



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Um Protocolo de Controle de Acesso Baseado Em Rede Neural Recorrente Para Comunicação Oportunística em Redes WiFi

Laís M. Gonçalves

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador
Prof. Dr. Marcos F. Caetano

Brasília
2019



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Um Protocolo de Controle de Acesso Baseado Em Rede Neural Recorrente Para Comunicação Oportunística em Redes WiFi

Laís M. Gonçalves

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Prof. Dr. Marcos F. Caetano (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Dr. Marcus Vinicius Lamar Dr. Eduardo Adilio Pelinson Alchieri
Universidade de Brasília Universidade de Brasília

Prof. Dr. José Edil Guimarães de Medeiros
Coordenador do Curso de Engenharia da Computação

Brasília, 24 de Junho de 2019

Dedicatória

Para a pessoa que devolveu minha alma, e sempre cuidou de mim, até mesmo quando eu já tinha desistido. B, Be, Beatrice.

Agradecimentos

Os agradecimentos deveriam ser para quem me ajudou nesse trabalho, mas para ser sincera, esse trabalho é fruto da trajetória da minha vida até aqui. Então preciso agradecer todos que passaram pela minha vida até agora.

Preciso agradecer principalmente à minha família verdadeira que me ajudava a aguentar as pressões, cada um à sua maneira. Cada um me ajudou a levar o barco, e não deixá-lo afundar. Ao Minho que mais de uma vez foi meu herói que veio ao meu socorro, simplesmente porque se importava. Ao amor da minha vida que sempre me fez acreditar que ia ficar tudo bem.

Agradeço à Deus e todas as forças do Universo que me guiaram e me deram forças, pra que eu cumprisse da melhor forma o meu caminho.

Agradeço a todas as pessoas cujas vidas tocaram a minha de forma positiva, e me deixaram algo de si que construiu algo em mim.

Agradeço àqueles que foram meus professores, que me deram uma ideia de como a vida lá fora irá me cobrar. Agradeço ao meu orientador Prof. Marcos F. Caetano pela paciência e orientação, e aos professores que aceitaram fazer parte da banca de defesa deste trabalho, por terem disponibilizado seu tempo para conhecê-lo e avaliá-lo.

E por fim, agradeço ao meu chefe Bruno por ter tido a paciência de aguentar meus horários loucos, e por ter acreditado em mim desde o meu terceiro semestre, sendo um dos incentivadores da minha independência.

Resumo

A Cisco estima que em 2021 haverá 5.5 bilhões de celulares no mundo [1]. O tráfego de dados móveis ao redor do mundo chegará aos 49 Exabytes mensais, estimando uma taxa de crescimento anual de 47% entre 2016 e 2021. Esse amplo crescimento trouxe a dúvida, se seria possível acomodar todos esses novos usuários no espectro disponível. Pois este, mesmo podendo ser utilizado diversas vezes, possui uma quantidade limitada de frequências disponíveis para este fim. O principal causador dessa problemática é a forma como o espectro é gerenciado atualmente.

Hoje o espectro de frequência para comunicações sem fio é dividido em blocos de frequências que são licenciados para usuários que têm prioridade no uso (usuários primários) [2]. Essa abordagem mostra sua ineficiência ao permitir que certas porções do espectro fiquem ociosas quando usuários primários estão inativos. Surgiu então a ideia de permitir que usuários que não possuem o direito licenciado ao uso do espectro (usuários secundários), usem essas porções ociosas do espectro, desde que não interferissem nas comunicações dos usuários primários [3]. Com isso tecnologias como o uso de Rádios Cognitivos surgiram para gerenciar essas comunicações e aumentar o uso eficiente do canal.

Este trabalho estudará uma forma mais eficiente de utilizar o espectro propondo um protocolo que possibilita o acessá-lo de forma oportunística usando uma Rede Neural desenvolvida nos trabalhos [4] [5], apresentando dados comparativos com o protocolo 802.11, que é o mais usado para gerenciamento do espectro por dispositivos móveis, através de simulações.

Palavras-chave: rádios cognitivos, protocolo MAC, redes neurais, acesso oportunístico

Abstract

Cisco estimates mobile data traffic around the world will reach 49 monthly Exabytes, estimating an annual growth rate of 47% between 2016 and 2021 [1]. The question is: it would be possible to accommodate all these new users in the spectrum available. Even it can be used several times, has a limited amount of frequencies available for this purpose. The main cause of this problem is the way the spectrum is currently managed.

Today the frequency spectrum for wireless communications is divided into frequency blocks licensed to users who have priority in using them (primary users) [2]. This is inefficient because some parts of the spectrum become idle when users are inactive. One solution was to allow users who do not have the license to use the spectrum (secondary users), to use these idle portions of the spectrum, as long as they do not interfere with the primary users' communications [3]. Technologies like Cognitive Radios have emerged to manage these communications and increase the efficient use of the channel.

This work will study a more efficient way to use the spectrum. We will propose a protocol that implements opportunistic access to the channel using a trained Neural Network developed in the works [4] [5]. We will compare with simulations, the proposed protocol and the 802.11 protocol, which is the most used for spectrum management by mobile devices.

Keywords: cognitive radios, MAC protocol, artificial neural network

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Metodologia Científica	2
1.3	Estrutura do documento	3
2	Revisão Teórica	4
2.1	Políticas de alocação do Espectro	4
2.1.1	Alocação Dinâmica do Espectro	5
2.2	Rádio Cognitivo	7
2.3	Protocolo 802.11	11
2.4	Rede Neural	14
2.4.1	Aquisição dos sinais	16
2.4.2	Processamento dos sinais	16
2.4.3	Limiarização	17
2.4.4	Treinamento da RNA	17
2.5	Revisão do Estado da Arte	18
2.6	Resumo do capítulo	18
3	Protocolo SEA	20
3.1	Visão Geral	20
3.2	Implementação CSMA/CA pelo INET	22
3.3	Implementação do SEA	23
3.3.1	Módulo PU	24
3.3.2	Módulo SU e Rede Neural	25
4	Resultados e Validação	31
4.1	Métricas	31
4.2	Cenário 1	32
4.2.1	SEA	33
4.2.2	Protocolo SEA vs Protocolo padrão	35

4.3 Cenário 2	36
4.3.1 SEA	37
4.3.2 Protocolo SEA vs Protocolo padrão	40
5 Conclusões	41
5.1 Trabalhos Futuros	41
Referências	43
Anexo	45
I Simulação completa do SEA - cenário 1	46
II Simulação completa do SEA - cenário 2	50

Lista de Figuras

2.1	Taxonomia do Modelo de Acesso Dinâmico [3].	6
2.2	Esquema OSA implementado por CRs [3].	7
2.3	Ciclo cognitivo de um CR [6].	9
2.4	Exemplo de transmissão de SU usando CR.	11
2.5	Esquema da pilha de protocolos da <i>Internet</i> , com detalhamento das camadas gerenciadas pelo protocolo 802.11.	12
2.6	Algoritmo usado pelo CSMA/CA [7].	14
2.7	Esquema de uma RNA Recorrente do tipo Elman. [4].	15
2.8	Exemplo de processamento do sinal [4].	17
3.1	Cenário de simulação com um PU e dois SUs se comunicando no ambiente do OMNET++.	21
3.2	Máquina de estados implementada pelo CSMA/CA do INET.	24
3.3	Exemplo do cálculo de tempos de transmissão em uma amostra de captura.	25
3.4	Detalhe da camada de enlace implementada pelo SEA.	25
3.5	Divisão da janela de oportunidade.	27
3.6	Máquina de estados de transmissão do protocolo SEA.	28
3.7	Máquina de estados de recepção do protocolo SEA.	29
4.1	Cenário de simulação com um PU e dois SUs se comunicando no ambiente do OMNET++.	32
4.2	Gráfico comportamental do protocolo SEA de 0s até 7.68ms.	33
4.3	Gráfico comportamental do protocolo SEA de 66.57536ms até 76.81536ms.	34
4.4	Gráfico comportamental do protocolo SEA de 30.72ms até 38.4ms	34
4.5	Gráfico comportamental do protocolo SEA de 120.33536ms até 124.43136ms	35
4.6	Métricas obtidas do Cenário 1	36
4.7	Cenário de simulação com um PU e dois pares de SUs se comunicando no ambiente do OMNET++.	37
4.8	Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0s até 7.68ms	38

4.9	Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.1075456s até 0.1165056s	38
4.10	Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.14339584s até 0.16387584s	39
4.11	Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.05735424s até 0.06145024s	39
4.12	Métricas obtidas do Cenário 2	40

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACK *Acknowledgement.*

C-MAC *Cognitive MAC.*

CR *Cognitive Radio.*

CSMA *Carrier Sense Multiple Access.*

CSMA/CA *CSMA with Collision Avoidance.*

DIFS *Distributed Inter-Frame Space.*

DSA *Dynamic Spectrum Access.*

FCC *Federal Communications Commission.*

LLC *Logical Link Control.*

MAC *Medium Access Control.*

OSA *Opportunistic Spectrum Access.*

PU_s *Primary Users.*

RNAs *Redes Neurais Artificiais.*

SEA *Smart Espectrum Allocation.*

SIFS *Short Inter-Frame Spacing.*

SPTF *Spectrum-Policy Task Force.*

SU_s *Secondary Users.*

WS *White Spaces.*

Capítulo 1

Introdução

O mundo atualmente pede mobilidade e flexibilidade. A principal tecnologia que permite isso é a *wireless*. Usada tanto em dispositivos do dia a dia como em serviços importantes para um país, e tudo indica que este número tende a crescer.

A Cisco estima que em 2021 haverá 5.5 bilhões de celulares no mundo [1]. O tráfego de dados móveis ao redor do mundo chegará aos 49 Exabytes mensais, estimando uma taxa de crescimento anual de 47% entre 2016 e 2021. Diante desse amplo crescimento, para tentar acomodar esses novos usuários no espectro, leis de regulamentação do uso do espectro para transmissão e recepção de dados foram instituídas pelos governos de cada país. Em 2002, a *Spectrum-Policy Task Force* (SPTF) emitiu um relatório que foi publicado pela *Federal Communications Commission* (FCC), chamando a atenção para uma possível escassez do espectro eletromagnético, e apresentando estudos e recomendações para um uso mais eficiente do mesmo nos Estados Unidos [8].

Hoje o espectro de frequência para comunicações sem fio é dividido em blocos de frequências licenciados que são vendidos ou leiloados entre usuários que possuirão direitos de acesso prioritário à essas porções, usuários primários, diferentemente dos usuários que não tem direito ao acesso à essas porções, usuários secundários. Dados colhidos no relatório da SPTF, indicam a subutilização de porções do espectro pelos usuários primários por alguns períodos de tempo, chamando essas faixas sem uso de espaços em branco (do Inglês *White Spaces* - WS). A atenção foi voltada para soluções que visam o melhor uso dessas faixas por usuários primários e usuários secundários, sem gerar interferência nas comunicações e menor desperdício de recursos do espectro [2].

O relatório do SPTF cita como recomendação o incentivo às tecnologias de acesso ao espectro que possibilite o seu uso de forma mais eficiente. O Rádio Cognitivo vem crescendo como a tecnologia chave que possibilita o acesso dinâmico ao espectro eletromagnético. Ele permite que usuários secundários usem de forma oportunística porções do espectro que antes eram usados apenas por usuários primários, empregando diferentes

técnicas para que isso seja feito com o mínimo de interferência. Porém manter baixo o nível de interferência se mostrou um dos maiores desafios da tecnologia, levando a pensar abordagens criativas para identificar quando há ou não transmissões de usuários primários, e assim identificar oportunidades. Com a tecnologia de Redes Neurais sendo cada vez mais utilizada e estudada, não demorou para esta começar a ser considerada como uma abordagem para ajudar no gerenciamento do espectro. Uma Rede Neural se diferencia de outros sistemas comuns pois consegue “aprender” a solucionar determinados problemas, podendo ser treinada para identificar e sinalizar oportunidades de acesso ao espectro.

Neste trabalho apresentaremos um modelo de protocolo de acesso oportunístico ao espectro, que acopla a tecnologia de Rádio Cognitivo com Rede Neural, sendo este último usado para “entender” padrões de uso do usuário licenciado, e prever oportunidades de transmissão para usuários secundários ao espectro de forma transparente aos usuários primários.

1.1 Objetivo

Este trabalho explora os efeitos de um protocolo de controle de acesso ao canal que usando como base as previsões de uma rede neural treinada, permite que usuários secundários realizem alocação do espectro e transmissão de forma dinâmica e oportunística. Como objetivo específico iremos:

- Desenvolver um protocolo de acesso oportunístico ao meio, usando a Rede Neural treinada desenvolvida nos trabalhos [4] [5].
- Comparar o funcionamento e benefícios dessa nova abordagem com o protocolo de acesso padrão 802.11.
- Validar o trabalho através de gráficos comparativos e análise de comportamento do protocolo. Destacando suas vantagens e sugerindo mudanças e evoluções para o protocolo implementado.

1.2 Metodologia Científica

A metodologia que este trabalho seguiu consiste nos seguintes passos:

1. **Estudo da Rede Neural.** Sendo o protocolo guiado pelas previsões da rede neural, tanto o estudo do funcionamento e treinamento de redes neurais foi necessário, como a exploração da rede neural usada em si. Rede essa que foi desenvolvida por um grupo de pesquisa da Universidade de Brasília, e publicada nos trabalhos [4][5][9][10][11].

2. **Estudo sobre o funcionamento do CSMA/CA.** Como o trabalho consistiu na adaptação do método CSMA/CA, foi necessário estudar como funciona o original e identificar mudanças que deveriam ser feitas para inserir o uso da Rede Neural.
3. **Estudo sobre Rádios Cognitivos.** Afim de aprofundar os conhecimentos nessa tecnologia emergente de rádios cognitivos, foi feita uma pesquisa sobre seu funcionamento e sobre os algoritmos já publicados permitindo diferenciação com o que foi desenvolvido e o que já era existente.
4. **Implementação do Protocolo de Acesso ao Meio.** Este momento do trabalho foi focado na adaptação do protocolo 802.11 implementado no ambiente de simulação OMNET++ usando a biblioteca INET, de forma a acoplar a Rede Neural treinada [4][5], visando a construção de um protocolo que permita o acesso oportunístico ao meio.
5. **Validação do protocolo.** Essa etapa consistiu em uma análise de desempenho baseada nos dados colhidos em simulações, comparação com outros protocolos e demonstração dos benefícios do uso da abordagem usada pelo protocolo estudado na alocação dinâmica do espectro.

1.3 Estrutura do documento

Essa monografia é dividida em 5 capítulos, contando com este, a Introdução. A relação dos outros capítulos é:

- O Capítulo 2 traz uma fundamentação teórica dos conceitos necessários para a compreensão do trabalho.
- O Capítulo 3 trata da descrição do protocolo e suas especificações. Mostra a implementação do mesmo e seu uso.
- O Capítulo 4 apresenta o ambiente de simulação, os cenários e as configurações feitas para validar o protocolo em si, assim como a análise dos resultados obtidos.
- O Capítulo 5 traz as conclusões deste trabalho apontando os principais resultados obtidos e sugerindo evoluções para o protocolo implementado.

Capítulo 2

Revisão Teórica

Este capítulo abordará conceitos básicos necessários para se entender o protocolo estudado, trazendo assuntos que serão referenciados ao longo do trabalho. Falaremos sobre os conceitos de alocação dinâmica do canal, protocolo CSMA de acesso ao meio, redes neurais e rádios cognitivos. A Seção 2.1 traz a principal problemática que motivou esse trabalho e também apresenta o conceito de alocação dinâmica do espectro, que será o caminho da solução do problema. A Seção 2.2 trata sobre Rádios Cognitivos, história, conceito e funcionamento. A Seção 2.3 explica o funcionamento do protocolo CSMA/CA e suas particularidades. A Seção 2.4 apresenta o conceito de Redes Neurais, com enfoque no funcionamento da rede neural [4] usada no protocolo estudado. O capítulo finaliza na Seção 2.5 citando outros trabalhos publicados de protocolos de acesso oportunístico ao canal, com técnicas e soluções diferentes para o mesmo problema.

2.1 Políticas de alocação do Espectro

Milhões de dispositivos de computação estão interligados ao redor do mundo através da *Internet* [7]. Esses dispositivos são chamados de hospedeiros ou sistemas finais e se conectam por enlaces (do Inglês *links*) de comunicação. Os enlaces de comunicação são construídos em diferentes meios físicos, como cabos coaxiais, fibras óticas e ondas de rádio. No início da Internet o uso de cabos era mais comum na comunicação dos dispositivos, que eram basicamente computadores de mesa, servidores que armazenavam e disponibilizavam informações como arquivos, *web sites*, etc. Com a expansão do uso de aparelhos sem fio e da necessidade por mobilidade do usuário, a demanda pelo uso de ondas da rádio como enlaces de comunicação também aumentou. Essas ondas de rádio usadas para transferência de dados entre dispositivos, são referenciadas no meio acadêmico como espectro eletromagnético.

Cada vez mais presente no cotidiano das pessoas, as redes sem fio tornaram-se uma das tecnologias mais importantes no acesso à Internet do mundo atual [7], aumentando o uso do espectro. O espectro é um recurso natural e que tem aumentado de valor à medida que mais serviços fazem uso dele. Por mais que esse recurso possa ser reutilizado inúmeras vezes, a quantidade de usuários que podem ser acomodados no espectro simultaneamente, é limitado. Para que isso ocorra de forma satisfatória é necessário planejamento e gerenciamento para que vários serviços possam usá-lo sem perda ou interferência entre as informações [6].

O aumento da demanda do uso do espectro incitou a preocupação de pesquisadores e estudiosos com a possível escassez do mesmo. A política atual de divisão do espectro é por meio da alocação estática e prevê o uso exclusivo do espectro para serviços específicos [3]. Por exemplo nos Estados Unidos a política de divisão do espectro vigente no país, determina que as frequências de 54 MHz a 890 MHz são para uso exclusivo de serviços de transmissão de televisão analógica. Essa forma de gerenciar o espectro de fato tem suas vantagens, como evitar a interferência de sinais e garantir a integridade das informações trocadas, e foi usado por anos. Porém no cenário atual a limitação dessa política pode ocasionar a negação desse serviço para novos usuários. O relatório publicado pela FCC propõe como uma forma de solucionar o problema, incentivo à tecnologias que mudem a forma antiga de divisão do espectro. Surgiu então o modelo de Alocação Dinâmica do Espectro (do Inglês *Dynamic Spectrum Access* - DSA).

2.1.1 Alocação Dinâmica do Espectro

Para a implementação da política de alocação dinâmica do espectro, estratégias diferentes podem ser usadas. Essas estratégias podem ser divididas em três modelos: Modelo Dinâmico de Acesso Exclusivo (do Inglês *Dynamic Exclusive Use Model*), Modelo de Compartilhamento Aberto (do Inglês *Open Sharing Model*) e Modelo de Acesso Hierárquico (do Inglês *Hierarchical Access Model*) [3], como pode ser visto na Figura 2.1.

O Modelo Dinâmico de Acesso Exclusivo não é muito diferente da política de divisão do espectro atual onde o usuário licenciado tem direitos de exclusividade no uso de sua respectiva frequência do espectro [3]. Porém esse modelo insere um pouco mais de flexibilidade e apresenta duas diferentes abordagens: Direitos de Propriedade Espectral (do Inglês *Spectrum Property Rights*) e Alocação Dinâmica Do Espectro (do Inglês *Dynamic Spectrum Allocation*) [6]. Na primeira abordagem o usuário licenciado, que tem os poderes de proprietário sobre uma faixa de frequência do espectro, passa a ter alguma flexibilidade na decisão de uso do mesmo. O usuário poderia comercializar ou vender sua faixa do espectro, tornando o mercado um impulsionador natural do uso mais eficiente desse recurso. A abordagem de Alocação Dinâmica do Espectro seria baseada nas análises de

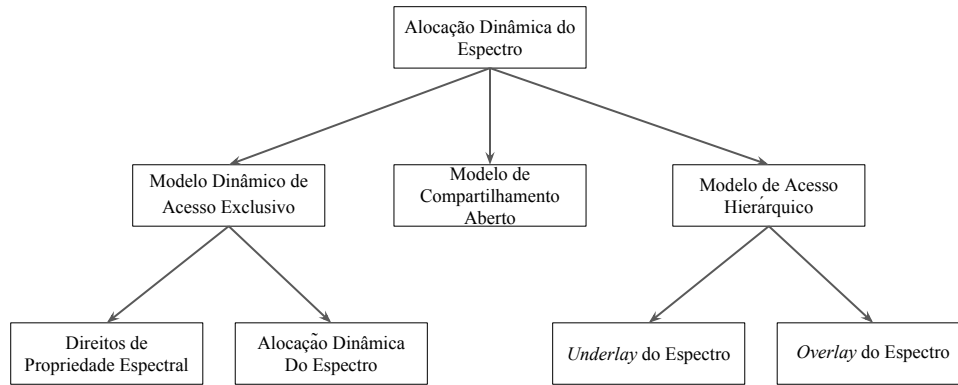


Figura 2.1: Taxonomia do Modelo de Acesso Dinâmico [3].

tráfego espacial e temporal do uso do espectro, e esse seria compartilhado entre diferentes serviços. Assim seria possível usar frequências reservadas que são pouco usadas e ficam ociosas a maior parte do tempo. Ou seja, em determinado momento e local o espectro é alocado para um serviço exclusivo. Mesmo assim há uma flexibilização de acesso ao espectro maior que o modelo tradicional.

Já no Modelo de Compartilhamento Aberto, também conhecido como Modelo de Acesso Comum (do Inglês *Spectrum Commons Model*) [3], não há prioridade de acesso ao espectro nem usuários licenciados. A ideia é que todos os usuários compartilhem o canal e implementem protocolos para gerenciar a interferência de sinais enviados pelo espectro. Protocolos são regras que definem formato e ordem das mensagens enviadas entre usuários através de um canal de comunicação, gerenciando a transmissão e recebimento da mensagem [7]. Nesse caso os usuários são os dispositivos eletrônicos, e o canal é o espectro.

No Modelo de Acesso Hierárquico os usuários são divididos em duas hierarquias: Usuários Primários (do Inglês *Primary Users* - PUs), que são os usuários licenciados, e Usuários Secundários (do Inglês *Secondary Users* - SUs), que são os usuários não-licenciados [3]. O espectro licenciado seria então liberado para o uso dos SUs de forma que a sua interferência fosse a mais transparente possível para os PUs. Esse modelo tem duas abordagens de compartilhamento do canal entre PUs e SUs: *underlay* e *overlay* do espectro. A abordagem de *underlay* limita o poder de transmissão dos SUs ao impor que operem abaixo do nível de ruído dos PUs. Isso para que o SU não atrapalhe a transmissão do PU. Essa abordagem considera que o PU está sempre transmitindo, então não explora os WS do canal. Diferentemente do que acontece na segunda categoria, *overlay* do espectro ou Acesso Oportunista ao Espectro (do Inglês *Opportunistic Spectrum Access* - OSA), onde o SU tem a liberdade de explorar e observar o canal de forma não intrusiva, à procura de WS que possam significar oportunidades de transmissão pelo canal.

A Figura 2.2 ilustra o esquema de um OSA implementado usando a tecnologia de

Rádio Cognitivo (do Inglês *Cognitive Radio* - CR). Na figura podemos ver quatro canais do espectro (Canal 1, Canal 2, Canal 3, Canal 4), onde estão acontecendo as transmissões do PU (representados pelos blocos azuis), mostrando que nesses momentos o canal está ocupado. Os espaços entre os blocos representam os WS, ou seja, blocos do espectro disponíveis que o SU pode usar para transmitir. A última linha (Observação do CR) a grosso modo ilustra a observação do canal feita pelo CR. No primeiro espaço demarcado pela linha pontilhada, ele detecta que há possibilidade de transmissão, ou seja, WS, nos canais 2, 3 e 4. No segundo espaço há possibilidade de transmissão somente nos canais 2 e 3, pois nesse momento o PU começa a transmitir no canal 4. Os blocos pretos sinalizam momentos que todos os canais estão ocupados, então não há WS nesses intervalos, e os intervalos delimitados pela seta sinalizam intervalos que existe WS em algum canal.

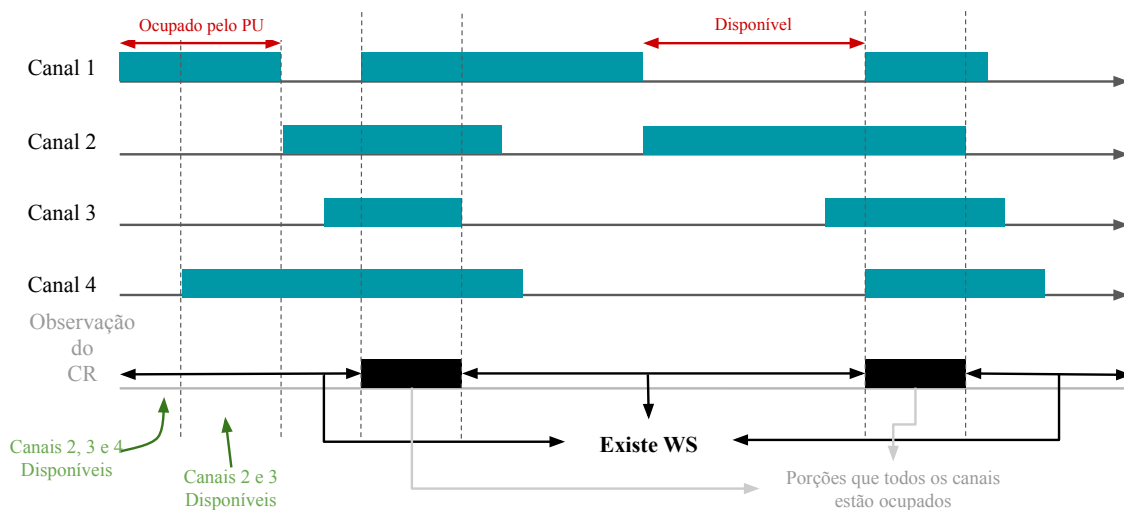


Figura 2.2: Esquema OSA implementado por CRs [3].

Comparando os três modelos citados, talvez o *Modelo de Acesso Hierárquico* seja o mais compatível com o modelo usado atualmente, e tem a vantagem de poder mesclar as duas abordagens, *underlay* e *overlay*, para obter uma maior eficiência de uso do canal.

Rádio Cognitivo é a peça principal na Alocação Dinâmica do Espectro pela abordagem *overlay* [6]. Ele permite que o dispositivo SU ajuste seus parâmetros como frequência, modulação e etc, para se adaptar e explorar melhor o espectro [12]. Esse assunto será mais explorado no próximo tópico.

2.2 Rádio Cognitivo

Em 1991 e 1998 Mitola propôs, respectivamente, o conceito de "rádio definido por software" e "rádio cognitivo" [13]. O CR permite que o SU use de forma oportunística o canal,

ao possibilitar o uso temporário de espaços do espectro que não estão sendo utilizados, sem interferir no uso do PU. Esse espaço além de serem chamados de WS, também são chamados de furo do espectro [14].

O CR é um sistema inteligente programado para se adaptar ao ambiente ao seu redor, calibrando em tempo real seus parâmetros internos baseado em estatísticas captadas do espectro [6]. Isso para obter dois resultados: comunicações com alta precisão a qualquer momento e em qualquer lugar e o melhor e mais eficiente uso do espectro possível. Essa capacidade cognitiva e possibilidade de reprogramação é o que permite o CR interagir e se adaptar a qualquer ambiente, possibilitando que SUs e PUs coexistam no mesmo espectro sem interferência [12]. Ainda segundo o trabalho citado, o ciclo de gerenciamento do espectro ocorre em quatro etapas principais: Sensoriamento Espectral (do Inglês *Spectrum Sensing*), Decisão Espectral (do Inglês *Spectrum Decision*), Compartilhamento Espectral (do Inglês *Spectrum Sharing*) e Mobilidade Espectral (do Inglês *Spectrum Mobility*).

1. **Sensoriamento Espectral:** Esta etapa é a mais importante do ciclo, pois possibilita que o SU encontre as frequências disponíveis do espectro. É neste momento que são obtidas informações do ambiente, estatísticas de comportamento do PU, métricas que devem ser aprendidas para melhor detectar os momentos que o canal fica ocioso e que podem ser oportunidades [14]. O sensoriamento pode ser feito por um (simples) ou por múltiplos CRs trocando informações do canal entre si (colaborativo) [6].
2. **Decisão Espectral:** Usando as informações obtidas no sensoriamento do espectro, o CR decide qual a melhor frequência do espectro para transmitir, qual o momento e os parâmetros internos que caracterizarão a transmissão oportunística. O objetivo é transmitir o máximo de informações possíveis, sem ocorrer interferência com o PU [6].
3. **Compartilhamento Espectral:** Podendo haver vários usuários SU tentando acessar o canal ao mesmo tempo, é necessário que essas transmissões sejam gerenciadas de alguma forma. Diminuindo assim a colisão de sinais vindos de SUs e PUs. Basicamente as principais funções dessa etapa do ciclo são: o acesso ao espectro, a alocação de recursos e a escolha de quais frequências do espectro que serão usadas [12].
4. **Mobilidade Espectral:** Como o direito principal de usar a faixa de frequência do espectro são dos PUs, os SUs só podem acessar partes ociosas dessa faixa e sem colidir com as transmissões dos PUs. Quando um PU é detectado usando o canal, os SUs devem liberar imediatamente a frequência do espectro alocada e continuar sua transmissão em outra faixa ociosa de outra frequência. Essa etapa precisa de

um sistema de gerenciamento capaz de fazer essa mudança de canal com o mínimo de perda para os SUs [12].

Na Figura 2.3 tentamos ilustrar de forma mais clara o ciclo cognitivo de um CR. Transmissões no espectro eletromagnético geram estímulos que são usados na etapa de Sensoriamento Espectral para caracterização do espectro. Se for detectada a presença do PU no canal, o ciclo entra na etapa de Mobilidade Espectral, que precisa retirar imediatamente a transmissão do SU da frequência na qual atividades do PU foi detectada, e passar para a etapa de Decisão Espectral. Caso na etapa de Sensoriamento Espectral for detectado WS, passa-se direto para a etapa de Decisão Espectral. Essa etapa é responsável por "escolher" uma frequência para que o SU transmita. Depois da frequência escolhida, o ciclo se fecha com a etapa de Compartilhamento Espectral, que irá gerenciar os recursos do espectro e as transmissões dos SUs no espectro [12].

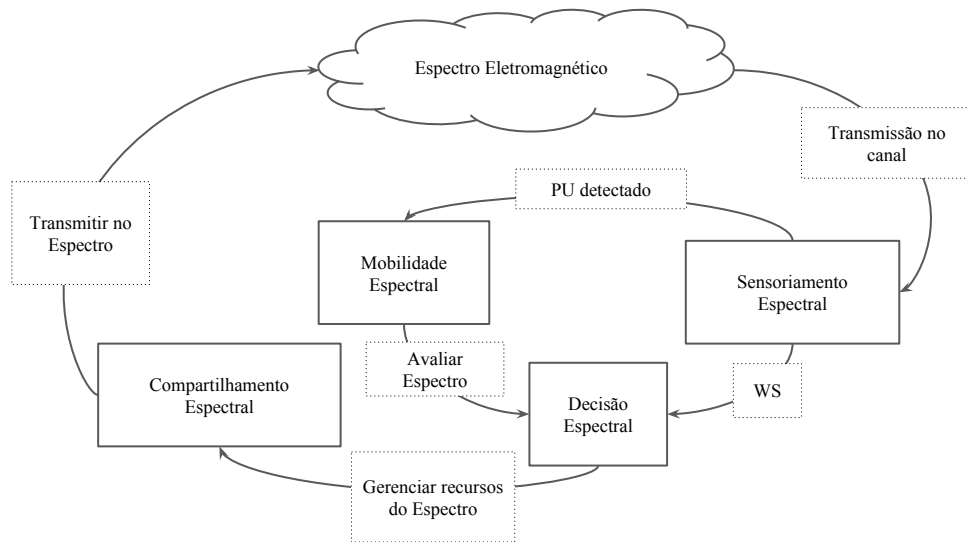


Figura 2.3: Ciclo cognitivo de um CR [6].

A principal característica do canal que os CRs atuam é a variação de disponibilidade dos recursos e frequência para transmissão, em virtude da variação de uso dos PUs e características do ambiente [15]. Heterogeneidade do espectro é como esse comportamento é chamado. Esse fenômeno é o principal fator que influenciará no desempenho de gerenciamento do espectro feito por um CR.

Em um ambiente controlado por CRs, com um espectro caracterizado como heterogêneo, faz-se necessário o desenvolvimento de novos protocolos de Controle de Acesso ao Meio (do Inglês *Medium Access Control* - MAC) que se adaptem às mudanças do canal, identificando WS e explorando de forma oportunística o espectro. Protocolos MAC são responsáveis por gerenciar o uso do canal, coordenando quais usuários usam o espectro,

em quais momentos e por quanto tempo podem transmitir [16], devem lidar com as características específicas de cada meio de transmissão que está sob sua gerência. O trabalho [15] apresenta algumas condições de funcionamento que os protocolos MAC para CRs, (do Inglês *Cognitive MAC* - C-MAC), devem trabalhar:

- **Transparência do SU para o PU.** As atividades do SU no canal licenciado devem ser transparentes ao PU. É possível adotar estratégias para prevenir essa interferência e tornar o acesso do SU o menos evasivo possível.
- **Acesso às informações do meio.** O CR deve fornecer informações do meio para o protocolo C-MAC, como frequência e detecção de atividades dos usuários. Essas informações servirão de base principal para decisões do protocolo para acesso ao canal.
- **Estratégias avançadas de compartilhamento do canal.** O C-MAC deve implementar formas eficientes de alocação do espectro para que o SU acesse o canal dinamicamente, e possam transmitir com a melhor qualidade possível. Esse aspecto também mitiga a interferência com as transmissões do PU.
- **Mecanismos de controle de sinalização.** Um protocolo C-MAC deve identificar, conhecer, acessar e gerenciar um canal de transmissão, para que seja totalmente funcional. E como dito várias vezes neste trabalho, o protocolo deve fazer isso de forma a garantir o melhor uso do espectro, e a menor interferência com dados enviados pelo PU.

Usaremos a Figura 2.4 para ilustrar como funciona a alocação dinâmica do espectro para protocolos C-MAC. Nela vemos a representação de três frequências do espectro (f_1 , f_2 , f_3) que estão sendo usadas para transmitir pacotes de usuários que usam um protocolo MAC padrão, transmissões representadas por blocos cinzas. Os blocos listrados azuis representam transmissões de SU que por sua vez fazem uso de rádios cognitivos para transmitir um dado [17]. Percebe-se que essas transmissões estão acontecendo dentro de um intervalo de tempo chamado tempo de transmissão do dado (T_{dado}). Nessa figura vemos que cada frequência de espectro ilustra uma possibilidade de transmissão do SU. Na primeira frequência (f_1) vemos que o bloco de mensagem do SU é transmitido com um certo intervalo em relação à transmissão do PU. Intervalo esse chamado de T_i na imagem. Diferente do que acontece na f_3 onde a transmissão do SU acontece imediatamente antes da transmissão do PU, porém não há colisão entre elas, nem perda de dados. E por último na f_2 temos um exemplo de um bloco de transmissão do SU se sobrepondo a um bloco de transmissão do PU, mostrando que por um determinado tempo foram transmitidos

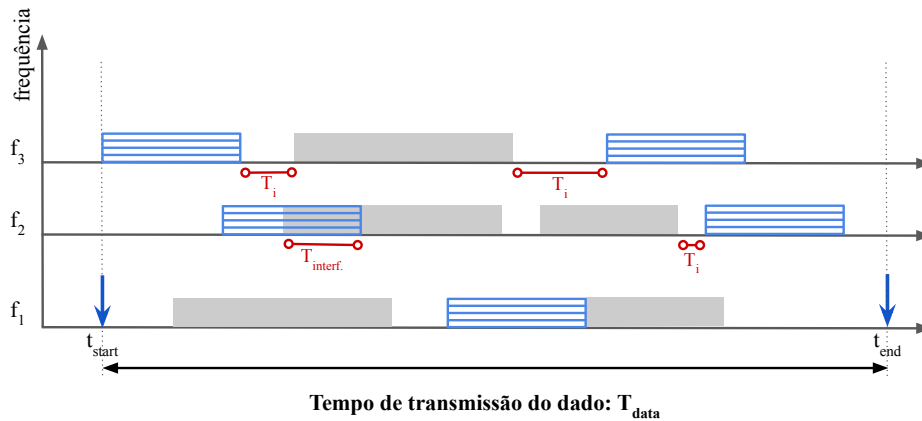


Figura 2.4: Exemplo de transmissão de SU usando CR.

simultaneamente. Esse tempo é chamado de tempo de interferência e foi representado por $T_{interf.}$.

Esse trabalho apresentará o estudo de um novo protocolo C-MAC baseado no método usado pelo protocolo 802.11 para acesso ao meio, chamado CSMA. Ambos serão estudados no próximo tópico.

2.3 Protocolo 802.11

Com a popularização das redes sem fio, protocolos que padronizavam as comunicações nessas redes começaram a surgir. Com o tempo um se destacou e prevaleceu: IEEE 802.11, também conhecida como Wi-Fi [7].

Há diversas variações da tecnologia 802.11 para redes sem fio, 802.11b, 802.11a, 802.11g e outros, sendo esta última a mais popular.

A maioria das redes de *Internet* tem os serviços necessários para a sua comunicação estruturados em um conjunto de níveis, ou camadas, chamado de pilha de protocolos da *Internet*, tendo cada nível seu conjunto de protocolos. Uma forma de divisão são em cinco camadas: aplicação, transporte, rede, enlace e física [18]. A camada de aplicação engloba os programas que os usuários usam para se comunicar na rede, como por exemplo navegadores. As camadas de transporte e de rede são responsáveis por tratar a mensagem que será enviada pelo canal. Já a camada de enlace é responsável por gerenciar o envio da mensagem pela camada física com a menor taxa de erros possível. E esta última consiste no meio que de fato a mensagem irá transitar. A Figura 2.5 ilustra essa pilha.

O protocolo 802.11 pertence tanto a camada de enlace como física. Internamente, na camada de enlace, ele ainda implementa uma divisão em duas camadas: LLC (do Inglês *Logical Link Control*) e MAC [18], como também ilustra a Figura 2.5. A função

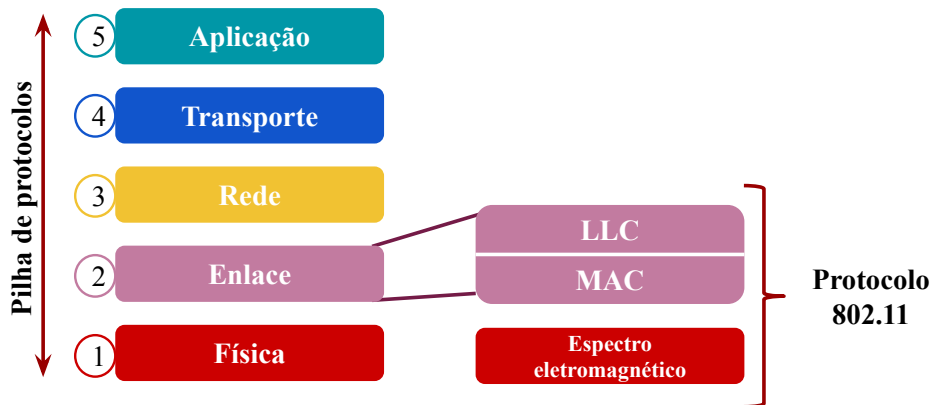


Figura 2.5: Esquema da pilha de protocolos da *Internet*, com detalhamento das camadas gerenciadas pelo protocolo 802.11.

do LLC é cuidar dos aspectos de comunicação com a camada acima, camada de rede, tornando as diferenças entre as variações do protocolo invisíveis para ela. A camada MAC é responsável por gerenciar as transmissões no canal, como já foi dito no tópico acima. No nosso caso, o espectro eletromagnético, que será acessado por CRs. Focaremos em como o 802.11 gerencia as funções da sua camada MAC, e no próximo capítulo faremos uma proposta de uma maneira mais eficiente para isso.

Um problema chamado, problema de acesso múltiplo, que os protocolos de canais de difusão compartilhados, como o 802.11, precisam lidar, é como gerenciar o compartilhamento do canal por usuários que podem transmitir e receber dados ao mesmo tempo [7]. Como notebooks e celulares, que não somente enviam como recebem dados. Além do mais em uma rede sem fio vários dispositivos podem estar conectados e trocando informações, então não somente é preciso coordenar o momento que um usuário envia e recebe respostas, como também é necessário decidir a vez de quem usa o canal e por quanto tempo, pois se dois usuários transmitirem dados ao mesmo tempo para o mesmo receptor, os dados colidirão. Quando os dados colidem, as informações são corrompidas e perdidas, assim o tempo que o canal ficou ocupado durante a colisão foi desperdiçado.

Pensando esse cenário em larga escala, com centenas de usuários tentando se comunicar usando o espectro, a probabilidade de transmissões sofrerem colisões aumenta, desperdiçando uma grande parte do tempo útil de uso do canal. Para lidar com esse problema o 802.11 utiliza um protocolo de controle de acesso múltiplo, do tipo controle de acesso aleatório, para gerenciar essas comunicações, chamado CSMA/CA (do Inglês *CSMA with Collision Avoidance* - CSMA com prevenção de colisão), variante do CSMA (do Inglês *Carrier Sense Multiple Access*) [18][7].

Basicamente a ideia dos protocolos de controle de acesso múltiplo, do tipo acesso aleatório, para lidarem com o problema apresentado, é que ao ocorrer uma colisão, cada

usuário retransmite a informação perdida até que esta consiga ser transmitida sem erros. Mas isso não significa que o dado será enviado imediatamente. Ao invés disso o usuário esperará uma quantidade aleatória de tempo para retransmitir o dado. Assim a probabilidade de dois usuários escolherem o mesmo instante para enviar um dado é menor, diminuindo o número de colisões.

O CSMA do CSMA/CA quer dizer "*acesso múltiplo por detecção de portadora*", isso significa que cada usuário que usa esse protocolo observa o canal antes de transmitir, e caso este esteja ocupado o usuário não transmite [7]. Para descrever melhor o funcionamento do CSMA/CA vamos supor um usuário (transmissor) tentando se comunicar com outro usuário (receptor) através do canal, usando o protocolo em questão. O algoritmo do protocolo para gerenciar a transmissão, que está ilustrado na Figura 2.5, seria:

1. Primeiramente o usuário observará o canal. Se o mesmo estiver disponível, o usuário espera um tempo antes de transmitir. Esse tempo de espera se chama Espaço Inter-quadros Distribuídos (do Inglês *Distributed Inter-Frame Space* - DIFS), ilustrado na Figura 2.5 como um intervalo antes da transmissão do usuário Origem.
2. Quando o tempo de espera DIFS acabar, o transmissor calculará um valor de intervalo de tempo aleatório que deverá esperar. Esse tempo de espera é chamado de *backoff*. Caso o canal fique ocupado durante esse intervalo de *backoff*, o decremento desse intervalo será interrompido, e quando ficar disponível novamente o algoritmo recomeça no passo 1.
3. Quando o tempo de *backoff* passar, o transmissor deve enviar a mensagem e ficar esperando uma confirmação do receptor, para saber se a mensagem foi recebida sem ter colidido com algum outro sinal de usuário que estivesse usando o canal. A confirmação é feita através do envio de uma mensagem do tipo ACK (do Inglês *Acknowledgement*). O usuário receptor esperará um tempo chamado Espaço Curto Inter-quadros (do Inglês *Short Inter-Frame Spacing* - SIFS) antes de tentar enviar um ACK. Vemos a representação do envio dessas mensagens na Figura 2.5 como uma faixa azul escura intitulada dados, que vai do usuário origem para o usuário destino. Há uma marcação de espaçamento no eixo do usuário destino intitulada SIFS e após esse espaçamento uma faixa azul clara que parte do usuário destino para o usuário origem intitulada ack, representando a troca de mensagens e os intervalos entre eles.
4. Se o transmissor receber uma confirmação do receptor ele saberá que o dado não foi perdido. Assim, se mais algum dado precisar ser enviado, o usuário transmissor iniciará o algoritmo novamente a partir do passo 1. Porém se a confirmação não for

recebida, o transmissor iniciará a retransmissão a partir da regressiva do *backoff* do passo 2, mas usando um novo valor aleatório em um intervalo maior.

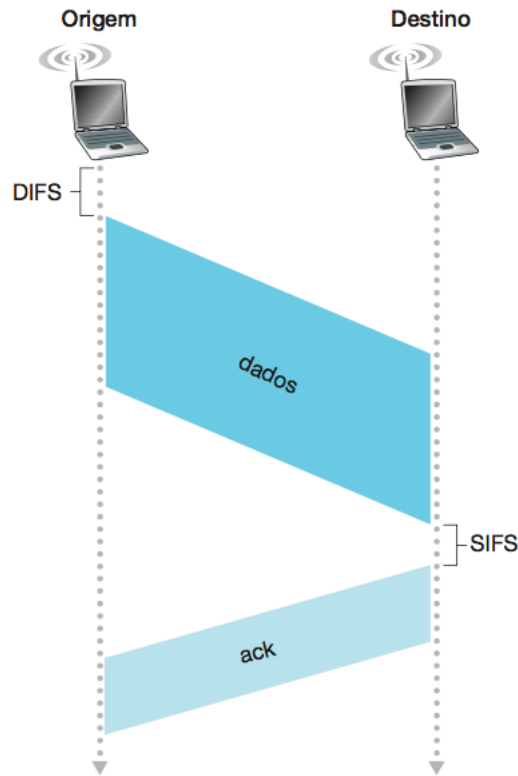


Figura 2.6: Algoritmo usado pelo CSMA/CA [7].

Neste trabalho, o protocolo C-MAC estudado foi baseado em uma versão do CSMA/CA alterada para usar uma rede neural no sensoriamento do canal. A seguir, vamos falar mais sobre redes neurais, e detalhes específicos da rede neural usada.

2.4 Rede Neural

O estudo da área de Redes Neurais Artificiais (RNAs) ressurgiu no final da década de 80. A forma de computar informações desses sistemas, se assemelha de algum modo à estrutura do cérebro humano, porque não segue as regras e algoritmos padrão para se chegar a um resultado [19]. RNAs são sistemas que podem aprender a partir de exemplos mostrados à elas. Simplificando, aprender é transformar experiências em conhecimento ou especialização [20].

Uma RNA é composta por camadas de núcleos de processamento chamados neurônios, que calculam determinadas funções matemáticas. A primeira parte do aprendizado de uma RNA é o treinamento, feito pela inserção de dados que simbolizam a experiência.

A saída seria a especialização, um resultado que seria usado normalmente por outro programa que realizaria uma determinada tarefa [20].

Os neurônios são interligados por várias conexões, chamadas “sinapses” relacionadas a pesos que são parâmetros relacionados ao “conhecimento” e ajustados durante o treinamento. Este se dá através de repetições dos exemplos recebidos, à procura de padrões. Os pesos são entradas para os neurônios, e servem para calibrar o processo de aprendizado deles.

Existem diferentes tipos de Redes Neurais Artificiais. Um desses tipos são as Redes Neurais Recorrentes. A Rede Neural usada neste trabalho, foi uma recorrente do tipo Elman cujo esquema é mostrado na Figura 2.7. Nela vemos uma RNA com suas entradas, saídas, camadas de neurônios representados por círculos, interligados por “sinapses” que são as linhas com setas. A camada composta pelos círculos brancos é chamada de camada de contexto, e funciona como uma memória que salva as saídas dos neurônios que compõe a camada escondida. Esses valores serão usados no tempo seguinte como entradas para os neurônios da camada escondida.

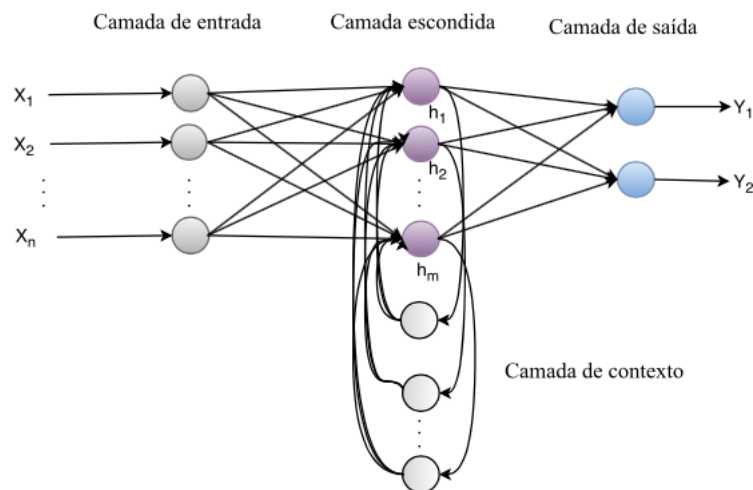


Figura 2.7: Esquema de uma RNA Recorrente do tipo Elman. [4].

O protocolo estudado usará uma RNA treinada para identificar oportunidades no canal, como a técnica de sensoriamento do espectro do CR. A RNA usada foi desenvolvida no trabalho [4] e revista no trabalho [5]. Vamos focar nos aspectos gerais do desenvolvimento dessa RNA especificamente.

O desenvolvimento da RNA usada foi dividido nas seguintes etapas: aquisição dos sinais observados no espectro (etapa 1), análise e tratamento do sinal (etapas 2 e 3), treinamento da RNA usando os sinais coletados e suas respostas (etapa 4) [4].

2.4.1 Aquisição dos sinais

Amostras de sinais discretos de comunicação cuja frequência central foi definida em 2,472GHz do espectro foram capturadas através de um *Universal Software Radio Peripheral* (USRP), com frequência de 25 MHz, com um intervalo entre amostras de $0,04\mu\text{s}$ [5]. As coletas foram feitas em redes 802.11g, funcionando no modo básico do CSMA/CA[4].

2.4.2 Processamento dos sinais

Um dos fatores mais importantes para identificar oportunidades de transmissão, é a detecção do espectro. Algumas das principais formas de detecção são: detecção por energia, detecção da característica ciclo-estacionária e detecção por correspondência de filtro [21]. A detecção por energia consiste em avaliar o nível de energia do sinal para identificar se há transmissões de PUs. A detecção por correspondência de filtro é aplicada quando o SU tiver algum conhecimento prévio do sinal de PU, assim poderá identificar o sinal depois do mesmo ser passado por um filtro que melhora o sinal original e diminui o ruído eletromagnético que degrada-o. A detecção da característica ciclo-estacionária se parece com este último, também precisa de um conhecimento prévio das características de transmissão do PU. Com informações mais específicas de PU com esse método é possível detectar o que é sinal original e o que é ruído. A RNA em questão usa a técnica de detecção por energia [4]. Nesse método a energia de um sinal pode ser descrita pela equação

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (2.1)$$

onde $x(t)$ é o sinal contínuo no tempo t , e E_x a energia do mesmo. Para um sinal modelado matematicamente por $z(t) = I(t) + i.Q(t)$, sendo $I(t)$ sinal de fase e $Q(t)$ sinal de quadratura, temos que a energia de sinais discretos para esse sinal seria

$$E_z = \sum_{j=1}^N I(j)^2 + Q(j)^2 \quad (2.2)$$

onde no domínio do tempo j é o número da amostra, N é o total de amostras no intervalo, I e Q componentes do sinal $z(t)$.

Para detectar se há energia nessa amostra de sinal discreto, um valor mínimo λ é definido e comparado com o resultado da função (2.2) para o canal. Assim, quando $E_z \geq \lambda$ então significa que o PU está enviando sinais pelo canal, caso contrário não há transmissões do PU na amostra de sinal j .

Assim todos os sinais capturados passam por esse processamento, e as estimativas de energia obtidas do canal serão usadas na próxima etapa. Para ilustrar esse processamento

a Figura 2.7 mostra dois gráficos, o primeiro mostra as componentes I e Q de uma amostra do sinal, e o segundo apresenta os níveis de energia do mesmo sinal.

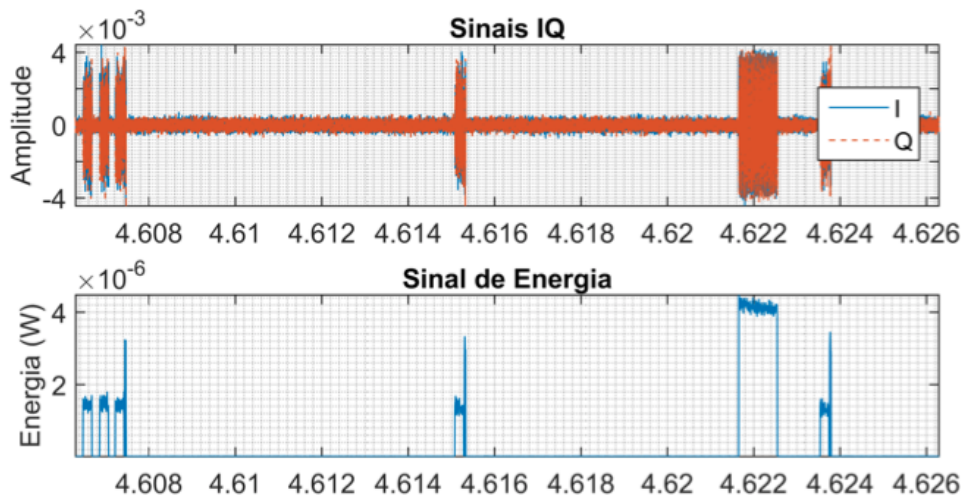


Figura 2.8: Exemplo de processamento do sinal [4].

2.4.3 Limiarização

As estimativas de energia das amostras do sinal são usadas para gerar dados binários mostrando se há ou não transmissão de PU no canal, e a partir disso é possível verificar oportunidades no canal e uma estimativa de tempo que as oportunidades e transmissões duram. Esses dados serão usados como parâmetros de entrada da RNA para treinamento.

2.4.4 Treinamento da RNA

A versão da RNA usada neste trabalho foi resultado dos trabalhos [4] [5], onde neste último a rede foi escrita em C++ para possibilitar a integração com o protocolo que será desenvolvido em um ambiente de simulação de redes.

A rede foi treinada para identificar nos sinais das amostras capturadas quando há transmissão e oportunidade. Essas transmissões das capturas foram consideradas nesse trabalho como sendo do PU. A rede foi desenvolvida para que funcionasse de forma *online* oferecendo como resultado para o SU 0 quando não há oportunidades de transmissão e 1 quando há, ou seja, quando deve transmitir no canal. Ao mesmo tempo, que pode receber como parâmetro dados de observação do canal, e incorporar esses dados novos para que a rede fique cada vez mais especializada, e aumentando as chances de previsões corretas.

Além do uso de RNAs como técnica de sensoriamento do canal, e ferramenta para previsão de oportunidade, outras técnicas já foram exploradas em alguns trabalhos [22] [23] [2]. A apresentação dos trabalhos citados, será feita no próximo tópico.

2.5 Revisão do Estado da Arte

O protocolo desenvolvido neste trabalho, que será detalhado no capítulo seguinte, usa uma rede neural treinada que prevê o comportamento do PU identificando oportunidades de transmissão e notificando o SU para que este possa transmitir de forma oportunística. Porém há diversas formas de prover o acesso de forma oportunística ao espectro, e nesse tópico citaremos alguns trabalhos relacionados a isso.

Como citado no tópico 2.4.2 deste capítulo, há outras formas de sensorear o canal além de detecção de energia. O protocolo apresentado no trabalho [22] mescla a técnica de detecção de característica cíclica estacionária e detecção de energia. Como já citado, com o método de detecção de característica cíclica estacionária é possível diferenciar sinal e ruído. A abordagem do trabalho mostra sua vantagem para sinais com alta taxa de ruído e degradação do sinal, obtendo assim mais precisão. O protocolo também treina uma RNA com os dados processados, e a partir disso identificará se há sinal do PU no canal ou não.

No trabalho [23] vemos um abordagem diferente baseada na cooperatividade dos SU através da troca de informações no canal. A ideia é que antes de decidir se um SU deve enviar dados pelo canal, ele receberá dados de observação do canal de outro SU, e determinará se há transmissão de PU ou não. Como há transmissões de SU e PU no mesmo canal, mesmo com essa abordagem podem haver colisões, as quais não são tratadas no trabalho citado.

Também atento à necessidade de uso mais eficiente do espectro, o IEEE padronizou uma variação do protocolo 802.11, 802.11af, para especificar internacionalmente o uso do que chamamos de espectro em branco da TV, por PUs e SUs [2]. Os espectros brancos da TV são espaços de espectros que ficam disponíveis em determinados dias e locais, tornando possível o compartilhamento desses espectros nesses períodos. Essa gestão do uso do espectro branco de TV é feita através de um banco de dados de geolocalização (GDB), que auxilia na escolha da melhor forma de gerir o espectro de acordo com os domínios reguladores. O GDB é um banco de dados com as informações do espectro de acordo com a geolocalização dele. Nele estão dados das frequências disponíveis e requisitos operacionais dos SUs de acordo com a regulação do local.

2.6 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão teórica dos principais conceitos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido. Começando com a teoria de alocação dinâmica

do espectro, explicando o conceito e abordagens possíveis, pontuando a importância de Rádios Cognitivos na implementação desse conceito.

O capítulo continua explicando sobre Rádios cognitivos, seu conceito e funcionamento padrão, focando nos aspectos destes que serão de suma importância para a solução proposta neste trabalho.

Continuando com uma explicação superficial sobre pilha de protocolos de rede com ênfase no protocolo da camada de enlace, 802.11 e seu método de controle de acesso múltiplo: CSMA/CA. Como citado durante o capítulo, este trabalho propõe um protocolo que é uma adaptação do CSMA/CA para que use as previsões de uma Rede Neural Treinada específica nas decisões de gerenciamento do canal. Assim sendo, a Rede Neural treinada é apresentada em sequência, com explicações do seu funcionamento.

Por último, alguns trabalhos sobre o tema de alocação dinâmica do espectro foram citados mostrando abordagens diferentes para o tema.

Nos próximos capítulos serão apresentados detalhes da implementação do novo protocolo, resultados e validação do mesmo, e proposta para trabalhos futuros.

Capítulo 3

Protocolo SEA

Apresentaremos neste capítulo uma proposta de protocolo de controle de acesso oportunístico ao canal, usando uma Rede Neural Artificial Recorrente treinada e desenvolvida nos trabalhos [4] e [5]. Essa RNA atuará nas decisões de acesso ao meio pelos SUs, através da análise comportamental do PU. Daqui em diante iremos nos referir ao protocolo proposto como SEA, um acrônimo para protocolo inteligente de alocação do espectro (do Inglês *Smart Espectrum Allocation*). No tópico 3.1 falaremos da metodologia utilizada, proposta do protocolo e as ferramentas usadas para seu desenvolvimento. O tópico 3.2 apresenta a implementação padrão do protocolo CSMA/CA, que foi usada como base para a criação do SEA. O tópico 3.3 explica a implementação do SEA e seus componentes.

3.1 Visão Geral

No capítulo anterior foram apresentados trabalhos que propuseram diferentes implementações para um acesso oportunístico ao canal, com a intenção de melhorar a eficiência das transmissões gerenciadas pelo protocolo padrão utilizado nos dias atuais. Todos tentaram resolver a questão de como coordenar o acesso do SU com o menor número possível de colisões com o PU. Este trabalho visa propor também uma solução para este problema, com uma abordagem que adiciona uma camada de “inteligência” ao SU, que junto com a tecnologia dos CRs, torna possível que este “decida” o melhor momento para transmitir no canal, através da análise comportamental do PU. Essa camada de decisão será implementada pela RNA desenvolvida nos trabalhos [4] e [5]. Essa RNA foi especificamente treinada para prever oportunidades em um certo cenário, e este foi usado para guiar as simulações do SEA.

Foi desenvolvida então a proposta de um protocolo de comunicação MAC que consiste na adaptação do protocolo 802.11 para usar a RNA citada acima, nas previsões de oportunidade de transmissão. Escolheu-se o protocolo 802.11 por ser o mais popular e

largamente utilizado pelos diversos dispositivos. A grosso modo, a ideia de funcionamento do SEA seria: caso houvesse alguma mensagem para o SU transmitir pelo canal, o mesmo só a enviaria caso a RNA [4][5] sinalizasse que havia alguma oportunidade. O que significaria que o PU não estava transmitindo. Aprofundaremos o funcionamento do SEA, nos tópicos a seguir.

Para este trabalho usamos um ambiente de simulação com uma implementação do protocolo 802.11. O ambiente escolhido como ferramenta de desenvolvimento foi o OMNET++ versão 5.3 [24], que é um software de ambiente de desenvolvimento voltado para simulação de redes de comunicação. Suas funcionalidades são estruturadas em módulos escritos na linguagem C++, que combinados podem construir diversos cenários de comunicação de rede, com dados configuráveis que podem ser ajustados para que estes cenários sejam os mais específicos possíveis. A proposta envolveu a compreensão e adaptação dessa biblioteca para a criação do SEA, e obtenção de resultados através do ambiente de simulação que permitam a comparação com o protocolo padrão atual.

Para auxiliar no desenvolvimento e testes, construímos no OMNET++ um cenário de simulação com um PU se comunicando no canal com o comportamento pré-definido, e dois SUs trocando mensagens entre si pelo mesmo canal, usando as regras de comunicação definidas pelo SEA. Podemos ver a montagem desse cenário mostrado na Figura 3.1, onde a representação da torre é a modelagem do PU, e a representação dos dois notebooks são os dois SUs se comunicando. A comunicação é representada pela linha vermelha que aparece saindo de um dos usuários para os outros.

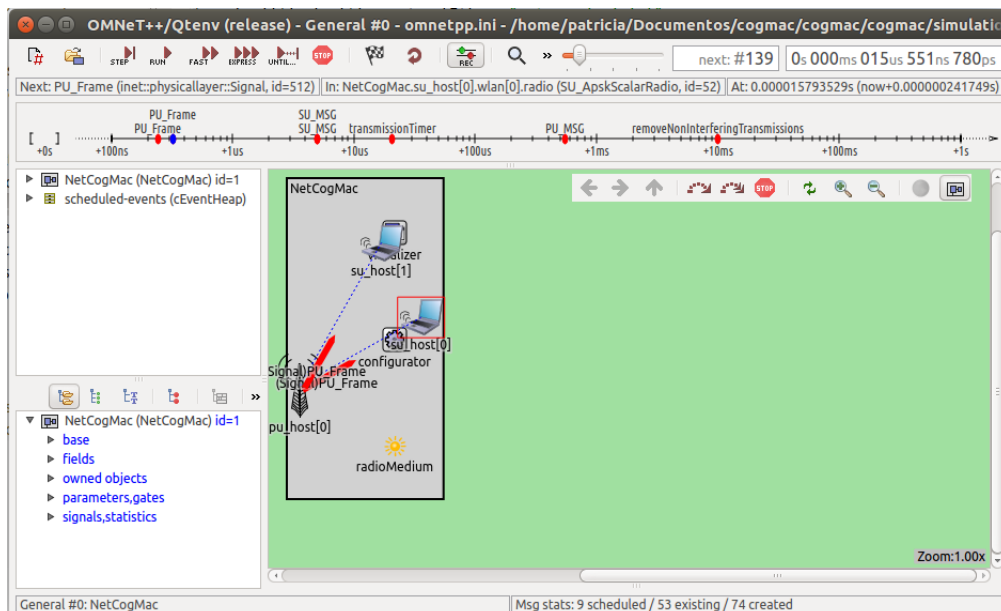


Figura 3.1: Cenário de simulação com um PU e dois SUs se comunicando no ambiente do OMNET++.

Acoplado ao OMNET++ usamos a biblioteca INET [25], que é uma biblioteca desenvolvida em C++ e implementa os protocolos padrões de rede para o ambiente OMNET++. Se valendo das funcionalidades do ambiente de simulação, modelos podem também ser construídos, modificados e adaptados usando a biblioteca do INET e testados através do ambiente OMNET++. Este trabalho teve como etapas de implementação do novo protocolo, a compreensão da implementação do protocolo 802.11 feito pela biblioteca INET, edição e adaptação do mesmo para que usasse a RNA [4][5], possibilitando enfim a simulação e análise da solução. No tópico a seguir identificaremos os aspectos mais relevantes para este trabalho, do comportamento padrão do protocolo 802.11 implementado pelo INET.

3.2 Implementação CSMA/CA pelo INET

A biblioteca do INET implementa a pilha de protocolos da *Internet*, apresentada no Capítulo 2, e suas funções. Com isso em mente, e tendo como objetivo um protocolo que gerencie de forma mais eficiente o uso do canal, focamos nossa atenção na camada de enlace, e por sua vez no 802.11. Como vimos no capítulo 2, o protocolo 802.11 pode ser dividido em mais dois níveis, LCC e MAC, sendo este último responsável pela gerência de comunicação no canal. Logo, iremos focar no protocolo utilizado pelo 802.11 nessa camada, CSMA/CA, já que nosso objetivo é atuar na alocação do espectro.

A implementação do CSMA/CA pelo INET, usa uma máquina de estados para implementar a transmissão e recepção de mensagens por um usuário. Na Figura 3.2 temos uma ilustração dessa máquina de estados para quando há uma transmissão, e usaremos essa figura para explicá-la. A máquina tem o estado inicial chamado *IDLE*, que sinaliza que o usuário não está recebendo nem transmitindo, está disponível. Caso alguma transmissão esteja acontecendo no canal, o canal não está livre (*!isMediumFree*), então o próximo estado é o *DEFER* onde permanece até que o canal fique livre novamente. Essa transição é representada na Figura 3.2 pela seta de cor lilás que sai do *IDLE* para o *DEFER*. Se o canal estiver livre (*isMediumFree*), o próximo estado é *WAITDIFS*, e essa etapa é representada pela seta lilás que sai do *IDLE* para o *WAITDIFS*.

O estado *DEFER* é para onde a máquina transiciona quando é detectado que o canal não está livre (*!isMediumFree*). Isso acontece em quase todos os estados que a máquina estiver, menos no estado *WAITACK*. Esse comportamento é representado por todas as setas coloridas que saem dos estados para o estado *DEFER*.

Quando uma mensagem chega para ser transmitida, a máquina que estava no estado *IDLE* ao ter a confirmação que o canal está livre, passa para o estado *WAITDIFS*. Neste estado um cronômetro é acionado, e contará o tempo de espera *DIFS* (*difsTime*). Durante

este tempo a máquina continua no mesmo estado. Essa espera é representada na Figura 3.2 como uma seta que sai do estado *WAITDIFS* para ele mesmo.

Quando o tempo de espera *DIFS* termina (*end-difsTime*), a máquina passa o estado *BACKOFF*, como representado pela seta amarela que vai do *WAITDIFS* até o *BACKOFF*. Neste estado é sorteado um número aleatório para o tempo de espera de *backoff* (*backoffTime*). Durante essa espera a máquina também permanece no mesmo estado, e a representação desse comportamento novamente é através da seta que sai desse estado e volta para ele. Ao final desse tempo (*end-backoffTime*), a máquina segue para o estado *TRANSMIT*, mudança ilustrada pela seta que sai do *BACKOFF* para o *TRANSMIT*.

No estado *TRANSMIT* a mensagem é finalmente enviada para a camada física, da pilha de protocolos, que a transmitirá pelo canal. A máquina permanece nesse estado até que a confirmação de que a mensagem foi completamente enviada chegue (*endData*). Só então a máquina se move para o estado *WAITACK*, seguindo a setinha azul que sai do estado *TRANSMIT* para o estado *WAITACK*, mostrado na Figura 3.2.

Depois de enviar a mensagem, o usuário que está transmitindo vai para o estado *WAITACK*, onde dispara um cronômetro de espera para a mensagem do tipo ACK (*ackTimeout*). Esse tempo de espera é representado pela seta que sai do *WAITACK* e volta para ele. Se a mensagem ACK chegar do receptor para o transmissor antes desse tempo se esgotar (*isAck*), o transmissor vai entender que a mensagem foi corretamente enviada. Caso o tempo se esgote sem a mensagem ACK ter sido recebida (*fin-ackTimeout*), é feita uma nova tentativa de envio seguindo todos os passos ditos aqui. Caso o número de tentativas de envio alcance o limite definido pelo projetista do protocolo (*max-tentativas*), a mensagem em questão é descartada, e todo o ciclo se inicia para enviar outra mensagem. Qualquer uma das situações citadas, faz com que a máquina passe de *WAITACK* para *IDLE*, reiniciando o ciclo. Efeito simbolizado pela seta rosa que sai do *WAITACK* para o estado *IDLE*, fechando o ciclo.

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é propor uma transmissão no canal de comunicação de redes sem fio mais eficiente, a máquina de estados de recepção implementada pelo CSMA/CA do INET é irrelevante nesse momento, pois a máquina de estados de transmissão que sofreu as maiores mudanças.

No próximo tópico será apresentada a implementação do SEA, bem como seu funcionamento e organização.

3.3 Implementação do SEA

O principal questionamento que motivou a implementação do SEA foi se um protocolo usasse uma RNA, como a desenvolvida nos trabalhos [4][5], para ajudar no controle do

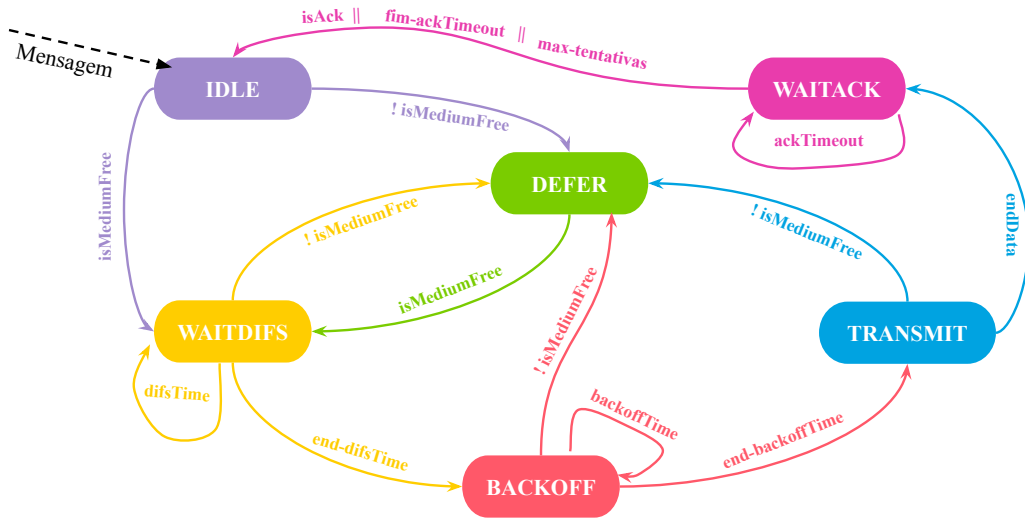


Figura 3.2: Máquina de estados implementada pelo CSMA/CA do INET.

acesso ao canal, se ele teria maior eficiência no uso deste.

Para responder a essa pergunta foi construído no OMNET++, um cenário simples, com um PU e dois SUs, como citado no tópico anterior. Sendo o comportamento desse PU modelado pelas capturas usadas para treinar a RNA que será usada. Os SUs simulariam o comportamento do SEA. Logo o trabalho dividiu-se em duas partes: modelagem do PU, e modelagem do SU.

3.3.1 Módulo PU

Como resultado das capturas de sinais feitas e processadas no trabalho [4], arquivos de texto preenchidos com 0s e 1s foram gerados. Esses arquivos representam transmissões no canal ao longo do tempo. Foi definido em [4] que cada 0 e 1 representava o que vamos chamar de *slot* de tempo, e que 0 significava sem transmissão, e 1 significa transmitindo. Com *slot* de tempo queremos dizer que cada número do arquivo significava uma janela de tempo de $5.12\mu s$ em que havia ou não mensagem sendo transmitida no canal.

Considerou-se, para fins de pesquisa, que todas essas transmissões modelariam o comportamento do PU, e o SU seria um usuário hipotético que tentaria acessar esse canal.

Então para modelar o usuário PU, foi modificada a implementação padrão do CSMA/CA feita pela biblioteca INET de forma que as transmissões fossem feitas seguindo a ordem e os tempos do arquivo de captura gerado no trabalho [4]. Para exemplificar melhor, na Figura 3.3 temos o trecho inicial de um arquivo de captura, e a marcação do tempo de quando uma transmissão, sequência de 1s, começa (t_1), $15.36\mu s$, termina (t_2), $35.84\mu s$, e o tempo que ela dura, $20.48\mu s$, considerando que começou-se no tempo de 0s (t_0).

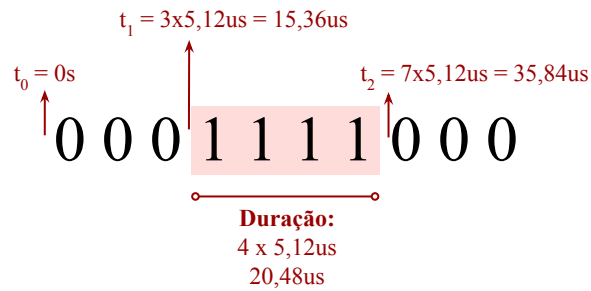


Figura 3.3: Exemplo do cálculo de tempos de transmissão em uma amostra de captura.

Como o PU é o usuário licenciado da rede, consideramos que não cabia a ele lidar com possíveis colisões, e sim o SU já que é o usuário que está usando o canal sem permissão. Além do mais, diferentemente da implementação do protocolo padrão, o PU não precisa fazer *backoff* nem as esperas padrões, porque as capturas já incluíam essas esperas. Logo o PU não precisa passar pelos estados da máquina implementada pelo INET, então ela não é usada aqui.

3.3.2 Módulo SU e Rede Neural

A primeira decisão de implementação do protocolo, foi sobre onde localizar o módulo da RNA. Tendo em mente a pilha de protocolos da *Internet* e a divisão em camadas que o 802.11 implementa, mostradas na Figura 2.5 do capítulo 2, decidiu-se que a RNA ficaria acoplada à camada MAC. Na Figura 3.4 é mostrado o detalhe de divisão da camada de enlace que o SU implementa, com o módulo da RNA acoplado. Assim a RNA está em comunicação direta com a camada MAC. O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 1 será usado para explicar melhor como acontece essa comunicação.

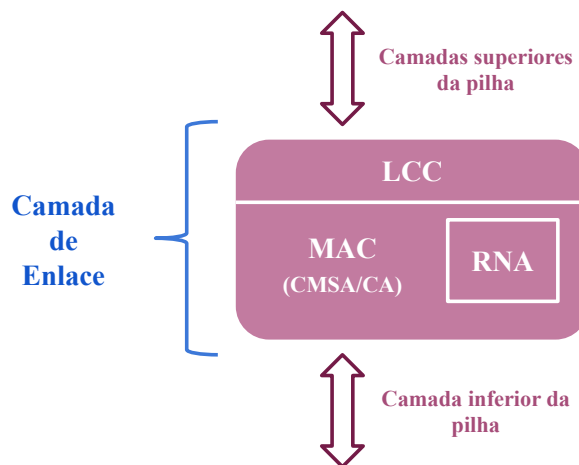


Figura 3.4: Detalhe da camada de enlace implementada pelo SEA.

Como falado na sessão 2.4.2, tópico sobre o processamento de sinais feito no processo de construção da RNA, a detecção de energia no canal foi feita por agrupamento de N amostras de sinais por intervalo de tempo. Chamou-se esses agrupamentos de janelas. O valor de N deve ser decidido considerando os aspectos de transmissão do protocolo usado, nesse caso, pelo usuário primário. Nos trabalhos anteriores definiu-se que o valor de N seria 128.

A frequência de amostragem das capturas feitas nos trabalhos da RNA foi 25MHz . Assim para calcular o período de uma janela dividimos $N(128)$ por 25MHz , e obtemos $5.12\mu\text{s}$.

Como dito anteriormente, o usuário SU usará as previsões da RNA para saber quando há uma oportunidade de transmissão. Para que isso aconteça é necessário que o SU observe o canal e notifique a RNA enviando 0s e 1s. Enviando 0s quando o PU não está transmitindo no canal e 1s quando está transmitindo. A RNA está programada para receber atualizações do canal a cada *slot* de tempo de $5.12\mu\text{s}$. Então o SU precisa notificar a RNA a cada intervalo de *slot*. Esse comportamento está sendo representado nas linhas 1 à 10 no Algoritmo 1. A cada notificação que a RNA recebe do SU, ela retorna para o mesmo se há ou não oportunidades no canal.

Para transmitir uma mensagem pelo canal, a cada previsão da RNA o SU verifica se o resultado significa se há oportunidade de transmissão ou não. Se houver oportunidade, o SU inicia a máquina de estados de transmissão do protocolo SEA.

Algoritmo 1: Pseudocódigo do funcionamento de SU

```
1 Reportando a RNA:
2 início
3   o SU observa o canal a cada intervalo de tempo de  $5.12us$ ;
4   if PU estiver usando o canal then
5     a RNA é alimentada com valor 1;
6   else
7     a Rede Neural é alimentada com valor 0;
8   end
9   SU recebe a predição da RNA;
10 fim
11
12 Gerenciando o envio pelo canal:
13 início
14   if RNA retorna 1 then
15     o SU envia mensagem pelo canal usando a máquina de estados adaptada do
        CSMA/CA;
16   else
17     o SU continua observando o canal e reportando a RNA;
18   end
19 fim
```

Segundo [4][5] cada oportunidade que a RNA identifica, significa que há uma janela de oportunidade com 70 *slots* de tempo de duração, o que dá um total de $358.4us$, que é o tempo que uma transmissão do SU deve levar. Essa janela de oportunidade é dividida, como ilustrado na Figura 3.5, entre os tempos de espera DIFS, tempo de transmissão do dado, tempo de espera SIFS, e tempo recepção do ACK.

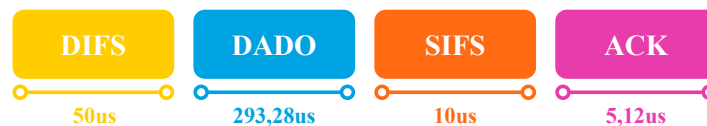


Figura 3.5: Divisão da janela de oportunidade.

Vemos também na Figura 3.5 a duração de cada bloco de tempo que compõe uma janela de oportunidade. A espera DIFS é implementada pelo INET com um valor padrão de $50us$, bem como SIFS com o valor de $10us$. Definiu-se para o protocolo SEA, que

a duração de um ACK fosse de um *slot* de tempo, ou seja $5.12\mu s$. Tendo esses valores pré-definidos, calculou-se que a duração do envio de um dado deveria ser de $293.28\mu s$ como mostrado no cálculo abaixo.

$$DADO = 358.4\mu s - 50\mu s - 10s - 5.12\mu s \quad (3.1)$$

$$DADO = 293.28\mu s \quad (3.2)$$

Tendo os detalhes apresentados em mente, modificou-se a máquina de estados de transmissão do CSMA/CA para atender a esses requisitos. Usaremos a Figura 3.6 como referência para a explicação das transições da máquina.

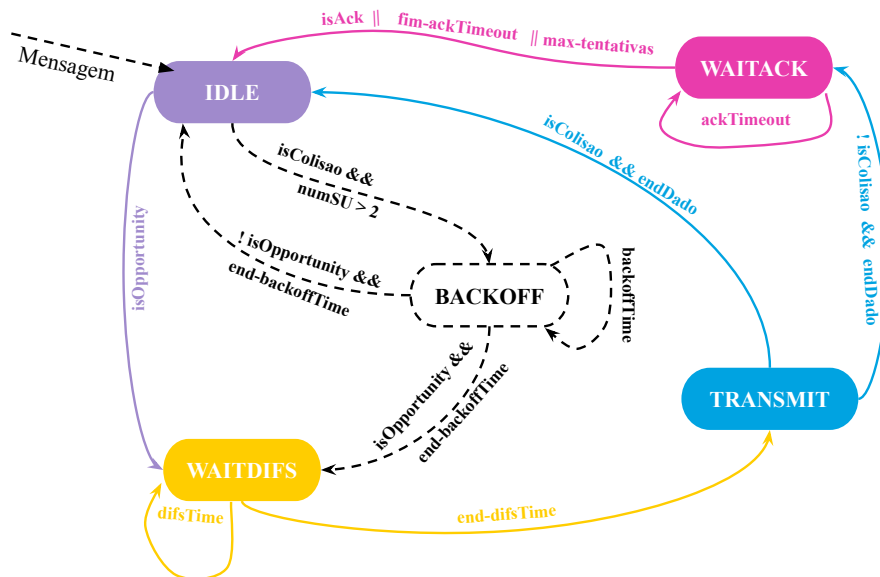


Figura 3.6: Máquina de estados de transmissão do protocolo SEA.

A máquina de estados de transmissão do SEA também se inicia no estado *IDLE* quando uma mensagem é recebida para ser enviada. Quando o SU recebe a confirmação da RNA de que há oportunidade de transmissão no canal (*isOpportunity*), a máquina transaciona para o estado *WAITDIFS*, como mostrado pela seta lilás que sai do estado *IDLE* para *WAITDIFS* na Figura 3.6.

No estado *WAITDIFS* o cronômetro do tempo de espera (*difsTime*) começa a sua contagem regressiva, e enquanto isso permanece no mesmo estado. Comportamento representado pela setinha que sai e retorna para o estado *WAITDIFS*. Quando o tempo de espera se encerra (*end-difsTime*), a máquina passa para o estado *TRANSMIT*. Essa transição é mostrada na Figura 3.6, pela seta amarela que sai do *WAITDIFS* para o *TRANSMIT*.

Nesse momento o SU que irá receber a mensagem começa a performar a máquina de estados da Figura 3.7. Quando o receptor detecta que há uma mensagem sendo transmitida pelo canal (*isReceiving*), a máquina sai do estado *IDLE* para o estado *RECEIVE*. Transição mostrada pela seta lilás da Figura 3.7.

O estado *TRANSMIT* é responsável por de fato transmitir a mensagem pelo canal, e verificar se houve colisão com algum outro usuário. Caso haja colisão (*isColisao*), ao terminar o envio da mensagem (*endDado*) a máquina volta para o estado *IDLE* e tenta transmitir a mesma mensagem novamente. Caso não haja colisão (*!isColisao*) e a transmissão tenha acabado (*endDado*) o próximo estado da máquina é o *WAITACK*, onde o usuário dispara o contador de espera da mensagem *ACK* (*ackTimeout*). As duas transições são representadas pelas setas azuis que aparecem na Figura 3.6.

Enquanto o transmissor fica no estado *WAITACK*, o receptor avalia a mensagem que recebeu. Caso a mensagem tenha vindo do PU (*msg-PU*), ou com um destinatário que não seja ele (*isEngano*), a mensagem é deletada. Se a mensagem chegar para o destinatário correto porém com perda de dados (*!msg-correta*), então não é mais confiável, e também é deletada. Nesses 3 casos a máquina volta para o estado *IDLE*, transação representada pela seta roxa escura que sai do estado *RECEIVE* para o estado *IDLE* na Figura 3.7. Porém se a mensagem não estiver corrompida (*msg-correta*) e o destinatário correto (*!isEngano*), a máquina vai para o estado *WAITSIFS*. Transição mostrada na Figura 3.7 como a seta roxa escura que sai do *RECEIVE* para o estado *WAITSIFS*.

No estado *WAITSIFS* o receptor dispara um cronômetro que faz a contagem regressiva da espera *SIFS* (*sifTime*). Enquanto isso espera no mesmo estado, comportamento mostrado pela seta que sai do *WAITSIFS* e volta para ele, na Figura 3.7. Quando o tempo de espera se esgota (*end-sifsTime*), ele envia uma mensagem do tipo *ACK* para o transmissor e retorna para o estado *IDLE*. Transição mostrada pela seta rosa, na Figura 3.7.

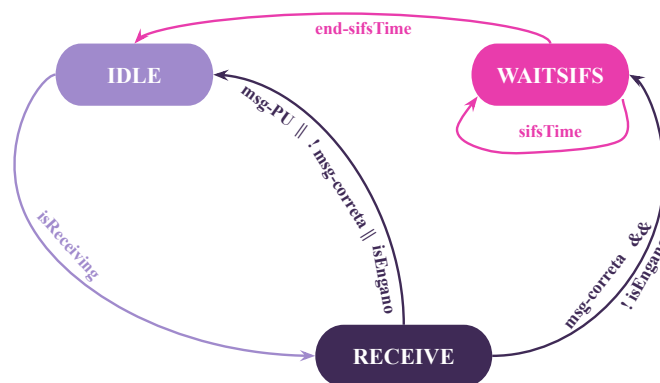


Figura 3.7: Máquina de estados de recepção do protocolo SEA.

Caso o transmissor receba a mensagem do tipo ACK antes do tempo de espera acabar (*isACK*), então o ciclo começa novamente para o envio de outra mensagem. Se o tempo acabar e o ACK não for recebido (*fin-ackTimeout*), o transmissor tentará mandar a mensagem novamente. Porém se a quantidade máxima de tentativas de envio, que no caso do SEA são 7, forem alcançadas (*max-tentativas*), o transmissor desiste de enviar essa mensagem e reinicia a máquina para enviar uma nova. Em todos os 3 casos a máquina volta para o estado *IDLE*. Esse fechamento do ciclo é ilustrado pela seta rosa que vai para o estado *IDLE*.

O estado *DEFER* não foi considerado na implementação da máquina de transmissão do SEA. Isso porque o estado *DEFER* é para garantir que o canal esteja livre, e no nosso caso a previsão da RNA fará isso. O estado *BACKOFF* é usado para tentar evitar transmissões simultâneas no canal, e a gerencia de colisão entre PU e SU está sendo feita pela RNA, ele seria usado na coordenação das transmissões dos SUS. Por isso, o caminho feito por linhas pontilhadas, na Figura 3.6, acontece apenas quando há mais de um par de SUs tentando transmitir no canal. Quando essa condição é identificada ($\text{numSU} > 2$), a máquina transaciona do estado *IDLE* para o estado *BACKOFF*, caso haja colisão (*isColisao*). No estado *BACKOFF* o cronômetro que marca o tempo de espera *backoff* (*backoffTime*) é acionado. Como mostrado pela seta pontilhada que sai do *BACKOFF* e volta para ele. Ao final da espera (*end-backoffTime*), caso a RNA preveja uma oportunidade (*isOpportunity*), a máquina então vai para o estado *WAITDIFS* e continua com as transições descritas anteriormente. Caso não haja oportunidade (*!isOpportunity*), a máquina volta para o estado *IDLE*. Ambas transições ilustradas na Figura 3.6 pelas setas pontilhadas que vão para o estado *WAITDIFS* e *IDLE* respectivamente.

Resultados e comparações de desempenho do SEA com o 802.11 padrão, serão apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados e Validação

Neste capítulo mostraremos os resultados das simulações usando o protocolo padrão e o SEA, dentro do ambiente do OMNET++. Começando pelo tópico 4.1 explicando as métricas que serão usadas para análise e comparação dos resultados. No tópico 4.2 serão mostrados e explicados os resultados obtidos na simulação do cenário 1, com apenas um par de SUs se comunicando, tanto para o protocolo padrão como para o protocolo SEA. No tópico 4.3 serão apresentados os resultados do cenário 2, e novamente será feita uma análise entre o protocolo padrão e o SEA.

4.1 Métricas

Para validar o comportamento do protocolo SEA partiremos de simulações em um cenário simples para um mais complexo. Duas métricas serão para avaliação dos resultados: quantidade de mensagens transmitidas e quantidade de colisões com PU. Como citado no Capítulo 2, tópico 2.4.4, arquivos de captura que mostram transmissões, foram gerados no trabalho [4]. Usaremos um desses arquivos de captura para modelar as transmissões do PU no nosso ambiente de simulação, e mostrar o funcionamento do protocolo SEA no uso de oportunidades que aparecem no canal, evitando ao máximo colisões com o PU. A duração do arquivo de captura usado nas simulações que serão apresentadas é de 0.16777216s.

Na métrica de quantidade de mensagens transmitidas, serão consideradas apenas as mensagens para as quais o transmissor receber uma mensagem ACK. E será considerado colisão as mensagens do SU que forem transmitidas simultaneamente com as do PU.

Nos próximos tópicos essas métricas serão usadas para avaliação de dois cenários diferentes de transmissão.

4.2 Cenário 1

Como citado no Capítulo 3 e mostrado aqui novamente pela Figura 4.1, o primeiro cenário criado é composto por um PU e dois SUs se comunicando através do canal. Um dos SUs é transmissor e outro o receptor, e para avaliar a capacidade máxima do protocolo, consideraremos que o transmissor sempre terá mensagens para transmitir. O PU transmite todas as mensagens em *broadcast*, ou seja, envia as mensagens para todos que estão usando o canal, sem um destinatário específico.

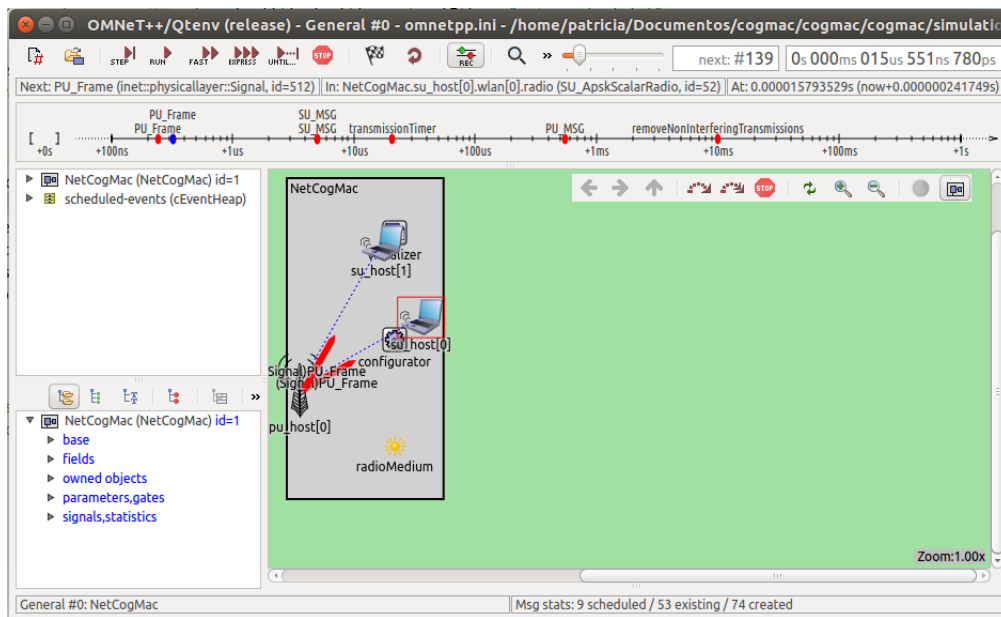


Figura 4.1: Cenário de simulação com um PU e dois SUs se comunicando no ambiente do OMNET++.

Os resultados das simulações desse cenário para o protocolo SEA, serão mostrados nos próximos tópicos. Usaremos para isso, gráficos que mostram ao longo do tempo as transmissões do PU, dos SUs e a previsão da RNA. As transmissões no canal dos SUs são representadas pelas linhas verdes e cinzas, e azuis quando forem o PU. Quando essas linhas alcançam valores maiores que 0, significa que uma transmissão está se iniciando, e quando os valores vão diminuindo, significa que a transmissão está finalizando, até que cheguem a 0, e a transmissão tenha acabado. As previsões da RNA são mostradas com valores inversos, por exemplo, no protocolo quando há uma oportunidade a RNA retorna o valor 1 para a camada MAC do SU, porém no gráfico essa previsão de oportunidade é representada com valor 0, e pela linha de cor vermelha.

4.2.1 SEA

Nesse momento considera-se que os SUs estão usando o protocolo SEA para controlar o acesso ao canal. Para os gráficos que serão mostrados nessa seção, as linhas verdes são as transmissões do SU transmissor, e as linhas pretas são os ACKs enviados pelo SU receptor.

Nesse primeiro momento analisaremos a Figura 4.2, onde temos um gráfico que mostra o comportamento dos usuários do canal e das previsões da RNA, no intervalo de simulação de 0s até 7.68ms. A partir desse trecho curto podemos verificar a previsão da RNA, que identificou que não havia oportunidade de transmissão no começo, e depois da transmissão do PU, notificou o SU que havia oportunidade. A partir daí o SU transmite, mostrada na legenda como SU_t, e em sequência um ACK é transmitido pelo receptor, SU_r. E assim repetidamente enquanto a RNA identificar oportunidade. A Figura 4.3 também mostra dois momentos que o PU transmite, representado na legenda como PU, e nesses dois momentos a RNA prevê que não há oportunidades, mostrado na legenda como RNA, e o SU não transmite. Quando a RNA identifica que há oportunidade, acontecem as sucessivas transmissões dos SUs, linhas verdes e linhas pretas. No início das transmissões, vemos que o PU não transmite por um tempo, porém a RNA não identifica oportunidade. Isso porque ela só começa as previsões quando começa a receber dados do espectro, e assim consegue identificar padrões.

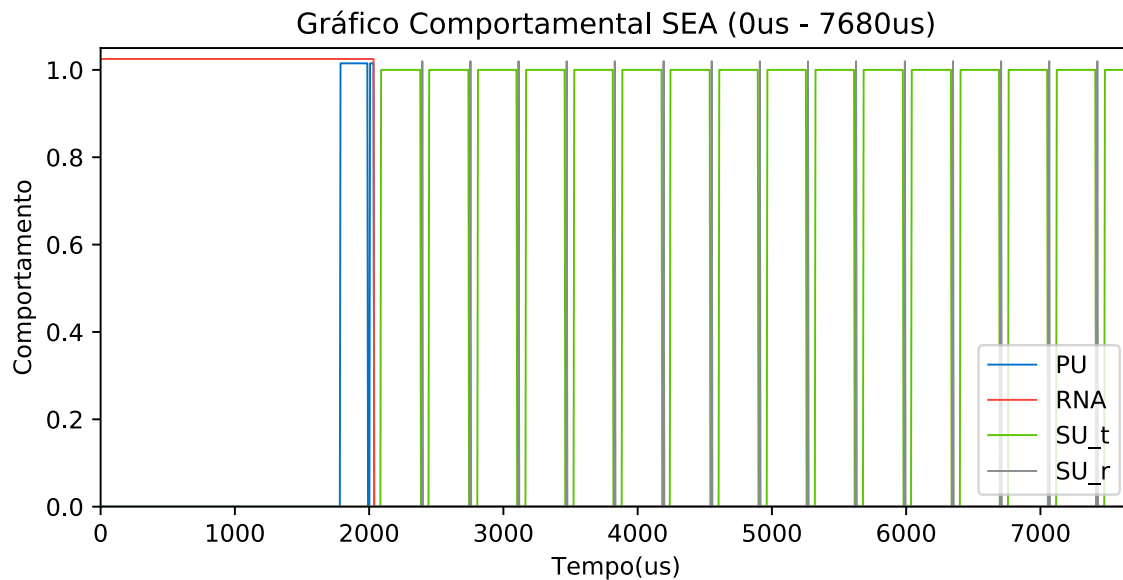


Figura 4.2: Gráfico comportamental do protocolo SEA de 0s até 7.68ms.

Mesmo a RNA prevendo corretamente as oportunidades, colisões entre as transmissões do PU e SU ainda ocorrem, como podemos ver nos trechos mostrados nas Figuras 4.4 e

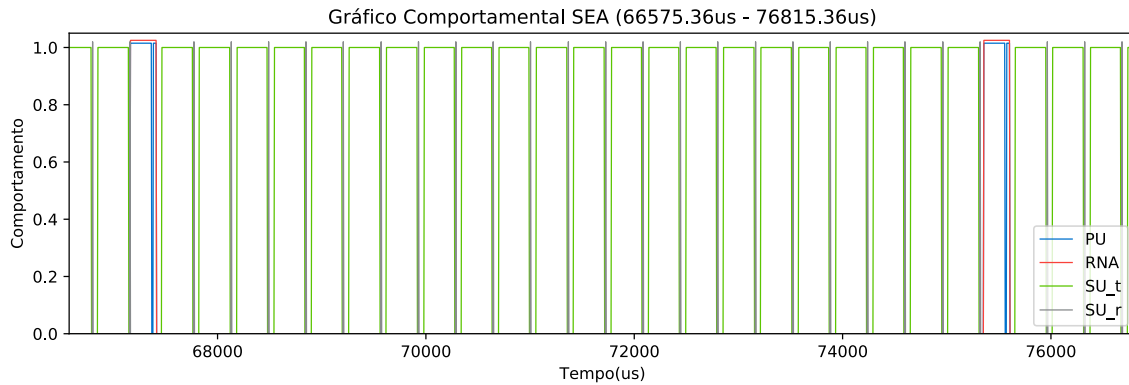


Figura 4.3: Gráfico comportamental do protocolo SEA de $66.57536ms$ até $76.81536ms$.

4.5, que mostram o intervalo de simulação de $30.72ms$ a $38.4ms$, e de $120.33536ms$ até $124.43136ms$, respectivamente.

É possível identificar, Figura 4.4, que a RNA sinalizou que havia oportunidade de transmissão, e o SU iniciou o envio. Porém durante a transmissão do SU a RNA passa a sinalizar que não há oportunidade ao mesmo tempo que o PU começa a transmitir. Assim acontece uma colisão, e o SU transmissor não recebe o ACK do SU receptor, mostrado pela falta da linha cinza em sequência, que representa o ACK. Esse fenômeno seria evitado se a RNA previsse a falta de oportunidade com uma certa antecedência. Assim o SU não começaria uma transmissão muito perto da transmissão do PU.

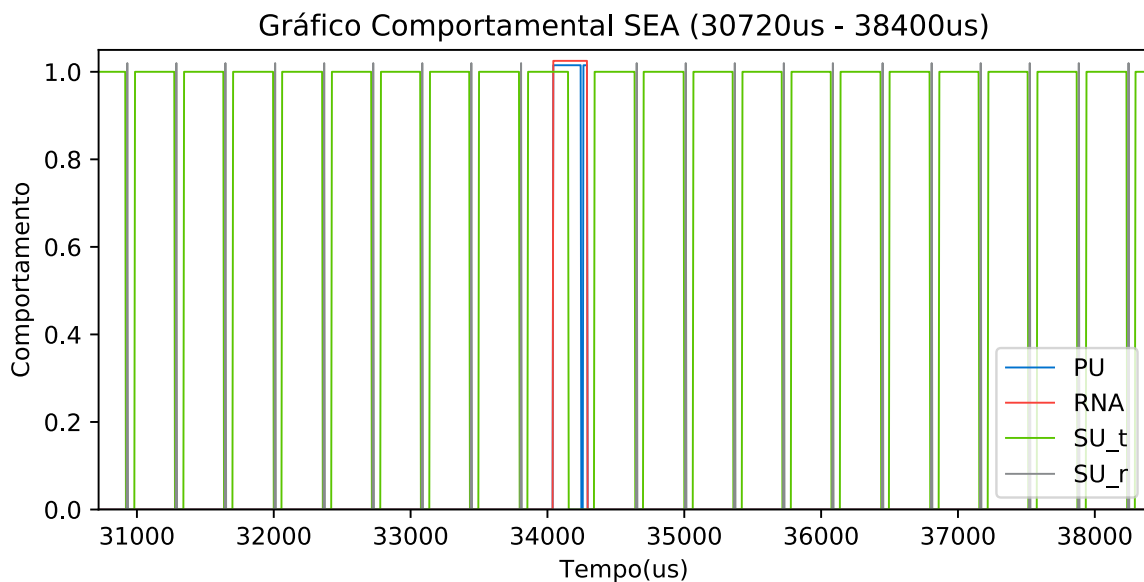


Figura 4.4: Gráfico comportamental do protocolo SEA de $30.72ms$ até $38.4ms$

A Figura 4.5 mostra mais um exemplo de colisão pois a RNA sinaliza que não há oportunidade quando o SU já começou a transmitir. Porém quando o SU termina a transmissão, o PU ainda está transmitindo, e a RNA continua sinalizando para o SU a

falta de oportunidade. Esse fatores geram a interrupção nos envios cadenciados do SU, espaço que a linha verde assume valor 0, mostrado na Figura 4.5, até que PU termine de transmitir e a RNA volte a identificar oportunidade no canal.

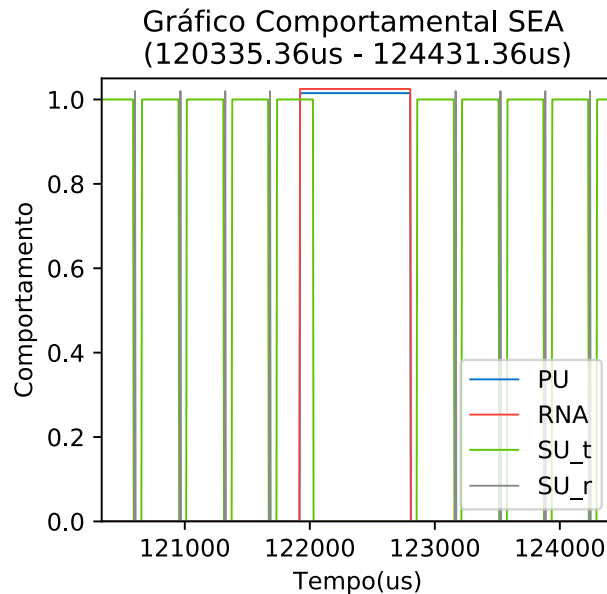


Figura 4.5: Gráfico comportamental do protocolo SEA de 120.33536ms até 124.43136ms

Os gráficos apresentados nessa seção são recortes da simulação completa desse cenário que é mostrado no Anexo 1.

A seguir, será feita uma análise com as métricas obtidas nesse cenário em comparação com as obtidas no mesmo cenário com SUs utilizando o protocolo padrão.

4.2.2 Protocolo SEA vs Protocolo padrão

Considerando a simulação inteira para esse cenário, verificamos que com o protocolo SEA, o SU conseguiu entregar 417 pacotes com sucesso, ou seja para os quais houveram envio do ACK, e sofreu 17 colisões com o PU.

Já o SU usando o protocolo padrão, para este mesmo cenário, conseguiu enviar 224 mensagens com sucesso, e aconteceram 10 colisões.

A Figura 4.6 mostra a comparação desses números graficamente.

Com isso calculou-se um aumento de mais de 86% na quantidade de mensagens enviadas com sucesso, ou seja sem colisão, ao usar o protocolo SEA, em comparação com o protocolo padrão.

Também obteve-se um aumento de 70% na quantidade de colisões ao se usar o protocolo SEA em comparação com o protocolo padrão.

Esse número elevado de colisões deve-se ao fato dessa versão da RNA ainda precisar de alguns ajustes no intervalo de predição de oportunidades, pois as colisões foram resultado

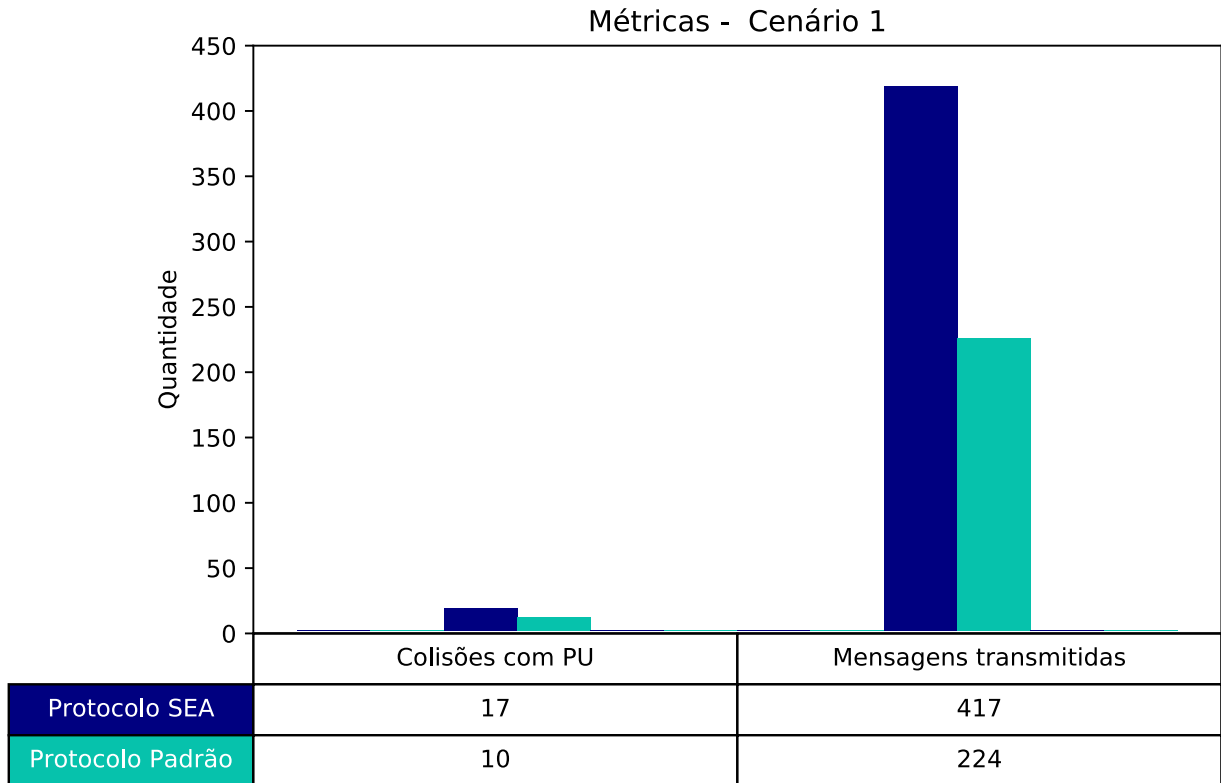


Figura 4.6: Métricas obtidas do Cenário 1

da notificação da falta de oportunidade no canal muito perto do envio do PU. Esse fato é mostrado no tópico anterior na explicação da Figura 4.4.

4.3 Cenário 2

Nesse segundo cenário tem-se um PU e dois pares de SUs se comunicando no canal, como ilustrado na Figura 4.7. Os SUs são representados pelos computadores, e o PU pela torre. Cada par é composto por um SU transmissor da mensagem, e um SU receptor da mensagem. Nesse cenário considerou-se as mesmas condições do cenário 1, com PU transmitindo em *broadcast*.

Nos gráficos que serão mostrados a linha verde mostra as transmissões de um par de SU, e a linha rosa mostra as transmissões do outro par de SU. A linha preta simboliza o envio do ACK, e o azul simboliza as transmissões de PU e a linha vermelha mostra as previsões da RNA.

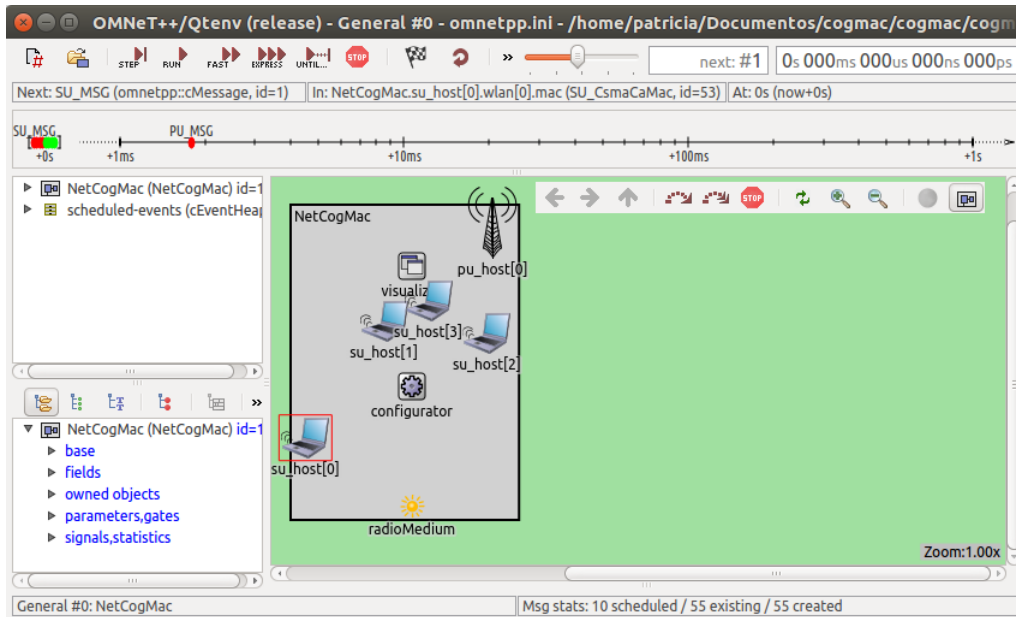


Figura 4.7: Cenário de simulação com um PU e dois pares de SUs se comunicando no ambiente do OMNET++

4.3.1 SEA

O gráfico da simulação completa desse cenário pode ser visto no Anexo 2. Serão usados trechos dele para validação do comportamento do protocolo SEA nesse cenário.

No trecho mostrado na Figura 4.8 vê-se a linha vermelha mostrando o período que a RNA não identifica oportunidade, o envio do PU, e o não envio do SU durante esse tempo. Um comportamento que difere do cenário 1, pois nesse caso há a espera do intervalo de *backoff* quando a transmissão de dois SUs colidem, ou seja transmitem simultaneamente.

Na Figura 4.8 é possível identificar que há simultaneamente a transmissão de dois SUs quando as linhas verde e rosa ficam sobrepostas, sinalizando uma colisão. Essa colisão é seguida de um espaço em branco caracterizando a espera do tempo de *backoff*. Depois desse tempo, o SU que gerou um tempo aleatório de *backoff* menor, consegue permissão de usar o canal primeiro e então transfere a mensagem. Vemos isso quando o espaço em branco é seguido pela transmissão mostrada pela linha verde, e a linha preta mostrando que houve o envio de um ACK para ela. Ou seja, nessa segunda transmissão, não houve colisão, e por isso a linha rosa não teve valores maiores que zero durante este tempo.

A Figura 4.9 mostra que as transmissões dos SUs seguem um padrão. Cada colisão é seguida de um intervalo correspondente à espera de *backoff*, depois de uma transmissão bem sucedida do SU. Vê-se também as transmissões dos dois pares de SUs intercalando-se entre si, mostrando a concorrência de ambos pelo canal, possibilitado pelo tempo de espera aleatório de *backoff*.

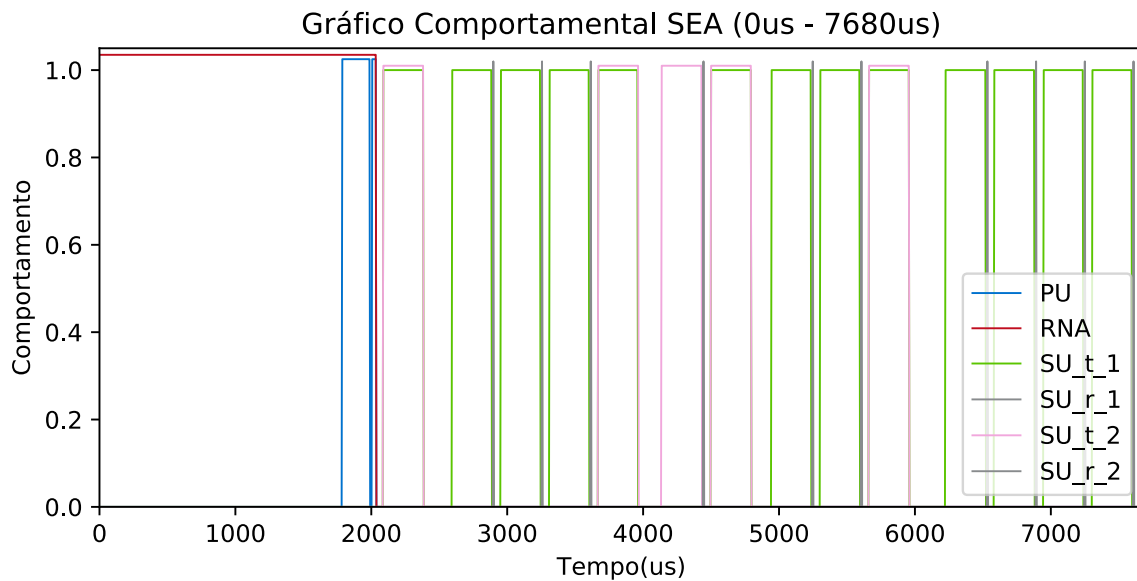


Figura 4.8: Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0s até 7.68ms

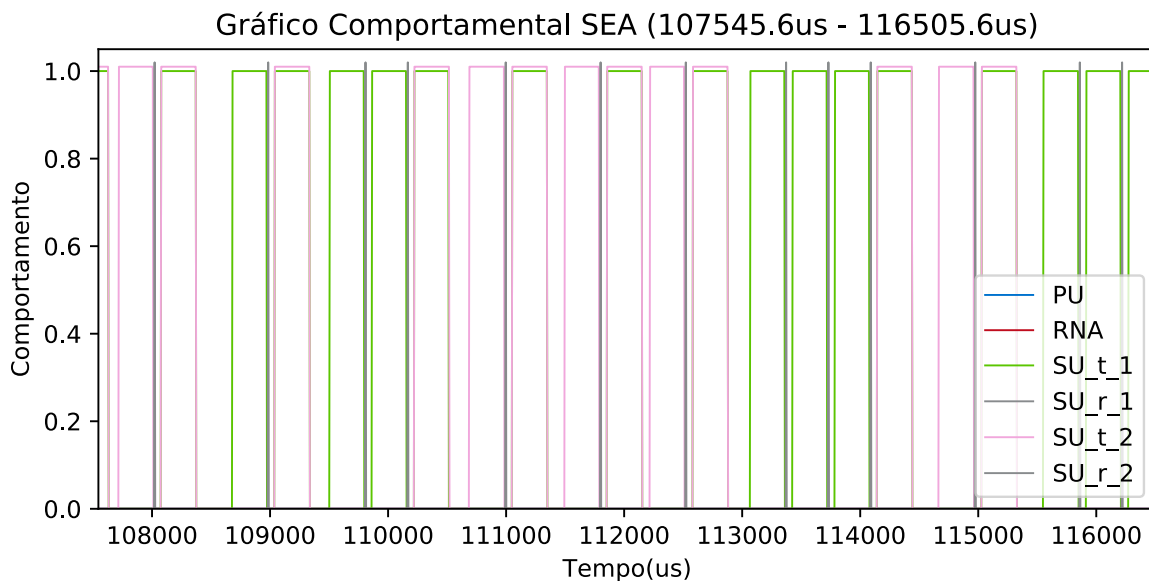


Figura 4.9: Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.1075456s até 0.1165056s

Pela Figura 4.10 identifica-se claramente os espaços de intervalo gerados por números diferentes de *backoff*, entre uma colisão entre SUs e uma transmissão bem sucedida.

Porém essas colisões entre os SUs, como dito no começo desse capítulo, não serão consideradas na contagem da métrica de colisões. Só serão consideradas colisões que com o PU.

As colisões com o PU nesse cenário 2, assim como no cenário 1, também ocorrem

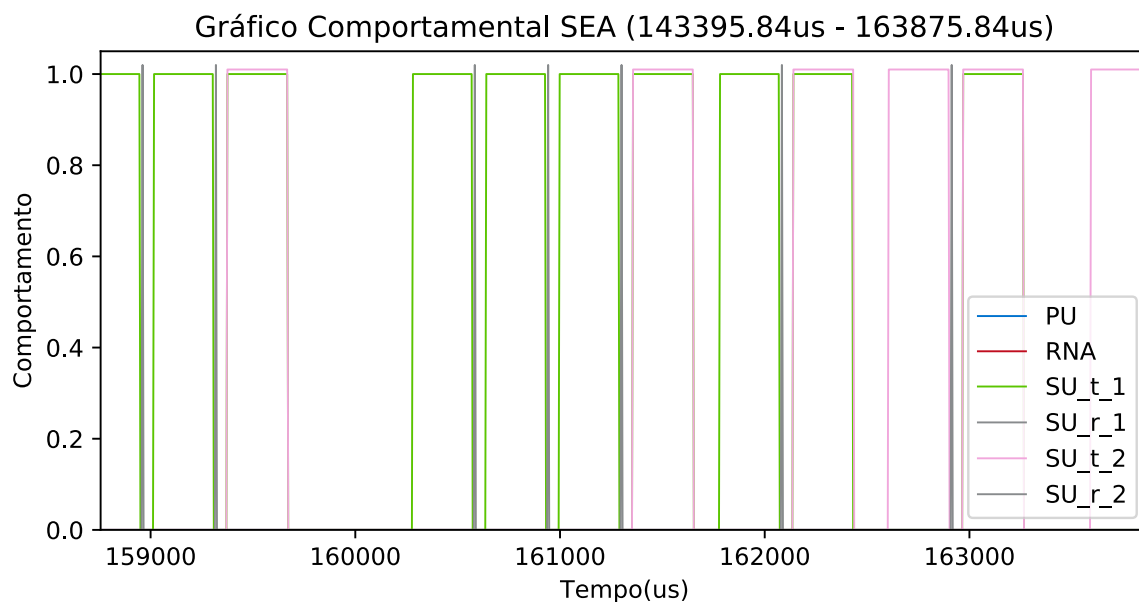


Figura 4.10: Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.14339584s até 0.16387584s

pelo fato da RNA notificar uma falta de oportunidade muito perto do início de uma transmissão do PU. Têm-se isso no trecho mostrado na Figura 4.11, onde a RNA para de notificar oportunidade do canal no meio de uma transmissão do SU. Assim, o SU não consegue evitar a colisão com o PU, que começa a transmitir imediatamente à notificação da RNA.

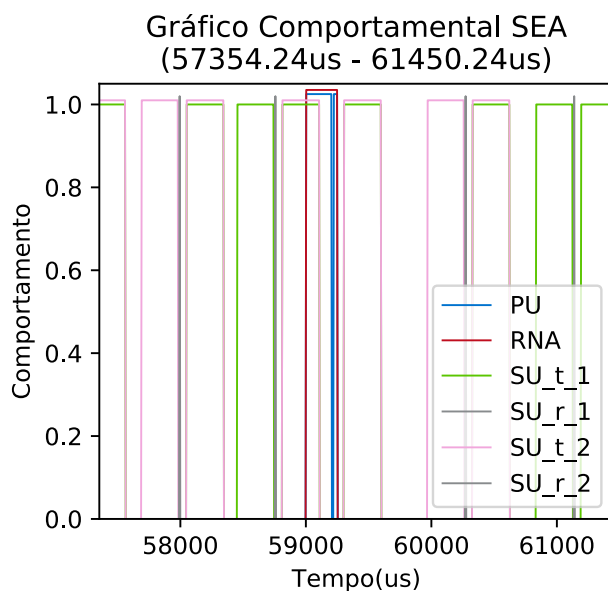


Figura 4.11: Gráfico comportamental do protocolo SEA com 2 pares de SUs se comunicando, do intervalo de 0.05735424s até 0.06145024s

4.3.2 Protocolo SEA vs Protocolo padrão

Analisando as métricas para esse cenário, obteve-se que o SU conseguiu entregar 237 mensagens com sucesso, ou seja que receberam uma mensagem ACK, usando o protocolo SEA, e teve 18 colisões.

Usando o protocolo padrão o SU conseguiu enviar 284 mensagens com sucesso, e aconteceram 14 colisões.

Na Figura 4.12 é exposto o gráfico destes resultados.

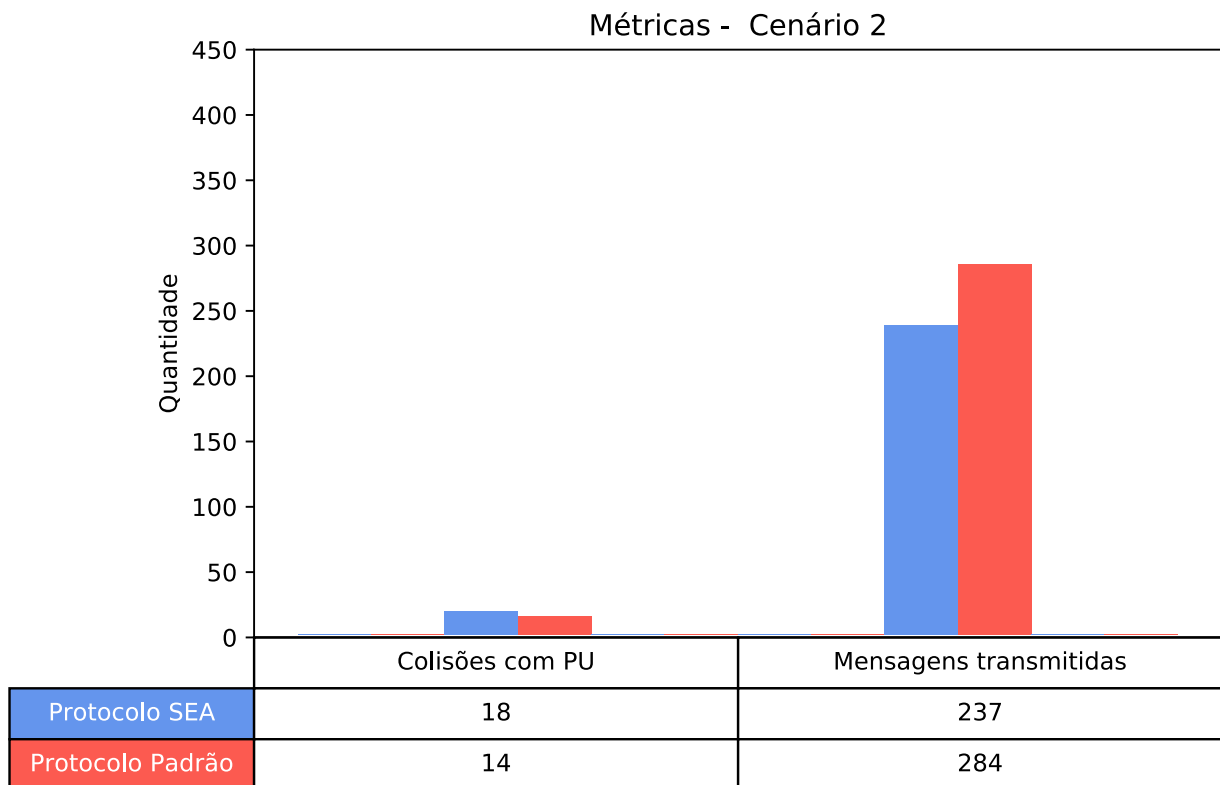


Figura 4.12: Métricas obtidas do Cenário 2

Identifica-se que com a adição de mais um par de SUs se comunicando no canal, calculou-se que houve uma diminuição de mais de 16% na quantidade de mensagens enviadas com sucesso ao usar o protocolo SEA, em comparação com o protocolo padrão.

Também obteve-se um aumento de mais de 28% no número de colisões ao se usar o protocolo SEA em comparação com o protocolo padrão.

A causa das colisões do cenário 1 se mantém no cenário 2. Porém a baixa no número de envios com sucesso é causada pelo fato de todos os SUs estarem usando a mesma versão de RNA que notifica-os ao mesmo tempo sobre oportunidades no canal, e eles logo transmitem, colidindo entre si e diminuindo as chances de envio com sucesso nesse primeiro momento. Mais pares de SUs impactaria na quantidade de transmissões bem sucedidas.

Capítulo 5

Conclusões

Com o crescimento do uso do espectro eletromagnético, especialistas alardearam do possível esgotamento das frequências utilizáveis, se a forma de dividi-lo entre os usuários continuar a mesma usada atualmente.

Diante disso, novas tecnologias surgiram para tentar tornar o uso do espectro mais eficiente. Uma das soluções para isso é a alocação dinâmica do espectro, que ao contrário da forma atual busca flexibilizar o acesso ao espectro e diminuir os momentos que o espectro fica ocioso. Uma das abordagens consiste em dividir os usuários do espectro em dois grupos. Um de usuários licenciados, com direitos de uso do espectro, e outro de usuários secundários, que mesmo sem direitos de uso, usam o espectro em momentos que os usuários licenciados o deixam ocioso.

Diante desse contexto, este trabalho busca sugerir um protocolo que implemente uma forma de acessar o canal de forma oportunística. A solução usada para coordenar o acesso ao canal foi usar as previsões da RNA publicada nos trabalhos [4] [5], para gerenciar as transmissões de mensagens dos usuários secundários pelo canal.

E assim formulamos o protocolo SEA, que se mostrou promissor nas simulações feitas pela ferramenta OMNET++. Conseguimos verificar que o uso da RNA na gerência do espectro é bastante promissor. Validamos o funcionamento do mesmo com o cenário 1 mostrado no capítulo 4, quando obtemos um aumento de mais de 86% nas transmissões bem sucedidas em comparação com os resultados do protocolo padrão.

Os resultados do cenário 2 levantaram algumas questões que precisam ser melhoradas em trabalhos futuros.

5.1 Trabalhos Futuros

Algumas sugestões para evolução da solução proposta neste trabalho são:

1. **Melhorar as previsões da RNA.** Calibrar os tempos de notificação da RNA para que o usuário secundário saiba com uma certa antecedência que o canal ficará indisponível. Essa adaptação evitaria grande parte das colisões que são causadas pela notificação de transmissão do usuário primário, durante uma transmissão do usuário secundário.
2. **Espera de um tempo *backoff* antes de transmitir.** No cenário com mais de um par de usuários secundários usando o canal, adicionar uma espera *backoff* antes de transmitir possivelmente reduziria as colisões entre eles, e aumentaria a quantidade de transmissões bem sucedidas. Melhorando as métricas para cenários com mais pares de SUs.

Referências

- [1] Cisco: *O tráfego mundial de dados aumentará 7 vezes entre 2016 e 2021*. https://www.cisco.com/c/pt_pt/about/press/news-archive-2017/20170208.html, acesso em 2018-11-27. v, vi, 1
- [2] Flores, Adriana B, Ryan E Guerra, Edward W Knightly, Peter Ecclesine e Santosh Pandey: *Ieee 802.11 af: A standard for tv white space spectrum sharing*. IEEE Communications Magazine, 51(10):92–100, 2013. v, vi, 1, 17, 18
- [3] Zhao, Xiaolong, Hangsheng Zhao, Long Cao e Jianzhao Zhang: *Taxonomy and current research status of dynamic spectrum access technology*. 2012. v, vi, ix, 5, 6, 7
- [4] Paulo A. L. Ferreira, Silas S. Fernandes: *Previsão de oportunidades de acesso utilizando redes neurais artificiais recorrentes*. Relatório Técnico, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, 2016. v, vi, ix, 2, 3, 4, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 31, 41
- [5] Makiuchi, Mariana Rodrigues: *Desenvolvimento de rede neural artificial recorrente em fpga para previsão online de oportunidades em transmissões oportunísticas em redes de comunicação wireless*. Relatório Técnico, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2018. v, vi, 2, 3, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 27, 41
- [6] Tabakovic, Zeljko, Sonja Grgic e Mislav Grgic: *Dynamic spectrum access in cognitive radio*. Em *2009 International Symposium ELMAR*, páginas 245–248. IEEE, 2009. ix, 5, 7, 8, 9
- [7] Kurose, James F e Keith W Ross: *Redes de computadores e a internet*. Uma nova, 2014. ix, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14
- [8] Haykin, Simon *et al.*: *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*. IEEE journal on selected areas in communications, 23(2):201–220, 2005. 1
- [9] Rodrigues, Mariana Makiuchi: *Previsão de oportunidades de transmissão em redes sem-fio usando redes neurais recorrentes*. Relatório Técnico, Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2018. 2
- [10] Fernandes, Silas S, Mariana R Makiuchi, Marcus V Lamar e Jacir L Bordim: *An adaptive recurrent neural network model dedicated to opportunistic communication in wireless networks*. Em *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, páginas 01–08. IEEE, 2018. 2

- [11] Ferreira, Paulo AL, Silas S Fernandes, Rodrigo R Bezerra, Marcus V Lamar e Jacir L Bordim: *Recurrent neural networks for transmission opportunity forecasting*. Em *2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, páginas 382–383. IEEE, 2016. 2
- [12] Thomas, Julie e Prasanth P Menon: *A survey on spectrum handoff in cognitive radio networks*. Em *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, páginas 1–4. IEEE, 2017. 7, 8, 9
- [13] Zhao, Qing e Ananthram Swami: *A survey of dynamic spectrum access: Signal processing and networking perspectives*. Relatório Técnico, CALIFORNIA UNIV DAVIS DEPT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2007. 7
- [14] Liu, Xiaoyuan, Yanling Zhang, Yang Li, Zhongshan Zhang e Keping Long: *A survey of cognitive radio technologies and their optimization approaches*. Em *2013 8th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, páginas 973–978. IEEE, 2013. 8
- [15] Gavrilovska, Liljana, Daniel Denkovski, Valentin Rakovic e Marko Angjelichinoski: *Medium access control protocols in cognitive radio networks: Overview and general classification*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(4):2092–2124, 2014. 9, 10
- [16] Nyayate, Mihir e YN Singh: *Dynamic safe transmit power mac protocol in wireless adhoc mac protocol*. Em *TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference*, páginas 179–183. IEEE, 2011. 10
- [17] Sobron, Iker, Cristina Regueiro, Inaki Eizmendi, Unai Gil e Manuel Velez: *Design and experimental evaluation of c-mac solutions for heterogeneous spectrum sharing*. Em *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, páginas 1–6. IEEE, 2016. 10
- [18] Tanenbaum, Andrew S: *Redes de computadores quarta edição*. Editora Campus, 2003. 11, 12
- [19] Pádua Braga, Antônio de, André Carlos Ponce de Leon Ferreira e Teresa Bernarda Ludermir: *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. LTC Editora Rio de Janeiro, Brazil:, 2007. 14
- [20] Shalev-Shwartz, Shai e Shai Ben-David: *Understanding machine learning: From theory to algorithms*. Cambridge university press, 2014. 14, 15
- [21] Tang, Yu Jie, Qin Yu Zhang e Wei Lin: *Artificial neural network based spectrum sensing method for cognitive radio*. Em *2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, páginas 1–4. IEEE, 2010. 16
- [22] Han, Dong, Gounou Charles Sobabe, Chenjie Zhang, Xuemei Bai, Zhijun Wang, Shuai Liu e Bin Guo: *Spectrum sensing for cognitive radio based on convolution neural network*. Em *2017 10th International Congress on Image and Signal Processing*,

- BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, páginas 1–6. IEEE, 2017.
17, 18
- [23] Stotas, Stergios e Arumugam Nallanathan: *Cooperative spectrum sensing protocols in cognitive radio based on energy detection*. Em *2009 First UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems (UKIWCWS)*, páginas 1–5. IEEE, 2009.
17, 18
- [24] *Omnet++: Discrete event simulator*. <https://omnetpp.org>. 21
- [25] *Inet framework*. <https://inet.omnetpp.org>. 22

Anexo I

Simulação completa do SEA - cenário 1

Gráfico Comportamental SEA (0us - 20480us)

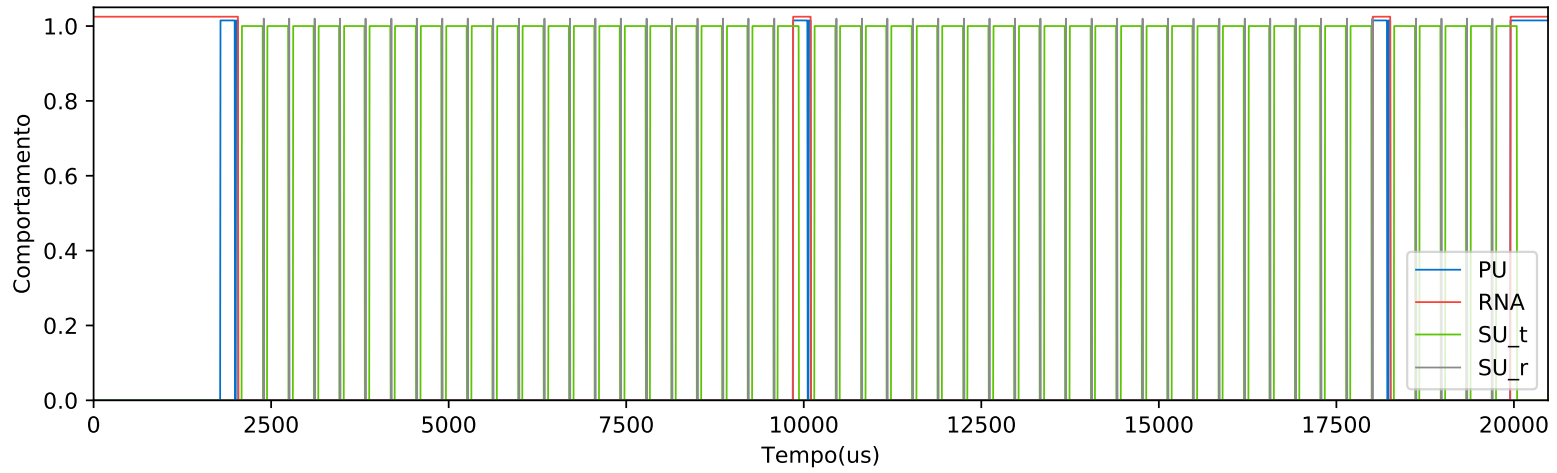


Gráfico Comportamental SEA (20485.12us - 40965.12us)

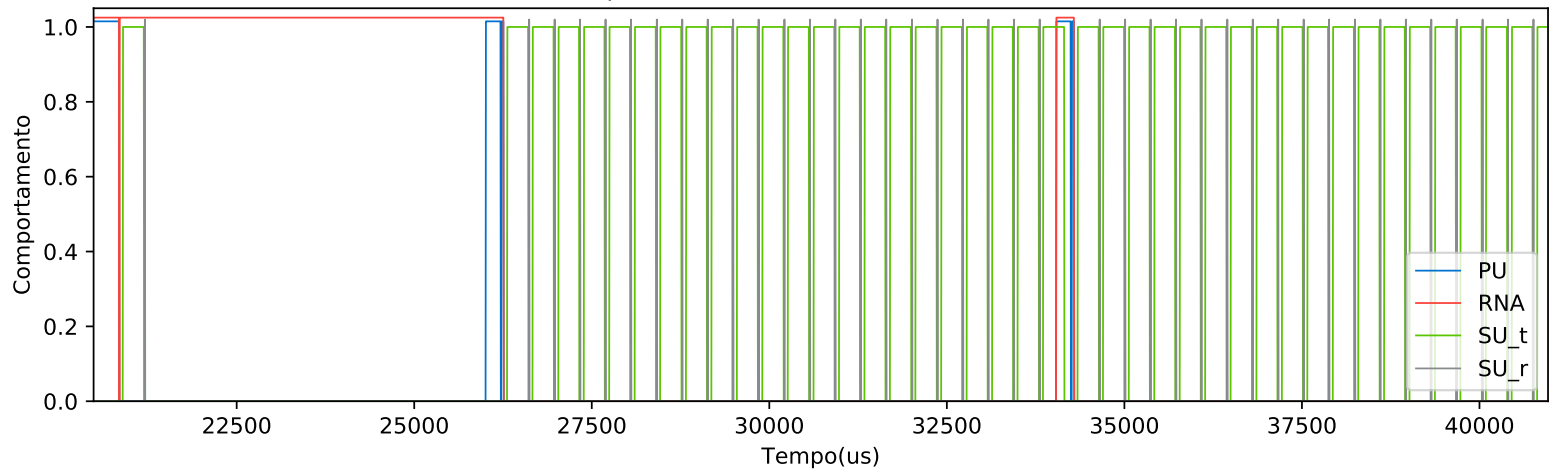


Gráfico Comportamental SEA (40970.24us - 61450.24us)

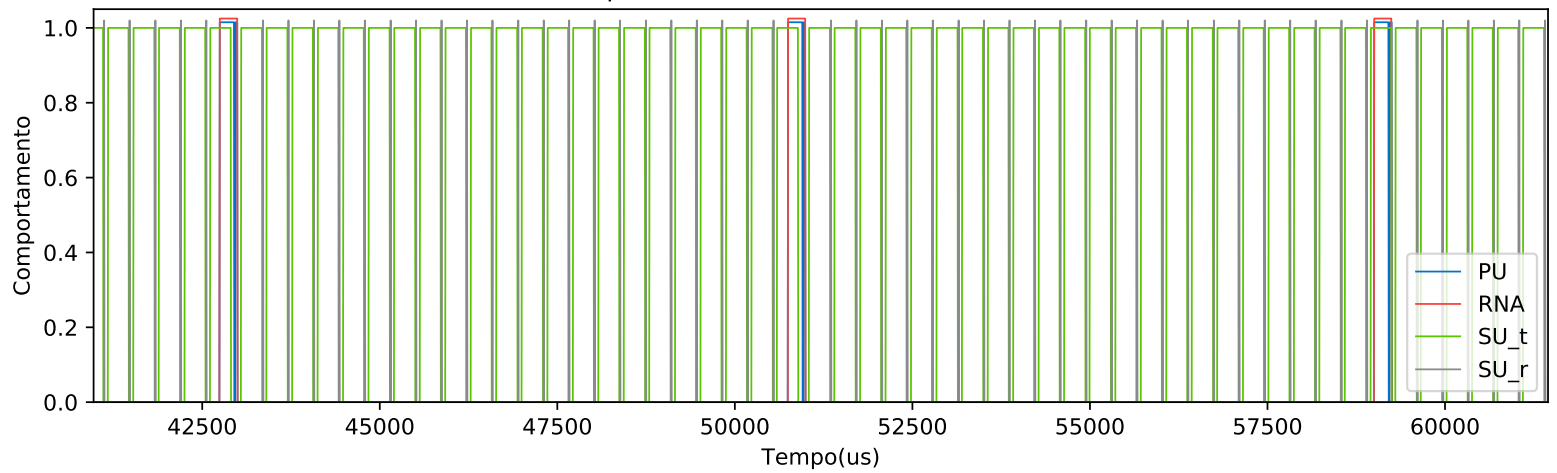


Gráfico Comportamental SEA (61455.36us - 81935.36us)

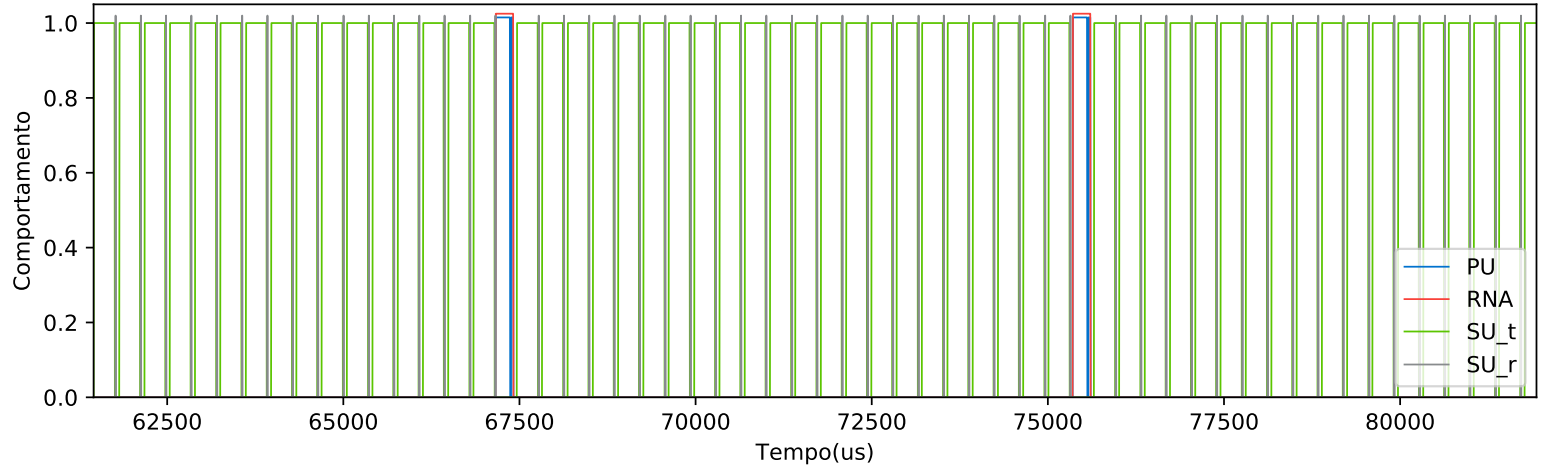


Gráfico Comportamental SEA (81940.48us - 102420.48us)

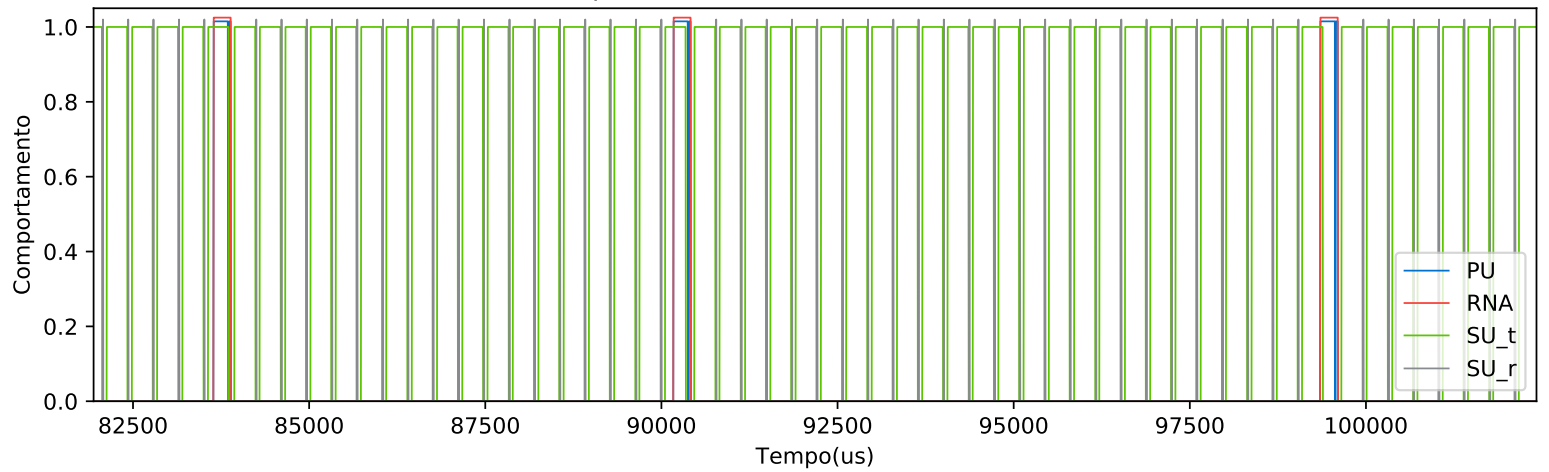


Gráfico Comportamental SEA (102425.6us - 122905.6us)

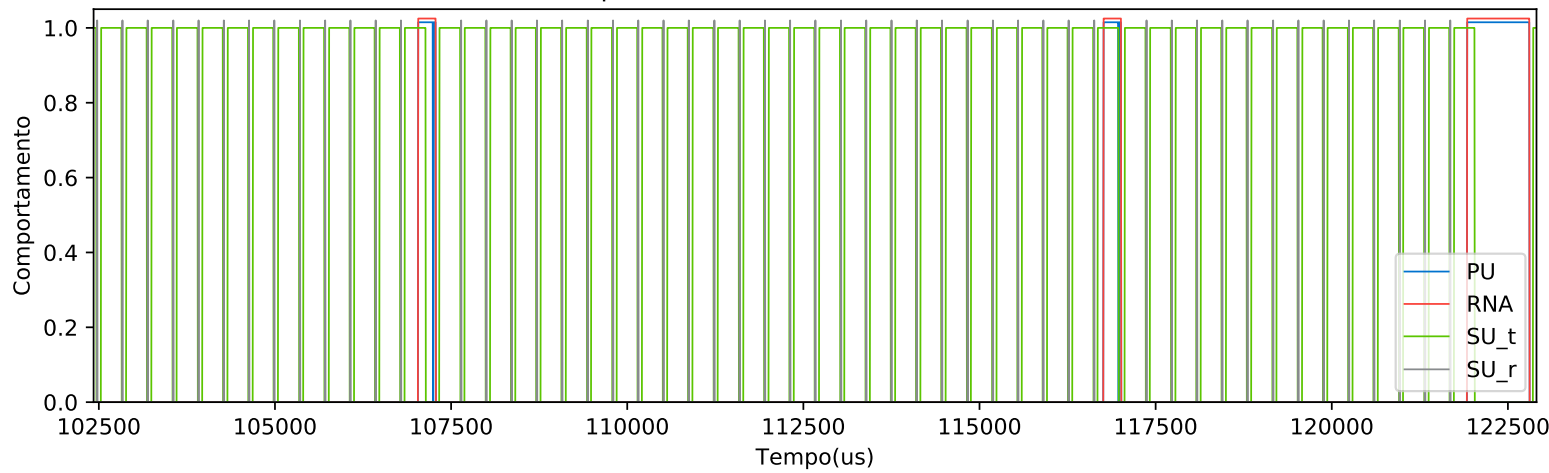


Gráfico Comportamental SEA (122910.72us - 143390.72us)

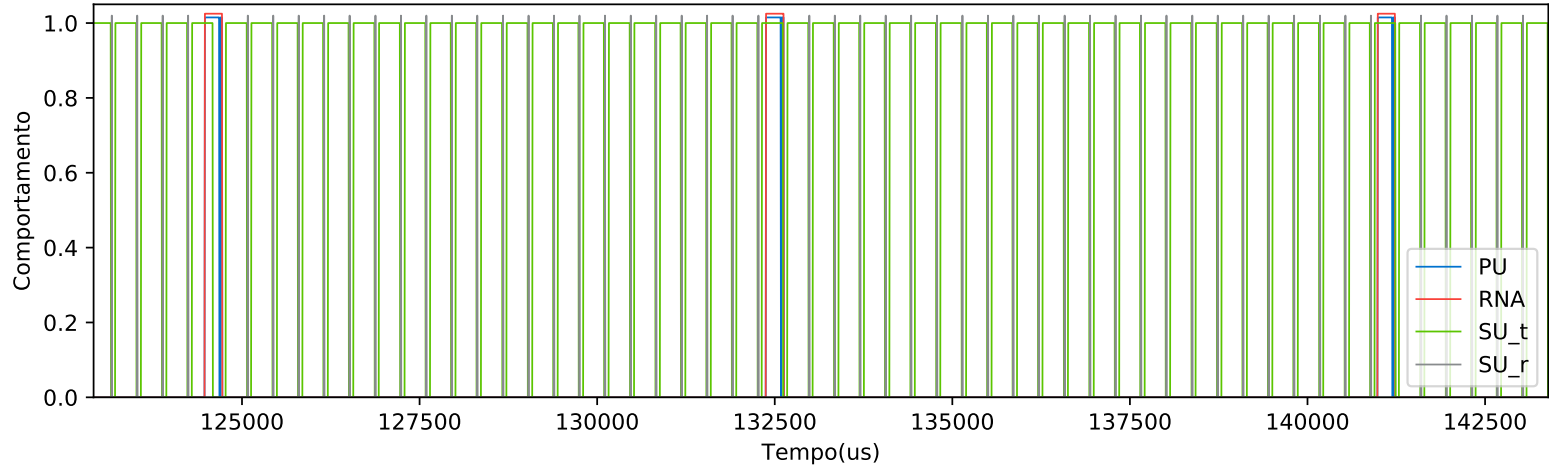


Gráfico Comportamental SEA (143395.84us - 163875.84us)

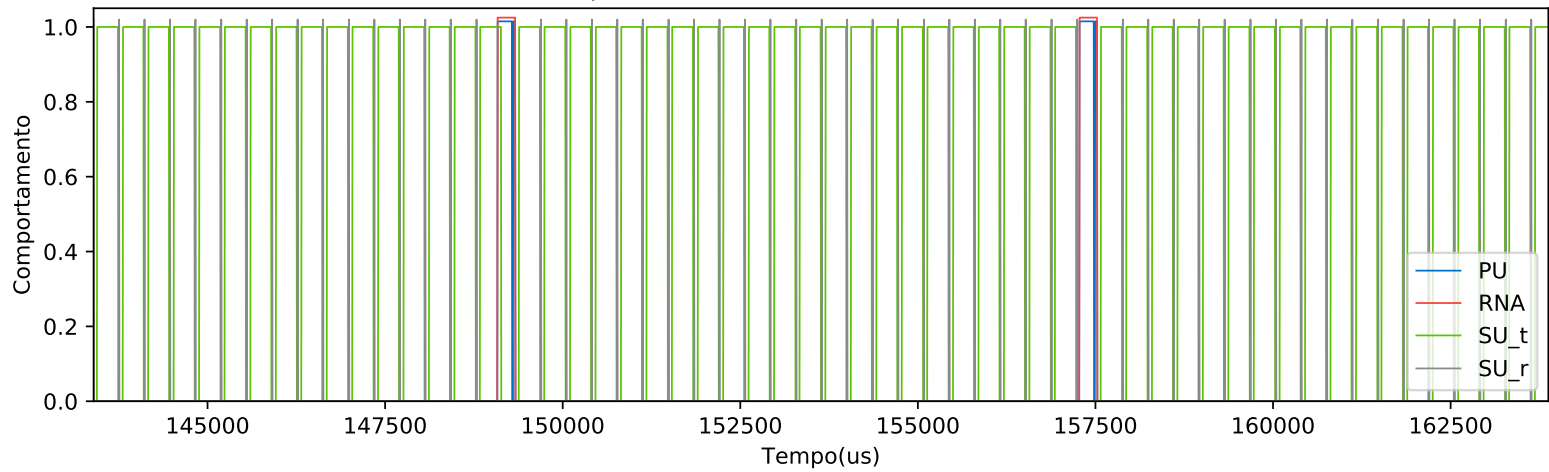
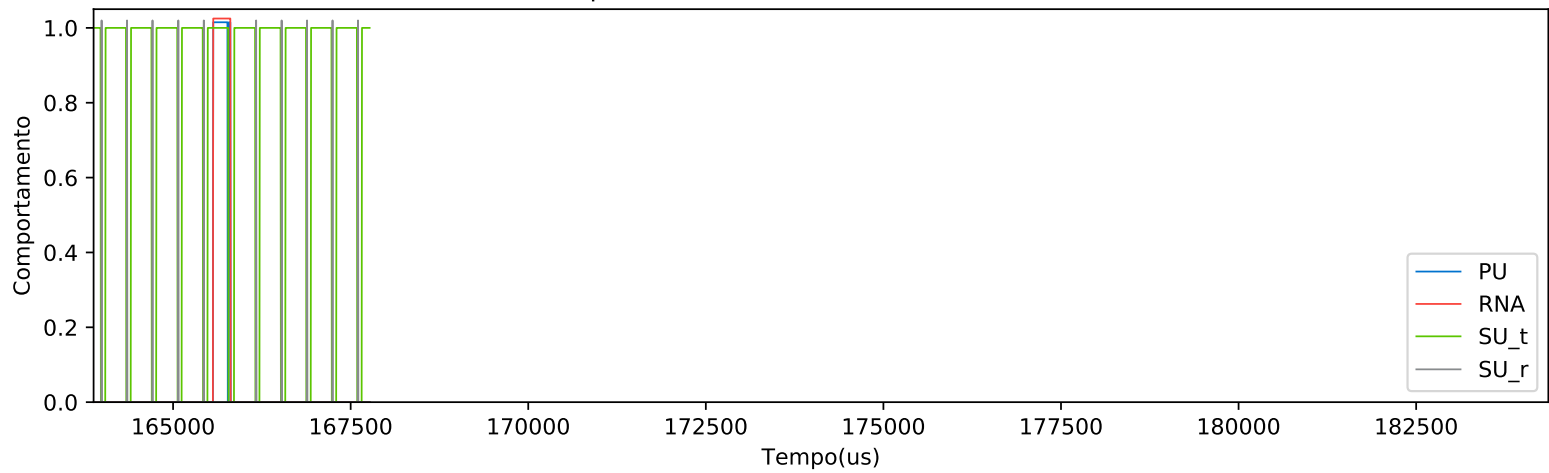


Gráfico Comportamental SEA (163880.96us - 184360.96us)



Anexo II

Simulação completa do SEA - cenário 2

Gráfico Comportamental SEA (0us - 20480us)

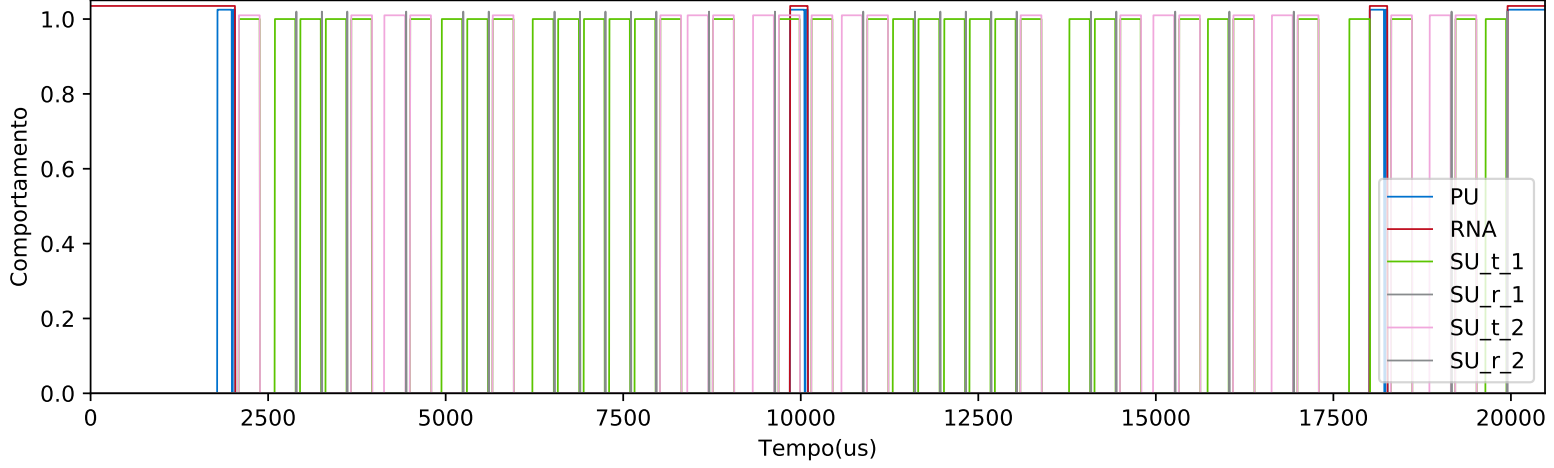


Gráfico Comportamental SEA (20485.12us - 40965.12us)

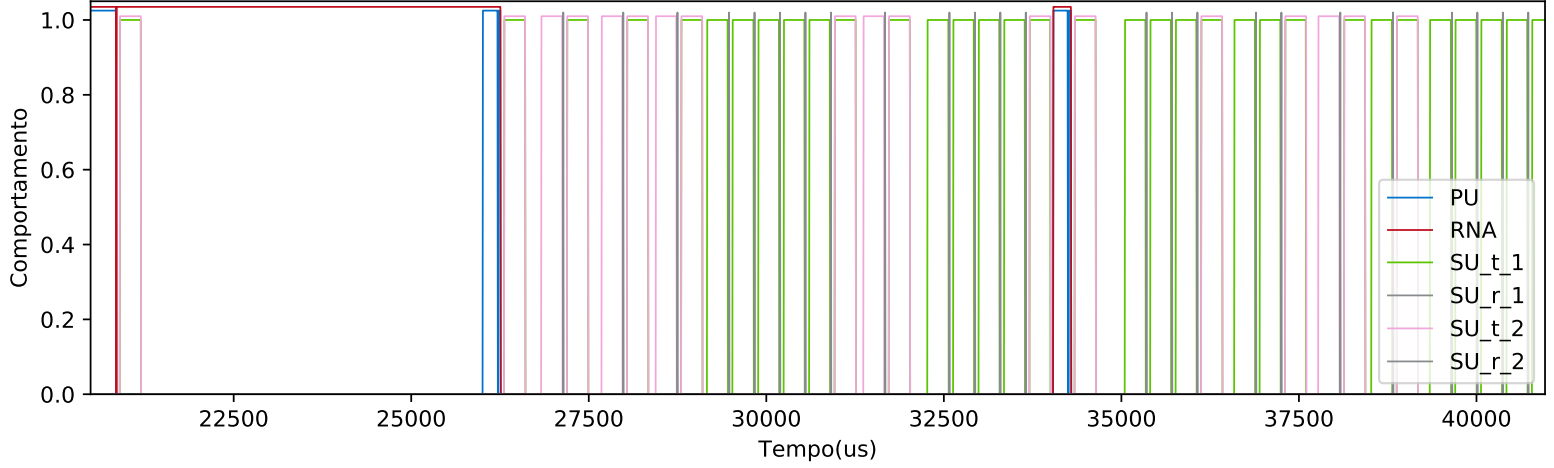


Gráfico Comportamental SEA (40970.24us - 61450.24us)

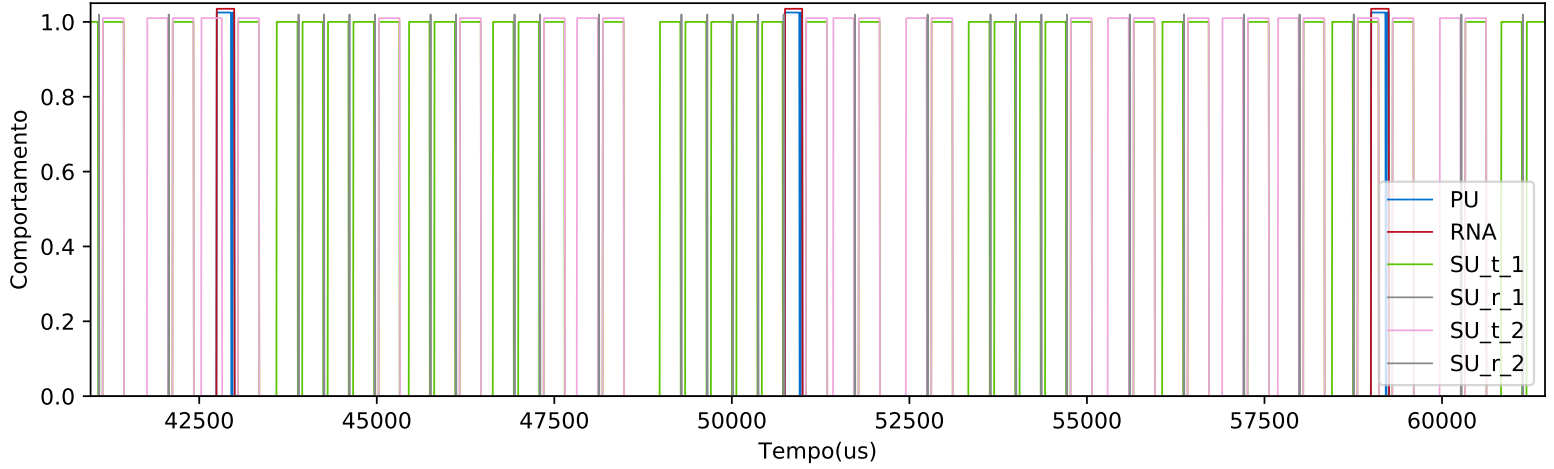


Gráfico Comportamental SEA (61455.36us - 81935.36us)

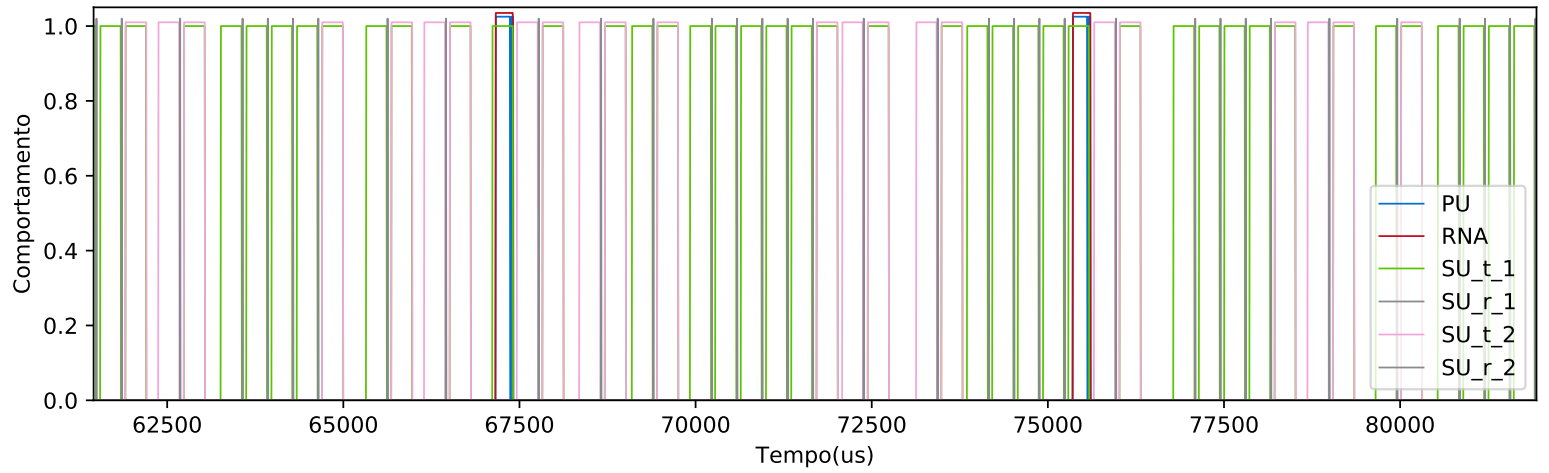


Gráfico Comportamental SEA (81940.48us - 102420.48us)

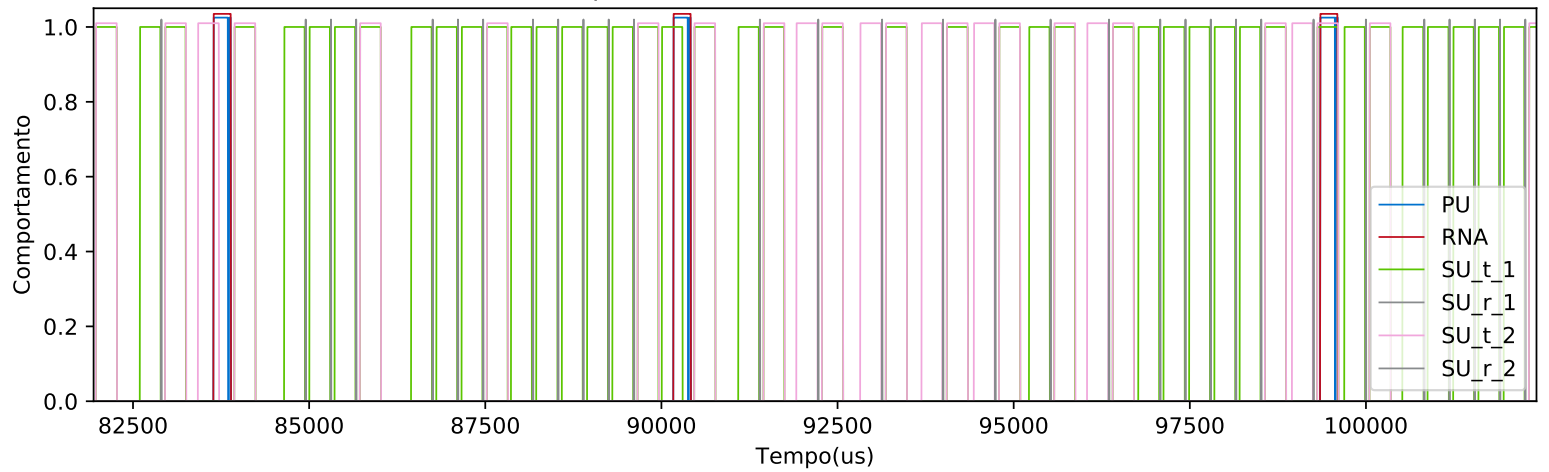


Gráfico Comportamental SEA (102425.6us - 122905.6us)

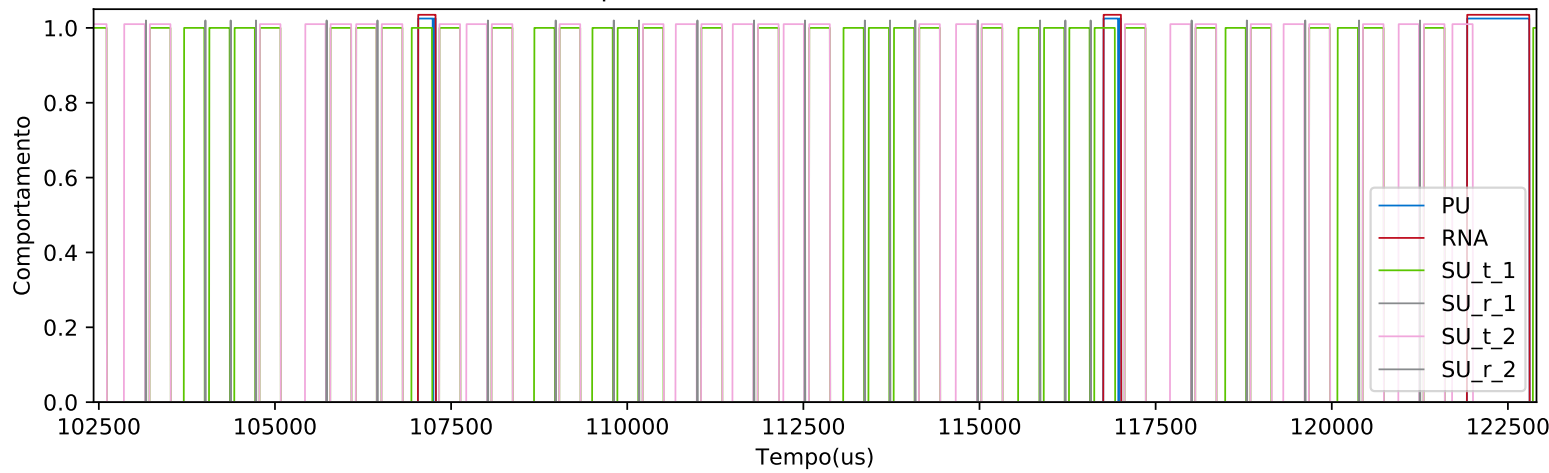


Gráfico Comportamental SEA (122910.72us - 143390.72us)

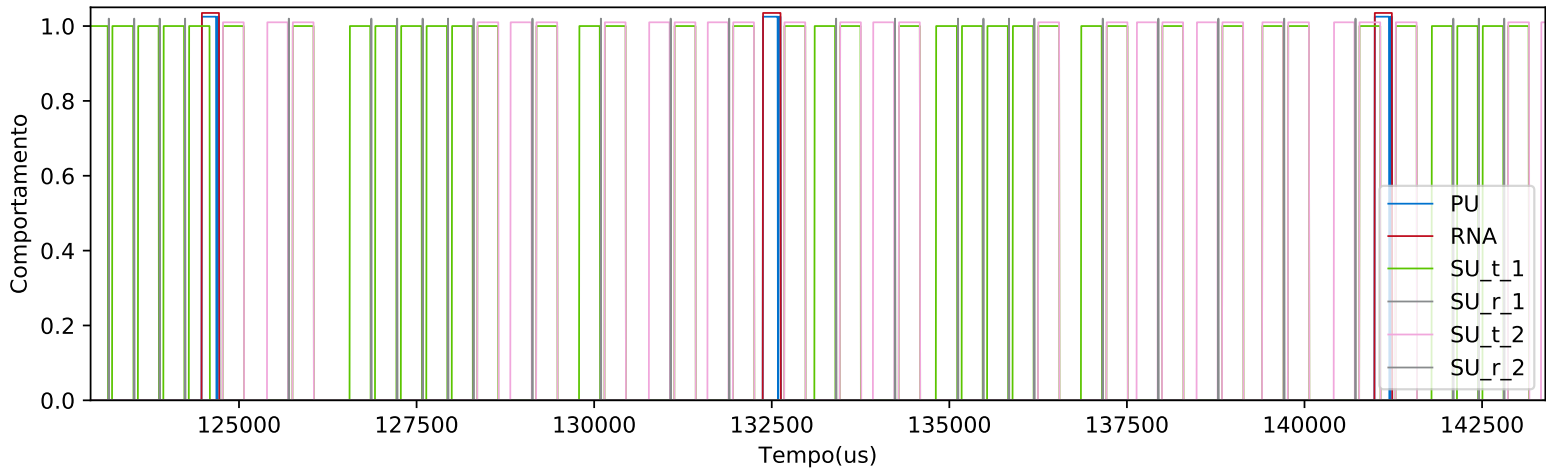


Gráfico Comportamental SEA (143395.84us - 163875.84us)

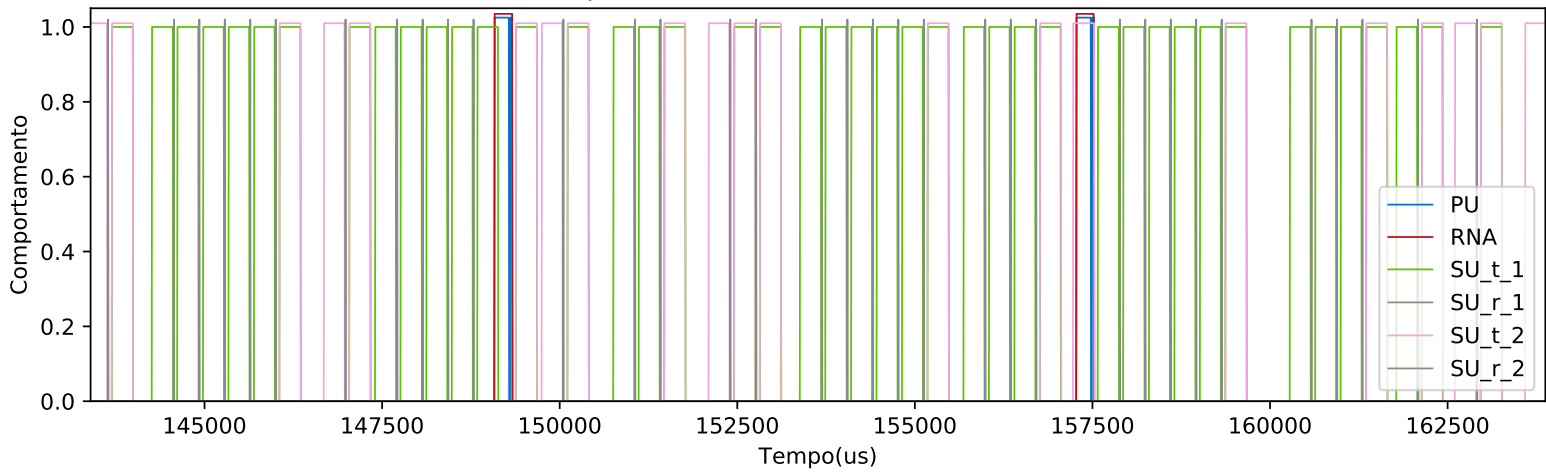


Gráfico Comportamental SEA (163880.96us - 184360.96us)

