



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PETERSON MARCELO SANTOS YOSHIOKA**

**UMA ABORDAGEM PARA OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE  
SENSORIAMENTO EM RÁDIO COGNITIVO COM ALGORITMO  
GENÉTICO MULTI OBJETIVO.**

**Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da  
Universidade Federal do Pará, orientado pelo  
Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior.**

**BELÉM  
2011**

## **UMA ABORDAGEM PARA OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE SENSORIAMENTO EM RÁDIO COGNITIVO COM ALGORÍTMO GENÉTICO MULTI OBJETIVO.**

Esta Dissertação foi julgada em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_ adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pela banca examinadora que atribuiu o conceito \_\_\_\_\_.

---

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior (Orientador)  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias (Membro)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. José Augusto Furtado Real (Membro)  
Instituto de Estudos Superiores da Amazônia

---

Prof. Dr. Ádamo Lima de Santana (Membro)  
Universidade Federal do Pará

---

Profa. Dra. Adriana Rosa Garcez Castro  
Universidade Federal do Pará

Visto:

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Nunes  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Pará

**BELÉM**  
**2011**

Ao meu pai, Jorge Yoshioka,  
mãe, Raimunda Yoshioka e  
namorada Andrea Gonçalves.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por permitir a conclusão mais essa etapa de minha vida e por ter me dado forças para me superar todos os dias.

Agradeço ao meu pai, maior exemplo de esforço e sabedoria que eu tenho. Agradeço a minha mãe pelo exemplo de caráter e força. Minha namorada Andrea pelo companheirismo e carinho. Minha tia Socorro e toda a minha família pelo apoio e amor incondicional.

Ao professor Kelvin Lopes Dias por acreditar em mim e me apoiar do começo ao fim do mestrado.

Ao professor Carlos Tavares pelo apoio.

Ao Andson pelo grande apoio no trabalho e pela grande amizade.

Aos amigos do laboratório, Jailton, Társsio, Edbruno (vulgo “te odeio”), Diego e Tiago pela amizade.

Aos amigos do EETEPA Marcos, Fernando, Allan, Pedro, Marciane, Luis pela amizade.

E a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de forma direta ou indireta.

**A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda. (Confúcio)**

## RESUMO

A eficiência espectral em redes baseadas na tecnologia de Rádio Cognitivo (RC) pode ser comprometida caso o rádio seja utilizado por muito tempo para a detecção em vez da transmissão de dados. Por isso, tornam-se necessários esquemas de sensoriamento que tenham o objetivo de obter o máximo possível de utilização do espectro, evitando sensoriamento desnecessário, bem como, obtendo o mínimo de interferência na transmissão do usuário primário decorrente de detecção incorreta de sua transmissão. Neste trabalho, propomos a utilização de Algoritmos Genéticos para realizar a adaptação do período de sensoriamento. O objetivo é obter um período de sensoriamento ótimo para os canais com vistas a maximizar a descoberta de oportunidades no espectro e minimizar o *overhead* decorrente do sensoriamento. A maioria dos trabalhos relacionados a este assunto considera que o *overhead* de sensoriamento é fixo, não levando em conta que alguns canais podem ter menor tolerância à interferência que outros. A proposta apresentada neste trabalho pode adaptar-se aos requisitos de tolerância à interferência no canal licenciado por meio da determinação de um período de sensoriamento que otimize as oportunidades para qualquer valor de *overhead* definido. Nossa proposta consegue obter um ganho de até 90% em relação às técnicas não otimizadas no número de oportunidades encontradas, até 40,9% no ganho de transmissão útil e obteve uma redução no tempo de interferência de 66,83%, bem como resultados similares aos obtidos por uma proposta otimizada presente na literatura, com a vantagem de permitir a adaptação do *overhead* de sensoriamento.

**PALAVRAS-CHAVE: Rádio Cognitivo, Algoritmo Genético, Sensoriamento.**

## **ABSTRACT**

The spectral efficiency in networks based on cognitive radio (CR) technology can be compromised if the radio is used for a long time for the detection instead of data transmission. So it becomes necessary sensing schemes that have the purpose of obtaining the maximum possible use of spectrum, avoiding unnecessary sensing, as well as obtaining a minimum of interference in the transmission of the primary user due to incorrect detection of its transmission. In this paper, we propose the use of genetic algorithms for the adaptation of the sensing period. The goal is to obtain an optimal channels sensing period in order to maximize the discovery of spectrum opportunities and minimize the overhead due to the sensing. Most related works to this issue adopt fixed sensing overhead, not taking into account that some channels may have less tolerance to interference than others. The proposal presented in this work can adapt to the requirements of tolerance to interference with licensed channel by determining a period of sensing that optimizes the opportunities for any set amount of overhead. Our proposal achieves a gain up to 90% compared to non-optimized techniques in terms of the number of opportunities found up to 40.9% gain in useful transmission and obtained a reduction in the time of interference of 66.83%. In addition, our proposal also achieves similar results to those obtained by an optimized proposal in the literature, with the advantage of allowing the adaptation of the sensing overhead.

**KEY-WORDS: Cognitive Radio, Genetic Algorithms, Spectrum Sensing.**

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de sensoriamento .....	40
Tabela 2 - Sensoriamento com uma e duas antenas .....	47
Tabela 3 – Parâmetros testados de pc e pm.....	64
Tabela 4 – Casos de Teste .....	65
Tabela 5 – Parâmetros adotados no AG .....	69
Tabela 6 – Quantidade de canais em cada instância.....	74
Tabela 7 – Médias utilizadas para gerar canais .....	74
Tabela 8 – Sumário das abordagens .....	75
Tabela 9 – Características da abordagem proposta.....	75
Tabela 10 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 3 canais.....	79
Tabela 11 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 6 canais.....	80
Tabela 12 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 9 canais.....	80
Tabela 13 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 3 canais.....	85
Tabela 14 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 6 canais.....	86
Tabela 15 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 9 canais.....	87
Tabela 16 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 3 canais.....	89
Tabela 17 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 6 canais.....	89
Tabela 18 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 9 canais.....	90
Tabela 19 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 3 canais.....	93
Tabela 20 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 6 canais.....	93
Tabela 21 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 9 canais.....	94

Tabela 22 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 3 canais.....	96
Tabela 23 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 6 canais.....	97
Tabela 24 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 9 canais.....	98

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Lacuna no espectro .....	19
Figura 2: Ciclo Cognitivo .....	20
Figura 3: Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo .....	23
Figura 4: Rede secundária na banda licenciada .....	24
Figura 5: Rede secundária sobre banda não licenciada .....	25
Figura 6: Vários elementos do sensoriamento de espectro. ....	29
Figura 7: Oportunidades no domínio da frequência e do tempo .....	30
Figura 8: Oportunidades no domínio do espaço .....	31
Figura 9: Oportunidade na dimensão código .....	32
Figura 10: Oportunidade na dimensão ângulo .....	32
Figura 11: Principais métodos de sensoriamento.....	39
Figura 12: Problema da incerteza do receptor .....	41
Figura 13: Problema do sombreamento .....	42
Figura 14: Modelo de temperatura de interferência .....	43
Figura 15: Período de sensoriamento muito pequeno.....	44
Figura 16: Período de sensoriamento muito grande .....	45
Figura 17: (a) Período sensoriamento pequeno para o canal. (b) Mesmo período de sensoriamento, porém grande para outro canal.....	45
Figura 18: Problema do terminal escondido em RC .....	48
Figura 19: Modelo do canal ON/OFF .....	55
Figura 20: Estrutura da proposta deste trabalho. ....	57
Figura 21: Indivíduo de um AG.....	58
Figura 22: Média do intervalo de confiança da média dos fitness.....	67
Figura 23: Fluxograma da utilização do AG .....	68
Figura 24: Primeiro caso de Interferência. ....	71
Figura 25: Segundo caso de interferência.....	72
Figura 26: Tempo de transmissão.....	73
Figura 27: Fitness de AG10, AG20 e AG40 3 canais. ....	77
Figura 28: Fitness de AG10, AG20 e AG40 para 6 canais.....	77
Figura 29: Fitness de AG10, AG20 e AG40 para 9 canais.....	78

Figura 30: Evolução do período de sensoriamento.....	79
Figura 31: Evolução do overhead de sensoriamento .....	81
Figura 32: Evolução das oportunidades encontradas no canal 1 .....	82
Figura 33: Tempo de Interferência para 3 abordagens .....	83
Figura 34: Tempo de transmissão útil para 3 abordagens .....	84
Figura 35: Média do número de oportunidades descobertas .....	84
Figura 36: Média do Overhead de Sensoriamento.....	88
Figura 37: Média do tempo de interferência.....	92
Figura 38: Tempo de transmissão útil para todos os métodos.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS

FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
PHY	Physical Layer
RRC	Redes de Rádios Cognitivos
SDR	Software Defined Radio
SNR	Razão Sinal-Ruído
UP	Usuário Primário
US	Usuário Secundário
AG	Algoritmo Genético
MAC	Media Access Control

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
2 RÁDIO COGNITIVO .....	18
2.1 CAPACIDADE COGNITIVA .....	19
2.2 RECONFIGURABILIDADE .....	20
2.3 ARQUITETURA DE REDES RÁDIO COGNITIVO .....	21
2.4 FUNÇÕES DAS REDES SECUNDÁRIAS .....	23
2.5 REDES SECUNDÁRIA SOBRE FAIXA DE ESPECTRO NÃO LICENCIADA ..	25
2.6 APLICAÇÕES PARA TECNOLOGIA RÁDIO COGNITIVO .....	26
3 SENSORIAMENTO DE ESPECTRO .....	28
3.1 ESPECTRO MULTIDIMENSIONAL .....	29
3.2 MÉTODOS DE SENSORIAMENTO .....	33
3.2.1 Sensoriamento baseado em detecção de energia .....	33
3.2.2 Sensoriamento baseado em forma de onda .....	35
3.2.3 Sensoriamento ciclo-estacionário .....	36
3.2.4 Sensoriamento baseado na identificação de rádio .....	37
3.2.5 Filtro casado .....	38
3.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SENSORIAMENTO .....	38
3.4 SENSORIAMENTO COOPERATIVO .....	41
3.5 DETECÇÃO BASEADA EM INTERFERÊNCIA .....	43
3.6 DESAFIOS DO SENSORIAMENTO DE ESPECTRO .....	44
3.6.1 Sensoriamento na camada MAC .....	44
3.6.2 Exigências de Hardware .....	47
3.6.3 Problema do terminal escondido .....	48
3.6.4 Detecção de Espalhamento Espectral de Usuários Primários .....	49
4 OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE SENSORIAMENTO EM RÁDIO COGNITIVO ...	50
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESTADO DA ARTE .....	50
4.2 MODELO DO CANAL .....	54
4.3 ABORDAGEM PROPOSTA .....	56
4.4 ALGORITMO GENÉTICO .....	57
4.5 METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS ...	61
4.6 OPERADORES GENÉTICOS .....	62

4.7 FLUXO DA PROPOSTA E PARÂMETROS ADOTADOS.....	67
5 AVALIAÇÃO PROPOSTA .....	70
5.1 MÉTRICAS ADOTADAS.....	70
5.2 CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO .....	74
5.3 RESULTADOS.....	76
5.3.1 Avaliação intra-proposta .....	76
5.3.2 Avaliação inter-propostas .....	84
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, tanto no Brasil quanto em outros países, a política de alocação espectral é estática, ou seja, uma vez alocado em uma faixa de espectro, o usuário não pode mudar de faixa ou utilizar outro tipo de serviço na mesma. Nos Estados Unidos a divisão e alocação do espectro é realizada pela *Federal Communications Commission* (FCC). No Brasil, o responsável pelo gerenciamento espectral é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). Contudo, existem pesquisas que comprovam que, apesar do crescente aumento do número de dispositivos e serviços sem fio, a política atual não tem proporcionado utilização eficiente do espectro (YANG, 2007). Embora o espectro seja um recurso natural escasso, ele tem sido subutilizado. Essa subutilização varia de acordo com fatores como faixa do espectro, período de tempo e localização geográfica.

Para resolver os problemas decorrentes da política de alocação estática do espectro, diversas soluções foram propostas. Uma delas é o Rádio Cognitivo (RC), uma tecnologia que provê acesso dinâmico ao espectro (DSA – *Dynamic Spectrum Access*), fornecendo a capacidade de compartilhar os canais licenciados com os usuários não-licenciados de forma oportunista (KIM, 2008). Em redes baseadas na tecnologia de Rádio Cognitivo (RRC), o usuário primário (UP) ou licenciado tem alta prioridade ou direitos legais para utilizar uma faixa específica do espectro, isto é, a faixa licenciada. Por outro lado, o usuário secundário (US) tem baixa prioridade e deve explorar o espectro sem causar interferência no UP quando estiver utilizando o canal licenciado. Para viabilizar o acesso oportunista, o seguinte conjunto de funções é adotado pelo RC: sensoriamento de espectro, decisão de espectro, compartilhamento do espectro e mobilidade do espectro. Tais funções são fundamentais para superar desafios como: determinar a porção de espectro disponível, selecionar o melhor canal disponível, coordenar o acesso ao canal com outros usuários e desocupar o canal quando o usuário licenciado for detectado (AKYILDIZ, 2008).

O sensoriamento de espectro é considerado um dos componentes mais importantes do RC, pois identifica oportunidades no espectro e sinaliza o retorno do usuário primário ao canal licenciado. No processo de sensoriamento, a

determinação do período com que os canais são sentidos é um desafio de pesquisa, pois a sua definição deve levar em consideração o compromisso entre o número de oportunidades descobertas e o *overhead* de sensoriamento causado. Uma oportunidade pode ser considerada como uma determinada banda de frequência que não está sendo utilizada em um momento específico, numa determinada área geográfica. Já o *overhead* de sensoriamento é o tempo durante o qual o US deve suspender a transmissão de dados para medir a disponibilidade do canal. O alto *overhead* de sensoriamento pode comprometer a eficiência espectral, pois, neste caso, o rádio é utilizado muito tempo para detecção de sinal do usuário primário em vez de transmissão de dados. Dessa forma, a otimização do período de sensoriamento visa determinar o período, para um determinado canal, que proporcione um grande número de oportunidades com um mínimo de *overhead* de sensoriamento. E esta definição é fortemente influenciada pelo padrão de uso do usuário primário e escala de tempo de sua aplicação.

Esta dissertação propõe uma estratégia de otimização do período de sensoriamento dos canais de modo a maximizar o número de oportunidades encontradas com um *overhead* de sensoriamento mínimo especificado, diminuir o tempo de interferência e aumentar o tempo de transmissão útil. Para tanto, utiliza-se uma técnica de inteligência computacional baseada em Algoritmo Genético (AG) multiobjetivo para definir o período de sensoriamento a partir de amostras de canais que seguem um modelo ON/OFF com funções densidade de probabilidade exponenciais. A proposta presente neste trabalho aumenta a eficiência do sensoriamento por adaptar-se aos requisitos de tolerância à interferência em canais licenciados.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2, os principais conceitos relacionados à tecnologia Rádio Cognitivo são sintetizados, incluindo a justificativa de sua utilização, principais características e arquitetura.

No Capítulo 3, o sensoriamento de espectro utilizado por Rádio Cognitivo é abordado através da apresentação de suas características, critérios para classificação e desafios atuais.

O objetivo do Capítulo 4 é descrever a proposta deste trabalho, os conceitos relacionados e a metodologia utilizada para definir os melhores parâmetros para o AG.

Já no Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos pela estrutura de otimização do período de sensoriamento que utiliza a estratégia AG, bem como os resultados da simulação da proposta.

Finalmente, no Capítulo 6, as considerações finais a respeito deste trabalho são realizadas.

## 2 RÁDIO COGNITIVO

A tecnologia rádio cognitivo<sup>1</sup> (RC) habilita o uso do espectro de forma oportunista. O termo rádio cognitivo pode ser definido como um rádio que muda seus parâmetros de transmissão baseado na interação com o ambiente que opera (FCC, 2003). A partir dessa definição duas características podem ser definidas: capacidade cognitiva e reconfigurabilidade.

A capacidade cognitiva se refere à capacidade do usuário RC de detectar e extrair, informações do ambiente de rádio. Devido à complexidade, esta capacidade não pode ser realizada através do simples monitoramento da potência na faixa espectral de interesse. Para isso, são necessárias técnicas mais sofisticadas para detectar variações temporais e espaciais em um ambiente de rádio e evitar interferência a outros usuários, principalmente aos licenciados. Essa capacidade objetiva identificar, entre outras coisas, quais canais estão disponíveis em determinados instantes de tempo e localização.

A capacidade de reconfigurabilidade consiste na seleção dos melhores parâmetros de rádio a serem adotados em uma dada faixa espectral. Esta seleção deve levar em conta os requisitos da aplicação secundária, prover melhor utilização do espectro e evitar interferência ao usuário primário. Neste âmbito, caso o *hardware* suporte, um dispositivo RC pode ser configurado para transmitir e receber sinais sobre várias faixas de frequências, além de se adaptar a diferentes tecnologias de transmissão, recepção e acesso.

O intuito do RC é a descoberta da melhor faixa de espectro disponível através da capacidade cognitiva e reconfiguração dos seus parâmetros para adaptar a esta faixa. Quando o usuário RC estiver utilizando o espectro o desafio é não interferir na transmissão do usuário licenciado como mostra a Figura 1. O RC permite, temporariamente, o uso de um espectro não utilizado, denominado como lacunas (AKYILDIZ, 2006), ou oportunidades (ARSLAN, 2007) no espectro, sendo este último termo adotado ao longo deste trabalho. Se o canal é usado por um usuário licenciado, o usuário RC deve se deslocar para outro canal, ou permanecer no

---

<sup>1</sup> Os termos rádio cognitivo usuário secundário e usuário não-licenciado serão utilizados indistintamente durante todo o texto.

mesmo, alterando seu nível de potência ou esquema de modulação para evitar interferência, como mostra a Figura 1.

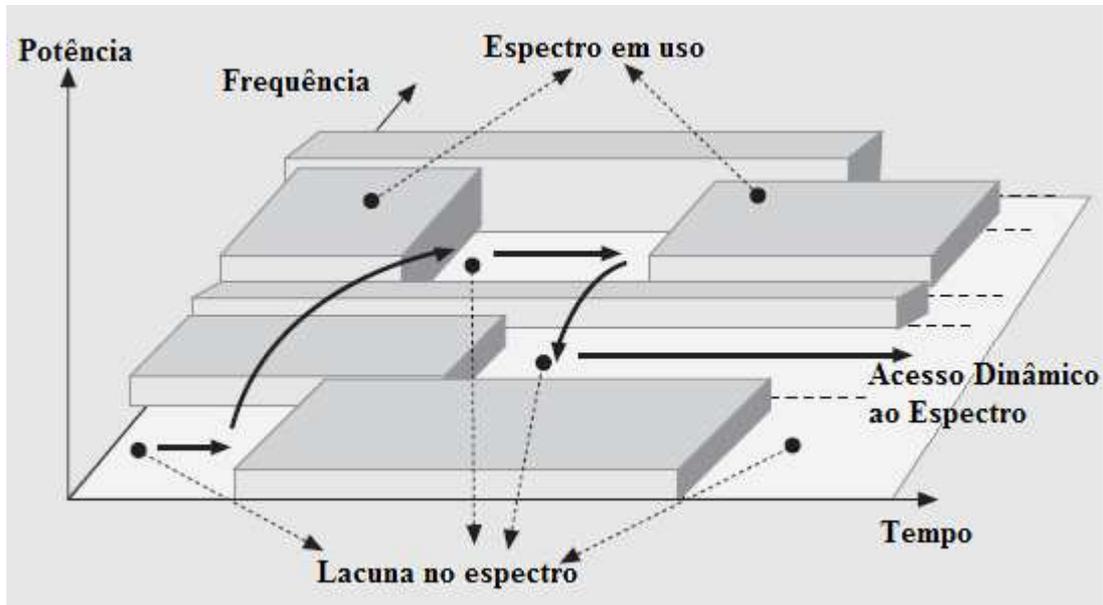


Figura 1: Lacuna no espectro (AKYILDIZ et. al, 2008).

## 2.1 CAPACIDADE COGNITIVA

A capacidade cognitiva de um dispositivo RC permite a interação em tempo real com seu ambiente para determinar e alterar os parâmetros de rádio apropriados. As tarefas envolvidas na operação de adaptação ao espectro definem o chamado ciclo cognitivo e são ilustradas na Figura 2. Nesta seção, é descrita uma visão geral dos três principais etapas do ciclo cognitivo: sensoriamento do espectro, análise espectral e decisão espectral.

No sensoriamento de espectro, descrito na Figura 2, o dispositivo RC monitora uma banda de espectro disponível, captura as informações e detecta as oportunidades sobre esse espectro. Na análise espectral, as características das oportunidades disponíveis são estimadas a partir da detecção do sensoriamento do espectro e então, são estimadas. Por fim, na decisão do espectro, o RC determina a taxa de dados, o modo de transmissão, e largura de banda da transmissão. Dessa forma, a banda apropriada de espectro é selecionada conforme as características do espectro e requisitos do usuário.

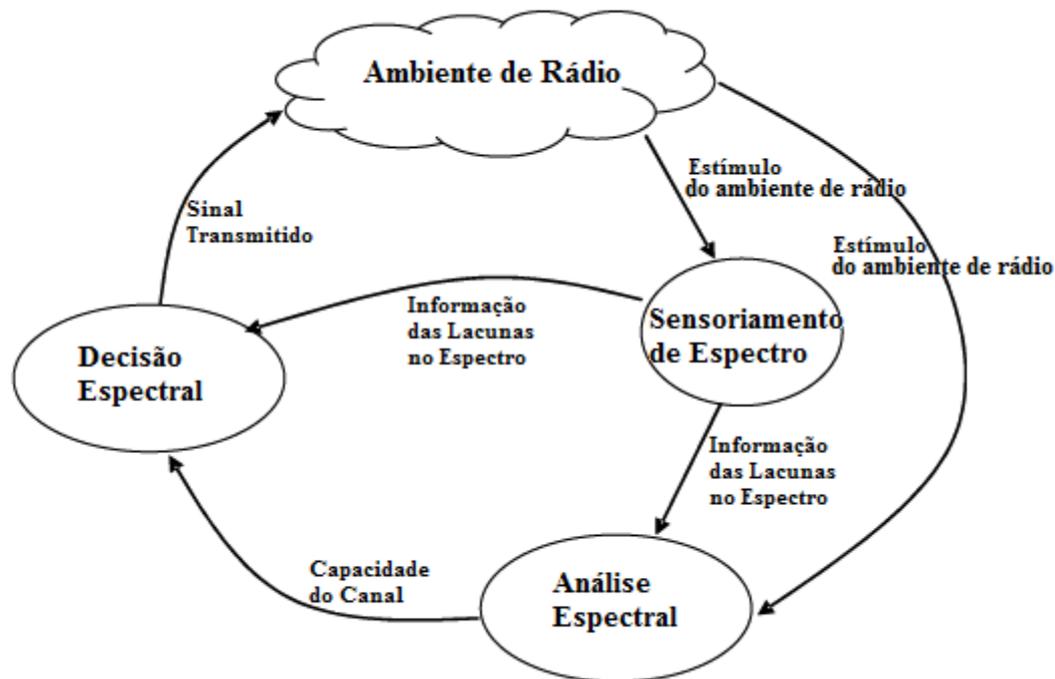


Figura 2: Ciclo Cognitivo (AKYILDIZ et. al, 2008).

## 2.2 RECONFIGURABILIDADE

Reconfigurabilidade é a capacidade de ajustar os parâmetros de operação para a transmissão sem qualquer modificação do hardware, realizando tal processo no âmbito de software. Esta capacidade permite ao RC adaptar-se facilmente a qualquer ambiente de rádio. Há vários parâmetros que podem ser reconfigurados no RC. Abaixo são apresentados alguns deles:

- **Frequência de operação:** o RC é capaz de alterar a sua frequência de operação baseado nas informações obtidas do ambiente de rádio. Com estas informações, a frequência de operação mais adequada pode ser determinada e a comunicação pode ser realizada.
- **Esquema de modulação:** o RC deve reconfigurar o seu esquema de modulação de forma adaptativa, levando em consideração os requisitos do usuário, condições do canal e a não interferência na comunicação do usuário licenciado.
- **Potência de transmissão:** a potência de transmissão do RC deve ser ajustada considerando questões como: prover melhor compartilhamento do espectro,

não interferência nas comunicações dos outros usuários, principalmente os licenciados, minimização do consumo de bateria do dispositivo, no caso de dispositivos não conectados em fonte de energia.

- Tecnologia de acesso: o RC pode ajustar dinamicamente a sua tecnologia de acesso, o que possibilita a interoperabilidade entre sistemas de comunicação diferentes.

É interessante notar que os parâmetros de transmissão do RC podem ser reconfigurados não apenas no início da transmissão, mas também durante esta, conforme as características do espectro; habilitando que o dispositivo RC migre para outra faixa espectral, diferente da ocupada atualmente.

## 2.3 ARQUITETURA DE REDES RÁDIO COGNITIVO

As arquiteturas de redes sem fio existentes adotam diferentes políticas de espectro e tecnologias de comunicação. Além disso, parte do espectro sem fio já está licenciado para diferentes fins, enquanto algumas bandas continuam operando em modo não licenciado. Nesta seção, a arquitetura de redes baseadas em rádio cognitivo (RRC) é apresentada considerando vários cenários. Os componentes da arquitetura de RRC, como mostrado na Figura 3, podem ser classificados em dois grupos: redes primárias e redes secundárias.

A rede primária possui direitos exclusivos de utilização de determinadas faixas de espectro, as faixas licenciadas. Como exemplos deste tipo de rede citam-se as redes celulares, de sistemas de televisão e sistemas de rádio. Os componentes de uma rede primária são o usuário primário (UP) e a estação rádio base primária. O usuário primário ou usuário licenciado tem a licença para operar em determinada faixa do espectro. Esse acesso é controlado pela estação base e não deve ser afetado por operações de usuários não licenciados. Não é necessário que o UP modifique ou adicione funções para coexistir com usuários RC.

A estação base primária, assim como o usuário primário, opera em uma faixa de espectro licenciada, sendo esta estação base capaz de transmitir e receber em

um sistema celular. Atualmente, a estação base primária não tem a capacidade de compartilhar setores do espectro com usuários RC.

A rede secundária (rede baseada em rádio cognitivo, rede de acesso dinâmico ao espectro, ou rede não licenciada) não tem licença para operar nas faixas licenciadas. Por isso, o acesso ao espectro licenciado é permitido somente de forma oportunista. A rede secundária pode ser desenvolvida de maneira infraestruturada ou *ad hoc*, conforme a Figura 3. Os principais componentes de uma rede secundária são: usuário secundário, estação base secundária e o corretor de espectro.

O usuário secundário (US) não possui concessão de utilização do espectro licenciado. Por isso, torna-se necessário adicionar funcionalidades para que ele possa compartilhar com usuários primários as faixas de espectro licenciadas.

A estação base secundária (ou estação base não licenciada) é um componente de infraestrutura fixa com capacidades cognitivas. Ela fornece conexão de um salto para USs. A Figura 3 exibe a arquitetura de uma rede secundária, onde há diferentes tipos de redes: rede primária, rede secundária.

Redes secundárias operam tanto no espectro licenciado, de forma oportunista, quanto no não licenciado. Há três tipos de acesso em redes secundárias: acesso à rede secundária, à rede *ad hoc* e à rede primária. No acesso à rede secundária, o usuário pode utilizar a estação base secundária nas faixas licenciadas e não licenciadas. No acesso a rede *ad hoc* um US pode se comunicar com outro US através de uma conexão *ad hoc* nas faixas licenciadas ou não licenciadas. No acesso a rede primária o US pode acessar a estação base primária através da banda licenciada.

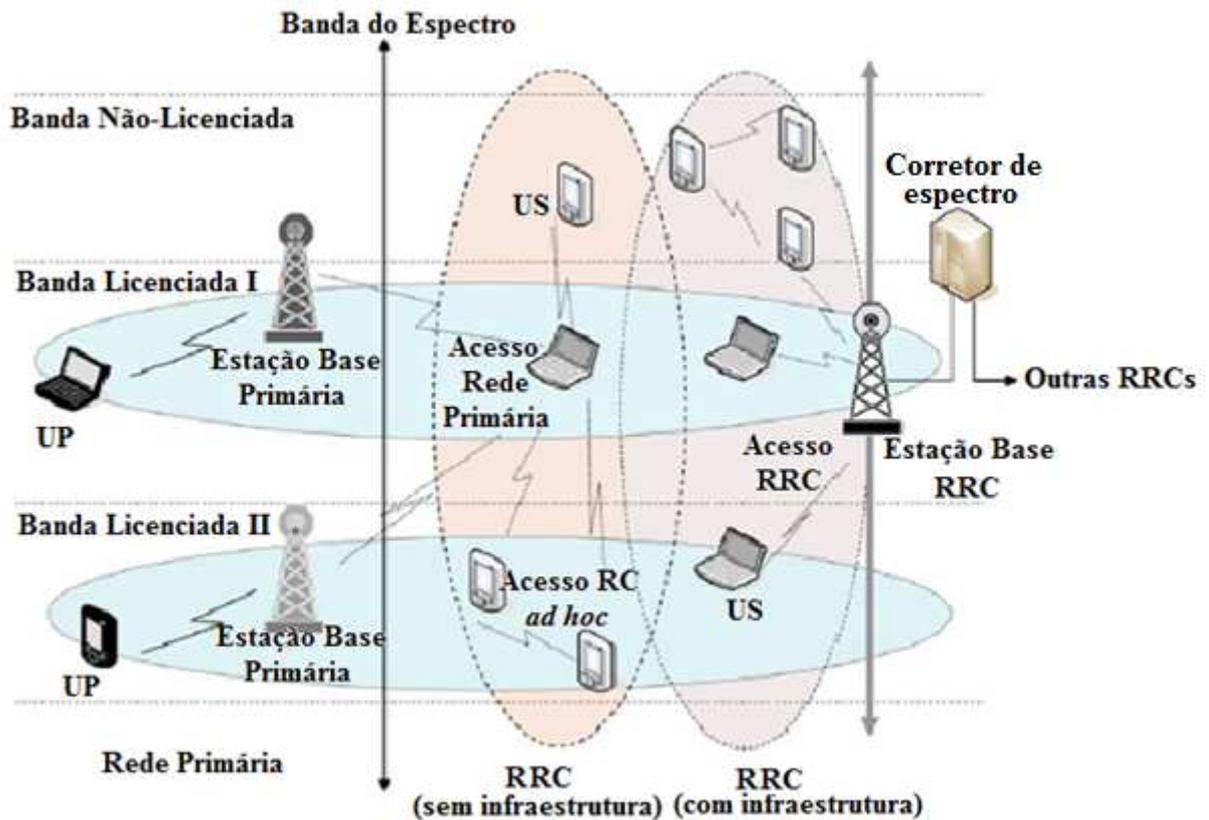


Figura 3: Arquitetura de uma Rede de Rádio Cognitivo (AKYILDIZ et. al, 2008).

Conforme a arquitetura apresentada na Figura 3, a capacidade cognitiva e a reconfigurabilidade são funcionalidades fundamentais para suportar os desafios que o RC impõe, que incluem a transmissão de qualidade sem interferência nos usuários do espectro licenciado, decisão de qual faixa de espectro utilizar e quando utilizar, além do compartilhamento do espectro com outros usuários secundários.

## 2.4 FUNÇÕES DAS REDES SECUNDÁRIAS

Conforme explicado na seção 2.3, as redes secundárias podem operar nas bandas licenciadas e não licenciadas do espectro. As funcionalidades da rede secundária variam dependendo do espectro. Nesta seção, serão classificadas as operações da rede secundária como: em banda licenciada e em banda não licenciada.

Como mostrado na Figura 4, há faixas do espectro licenciado que não são utilizadas temporariamente. Por isso, as redes secundárias foram desenvolvidas para explorar essas faixas de espectro através da tecnologia de RC. Ambas, redes secundárias e primárias, coexistem no mesmo local e utilizam a mesma faixa de espectro.

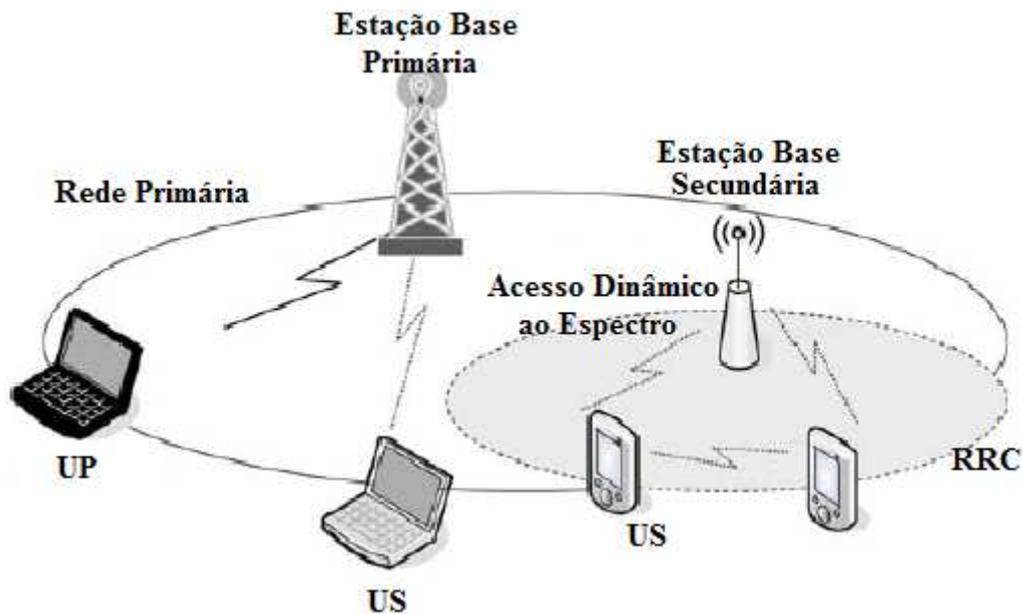


Figura 4: Rede secundária na banda licenciada (AKYILDIZ et. al, 2008).

Devido à existência do UP, há vários desafios para a rede secundária. Embora a principal proposta da rede secundária seja determinar o melhor espectro disponível, a principal função do RC na banda licenciada é detectar a presença do UP para não causar interferência nele. Deste modo, evitar a interferência no UP é a questão mais importante nessa arquitetura. Além disso, se o UP retornar a uma faixa de espectro ocupada por um US, este deve desocupar a faixa e se deslocar imediatamente para outra faixa de espectro disponível, este comportamento do US é denominado *handoff* de espectro.

## 2.5 REDES SECUNDÁRIA SOBRE FAIXA DE ESPECTRO NÃO LICENCIADA

A política de abertura do espectro, que começou na faixa industrial, científica e médica (ISM – *Industrial, Scientific, and Medical*), viabilizou uma impressionante variedade de tecnologias importantes e usos inovadores. Contudo, devido à interferência entre várias redes heterogêneas e o alto número de dispositivos sem fio, a transmissão nesta faixa está se degradando.

A rede secundária pode ser projetada para operações na banda licenciada, desde que, não provoque interferência na comunicação primária e proporcione melhor utilização do espectro. A arquitetura da rede secundária sobre a banda não licenciada é ilustrada Figura 5. Como US não precisa de licença para utilizar o espectro, todos os USs tem o mesmo direito de acesso na faixa de espectro, desde que atendam as normas de uso determinadas pelas agências reguladoras.

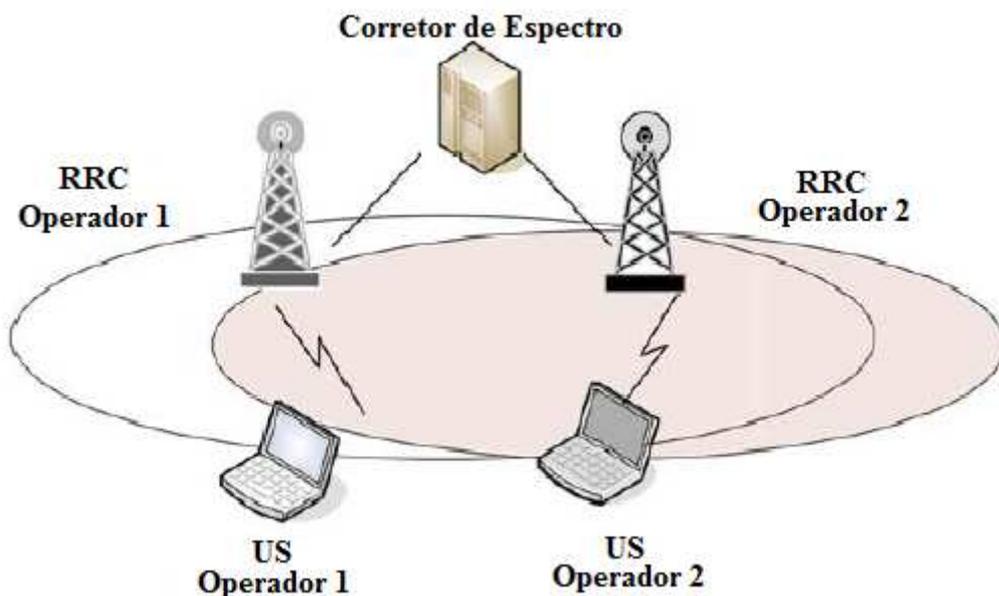


Figura 5: Rede secundária sobre banda não licenciada (AKYILDIZ et. al, 2008).

Múltiplas redes secundárias coexistem na mesma área e se comunicam usando a mesma porção do espectro. Algoritmos de compartilhamento de espectro inteligentes podem prover melhor eficiência espectral e QoS as aplicações secundárias.

Nessa arquitetura, o objetivo do US é detectar a transmissão de outros USs. Diferente da operação em banda licenciada, o *handoff* de espectro não é encadeado pelo aparecimento de outros usuários. Contudo, todos os USs devem competir pela mesma faixa de espectro, pois têm o mesmo direito. Para isso, são necessários métodos sofisticados de compartilhamento do espectro nessa arquitetura. Caso várias redes secundárias operem na mesma faixa de frequência não licenciada é necessária uma porção justa do espectro entre essas redes.

## 2.6 APLICAÇÕES PARA TECNOLOGIA RÁDIO COGNITIVO

Devido às características descritas anteriormente, rádio cognitivo tem diversas aplicações, sendo algumas descritas a seguir.

Redes de segurança e emergência podem ser implementadas por RC. No caso de desastres naturais que podem temporariamente desabilitar ou destruir infraestrutura de comunicação, torna-se necessário estabelecer uma rede de emergência. Considerando que redes de emergência lidam com informação crítica, uma comunicação confiável deve garantir um atraso mínimo na comunicação. Além disso, esse tipo de comunicação exige uma quantidade significativa de espectro para tratamento de volume de tráfego incluindo voz, vídeo e dados. RRC permite o uso do espectro sem a necessidade de infraestrutura e pela manutenção de prioridade de comunicação e tempo de resposta.

Outra possível aplicação de RC é no ambiente militar. RRC podem permitir rádios militares escolherem aleatoriamente a frequência, largura de banda, tipo de modulação e esquema de codificação adaptando ao ambiente de rádio do local de guerra. Além disso, redes militares têm uma forte necessidade de segurança e proteção da comunicação em ambiente inimigo. RRC deve permitir a realização de *handoff* de espectro para encontrar uma faixa de espectro segura para comunicação.

Redes *mesh* sem fio estão crescendo como uma tecnologia com boa relação custo benefício que fornece conectividade em banda larga. Contudo, redes *mesh* necessitam de alta qualidade para se adequar as exigências que incluem grande

número de usuários e aplicações que exigem muita vazão. RC permite o acesso a grande quantidade do espectro, por tanto RRC pode ser usada pelas redes *mesh* em grandes áreas urbanas, oferecendo qualidade de comunicação a grandes exigências de transmissão.

### 3 SENSORIAMENTO DE ESPECTRO

Para Arslan (2007), o sensoriamento de espectro em RC é um termo que envolve a obtenção das características de uso do espectro em várias dimensões, tais como tempo, espaço, frequência e código. Envolve também determinar que tipos de sinais estão ocupando o espectro, incluindo, por exemplo, modulação, forma de onda, largura de banda e frequência portadora. No entanto, diferente de outras aplicações, este sensoriamento em RC, devido ao uso oportunista, requer técnicas mais poderosas de análise de sinal com alta complexidade computacional.

Sendo considerada uma das principais tarefas do RC, o sensoriamento do espectro consiste em um processo periódico e dinâmico de monitoramento do ambiente de rádio. Este mecanismo visa determinar as faixas de frequências disponíveis, evitar interferência à comunicação licenciada, bem como detectar as características dos sinais presentes que inclui tipo de modulação, forma de onda, frequência da portadora. De acordo com Kim (2008), o sensoriamento de espectro é a tarefa de obter consciência sobre o espectro utilizado e a existência do UP na área geográfica. Quando uma faixa espectral é passível de utilização, o usuário de RC a utiliza e fica em constante monitoramento a fim de verificar o possível retorno do usuário licenciado àquela banda. Quando o usuário primário retorna, o usuário RC deve parar a sua transmissão, vagar aquela faixa e buscar outra faixa disponível para retomar a sua comunicação.

O sensoriamento de espectro pode ser realizado como um mecanismo de duas camadas de redes: física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC). Do ponto de vista da camada PHY, busca-se detectar eficientemente os sinais do usuário primário e as oportunidades de acesso, adaptando-se esquemas do rádio secundário relacionados à codificação, modulação, entre outros. Vários métodos de sensoriamento de espectro são apresentados na literatura para a camada PHY, entre eles estão: detecção de energia, filtro casado, detecção de característica, que serão descritos posteriormente. Por outro lado, da perspectiva da camada MAC, o sensoriamento determina quando o usuário não licenciado tem que “sentir” os canais, além de determinar quais canais devem ser sentidos.

Alguns elementos do sensoriamento de espectro são apresentados na Figura 6. O objetivo desta seção é descrever esses elementos do sensoriamento de espectro, citando os métodos de sensoriamento, analisando o espectro de forma multidimensional e discutindo os desafios de realizar o sensoriamento de espectro em RC.

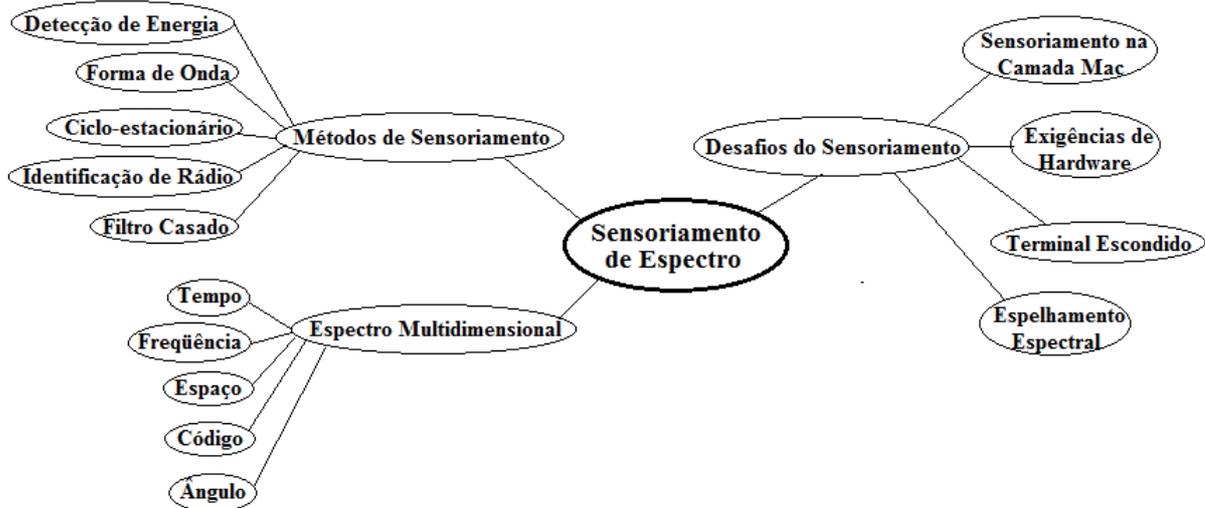


Figura 6: Vários elementos do sensoriamento de espectro.

### 3.1 ESPECTRO MULTIDIMENSIONAL

A definição de oportunidade determina a forma com que um dispositivo RC pode medir e explorar o espectro. Segundo Kolodzy (2001), oportunidade é uma faixa de espectro que não está sendo utilizada em determinado momento e local. Em métodos convencionais de sensoriamento de espectro, uma oportunidade pode ser explorada em três dimensões: frequência, tempo e espaço. No entanto, outras dimensões também podem ser exploradas como, por exemplo, a dimensão código. Se a dimensão código, assim como outras novas dimensões, é interpretada como parte do espectro, novas possibilidades de utilização do espectro podem ser criadas. Como consequência, novos desafios surgem para detectar estas novas oportunidades.

Explorar novas dimensões é um dos desafios do sensoriamento de espectro em RC. Hiper-espaço teórico, o qual é ocupado por sinais de rádio, tem dimensões de localização, ângulo de chegada, frequência, tempo, além de outras possibilidades (DROZD, 2005). É desejável que o sensoriamento deva incluir o processo de identificação em todas as dimensões e encontrar oportunidades. Este conceito permite o compartilhamento entre sistemas licenciados e não-licenciados. Várias dimensões de sensoriamento são descritas a seguir. Cada dimensão tem seus próprios parâmetros, que devem ser detectados para obter o conhecimento total sobre do espectro.

A dimensão frequência procura oportunidades no domínio do espectro de frequência. Uma oportunidade nesta dimensão é uma faixa de frequência disponível em determinado momento. Na dimensão tempo uma oportunidade surge quando uma determinada faixa de espectro esteja disponível. Isto é, uma faixa que não é utilizada continuamente. A Figura 7 ilustra as oportunidades na dimensão frequência e tempo.

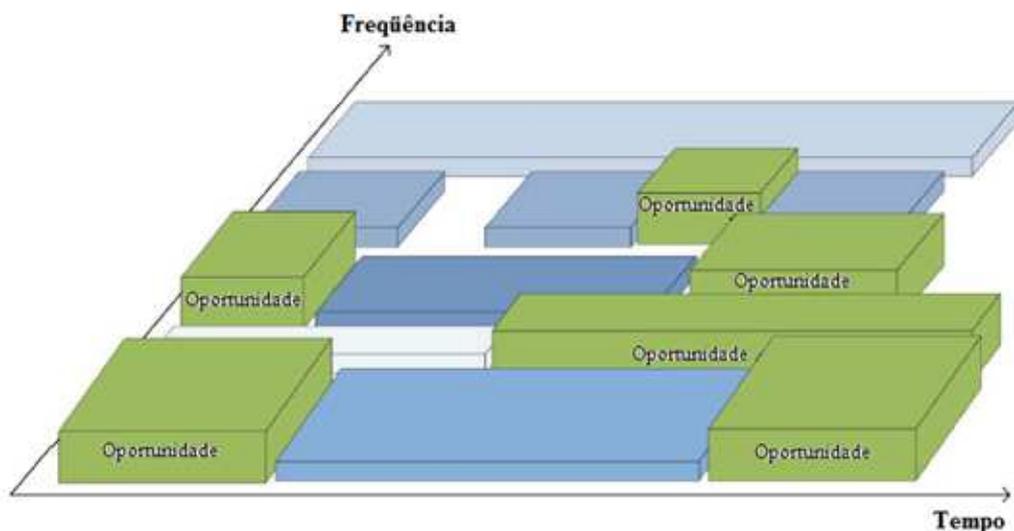


Figura 7: Oportunidades no domínio da frequência e do tempo (ARSLAN, 2007).

Na dimensão espaço um canal pode estar disponível em uma determinada área. Essa é uma vantagem devido à perda de propagação devido a localização e distância do UP. A Figura 8 ilustra a oportunidade de espectro que surgiu devido a um sensoriamento que explora a dimensão espaço. Nesta dimensão o

sensoriamento pode ser realizado detectando o nível de interferência. A não interferência significa a não transmissão do UP nesta área, com exceção no problema do terminal escondido, descrito na seção 3.8.4.

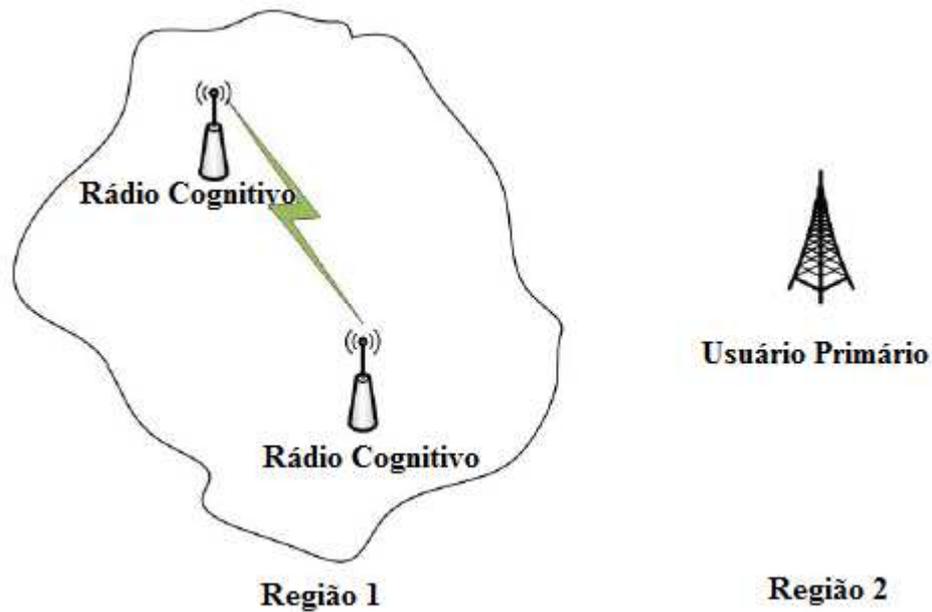


Figura 8: Oportunidades no domínio do espaço (ARSLAN, 2007).

Na dimensão código, o espectro pode ser usado através do espalhamento espectral ou salto de frequência. Isto é, utilizar o mesmo canal ao mesmo tempo que o UP. A transmissão, no domínio do código, sem interferir com o UP, seria possível com um código ortogonal ao código que o UP está usando. Surge então uma nova oportunidade em RC. A Figura 9 mostra o surgimento de uma oportunidade na dimensão código.

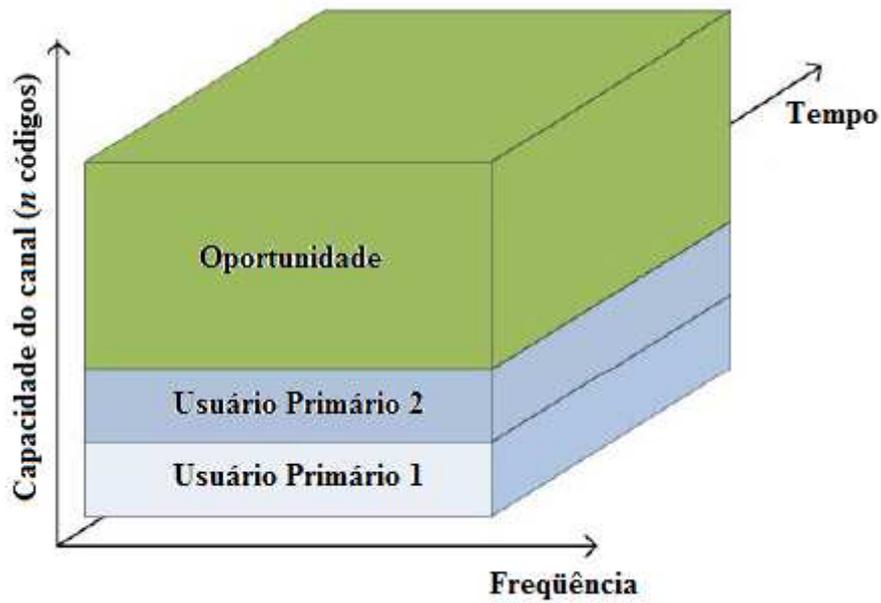


Figura 9: Oportunidade na dimensão código (ARSLAN, 2007).

Junto com o conhecimento da localização ou direção de UP, oportunidades de espectro na dimensão do ângulo podem ser criadas. Por exemplo, se um UP está transmitindo em uma direção específica, o US poderá transmitir para outras direções sem criar interferência sobre o UP. A Figura 10 exibe a oportunidade criada na dimensão ângulo, assumindo que neste tipo de transmissão a antena não emite o sinal para todos os ângulos.

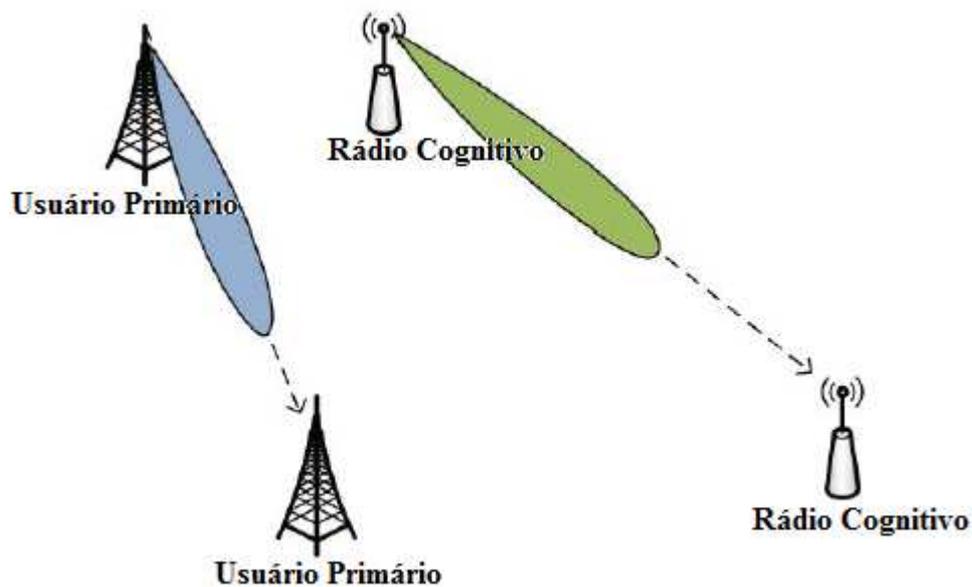


Figura 10: Oportunidade na dimensão ângulo (ARSLAN, 2007).

É desejável definir  $n$  dimensões no sensoriamento de espectro. Ou seja, incluir o processo de identificação de todas as dimensões do espectro e encontrar oportunidades no espectro.

## 3.2 MÉTODOS DE SENSORIAMENTO

Nesta seção serão descritos os principais métodos de sensoriamento em rádio cognitivo utilizados atualmente. Nas abordagens são incluídas a identificação das características de detecção, a forma como cada método identifica a transmissão primária, desempenho de cada método.

### 3.2.1 Sensoriamento baseado em detecção de energia

Um dispositivo RC deve distinguir entre canais que estão ou não sendo utilizados. Logo um dispositivo RC deve ser capaz de determinar se um UP está transmitindo em um determinado canal. O sinal transmitido pelo UP é detectado e comparado com um limiar  $\lambda_E$  para que possa constatar a presença do UP no canal. Este limiar depende do nível de ruído.

O sensoriamento baseado em detecção de energia (AKYILDIZ et. al, 2008) é o mais utilizado devido a sua baixa complexidade computacional e fácil implementação. Ele é mais genérico, com relação a outras abordagens, pois seus receptores não precisam de nenhuma informação sobre o sinal do UP para realizar o sensoriamento.

Alguns dos desafios do sensoriamento baseado em detecção de energia incluem a seleção de um limiar para detecção de UP (SHANKAR, 2005), incapacidade de diferenciar os tipos de sinal, apenas a presença ou ausência de sinal. O desempenho pobre sob baixos valores na relação sinal-ruído. Além disso, esta abordagem não é eficiente para detecção de sinais com espalhamento espectral.

Assumindo que o sinal recebido pelo detector,  $y(n)$ , tem sua fórmula de acordo com a Equação (1).

$$y(n) = s(n) + w(n) \quad (1)$$

Sendo  $s(n)$  o sinal do UP detectado,  $w(n)$  uma amostra do ruído branco Gaussiano e  $n$  o índice da amostra. Quando não há transmissão do UP, ou seja,  $s(n)=0$ , a métrica de decisão para o detector de energia pode ser descrita conforme a Equação (2).

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2 \quad (2)$$

Onde  $N$  é o total de amostras observadas. A decisão sobre a ocupação de um canal pode ser obtida comparando a métrica de decisão  $M$  com um limiar fixo  $\lambda_E$ . Isso é equivalente a distinguir as seguintes hipóteses descritas na Equação (3). Onde  $H_0$  é a hipótese de um UP estar ausente e  $H_1$  é a hipótese de que um usuário licenciado de um sinal estar presente no canal.

$$\begin{aligned} H_0 : y(n) &= w(n), \\ H_1 : y(n) &= s(n) + w(n). \end{aligned} \quad (3)$$

Um algoritmo de detecção pode ser resumido em duas possibilidades: probabilidade de detecção  $P_D$  e probabilidade de alarme falso  $P_f$ . Onde  $P_D$  é a probabilidade de detectar um sinal em uma determinada frequência quando ele está realmente presente. Em RC é desejável ter uma alta probabilidade de detecção, que pode ser descrita conforme a Equação (4), onde  $\Pr$  é o cálculo da probabilidade.

$$P_D = \Pr(M > \lambda_E | H_1) \quad (4)$$

Por outro lado,  $P_f$ , descrito na Equação (5), é a probabilidade de detectar que um sinal em transmissão em um canal dado que o sinal está ausente.

$$P_f = \Pr(M > \lambda_E | H_0) \quad (5)$$

Este tipo de sensoriamento é propenso a falso alarme acionados por sinais ou ruídos indesejados. Mas esta probabilidade deve ser baixa para evitar a subutilização das possibilidades de transmissão. Ou seja, um dispositivo RC detectou incorretamente que o canal estava sendo utilizado e por isso não transmitiu, perdendo o uso de uma oportunidade.

Um limiar de decisão  $\lambda_E$  pode ser selecionado para encontrar um equilíbrio entre  $P_D$  e  $P_f$ . Contudo, este limiar necessita de conhecer a potência do sinal detectado e a potência do ruído. A potência do ruído pode ser estimada facilmente, mas estimar a potência do sinal é difícil devido às mudanças que ocorrem nas características de transmissão dos UPs. Segundo Lehtomäki (2005), na prática, um limiar é escolhido para obter certa taxa de alarme falso. Por isso, o conhecimento da variação do ruído é suficiente para seleção de um valor limite.

### 3.2.2 Sensoriamento baseado em forma de onda

Padrões conhecidos são normalmente utilizados nos sistemas sem fio para auxiliar no reconhecimento de características futuras da transmissão do UP, baseado no conhecimento de transmissões anteriores. Tais padrões incluem *preambles*, *midambles*, padrões transmitidos regularmente, seqüências de espalhamento. Sendo *preamble* uma seqüência de transmissão conhecida antes que uma transmissão comece. E *midambles* um padrão reconhecido no meio de uma transmissão.

Na presença de um padrão conhecido, o sensoriamento pode ser realizado através da correlação do sinal recebido com uma cópia conhecida do sinal. Este método é aplicado somente a sistemas com padrão de sinal conhecido. Para Olivieri (2005), este sensoriamento pode superar o sensoriamento por detecção de energia devido ao menor tempo de sensoriamento e a maior confiabilidade. Além de constatar que o desempenho deste sensoriamento é melhor quanto maior for o comprimento do sinal padrão.

Utilizando o modelo descrito na Equação (1), e segundo Tang (2005), a métrica de sensoriamento pode ser obtida conforme a Equação (6). Onde \* representa o conjugado.

$$M = \text{Re}\left[\sum_{n=1}^N y(n)s^*(n)\right] \quad (6)$$

Onde segundo Tang (2005) na ausência do sinal do UP no canal, o valor da métrica define-se de acordo com a Equação (7).

$$M = \text{Re}\left[\sum_{n=1}^N w(n)s^*(n)\right] \quad (7)$$

Similarmente, na presença do sinal do UP a métrica de decisão do sensoriamento, como descreve a Equação (8), torna-se:

$$M = \sum_{n=1}^N |s(n)|^2 + \text{Re}\left[\sum_{n=1}^N w(n)s^*(n)\right] \quad (8)$$

A decisão sobre a presença de um sinal UP em um canal pode ser feita através da comparação da métrica  $M$  com um limiar fixo  $\lambda_w$ .

Conforme o exposto nesta seção, pode ser constatar que o sensoriamento baseado em forma de onda, quando encontra um padrão de transmissão, realiza a detecção em um tempo curto, em relação às outras abordagens de sensoriamento.

### 3.2.3 Sensoriamento ciclo-estacionário

Em geral, sinais modulados são associados a portadoras senoidais, trens de pulso, espalhamento espectral, seqüências de salto, ou ciclos prefixados, que resultam em sinal periódico. Sensoriamento ciclo-estacionário é um método para detecção da transmissão do UP pela exploração das características ciclo-estacionárias do sinal detectado.

Características ciclo-estacionárias são causadas pela periodicidade do sinal, ou na sua média e auto-correlação (MAEDA, 2007). Segundo Sutton (2007) as características ciclo-estacionárias podem ser deliberadamente induzidas para facilitar o sensoriamento de espectro. Em vez da densidade espectral de potência, é usada a função de correlação cíclica para detectar os sinais presentes num dado espectro.

Esta abordagem consegue diferenciar o ruído de um sinal licenciado. Isto porque o ruído é *wide-sense stationary* (WSS) sem correlação, enquanto sinais modulados são ciclos-estacionários com correlação espectral, devido à redundância de periodicidade do sinal (CABRIC, 2005). Além disso, de acordo com Kim (2007), esta abordagem pode distinguir entre diferentes tipos de transmissão e de UPs.

Em relação à robustez da incerteza na potência do ruído, a detecção ciclo-estacionária tem um desempenho melhor do que a detecção de energia. Contudo, é computacionalmente complexa e exige um grande tempo de observação.

### 3.2.4 Sensoriamento baseado na identificação de rádio

Um conhecimento completo sobre as características do espectro pode ser obtido através da identificação das tecnologias de transmissão utilizadas pelos UPs. Essa identificação provê ao RC um maior conhecimento dimensional e precisão dos parâmetros de rádio. Por exemplo, supondo que a tecnologia de um UP seja identificada como um sinal Bluetooth. Rádio cognitivo pode usar esta informação para extrair alguma informação útil na dimensão espacial, como o alcance do sinal Bluetooth ser conhecido por ser cerca de 10 metros. Além disso, o RC pode desejar se comunicar com os outros sistemas de comunicação identificados.

Para a identificação de rádio, em Farnham (2000), são utilizadas técnicas de extração das características e de classificação. O objetivo é identificar a presença de tecnologias de transmissão conhecidas e conseguir a interação com elas. As duas principais funções são a identificação do modo inicial (IMI) e acompanhamento modo alternativo (AMA). Através da potência do sinal, o IMI procura de dispositivos cognitivos para um determinado modo de transmissão em rede. Já no AMA o

dispositivo cognitivo se comunicam em um determinado modo, enquanto monitora outros.

No sensoriamento baseado na identificação de rádio, vários parâmetros são extraídos do sinal recebido e eles são usados para identificar a tecnologia mais provável do UP, através de vários métodos de classificação. Em Vardoulis (2001), os parâmetros obtidos pelo detector de energia, são utilizados para a classificação. Esses parâmetros incluem quantidade de energia detectada, sua distribuição em todo o espectro. Largura de banda e forma de onda do canal são usadas como características.

### 3.2.5 Filtro casado

Quando a informação do usuário primário é conhecida pelo US, o detector ideal em ruído gaussiano estacionário é o filtro casado, pois maximiza a relação sinal ruído do receptor. A principal vantagem do filtro casado é que ele necessita de pouco tempo para alcançar um ganho de processamento alto, definindo rapidamente as probabilidades de falso alarme e detecção (TANDRA, 2005).

Esta estratégia requer um conhecimento perfeito, a priori, das características do sinal licenciado, tais como o tipo de modulação, formato do pulso e formato do pacote transmitido pelo UP. Estas informações, quando obtidas pelo receptor do US, não são precisas, e por isso o desempenho deste filtro é pobre. Além disso, como os receptores RC necessitam conhecer todos os tipos de sinal, a implementação deste tipo de filtro é impraticável devido a sua alta complexidade. E devido a essas desvantagens, se fosse implementado teria um alto consumo de energia no dispositivo.

## 3.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SENSORIAMENTO

Uma comparação básica dos métodos de detecção é apresentada na Figura 11. Observa-se que o sensoriamento baseado em forma de onda é mais robusto do que o detector de energia e o ciclo-estacionário. Além disso, tem menor

complexidade computacional que o ciclo-estacionário. Isto ocorre devido ao processamento rápido que vem do uso das componentes de sinais conhecidos. No entanto, na forma de onda deve haver uma informação a priori das características do UP. E os UPs devem transmitir padrões conhecidos.

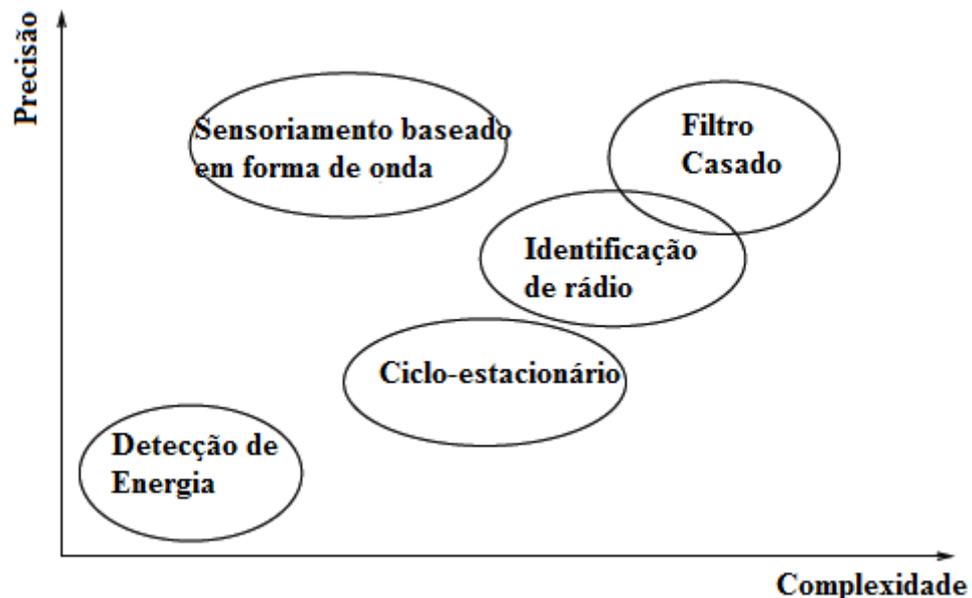


Figura 11: Principais métodos de sensoriamento

Segundo Ganesan (2005), o desempenho do método baseado em detecção de energia é limitado quando não possuem dois pressupostos comuns: ruído não-estacionário e variância desconhecida. No entanto, é mostrado que em situações onde o ruído é estacionário, os métodos ciclo-estacionários têm desempenho pior do que os de detecção de energia. Além disso, na presença de co-canal ou interferências de canais adjacentes, o ruído torna-se não-estacionário. Assim, sensoriamentos baseados em detecção de energia falham, enquanto os ciclo-estacionários não são afetados.

Por outro lado, as características ciclo-estacionárias podem ser completamente perdidas, devido ao desvanecimento do canal. Além disso, as incertezas de um modelo criam dificuldades na relação sinal-ruído para detectores ciclo-estacionários de características semelhantes aos detectores de energia. Por

fim, o sensoriamento ciclo-estacionário é conhecido por ser vulnerável aos desvios de amostragem *clock* (CABRIC, 2007).

Na escolha do método de sensoriamento alguns compromissos devem ser considerados. As características das transmissões dos UPs são o principal fator na escolha de um método de detecção. As ciclo-estacionárias são contidas em forma de onda, e há a existência de ciclos que são regularmente transmitidos, assim características de tempo e frequência são muito importantes. Outros métodos incluem fatores como a precisão dos parâmetros detectados, de tempo e frequência de sensoriamento definidos, complexidade computacional e requisitos de rede.

A Tabela 1 resume os métodos descritos nesta seção, apontando as suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Métodos de sensoriamento

<b>Métodos de Sensoriamento</b>	<b>Principais Vantagens</b>	<b>Principais Desvantagens</b>
Sensoriamento baseado em detecção de energia	-baixa complexidade computacional - fácil implementação. -não precisam de informação, a priori, sobre o sinal do UP.	Ineficiente para detecção de sinais com espalhamento espectral.
Sensoriamento baseado em forma de onda	Menor tempo de sensoriamento com maior confiabilidade	Aplicado somente a sistemas com padrão de sinal conhecido
Sensoriamento ciclo-estacionário	Consegue diferenciar o ruído de um sinal licenciado	Computacionalmente complexo e exige um grande tempo de observação
Sensoriamento baseado na identificação de rádio	Maior precisão dos parâmetros de rádio	Requer a identificação das tecnologias de transmissão utilizadas pelo UP.
Filtro casado	Define rapidamente as probabilidades de falso alarme e detecção.	Requer um conhecimento perfeito, a priori, das características do sinal licenciado

### 3.4 SENSORIAMENTO COOPERATIVO

A suposição sobre a detecção do transmissor primário é que as localizações dos receptores primários são desconhecidas devido à ausência de sinalização entre UPs e os USs. Portanto, o RC deve confiar em apenas nos sinais fracos do transmissor primário baseado na observação local do US. Contudo, existem casos em que a RRC é separada da rede primária não havendo interação entre elas. Deste modo, em relação a detecção do transmissor, o US não consegue evitar a interferência devido a falta de informação do receptor primário, conforme é ilustrado na Figura 12.

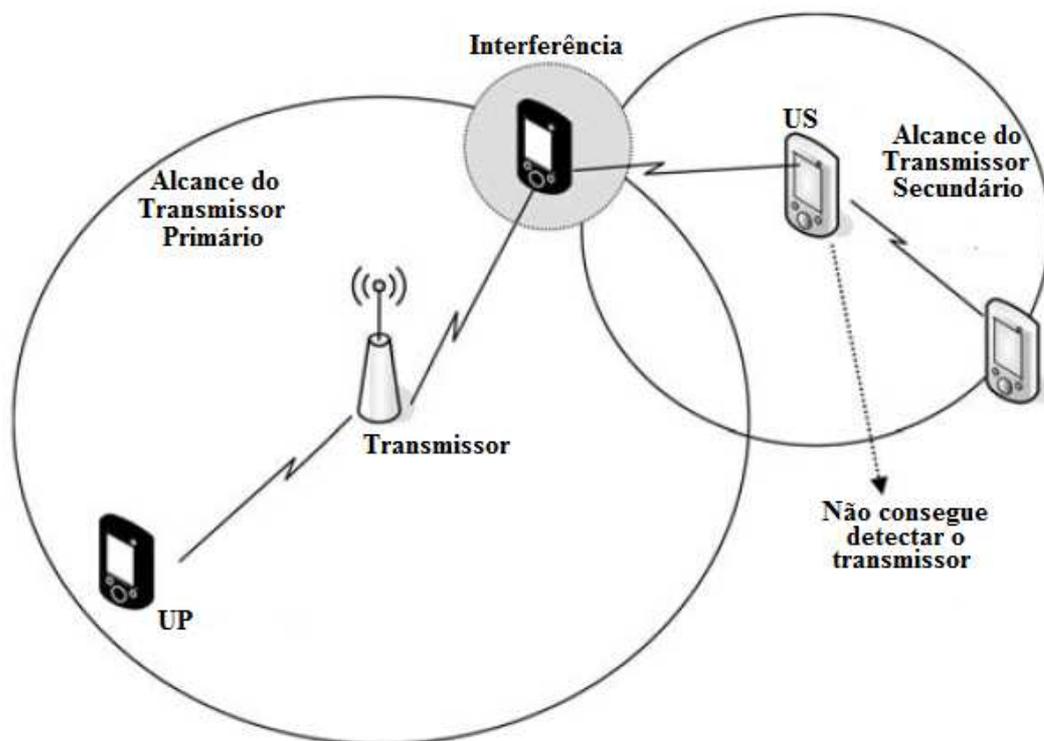


Figura 12: Problema da incerteza do receptor (AKYILDIZ et. al, 2006).

Além disso, o modelo de detecção do transmissor não pode impedir o problema do terminal escondido. Um transmissor de um US pode ter uma boa visão de um receptor, mas pode não ser capaz de detectar uma transmissão primária devido ao sombreamento, mostrado na Figura 13. Para esses casos, as informações de sensoriamento de outros USs é compartilhada para obter um sensoriamento mais preciso.

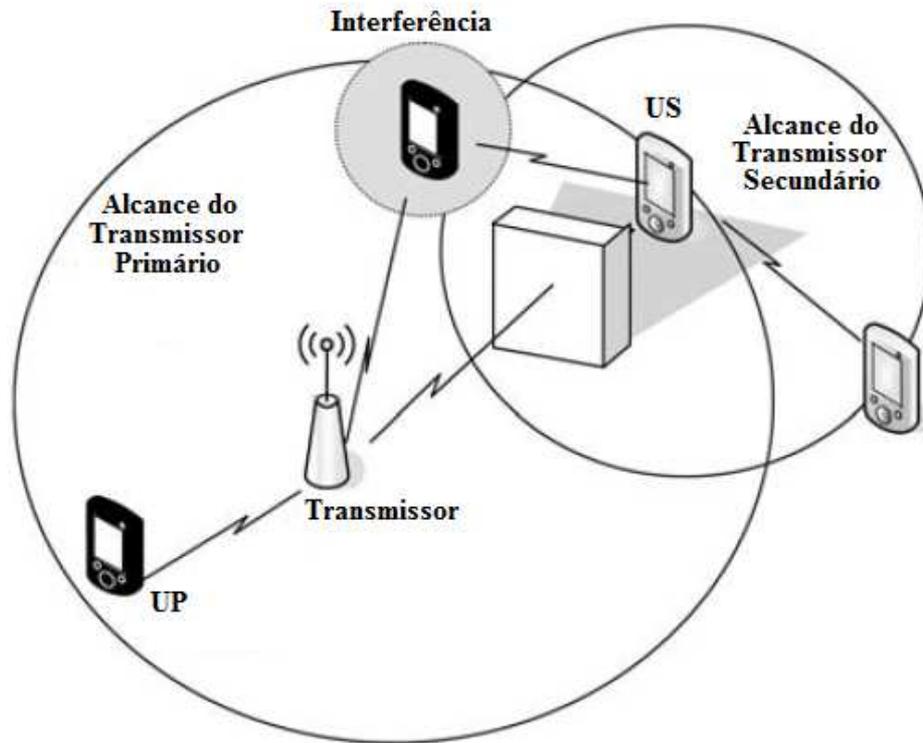


Figura 13: Problema do sombreamento (AKYILDIZ et. al, 2006).

No sensoriamento não cooperativo, como descrito na seção 3.3, o US detecta o sinal do transmissor primário independente e conforme suas observações locais. A detecção cooperativa refere-se a métodos de sensoriamento onde as informações de vários USs são incorporadas para detecção do UP. A detecção cooperativa pode ser classificada como centralizada e distribuída. Sendo que na centralizada, a estação base tem a responsabilidade de concentrar toda a informação de sensoriamento e detectar oportunidades no espectro. Por outro lado, soluções distribuídas requerem troca de observações entre USs.

Entretanto, a abordagem cooperativa tem um custo, ela causa efeitos negativos sobre os recursos limitados da rede devido ao alto *overhead* de tráfego gerado. Além disso, com essa abordagem não é possível conhecer a localização do UP, continuando o problema da incerteza do receptor primário.

### 3.5 DETECÇÃO BASEADA EM INTERFERÊNCIA

Interferência normalmente é regulamentada de forma centrada no transmissor, o que significa que a interferência pode ser controlada no transmissor através da potência irradiada, as emissões fora da banda e localização dos transmissores individuais. No entanto, a interferência ocorre realmente nos receptores. Segundo Akyildiz (2006), o modelo baseado em temperatura de interferência é centrado no gerenciamento da interferência no receptor, através da estimação da temperatura limite, representada pelo montante das novas interferências que o receptor primário pode suportar.

Portanto, um modelo para a medição interferência, denominado de temperatura de interferência foi determinado por FCC (2003), como mostra a Figura 14. O modelo mostra o sinal de uma estação de rádio destinada a operar em uma faixa em que o potência recebida ao nível de ruído. Além disso, sinais de interferência aparecem quando o nível ruído aumenta dentro da área de serviço, conforme indicado pelos picos acima do nível de ruído original. O modelo de temperatura interferência gera interferência no receptor através do limite de temperatura de interferência, que é representada pela quantidade de interferência que o receptor poderia tolerar, ou seja, este modelo define um limite máximo de seu nível de interferência. Enquanto os USs não excederem este limite por suas transmissões, eles podem usar esta banda do espectro.

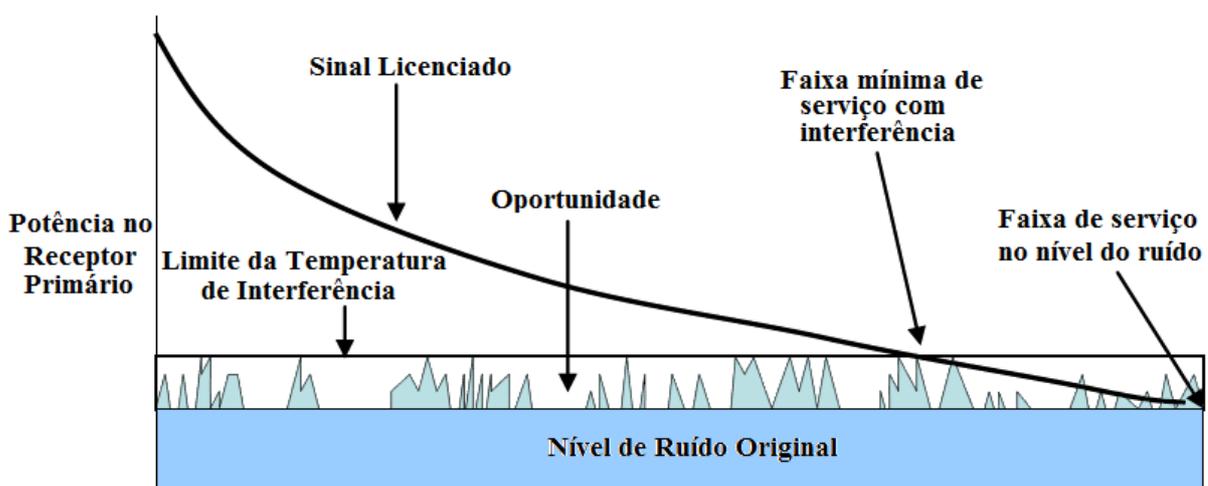


Figura 14: Modelo de temperatura de interferência (AKYILDIZ et. al, 2006)

### 3.6 DESAFIOS DO SENSORIAMENTO DE ESPECTRO

Existem vários desafios de pesquisa em aberto que precisam ser investigados para o desenvolvimento do sensoriamento de espectro em rádio cognitivo. Esta seção tem o objetivo de descrever alguns desafios.

#### 3.6.1 Sensoriamento na camada MAC

Na camada MAC, um dos aspectos fundamentais para a eficácia do sensoriamento é a definição da periodicidade com que os canais serão sentidos pelo US, ou seja, de quanto em quanto tempo o US deve sentir o canal. Para tanto, deve-se considerar um compromisso entre o número de descobertas de oportunidades de utilização do espectro e o *overhead* de sensoriamento obtido com a adoção de um dado período de sensoriamento. Caso este período seja muito pequeno, muitas oportunidades no espectro serão encontradas, no entanto, o US despenderá muito tempo sentindo os canais, o que fará com que a sua utilização espectral seja reduzida. A Figura 15 ilustra esta situação, onde o período de sensoriamento é muito pequeno para o canal representado por um modelo ON-OFF, detectado pela camada física, realizando assim uma quantidade excessiva de sensoriamentos redundantes.

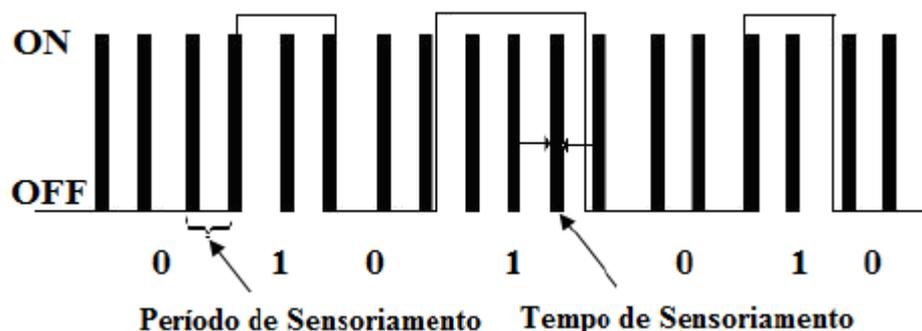


Figura 15: Período de sensoriamento muito pequeno

Ao contrário, sentir os canais com menor frequência pode ocasionar perdas de descobertas de oportunidades no espectro e/ou não percepção da interferência

causada no UP, conforme mostra a Figura 16. Neste caso, o UP estava presente no canal, representado pelo estado ON, mas não foi detectado em função de um valor grande para o período de sensoriamento adotado. Dessa forma, apesar do *overhead* de sensoriamento obtido ser menor, neste segundo caso, e o US poderá passar mais tempo realizando a sua transmissão, o US provocará maior interferência à comunicação primária.

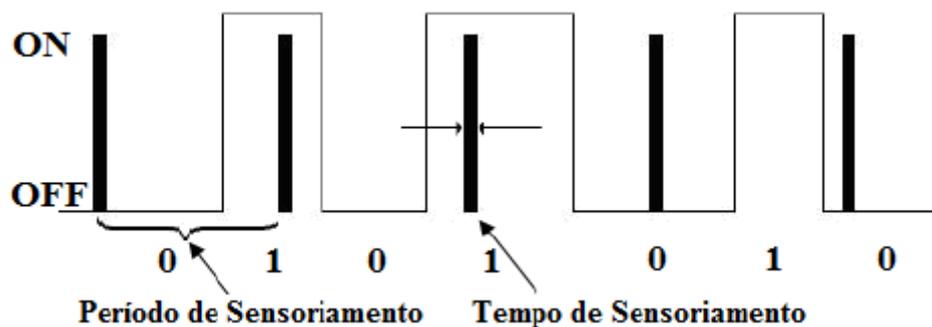


Figura 16: Período de sensoriamento muito grande

Além disso, devido ao peculiar padrão de uso de cada canal, definido pela atividade do UP, um determinado período de sensoriamento pode proporcionar um bom desempenho para um canal (compromisso entre o número de descobertas encontradas e o *overhead* de sensoriamento obtido) ao passo que para outro isso pode não ocorrer, como ilustra a Figura 17.

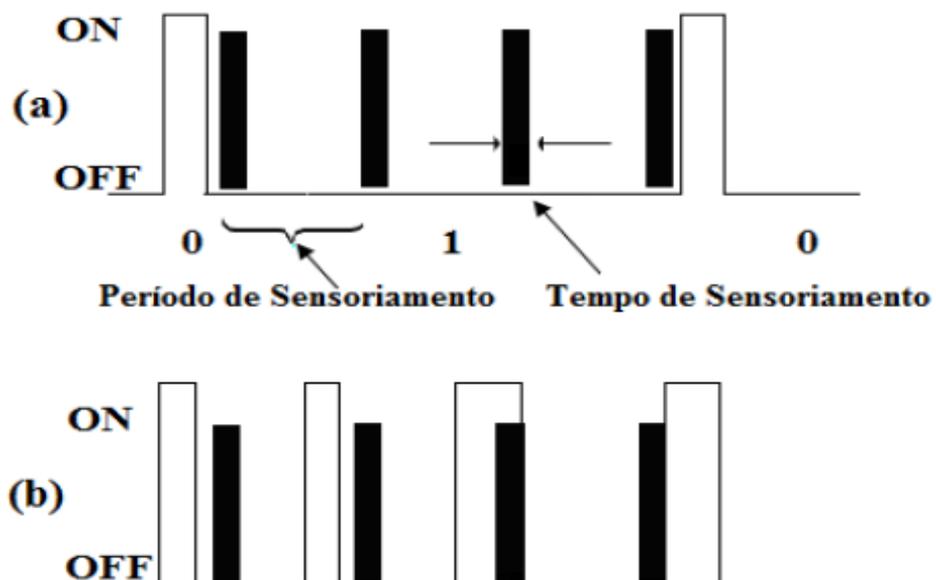


Figura 17: (a) Período sensoriamento pequeno para o canal. (b) Mesmo período de sensoriamento, porém grande para outro canal.

Adicionalmente, o sensoriamento de espectro também é afetado por outro fator: a tolerância à interferência do UP. Em alguns canais como, por exemplo, os pertencentes à banda de segurança pública, quando o RC explora suas oportunidades, o sensoriamento deve ser feito tão frequente tanto quanto possível a fim de prevenir a interferência aos usuários primários (ARSLAN, 2007). Com isso, um dos grandes desafios na área de sensoriamento de espectro é encontrar um período de sensoriamento ótimo para cada canal com vistas a obter um bom compromisso entre o número de descobertas encontradas e o conseqüente *overhead* de sensoriamento proporcionado, para transmissões primária e secundária.

O sensoriamento na camada MAC pode ser classificado como pró-ativo ou reativo (KIM, 2008). Quando o requisito de largura de banda de uma rede secundária ou baseada em rádio cognitivo (RRC) pode ser satisfeito com apenas um canal, torna-se suficiente para o US descobrir apenas um canal ocioso e permanecer nele até a chegada de um UP. Assim, o sensoriamento é realizado sob demanda, apenas quando o US da RRC tem que mudar para outro canal. Este tipo de sensoriamento é chamado de detecção reativa.

Por outro lado, para descobrir mais canais ociosos/vagos deve-se realizar um sensoriamento pró-ativo, ou seja, cada canal deve ser sentido regularmente com seu próprio período, possibilitando que as oportunidades existentes nos canais sejam encontradas. E este processo de descoberta se dá de forma contínua, não apenas sob demanda. Nesta abordagem, adota-se esta forma de sensoriamento, onde se busca encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento ótimo para os canais objetivando um bom compromisso entre oportunidades no espectro encontradas e *overhead* de sensoriamento desejado.

### 3.6.2 Exigências de Hardware

O sensoriamento de espectro em RC exige um hardware diferenciado, com alta taxa de amostragem, alta resolução nos conversores analógico-digital e alta velocidade nos processadores de sinal.

Adicionalmente, o sensoriamento de espectro pode ser realizado nas arquiteturas de uma antena ou duas antenas. Com uma antena garante-se simplicidade e baixo custo de sensoriamento de espectro. Contudo, a eficiência da utilização do espectro é reduzida, pois uma parte importante do tempo é utilizada para a detecção em vez da transmissão de dados, haja vista que um dispositivo de uma antena não consegue transmitir e sentir o canal ao mesmo tempo.

Já na arquitetura com duas antenas, uma antena é dedicada à transmissão e recepção de dados, enquanto a outra é dedicada ao sensoriamento de espectro. A desvantagem inclui o maior consumo de energia e custo de hardware. A Tabela 2 compara as principais vantagens e desvantagens da utilização das duas arquiteturas.

Tabela 2 - Sensoriamento com uma e duas antenas

	<b>Uma antena</b>	<b>Duas antenas</b>
<b>Vantagens</b>	Simplicidade	Alta eficiência espectral
	Baixo custo	Melhor exatidão no sensoriamento
<b>Desvantagens</b>	Baixa eficiência espectral	Alto custo
	Pobre exatidão no sensoriamento	Alto consumo de potência
		Maior complexidade

Dependendo dos recursos disponíveis, desempenho desejados e/ou exigências de taxas de dados, opta-se por uma arquitetura ou outra. Neste trabalho será utilizada a arquitetura com uma antena.

Já existem plataformas de software e hardware disponíveis para RC. Entre elas estão: GNU Rádio (BLOSSOM, 2004), *Universal Software Radio Peripheral*

(USRP) (ETTUS, 2011), Shared Spectrum's XG Radio (MCHENRY, 2007). O detector de energia é o mais utilizado nestas plataformas devido à simplicidade e ao baixo custo. Por isso, esse será o método de sensoriamento utilizado nesta dissertação.

### 3.6.3 Problema do terminal escondido

Um transmissor secundário pode não ser capaz de detectar uma transmissão primária devido ao sombreamento. Por não conseguir detectar a transmissão do UP, a transmissão do dispositivo RC causa interferência no receptor UP. A Figura 18 ilustra o problema do terminal escondido, onde o usuário secundário (US1) realiza o sensoriamento e a transmissão causando interferência no UP2, pois não consegue detectar a presença do receptor primário (UP1), nem do transmissor primário (UP2), pois este último localiza-se fora do alcance de detecção dos dispositivos, representado pelos círculos.

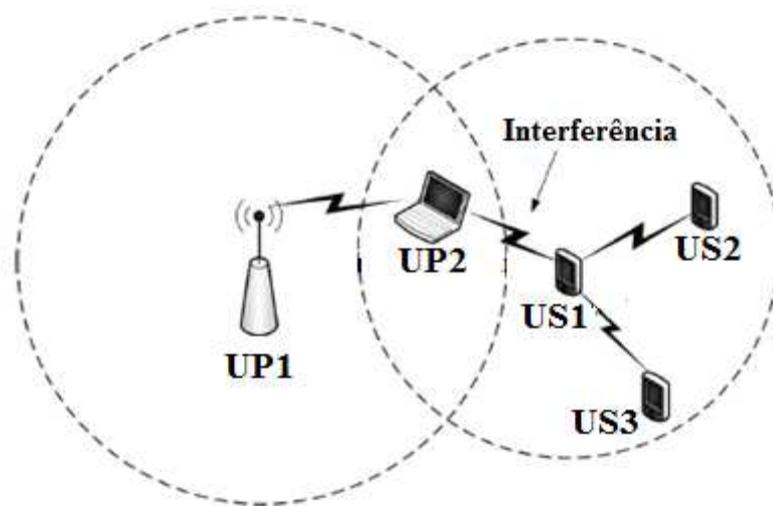


Figura 18: Problema do terminal escondido em RC (AKYILDIZ et. al, 2008).

Uma possível solução para este problema seria a implantação da detecção cooperativa. Para o problema do terminal escondido seria o sensoriamento cooperativo.

### 3.6.4 Detecção de Espalhamento Espectral de Usuários Primários

A detecção de UPs que utilizam espelhamento espectral é mais difícil. Devido à energia do sinal transmitido ocupar uma banda muito maior que a informação, a largura de banda usada para transmissão torna-se muito maior que a mínima necessária para transmitir a informação. Este problema pode ser parcialmente evitado se o padrão do sinal é conhecido e se for possível alcançar um perfeito sincronismo com o sinal.

## 4 OTIMIZAÇÃO DO PERÍODO DE SENSORIAMENTO EM RÁDIO COGNITIVO

Este capítulo descreve a proposta e a metodologia utilizadas para definir o conjunto de períodos de sensoriamento ótimos para os canais de comunicação. O objetivo desta abordagem é obter um bom compromisso entre o número encontrado de oportunidades nos canais e a taxa de *overhead* de sensoriamento estipulada para estes canais.

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESTADO DA ARTE

O sensoriamento de espectro em RC objetiva encontrar boas oportunidades de transmissão e detectar a chegada do usuário primário ao canal, de modo a não causar interferência na transmissão primária. A eficiência do sensoriamento é dada por quão capaz ele é de descobrir as oportunidades no espectro, bem como evitar a interferência na comunicação licenciada.

Quando o dispositivo de rádio sente mais o espectro do que transmite, a eficiência espectral é degradada, pois assim utiliza muito tempo para a detecção do UP em vez de realizar a transmissão secundária. Por outro lado, sentir os canais de comunicação com pouca frequência pode resultar em perdas na descoberta de oportunidades, bem como interferência à comunicação licenciada. Por isso, tornam-se necessários procedimentos de sensoriamento que tenham o objetivo de obter máxima utilização espectral possível sem causar interferência na transmissão do usuário primário.

Neste aspecto, em Choi (2010) foi desenvolvido um sistema de sensoriamento que propõe a melhoria da utilização do espectro decidindo, adaptativamente, se o RC sente o canal ou se transmite dados do usuário. A tomada de decisão é baseada em resultados de sensoriamento e transmissão de dados anteriores, sensoriamento atual e troca de canal. No trabalho, o comportamento do UP foi modelado como um processo de Markov com dois estados. Nele, os autores desenvolveram um algoritmo que utiliza o processo de decisão de Markov

parcialmente observável para otimizar o mecanismo de sensoriamento. Com isso, o esquema proposto evita sensoriamentos desnecessários.

No entanto, os autores consideram uma rede em pequena escala, *Wireless Personal Area Network* (WPAN), com a topologia em estrela e nó central, denominado de “nó mestre”, que tem a função de fazer o sensoriamento e tomar as decisões de qual canal utilizar e quando ele deve ser utilizado. Além disso, existem os “nós escravos” que recebem a ordem do nó mestre de quando transmitir, qual canal utilizar, bem como de quando realizar a troca de canal. Assim, os nós escravos não realizam sensoriamento. Os autores avaliam o desempenho da estratégia quanto à utilização do canal e probabilidade de colisão. Essa arquitetura pode ser considerada limitada, pois funciona em condições demasiadamente específicas. Em um ambiente onde não exista o nó mestre, um nó escravo não tem inteligência suficiente para realizar sozinho o sensoriamento e a tomada de decisão. Ademais, os autores não citam o efeito do *overhead* de fluxo na rede causado pelas trocas de informação entre nó mestre e escravos. Este parâmetro é considerado importante, pois o nó mestre faz o sensoriamento continuamente e atualiza os nós escravos a todo o momento.

Em Kim (2008) é proposto um algoritmo adaptativo que busca determinar a periodicidade ótima com que cada canal é sentido. O objetivo é maximizar a descobertas de oportunidades no espectro e minimizar o atraso na busca por um canal disponível. Na proposta, adota-se o modelo de canais ocupado/desocupado (ON/OFF), cuja duração de cada período ON/OFF segue uma distribuição exponencial. Os resultados obtidos foram apresentados em termos de utilização do canal licenciado pelo usuário secundário.

No entanto, em Kim (2008), o conjunto de períodos de sensoriamento encontrado baseia-se numa estratégia que leva em consideração o comportamento médio dos canais e não as amostras dos canais, gerados a partir de uma distribuição exponencial. Com isso, não fica claro se o desempenho do período de sensoriamento obtido com esta proposta seria ótimo caso os autores considerassem/avaliassem as amostras geradas dos canais em vez da informação do comportamento médio dos mesmos. Ademais, os autores não consideram a influência da seleção do período de sensoriamento sobre a interferência ao usuário

primário. Além disso, o resultado encontrado tem *overhead* de sensoriamento fixo, não levando em conta que alguns canais têm menos tolerância a interferência que outros.

Em Song (2009) é proposta a melhoria na utilização espectral através de um sistema de sensoriamento de espectro cooperativo e adaptativo. A adaptação do sistema de sensoriamento se dá conforme características de uso do canal e número de usuários secundários que participam do sensoriamento cooperativo. Os autores avaliam a abordagem proposta em relação a eficiência da detecção e custo de detecção. No entanto, a quantidade de interferência gerada pelo usuário secundário não é considerada na avaliação. Assim como, também não é avaliado o *overhead* de troca de mensagens na rede, pois os USs trocam mensagens entre si ou as enviam para uma entidade central.

Os trabalhos descritos anteriormente levam em consideração o comportamento médio dos canais, o que pode inviabilizar sua aplicação em cenários realistas. Dessa forma, os resultados obtidos por meio dessa abordagem podem não refletir os valores reais, devido a não-linearidade dos dispositivos, falhas de equipamentos ou fatores ambientais inesperados, entre outros, que não são considerados na definição do modelo adotado. Em vista disso nesta dissertação foram utilizadas amostras geradas com comportamento estocástico, para tornar a abordagem proposta mais fiel à realidade.

Levando-se em consideração que ambientes RC são altamente dinâmicos, AG pode se apresentar como uma ferramenta muito útil para esses sistemas. O AG possui a capacidade de otimização de sistemas não-lineares, encontrando respostas satisfatórias para grandes espaços de busca. Questões como a não-linearidade de canais são assimiladas pelo AG. Com isso, o AG consegue calcular um período de sensoriamento satisfatório independente do comportamento do canal.

Em se tratando do uso de AG em RC, Chantaraskul (2010) propõe uma arquitetura de tomada de decisão sobre sensoriamento de espectro, incluindo o fluxo de informações do RC como um processo de entrada para o mecanismo de tomada de decisão. A filtragem de informações do ambiente de rádio e o mecanismo de raciocínio em que a decisão é obtida utilizam uma abordagem em um AG, que busca otimizar o tamanho do pacote, frequência, tipo de modulação, potência de

transmissão e a taxa de dados. A proposta é testada através de simulações e um estudo experimental para prova de conceitos é realizado em uma plataforma baseada na *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) e GNU Radio. No processo de avaliação da arquitetura foram fornecidas as configurações do ambiente de teste e os resultados da observação, abrangendo sensoriamento de espectro e a alocação oportunista de canal na banda ISM. Os autores avaliam a proposta em relação ao *fitness* dos melhores indivíduos.

Ademais, os autores utilizam uma estratégia multiobjetivo que considera a média ponderada para calcular o *fitness* dos indivíduos. Esta estratégia precisa das ponderações para canais diferentes, devido aos diferentes padrões de uso desses canais. No entanto, os autores não clarificam como ajustar os pesos para diferentes tipos de canais e nem consideram a interferência causada pelo usuário secundário.

Abordagens baseadas em AG têm a vantagem de explorar um grande espaço de buscas devido ao seu paralelismo implícito. No entanto, o tempo necessário para um algoritmo genético chegar a uma solução satisfatória aumenta com a complexidade do sistema. Em vista disso, são necessárias técnicas para acelerar a convergência do AG e, por conseguinte, obter resultados satisfatórios em menor período de tempo.

Neste âmbito, em Chen (2010) são apresentadas algumas abordagens para melhorar o tempo de convergência do AG na determinação do conjunto de parâmetros de transmissão ideais para um sistema baseado em RC. Para isso, foram analisadas e testadas técnicas de adaptação da população, quantização de variáveis, adaptação de variáveis e algoritmos genéticos multiobjetivos. As métricas utilizadas para avaliar a proposta foram a vazão do canal, a demanda de usuários secundários e o valor de *fitness*.

Em Willkomm et. al (2009), foi realizado um estudo sobre a análise de um conjunto de dados de chamadas registradas dentro de uma rede celular. Deste modo, eles foram capazes de mostrar informações de sensoriamento dessa rede. Esse estudo foi realizado simultaneamente em centenas de estações base durante três semanas, resultando em dez milhões de chamadas. De posse desses resultados foi criado um modelo de chamadas e da capacidade do sistema. Foram descritos alguns aspectos relevantes para a permissão do acesso dinâmico ao

espectro em uma rede celular. Um deles é que redes celulares são atrativas ao acesso dinâmico durante a noite e fins de semana, ou seja, horários que não são de pico e podem ser largamente utilizados por usuários secundários. Outro aspecto é a velocidade com que novas faixas de espectro podem ser percebidas. Um canal é desocupado se o sensoriamento detecta o UP no canal. O US, em conformidade com o comportamento do UP, deve escolher um período de sensoriamento mais adequado. Períodos de sensoriamento curtos são utilizados em determinados momentos, no entanto, em outros, períodos de sensoriamento longos são justificados quando a utilização do UP no canal for comprovadamente baixa.

Em termos de tempo de processamento o AG é maior do que outras propostas de otimização. No entanto, como exposto em Willkomm et. al (2009), existem canais que seguem um padrão durante um longo período de tempo. Caso o tempo de processamento do AG seja bem menor em relação ao tempo em que o canal segue o padrão, ainda resta muito tempo para utilizar o período de sensoriamento ótimo. O AG é aplicável a esse tipo de cenário, onde leva um tempo de processamento curto em relação ao tempo total em que um canal segue um padrão. Além disso, o tempo do processamento do AG pode diminuir com técnicas de aceleração de convergência, por tanto o AG também pode ser útil em aplicações que necessitam de respostas rápidas. Dessa forma, uma abordagem utilizando AG é perfeitamente aplicável em sistemas RC.

Como visto acima, diversos trabalhos têm sido propostos para o processo de sensoriamento de espectro em RC. Diferentemente de outros trabalhos, nesta dissertação propõe-se a utilização de algoritmos genéticos com uma estratégia multiobjetivo para otimização do período de sensoriamento do espectro. Nesta proposta, busca-se maximizar o número de oportunidades descobertas no espectro, considerando um valor de *overhead* de sensoriamento definido pelo usuário.

## 4.2 MODELO DO CANAL

Neste trabalho, o período de sensoriamento do canal  $i$  será representado pela variável  $x_i$ . Qualquer canal ocioso descoberto pelo sensoriamento periódico torna-se



como em Kim (2008), os períodos ON e OFF são considerados como independentes entre si e identicamente distribuídos.

Sendo  $S^i(t)$  o estado do canal  $i$  no instante  $t$ . O processo de sensoriamento se resume ao processo de amostragem dos canais a cada intervalo de tempo. Neste caso, os estados ON e OFF dos canais podem ser representados pelos dígitos 1 e 0, respectivamente. Com isso, para determinar o conjunto ótimo de períodos de sensoriamento, a proposta apresentada neste trabalho utiliza os valores amostrados dos canais em vez do comportamento médio de cada período ON/OFF, adotado em Kim (2008). Dessa forma, esse estudo proporciona um cenário de avaliação mais próximo do real, pois informações do comportamento médio dos canais podem não estar disponíveis ou demandar muito tempo e medições para serem obtidas. Além disso, esta proposta é totalmente extensível para outros modelos de canais.

### 4.3 ABORDAGEM PROPOSTA

Este capítulo descreve a proposta e a metodologia utilizadas para definir o conjunto de períodos de sensoriamento ótimos para os canais de comunicação. O objetivo desta abordagem é obter um bom compromisso entre o número oportunidades encontrado nos canais e a taxa de *overhead* de sensoriamento estipulada para estes canais. Para alcançar este objetivo, um Algoritmo Genético (AG) com uma estratégia de múltiplos objetivos foi adotado e é detalhado na Seção 4.4.

A Figura 19 descreve de maneira geral a proposta deste trabalho, onde um AG é a abordagem que define um período de sensoriamento ( $x$ ) satisfatório para que o sensoriamento de canais possa executar seu serviço com o compromisso descrito acima. Os dados do sensoriamento são considerados pelo AG para que ele possa avaliar o período de sensoriamento.

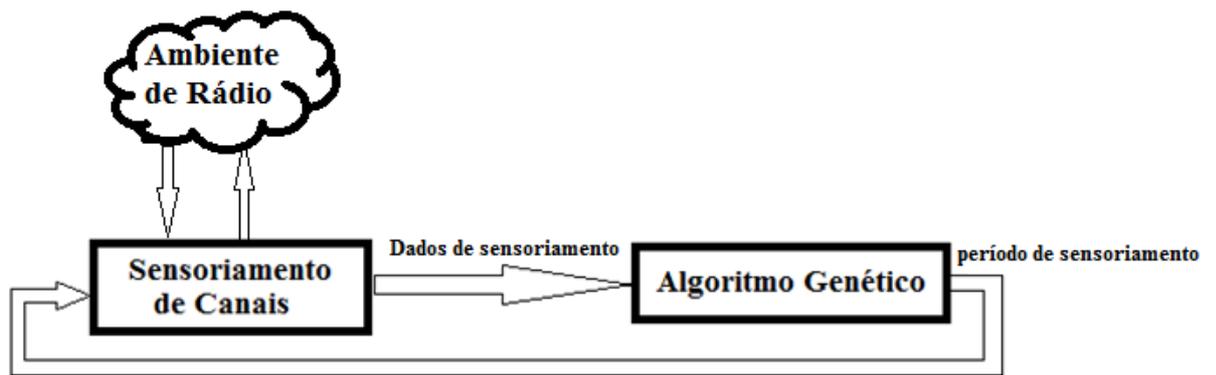


Figura 20: Estrutura da proposta deste trabalho.

#### 4.4 ALGORITMO GENÉTICO

Como apresentado na Seção 3.6.1, no sensoriamento pró-ativo cada canal é sentido com seu próprio período de sensoriamento, os quais são independentes entre si. Neste aspecto, a adaptação do período de sensoriamento de cada canal é um grande desafio, haja vista que na definição de qual valor adotar deve-se levar em conta o compromisso entre o número de oportunidades descobertas e o *overhead* de sensoriamento. Ademais, o período de sensoriamento ótimo para um canal pode não ser para os demais.

Com isso, nesta abordagem busca-se através dos conceitos evolutivos inerentes aos algoritmos genéticos, que é um algoritmo de busca baseado nos princípios da teoria da evolução natural de Darwin (Linden, 2008), encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento ótimo a ser utilizado no processo de sensoriamento de canal. Neste processo de evolução, a cada geração, um conjunto de possíveis soluções para o problema é avaliado e as boas características das melhores soluções são transferidas para as gerações seguintes, dando continuidade ao processo de otimização (Linden, 2008). Estas características e outras como o paralelismo, implícito ao AG, e sua abrangência de aplicação tornam o AG uma interessante ferramenta a ser utilizada em RC.

No AG proposto, cada indivíduo é formado por  $N$  parcelas, onde cada uma representa o período de sensoriamento de um canal, sendo  $N$  o número de canais. A codificação binária de cada parcela com  $P$  casas decimais de resolução utiliza  $K$  bits, definida de acordo com a Equação (11). Onde  $X_{max}$  e  $X_{min}$  são os limites superior e inferior, do intervalo de definição do período de sensoriamento. Com isso, a codificação de um indivíduo é dada por  $N \times K$  bits. A Figura 20 ilustra a estrutura de cada indivíduo que compõe a população de possíveis soluções para o problema deste trabalho.

$$2^K \geq (X_{max} - X_{min}) \times 10^P \quad (11)$$

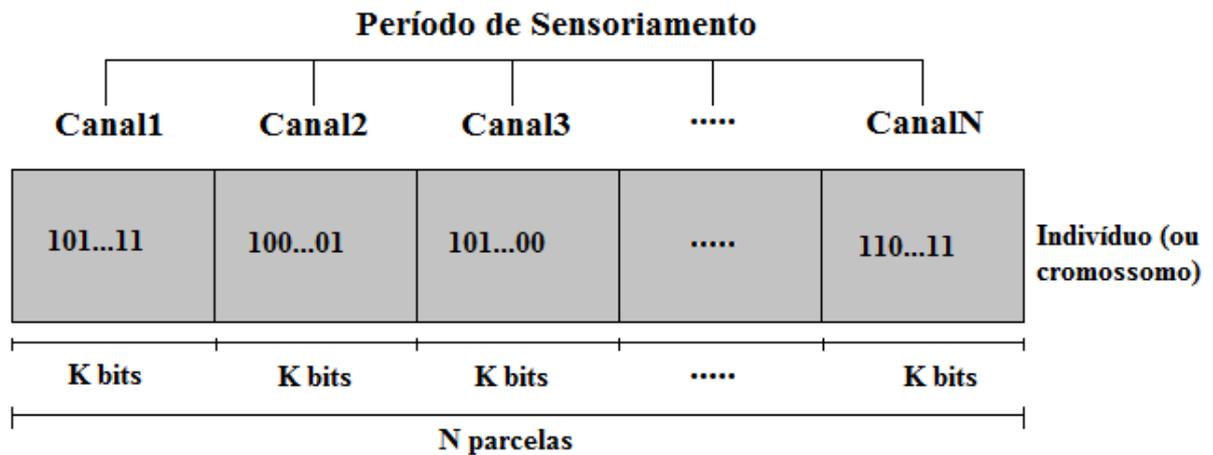


Figura 21: Indivíduo de um AG

Para avaliar cada possível solução ao problema (indivíduo) durante o processo de evolução, utilizou-se a estratégia de conjuntos pareto, devido ao problema da determinação do conjunto de períodos de sensoriamento de canais apresentar múltiplos objetivos (Linden, 2008).

A otimização utilizando conjuntos pareto baseia-se no conceito de dominância. Para que uma solução  $X_q$  domine sobre outra solução  $X_r$ , cada coordenada da avaliação de  $X_q$  deve ser maior ou igual que a respectiva coordenada de  $X_r$ , sendo que deve haver pelo menos uma coordenada de  $X_q$  que seja maior que  $X_r$ , (Linden, 2008). Considere a função de avaliação como um vetor  $f(X) =$

$[f_1(X), f_2(X), \dots, f_s(X)]$ , onde  $X$  representa o indivíduo ou solução para um problema e  $f(X)$  representa a avaliação para determinado indivíduo. O conceito de dominância pode ser representado matematicamente (considerando o símbolo  $\equiv$  como dominância), conforme a Equação (12).

$$\begin{aligned} X_q \equiv X_r \Rightarrow \forall i \in \{1, 2, \dots, s\}, f_i(X_q) \geq f_i(X_r) \\ \exists j \in \{1, 2, \dots, s\}, f_j(X_r) > f_j(X_q) \end{aligned} \quad \text{e} \quad (12)$$

Na abordagem desenvolvida neste trabalho, a função de avaliação  $f(x)$  é parcialmente definida conforme a Equação (13), onde cada indivíduo na estratégia de conjuntos pareto é avaliado em relação ao número de oportunidades descobertas (Op).

$$f(X) = Op(X) \quad (13)$$

Ademais, a avaliação de cada indivíduo leva em conta o seu *overhead* de sensoriamento proporcionado, o qual é dado pela Equação (14).

$$Ov(X) = \sum_{i=1}^N \frac{t_s}{x_i} \quad (14)$$

Já o número de oportunidades encontradas nos canais adotando-se o conjunto de períodos de sensoriamento determinado por cada indivíduo é descrito pela Equação (15).

$$Op(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^M S_i(x_i, h) \quad (15)$$

Onde:

$X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$  é o vetor que representa um indivíduo no AG, com  $i=1, 2, \dots, N$  e  $N$  o número de canais;

$x_i$  representa a parcela  $i$  do indivíduo  $X$ . Refere-se ao período de sensoriamento do canal  $i$ ;

$Ov(x)$  é o *overhead* de sensoriamento proporcionado pelo indivíduo  $X$ ;

$Op(x)$  refere-se ao número de oportunidades encontradas utilizando o indivíduo  $x$ ;

$S_i(x_i h)$  representa o estado do canal  $i$ , 1 ou 0, no instante  $x_i h$ , com  $h$  variando de 1 a  $M$ , sendo  $M$  o número total de amostras do canal  $i$  com período de sensoriamento  $x_i$ ;

$t_s$  é o tempo de sensoriamento.

Durante o processo de avaliação, para definir o valor de *fitness* de cada indivíduo  $X_q$ , o número de indivíduos dominados por  $X_q$  na população é calculado por  $DN(X_q)$ , conforme a Equação (16), onde  $q, r \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$  e  $L$  é o tamanho da população (considerando o símbolo  $\cong$  com significado de não dominância).

$$DN(X_q) = \sum_{r=1, r \neq q}^L \begin{cases} 1, & X_q \cong X_r \\ 0, & X_q \not\cong X_r \end{cases} \quad (16)$$

Além disso, é avaliado se o indivíduo possui *overhead* de sensoriamento, menor ou igual a um limiar definido pelo usuário ( $Th_{ov}$ ), conforme a Equação (17). Onde  $\delta_{ov}(X_q)$  é igual a zero se  $X_q$  tem *overhead* de sensoriamento maior do que  $Th_{ov}$ , caso contrário é igual a um

$$\delta_{ov}(X_q) = \begin{cases} 1, & Ov(X_q) \leq Th_{ov} \\ 0, & Ov(X_q) > Th_{ov} \end{cases} \quad (17)$$

Deste modo, o valor de *fitness* de cada  $X_q$  é dado pela Equação 18, onde o *fitness* consiste na soma de (16) e (17). Portanto, antes do cálculo do valor de *fitness* de um indivíduo, é necessário descobrir o número de oportunidades e *overhead* de sensoriamento para todos os membros da geração.

$$fitness(X_q) = \delta_{ov}(X_q) + DN(X_q) \quad (18)$$

Assim, o problema de otimização do período de sensoriamento do espectro pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} & \underset{X \in \{X_1, X_2, \dots, X_L\}}{\text{Max fitness}(X)} \\ & \text{sujeito a } \begin{cases} x_i > 0, x_i \in X, i = 1, 2, 3, \dots, N \\ Ov(X) \leq Th_{ov} \end{cases} \end{aligned}$$

O número de oportunidades, *overhead* de sensoriamento e *fitness* serão considerados métricas de desempenho do AG e serão avaliadas no capítulo 5.

## 4.5 METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Antes de se apresentar o processo de seleção dos parâmetros a serem adotados no AG, descrito nas Seções 4.3 e 4.4, bem como os resultados obtidos na avaliação da abordagem proposta, torna-se importante definir a metodologia a ser empregada na apresentação e definição dos resultados obtidos.

Neste aspecto, os resultados apresentados nesta dissertação são definidos em termos de intervalos de confiança, os quais são obtidos através de inferências das estatísticas das amostras tomadas. Neste trabalho, para que os resultados apresentados possuam bom nível de confiança, todos os resultados apresentados utilizam intervalo de confiança de 95%, valor mais utilizado segundo Jain (1991).

Para a definição dos intervalos de confiança, utilizando um nível de 95%, adotou-se o método não-paramétrico *bootstrap*. Este método permite a definição de intervalos de confiança de parâmetros (EFRON, 1993), em circunstâncias em que outras técnicas não são aplicáveis ou no caso em que o número de amostras é reduzido, por exemplo.

O intervalo com nível de significância  $\alpha$  obtida pelo *bootstrap* pode ser calculado conforme o algoritmo abaixo.

1. Selecionar uma amostra aleatória de tamanho  $A$ ;
  2. Selecionar uma amostra da amostra (re-amostra) de tamanho  $A$  com reposição;
  3. Calcular a média desta re-amostra e inserir no vetor  $X$ ;
  4. Repetir os passos de 2 e 3  $M$  vezes; (com  $M$  grande)
  5. Classificar  $X$  em ordem crescente das médias.
  6. Em função do nível de confiança desejado  $(1 - \alpha)100\%$ , o intervalo de confiança é determinado por  $(X_{q_1}, X_{q_2})$ .
- Onde:

$$q_1 = \text{parte inteira } (M \times \alpha / 2) , q_2 = M - q_1 + 1 \text{ e } X = [X_1, X_2, \dots, X_M]$$

Nesta proposta, utilizou-se essa abordagem devido ao alto período de processamento do AG, que inviabiliza a tomada de um número elevado de amostras. Assim, os valores configurados para  $A$  e  $B$  foram 6 e 1000, respectivamente. Para que o intervalo de confiança seja de 95% o valor de  $\alpha$  é 0,05.

## 4.6 OPERADORES GENÉTICOS

O operador de seleção do AG, em que os indivíduos são selecionados para realizar o cruzamento, objetiva simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que pais mais capazes são mais prováveis de gerar filhos do que pais menos aptos (Linden, 2008). Diante disso, nesta abordagem adotou-se como operador de seleção para o AG a roleta ponderada, a qual é baseada no valor de *fitness* dos indivíduos. Assim, indivíduos com maiores valores de aptidão são mais prováveis a deixar descendentes e, assim, transferir seu material genético para gerações seguintes do que indivíduos que possuem baixos valores de *fitness*.

Como operador de cruzamento ou *crossover*, que realiza a troca de material genético entre os indivíduos definidos pelo processo de seleção, adotou-se neste trabalho o operador uniforme para realizar o cruzamento entre pares de indivíduos.

Quanto à operação de mutação, que visa introduzir genes alternativos ao cromossomo, adotou-se nesta proposta a mutação simples, de um bit. Neste processo, o valor de um gene (bit) em um cromossomo é trocado seguindo a idéia:

caso o gene selecionado para a mutação possua valor 1, o seu valor após a mutação será 0 e vice-versa.

Os parâmetros importantes para as operações de *crossover* e mutação são as taxas de *crossover* ou probabilidade de *crossover* (pc) e a taxa de mutação ou probabilidade de mutação (pm). Esses parâmetros representam a frequência com que os processos de *crossover* e mutação são realizados.

A definição de tais parâmetros é um processo importante na configuração do algoritmo genético, pois, por exemplo, a adoção de probabilidade de mutação elevada pode resultar em perda de boas soluções durante o processo evolutivo do AG, devido à grande possibilidade de tais soluções serem modificadas, especialmente quando não se utiliza técnica elitista. No entanto, uma taxa de mutação muito pequena, para uma população grande, pode causar a falta de diversidade de soluções e convergência prematura do AG.

Quanto ao *crossover*, como a taxa de cruzamento determina o número de cromossomos que entra num *pool* de “acasalamento”, adotando uma taxa de cruzamento muito baixa ocasionaria um número insuficiente de novos filhos, soluções. Por outro lado, uma taxa de *crossover* alta inseriria muitos cromossomos novos na população, o que pode resultar na perda de bons blocos dentro de um cromossomo, destruição de bons esquemas (Linden, 2008).

Além destes, existem outros parâmetros de operações que afetam a eficiência do sistema baseado em AG. Em Rudolph (1994) é estudada a variação de vários parâmetros do AG, que incluem tamanho da população, taxa de *crossover*, taxa de mutação e estratégia de seleção.

Nesta proposta, são realizados testes para definir os valores dos dois parâmetros mais importantes citados acima: probabilidade de *crossover* e probabilidade de mutação. Pois, a melhor combinação destas probabilidades pode resultar em respostas satisfatórias com uma rápida convergência ao AG.

Para composição dos testes foram utilizados 10 valores, situados no intervalo [0.01, 0.95], para probabilidade de mutação. O mesmo número de valores foi adotado para a probabilidade *crossover* para valores definidos no intervalo [0.01, 0.95]. Tais valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros testados de pc e pm.

pc	pm
0.05	0.01
0.1	0.0325
0.2	0.055
0.3	0.0775
0.4	0.1
0.5	0.3
0.6	0.5
0.7	0.7
0.8	0.9
0.9	0.95

Realizando o número de combinações possíveis entre os valores de probabilidade de mutação e probabilidade *crossover* definidos, tem-se 100 casos de testes, os quais são apresentados na Tabela 3.

Para a seleção do melhor caso de teste utilizou-se o critério definido em (21). Neste critério o caso de teste escolhido é o que resulta no maior valor médio do intervalo de confiança das médias de todos os *fitness* dos indivíduos. Este critério busca selecionar os parâmetros do AG que proporcionem maiores médias de *fitness* das populações.

$$m = [m_1, m_2, \dots, m_G] \quad (19)$$

$$\mu = \text{media}(m) \quad (20)$$

$$\max(\mu) \quad (21)$$

Onde  $G$ , na Equação (19), é o número de gerações, o  $m$  representa o vetor das médias dos *fitness* dos indivíduos de cada geração. O valor de  $\mu$  em (20) representa a média do vetor  $m$ . E o critério para a escolha do caso de teste é o que proporciona maior valor de  $\mu$ , conforme denotado em (21).

A Tabela 4 apresenta os valores de probabilidade de *crossover*, probabilidade de mutação, o intervalo de confiança (IC), descrito na seção 4.5, e o valor médio do intervalo de confiança (IC). O caso de teste 5 foi selecionado conforme o critério exposto anteriormente para sintonização das probabilidades do AG adotado na proposta, permanecendo esses valores fixos durante toda a execução do AG. Os

outros parâmetros de sintonização do AG adotados, tanto nos casos de testes, quanto na avaliação geral da proposta apresentada no Capítulo 5, são sumarizados na Tabela 5, da Seção 4.7.

Tabela 4 – Casos de Teste

<b>Caso de teste</b>	<b>pc</b>	<b>pm</b>	<b>IC</b>		<b>MI</b>
1	0.05	0.01	271097.4961	275313.6338	273205.5649
2	0.05	0.0325	264735.6437	271136.8529	267936.2483
3	0.05	0.055	255089.7859	264211.3272	259650.5566
4	0.05	0.0775	246710.6718	254485.9151	250598.2934
5	0.1	0.01	319111.4823	329707.9687	324409.7255
6	0.1	0.0325	314755.1715	325784.6720	320269.9217
7	0.1	0.055	300999.0917	314285.7050	307642.3983
8	0.1	0.0775	288257.8851	300344.5973	294301.2412
9	0.2	0.01	282481.7214	287713.0242	285097.3728
10	0.2	0.0325	278803.6164	282307.3046	280555.4605
11	0.2	0.055	275276.1498	278636.0143	276956.0820
12	0.2	0.0775	271132.2661	275046.5564	273089.4112
13	0.3	0.01	269981.3885	271031.6203	270506.5044
14	0.3	0.0325	269032.8117	269952.2835	269492.5476
15	0.3	0.055	268044.9669	269026.0595	268535.5132
16	0.3	0.0775	266381.2581	267987.5937	267184.4259
17	0.4	0.01	265880.6449	266352.7698	266116.7073
18	0.4	0.0325	265303.7330	265824.9641	265564.3486
19	0.4	0.055	264617.1816	265258.2931	264937.7373
20	0.4	0.0775	263685.2486	264577.0369	264131.1427
21	0.5	0.01	263115.5806	263633.8164	263374.6985
22	0.5	0.0325	262783.2194	263092.3812	262937.8003
23	0.5	0.055	262199.1361	262746.5800	262472.8581
24	0.5	0.0775	261457.6354	262169.1267	261813.3810
25	0.6	0.01	261179.6350	261451.7927	261315.7138
26	0.6	0.0325	260848.2881	261170.0579	261009.1730
27	0.6	0.055	260502.9072	260833.0550	260667.9811
28	0.6	0.0775	259956.5854	260470.0291	260213.3073
29	0.7	0.01	259721.0630	259943.4917	259832.2773
30	0.7	0.0325	259567.3670	259700.5694	259633.9682
31	0.7	0.055	259253.5784	259558.0539	259405.8162
32	0.7	0.0775	258863.5960	259227.8733	259045.7346
33	0.8	0.01	258563.8116	258849.5897	258706.7007
34	0.8	0.0325	258363.3836	258552.9664	258458.1750
35	0.8	0.055	258117.7495	258355.1786	258236.4641
36	0.8	0.0775	257807.8624	258109.4016	257958.6320
37	0.9	0.01	257535.7937	257794.9399	257665.3668
38	0.9	0.0325	257321.4152	257516.1221	257418.7686
39	0.9	0.055	257103.3555	257304.3329	257203.8442
40	0.9	0.0775	256823.7820	257093.8140	256958.7980
41	0.05	0.1	157418.4948	157680.5142	157549.5045
42	0.05	0.3	147804.9139	157202.2329	152503.5734
43	0.05	0.5	142399.7242	147417.1823	144908.4533
44	0.05	0.7	139163.0919	142199.5360	140681.3140
45	0.05	0.9	137738.0679	139069.4180	138403.7430
46	0.1	0.1	152109.5208	152562.3222	152335.9215
47	0.1	0.3	143666.7407	151653.5701	147660.1554
48	0.1	0.5	138791.7452	143379.4124	141085.5788
49	0.1	0.7	135992.4488	138613.7742	137303.1115
50	0.1	0.9	134781.6794	135904.8171	135343.2482
51	0.2	0.1	134594.9953	134758.5062	134676.7508

52	0.2	0.3	134127.9785	134586.1498	134357.0641
53	0.2	0.5	133619.7712	134103.9422	133861.8567
54	0.2	0.7	133130.0829	133600.3175	133365.2002
55	0.2	0.9	132765.1349	133112.2605	132938.6977
56	0.3	0.1	132641.8413	132750.9162	132696.3787
57	0.3	0.3	132414.8638	132631.7214	132523.2926
58	0.3	0.5	132187.0945	132405.2057	132296.1501
59	0.3	0.7	131954.6923	132176.7935	132065.7429
60	0.3	0.9	131782.7986	131942.9363	131862.8674
61	0.4	0.1	131661.4807	131775.4647	131718.4727
62	0.4	0.3	131485.3469	131651.2389	131568.2929
63	0.4	0.5	131325.6319	131478.7640	131402.1980
64	0.4	0.7	131166.6098	131313.8646	131240.2372
65	0.4	0.9	131016.8088	131162.1160	131089.4624
66	0.5	0.1	130906.5349	131013.6322	130960.0835
67	0.5	0.3	130774.4808	130900.5263	130837.5035
68	0.5	0.5	130654.3677	130769.2640	130711.8159
69	0.5	0.7	130531.7923	130646.9076	130589.3499
70	0.5	0.9	130429.8346	130524.8487	130477.3417
71	0.6	0.1	130326.7838	130421.3243	130374.0540
72	0.6	0.3	130215.7563	130322.7186	130269.2374
73	0.6	0.5	130110.1721	130211.7122	130160.9422
74	0.6	0.7	129991.3748	130104.3714	130047.8731
75	0.6	0.9	129898.5937	129986.3306	129942.4622
76	0.7	0.1	129819.4315	129893.5996	129856.5156
77	0.7	0.3	129738.1795	129816.6734	129777.4265
78	0.7	0.5	129658.9657	129734.5131	129696.7394
79	0.7	0.7	129581.5736	129654.5819	129618.0778
80	0.7	0.9	129507.2069	129578.3900	129542.7984
81	0.8	0.1	129462.1584	129502.8003	129482.4794
82	0.8	0.3	129413.2613	129459.2378	129436.2496
83	0.8	0.5	129346.5092	129410.0176	129378.2634
84	0.8	0.7	129282.8088	129344.2718	129313.5403
85	0.8	0.9	129229.8290	129279.0623	129254.4456
86	0.9	0.1	129201.5808	129227.8264	129214.7036
87	0.9	0.3	129163.7822	129200.7764	129182.2793
88	0.9	0.5	129121.9014	129161.3866	129141.6440
89	0.9	0.7	129083.3889	129120.7529	129102.0709
90	0.9	0.9	129056.5168	129083.0094	129069.7631
91	0.1	0.95	151749.5191	152023.1877	151886.3534
92	0.2	0.95	149351.2470	151756.7692	150554.0081
93	0.3	0.95	147510.8292	149252.1771	148381.5031
94	0.4	0.95	146029.7631	147436.8227	146733.2929
95	0.5	0.95	144844.8158	145969.0961	145406.9559
96	0.6	0.95	143892.2663	144793.9882	144343.1272
97	0.7	0.95	143166.1460	143852.6961	143509.4210
98	0.8	0.95	142700.2357	143136.6663	142918.4510
99	0.9	0.95	142484.4423	142680.2884	142582.3653
100	0.05	0.95	158793.4105	159171.5760	158982.4933

A Figura 21 ilustra os valores da média do intervalo de confiança da média dos *fitness*. O caso de teste selecionado foi o de número 5, que alcançou o maior valor no gráfico apresentado na Figura 21.

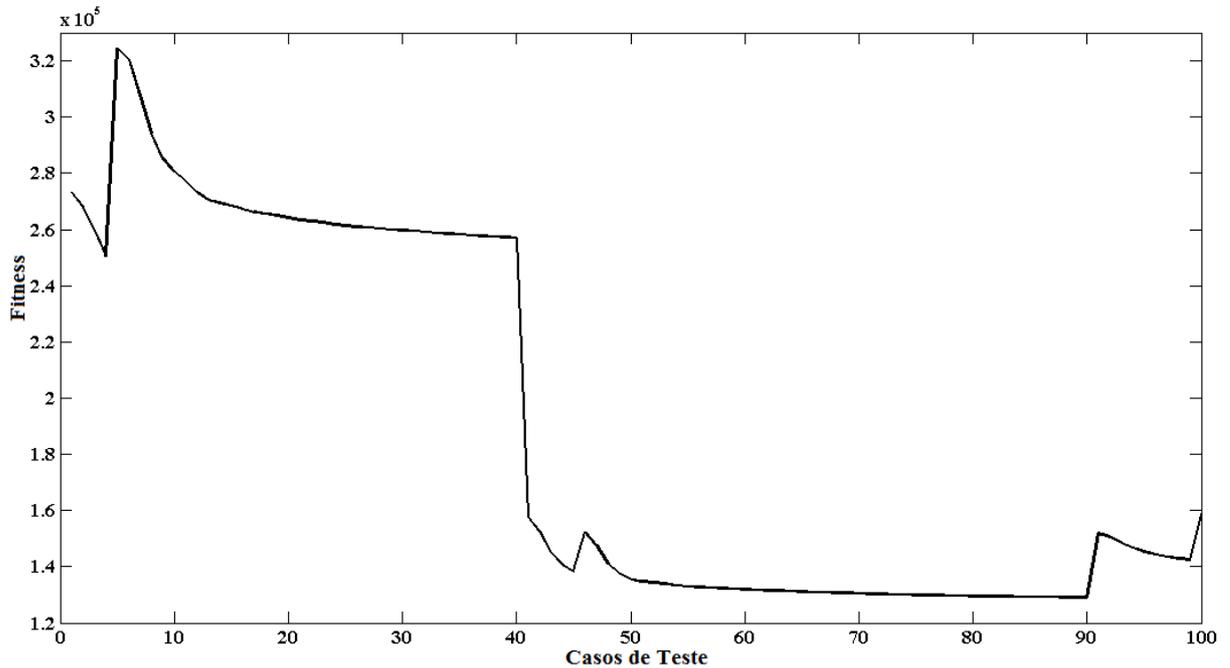


Figura 22: Média do intervalo de confiança da média dos fitness.

#### 4.7 FLUXO DA PROPOSTA E PARÂMETROS ADOTADOS

A Figura 22 mostra o fluxograma de utilização do AG no problema de otimização do período de sensoriamento dos canais de comunicação. Inicialmente, a população é gerada aleatoriamente, apresentando diversos conjuntos de períodos de sensoriamento candidatos a solução do problema. Em seguida, tais conjuntos são utilizados na realização do sensoriamento dos canais. Após o sensoriamento, os indivíduos são avaliados de acordo com a função de *fitness* definida na Equação (18), que leva em conta o número de oportunidades encontradas e o *overhead* de sensoriamento obtido. Posteriormente, eles são submetidos aos operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, dando origem aos indivíduos que irão compor a nova população. Com a nova população, o critério de parada (número de gerações) é avaliado. Caso o número de gerações atual seja menor que o definido previamente, então o processo se repete a partir da etapa do sensoriamento dos canais. Caso contrário, os indivíduos da nova população são submetidos ao

sensoriamento dos canais e avaliados, onde o melhor dentre todos é escolhido como solução para o problema, representando o conjunto de períodos de sensoriamento ótimo para os canais.

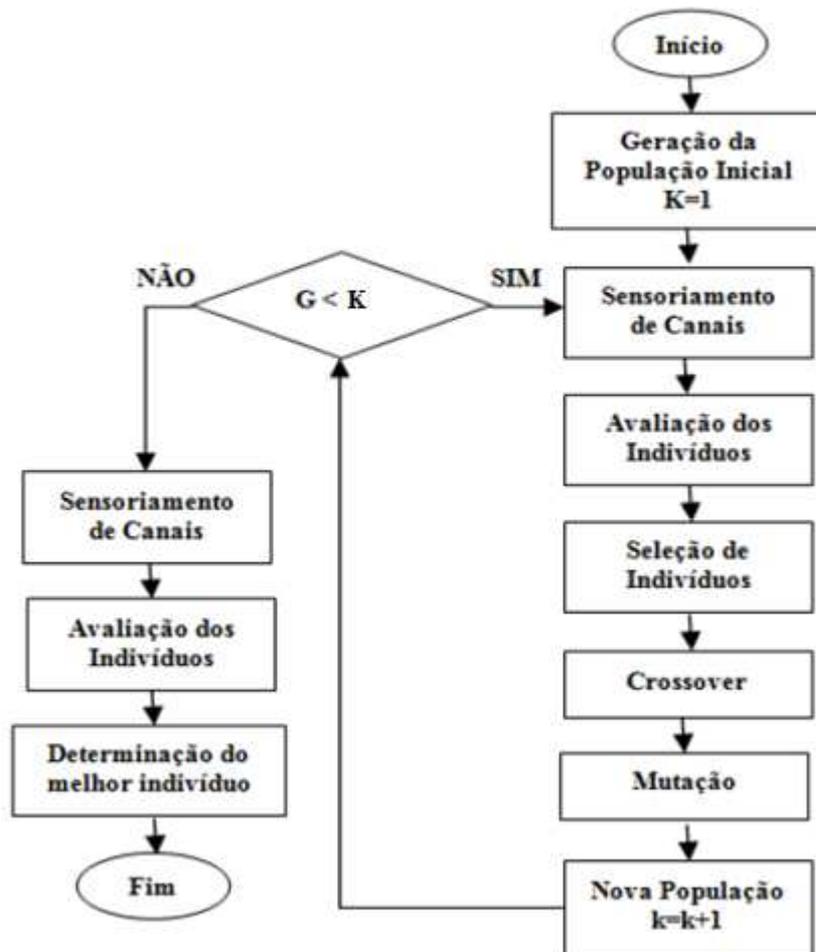


Figura 23: Fluxograma da utilização do AG

Após o AG definir o período de sensoriamento de cada canal, simula-se o sensoriamento através das amostras dos canais modelados na distribuição exponencial. Com isso, determina-se o número de oportunidades encontradas e o *overhead* de sensoriamento obtido em cada canal. Nesta trabalho, os períodos de sensoriamento podem variar no intervalo de (0, 10] segundos, conforme Kim (2008).

A Tabela 4 sumariza os parâmetros que foram adotados neste trabalho para a implementação do AG. Esses parâmetros foram definidos a partir de testes com diversos valores, sendo escolhidos os que tiveram melhores resultados nas simulações, conforme apresentado na Seção 4.3. Quanto à resolução (R) adotada

na representação dos indivíduos, adotou-se 10 casas decimais. Com isso, cada parcela de um indivíduo, período de sensoriamento de um canal, é codificada utilizando 75 bits, valor definido de acordo com a Equação (11). Além disso, assim como em (Chantaraskul, 2010), o número de gerações e o tamanho adotados foram 300 e 100, respectivamente.

Tabela 5 – Parâmetros adotados no AG

Número de Gerações (G)	300
Tamanho da População (T)	100
Taxa de crossover	0.6
Taxa de mutação	0.001
Resolução (R)	10
Número de Bits	75

## 5 AVALIAÇÃO PROPOSTA

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos pela estrutura de otimização do período de sensoriamento que utiliza a estratégia AG, considerando os parâmetros e características descritos no Capítulo 4.

Através das simulações numéricas, examina-se o impacto da seleção do período de sensoriamento sobre canais gerados com distribuição exponencial. Para mostrar a generalidade da proposta, adotamos três instâncias de simulação, que diferem no número de canais, as quais são apresentadas na Seção 5.2 (Seção do Cenário). Compara-se esta proposta com o método que utiliza período de sensoriamento fixo e igual para todos os canais, o qual é adotado em Yang (2007), e com o método adaptativo do período de sensoriamento proposto em Kim (2008), que utiliza uma técnica de otimização não-linear para encontrar os valores ótimos de período de sensoriamento. A descrição das métricas utilizadas e a sumarização das abordagens consideradas na avaliação são apresentadas nas Seções 5.1 e 5.2, respectivamente.

### 5.1 MÉTRICAS ADOTADAS

Para avaliação da abordagem proposta foram adotadas 4 métricas: *overhead* de sensoriamento, número de oportunidades encontradas, tempo de interferência e tempo de transmissão útil.

O *overhead* de sensoriamento é adotado como métrica de desempenho devido ao seu impacto na eficiência espectral. Isto porque não é desejável que o rádio passe muito tempo sentindo o canal primário, pois isso reduz o tempo que ele poderia usar para transmissão. O *overhead* de sensoriamento é calculado de acordo com a Equação (14), na Seção 4.2.

A métrica de número de oportunidades encontradas está relacionada à eficiência do sistema, pois para transmissão secundária, em RC, é desejável ter um grande número de oportunidades encontradas. A determinação do número de oportunidades é descrito na Equação (15), na Seção 4.2.

O tempo de interferência é outra métrica muito importante para RC, pois o US deve minimizar a interferência na comunicação primária durante a utilização do canal licenciado.

A interferência na comunicação primária ocorre devido à latência ou a não detecção do retorno do usuário primário ao seu canal de comunicação. Em geral, de acordo com o tamanho do período de sensoriamento, duas situações de interferências são possíveis. A primeira delas ocorre na transição do período OFF para ON consecutivo, em que o sensoriamento do canal ocorre somente instantes após o retorno do usuário primário, devido ao período de sensoriamento adotado, conforme ilustrado na Figura 24.

Na Figura 24, o US realiza o sensoriamento (no tempo  $T_1$ ) do canal e detecta a sua desocupação. Com isso ele inicia a sua transmissão adotando este canal e após o tempo determinado pelo período de sensoriamento, o US novamente sente o canal de comunicação (em  $T_2$ ), detectando o retorno do UP e com isso interrompe a sua transmissão, vagando o canal primário. No entanto, houve um tempo entre a transição OFF-ON ( $T_{ON1}$ ) do estado do canal e o segundo sensoriamento ( $T_2$ ), que ocasionou interferência na comunicação primária. Para esse caso, o tempo de interferência é dado pela Equação 22.

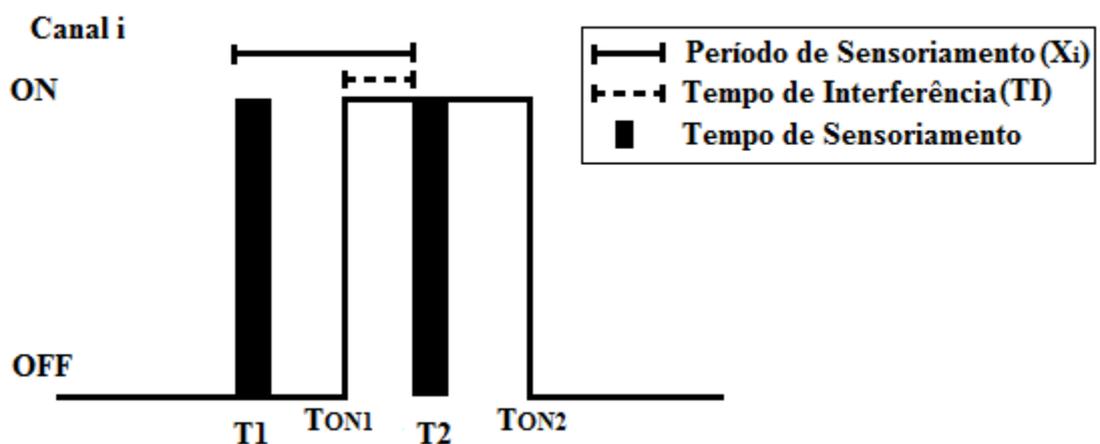


Figura 24: Primeiro caso de Interferência.

$$TI = T_2 - T_{ON1} \quad (22)$$

A segunda situação de interferência é apresentada na Figura 25. Nesta situação, o tempo de duração do estado ON do canal é menor do que o período de sensoriamento adotado. Com isso, o RC não percebe a interferência que ocasionou ao usuário primário. Para esse caso, o tempo de interferência é dado pela Equação 23.

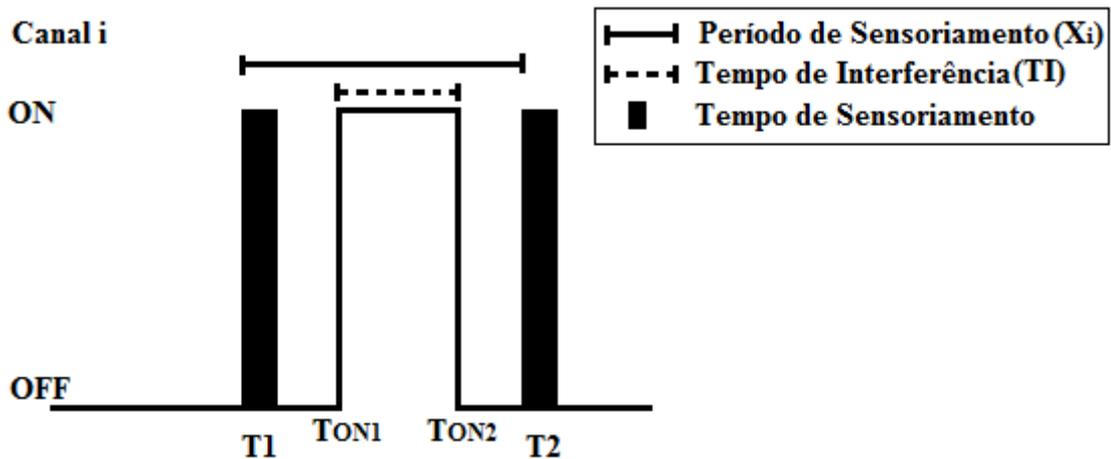


Figura 25: Segundo caso de interferência.

$$TI = T_{ON2} - T_{ON1} \quad (23)$$

Outra importante métrica analisada é o tempo de transmissão útil. Para sua determinação, faz-se necessário conhecer o tempo de transmissão, representado pela Figura 26. O tempo de transmissão calculado no canal em todo tempo de execução é dado pela Equação 24 descreve toda a transmissão obtida de um canal.

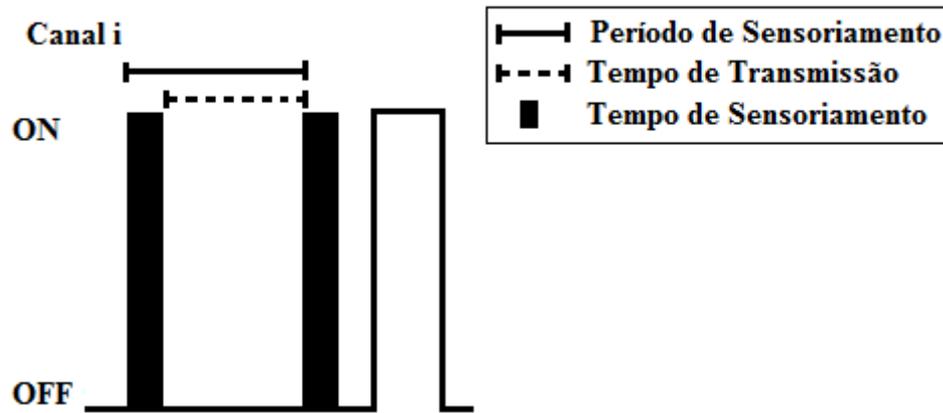


Figura 26: Tempo de transmissão

$$TT = Op(x_i) \times x_i \quad (24)$$

Onde:

$TT$ : tempo de transmissão

$Op(x_i)$  : quantidade de oportunidades encontradas

$x_i$  : período de sensoramento

Como no tempo de transmissão total está incluso o tempo de interferência, para se determinar o tempo de transmissão útil deve-se excluir o tempo relativo a interferência. Com isso, o tempo de transmissão útil é dado pela Equação 25.

$$TU = TT - TI \quad (25)$$

Onde:

$TU$ : transmissão útil

$TT$ : tempo de transmissão

$TI$ : tempo de interferência

Além das quatro métricas apresentadas, adotou-se o valor fitness para avaliar a convergência do sistema, bem como a evolução do período de sensoramento durante o processo evolutivo do AG. O valor de fitness de cada indivíduo está relacionado à avaliação do indivíduo no ambiente do sistema e é dado pela Equação (18) da Seção 4.2. Assim, indivíduos com maiores valores *fitness* têm melhores

resultados. Logo, isto é a importante métrica para se avaliar se o sistema esta convergindo para respostas satisfatórias.

## 5.2 CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO

Para mostrar a generalidade da proposta, foram adotadas três instâncias de simulação, que diferem quanto ao número de canais, as quais apresentam três, seis e nove canais. A Tabela 6 mostra as características de cada instância de simulação adotadas.

Tabela 6 – Quantidade de canais em cada instância

Instância	Nº de canais
1	3
2	6
3	9

Para modelar os canais de comunicação primário utilizou-se o modelo ON/OFF descrito na Seção 4.1. As médias utilizadas para gerar os canais utilizados na simulação são apresentadas na Tabela 7. O tempo de simulação de cada canal adotado foi de 100s.

Tabela 7 – Médias utilizadas para gerar canais

Médias dos canais	$E[T_{OFF}^i]$	$E[T_{ON}^i]$
Canal1	2,611	1,779
Canal2	4,947	0,791
Canal3	2,405	3,122
Canal4	0,931	1,046
Canal5	1,962	0,942
Canal6	0,238	3,224
Canal7	1,035	2,113
Canal8	3,486	2,663
Canal9	2,623	1,805

Para realizar a comparação com o mecanismo que utiliza períodos de sensoriamento fixos e o apresentado em Kim (2008), foram desenvolvidas três versões da estratégia proposta que utiliza algoritmo genético para adaptação do período de sensoriamento, as quais diferem entre si quanto ao limite superior de *overhead* de sensoriamento tolerável nos canais. Estas são denotadas como AG10, G20 e AG40. Nelas, o AG busca encontrar um conjunto de períodos de sensoriamento que maximize o número oportunidades encontradas, proporcionando

um *overhead* de sensoriamento menor ou igual a 10%, 20% e 40%, respectivamente. O objetivo é comparar cada uma dessas versões do AG com estratégia definida em Kim (2008), que será denotada como Kim (nome do autor daquela estratégia) e com as abordagens de períodos de sensoriamento fixo, denotadas como Fixo1 e Fixo2, que adotam períodos de sensoriamento iguais a 0,5s e 1,0s, respectivamente. A Tabela 8 sumariza as diferentes abordagens adotadas na simulação.

Tabela 8 – Sumário das abordagens

<b>Abordagem</b>	<b>Descrição</b>
Fixo1	Abordagem com período de sensoriamento fixo em todos os canais (1.0s)
Fixo2	Abordagem com período de sensoriamento fixo em todos os canais (0.5s)
Kim	Abordagem descrita em Kim (2008)
AG10	Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 10%
AG20	Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 20%
AG40	Abordagem que realiza o sensoriamento com <i>overhead</i> de sensoriamento limitado a 40%

A Tabela 9 sumariza alguns componentes e características da abordagem proposta de acordo com os capítulos anteriores. Um aspecto interessante apresentado nesta tabela é a divisão, não disjunta, das métricas e critérios adotados na avaliação da abordagem: intra-proposta e inter-propostas. A primeira refere-se à avaliação entre si das versões adotadas da abordagem proposta. Já a segunda denota as métricas consideradas na avaliação comparativa das versões baseadas em AG com outras estratégias dispostas na literatura.

Tabela 9 – Características da abordagem proposta

<b>Método de sensoriamento</b>	detector de energia
<b>Arquitetura do Hardware</b>	uma antena
<b>Dimensão utilizada</b>	Domínio do tempo
<b>Classificação</b>	Pró-ativa
<b>Tipo Sensoriamento</b>	Não-cooperativo
<b>Objetivo</b>	Otimizar o período de sensoriamento
<b>Estratégia</b>	AG multiobjetivo
	<i>Fitness</i>
<b>Métricas de avaliação intra-proposta</b>	<i>Período de Sensoriamento</i>
	<i>Overhead</i> de sensoriamento
	Número de Oportunidades
<b>Métricas de avaliação inter-propostas</b>	Tempo de Interferência
	Tempo de Transmissão Útil

## 5.3 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no processo de simulação da abordagem proposta. Inicialmente, na Seção 5.2.1 são mostrados os resultados obtidos quanto aos valores de *fitness* dos indivíduos, período de sensoriamento e overhead de sensoriamento, respectivamente, durante o processo de evolução do AG, ou seja, os resultados obtidos quanto às métricas e critério de avaliação intra-proposta apresentados na Tabela 8. Tal estudo é realizado a fim de denotar o processo de convergência das versões da abordagem proposta, descrita na Seção 5.1. Com isso, nestas três seções seguintes a avaliação é restrita a estas três versões, não havendo comparação com as outras abordagens da literatura considerada nesta dissertação, descritas na Seção 5.1. Já na Seção 5.3 os resultados obtidos adotando as métricas de avaliação inter-propostas definidos na Tabela 8 são apresentados. Uma análise comparativa entre a abordagem proposta e as dispostas na literatura apresentada na Tabela 7.

### 5.3.1 Avaliação intra-proposta

Quanto ao *fitness*, a Figura 27 exibe a evolução média do *fitness* do melhor indivíduo com o passar das gerações para a abordagem AG10, AG20 e AG40, utilizando a instância de simulação de 3 canais. Todas demonstram a tendência do melhor indivíduo de uma geração em evoluir seu *fitness* com o decorrer das gerações e, conseqüentemente, encontrar períodos de sensoriamento melhores que proporcionem ao US um maior número de oportunidades descobertas e a garantia de não ultrapassar a taxa de *overhead* de sensoriamento estipulada.

Em cada instância de simulação, conforme descrito na Seção 4.5, foram realizadas 6 repetições, com sementes distintas na geração dos canais, mas mantendo as mesmas médias apresentadas na Tabela 6, Seção 5.1.

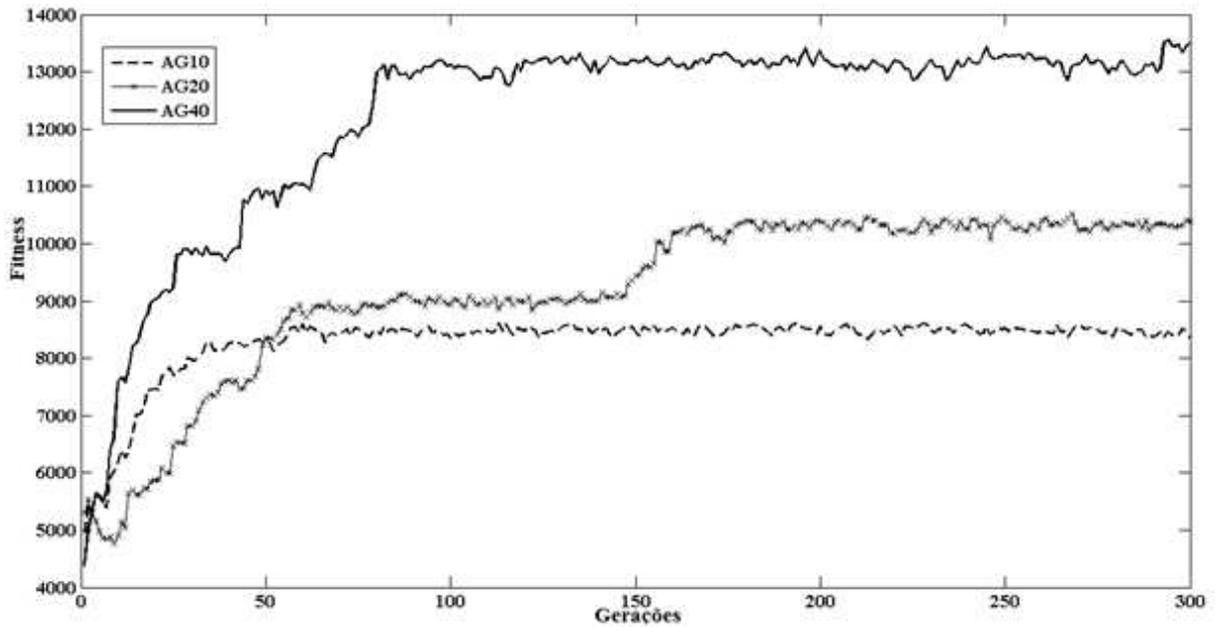


Figura 27: Fitness de AG10, AG20 e AG40 3 canais.

A média dos melhores *fitness*, para as instâncias de simulação com 6 e 9 canais, ilustradas nas Figuras 28 e 29, apresentaram comportamento semelhante à de 3 canais, ilustrada na Figura 27. Portanto, seus valores de *fitness* também evoluem, encontrando valores de *fitness* melhores conforme o número de gerações aumenta.

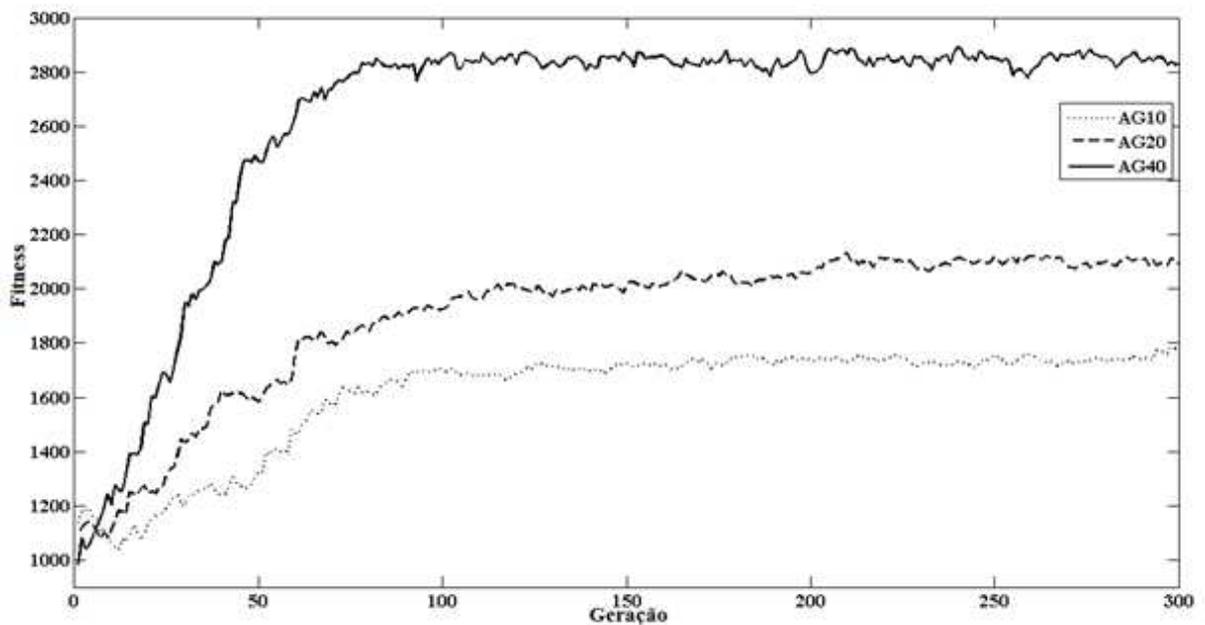


Figura 28: Fitness de AG10, AG20 e AG40 para 6 canais.

As Figuras 27, 28 e 29 mostram um crescente aumento nos valores de *fitness*, isso é devido à maior quantidade de canais utilizada para o cálculo do *fitness*, descrito na Seção 4.3.

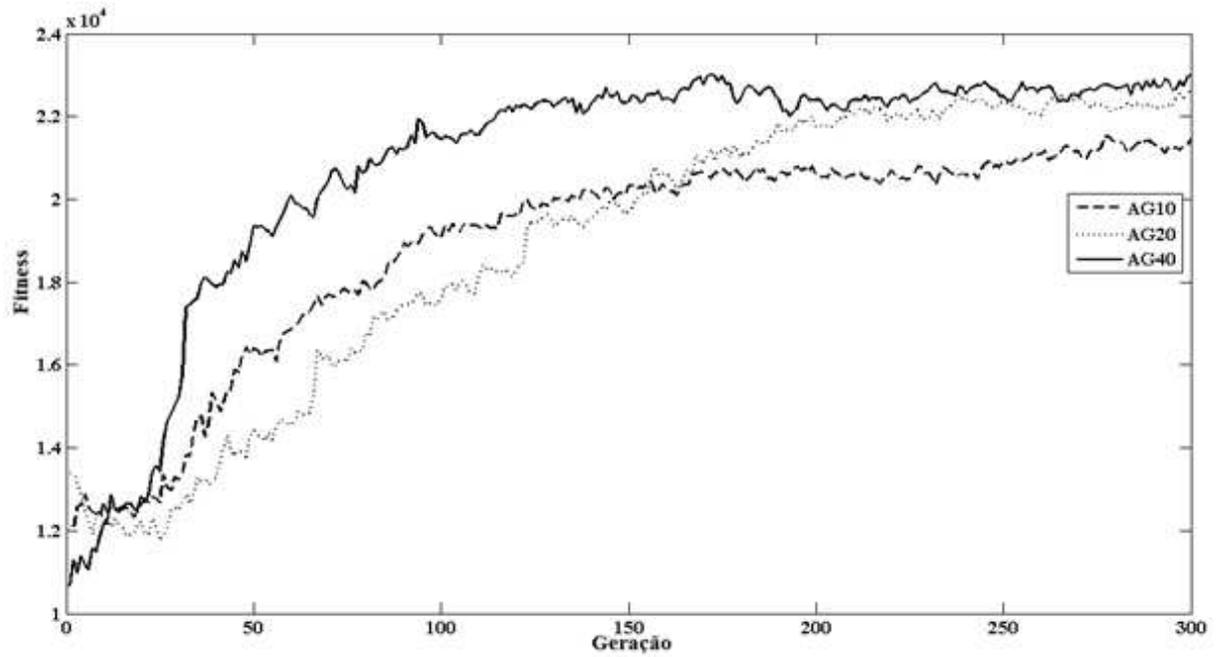


Figura 29: Fitness de AG10, AG20 e AG40 para 9 canais.

Considerando o período de sensoriamento, a Figura 30 ilustra a evolução do período de sensoriamento do canal 1 com o passar das gerações para as três versões da abordagem proposta. Nota-se que a proposta apresenta rápida convergência e que cada versão altera o período de sensoriamento em busca de um valor ótimo de acordo com o padrão de uso do canal licenciado e com o *overhead* de sensoriamento previamente definido. Observa-se quanto maior o *overhead* de sensoriamento, menor o período de sensoriamento. Isso porque, para sentir o canal mais vezes é necessário diminuir o tempo de sensoriamento. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do período de sensoriamento.

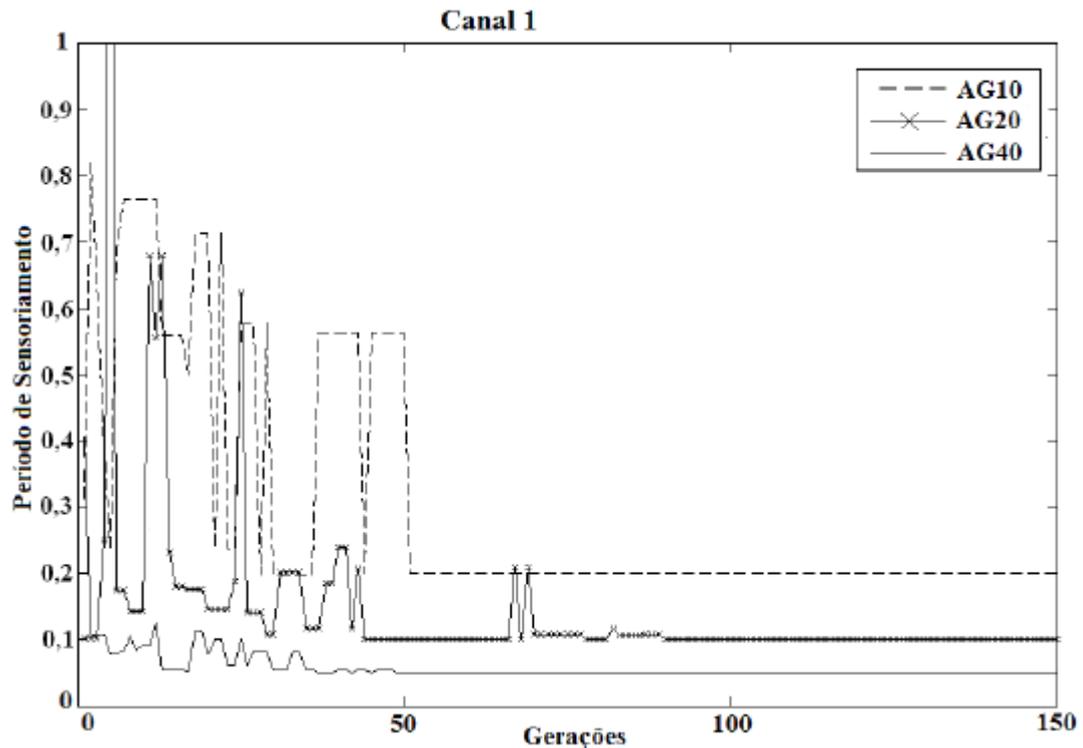


Figura 30: Evolução do período de sensoriamento.

As Tabelas 10, 11 e 12 exibem o intervalo de confiança do período de sensoriamento para as abordagens deste trabalho e para instâncias de 3, 6 e 9 canais, respectivamente. Os valores do intervalo de confiança calculados conforme descrito na Seção 4.5, onde min e max representam, respectivamente, os valores mínimo e máximo do intervalo de confiança e MIC representa a média do intervalo de confiança.

Tabela 10 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 3 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	0,2167	0,2180	0,2173
	AG20	0,1132	0,1138	0,1135
	AG40	0,0526	0,0529	0,0527
C2	AG10	0,2099	0,2125	0,2112
	AG20	0,1115	0,1132	0,1124
	AG40	0,0544	0,0547	0,0545
C3	AG10	0,2157	0,2181	0,2169
	AG20	0,1259	0,1259	0,1259
	AG40	0,0606	0,0613	0,0610

No canal 1, o AG20 obteve uma diminuição de 91,45% em relação ao AG10 e o AG40 obteve uma diminuição de 53,5% em relação ao AG20. Note que a diminuição do MIC para AG10, AG20 AG40, respectivamente, ocorre para todos os

canais. Este comportamento comprova o que foi ilustrado na Figura 30, que quanto maior o *overhead* de sensoriamento, menor o período de sensoriamento. Este comportamento ocorre para todos os canais e também nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 6 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	0,2257	0,2286	0,2272
	AG20	0,1194	0,1200	0,1197
	AG40	0,0636	0,0636	0,0636
C2	AG10	0,2181	0,2193	0,2187
	AG20	0,1339	0,1410	0,1374
	AG40	0,0565	0,0575	0,0570
C3	AG10	0,2296	0,2324	0,2310
	AG20	0,1188	0,1196	0,1192
	AG40	0,0799	0,0824	0,0812
C4	AG10	0,3093	0,3229	0,3161
	AG20	0,1143	0,1154	0,1148
	AG40	0,0638	0,0659	0,0648
C5	AG10	0,2267	0,2284	0,2275
	AG20	0,1131	0,1140	0,1136
	AG40	0,0568	0,0574	0,0571
C6	AG10	0,2222	0,2242	0,2232
	AG20	0,1372	0,1408	0,1390
	AG40	0,0806	0,0823	0,0815

O desvio padrão (RAJ, 1991) é utilizado nesta análise para mostrar o grau de proximidade das respostas em relação a instâncias de simulação. O objetivo é demonstrar que a proposta apresentada neste trabalho obtém valores médios próximos, independente da instância de simulação. Calculando-se o desvio padrão de MIC do canal 1 no AG10 contido nas Tabelas 10, 11 e 12 obtém-se o valor de 0,005. Ou seja, os valores de MIC estão 0,5% em torno da média, portanto considerados próximos uns dos outros. Esse comportamento repete-se nos demais canais para todas as instâncias da simulação. O que comprova que os valores de período de sensoriamento encontrados na proposta apresentada neste trabalho convergem para valores próximos independente da instância de simulação.

Tabela 12 – Intervalos de confiança dos períodos de sensoriamento resultantes para 9 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	0,2232	0,2280	0,2256
	AG20	0,1847	0,1950	0,1899
	AG40	0,1365	0,1503	0,1434
C2	AG10	0,2443	0,2452	0,2448
	AG20	0,1261	0,1261	0,1261
	AG40	0,1166	0,1227	0,1197
C3	AG10	0,2861	0,2916	0,2888
	AG20	0,1751	0,1822	0,1787

	AG40	0,0976	0,1028	0,1002
C4	AG10	0,2816	0,2858	0,2837
	AG20	0,2330	0,2388	0,2359
	AG40	0,0840	0,0908	0,0874
C5	AG10	0,2420	0,2442	0,2431
	AG20	0,1107	0,1116	0,1111
	AG40	0,0980	0,1028	0,1004
C6	AG10	0,2929	0,3185	0,3057
	AG20	0,1502	0,1582	0,1542
	AG40	0,0694	0,0750	0,0722
C7	AG10	0,2372	0,2390	0,2381
	AG20	0,1214	0,1221	0,1217
	AG40	0,1092	0,1136	0,1114
C8	AG10	0,2275	0,2296	0,2285
	AG20	0,1385	0,1439	0,1412
	AG40	0,0822	0,0846	0,0834
C9	AG10	0,2598	0,2652	0,2625
	AG20	0,1220	0,1224	0,1222
	AG40	0,0940	0,1016	0,0978

Na avaliação do *overhead* de sensoriamento das versões da abordagem proposta, a Figura 31 ilustra a evolução do *overhead* de sensoriamento do canal 1 com o passar das gerações para AG10, AG20 e AG40. Percebe-se a tendência do melhor indivíduo de uma geração em evoluir o mais próximo do valor do *overhead* previamente definido. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do *overhead* de sensoriamento.

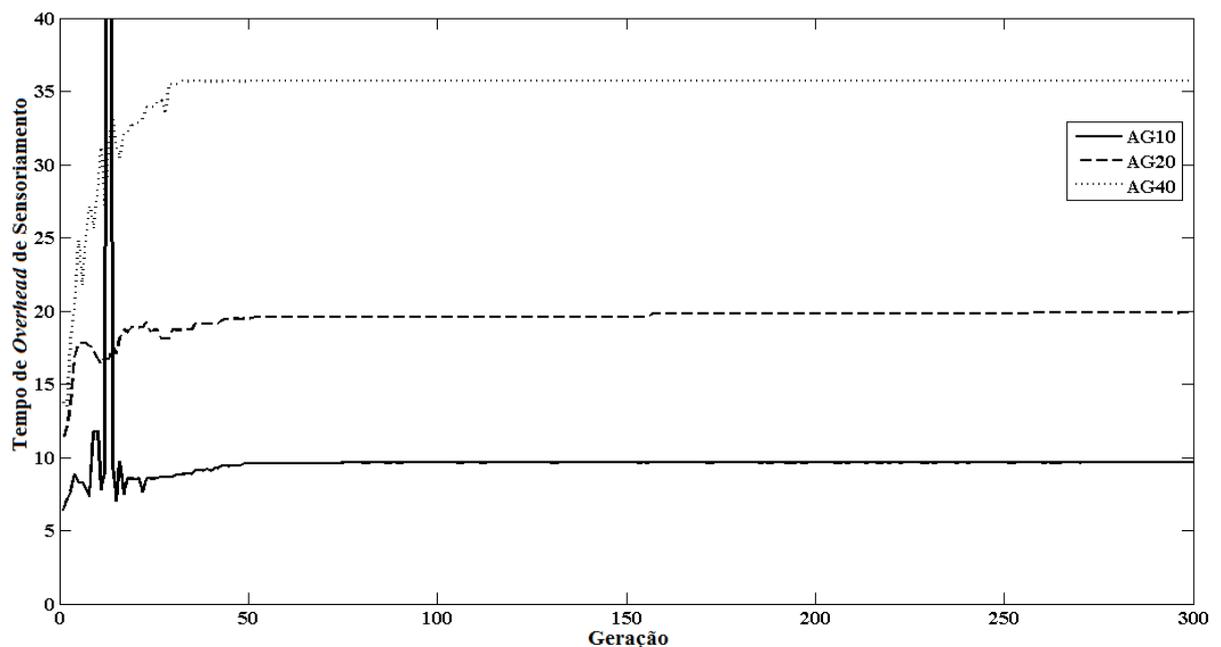


Figura 31: Evolução do overhead de sensoriamento

Quanto ao número de oportunidades, a Figura 32 mostra a evolução do número de oportunidades que foram encontradas no melhor indivíduo de cada geração do canal 1 para as abordagens AG10, AG20 e AG40. Observa-se que o número de oportunidades aumenta com o decorrer das gerações, indicando a evolução do indivíduo. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do número de oportunidades.

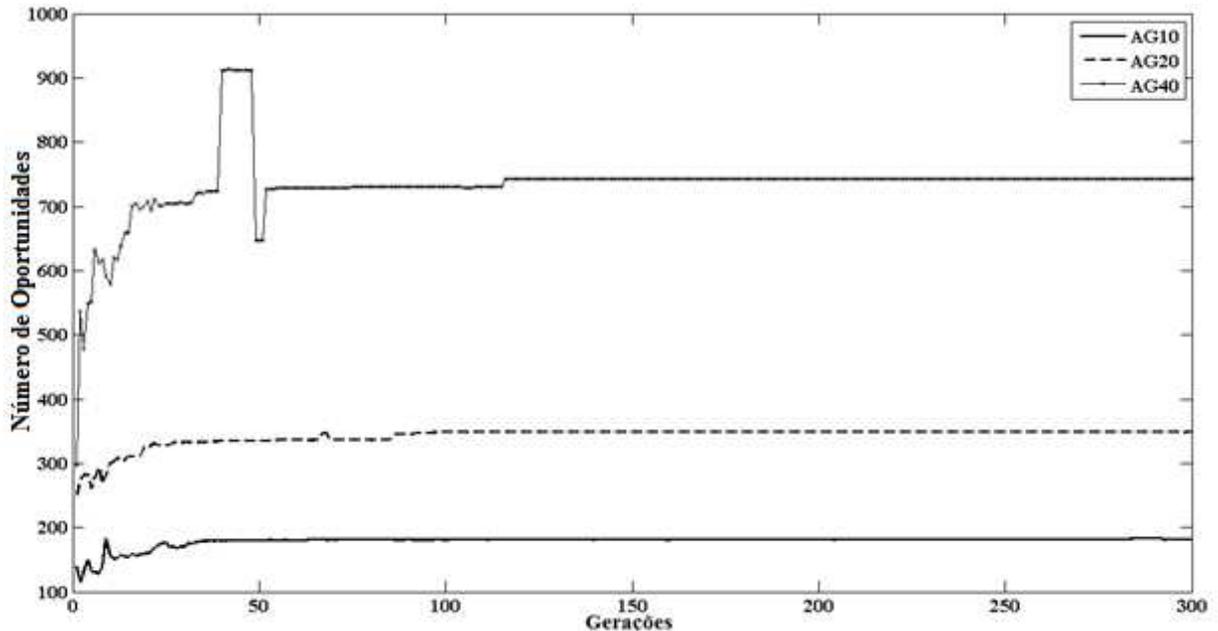


Figura 32: Evolução das oportunidades encontradas no canal 1

Quanto ao tempo de interferência, a Figura 33 mostra a evolução dos tempos de interferência que foram encontrados no melhor indivíduo de cada geração do canal 1 com *overhead* de sensoriamento de 10%. Observe que o tempo de interferência diminui com o aumento de *overhead* de sensoriamento, indicando que quanto maior o número de vezes que um US realiza o sensoriamento menor é a incidência de interferência no canal. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do tempo de interferência.

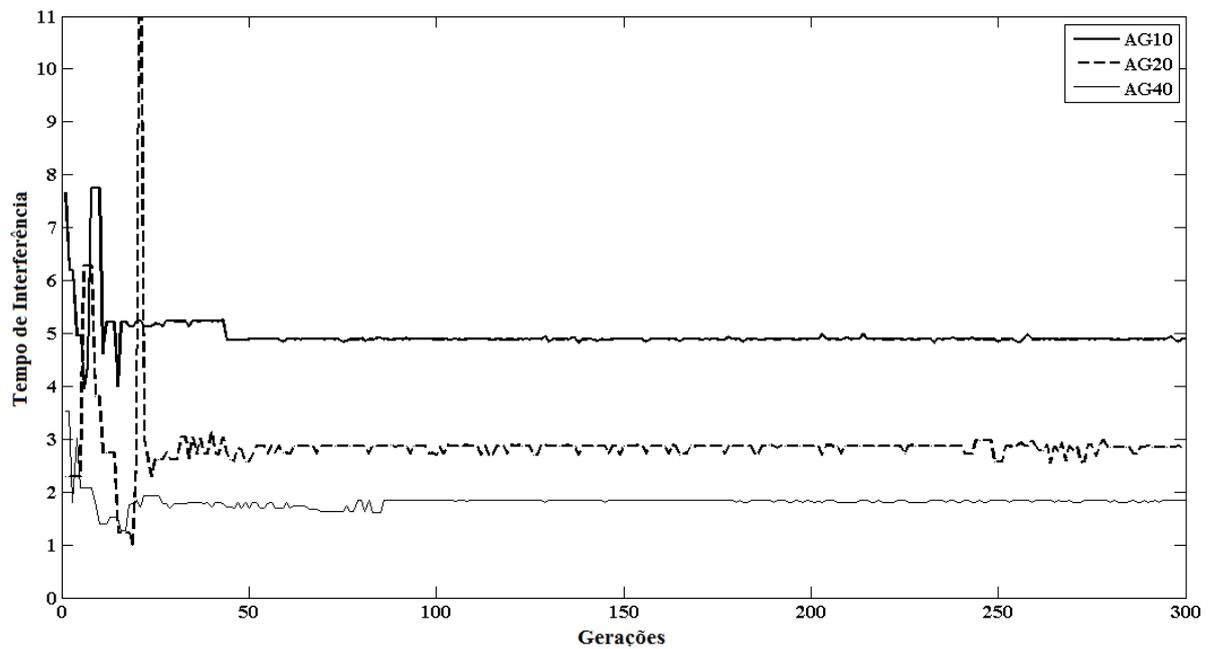


Figura 33: Tempo de Interferência para 3 abordagens

Quanto ao tempo de transmissão útil, a Figura 34 mostra a evolução dos tempos de transmissão útil que foram encontrados no melhor indivíduo de cada geração do canal 1 para as abordagens de AG5, AG10, AG20 e AG40. Observa-se que o tempo de transmissão útil aumenta com o aumento de *overhead* de sensoriamento, indicando que quanto maior o número de vezes que um US executa o sensoriamento, menor é a incidência de interferência no canal, conseqüentemente encontra mais oportunidades possíveis de serem utilizadas. Os demais canais têm um comportamento semelhante na evolução do tempo de interferência.

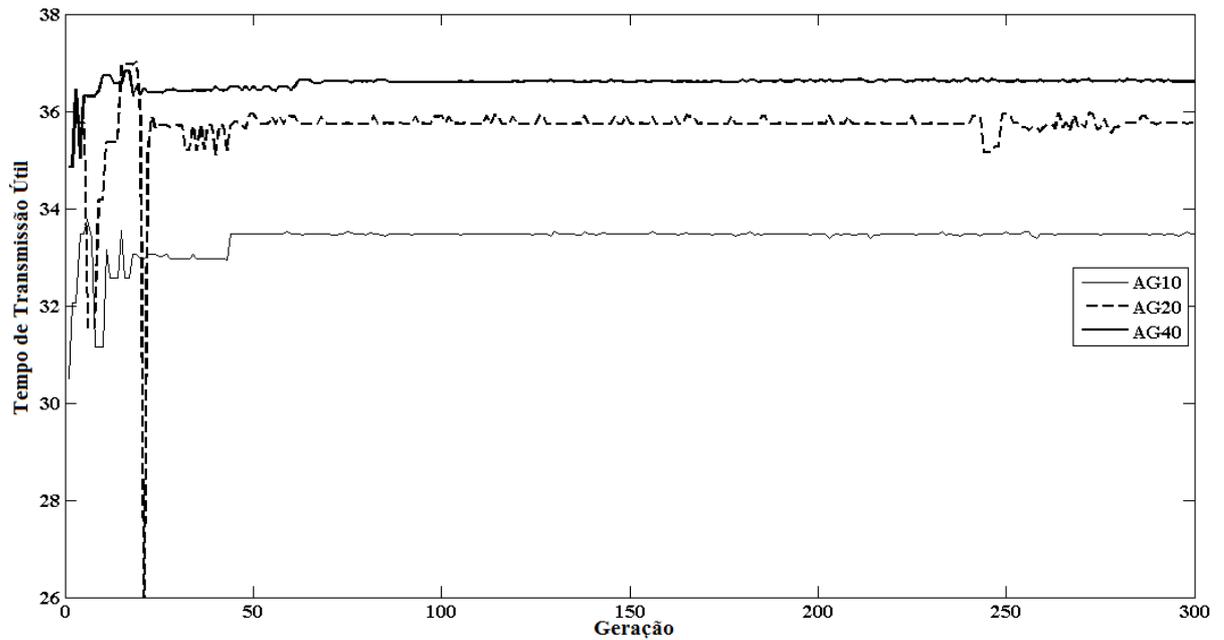


Figura 34: Tempo de transmissão útil para 3 abordagens

### 5.3.2 Avaliação inter-propostas

Quanto ao número de oportunidades, observa-se (ver Figura 35) que a estratégia desenvolvida neste trabalho pode se adaptar às várias exigências de *overhead* de sensoriamento definidas. A Figura 35 mostra uma comparação do resultado médio do número de oportunidades alcançado pelas abordagens nos três casos de simulação: com três, seis e nove canais.

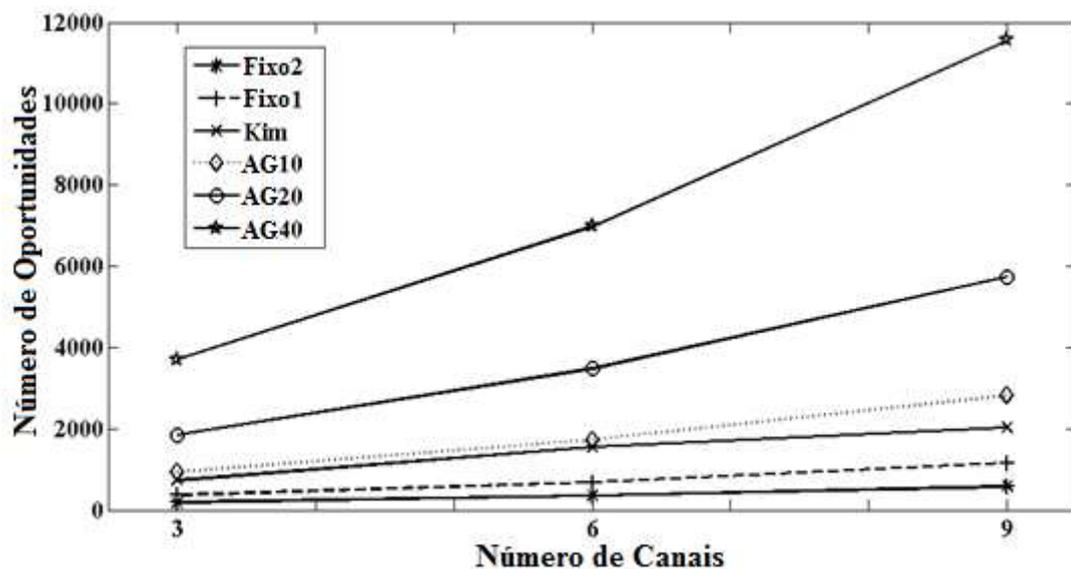


Figura 35: Média do número de oportunidades descobertas

Nota-se que as três abordagens desenvolvidas AG10, AG20, AG40 mostraram-se superiores as que utilizam período de sensoriamento fixo e estratégia adaptativa de Kim (2010). Com a abordagem AG10 obteve-se uma melhoria de desempenho, em média, de 21,54% e 28,07%, em relação ao método Kim, adotando 3 e 9 canais, respectivamente. Utilizando o AG20, a melhoria no número de descobertas de oportunidades em relação aos outros métodos cresceu com o aumento do número de canais, obtendo desempenho superior de até 64,68% e 79,88% em relação ao método de Kim e Fixo1, respectivamente, na instância que utiliza 9 canais na simulação. O AG40 mostrou superioridade mais expressiva em todos os casos de simulação adotados, obtendo melhorias de aproximadamente 82,5% e 94,98% em relação aos métodos de Kim e Fixo2, por exemplo, na simulação com 9 canais.

Ademais, através da Figura 35, observa-se que a estratégia desenvolvida neste trabalho pode se adaptar às várias exigências de *overhead* de sensoriamento definidas no início da execução da proposta. O fato de ser possível regular o limite de *overhead* de sensoriamento está diretamente ligado à possibilidade de detectar a presença do UP no canal licenciado e descobrir oportunidades de comunicação para o US. Isto porque, quanto maior o valor do *overhead* de sensoriamento maior será a quantidade de vezes que o US realizará o sensoriamento dos canais. Com isso, em situações onde um mínimo de interferência é indispensável, a proposta desenvolvida neste trabalho pode adaptar-se a uma maior ou menor porcentagem de *overhead* de sensoriamento, a fim de obter melhor monitoramento do canal e, conseqüentemente, menor interferência ao UP.

As Tabelas 13, 14 e 15 exibem o intervalo de confiança do número de oportunidades encontradas para instâncias de 3, 6 e 9 canais, respectivamente.

Tabela 13 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 3 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	180,30	182,06	181,18
	AG20	346,92	349,88	348,40
	AG40	740,75	744,80	742,78
	Fixo1	-	-	76
	Fixo2	-	-	34
	Kim	-	-	177
C2	AG10	408,66	410,37	409,51
	AG20	748,96	757,97	753,47
	AG40	1563,93	1572,26	1568,09

	Fixo1	-	-	169
	Fixo2	-	-	86
	Kim	-	-	401
C3	AG10	294,36	296,18	295,27
	AG20	503,00	503,00	503,00
	AG40	1031,10	1041,56	1036,33
	Fixo1	-	-	125
	Fixo2	-	-	64
	Kim	-	-	288

Na Tabela 13 a abordagem AG20, do canal 1, obteve um aumento no número de oportunidades de 92,3% em relação a AG10, enquanto o AG40 obteve um aumento de 113,2% em relação ao AG20. Note que o aumento médio do número de oportunidades encontradas foi influenciado pelo aumento do *overhead* definido em cada abordagem, para todos os canais.

Tabela 14 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 6 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	173,65	175,68	174,67
	AG20	329,17	330,66	329,91
	AG40	611,16	611,18	611,17
	Fixo1	-	-	76
	Fixo2	-	-	34
	Kim	-	-	172
C2	AG10	391,08	392,86	391,97
	AG20	685,64	701,13	693,39
	AG40	1501,41	1512,52	1506,97
	Fixo1	-	-	169
	Fixo2	-	-	86
	Kim	-	-	389
C3	AG10	279,19	280,91	280,05
	AG20	535,26	540,85	538,06
	AG40	869,94	886,91	878,42
	Fixo1	-	-	125
	Fixo2	-	-	64
	Kim	-	-	278
C4	AG10	323,19	332,02	327,60
	AG20	780,34	786,17	783,25
	AG40	1528,77	1548,09	1538,43
	Fixo1	-	-	176
	Fixo2	-	-	88
	Kim	-	-	325
C5	AG10	170,34	171,32	170,83
	AG20	338,12	340,72	339,42
	AG40	669,91	682,85	676,38
	Fixo1	-	-	75
	Fixo2	-	-	39
	Kim	-	-	166
C6	AG10	175,65	176,60	176,13
	AG20	299,85	307,04	303,44
	AG40	523,51	547,79	535,65
	Fixo1	-	-	74
	Fixo2	-	-	38
	Kim	-	-	174

Na Tabela 14 a abordagem AG20, do canal 4, obteve um aumento no número de oportunidades de 139% em relação a AG10 e o AG40 obteve um aumento de 96,41% em relação ao AG20, esse acontecimento ocorre em todos os canais. O mesmo comportamento pode ser observado na Tabela 15. Portanto, esse comportamento também foi obtido para todas as instâncias de simulação.

Tabela 15 – Intervalos de confiança do número de oportunidades encontradas para 9 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	161,39	162,26	161,82
	AG20	278,12	283,85	280,99
	AG40	435,36	458,39	446,87
	Fixo1	-	-	76
	Fixo2	-	-	34
	Kim	-	-	155
C2	AG10	340,75	346,95	343,85
	AG20	671,82	671,87	671,84
	AG40	925,18	974,30	949,74
	Fixo1	-	-	169
	Fixo2	-	-	86
	Kim	-	-	337
C3	AG10	215,69	224,30	219,99
	AG20	497,02	513,59	505,31
	AG40	828,51	855,55	842,03
	Fixo1	-	-	125
	Fixo2	-	-	64
	Kim	-	-	213
C4	AG10	368,91	371,69	370,30
	AG20	498,18	514,00	506,09
	AG40	1359,20	1399,54	1379,37
	Fixo1	-	-	176
	Fixo2	-	-	88
	Kim	-	-	364
C5	AG10	170,40	171,54	170,97
	AG20	344,15	348,93	346,54
	AG40	521,37	534,54	527,96
	Fixo1	-	-	75
	Fixo2	-	-	39
	Kim	-	-	166
C6	AG10	156,12	158,63	157,37
	AG20	286,94	292,73	289,83
	AG40	596,82	609,17	602,99
	Fixo1	-	-	74
	Fixo2	-	-	38
	Kim	-	-	153
C7	AG10	338,09	343,28	340,68
	AG20	690,49	699,16	694,83
	AG40	969,82	996,68	983,25
	Fixo1	-	-	170
	Fixo2	-	-	86
	Kim	-	-	336
C8	AG10	309,37	319,99	314,68
	AG20	590,17	596,25	593,21
	AG40	1010,12	1044,70	1027,41
	Fixo1	-	-	157

	Fixo2	-	-	79
	Kim	-	-	310
C9	AG10	280,56	284,95	282,75
	AG20	569,72	571,23	570,47
	AG40	952,02	1008,56	980,29
	Fixo1	-	-	140
	Fixo2	-	-	70
	Kim	-	-	278

A Figura 36 mostra uma comparação do resultado médio do *overhead* de sensoriamento alcançado pelas abordagens nos três casos de simulação: com três, seis e nove canais.

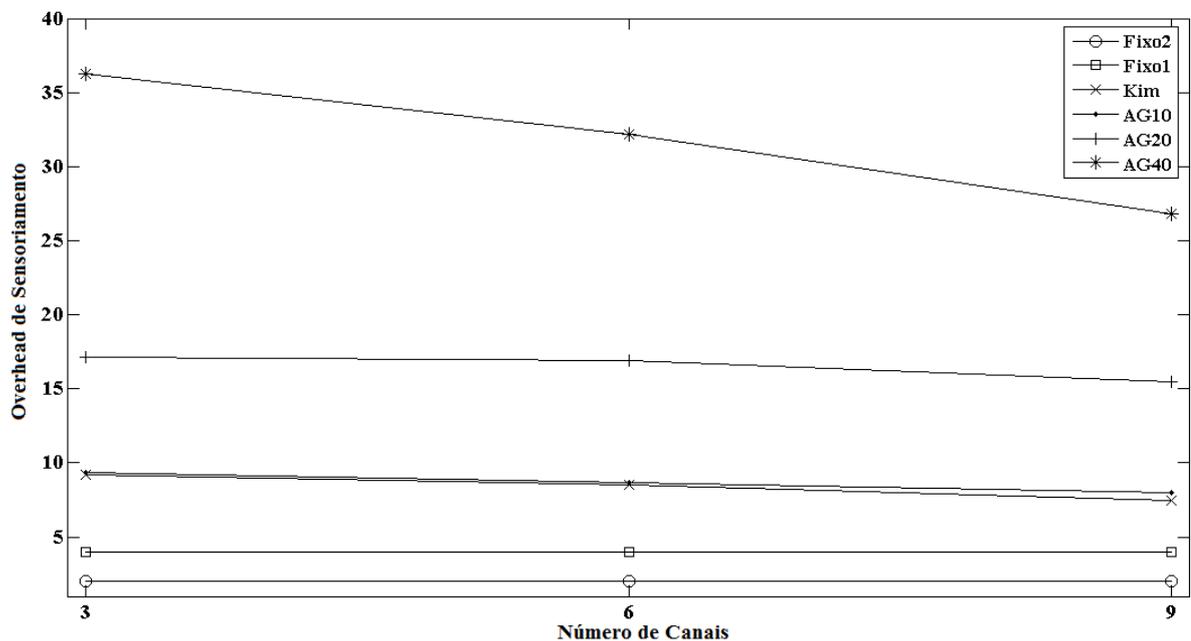


Figura 36: Média do Overhead de Sensoriamento

Nota-se que as três abordagens desenvolvidas AG10, AG20, AG40 cumpriram o compromisso entre o *overhead* de sensoriamento e o número de oportunidades, onde um número de oportunidades alto obtém um *overhead* alto. A abordagem AG10 possui um *overhead* de sensoriamento maior, em média, de 2,04% e 2,17%, em relação ao método Kim, adotando 3 e 6 canais, respectivamente. Esse aumento no *overhead* de sensoriamento proporcionou uma melhoria de 21,54% e 28,07% no número de oportunidades encontradas. Utilizando o AG20, o *overhead* de sensoriamento em relação ao método de Kim e Fixo1 cresceu, obtendo um aumento de até 52,07% e 74,2%, respectivamente, na

instância que utiliza 9 canais na simulação, aumentando o número de oportunidades em 64,68% e 79,88%. No AG40 o *overhead* de sensoriamento foi o mais alto de todos os casos de simulação adotados, obtendo 72,97% e 92,53% em relação aos métodos de Kim e Fixo2 na simulação com 9 canais, o que proporcionou um aumento de 82,5% e 94,98% no número de oportunidades.

As Tabelas 16, 17 e 18 exibem o intervalo de confiança do *overhead* de sensoriamento para instâncias de 3, 6 e 9 canais, respectivamente. Os valores do intervalo de confiança calculados conforme descrito na Seção 4.5, onde min e max representam, respectivamente, os valores mínimo e máximo do intervalo de confiança e MIC representa a média do intervalo de confiança.

Tabela 16 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 3 canais

Canais	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	9,2564	9,3178	9,2871
	AG20	17,5962	17,8052	17,7007
	AG40	38,2950	38,6210	38,4580
	Fixo1	-	-	4
	;;Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	9,101
C2	AG10	9,5035	9,5668	9,5352
	AG20	17,7897	17,9313	17,8605
	AG40	37,0212	37,3109	37,1661
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	9,343
C3	AG10	9,2317	9,3019	9,2668
	AG20	15,8800	15,8800	15,8800
	AG40	32,9316	33,2385	33,0850
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	9,081

Na Tabela 16 a abordagem AG20, do canal 2, obteve um aumento no *overhead* de sensoriamento de 87,3% em relação a AG10 e o AG40 obteve um aumento de 108% em relação ao AG20. O aumento médio do *overhead* obtido foi influenciado pelo aumento do *overhead* definido em cada abordagem.

Tabela 17 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 6 canais

Canais	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	8,8311	8,9365	8,8838
	AG20	16,9132	17,0500	16,9816
	AG40	31,4555	31,4574	31,4565
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,705

C2	AG10	9,1391	9,1979	9,1685
	AG20	16,3992	16,6033	16,5013
	AG40	35,7558	36,1226	35,9392
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,985
C3	AG10	8,7155	8,7795	8,7475
	AG20	16,8684	16,9763	16,9224
	AG40	27,5087	27,7713	27,6400
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,572
C4	AG10	7,3456	7,5713	7,4585
	AG20	17,5326	17,8952	17,7139
	AG40	33,9026	34,2944	34,0985
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	7,309
C5	AG10	8,8243	8,9298	8,8771
	AG20	17,7009	17,8352	17,7680
	AG40	35,5825	36,2061	35,8943
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,877
C6	AG10	9,0144	9,1092	9,0618
	AG20	15,6483	15,8469	15,7476
	AG40	27,5445	28,2436	27,8941
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,88

Na Tabela 17 a abordagem AG20, do canal 6, obteve um aumento no *overhead* de sensoriamento de 73,78% em relação a AG10 e o AG40 obteve um aumento de 77,1% em relação ao AG20. Houve novamente um crescimento no médio do *overhead* de sensoriamento obtido respectivamente nas abordagens AG10, AG20 e AG40 para todos os canais. Esse comportamento ocorre também na Tabela 18. Concluindo-se que é um comportamento padrão independente da instância de simulação.

Tabela 18 – Intervalos de confiança dos overheads de sensoriamento gerados para 9 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	8,2116	8,2556	8,2336
	AG20	14,4381	15,5089	14,9735
	AG40	22,2652	23,2832	22,7742
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	9,986
C2	AG10	7,8311	7,9983	7,9147
	AG20	15,8561	15,8573	15,8567
	AG40	22,3236	23,1522	22,7379

	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	7,677
C3	AG10	6,7942	6,9660	6,8801
	AG20	15,7447	16,4391	16,0919
	AG40	26,9330	27,6610	27,2970
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	4,673
C4	AG10	8,2959	8,3526	8,3242
	AG20	11,1887	11,6774	11,4330
	AG40	30,9806	32,0446	31,5126
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,074
C5	AG10	8,8632	8,9397	8,9014
	AG20	17,9240	18,1125	18,0182
	AG40	27,1466	27,9164	27,5315
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,634
C6	AG10	8,1060	8,4434	8,2747
	AG20	15,0690	15,3895	15,2293
	AG40	31,4851	32,1758	31,8304
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	8,026
C7	AG10	7,5069	7,9010	7,7039
	AG20	16,4720	16,5907	16,5313
	AG40	22,1586	23,1898	22,6742
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	6,472
C8	AG10	7,6847	7,9518	7,8182
	AG20	14,7883	15,1387	14,9635
	AG40	26,1210	27,1793	26,6502
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	6,583
C9	AG10	7,8743	8,0762	7,9753
	AG20	16,3694	16,4642	16,4168
	AG40	27,7574	28,4556	28,1065
	Fixo1	-	-	4
	Fixo2	-	-	2
	Kim	-	-	6,736

Nota-se também nas Tabelas 16, 17, 18 que para todas as instâncias de simulação o *overhead* de sensoriamento fica abaixo do limite especificado, satisfazendo a restrição imposta no problema de otimização definido na Seção 4.2.

Em relação à métrica de interferência, a Figura 37 mostra o resultado médio obtido pelas abordagens nos três casos de simulação: com três, seis e nove canais. Nesta figura, observa-se que as três abordagens desenvolvidas AG10, AG20, AG40

apresentam melhor desempenho em relação às estratégias que utilizam período de sensoriamento fixo e a estratégia adaptativa de Kim (2008). Com a abordagem AG10 obteve-se uma diminuição no tempo de interferência, em média, de 8,34% e 26,9%, em relação ao método Kim, adotando 3 e 9 canais, respectivamente. Utilizando o AG20, a diminuição no tempo de interferência em relação aos outros métodos foi de 52,21% e 76,14% em relação ao método de Kim e Fixo1, respectivamente, na instância que utiliza 9 canais na simulação. O AG40 mostrou menor tempo de interferência em todos os casos de simulação adotados, obtendo aproximadamente 64,49% e 66,83% em relação aos métodos de Kim e Fixo2, por exemplo, na simulação com 3 canais. Note que o período de sensoriamento é menor, quanto maior é o *overhead* de sensoriamento. O grande número de vezes que o canal é sentido, nas abordagens com alto *overhead*, causa menor tempo de interferência.

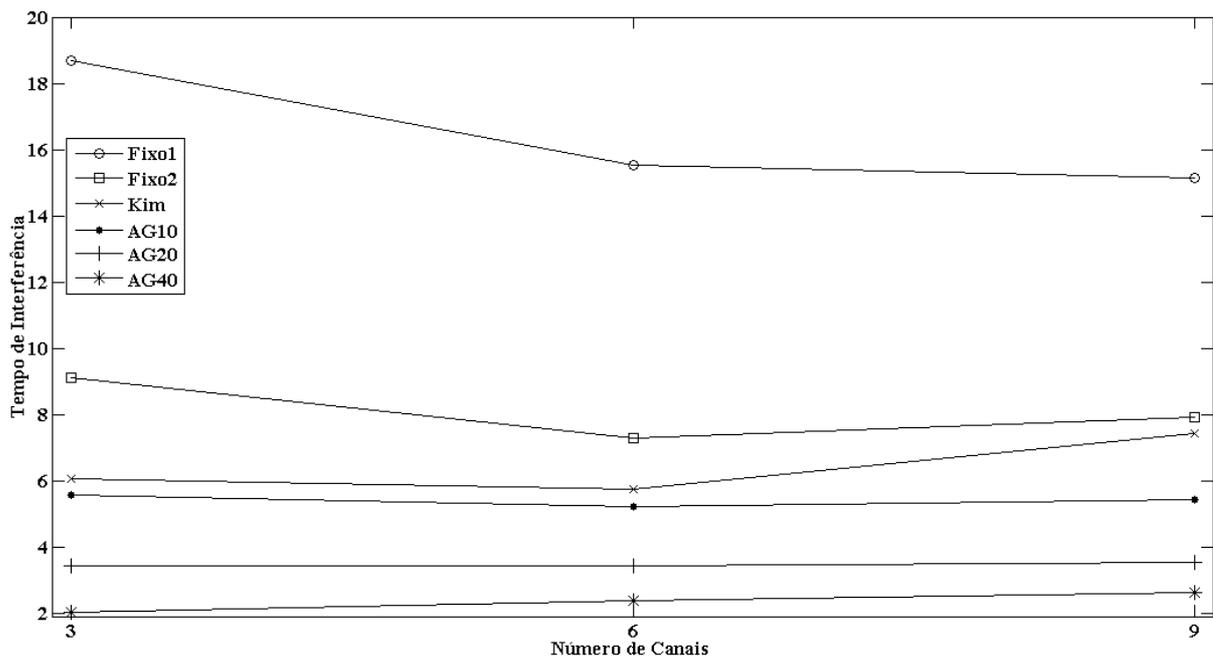


Figura 37: Média do tempo de interferência

As Tabelas 19, 20 e 21 exibem o intervalo de confiança do tempo de interferência para instâncias de 3, 6 e 9 canais, respectivamente utilizando as estratégias AG10, AG20 e AG40.

Tabela 19 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 3 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	6,8393	6,8650	6,8521
	AG20	4,5278	4,5853	4,5565
	AG40	2,6184	2,6346	2,6265
	Fixo1	-	-	12,821
	Fixo2	-	-	26,821
	Kim	-	-	8,665
C2	AG10	5,5246	5,6177	5,5711
	AG20	3,2535	3,2910	3,2722
	AG40	2,1180	2,1320	2,1250
	Fixo1	-	-	8,762
	Fixo2	-	-	16,571
	Kim	-	-	6,024
C3	AG10	4,2247	4,2809	4,2528
	AG20	2,4848	2,5116	2,4982
	AG40	1,3630	1,3698	1,3664
	Fixo1	-	-	5,717
	Fixo2	-	-	12,611
	Kim	-	-	5,505

Na Tabela 19 a abordagem AG20, do canal 1, obteve uma diminuição no tempo de interferência de 33,5% em relação a AG10 e o AG40 obteve uma diminuição de 42,3% em relação ao AG20, é possível observar que diminuições semelhantes ocorrem para os demais canais. Portanto, o tempo de interferência calculado decresce com o aumento do *overhead* de sensoriamento, para todos os canais.

Tabela 20 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 6 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	7,1566	7,2277	7,1921
	AG20	4,4373	4,4632	4,4502
	AG40	2,7635	2,7689	2,7662
	Fixo1	-	-	12,821
	Fixo2	-	-	26,821
	Kim	-	-	13,631
C2	AG10	5,9040	6,0126	5,9583
	AG20	3,9303	4,2162	4,0732
	AG40	2,1211	2,1334	2,1272
	Fixo1	-	-	8,762
	Fixo2	-	-	16,571
	Kim	-	-	11,784
C3	AG10	4,3756	4,4030	4,3893
	AG20	2,5445	2,5899	2,5672
	AG40	1,8112	1,8411	1,8261
	Fixo1	-	-	5,717
	Fixo2	-	-	12,611
	Kim	-	-	7,455
C4	AG10	4,9869	5,0394	5,0132
	AG20	2,7160	2,7378	2,7269
	AG40	1,7448	1,8039	1,7744
	Fixo1	-	-	5,339

	Fixo2	-	-	16,571
	Kim	-	-	7,180
C5	AG10	3,2111	3,2437	3,2274
	AG20	2,0049	2,0156	2,0103
	AG40	1,1388	1,1448	1,1418
	Fixo1	-	-	4,406
	Fixo2	-	-	10,55
	Kim	-	-	4,333
C6	AG10	5,4236	5,4653	5,4444
	AG20	3,3854	3,4631	3,4242
	AG40	2,3063	2,3769	2,3416
	Fixo1	-	-	6,718
	Fixo2	-	-	14,144
	Kim	-	-	10,324

É possível observar, através das Tabelas 20 e 21, que o comportamento de diminuição da interferência com o aumento do *overhead* de sensoriamento se repete em todas as instâncias de simulação.

Tabela 21 – Intervalos de confiança do tempo de interferência para 9 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC10
C1	AG10	7,0101	7,0594	7,0347
	AG20	6,6760	6,9661	6,8210
	AG40	4,8148	5,0205	4,9177
	Fixo1	-	-	12,821
	Fixo2	-	-	26,821
	Kim	-	-	25,157
	C2	AG10	5,9183	5,9676
AG20		3,5600	3,5790	3,5695
AG40		3,5974	3,7251	3,6612
Fixo1		-	-	8,762
Fixo2		-	-	16,571
Kim		-	-	14,797
C3	AG10	4,9181	5,0767	4,9974
	AG20	3,2104	3,3294	3,2699
	AG40	2,0659	2,1428	2,1044
	Fixo1	-	-	5,717
	Fixo2	-	-	12,611
	Kim	-	-	16,733
C4	AG10	5,4839	5,5692	5,5266
	AG20	3,9454	4,0979	4,0217
	AG40	2,1547	2,2747	2,2147
	Fixo1	-	-	5,339
	Fixo2	-	-	16,571
	Kim	-	-	13,340
C5	AG10	3,1616	3,1932	3,1774
	AG20	1,8436	1,8584	1,8510
	AG40	1,5332	1,6184	1,5758
	Fixo1	-	-	4,406
	Fixo2	-	-	10,55
	Kim	-	-	9,714
C6	AG10	6,8233	7,0157	6,9195
	AG20	3,8347	3,9272	3,8809
	AG40	2,0053	2,0411	2,0232
	Fixo1	-	-	6,718

	Fixo2	-	-	14,144
	Kim	-	-	13,145
C7	AG10	7,8535	8,1245	7,9890
	AG20	4,2092	4,2160	4,2126
	AG40	3,6349	3,7552	3,6951
	Fixo1	-	-	13,53
	Fixo2	-	-	23,477
	Kim	-	-	20,948
C8	AG10	3,6636	3,6732	3,6684
	AG20	2,3822	2,4526	2,4174
	AG40	1,7227	1,7659	1,7443
	Fixo1	-	-	8,595
	Fixo2	-	-	11,164
	Kim	-	-	9,228
C9	AG10	3,4041	3,4339	3,4190
	AG20	1,8224	1,8424	1,8324
	AG40	1,7152	1,7580	1,7366
	Fixo1	-	-	5,468
	Fixo2	-	-	8,468
	Kim	-	-	7,411

Considerando a última métrica de avaliação adotada, tempo de transmissão útil, a Figura 38 mostra o resultado médio obtido para todas as abordagens consideradas neste trabalho, nos três casos de simulação: com três, seis e nove canais. Dos resultados dispostos nesta figura, observa-se que as três abordagens desenvolvidas AG10, AG20, AG40 mostraram-se superiores em comparação às estratégias que utilizam período de sensoriamento fixo e a estratégia adaptativa de Kim (2008). Com a abordagem AG10 obteve-se uma aumento no tempo de transmissão útil, em média, de 3,66% e 5,0%, em relação ao método Kim, adotando 3 e 9 canais, respectivamente. Utilizando o AG20, o aumento no tempo de transmissão útil em comparação aos outros métodos foi de 7,6% e 21,3% em relação ao método de Kim e Fixo2, respectivamente, na instância que utiliza 6 canais na simulação. O AG40 mostrou maior tempo de transmissão útil em todos os casos de simulação adotados, obtendo aproximadamente 9,05% e 40,9% em relação aos métodos de Kim e Fixo1, por exemplo, na simulação com 3 canais.

O aumento do tempo de transmissão útil obtido pela abordagem proposta (nas três versões) não é tão expressivo devido ao aumento do *overhead* de sensoriamento. O *overhead* causa a diminuição do tempo de transmissão, no entanto, devido ao menor tempo de interferência, as abordagens que tem *overhead* alto têm bons tempos de transmissão útil.

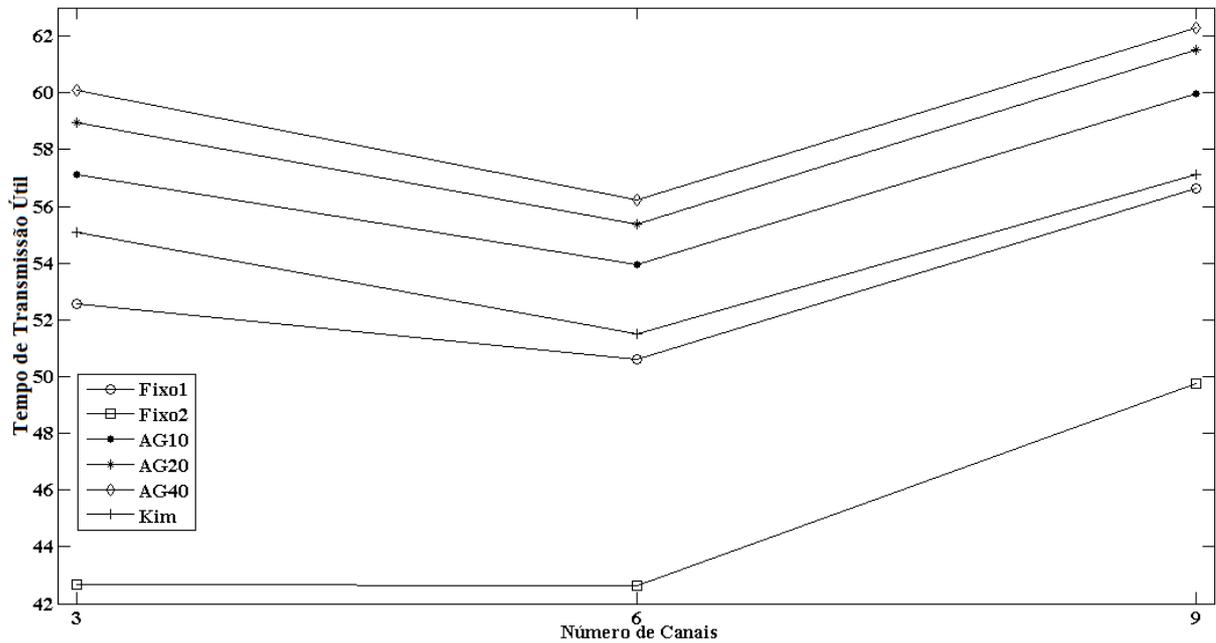


Figura 38: Tempo de transmissão útil para todos os métodos

As Tabelas 22, 23 e 24 exibem o intervalo de confiança do tempo de transmissão útil para instâncias de 3, 6 e 9 canais, respectivamente.

Tabela 22 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 3 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	32,1717	32,1739	32,1728
	AG20	34,5779	34,5278	34,5529
	AG40	36,2168	36,2056	36,2112
	Fixo1	-	-	25,179
	Fixo2	-	-	7,179
	Kim	-	-	30,079
C2	AG10	79,9421	79,8767	79,9094
	AG20	81,4261	81,402	81,4141
	AG40	82,3616	82,3668	82,3642
	Fixo1	-	-	75,738
	Fixo2	-	-	69,4280
	Kim	-	-	78,354
C3	AG10	59,2821	59,2483	59,2652
	AG20	60,8403	60,8139	60,8271
	AG40	61,7003	61,6947	61,6975
	Fixo1	-	-	56,782
	Fixo2	-	-	51,3881
	Kim	-	-	59,348

No canal 1, a abordagem AG20 obteve um aumento de 6,3% em relação à AG10 e o AG40 obteve um aumento de 4,57 em relação ao AG20. Concluindo-se

que na Tabela 22 que um alto *overhead* de sensoriamento causa um alto tempo de transmissão útil.

Tabela 23 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 6 canais

Canal	Abordagem	min	max	MIC
C1	AG10	32,2027	32,1609	32,1818
	AG2	34,6865	34,6684	34,6775
	AG40	36,0851	36,0839	36,0845
	Fixo1	-	-	25,1784
	Fixo2	-	-	7,1784
	Kim	-	-	24,401
C2	AG10	79,4504	79,3539	79,4022
	AG20	80,8125	80,5403	80,6764
	AG40	82,341	82,3337	82,3374
	Fixo1	-	-	75,7377
	Fixo2	-	-	69,4280
	Kim	-	-	73,789
C3	AG10	59,2805	59,26	59,2702
	AG2	60,7637	60,7291	60,7464
	AG40	61,2967	61,273	61,2849
	Fixo1	-	-	56,7825
	Fixo2	-	-	51,3881
	Kim	-	-	55,746
C4	AG10	84,3944	84,3545	84,3744
	AG2	86,2652	86,2625	86,2639
	AG40	87,0863	87,0358	87,061
	Fixo1	-	-	82,6603
	Fixo2	-	-	77,4510
	Kim	-	-	80,630
C5	AG10	35,2959	35,2731	35,2845
	AG2	36,2317	36,2303	36,2309
	AG40	36,9918	36,9892	36,9905
	Fixo1	-	-	33,0934
	Fixo2	-	-	26,5934
	Kim	-	-	33,700
C6	AG10	33,2099	33,1852	33,1976
	AG2	35,0036	34,9394	34,9715
	AG40	35,8316	35,7941	35,8128
	Fixo1	-	-	30,2818
	Fixo2	-	-	23,8559
	Kim	-	-	26,590

O aumento do tempo de transmissão útil se deve ao aumento do tempo de transmissão e à diminuição do tempo interferência. E através da observação das Tabelas 23 e 24 conclui-se que esse comportamento ocorre em todas as instâncias de simulação.

Tabela 24 – Intervalos de confiança do tempo de transmissão útil para 9 canais

<b>Canal</b>	<b>Abordagem</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>MIC10</b>
C1	AG10	32,1503	32,1108	32,1306
	AG20	32,8055	32,5569	32,6813
	AG40	34,2919	34,1236	34,2077
	Fixo1	-	-	25,178
	Fixo2	-	-	7,1784
	Kim	-	-	13,907
C2	AG10	79,3881	79,3721	79,3801
	AG20	81,1255	81,1107	81,1181
	AG40	81,1777	81,1034	81,1406
	Fixo1	-	-	75,737
	Fixo2	-	-	69,428
	Kim	-	-	70,002
C3	AG10	58,9129	58,8627	58,8878
	AG20	60,218	60,1208	60,1694
	AG40	61,1168	61,0547	61,0857
	Fixo1	-	-	56,7825
	Fixo2	-	-	51,388
	Kim	-	-	48,057
C4	AG10	83,8238	83,7459	83,7848
	AG20	85,0069	84,8852	84,946
	AG40	86,7342	86,626	86,6801
	Fixo1	-	-	82,6603
	Fixo2	-	-	77,4510
	Kim	-	-	78,129
C5	AG10	35,075	35,0569	35,066
	AG20	36,3903	36,3899	36,3901
	AG40	36,6602	36,5923	36,6263
	Fixo1	-	-	33,0934
	Fixo2	-	-	26,5934
	Kim	-	-	26,493
C6	AG10	31,937	31,782	31,8595
	AG20	34,5181	34,505	34,5116
	AG40	36,09	36,0649	36,0774
	Fixo1	-	-	30,2818
	Fixo2	-	-	23,8559
	Kim	-	-	21,155
C7	AG10	76,9387	76,7017	76,8202
	AG20	80,1699	80,1647	80,1673
	AG40	80,6898	80,587	80,6384
	Fixo1	-	-	71,4691
	Fixo2	-	-	62,5225
	Kim	-	-	62,898
C8	AG10	74,8491	74,8532	74,8512
	AG20	76,0101	75,9521	75,9811
	AG40	76,6472	76,6108	76,629
	Fixo1	-	-	69,904
	Fixo2	-	-	67,8358
	Kim	-	-	68,902
C9	AG10	66,9702	66,992	66,9811
	AG20	67,6193	67,6104	67,6149
	AG40	67,6508	67,6205	67,6357
	Fixo1	-	-	64,5317
	Fixo2	-	-	61,5317
	Kim	-	-	60,238

Como visto neste capítulo, a abordagem proposta mostrou-se superior as outras adotadas no estudo comparativo, quanto às métricas avaliadas. A superioridade das versões da abordagem apresentada neste trabalho deve-se à característica adaptativa na definição do período de sensoriamento, que se ajusta de acordo com o padrão de uso de cada canal, o que não ocorre no método que utiliza período de sensoriamento fixo. Além disso, tal desempenho justifica-se, também, pelo fato da otimização do conjunto de períodos de sensoriamento ser realizada com base nas amostras de sensoriamento dos canais e não no seu comportamento médio, como feito em Kim (2008). Ademais, a abordagem apresentada neste trabalho leva em conta um fator importante na definição do período de sensoriamento: a interferência provocada no UP decorrente da sua não detecção, o que é negligenciada nas outras abordagens.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou e avaliou uma proposta de otimização do período de sensoriamento em redes baseadas em RC utilizando Algoritmo Genético com estratégia de múltiplos objetivos. A proposta visa otimizar o número de oportunidades descobertas no espectro para transmissão do usuário secundário, bem como, minimizar o *overhead* de sensoriamento, pois tal processo influencia na máxima utilização espectral da transmissão secundária. A abordagem proposta apresentou resultados satisfatórios, demonstrando sua superioridade em relação aos outros métodos utilizados no estudo. A proposta atendeu o compromisso entre o alto número de oportunidades descobertas e o baixo *overhead* de sensoriamento, sendo este adaptável de acordo com as condições do usuário.

Aplicações baseadas em AGs podem adaptar-se a vários tipos de problemas, porém o tempo de processamento é alto com relação às outras estratégias. A justificativa para utilização da proposta apresentada neste trabalho é a de que a aplicação pode calcular um período de sensoriamento ótimo coletando as amostras dos canais, e realizando o processamento *offline* e periódico de novas amostras a serem adotadas em momentos subsequentes de sua operação. Além disso, diversas técnicas para aceleração do tempo de convergência do AG já estão dispostas na literatura.

Ademais, o tempo de processamento do AG não é um fator que comprometa a aplicabilidade da abordagem proposta em vários casos, o qual depende do tipo de canal primário que se deseja adotar para transmissão oportunista.

Um exemplo de aplicação seria nos canais destinados a transmissão de TV nos Estados Unidos da América, com estações de TV como usuários primários. Neste caso, os UPs, isto é, estações de TV e microfones sem fio, alteram seu comportamento apenas em escalas de tempo longas, horas ou dias, por exemplo. Com isso, a abordagem proposta seria disponível para determinar os períodos de sensoriamento dos canais e, uma vez definidos, tais períodos seriam válidos por longos instantes de tempo.

Além disso, a abordagem proposta mostrou-se aplicável em ambientes onde há pouca tolerância à interferência, como frequências de segurança e emergência, onde a determinação do período de sensoriamento leva em conta tais fatores através da sintonização de um *overhead* de sensoriamento maior.

Para trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo sobre a melhor taxa de *overhead* para diferentes condições de canais, já que a proposta possibilita a adaptação do período de sensoriamento com um *overhead* de sensoriamento definido pelo usuário. Pretende-se também realizar um estudo para a implementação de técnicas de aceleração de convergência para o AG, objetivando obter um tempo processamento menor, mantendo o bom desempenho da proposta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, I. F. *et al.*, **NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey**, *Comp. Networks J.*, vol. 50, Sept. 2006, pp. 2127–59.

AKYILDIZ, Ian F.; VURAN, Mehmet C.; LEE, Won-Yeol; MOHANTY, Shantidev. **A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks**. *IEEE Communications Magazine*. vol. 46, no. 4, pp. 40-48, Abril, 2008.

ARSLAN, Huseyin. **Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems**. Springer, 2007.

BLOSSOM E., **GNU radio: tools for exploring the radio frequency spectrum**, *Linux Journal*, vol. 2004, no. 122, June 2004.

CABRIC D.; BRODERSEN R. W., **Physical layer design issues unique to cognitive radio systems**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, vol. 2, Berlin, Germany, Sept. 2005, pp. 759–763.

CABRIC, D.; TKACHENKO A.; BRODERSEN, R. W., **Cyclostationary feature detector experiments using reconfigurable BEE2**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp. 216–219.

CHANTARASKUL S.; MOESSNER K., **Implementation of a genetic algorithm-based decision making framework for opportunistic radio** *IET Commun.*, 2010, Vol. 4, Iss. 5, pp. 495–506.

CHEN S.; NEWMAN, T. R.; EVANS, J.B.; WYGLINSKI A. M. **Genetic Algorithm-Based Optimization for Cognitive Radio Networks**. *IEEE Sarnoff Symposium* 2010. pp. 1-6

CHOI, K. W., **Adaptive sensing technique to maximize spectrum utilization in cognitive radio**, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 992-998, 2010.

DROZD, A. L.; KASPEROVICH I. P.; CARROLLC. E.; and BLACKBURNA. C., **Computational electromagnetics applied to analyzing the efficient utilization of the RF transmission hyperspace**, in *Proc. IEEE/ACES Int. Conf. on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, Honolulu, Hawaii, USA, Apr. 2005, pp. 1077–1085.

EFRON, B.; TIBSHIRANI R., **An Introduction to the Bootstrap**, Chapman and Hall, 1993.

ETTUS M., **Universal software radio peripheral**. [Online]. Disponível em: [www.ettus.com](http://www.ettus.com) . último acesso em julho de 2011.

FARNHAM ,T.; CLEMO, G.; HAINES, R.; SEIDEL, E.; BENAMAR, A.; BILLINGTON, S.; GRECO, N.; DREW, N.; LE, T.; ARRAM, B.; MANGOLD, P., **IST-TRUST: A perspective on the reconfiguration of future mobile terminals using software download**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.*, London, UK, Sept. 2000, pp. 1054–1059.

FCC, ET Docket No 03-322 Notice of Proposed Rule Making and Order, Dec 2003.

GANESAN G.; LI Y., **Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio**, in *Proc. IEEE Global Telecomm. Conf. (Globecom)*, vol. 5, St. Louis, Missouri, USA, Nov./Dec. 2005, pp. 2505–2509.

JAIN, Raj, **Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling** 1991.

KIM, H.; SHIN, K. G. **Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks**. *IEEE Transactions on mobile computing*, vol . 7, no. 5, pp. 533-545, 2008.

KIM, K.; AKBAR I. A.; BAE K. K.; UM J.-S.; SPOONER C. M.; REED J. H., **Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive radio**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp. 212–215.

KOŁODZY, P. et al., **Next generation communications: Kickoff meeting**, in *Proc. DARPA*, Oct. 2001.

LEHTOMÄKI J.; JUNTTI M.; SAARNISAARI H.; KOIVU S., **Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer**, *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 796–799, Nov. 2005.

LINDEN R., **Algoritmos Genéticos**. Brasport, Rio de Janeiro, vol.1, 2008.

MAEDA K.; BENJEBBOUR A.; ASAI T.; FURUNO T.; OHYA T., **“Recognition among OFDM-based systems utilizing cyclostationarity-inducing transmission,”** in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp. 516–523.

MCHENRY M.; LIVSICS, E.; NGUYEN, T.; MAJUMDAR N., **XG dynamic spectrum sharing field test results**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, Apr. 2007, pp. 676–684.

OLIVIERI M. P.; BARNETT G.; LACKPOUR A.; DAVIS A., **A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, Maryland, USA, Nov. 2005, pp. 170–179.

SHANKAR, S.; CORDEIRO, C.; CHALLAPALI, K., **Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, Maryland, USA, Nov. 2005, pp. 160–169.

J. Song, H. Cai; Z, Feng, **A Novel Cooperative Spectrum Sensing Scheme Based on Channel-usage in Cognitive Radio Networks**, *Networking and Mobile Computing, WinCom '09. 5th International Conference on Wireless Communication*, pp. 1-4, 2009.

RUDOLPH G.: **Convergence analysis of canonical genetic algorithms**, *IEEE Trans. Neural Netw.*, 1994, 5, pp. 96–101.

SUTTON, P. D. Sutton; LOTZE J.; NOLAN K. E.; DOYLE L. E., **Cyclostationary signature detection in multipath rayleigh fading environments**, in *Proc. IEEE Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun. (Crowncom)*, Orlando, Florida, USA, Aug. 2007.

TANG H., **Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems**, in *Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore, Maryland, USA, Nov. 2005, pp. 151–159.

TANDRA R.; SAHAI A., **Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty**, in *Proc. IEEE Int. Conf. Wireless Networks, Commun. and Mobile Computing*, vol. 1, Maui, HI, June 2005, pp. 464–469.

YANG, L., CAO, L., ZHENG H. **Proactive channel access in dynamic spectrum networks**. *Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, 2007.

VARDOULIAS, G.; FAROUGHIE-SFAHANI, J.; CLEMO, G.; HAINES, R., **Blind radio access technology discovery and monitoring for software defined radio communication systems: problems and techniques**, in *Proc. Int. Conf. 3G Mobile Communication Technologies*, London, UK, Mar. 2001, pp. 306–310.

WILLKOMM D.; MACHIRAJU S.; BOLOT J. e WOLISZ A., **Primary User Behavior in Cellular Networks and Implications for Dynamic Spectrum Access**, *IEEE Communications Magazine* March 2009.