser este o que melhor entregou os resultados no momento do cancelamento de interferências por subtração de sinais. Ainda assim, as extremidades das senoides nos momentos em que os bits assumem o valor de 1 sofrem grandes picos por consequência da banda de transição, mas não foi possível realizar simulações para valores maiores, também por limitações computacionais.

Após a implementação em GNU Radio, houve uma tentativa de implementação utilizando o SDR Adalm-Pluto, com o intuito de substituir a onda quadrada infinita por bits finitos escolhidos pelo usuário, todavia, não foi possível realizar a demodulação no momento da recepção.

Para que a demodulação fosse possível, seria necessário sincronizar o sinal em relação ao tempo, à fase e à frequência, bem como realizar filtragens para diminuir ruídos oriundos, principalmente, de efeitos de canal. Estes processos acrescentariam complexidade extra ao presente trabalho. Além disso, a ideia original era realizar um teste passando

o sinal transmitido da placa para um circuito demodulador de radiofrequência, mas a potência do sinal obtido foi inferior à mínima que o circuito é capaz de demodular, devido à grande atenuação que o sinal sofre ao ser transmitido pelo ar. O SDR Pluto conta com um módulo amplificador de sinal que também eleva consideravelmente os níveis de ruído. É essencial removê-los para que não haja grandes dificuldades durante a demodulação. Apesar disso, o circuito de radiofrequência com o qual se desejava realizar o teste não possui nenhum artifício para realizar qualquer tipo de amplificação. Por estas razões, as tentativas de implementação foram abandonadas e, nas seguintes seções, serão apresentados apenas resultados de simulação.

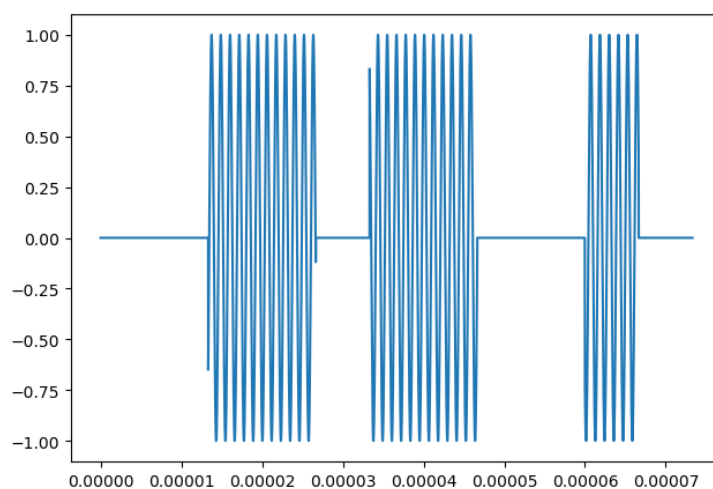


Figura 4.3. Forma de onda transmitida pelo SDR Pluto. Modulação ASK

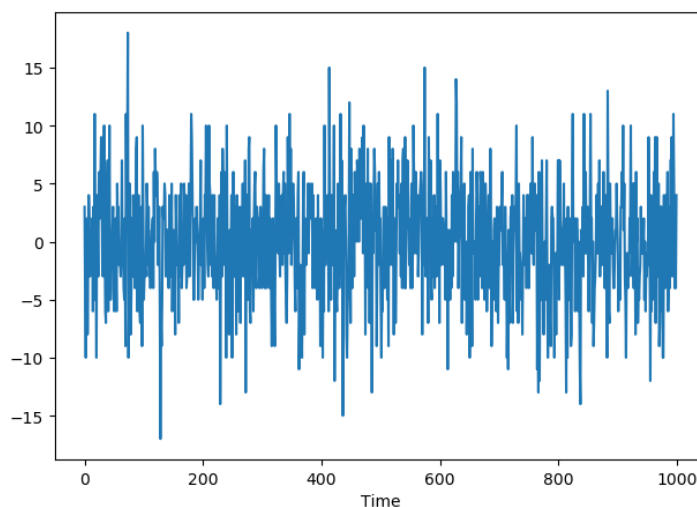


Figura 4.4. Forma de onda recebida pelo SDR Pluto. Percebe-se níveis de ruído maiores do que o próprio sinal enviado, que possui amplitude 1

4.2 Sinal de Aviso e Subfase ALOHA Puro

Em relação às partes que dizem respeito à lógica do protocolo ALOHA, existem três cenários possíveis. São eles: o transceptor SWIPT ser capaz de transmitir seu pacote de dados contendo o *payload* na primeira tentativa; ser capaz de transmitir, mas não na primeira tentativa; e não ser capaz de transmitir. Todos os cenários foram simulados utilizando o Algoritmo 1.

A quantidade de bits por pacote $n = 8$ e a quantidade máxima de repetições de transmissão $K_{max} = 12$ não foram alteradas em nenhum dos cenários.

4.2.1 Transmissão Bem-sucedida na Primeira Tentativa

O primeiro cenário é o ideal, no qual o transceptor é capaz de estabelecer contato com a microbase na primeira tentativa. Quando ele envia seu pacote vazio, recebe de volta no sinal de confirmação os seus bits identificadores.

Para que o código represente este cenário, basta executá-lo com $limite = 1$. Ele realizará o processo de gerar o pacote de bits e selecionar potência uma única vez. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão bem-sucedida na primeira tentativa

Bit	$T_b[ms]$	Potência Selecionada [W]
00110010 (pacote sem payload)	2215	0,2
00010110 (pacote com payload)	1354	0,2

Como, no código, os bits são gerados aleatoriamente, é dito que um representa o pacote vazio e o outro representa o pacote com *payload* devido ao momento em que são gerados. Os seus valores não são relevantes para a análise, neste momento. Se um ou mais bits dessas mensagens fossem de fato considerados como aqueles referentes ao ID do transceptor, seria necessário que eles se mantivessem os mesmos em ambos os casos. A potência de transmissão do pacote com *payload* permanece em 0,2, como inicialmente selecionado, porque foi com este valor de pico que ele pôde ser decodificado.

4.2.2 Transmissão Bem-sucedida, mas não na Primeira Tentativa

Para este caso, ainda é possível estabelecer contato com a microbase, entretanto são necessárias algumas tentativas falhas. Para simular o cenário, considerou-se que $limite = 5$. Desta forma, são necessárias cinco tentativas até que a transmissão seja bem-sucedida. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão de pacotes de dados sem *payload*. O pacote transmitido foi de 00111110

K	c	$T_b[ms]$	Potência Selecionada [W]
0	0	751	0,1
1	1	1204	0,7
2	2	2117	0,1
3	3	2982	0,1
4	4	2468	0,7

A tentativa final, na qual $K = 4$, foi a tentativa bem-sucedida. Portanto, o pacote com *payload* será transmitido a uma potência equivalente a $0,7 W$. O pacote vazio assumiu o valor de 00111110, e, com *payload*, tornou-se 01000110.

4.2.3 Transmissão não Realizada

O último cenário é onde não foi possível estabelecer comunicação com a microbase, o que resulta na perda dos dados do pacote. Como $K_{max} = 12$ e K é inicialmente nulo, foram realizadas treze tentativas, nenhuma bem-sucedida. Os resultados para este caso encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Resultados obtidos por meio do Algoritmo 1 para a transmissão de pacotes de dados sem *payload*. O pacote não transmitido foi de 10010101

K	c	$T_b[ms]$	Potência Selecioneada [W]
0	0	2215	0,2
1	1	1622	0,1
2	2	3759	0,1
3	3	498	0,7
4	4	1873	0,7
5	5	1228	0,1
6	6	2410	0,1
7	7	517	0,1
8	8	3437	0,1
9	9	3728	0,2
10	10	2934	0,7
11	11	116	0,7
12	12	2766	0,7

Como só foram definidos três níveis possíveis de potência, ocorreram diversas repetições sucessivas durante a seleção. O mesmo pode acontecer com outros transceptores, fazendo com que tentem transmitir a um mesmo valor. A eficiência é ainda mais comprometida conforme o aumento do número de módulos disponíveis na malha. Ainda assim, a estratégia de seleção de potência, aliada a cancelamentos de interferências, fornece resultados mais atrativos do que os obtidos em um protocolo de comunicação puramente ALOHA.

4.3 Subfase de Estimativa: SIC

4.3.1 SIC

As formas de onda moduladas e demoduladas, para o caso de haver apenas um sinal sendo transmitido, são as mesmas já apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.4 da Seção 4.1 e não serão revisitadas nesta, pois não há necessidade de cancelamento.

A onda resultante da transmissão de 2 sinais modulados, gerada pelo esquemático da Figura 3.7, é apresentada na Figura 4.5.

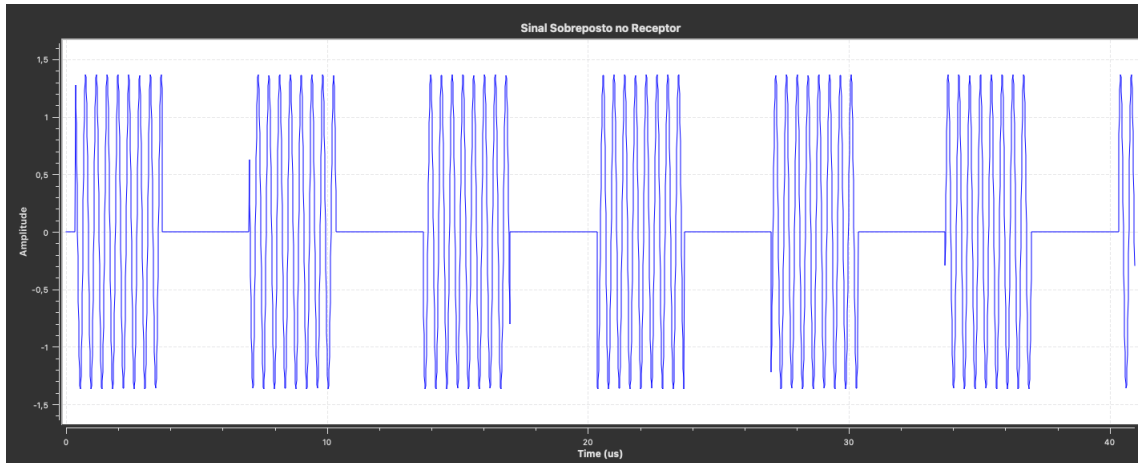


Figura 4.5. Forma de onda ao início da recepção em decorrência da transmissão de dois sinais simultâneos. Representa também a forma de onda do sinal transmitido, pois não foram incluídos efeitos de canal no sistema.

A demodulação deste sinal sobreposto resulta na mensagem do sinal de amplitude $0,866\text{ W}$, demonstrada na Figura 4.6.

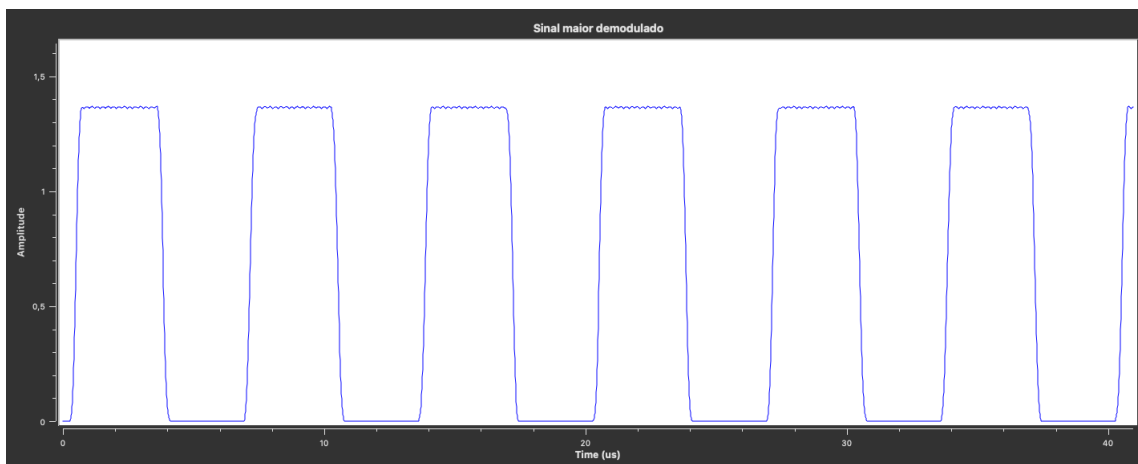


Figura 4.6. Sinal sobreposto demodulado. Pelo fato de um dos sinais possuírem maior amplitude (o de $0,866\text{ W}$), este resultado é considerado como sendo a sua demodulação.

Este sinal é, então, multiplicado pela constante $0,624$, a fim de recuperar a sua amplitude original, que é importante para a etapa de cancelamento. O resultado desta multiplicação é mostrado na Figura 4.7 e possui amplitude de, aproximadamente, $0,866\text{ W}$, como esperado, desconsiderando pequenas oscilações no pico oriundas dos processos de filtragem e de arredondamento de valores.

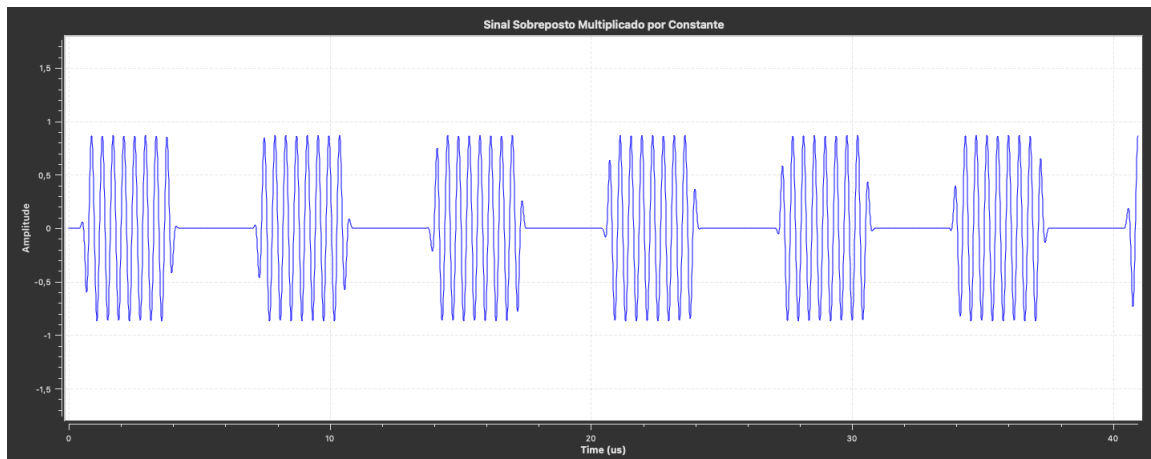


Figura 4.7. Sinal maior remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de amplitude.

A próxima etapa do esquemático é o cancelamento em si, ou seja, a subtração entre o sinal da Figura 4.7 e o sinal da Figura 4.5. O resultado desta subtração encontra-se no gráfico da Figura 4.8. Nela, percebe-se um cancelamento imperfeito, oriundo de atraso inserido pelo processo de filtragem do bloco *Low Pass Filter* (o filtro passa-baixas).

Além disso, também em decorrência da subtração imperfeita, a amplitude do sinal que se deseja obter possui valor de pico incorreto, bem abaixo de $0,5\text{ W}$, mesmo que se desconsidere as extremidades.

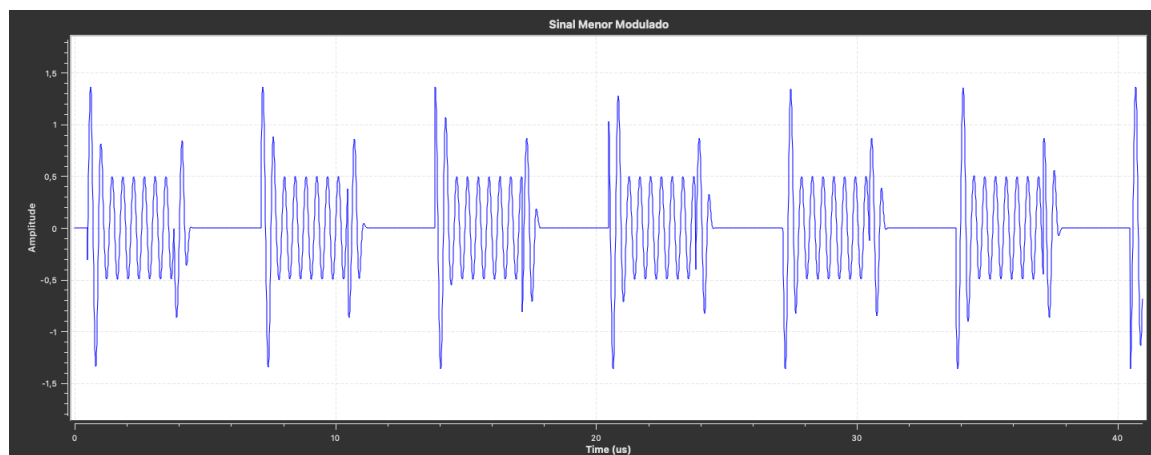


Figura 4.8. Resultado da subtração entre o sinal da Figura 4.5 e o sinal da Figura 4.7. Aponta não sincronia entre os sinais, causada pelo processamento do sinal da Figura 4.7.

Após a demodulação, o sinal obtido a partir desta operação é representado na Figura 4.9.

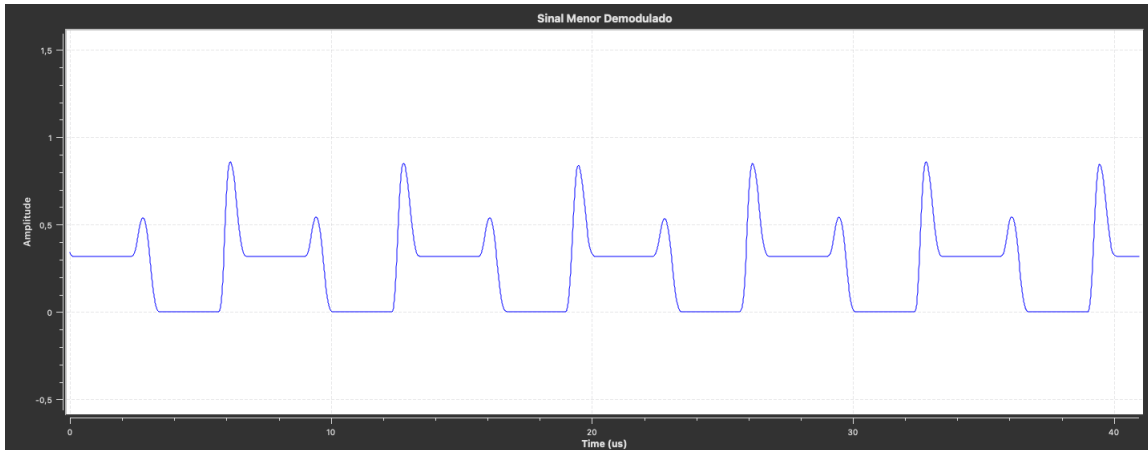


Figura 4.9. Resultado da demodulação dos sinais dessincronizados. Além de picos causados pela subtração imperfeita, a amplitude obtida está bem abaixo do esperado, de 0,5 W.

A solução selecionada para lidar com este empecilho foi adicionar um atraso ao sinal da Figura 4.5. Esta é a função do bloco *Delay* presente na Figura 4.10. Inseriu-se, também, um bloco gráfico para visualizar a defasagem causada pela filtragem. Este bloco possui duas entradas, nas quais em uma é inserida a saída do Delay, a princípio com o valor de zero, e na outra insere-se a saída do bloco *Throttle* (sinal defasado). O resultado aparece na Figura 4.11.

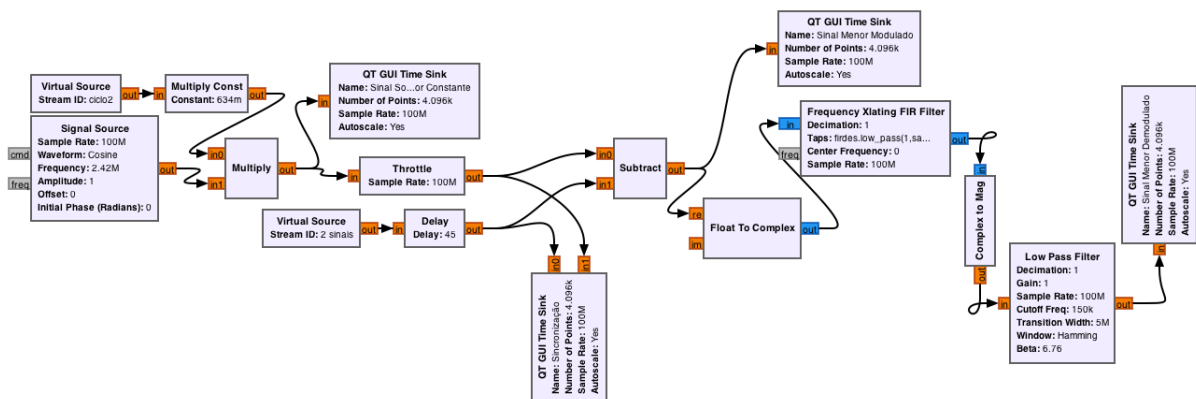


Figura 4.10. Inserir Time Sink no diagrama para auxiliar na correção da defasagem de sinal. Bloco delay teve seu valor alterado de modo a encontrar a melhor forma de onda possível para o resultado da subtração dos sinais.

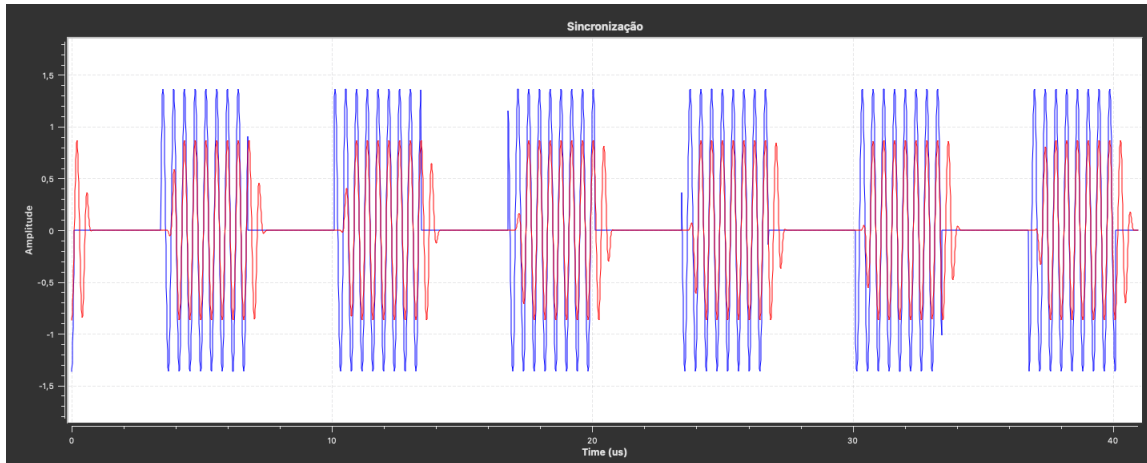


Figura 4.11. Sinais de entrada e sobreposto processado colocados em conjunto no gráfico para análise de defasagem.

Com este resultado em mão, incluiu-se o bloco *Delay*, cuja função é atrasar o sinal mediante certo número de amostras pré-definido. A definição da quantidade de amostras selecionadas neste bloco foi realizada mediante análise gráfica. As amostras foram ajustadas manualmente até que alinhassem ambos os sinais, de modo a obter o melhor cancelamento possível, o que ocorreu no valor de 45 amostras. O sinal obtido após a inserção do atraso encontra-se na Figura 4.12.

Esta solução deverá passar por ajustes em futuras implementações em hardware. Para abordagens que ainda façam uso do GNU Radio, uma possibilidade é substituir o bloco *Delay* pelo bloco *Symbol Sync*, próprio para realizar sincronizações. Além disso, é possível realizar implementações considerando o atraso característico do filtro. Como ele é determinístico, seu atraso é quantificável com confiabilidade. Basta acrescentar este atraso à solução.

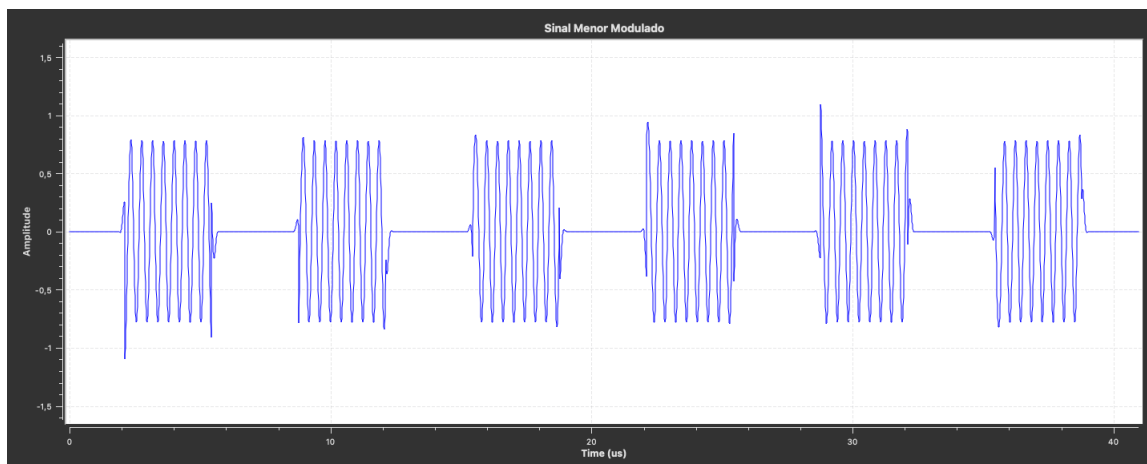


Figura 4.12. Resultado da subtração dos sinais após a inserção do Delay. Corresponde ao sinal menor modulado e possui a amplitude esperada, de 0,5 W.

Depois da demodulação apresentada na Figura 4.13, é possível perceber que o sinal melhorou consideravelmente, apesar de ainda haver pequenos resíduos. O nível de amplitude, agora de 0.5 W, também foi corrigido. Não foi possível eliminar completamente os resíduos do processo de cancelamento, uma vez que seria necessário alterar a banda de transição dos filtros para além do que as ferramentas computacionais disponíveis para a realização do trabalho seriam capazes de processar. Assim sendo, este foi o melhor resultado alcançado.

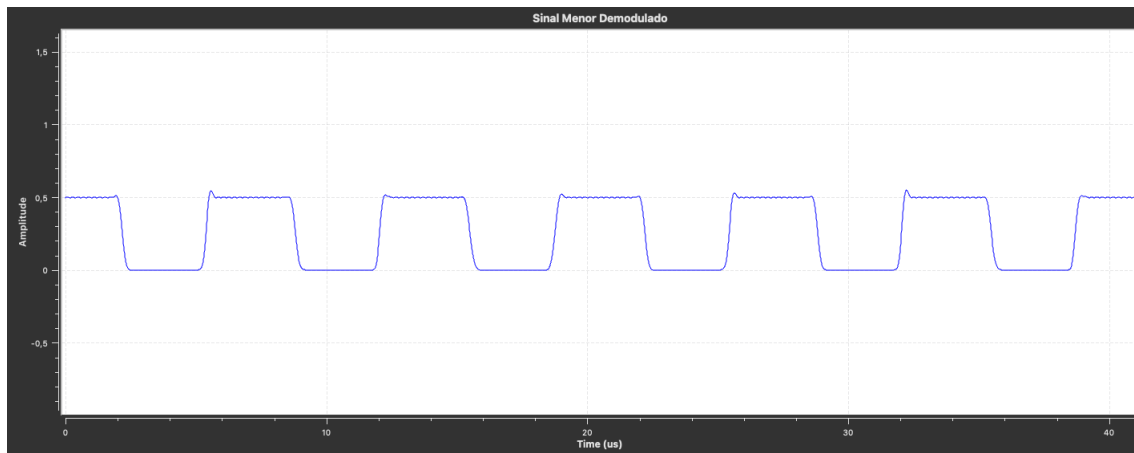


Figura 4.13. Última forma de onda do processo de SIC para decodificação de dois sinais. Corresponde ao demodulado do sinal menor.

Situações semelhantes foram identificadas na recepção de três sinais simultâneos. O sinal que chega ao receptor é apresentado na Figura 4.14 e demodulado na Figura 4.15.

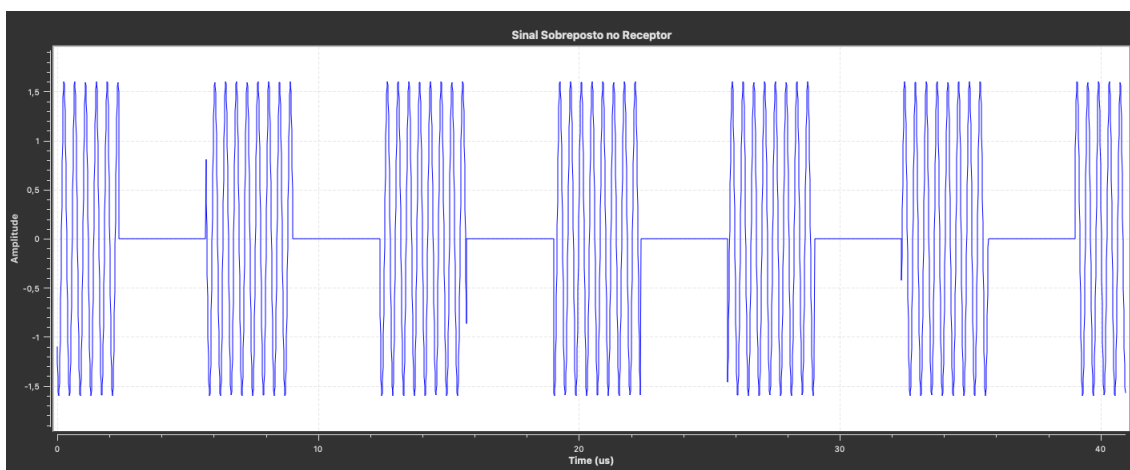


Figura 4.14. Forma de onda ao início da recepção em decorrência da transmissão de três sinais simultâneos. Representa também a forma de onda do sinal transmitido, pois não foram incluídos efeitos de canal no sistema.

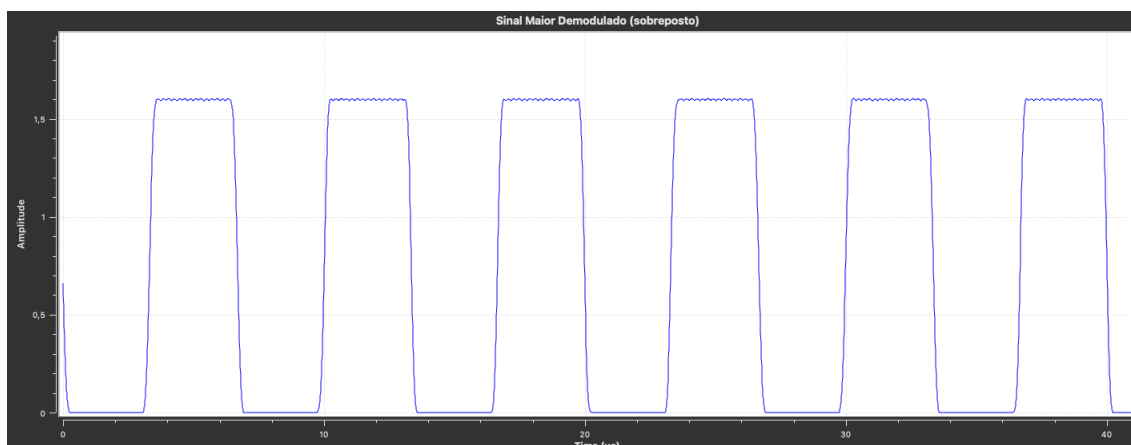


Figura 4.15. Sinal sobreposto demodulado. Como no caso de recepção de dois sinais, é considerado o resultado da demodulação do sinal de maior amplitude, no caso 0,837 W

Para obter-se novamente uma amplitude de 0,837 W, o sinal da Figura 4.15 é multiplicado pela constante 0,523 e posteriormente remodulado, resultando na onda da Figura 4.16.

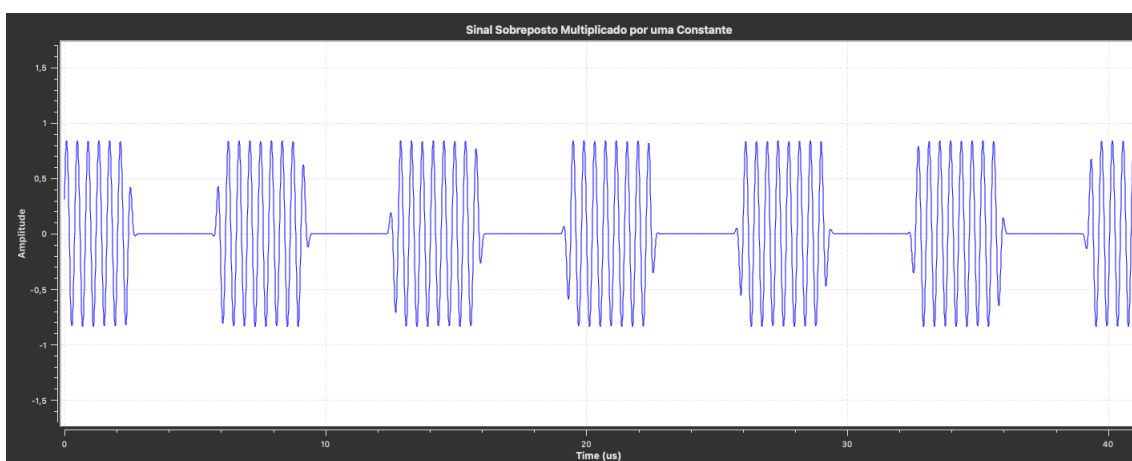


Figura 4.16. Sinal maior remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de amplitude.

Como feito para o cancelamento de dois sinais, adicionou-se um atraso ao sinal de entrada do receptor. O valor selecionado foi de 42 amostras, e o cancelamento resultou no sinal da Figura 4.17. Este sinal é a sobreposição do sinal de amplitude de 0,447 W com o sinal de amplitude 0,316 W. O valor obtido foi de, aproximadamente, 0,763 W (Figura 4.18).

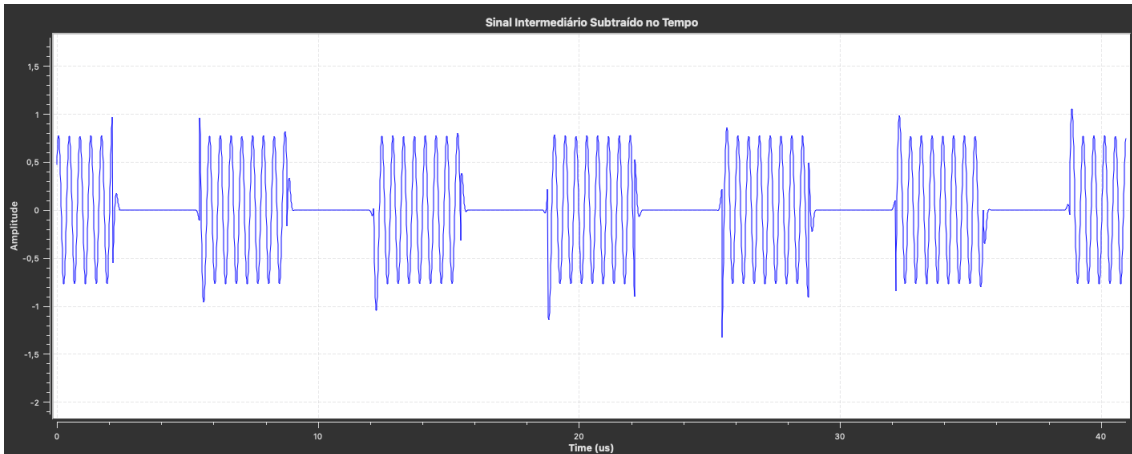


Figura 4.17. Sobreposição entre os sinais de amplitude 0,447 W e 0,316 W

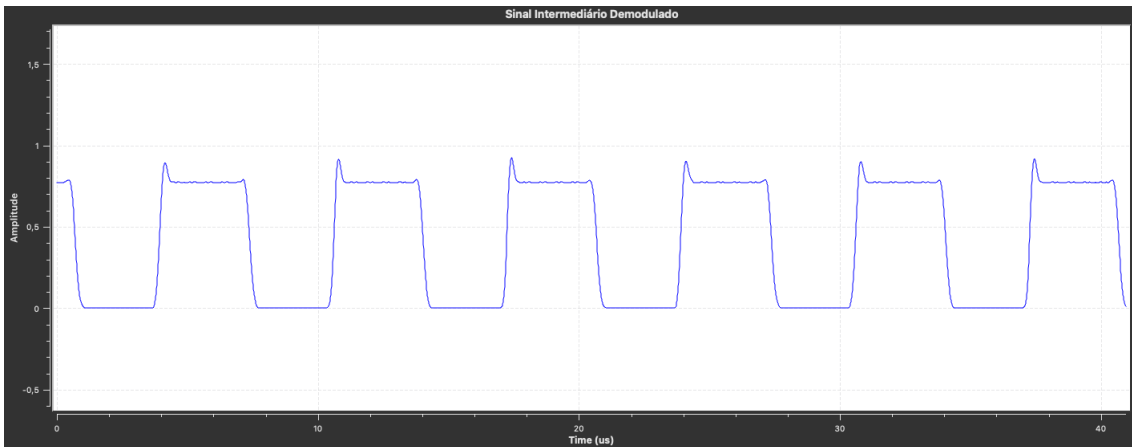


Figura 4.18. Demodulação da sobreposição entre os sinais de amplitude 0,447 W e 0,316 W. É tido como o resultado da demodulação do sinal de potência intermediária (0,447 W).

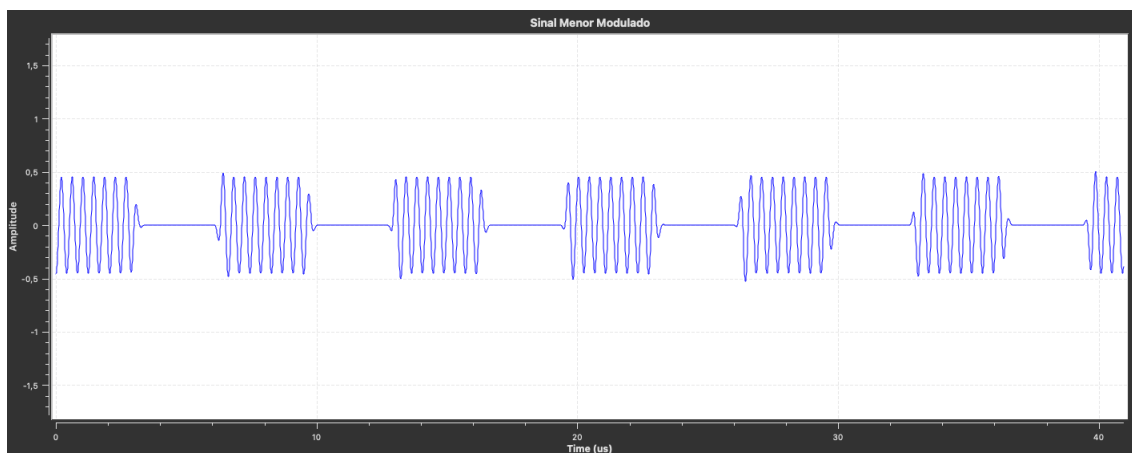


Figura 4.19. Sinal intermediário remodulado e corrigido para refletir seus níveis originais de potência.

Para o ciclo final de cancelamento, o sinal foi multiplicado por 0,586 e modulado

novamente. O sinal de amplitude de 0,316 W é, então, obtido a partir da subtração do sinal da Figura 4.19 e do sinal da Figura 4.17 atrasado em 40 amostras. Obteve-se, assim, o sinal da Figura 4.20, que é representado demodulado pela Figura 4.21.

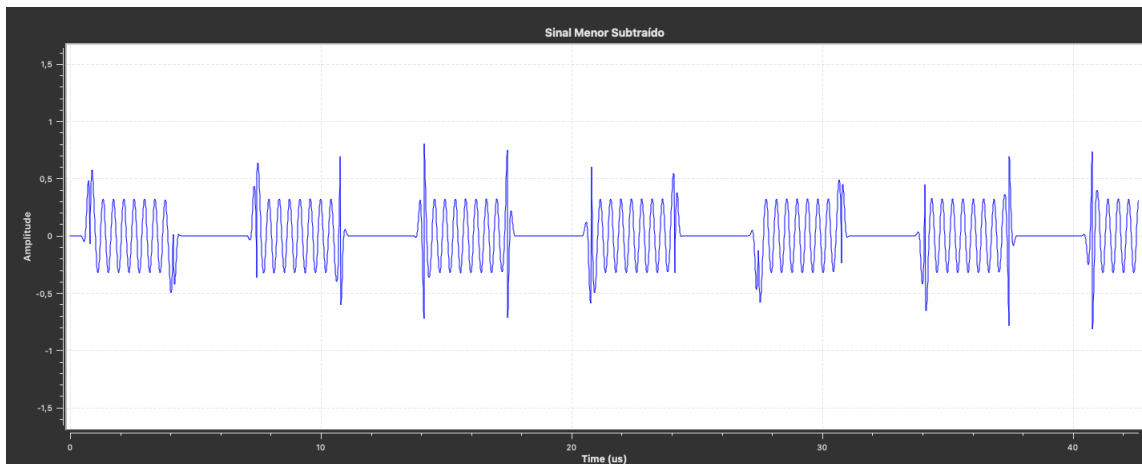


Figura 4.20. Sinal de amplitude 0,316 W modulado obtido pela subtração dos sinais das Figuras 4.19 e 4.17. Já houve a correção de defasagem.

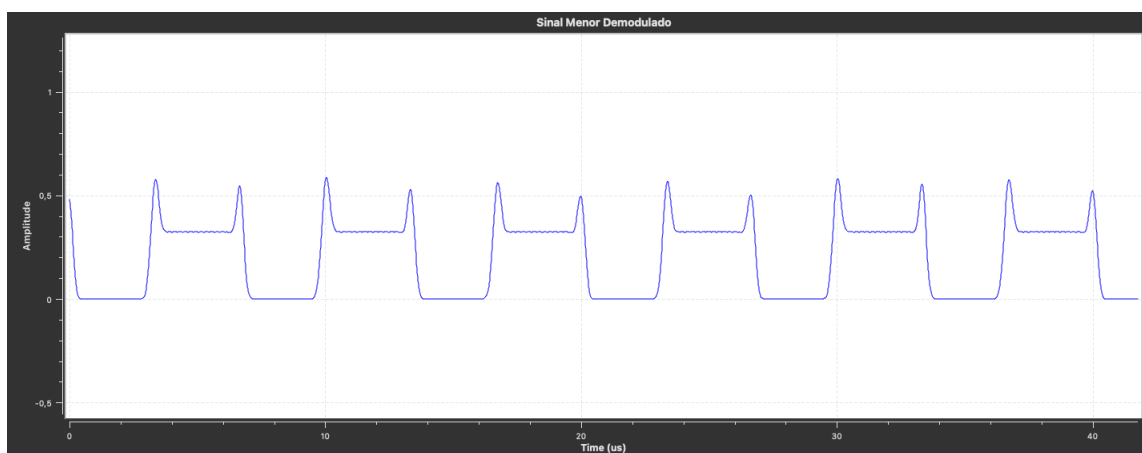


Figura 4.21. Última forma de onda do processo de SIC para decodificação de três sinais. Corresponde ao demodulado do sinal menor (0,316 W).

Ao comparar o resultado final de forma de onda obtida após os cancelamentos, percebe-se que o erro decorrente da subtração imperfeita advinda do valor da largura de banda de transição se propaga e degrada cada vez mais o sinal a cada novo cancelamento realizado. Entretanto, para todos os casos analisados, estes erros não impedem a decodificação dos bits, e ainda é possível utilizar os valores iniciais de amplitude como limiar de decisão para decifrar a mensagem enviada.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs a simulação de uma implementação do protocolo digital ALOHA NOMA para uma aplicação envolvendo sensores IoT com tecnologia SWIPT integrada. Os resultados obtidos foram capazes de demonstrar o funcionamento do protocolo. Ele é condizente com a aplicação, porém, para que de fato seja de valia em grandes redes de sensores IoT, seria necessário a implementação de sistema mais complexo que o estudado, a começar por um aumento da ordem do SIC e das quantidades de níveis de potência disponíveis para seleção. Isso aumenta consideravelmente o nível de complexidade de realização da fase de estimativa.

Certas porções do protocolo foram realizadas em ferramentas computacionais distintas. O SIC e a modulação foram desenvolvidos no software GNU Radio, com o intuito de facilitar integração da solução com implementações em hardwares, a exemplo de rádios definidos por software. As porções referentes a ALOHA foram desenvolvidas em Matlab devido à boa compatibilidade com rádios definidos por software e outros hardwares, de forma que não causará empecilhos em posteriores evoluções e implementações do método. Também há a vantagem de permitir mais simples implementação de laços e condicionais, quando comparado ao GNU Radio. Entretanto, para a integração entre o Algoritmo 1 e o SIC, é melhor que ambos sejam desenvolvidos com o uso de ferramentas compatíveis entre si, como é o caso da linguagem Python.

A modulação ASK desenvolvida em GNU Radio foi implementada com rapidez e sem grandes contratempos, o que evidencia o poder desta ferramenta para a prototipagem de sistemas de comunicação. O protocolo ALOHA também contribuiu positivamente para a aplicação pretendida, apesar da baixa eficiência, compensada pelo NOMA. O protocolo oferece regras simples e de implementação descomplicada, aliadas a uma segunda técnica já mais complexa, e ajuda a diminuir o tempo de implementação e a voltar o foco realmente para estratégias que visam a melhora em eficiência, ou seja, a diminuição de pacotes de dados perdidos.

O SIC implementado em GNU Radio para a porção relacionada ao NOMA foi capaz de cancelar até três sinais transmitidos simultaneamente, desde que estes respeitassem a

condição de terem níveis de potência distintos entre si e que o sinal de maior potência tenha sempre amplitude superior à soma dos níveis de potência dos outros dois sinais. Apesar do cancelamento bem-sucedido, o SIC alcançado é imperfeito, apresentando resíduos de sinais subtraídos anteriormente por consequência da impossibilidade de melhorar a transição de banda dos filtros utilizados ao longo do processo. Esses erros vão se propagando e se tornando maiores à medida que os cancelamentos ocorrem. Não causa problemas para a demodulação no caso abordado, devido à baixa quantidade de cancelamentos sucessivos, entretanto, faz-se necessário resolver esta questão, caso a ordem do SIC seja superior ou a quantidade de dispositivos na rede seja elevada, como acontece no caso da aplicação pretendida. Também é necessário aumentar a quantidade de valores possíveis para os níveis de potência a serem selecionados.

5.1 Trabalhos Futuros

O Protocolo ALOHA NOMA é uma arquitetura nova, que une o Protocolo ALOHA, da década de 1970, com o acesso múltiplo não ortogonal, NOMA, que surgiu como tecnologia pretendida para o 5G. Desta forma, existem diversos trabalhos a serem realizados.

Algumas possíveis ramificações para o presente trabalho são:

- A mudança da modulação utilizada para uma que possibilite uma maior quantidade de símbolos a transmitir;
- Desenvolvimento do Algoritmo 1 em Python para uma melhor compatibilidade com o GNU Radio;
- A implementação do protocolo em hardware;
- Acrescentar um código corretor de erros à solução, por exemplo, de Hamming, para auxiliar na estratégia de cancelamento de interferências;
- Investigação e propostas de outras arquiteturas para o SIC;
- Inserção de modelos de canal e ruído, e suas consequências para a arquitetura;
- Comparativo de testes de múltiplas hipóteses a serem aplicados na etapa de estimativa de quantidade de dispositivos na rede;
- Aplicação do protocolo ALOHA NOMA em outros contextos;

Referências Bibliográficas

- [1] Golshan Famitafreshi, M. Shahwaiz Afaqui, e Joan Melià-Seguí. A comprehensive review on energy harvesting integration in iot systems from mac layer perspective: Challenges and opportunities. *Sensors*, 21(9), 2021.
- [2] Jie Ding, Mahyar Nemati, Chathurika Ranaweera, e Jinho Choi. Iot connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 8:67646–67673, 2020.
- [3] Ioannis Krikidis, Stelios Timotheou, Symeon Nikolaou, Gan Zheng, Derrick Wing Kwan Ng, e Robert Schober. Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(11):104–110, 2014.
- [4] A. S. Tanenbaum e D. Wetherall. *Computer Networks*. Pearson, London, UK, 2011.
- [5] Behrouz A. Forouzan. *Data Communications and Networking*. McGraw-Hill, New York, NY, 2007.
- [6] Jehad M. Hamamreh. Non-orthogonal multiple access (noma): Motivation, concept, pros., cons., more. https://www.youtube.com/watch?v=HGVxvxpzlK4&t=2230s&ab_channel=JehadM.Hamamreh, 2020. Acesso: 01-11-2020.
- [7] Adalm-pluto. <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html>. Acesso: 28-10-2021.
- [8] I. Peña-López. Itu internet report 2005: The internet of things. Technical report, 2005.
- [9] Mohammad Baniata, Haftu Tasew Reda, Naveen Chilamkurti, e Alsharif Abuadbbba. Energy-efficient hybrid routing protocol for iot communication systems in 5g and beyond. *Sensors*, 21(2), 2021.
- [10] :X. NGUYEN, H. Tran Dinh, O. Onireti, T. Tran Phu, S. Nguyen Quang, S. Chatzinotas, e P H. Vincent. Backscatter-assisted data offloading inofdma-based wireless

- powered mobile edge computing for iot networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021.
- [11] Anh-Nhat Nguyen, Van Nhan Vo, Chakchai So-In, e Dac-Binh Ha. System performance analysis for an energy harvesting iot system using a df/af uav-enabled relay with downlink noma under nakagami-m fading. *Sensors*, 21(1), 2021.
- [12] Dinh-Hieu Tran, Van-Dinh Nguyen, Sumit Gautam, Symeon Chatzinotas, Thang Vu, e Björn Ottersten. Uav relay-assisted emergency communications in iot networks: Resource allocation and trajectory optimization. 08 2020.
- [13] Phu Tran Tin, Tan N. Nguyen, Dinh-Hieu Tran, Miroslav Voznak, Van-Duc Phan, e Symeon Chatzinotas. Performance enhancement for full-duplex relaying with time-switching-based swipt in wireless sensors networks. *Sensors*, 21(11), 2021.
- [14] Cisco Community. White Paper: Cisco annual internet report (2018-2023). Technical report, Cisco: San Jose, CA, USA, 2020.
- [15] Vasaki Ponnusamy, Low Tang Jung, Thinaharan Ramachandran, e Noor Zaman. Bio-inspired energy scavenging in wireless ad hoc network. In *2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*, pages 1–5, 2017.
- [16] J.R. Vacca. *Chapter 11: Computer and Information Security Handbook*. Morgan Kaufmann, Amsterdam, The Netherlands, 2012.
- [17] Yong-Gi Hong, SeongJun Hwang, Jiho Seo, Jonghyeok Lee, e Jaehyun Park. Real-time implementation of distributed beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in interference channels. *ETRI Journal*, 43, 12 2020.
- [18] Weidang Lu, Xiaohan Xu, Guoxing Huang, Bo Li, Yuan Wu, Nan Zhao, e F. Richard Yu. Energy efficiency optimization in swipt enabled wsns for smart agriculture. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6):4335–4344, 2021.
- [19] Shu Han, Xiao-ming Liu, Hong-yu Huang, Fei Wang, e Yuan-hong Zhong. Research on energy-efficient routing algorithm based on swipt in multi-hop clustered wsn for 5g system. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 03 2021.
- [20] Guodong Wang, Yanixao Zhao, Jun Huang, Qiang Duan, e Jun Li. A k-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network. pages 1–6, 05 2016.

- [21] Tran Dinh Hieu, L. Dung, e Byung-Seo Kim. Stability-aware geographic routing in energy harvesting wireless sensor networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16, 2016.
- [22] Suzhi Bi, Chin Keong Ho, e Rui Zhang. Wireless powered communication: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 53(4):117–125, 2015.
- [23] Dusit Niyato, Dong In Kim, Marco Maso, e Zhu Han. Wireless powered communication networks: Research directions and technological approaches. *IEEE Wireless Communications*, 24(6):88–97, 2017.
- [24] Tan N. Nguyen, Minh Tran, Thanh-Long Nguyen, Duy-Hung Ha, e Miroslav Voznak. Multisource power splitting energy harvesting relaying network in half-duplex system over block rayleigh fading channel: System performance analysis. *Electronics*, 8(1), 2019.
- [25] Seunghyun Lee, Rui Zhang, e Kaibin Huang. Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(9):4788–4799, 2013.
- [26] Marco Maso, Chen-Feng Liu, Chia-Han Lee, Tony Q. S. Quek, e Leonardo S. Cardoso. Energy-recycling full-duplex radios for next-generation networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(12):2948–2962, 2015.
- [27] Tan N. Nguyen, Tran Hoang Quang Minh, Phuong T. Tran, Miroslav Voznak, Tran Trung Duy, Thanh-Long Nguyen, e PHU Tran Tin. Performance enhancement for energy harvesting based two-way relay protocols in wireless ad-hoc networks with partial and full relay selection methods. *Ad Hoc Networks*, 84:178–187, 2019.
- [28] Tran Dinh Hieu, Tran Trung Duy, e Byung-Seo Kim. Performance enhancement for multihop harvest-to-transmit wsns with path-selection methods in presence of eavesdroppers and hardware noises. *IEEE Sensors Journal*, 18(12):5173–5186, 2018.
- [29] Bryce Kellogg, Aaron Parks, Shyamnath Gollakota, Joshua R. Smith, e David Wetherall. Wi-fi backscatter: Internet connectivity for rf-powered devices. In *Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM*, SIGCOMM '14, page 607–618, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [30] Tran Dinh Hieu, Tran Trung Duy, e Seong Gon Choi. Performance enhancement for harvest-to-transmit cognitive multi-hop networks with best path selection method under presence of eavesdropper. In *2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, pages 323–328, 2018.
- [31] Lav R. Varshney. Transporting information and energy simultaneously. In *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 1612–1616, 2008.

- [32] M. S. Masouleh, A. Kaddour, e S. Georgakopoulos. Recent advances in wireless systems for simultaneous power and data transfer. In *2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*, pages 1–2, April 2019.
- [33] Ulkuhan Guler, Mohammad S.E. Sendi, e Maysam Ghovanloo. A dual-mode passive rectifier for wide-range input power flow. In *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pages 1376–1379, 2017.
- [34] Michael Whitaker. Energy harvester produces power from local environment, eliminating batteries in wireless sensors. <https://www.analog.com/en/technical-articles/energy-harvester-produces-power-from-local-environment.html>. Acesso: 20-10-2021.
- [35] Xin Kang, Chin Keong Ho, e Sumei Sun. Full-duplex wireless-powered communication network with energy causality, 2014.
- [36] Pulkit Grover e Anant Sahai. Shannon meets tesla: Wireless information and power transfer. In *2010 IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 2363–2367, 2010.
- [37] Rui Zhang e Chin Keong Ho. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(5):1989–2001, 2013.
- [38] Rushi J. Vyas, Benjamin B. Cook, Yoshihiro Kawahara, e Manos M. Tentzeris. E-whep: A batteryless embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-tv signals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(6):2491–2505, 2013.
- [39] Stelios Timotheou e Ioannis Krikidis. Joint information and energy transfer in the spatial domain with channel estimation error. In *2013 IEEE Online Conference on Green Communications (OnlineGreenComm)*, pages 115–120, 2013.
- [40] James F. Kurose e Keith W. Ross. *Computer Networking a Top Down Approach*. Addison-Wesley Publishing Company, Boston, MA, USA, 2009.
- [41] I. Demirkol, C. Ersoy, e F. Alagoz. Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4):115–121, 2006.
- [42] Don Torrieri. *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*. Springer, Switzerland, 2018.

- [43] Ki Won Sung Guowang Miao, Jens Zander e Slimane Ben Slimane. *Fundamentals of Mobile Data Networks*. Cambridge University Press, UK, 2016.
- [44] Jorge Olenewa. *Guide to Wireless Communications*. Cengage Learning, 2016.
- [45] Weijia Han, Yan Zhang, Xijun Wang, Jiandong Li, Min Sheng, e Xiao Ma. Orthogonal power division multiple access: A green communication perspective. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12):3828–3842, 2016.
- [46] Fuhui Zhou, Yongpeng Wu, Rose Qingyang Hu, Yuhao Wang, e Kat Kit Wong. Energy-efficient noma enabled heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 32(2):152–160, 2018.
- [47] Zeming Li e Jinsong Gui. Energy-efficient resource allocation with hybrid tdma–noma for cellular-enabled machine-to-machine communications. *IEEE Access*, 7:105800–105815, 2019.
- [48] Tao Shu e Marwan Krunz. Energy-efficient power/rate control and scheduling in hybrid tdma/cdma wireless sensor networks. *Computer Networks*, 53(9):1395–1408, 2009.
- [49] Mastrooreh Salajegheh, Hamed Soroush, e Antonis Kalis. Hymac: Hybrid tdma/fdma medium access control protocol for wireless sensor networks. In *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–5, 2007.
- [50] P. Udayakumar, Ranjana Vyas, e O. Vyas. Token bus based mac protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, 43:6–10, 04 2012.
- [51] Fang Wei, Xinming Zhang, He Xiao, e Aidong Men. A modified wireless token ring protocol for wireless sensor network. In *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, pages 795–799, 2012.
- [52] Shama Siddiqui, Sayeed Ghani, e Anwar Ahmed Khan. Adp-mac: An adaptive and dynamic polling-based mac protocol for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 18(2):860–874, 2018.
- [53] Chisato Fujii e Winston K. G. Seah. Multi-tier probabilistic polling in wireless sensor networks powered by energy harvesting. In *2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, pages 383–388, 2011.

- [54] Vanessa L. Quintero, Claudio Estevez, Marcos E. Orchard, e Aramis Pérez. Improvements of energy-efficient techniques in wsns: A mac-protocol approach. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 21(2):1188–1208, 2019.
- [55] P. Venkitasubramaniam, S. Adireddy, e Lang Tong. Opportunistic aloha and cross layer design for sensor networks. In *IEEE Military Communications Conference, 2003. MILCOM 2003.*, volume 1, pages 705–710 Vol.1, 2003.
- [56] Zornitza Genova Prodanoff. Optimal frame size analysis for framed slotted aloha based rfid networks. *Computer Communications*, 33(5):648–653, 2010.
- [57] Rodrigo Teles Hermeto, Antoine Gallais, e Fabrice Theoleyre. Scheduling for ieee802.15.4-tsch and slow channel hopping mac in low power industrial wireless networks: A survey. *Computer Communications*, 114:84–105, 2017.
- [58] Injong Rhee, Ajit Warriar, Mahesh Aia, Jeongki Min, e Mihail L. Sichitiu. Z-mac: A hybrid mac for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16(3):511–524, 2008.
- [59] Mohamed Elkourdi, Asim Mazin, Eren Balevi, e Richard D. Gitlin. Enabling slotted aloha-noma for massive m2m communication in iot networks. In *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, pages 1–4, 2018.
- [60] Eren Balevi, Faeik T. Al Rabee, e Richard D. Gitlin. Aloha-noma for massive machine-to-machine iot communication. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–5, 2018.
- [61] Jinho Choi. Noma-based random access with multichannel aloha. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(12):2736–2743, 2017.
- [62] Norman Abramson. The aloha system: another alternative for computer communications. *Fall Joint Computer Conference*, 37:281–285, 01 1977.
- [63] Eren Balevi, Faeik T. Al Rabee, e Richard D. Gitlin. Aloha-noma for massive machine-to-machine iot communication. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–5, 2018.
- [64] Jinho Choi. Noma: Principles and recent results. In *2017 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 349–354, 2017.
- [65] Ber of 3 user non-orthogonal multiple access (noma) with qpsk modulation. <https://ecewireless.blogspot.com/2020/06/ber-of-3-user-non-orthogonal-multiple.html>, 2020. Accesso: 15-09-2021.

- [66] J P Shaffer. Multiple hypothesis testing. *Annual Review of Psychology*, 46(1):561–584, 1995.
- [67] Ningbo Zhang, Jing Wang, Guixia Kang, e Yang Liu. Uplink nonorthogonal multiple access in 5g systems. *IEEE Communications Letters*, 20(3):458–461, 2016.
- [68] Jinho Choi. Noma-based random access with multichannel aloha. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(12):2736–2743, 2017.
- [69] Qahhar Muhammad Qadir, Tarik A. Rashid, Nawzad K. Al-Salihi, Birzo Ismael, Alexander A. Kist, e Zhongwei Zhang. Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. *IEEE Access*, 6:77454–77473, 2018.
- [70] Zabih Ghassemlooy Anthony Boucouvalas Murat Uysal, Carlo Capsoni e Eszter Udvary. *Optical Wireless Communications. An Emerging Technology*. Springer, 2016.
- [71] Sigfox, the 0g network. <https://www.sigfox.com/en>. Acesso: 20-10-2021.
- [72] Semtech Neuchatel SA. Combined narrow-band and spread spectrum physical layer proposal for cellular iot. Technical Report GP-150074, 3GPP, 2015.

Apêndices

A ALOHA PURO

```
1 %Definir o numero de vezes a repetir o loop
2 K=0;
3 Kmax = 12;
4
5 %Definir contador para alterar valor do sinal de aviso
6 c=0;
7 limite = 1;
8
9 %Definir o numero de bits que existira na mensagem
10 n = 8;
11
12 %Gerar um vetor de bits
13 bits = randi([0 1],1,n);
14
15 %Definir sinal de aviso como 1 para transmitir indefinidamente.
16 % E, na realidade, um pacote de bits transmitido pela microbase.
17 aviso = 1;
18
19 %Sinal de confirmacao. 0, se nao existir o id do transceptor no
    sinal, 1 se existir.
20 confirma = 0;
21
22 %Definir niveis possiveis de potencia de sinal
23 P = [0.7,0.2,0.1];
24 Pselecionada=0;
25
26 %loop de transmissao ALOHA
27 while aviso == 1
28     if (K <= Kmax) && (confirma == 0)
29         if c < limite
30             %aguarda um tempo Tb
31             Tb = randi(2^Kmax - 1);
32             disp('contador');
```



```

33         disp(c);
34         disp('K:');
35         disp(K);
36         disp('Tb');
37         disp(Tb);
38         pause(Tb/1000);
39         Pselecionada = randsample(P,1);
40         sinal = Pselecionada.*bits;
41         disp('sinal');
42         disp(sinal);
43         c = c+1;
44     else
45         %seta confirma=1
46         confirma = 1;
47     end
48     K = K + 1;
49 end
50
51 %Encerra transmissao e aguarda proximo sinal de aviso
52 if K > Kmax || confirma == 1
53     aviso = 0;
54     K = 0;
55     c = 0;
56     break
57 end
58 end
59
60 while confirma == 1
61     if Kmax > limite
62         bit_com_payload = randi([0 1],1,n)
63         sinal = Pselecionada*bit_com_payload;
64         disp('Sinal com payload');
65         disp(sinal);
66     end
67     confirma = 0;
68     aviso = 1;
69     break
70 end

```

Listing A.1. Código fonte do protocolo ALOHA Puro

