

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**WAGNER CARLOS MARIANI**

**ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS PARA COEXISTÊNCIA**  
**DE ESTAÇÕES BASE EM REDES PADRÃO IEEE 802.22**

**CURITIBA**

**2013**

**WAGNER CARLOS MARIANI**

**ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS PARA COEXISTÊNCIA  
DE ESTAÇÃO BASE EM REDES PADRÃO IEEE 802.22**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Informática Aplicada.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Telecomunicações

Orientador: Manoel Camillo de Oliveira Penna Neto

Co-Orientador: Marcelo Eduardo Pellenz

**CURITIBA**

**2013**

Dados da Catalogação na Publicação  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR  
Biblioteca Central

M333a  
2013

Mariani, Wagner Carlos

Algoritmos de alocação de canais para coexistência de estação base em redes padrão IEEE 802.22 / Wagner Carlos Mariani ; orientador, Manoel – Camilo de Oliveira Penna Neto ; co-orientador, Marcelo Eduardo Pellenz. 2013.

xviii, 100 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2013

Bibliografia: f. 98-100

1. Redes de computação - Normas. 2. IEEE 802.22 – Normas. 3. Algoritmos. 4. Coloração de grafos. 5. Informática. I. Penna, Manoel Camillo de Oliveira. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Informática. IV. Título.

CDD 20. ed. – 004



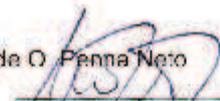
Pontifícia Universidade Católica do Paraná  
Escola Politécnica  
Programa de Pós-Graduação em Informática

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 04/2013**

Aos 08 dias do mês de Março de 2013 realizou-se a sessão pública de Defesa da Dissertação "**Algoritmos de Alocação de Canais para Coexistência de Estação Base em Redes Padrão IEEE 802.22**".apresentado pelo aluno **Wagner Carlos Mariani**, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Manoel Camilo de O. Penna Neto  
PUCPR (Orientador)

  
(assinatura)

APROV.  
(Aprov/Reprov.).

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz  
PUCPR

  
(assinatura)

APROV.  
(Aprov/Reprov.).

Prof. Dr. Edgard Jamhour  
PUCPR

  
(assinatura)

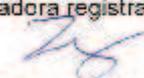
Aprov.  
(Aprov/Reprov.).

Profª. Drª. Michele Nogueira  
UFPR

  
(assinatura)

APROV.  
(Aprov/Reprov.).

Conforme as normas regimentais do PPGIa e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado APROVADO (aprovado/reprovado), segundo avaliação da maioria dos membros desta Banca Examinadora. Este resultado está condicionado ao cumprimento integral das solicitações da Banca Examinadora registradas no Livro de Defesas do programa.

  
Prof. Dr. Fabricio Enembreck  
Diretor do Programa de Pós-Graduação em Informática



**Dedico este trabalho:**  
**A minha esposa Simone Zago**  
**e a memória de meu avô Faustino Mariani**

## AGRADECIMENTOS

Uma dissertação de Mestrado é uma experiência enriquecedora, onde a superação e o desafio são a ordem e nos reinventamos a cada dia e a cada tentativa de buscar soluções, sempre no anseio de ser um pesquisador. Todos aqueles que mesmo minimamente já entraram em contato com este processo, sabem o quanto nos tornamos dependentes de inúmeras pessoas e entidades, que colaboram das mais diversas maneiras para que o seu sonho se realize e algumas pessoas colaboram de uma maneira tão intensa que em certo ponto o sonho de ser mestre deixa de ser um sonho individual e passa a ser um sonho coletivo, o sonho de todas estas pessoas também, as quais o mínimo que posso fazer é ir em frente, e seria imperdoável deixar de delas neste momento.

E como o desafio é a ordem, agora sou novamente desafiado a agradecer a todos. Mesmo sabendo ser quase impossível traduzir em palavras, tudo e todos os que merecem.

Agradeço a minha esposa Simone, que agora espera meu primeiro filho ou filha, que compreendeu minha ausência e vivenciou, sempre ao meu lado todas as experiências deste grande desafio, mesmo quando não pude, devido aos estudo dar-lhe a atenção que merecia.

Também devo meus agradecimentos aos meus pais Vanderlei e Maria Inez, que como se não fosse o bastante, todo o afeto, compreensão e amor com que me criaram desde meu nascimento até aqui, ainda administraram todas as obras que envolveram a construção de minha casa, para que assim eu pudesse dedicar-se aos estudos que me trouxeram até esta dissertação. Meus pais são um exemplo de pessoas, pessoas estas que devo procurar sempre espelhar-me, mas que jamais conseguirei superar.

Devo agradecer ao meu irmão Diego, e sua esposa Ana Cristina, que durante meus estudos, nos dias em que tive que dormir em Curitiba, acolheram-me em sua casa. Muitas vezes ainda, meu irmão, ou sua mulher ausentaram-se de seu trabalho para me ajudar no mestrado de alguma forma, seja para entregar algum documento na Universidade, ou ainda me resgatando no meio de alguma tempestade, para que eu não estivesse molhado durante as aulas ou na vigem de volta para casa, estes são gestos que demonstram o quanto é profundo o significado da palavra “irmão”.

Agradeço aos colaboradores da PUC especialmente aos que estão alocados no ginásio de esportes que sempre foram muito gentis e me acolheram nas madrugadas em que chegava em Curitiba para ir diretamente para as aulas, e também aos colaboradores alocados no bloco II do parque tecnológico, onde fica alocado o PPGIa pois sempre foram gentis e prestativos comigo.

Dentre os colaboradores da PUC, agradeço a todos os meus professores, especialmente aos meus orientadores Manoel Camillo de Oliveira Penna Neto, e Marcelo Eduardo Pellenz, que nas inúmeras vezes que me receberam sempre foram muito profissionais atenciosos e suas orientações mostram-se sabias e assertivas.

Não posso deixar de agradecer a todos os meus colegas alunos de mestrado, que compartilharam com muita proximidade todo o caminho percorrido até aqui.

Agradeço ao SENAI DR Santa Catarina, concessão da bolsa *de* mestrado. E a todos os meus colegas colaboradores do SENAI que me apoiaram, durante meus estudos.

Por fim, porem não menos importante, quero agradecer a Deus, que me iluminou cercado-me destas pessoas tão especiais. Como verdadeiramente diz um provérbio africano "Se quiser ir rápido, vá sozinho; se quiser ir longe, vá acompanhado".

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

*Madre Teresa de Calcuta*

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para a atribuição de canais em redes sem fio cognitivas com base no padrão IEEE 802.22, destacando as redes que se sobrepõem e, que portanto, estão em conflito. Devem ser capazes de alterar suas atribuições de canais para coexistir sem interferir uma com as outras, alterando quando necessário o canal sobre qual os elementos da rede operam. Nesta proposta fez-se o uso do algoritmo de coloração de grafos, com o objetivo de distribuir os canais entre as diferentes redes. Este algoritmo, por sua vez, pode ser executado de três maneiras diferentes: na primeira delas o algoritmo executa uma coloração de grafos atribuindo uma cor para cada rede e, em seguida, reinicia a distribuição até que não seja mais possível atribuir qualquer cor a qualquer rede; na segunda maneira também é distribuído todas as cores possíveis, mas procurando manter a proporcionalidade entre a demanda e o que foi efetivamente entregue; na terceira maneira, executamos a tarefa, atribuindo-se cores somente até o ponto em que é atingida a demanda. Para testar a solução, a proposta foi implementada e comparada como resultado de cada uma das três maneiras entre si e também com a proposta *Utility Graph Colouring* (UGC) de Sengupta et al. (2011). Avaliou-se, nestes testes, a utilidade do espectro por redes padrão IEEE 802.22, a média quadrática de erro e a média quadrática de erro proporcional à demanda. Nestas comparações, conclui-se que a distribuição proporcional à demanda obtém os melhores resultados quando se leva em conta a utilidade do espectro e também tem o menor erro quadrático médio em relação à demanda. Podemos concluir com este estudo que ao utilizarmos esta abordagem para coloração de grafos, associada a técnicas de proporcionalidade, produz-se distribuições válidas de canais para as redes IEEE 802.22. Concluímos também que a utilidade do espectro, ao manter a proporcionalidade entre o demandado e o efetivamente distribuído, em nossa proposta, não é necessariamente prejudicada, especialmente quando esgotam-se os canais disponíveis para distribuição.

**Palavras-Chave:** Coexistência. Coloração de Grafos. Padrão IEEE 802.22. Alocação de canais.

## ABSTRACT

This dissertation presents a proposal for channels allocation channels in cognitive wireless networks based on IEEE 802.22 standard, noting that the networks that overlap and therefore are in conflict, should be able to change their channel assignments to co-exist autonomously by changing the channel on which the network elements operate when required. In this study we propose to use graph coloring algorithm to distribute the channels between the different networks. The proposed algorithms can be performed in three different ways: the first begins by assigning a color to each network and proceeds until it is no longer possible to allocate any color at any network; the second also distributes all possible colors, but keep looking proportionality between the required and delivered; and the third assigns colors only until the demand is satisfied. To test the solution, the algorithm were implemented and compared to each other and also with the proposed Utility Graph Colouring (UGC) of Sengupta et al. (2011). The evaluation was based in the following metrics: the utility of the spectrum, the mean square error between required and assigned bandwidth, and the mean squared error proportional to demand. In these comparisons, we conclude that the distribution proportional to demand gets the best results when taking into account the usefulness of spectrum and also has the lowest mean square error relative to demand. We can conclude from this study that we use the approach to graph coloring, associated with proportionality techniques, it produce valid distributions channels for IEEE 802.22 networks. We also conclude that the usefulness of the spectrum, to maintain proportionality between the defendant and effectively distributed, in our proposal, it is not necessarily impaired, especially when it is exhausted the available channels for distribution.

**Keywords: Coexistence. Graph Coloring. IEEE 802.22 Standard. Channel allocation.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Referência para arquitetura IEEE 802.22. ....	27
Figura 2 - Exemplo de superframe. ....	28
Figura 3 – Exemplo de grafo colorido.....	33
Figura 4 - Exemplo de UGC para IEE 802.22.....	42
Figura 5 – Comunidade de WRAN's operando no padrão 802.22.....	45
Figura 6 – Exemplo de sequencia de escolhas realizadas com base nas equações 2 e 3.....	48
Figura 7 – WRANs interferentes e sua representação em grafos. ....	55
Figura 8 – Grafo já colorido e sua representação .....	56
Figura 9 – Grafo já colorido com mais de uma cor e sua representação em <b>ca</b> .....	57
Figura 10 - Função Principal. ....	62
Figura 11 - Pseudocódigo Função Multi .....	65
Figura 12 - Figura de um processo de atribuição de cores. ....	68
Figura 13 - Pseudocódigo da função Coloração_LF. ....	70
Figura 14 - Pseudocódigo função Coloração_Demanda. ....	73
Figura 15 – Pseudocódigo Coloração Proporcional .....	77
Figura 16 - Utilidade do Sistema em Mhz.....	84
Figura 17 - Média Quadrática de Erro.....	85
Figura 18 - Erro quadrático em função da proporcionalidade.....	86
Figura 19 - Utilidade do sistema em MHz .....	87
Figura 20 - Média quadrática de erro .....	88
Figura 21 - Erro quadrático médio proporcional .....	89
Figura 22 - Utilidade do sistema em MHz .....	90
Figura 23 - Erro quadrático médio .....	91
Figura 24 – Erro quadrático médio proporcional .....	92

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Algoritmo de Coloração Gulosa (G,K) .....	34
Quadro 2 - Algoritmo de Coloração por intercambio de cores (G,K).....	34
Quadro 3 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração RS .....	34
Quadro 4 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração LF .....	35
Quadro 5 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração CS .....	35
Quadro 6 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração RFI.....	36
Quadro 7 – Variáveis e funções da Função Principal.....	61
Quadro 8 - Argumentos recebidos pela função Multi, e variáveis locais.....	65
Quadro 9 - Variáveis e funções locais e argumentos recebidos pela função Coloração_LF....	69
Quadro 10 - Argumentos, variáveis e funções locais da função Coloração_Demanda.....	72
Quadro 11 – Variáveis e funções locais da função Coloração_Proporcional. ....	76
Quadro 12 – Exemplo de resultado esperado .....	82
Quadro 13 - Parâmetros aplicados.....	84
Quadro 14 – Parâmetros aplicados .....	87
Quadro 15 – Parâmetros aplicados .....	90
Tabela 1 – Comunidade de Wrans representada no formato de tabela. ....	45
Tabela 2 – Canais disponíveis para cada WRAN de acordo com a figura 5.....	46
Tabela 3 – Tabela de possibilidades .....	46
Tabela 4 – Tabela de oportunidades .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS

ADOPT	Assynchronous Distributed OPTmization
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
Bmin	Banda mínima há ser disponibilizada
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
BS	<i>Base station</i>
CASS	<i>Coexistence-Aware Spectrum Sharing</i>
CBP	<i>Co-existence Protocol</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipament</i>
CPN	Número de prioridade de contenção
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CS	<i>Connected Sequential</i>
DCAA-O	<i>Distributed Channel Assignment Algorithm – Optimal</i>
DCOP	<i>Distributed Constraint Optimization Problem</i>
DPOP	<i>Distributed Pseudotree Optimazation Procedure</i>
DySPAN	<i>Dynamic Spectrum Access Networks</i>
ECMA	<i>European Computer Manufacturers Association</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	<i>Internet Protocol</i>
LSI-TEC	Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple input Multiple Output</i>
OFDMA	Múltiplos por divisão de frequência ortogonal
PHY	<i>Physical Layer</i>
PSD-DF	Partido Social Democrático – Distrito Federal
QOS	<i>Quality of Service</i>
LF	<i>Largest first</i>
RFI	<i>Resource first interchange</i>
RS	<i>Random sequential</i>
SA	<i>Spectrum automation</i>
SM	<i>Spectrum Manager</i>

SSF	<i>Spectrum Sensing Function</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UGC	<i>Utility Graph Colouring</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

U	total de utilidade do espectro em MHZ
C	conjunto de cores
B	banda designada para cada cor
Y	quantidade de vezes em que a cor está presente.
P	vetor contendo a demanda normalizada das redes
$request_i$	slot times requisitados pela rede
N	número de nós do grafo
n	nó específico no grafo
y	demanda normalizada para determinado nó
<b>cd</b>	matriz contendo as cores disponíveis para cada nó
<b>cd<sub>o</sub></b>	matriz contendo os canais originalmente disponíveis cada nó
<b>cd<sub>t</sub></b>	matriz temporária utilizada para construir uma nova versão multiplexada de <b>cd</b>
<b>cd<sub>t1</sub></b>	Matriz temporária originalmente igual a <b>cd</b> será utilizada construir uma nova versão multiplexada de <b>cd</b>
<b>a</b>	matriz contendo as cores alocadas para cada nó
G	grafo representando as redes sobrepostas
tm	variável representando o tamanho em MHZ das cores
mp	variável contendo a quantidade de multiplexações já realizadas
mp <sub>max</sub>	variável representando o máximo de multiplexação permitido
M	variável que contém o número de cores existentes no problema
<b>dm</b>	vetor contendo a demanda para cada nó de G
<b>dm<sub>x</sub></b>	vetor com a demanda de canais por nó. <b>dm<sub>x</sub>[i]</b> = demanda do nó <i>i</i> , levando em conta se ocorreu alguma multiplexação ( $i = 1, \dots, N$ ).
erro	média quadrática de erro entre a demanda e o distribuído para os nós
<b>dm<sub>nor</sub></b>	vetor contendo a demanda normalizada para cada nó de G
<b>ca<sub>nor</sub></b>	vetor onde armazenamos a demanda normalizada.
erro <sub>nor</sub>	média quadrática de erro normalizado entre a demanda e o distribuído para os nós
T	Variável contendo a quantidade de cores (subcanais) disponíveis para coloração

<i>K</i>	Variável contendo a quantidade de colunas existentes na matriz <b>ca</b>
<i>F</i>	Variável que pode receber os valores 1, 2 ou 3 sendo que 1 indicando que coloração será aplicada no processo
Vizinhos	função que recebe como argumento o grafo (G) e um de seus nós (n) e retorna um vetor com os vizinhos de n;
Numerador	função que recebe como argumento a matriz <b>Cd</b> e o nó que será colorido, retornando um vetor com os números dos canais que estão disponíveis, para este nó
<i>cor</i>	variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor <b>CorDisp</b> .
<i>alvo</i>	variável que indica o nó que deve ser colorido durante esta interação.
<b>ordenado</b>	vetor contendo os nós de <b>G</b> por ordem decrescente de grau.
<b>CorDisp</b>	vetor que contendo as cores (canais) que podem ser utilizados no nó que desejamos atribuir
<b>vi</b>	vetor contendo os nós vizinhos de alvo.
<i>i</i>	variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor <b>vi</b> .
<i>bloqueio</i>	variável que serve como flag, valendo 0 (zero), quando não existem restrições para o uso da cor e 1 quando existem restrições para o uso da cor.
<b>mc</b>	vetor de dimensão <i>N</i> contendo a quantidade de canais já alocada para cada nó do grafo, onde cada elemento representa uma contribuição diferente ao <i>alvo</i> .

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>18</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO .....	18
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 OBJETIVOS .....	20
<b>1.3.1 Objetivo geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>21</b>
1.4 CONTRIBUIÇÃO .....	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>23</b>
<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>23</b>
<b>2 REDES DE ACESSO BASEADAS EM RÁDIOS NAS ÁREAS RURAIS</b> .....	<b>23</b>
2.1 IMPORTÂNCIA DA INTERNET EM ÁREAS RURAIS .....	23
2.2 RÁDIOS COGNITIVOS USANDO PADRÃO IEEE 802.22 .....	25
<b>2.2.1 Métodos de gerência de espectro</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2.2 Auto coexistência (interferência e o problema de alocação de canais)</b> .....	<b>32</b>
2.3 DISTRIBUIÇÃO DE RECURSOS COM BASE EM COLORAÇÃO DE GRAFOS .....	32
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	36
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>38</b>
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>38</b>
3.1 COEXISTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS BASEADOS EM REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS .....	38
3.2 COEXISTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS BASEADOS EM REDES IEEE 802.22	41

3.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TRABALHOS RELACIONADOS .....	49
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>51</b>
<b>4</b>	<b>ALOCAÇÃO DE CANAIS PARA COEXISTÊNCIA DE ESTAÇÕES BASE EM REDES PADRÃO IEEE 802.22.....</b>	<b>51</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	52
4.2	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	54
4.3	DISTRIBUIÇÕES DE CANAIS .....	57
4.3.1	<b>Distribuição de canais .....</b>	<b>57</b>
4.4	O ALGORITMO PROPOSTO .....	60
4.5	CONSIDERAÇÕES .....	78
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>80</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
5.1	FERRAMENTAS UTILIZADAS .....	80
5.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	80
5.3	A REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	83
5.4	SIMULAÇÃO VARIANDO A OCUPAÇÃO POR USUÁRIOS PRIMÁRIOS.....	83
5.5	SIMULAÇÃO VARIANDO A DENSIDADE MÉDIA DOS GRAFOS .....	86
5.6	SIMULAÇÃO VARIANDO A QUANTIDADE DE NÓS DOS GRAFOS.....	90
5.7	CONSIDERAÇÕES .....	93
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>94</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>94</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	94
6.2	TRABALHOS FUTUROS .....	95
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

Um Rádio Cognitivo de acordo com Hossain, Niyato e Han (2009, p. 41-43) é um dispositivo de rádio definido por software capaz de mudar seus parâmetros de transmissão e recepção de acordo com as informações sobre o meio no qual se encontra. O desenvolvimento de rádios cognitivos criou o ambiente necessário para a proposta do padrão IEEE 802.22 WRAN que por sua vez tem como objetivo permitir o compartilhamento do espectro atribuído à difusão televisiva quando ocioso.

A proposta do IEEE 802.22 prevê o uso de frequências tradicionalmente destinadas ao uso de emissoras de TV, mas que em determinados pontos geográficos, esteja ociosa. Este padrão de rádio prevê a distribuição regional de sinal de rádio, podendo alcançar no limite da tecnologia até 100 km de raio.

Para impedir que esta tecnologia acabe por ferir os direitos de usuários primários, uma série de medidas foram tomadas com o intuito de garantir que estes não tenham suas transmissões perturbadas pelo uso desta tecnologia. Entre estas medidas está o uso de um geolocalizador do tipo *Global Positioning System* (GPS) que associado a uma base de dados de usuários primários, garante que o rádio cognitivo no padrão IEEE 802.22 não gere transmissões nas frequências em uso em sua localização.

Nossa proposta concentra-se em propor soluções válidas para a coexistência entre as redes formadas por equipamentos dentro do padrão IEEE 802.22, soluções estas que visem otimizar o uso das frequências disponíveis para as redes dentro deste padrão e que levem em consideração a demanda ao realizar a distribuição das mesmas.

### 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Uma vez que os equipamentos envolvidos em uma WRAN do tipo IEEE 802.22, devem trabalhar em caráter secundário, ou seja, não serão detentores legais de certa faixa de frequência, pode-se acreditar que será possível que em dado momento duas ou mais WRANs diferentes disputem o uso de um mesmo espaço. E todos terão os mesmos direitos como usuários secundários. Deve-se encontrar, portanto, uma forma de resolver esta disputa pelo

uso do espaço disponível, caso contrário, incorre-se no risco de duas ou mais WRANs, operarem na mesma faixa de frequência, prejudicando a troca de informações.

A coexistência consiste em criar meios para as diferentes WRANs operarem de forma harmoniosa, evitando que os operadores enviem sinal ao mesmo tempo nas mesmas frequências, sempre que estes sinais possam prejudicar a comunicação de equipamentos vizinhos. Se existirem canais suficientes, uma solução natural pode ser alocar diferentes canais para diferentes WRANs, ou seja, alocar canais em diferentes porções do espectro para WRANs diferentes.

A proposta deste padrão envolve também uma série de equipamentos que além de manter a conectividade realizam um sensoriamento no ambiente da WRAN e trazem dados que podem ser usados como fatores para a decisão no uso do espectro. O uso de faixas de frequências pelos transmissores primários, como transmissões de TV ou microfones sem fio, tem preferência sobre as redes no padrão IEEE 802.22, e a presença destes transmissores em certo canal, deve impedir o uso do mesmo por outras redes. Portanto a presença de um usuário primário dentro de uma área geográfica pode influenciar a operação de uma ou várias redes IEEE 802.22.

Ainda de acordo com Cordeiro, Challapali e Birru (2006) poderemos ter o uso de múltiplos canais por uma WRAN, fazendo assim uma combinação destes quando necessária para atender a demanda e requisitos de *Quality of Service* (QOS).

Levando em conta estes fatores, torna-se evidente a existência de um problema de atribuição entre as diversas WRAN onde se deseja aproveitar as diversas variáveis obtidas através dos sensores para alocar recursos. Demonstraremos neste trabalho que esta alocação de recursos pode ser resolvida usando algoritmos de coloração de grafos, e que a coloração de grafos, pode ser utilizada de maneira a manter a proporcionalidade entre a demanda e o distribuído, utilizando estratégias que alteram a sequência dos nós a serem coloridos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Acreditamos que a tecnologia IEEE 802.22 pode contribuir para o combate ao êxodo rural e este é um forte fator que nos motiva a desenvolver este trabalho.

Podemos entender o êxodo rural como sendo o deslocamento de pessoas da zona rural (campo) para a zona urbana (cidades). O êxodo rural provoca, na maioria das vezes,

problemas sociais. Cidades que recebem grande quantidade de migrantes, muitas vezes, não estão preparadas para tal fenômeno.

Alguns motivos que podem fazer com que os habitantes saiam da zona rural para as grandes cidades são: busca de empregos com boa remuneração, necessidade de infraestrutura e serviços públicos.

Embora vários destes motivos saiam do alcance dessa dissertação, podemos com toda a certeza nos empenhar em melhorar a infraestrutura, diminuindo assim um dos fatores que levam ao êxodo rural. Neste sentido, o governo federal lançou em 2003 o programa “Luz Para Todos”, que tinha como objetivo erradicar a exclusão elétrica no Brasil até o ano de 2011, melhorando assim a infraestrutura no campo (ETGES; WERNER; WEBER,2013).

Agora, o Programa Nacional de Telecomunicações Rurais, parte do Plano Nacional de Banda Larga, tem como objetivo disponibilizar *Internet* de Banda larga nas regiões de baixa densidade demográfica (BRASIL. Ministério das Comunicações). Com o objetivo de ampliar ainda mais a infraestrutura disponível ao homem do campo, e conseqüentemente reduzindo os fatores motivadores do êxodo rural (ETGES; WERNER; WEBER,2013).

Sendo assim, nos parece muito motivador, apresentar sugestões que possam contribuir para resolver um problema, o de resolução de conflitos de coexistência, no padrão, IEEE 802.22, que se propõe a oferecer meios de atender a esta demanda.

Neste trabalho leva-se em conta que as informações levantadas pelo sensoriamento dos rádios cognitivos no padrão IEEE 802.22 podem, quando adequadamente tratadas, gerar uma alocação ótima de canais.

### 1.3 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos propostos para a pesquisa.

#### 1.3.1 Objetivo geral

Propor uma solução para os conflitos existentes entre os dispositivos de comunicação em áreas de sobreposição de sinais em WRANs usando o IEEE 802.22, levando em conta as informações levantadas pelo sensoriamento do espectro, mantendo quando possível a proporcionalidade entre a necessidade de banda e o efetivamente entregue.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- a) Propor uma solução que procure distribuir canais para as diferentes WRANs;
- b) Encontrar uma forma de permitir que o conjunto de WRANs consiga trabalhar mesmo em situações onde não existem canais exclusivos para cada uma;
- c) Propor estratégias de distribuição para os canais excedentes no espectro;
- d) Comprovar que o uso de algoritmos de coloração de grafos podem encontrar soluções válidas e competitivas;
- e) Avaliar a eficiência da metodologia proposta através de simulação;
- f) Comparar os resultados obtidos com os obtidos através de outras propostas, sob o ponto de vista do melhor aproveitamento das faixas de espectro disponíveis.

## 1.4 CONTRIBUIÇÃO

A principal contribuição deste trabalho está no uso de coloração de grafos para distribuir múltiplos canais necessários para se operar em WRAN dentro do padrão IEEE 802.22. Sengupta et al. (2011) também sugerem o uso de coloração de grafos para tal. Seu trabalho limita-se, no entanto, a ambientes onde todas as WRANs possuem a mesma disponibilidade de canais. Para nosso trabalho levamos em conta a hipótese da existência de ambientes onde a disponibilidade de canais não é a mesma para todas as WRANs.

Ainda propomos distribuir canais levando em conta a demanda do sistema por espaços no espectro eletromagnético disponível. Para isso criamos três algoritmos de coloração de grafos. O primeiro distribui canais de maneira proporcional à demanda, o segundo distribui canais somente até atingir a demanda, e para situações onde não seja desejado observar a demanda, o terceiro que não considera esses fatores.

Tanto quanto nos foi possível investigar, não existe nenhum estudo científico que proponha um método para alocação de canais em WRANs dentro do padrão IEEE 802.22 que utilize técnicas de coloração de grafos, mas que ao mesmo tempo respeite as demandas por banda, e as características do ambiente, que podem levar a disponibilidade de conjuntos de canais diferentes entre as WRANs interferentes entre si.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo o trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 discutimos as referências bibliográficas que servirão de **embasamento teórico** para a pesquisa; considerando aspectos como a importância das redes sem fio para áreas rurais; o padrão proposto pela IEEE 802.22; os algoritmos de coloração de grafos e algumas estratégias clássicas de coloração. No Capítulo 3 discutimos **os trabalhos relacionados** a esta área de pesquisa. No Capítulo 4 apresentamos a **proposta deste trabalho**, detalhando a nossa contribuição. O Capítulo 5 trata dos **experimentos realizados** para validar a proposta e seus respectivos **resultados**. No Capítulo 6 são feitas **conclusões** e sugestões para **trabalhos futuros**.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

#### 2 REDES DE ACESSO BASEADAS EM RÁDIOS NAS ÁREAS RURAIS

Neste capítulo temos como objetivo apresentar um embasamento teórico sobre a importância da Internet em áreas rurais, bem como rádios cognitivos, que podem ser usados para levar a Internet para áreas rurais, especialmente no padrão IEEE 802.22 sobre o qual fundamentamos nossa proposta. Por fim, discutimos sobre coloração de grafos, que é uma técnica conhecida na área de computação que pode nos ajudar com a questão da coexistência entre diferentes redes operando neste padrão.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção **2.1 discutimos a importância da Internet em áreas rurais**; na seção **2.2**, abordamos diversas **características** técnicas existentes no **padrão IEEE 802.22**; na seção **2.3** discutimos a **coloração de grafos**, algumas de suas propriedades e técnicas de coloração existentes na bibliografia. Por fim, na seção **2.4** são feitas algumas **considerações** sobre o capítulo.

##### 2.1 IMPORTÂNCIA DA INTERNET EM ÁREAS RURAIS

A importância do acesso a Internet tem ganhado tal proporção que recentemente o senador Rodrigo Rollemberg (PSB-DF), apresentou uma proposta de emenda constitucional (PEC 6/11) que visa estabelecer o acesso à Internet como um direito social.

O desfrute de muitos direitos do cidadão, como o da informação, o da educação, o do trabalho e o da remuneração digna, depende cada vez mais do acesso às novas tecnologias de informação e comunicação. Daí a necessidade de incluir tal acesso como um direito constitucional, afirma Rollemberg (BRASIL, 2011).

Existem no Brasil, mesmo antes da proposta do senador, inúmeros projetos visando à inclusão digital. Segundo o Ministério das Comunicações, desde 2005 o governo investiu 502,9 milhões de reais em projetos de inclusão digital.

O governo ainda quer levar os serviços de Internet e telefonia celular para as regiões rurais do país. Em julho de 2009, o Ministério das Comunicações instituiu o Programa Nacional de Telecomunicações Rurais para permitir à população das áreas rurais o acesso a esses serviços.

A portaria determina que a prestação dos serviços deva privilegiar o uso de frequências na faixa de 450 a 470 MHz. A autorização para o uso dessas radiofrequências seria condicionada a obrigações por parte das empresas, como iniciar o atendimento em 2010 e garantir a cobertura total em até cinco anos (BRASIL, 2010).

No entanto, infelizmente, o programa Nacional de Telecomunicações Rurais até agora não obteve avanços, nem mesmo no leilão das faixas previstas para a operação. O governo tentou até mesmo contratar conexões por satélite para atender esta demanda, infelizmente, também sem sucesso uma vez que não existe banda de satélite suficiente nem mesmo para atender as 75 mil escolas públicas que fazem parte deste programa (BERBERT, 2010).

Aparentemente, existe um empenho no governo brasileiro em disponibilizar redes de computadores em especial a Internet a toda a população. De fato existem motivadores econômicos para isto, segundo o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento (BIRD), uma alta de 10 pontos percentuais da taxa de conexões à Internet de banda larga é acompanhada por um maior crescimento econômico de 1,38 pontos percentual (BIRD..., 2010).

No entanto, em um país com dimensões continentais como o Brasil, a inclusão digital, em especial o acesso à banda larga, pode exigir além de vontade política, o desenvolvimento ou amadurecimento de tecnologias que viabilizem o atendimento desta demanda, nestas condições.

Neste sentido, as tecnologias de rádio cognitivo têm despertado o interesse de alguns segmentos da sociedade, como um indutor necessário para a inclusão digital, inclusive em meios rurais.

A Microsoft, por exemplo, assinou em 2010 um acordo com a Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações de Campinas visando o desenvolvimento de tecnologias para rádios cognitivos. O presidente da Microsoft Brasil Michel Levy, afirma que esta iniciativa se deve por que "A Microsoft Brasil está comprometida em apoiar o governo brasileiro a expandir o acesso à banda larga no País" (CPqD, 2010).

A *IC Desing House* Nordeste, núcleo de pesquisas do Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico Nordeste – LSI-TEC obteve benefício financeiro do Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica do Estado da Bahia (INOVATEC), para desenvolvimento do projeto “Rádio Cognitivo em Circuito Integrado para Banda Larga Rural”. O objetivo do projeto Banda Larga para Área Rural, aprovado pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação da Bahia, é o desenvolvimento de protótipos de equipamentos para provisão do Sistema de Rádio Cognitivo no novo padrão IEEE 802.22, desenvolvido especificamente para banda larga de áreas rurais com baixa densidade populacional (BANDA..., 2011).

Os tradicionais meios de comunicações como fibra óptica e cabos metálicos podem não ser os mais adequados para a distribuição de rede em meios de baixa densidade demográfica como os meios rurais, pois, a capilaridade necessária para atingir os habitantes destas áreas demandaria uma enorme malha de distribuição das redes. Como os custos desta instalação podem se tornar proibitivos, as soluções por meios sem fio têm sido apontadas como uma alternativa que pode abstrair este problema.

## 2.2 RÁDIOS COGNITIVOS USANDO PADRÃO IEEE 802.22

Um Rádio Cognitivo é um dispositivo de rádio definido por software capaz de mudar seus parâmetros de transmissão e recepção de acordo com informações sobre o meio no qual se encontra, como por exemplo, condições de utilização do espectro de radiofrequência, comportamento dos usuários e condições de utilização da rede, para garantir mais eficiência e menos interferência entre dispositivos, proporcionando assim uma melhor experiência ao usuário (MITOLA III; MAGUIRE JR., 1999).

O conceito de rádio cognitivo foi inicialmente definido pela comunidade de estudos de rádios definidos por software, mas desde então se tornou um campo de estudo independente.

Regulamentações e propostas para o aproveitamento no uso das frequências ociosas dentro do espaço tradicionalmente destinado a operadoras de TV por tecnologias que operam em caráter secundário, tais como, IEEE 802.11af, IEEE 802.19, ECMA TG1, e ECMA 392, além do IEEE 802.22 abordado em nossa proposta podem ser vistas em Ghosh, Roy e Cavalcanti (2011).

Os conceitos a seguir foram extraídos de Cordeiro e colaboradores (2006), Stenvenson e Shellhammer (2009) e da norma IEEE Standart 802.22 (IEEE Institute of Electrical and Electronics engineers, 2011).

Em dezembro de 2002 a *Federal Communications Commission* (FCC) nos Estados Unidos divulgou um documento tratando da possibilidade de explorar bandas de transmissão VHF e UHF para acesso a redes de Banda Larga.

Com baixos níveis de ruídos e reflexões ionosféricas as bandas de transmissão para TV são ideais para a cobertura de grandes áreas pouco povoadas.

Desde 2005 o IEEE começou a realizar a DySPAN que é a Conferência Anual em Redes de Acesso Dinâmico ao Espectro.

Uma área específica do campo de rádio cognitivo é a área de acesso ao espectro dinâmico em que uma rede de rádio cognitivo identifica dinamicamente e utiliza porções do espectro que não estão sendo usadas por outros sistemas.

Estas parcelas são chamadas na literatura como espaços em branco e podem consistir por frequências não utilizadas ou não utilizadas por certo período de tempo.

O desenvolvimento do IEEE 802.22 WRAN é destinado ao uso de técnicas de rádio cognitivo para permitir o compartilhamento do espectro ocioso atribuído à difusão televisiva, que pode servir como base para levar a banda larga a áreas de baixa densidade populacional.

O IEEE 802.22 é projetado para operar na mesma banda da TV, ou seja, entre 54 e 862 MHz, porém assegurando que não existirá nenhuma interferência.

Também é de competência da difusão televisiva o uso de equipamentos de baixa potência nesta mesma banda, como microfones sem fio. O rádio cognitivo, segundo Kim e Kang (2010), deve então observar o seu ambiente e alterar suas características para manter em conformidade com a premissa de que não irá gerar interferências a estes serviços.

Embora existam vários métodos que podem ser usados por uma rede de rádios cognitivos, apenas dois deles são utilizados no IEEE 802.22, sendo eles o Banco de Dados de geolocalização e a detecção de espectro.

Atualmente o uso destas faixas é reservado apenas a estes equipamentos, a operação nestas faixas é controlada pelas agencias regulamentadoras, e o uso mesmo que temporário, deve ser requisitado com antecedências a estas agências.

A operação cognitiva ainda depende de regulamentação. A migração dos canais de TV para a tecnologia digital deve ter como consequência a diminuição de operadores primários nestas faixas.

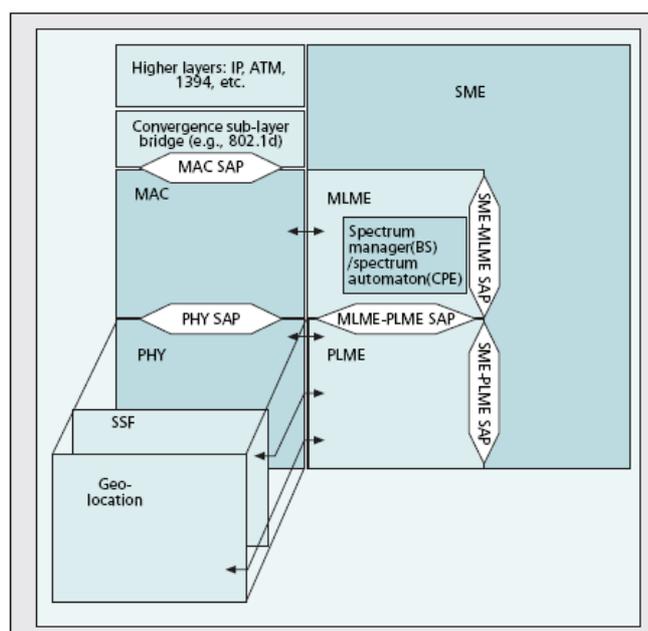
O projeto de difusão do rádio cognitivo prevê o uso de ao menos dois tipos de equipamentos. O primeiro deles é a Estação Base, *Base Station* (BS), que deverá atender um raio de 17 a 33 km podendo alcançar até 100 km servindo a até 255 clientes. A vazão mínima

entregue estes clientes é projetada para ser equivalente a um enlace T1, ou seja, 1,5 Mbps de Download e 384 Kbps de *Upload*. Com esta taxa será possível garantir serviços de videoconferência. O segundo equipamento é o chamado equipamento dentro das instalações do cliente (*Customer Premises Equipment - CPE*). Seu uso prevê antenas externas a 10 metros do solo assim como é feito com as transmissões de TV.

Ao cobrir estas grandes distâncias esta rede deve prever atrasos maiores do que o comumente encontrado em outros padrões 802, neste caso, para uma área de 100 km o IEEE 802.22 pode suportar uma latência de até 37 $\mu$ s.

Para organizar todos estes serviços desde a camada de enlace de dados até a entrega da comunicação para as camadas superiores como *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) ou Internet Protocol (IP), por exemplo, o padrão foi dividido em subcamadas conforme a Figura 1 (Referência para arquitetura IEEE 802.22).

Figura 1 - Referência para arquitetura IEEE 802.22.

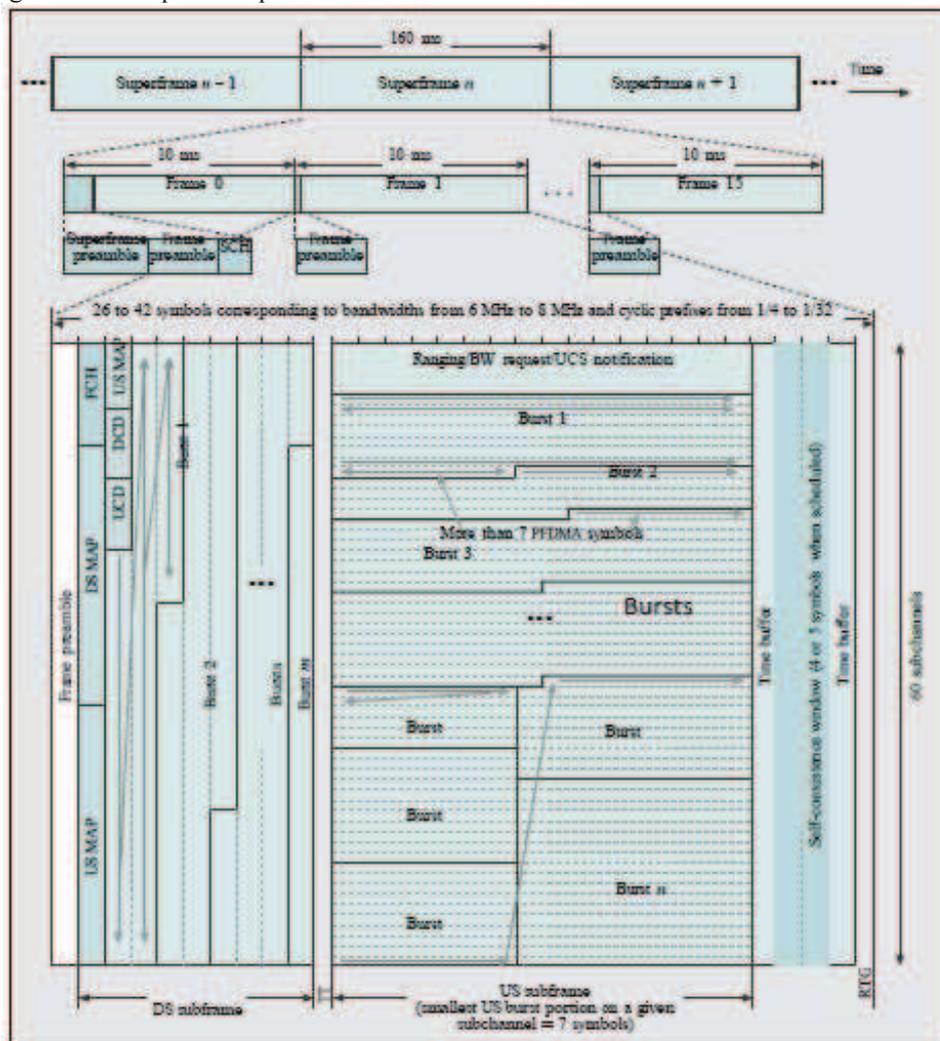


Fonte: STENVENSON; SHELLHAMMER (2009, p. 131).

Partindo das camadas superiores como o IP, encontramos primeiramente a subcamada de convergência, onde se propõe a aplicação de algum algoritmo do tipo *spaning-tree* como, por exemplo, o 802.1d, cujo uso já é difundido em redes ethernet, e cuja função principal é evitar *loops* lógicos em redes comutadas além de determinar qual é o caminho mais eficiente.

A subcamada imediatamente inferior é a subcamada *Media Access Control* (MAC). A função da camada MAC é oferecer mecanismos flexíveis e eficientes para a transmissão de dados. A camada MAC definida pelo IEEE 802.22 é aplicável a qualquer região do mundo, não necessitando de configurações específicas para cada país. Na subcamada MAC são tratados aspectos como a transmissão de dados e a criação de *super-frames*, que são compostos de 16 frames de 10 ms cada, como pode ser visto na Figura 2. O preâmbulo do *super-frame* traz também um mapa de *upstream* e *downstream*, permitindo assim calcular a demanda de determinada WRAN e atender requisitos de QOS, além de viabilizar a inicialização de Redes e a Coexistência Segura.

Figura 2 - Exemplo de superframe.



Fonte: IEEE Standard for Wireless Regional Area Networks. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands (2011, p. 29).

Em seguida temos a Subcamada PHY. Esta camada tem três funções primárias, a comunicação de dados, a função de detecção de espectro – *Spectrum Sensing Function* (SSF), e a geolocalização, estas duas últimas fornecendo a funcionalidade necessária para apoiar o sistema cognitivo. Além disto, nas BSs existe uma entidade funcional chamada de *Spectrum Manager* (SM), e nas CPEs uma entidade de mesmo nível é chamada de *Spectrum Automation* (SA). Esta diferença entre BS e CPE existe porque poderemos determinar a mudança de canais apenas pelas BSs, enquanto as CPEs através da SA apenas analisam o espectro e enviam os resultados para a BS tomar a decisão. A SA também é responsável pelos comportamentos autônomos no caso de se perder o contato com o BS ou ainda durante a inicialização.

Por fim, temos os tratamentos da camada física. Esta camada deverá se estender nas faixas de 54 a 862 MHz e sua atuação, portanto, abrange inclusive a faixa de 450 a 470 MHz, previsto pelo Programa Nacional de Telecomunicações Rurais, do Ministério das Comunicações do Brasil, incluso no plano nacional de banda larga.

Os rádios no padrão 802.22 irão trabalhar com uma interface transportadora baseada em múltiplos acesso por divisão de frequência ortogonal (OFDMA). Num primeiro momento o sistema irá trabalhar em *Time Division Duplex* (TDD), ou seja, usará uma única frequência para transmitir e receber dados, dividindo o mesmo entre intervalos de transmissão e recepção. Embora já existam planos para uma expansão usando a tecnologia FDD (*Frequency Division Duplex*), onde teremos uma frequência para transmitir e outra para receber.

A quantidade de canais disponíveis é a mesma dos canais disponíveis para TV, o espaçamento entre os canais também deverão obedecer às normas de TV, que podem variar de um país para o outro, ou seja, poderemos ter canais de 6,7 ou 8 MHz dependendo da região do mundo. Cada canal será subdividido em 60 subcanais.

Uma rede padrão IEE 802.22 pode agrupar até três canais criando com o objetivo de aumentar a banda de transmissão.

### **2.2.1 Métodos de gerência de espectro**

Como citado anteriormente, o padrão IEEE 802.22 deve evitar a interferência com os transmissores primários. Ao localizar este tipo de interferência, poderemos tomar uma destas quatro atitudes:

- a) Limitar a potência da transmissão dos CPEs, conseqüentemente limitando o alcance de seu sinal;
- b) Caso esta limitação comprometa o acesso por meio de seus CPEs, desconectar os mesmos para que estes procurem outro BS;
- c) Reduzir a potência do BS, visando eliminar a interferência;
- d) Se não for possível para os CPEs prejudicados conectarem-se a outro BS, o conjunto, então, deve iniciar uma movimentação no espectro para outro canal.

Estes métodos serão aplicados na subcamada MAC através do SSF e do Banco de Dados de geolocalização, visando garantir a coexistência com emissores primários de TV Analógica Digital e *links* externos licenciados.

Para o correto uso do Banco de Dados de geolocalização é necessário que se tenha a correta localização do BS e de todos os CPEs associados e para cumprir com este requisito, todos os dispositivos devem ser equipados com um sistema de localização do tipo GPS.

Ao ligar uma nova CPE, esta deve obter sua posição através do GPS para só então realizar tentativas de associar-se a um BS, que deve manter também um banco de dados histórico com a localização precisa não apenas dos transmissores primários, mas também de outras operações de equipamentos no padrão IEEE 802.22.

Quando a CPE tentar conectar-se com um BS, este deverá utilizar estas informações para adequar-se a este novo usuário podendo inclusive tomar uma ou mais das atitudes citadas acima.

Além do uso do Banco de Dados de geolocalização, o padrão prevê uma função de sensoriamento de espectro SSF, tanto dos BSs quanto nos CPEs, cujo objetivo é detectar transmissões de TV e *links* externos licenciados como microfones sem fio, por exemplo.

Este sensoriamento é baseado em quatro aspectos: o primeiro é o sensoriamento por canal, onde a norma não determina se deve ser testado de forma independente ou se podemos testar mais de um canal por vez; o segundo aspecto é a análise dos períodos de silêncio, onde o canal, que até então estava sendo usado para a transmissão será sensoriado em busca de usuários primários. Neste período BSs poderão sincronizar-se com outros BSs ou até mesmo agendar uma interrupção dos serviços com os CPEs. O terceiro é a padronização dos relatórios do estado do espectro para que as mensagens possam ser devidamente interpretadas e tratadas e, por fim, a liberdade para implementar qualquer técnica de sensoriamento contanto que sejam obedecidos os parâmetros técnicos da norma IEEE 802.22.

Quanto ao sensoriamento do espectro diversos estudos científicos foram desenvolvidos nos últimos anos.

Em YÜCEK e ARSLAN (2009), nos resume que a maioria, porém nem todos, os métodos de sensoriamento de espectro baseiam-se em umas das cinco estratégias que seguem abaixo:

O sensoriamento baseado em detecção de energia, também conhecido como radiometria ou periodograma, onde o sinal é detectado através da comparação da saída do detector de energia com um valor de base, que varia de acordo com a tolerancia ao ruído.

O sensoriamento baseado no formato da onda, onde se compara o sinal recebido com padrões já conhecidos.

Com o sensoriamento baseado no ciclo estacionário, onde características de periodicidade do sinal ou estatísticas desta periodicidade são usadas para detectar a presença de sinais.

Com sensoriamento baseado em características de identificação de rádio, onde as características, inclusive temporais, de padrões de transmissões conhecidas são comparadas com o sinal recebido.

Com o sensoriamento baseado em filtragem combinada, onde certos padrões específicos são testados com o objetivo de atestar sua presença.

Sob outro aspecto ainda segundo YÜCEK e ARSLAN (2009) podemos classificar um método de sensoriamento como sendo centralizado, ou distribuído.

Dentro destas estratégias, LEE, YOON e KIM (2007) propõe um método de sensoriamento de espectro baseado em ciclos estacionários que toma como base um cálculo de autocorrelação de sinais detectados na análise do espectro, e tem como objetivo aumentar a sensibilidade na detecção de espaços disponíveis para a transmissão.

HAYKIN, THOMSON e REED (2012) propõe também um método de sensoriamento de espectro baseado em ciclos estacionários, chamado MTM este método é baseado em estatísticas não paramétricas. Em seu trabalho realizam-se os sensoriamentos na busca de concentrações de energia em certas larguras de banda e em determinado espaço amostral finito.

DHOPE e SIMUNIC (2009) propõe um método de detecção híbrido para redes no padrão IEEE 802.11af com características de métodos de detecção de energia e métodos de covariância de valor absoluto, que tem como objetivo melhorar a detecção de espaços em branco nos sinais de TV.

### 2.2.2 Auto coexistência (interferência e o problema de alocação de canais)

Enquanto muitos outros padrões IEEE 802 deixam questões de coexistência para serem tratadas depois de prontos, o padrão IEEE 802.22 deseja levar em consideração esta questão ainda em sua implementação. Isto faz especialmente sentido se levarmos em conta que o padrão é escrito para dar cobertura em uma área de até 100 km, seu alcance é maior que as tecnologias sem licenças existentes, e ao contrário de tecnologias como o celular, não existe uma banda dedicada do espectro, organizada para cada operador. Também podemos assumir que em uma rede desta natureza, seja aceitável gastarmos certo tempo durante a inicialização para a sincronização entre os elementos envolvidos.

Já o IEEE 802.22, tanto levando em conta o BS como seus CPEs, trabalha de forma oportunista aproveitando espaços ociosos do espectro, convivendo tanto com usuários primários como com outros provedores do mesmo serviço. Uma vez que os provedores podem ser companhias independentes não podemos garantir que existirá um acordo mutuo para a coexistência no espectro de forma voluntária.

No projeto atual da norma, quando as WRANs têm de trabalhar no mesmo canal, a sincronização é obtida pela transmissão entre BSs de *beacons* contendo *time-stamps* que são chamados de protocolo de *beacons* de coexistência CBP (*Co-existence Beacons Protocol*). Estes *beacons* podem ser encaminhados inclusive usando CPEs como pontes. Quando um BS recebe um *beacon* de coexistência, de um vizinho ele pode ajustar o tempo de início de seus *superframes* de acordo com regras pré-estabelecidas.

O problema de auto coexistência em WRANs também tem recebido grande atenção da comunidade científica, sendo discutido na seção 3.

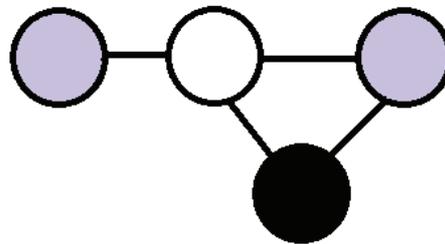
## 2.3 DISTRIBUIÇÃO DE RECURSOS COM BASE EM COLORAÇÃO DE GRAFOS

No contexto das WRANs, um canal (ou subcanal) pode ser visto como uma porção do espectro disponível para transmissão. Quando nos deparamos com uma distribuição de canais entre WRANs que podem transmitir usando canais que se sobrepõem, estamos diante de uma situação na qual podemos aplicar a teoria de coloração de grafos.

De acordo com Gardin e Hernandez (2008) a coloração de grafos é um problema de otimização combinatória, pois requer a gerência de determinado recurso.

O problema de coloração de grafos é comumente discutido em Teoria dos Grafos, devido a sua relevância em campos práticos e teóricos. Esse problema pode ser definido como um problema de achar o menor número de cores  $k$ , tal que exista uma  $(k)$ -coloração do grafo  $G$ , ou seja, a atribuição de  $k$  cores a cada um dos nós de  $G$ , sem que nós adjacentes recebam a mesma cor. Este número mínimo de cores  $k$ , é denominado número cromático de  $G$ . Um exemplo de grafo colorido pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Exemplo de grafo colorido



Fonte: o autor.

Do ponto de vista teórico, o problema de coloração em grafos encontra-se na classe NP-completo, logo é pouco provável que ele possa ser resolvido de maneira exata em tempo polinomial. Do ponto de vista prático, os algoritmos exatos existentes atualmente se tornam inviáveis conforme se aumenta o número de vértices do grafo, e até mesmo para grafos relativamente pequenos, esses métodos extrapolam, em geral, limites de tempo aceitáveis (LOZANO, 2007).

Esta característica levou a criação de vários algoritmos sub-ótimos que devido a sua larga aplicação ou ao tempo em que foram publicados são conhecidos como clássicos. Estes algoritmos podem ter sua aplicação variada e a opção entre eles pode levar em conta fatores como a complexidade computacional ou a disponibilidade de recursos no ambiente.

Kosowsk; Manuszewski (2004) descrevem vários algoritmos considerados clássicos e sugerem o uso de uma função de coloração gulosa, que em sua forma básica pode ser definida no pseudocódigo no Quadro 1 (Algoritmo de Coloração Gulosa( $G,K$ )), ou então de uma função de coloração com intercâmbio de cores que pode ser vista no pseudocódigo no Quadro 2 (Algoritmo de Coloração por intercâmbio de cores ( $G,K$ ), como parte da implementação destes algoritmos. Temos que  $K = \{v_1, \dots, v_n\}$  é o conjunto de vértices do grafo  $G$ .

Quadro 1 - Algoritmo de Coloração Gulosa (G,K)

- |    |  |
|----|--|
| 1. | <b>Início</b>                                      |
| 2. | <b>Para</b> $v = v_1$ <b>até</b> $v_n$ <b>Faça</b> |
| 3. | Entregue ao nó $v$ a menor cor possível            |
| 4. | <b>Fim Para</b>                                    |
| 5. | <b>Fim</b>   |

Fonte:

KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

Quadro 2 - Algoritmo de Coloração por intercambio de cores (G,K)

- |    |  |
|----|--|
| 1. | <b>Início</b>  |
| 2. | <b>Para</b> $v = v_1$ <b>até</b> $v_n$ <b>faça</b>                 |
| 3. | <b>Se</b> $v$ requisitar uma nova cor                              |
| 4. | tente trocar as cores de $G$ , a fim de liberar uma delas para $v$ |
| 5. | entregue ao nó $v$ a menor cor possível                            |
| 6. | <b>Fim Se</b>  |
| 7. | <b>Fim Para</b>  |
| 8. | <b>Fim</b>   |

Fonte: KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

Segundo Kosowsk; Manuszewski (2004), em todos estes métodos considerados clássicos, a aplicação da coloração é combinada com uma ordenação dos nós a serem coloridos. Alguns métodos considerados clássicos serão vistos abaixo.

O algoritmo conhecido como RS (*random sequential*), ou algoritmo ingênuo, escolhe qualquer ponto do grafo e verifica com os vizinhos se a cor atribuída não gera conflito, em caso negativo, atribui-se outra cor e repete-se o processo. O pseudocódigo deste método está representado no Quadro 3.

Quadro 3 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração RS

- |    |  |
|----|--|
| 1. | <b>Início</b>  |
| 2. | $K =$ a sequência randômica de nós existentes em $G$ |
| 3. | Coloração Gulosa(G,K)                                |

4. <b>Fim</b>
---------------

Fonte: KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

Outro exemplo de Kosowsk; Manuszewski (2004) demonstra a coloração do tipo LF. O Método LF está baseado na observação de que vértices de baixo grau geralmente permitem uma escolha mais flexível de cores e, por isso, é natural colorir os outros vértices primeiro.

O algoritmo é muito semelhante ao RS com a diferença que os nós a serem testados são dispostos em ordem decrescente da quantidade de arestas conectadas ao nó. O pseudocódigo deste método está apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração LF

- |   |
|---|
| 1. <b>Início</b>  |
| 2. $K =$ a sequência decrescente de nós existentes em $G$ |
| 3. Coloração Gulosa( $G, K$ )                             |
| 4. <b>Fim</b>   |

Fonte: KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

Outro algoritmo tido pelo autor como clássico é o método CS, cujo qual escolhe o próximo nó a ser colorido em ordem decrescente de arestas, porém, apenas entre os vizinhos do nó que acabou de ser colorido.

Quadro 5 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração CS

- |   |
|---|
| 1. <b>Início</b>  |
| 2. $K =$ Os nós em $G$ são ordenados de tal forma que todo nó $V$ tem ao menos um vizinho na parte anterior da sequência (exceto o primeiro); |
| 3. Coloração Gulosa ( $G, K$ )  |
| 4. <b>Fim</b>   |

Fonte: KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

O algoritmo RFI é uma variação do algoritmo LF, pois os nós são organizados de maneira decrescente segundo o número de arestas e em seguida coloridos. Porém, coloração não é gulosa e, sim, por intercâmbio de cores. Com esta abordagem podemos, em alguns tipos

de grafos, economizar no uso de cores. O pseudocódigo deste método pode ser visto em Quadro 6.

Quadro 6 – Pseudo-código de coloração usando os princípios de coloração RFI

1.	<b>Início</b>
2.	K= a sequencia decrescente de nós existentes em G
3.	Coloração por intercâmbio de cores(G,K)
4.	<b>Fim</b>

Fonte: KOSOWSK; MANUSZEWSKI (2004)

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram discutidas as principais características de rádios cognitivos especialmente sobre as redes que operam no Padrão IEEE 802.22 e suas características. Durante a pesquisa vários itens importantes para nossa proposta foram observados. Quanto ao padrão IEEE 802.22 relacionamos abaixo os principais pontos a serem considerados:

- As redes preparadas para operar no padrão IEEE 802.22 devem operar de maneira oportunista sobre o mesmo espaço de radio frequências destinado as emissoras de TV VHF e UHF, porem, operando de maneira a não causar interferência aos operadores primários;
- As redes no padrão IEE 802.22, são do tipo WRAN, *Wireless Area Network*, e são formadas por, no mínimo, um BS e um CPE;
- A estrutura dos superframes existentes na camada MAC no padrão IEEE 802.22, possuem um campo para um mapa de *Upstream* e *Downstream* isto nos permite concluir que com base nestes mapas podemos conhecer a demanda por espaços no espectro eletromagnético para atender esta demanda;
- As redes IEEE 802.22 possuem um sistema de geolocalização tipo GPS, associado a uma base de dados de operadores primários que impedem as redes de operarem sobre as radio frequências destinadas a estes últimos;
- Além da geolocalização, os equipamentos que compõem as redes IEEE 802.22 realizam processos de sensoriamento, que combinados com períodos sem transmissão, que permitem localizar operadores primários e temporários como microfones sem fio e

quando estes forem localizados, toda a WRAN estará impedida de operar neste espaço de frequências;

- Para atender estas duas últimas premissas, podem existir momentos onde diferentes WRANs tenham que realizar uma movimentação no espectro para outro canal;
- Deseja-se que o padrão IEEE 802.22 resolva conflitos de coexistência de maneira autônoma, portanto, quando ocorrerem estas movimentações é preciso que todas as redes sobrepostas adaptem-se a esta nova realidade;
- Por conta de operadores primários podemos entender que nem todas as WRANs terão os mesmos canais disponíveis.

Este capítulo também nos trouxe uma abordagem sobre coloração de grafos e estratégias consideradas clássicas para sua aplicação e podemos concluir com base neste capítulo que:

- A coloração de grafos encontra-se na classe NP-completo, logo, não sabemos se ele pode ser resolvido de maneira exata em tempo polinomial;
- Nos algoritmos exatos existentes para a coloração de grafos, à medida que aumenta-se o tamanho dos grafos, tornam-se inviáveis devido ao tempo de execução ou ao espaço de memória consumido;
- A coloração de grafos normalmente é composta por duas etapas: na primeira etapa define-se a ordem com que os nós de um grafo serão coloridos e na etapa seguinte executa-se a coloração dos nós;
- A coloração dos nós nas estratégias mais conhecidas pode ser realizada de maneira gulosa ou por meio de um intercâmbio de cores;
- Concluimos também que a coloração de grafos, consiste em uma distribuição de recursos entre elementos conflitantes, portanto; pode ser aplicada para alcançar os objetivos deste trabalho.

A seguir no **capítulo 3** os principais **trabalhos relacionados** à nossa proposta serão discutidos.

## CAPÍTULO 3

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados à nossa proposta. Em **3.1** relacionamos diversos **trabalhos** publicados, com o objetivo de **contribuir para uma coexistência de equipamentos baseados em rádios cognitivos** no espaço de espectro eletromagnético destinado aos mesmos. Em 3.2 relacionamos diversos **trabalhos** publicados com o objetivo de contribuir para uma **coexistência de equipamentos operando dentro do padrão IEEE 802.22** Em **3.3** apresentamos nossas **considerações** a respeito deste capítulo, onde procuramos nos focar nos trabalhos que podem efetivamente contribuir com nossa proposta e/ou servir como base de comparação.

#### 3.1 COEXISTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS BASEADOS EM REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS

Em se tratando não apenas de redes IEEE 802.22, mas de todas as tecnologias de redes sem fio com rádios cognitivos encontramos publicações que oferecem soluções para a coexistência de redes distintas.

O artigo proposto por Bian e Park (2009) sugere um novo protocolo chamado CASS, que tem como objetivo também coordenar a coexistência e escolha de canais entre BSs. Este protocolo sugere trocar um histórico de sensoriamento para definir um canal preferido para uso em um BSs, os canais preferidos seriam os que têm o menor histórico de uso por transmissores primários.

Em seguida os autores propõem a troca de mensagens entre os BSs para certificar-se que este canal não esteja em uso. A proposta prevê também uma forma de solucionar possíveis disputas para o direito de uso de um determinado canal através de uma eleição levando em conta um número chamado pelos autores de número de prioridade de contenção (CPN).

O protocolo CASS ainda tem dois modos de operação, ambos são feitos para quando não existirem canais exclusivos o suficiente para todas as WRANs, o primeiro modo é chamado de modo não-exclusivo, e o segundo é chamado de modo exclusivo. Como a

proposta prevê a mudança de um modo para outro dinamicamente, o algoritmo realiza uma avaliação do canal.

No modo não exclusivo, o protocolo determina que as WRANs envolvidas trabalhem no mesmo canal e estima uma perda máxima nos requisitos de QOS e monitora as transferências entre BSs e CPEs, se as perdas passarem do limite então ele muda para o modo exclusivo.

No modo exclusivo, são criados tempos de contenção alternados entre as BS's envolvidas para que neste tempo as BSs possam se comunicar com exclusividade com seus CPEs. A aplicação desta proposta em outros padrão além do IEEE 802.22 é citada.

Monteiro (2010) apresenta o problema de alocação de canais em redes IEEE 802.11, como um problema de *Distributed Constraint Optimization Problem* (DCOP). Para isto, cria uma tabela de fatores de sobreposição, que será usada como função de custos para seu algoritmo, que é uma variação do simple-ADOPT, batizada de *Distributed Channel Assignment Algorithm – Optimal* (DCAA-O). Este algoritmo tem como principal vantagem sobre o simple-ADOPT uma limitação de troca de mensagem, entre os agentes que trabalham paralelamente e de forma síncrona.

Para que a execução do DCAA-O seja possível é criado um grafo, onde os nós simbolizam os agentes e as arestas simbolizam os conflitos. Depois que este grafo for obtido, apenas para efeito de trocas de mensagens, este grafo é transformado em uma árvore.

Os agentes passam então a trocar mensagens nesta árvore com o objetivo de encontrar o conjunto de valores que minimize a função global.

Em Monteiro et al. (2012) propõe-se formalizar a alocação de canal como um problema de otimização DCOP e para sua solução propõe uma estratégia de alocação cooperativa de canais do tipo DPOP (*distributed pseudotree-optimization procedure*). Cujas soluções apresentam resultados ótimos e tem uma troca de mensagens escalável em relação ao tamanho do grafo.

O algoritmo ZAP proposto por Walenga Jr. et al. (2010) é um modelo distribuído que leva em conta a interferência existente entre grupos de 2 saltos. Este algoritmo, a princípio foi criado para o uso em rádios cognitivos, mas não é atribuído expressamente a uma tecnologia em especial.

Os autores consideram que a solução proposta em seu trabalho como muito competitiva, mas que pode ser superada por algoritmos centralizados. Estes, por sua vez,

ainda segundo os autores podem encontrar soluções ótimas, mas com problemas em outros pontos a serem levados em consideração, como o alto *overhead*, por exemplo.

A proposta do ZAP prevê a troca de mensagens de *hello*, por um canal que estará sempre disponível. Estas mensagens de *hello* são compostas por listas de vizinhos e canais disponíveis, que são trocadas entre equipamentos adjacentes para que sejam processados por um algoritmo distribuído composto por uma máquina de estados que possui quatro estados: (1) Gerente de Topologia, (2) Atribuição Local, (3) Mecanismo de Interação, e (4) Escalonador.

O gerente de topologia mantém atualizada a lista de topologias sempre que não houver estabilidade. Em momentos de instabilidade o gerente de topologia irá alternar para o estado de Escalonador. Os autores consideram que a rede está estável quando forem trocados dois ou mais pacotes de *hello* sem alterações.

O estado de atribuição local determina uma atribuição de canal prévia. Esta decisão é tomada a princípio com base no conhecimento local, que só será alterada quando receber uma mensagem de interação vinda de um nó com maior prioridade de decisão e, nestes casos, o algoritmo também irá alternar para o estado de Escalonador.

O mecanismo de interação deste algoritmo é responsável por concatenar as atribuições propostas pelos nós enquanto o critério de parada não for atingido. O critério de parada nesta proposta é o fim dos canais problemáticos incluídos em uma lista denominada *interferent list*.

O escalonador é responsável por responder aos chamados internos e externos ao nó previstos neste algoritmo sempre que receber qualquer estímulo incluindo estouros de temporizadores o escalonador em questão irá tratar do mesmo mudando o estado da máquina conforme a situação.

Em Lien et al. (2010) propõe-se o uso de rádios cognitivos, associados a coloração de grafos, gerando assim um algoritmo que foi chamado de *cognitive radio resource management* (CRRM) ou gerenciador de recursos com rádio cognitivo, para ser usado em pequenas bases para telefonia celular (fentocell) que sobrepõe-se causando interferências. Os autores demonstram vantagens sobre o sistema de distribuição aleatória.

Nguyen e Lee (2011) sugerem a aplicação de coloração de grafos para alocação de canais e controle de potência entre operadores secundários na faixa licenciada para telefonia celular.

### 3.2 COEXISTÊNCIA DE EQUIPAMENTOS BASEADOS EM REDES IEEE 802.22

Chen et al. (2009) propõem um algoritmo para IEEE 802.22 baseado em um mecanismo de leilão de canais.

Este algoritmo distribuído primeiramente propõe uma subdivisão dos espaços livres no espectro em unidades mínimas, que os autores denominam de BINs as unidades mínimas excedentes podem ser oferecidas em um leilão, para os BSs vizinhos em seu alcance.

O algoritmo atribui um valor pseudo-monetário aos BINs e este valor pseudo-monetário fica mais alto quanto menos BINs o BS dispuser.

Por outro lado BSs que possuem uma quantidade pequena de BINs podem eventualmente comprar o direito de usar estes BINs.

Os autores da proposta não apresentam expectativas de alcançar um resultado ótimo. Em seu artigo comparam seu algoritmo apenas com outros que utilizam técnicas de leilão e sua preocupação com o *overhead* também é citada.

Em Al-Zubi, Siam e Krunz (2009) sugerem quatro formas de controlar a distribuição de canais entre diversas WRANs interferentes, sendo que duas deles envolvem antenas omnidirecionais nas BSs e as outras duas formas necessitam de antenas direcionais nas BSs diminuindo assim as interferências, os métodos propostos envolvem *dynamic frequency hopping* (DFH) ou saltos dinâmicos de frequências, usados para compartilhar os canais.

Em Yang e Wu (2010) procura-se uma solução para a distribuição de canais em redes IEEE 802.22 primeiramente classificando o tráfego das redes dentre uma das categorias sendo elas voz, vídeo, ou dados, em seguida propõe um algoritmo de gerenciamento de canais baseado em lógica de fuzzy, seu método é chamado de *fuzzy logic control* (FLC) controle com lógica de fuzzy.

Em Kim e K. G. (2010) propõem-se o uso de algoritmos genéticos para alocar canais entre as diferentes WRANs neste trabalho duas soluções são propostas, uma delas utilizando um algoritmo centralizado e outra onde a solução é estendida para uma proposta distribuída.

Em Arauz e Miller (2012) estuda situações onde redes no padrão IEEE 802.22 situam-se em regiões onde muitos usuários primários estão operando e as diversas redes tem apenas um canal disponível, neste ambiente um algoritmo de controle de potência entre as WRANs é sugerido visando atenuar os efeitos da falta de banda.

Ko e Wei (2010) propõem a atribuição de canais em WRANs que se sobrepõem sob a perspectiva da teoria dos jogos onde as BSs obedecem uma dinâmica de aluguel e oferta de

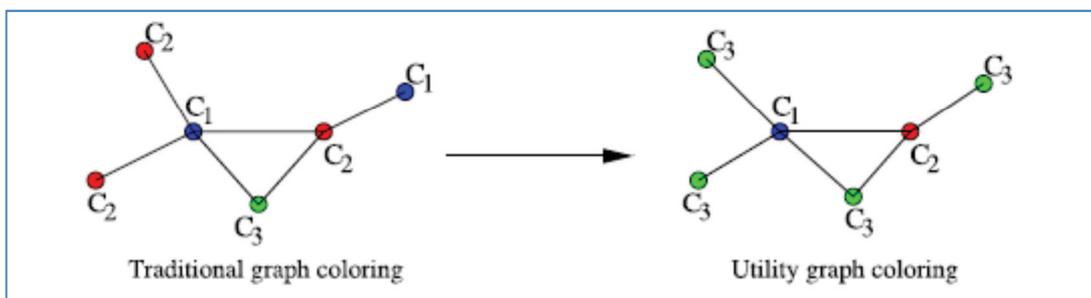
canais até um ponto onde novas operações executadas por qualquer uma das BSs não possam aumentar seu desempenho, e o conjunto de WRANs encontra-se no que é conhecido como equilíbrio de Nash. Neste artigo busca-se uma alocação de recursos de tal forma a maximizar o desempenho geral do sistema. Em Gardellin, Das e Lenzini (2010) e Dong et al. (2009) também encontramos a aplicação da teoria de jogos buscando uma solução para a atribuição de canais em WRANs sobrepostas.

Sengupta et al. (2011) sugerem uma variação do uso tradicional algoritmo de coloração de grafos, chamado de *Utility Graph Colouring* (UGC) onde os BSs são representados pelos nós, as arestas simbolizam as restrições de interferência entre as BSs; e as cores, por sua vez, representam os canais disponíveis.

Este algoritmo que será executado de maneira centralizada toda vez que o ambiente sofrer alterações, é dividido em três fases, sendo que na primeira fase o algoritmo encontra o número mínimo de cores necessárias para colorir todos os vértices. Nesta fase não existe qualquer preocupação com quaisquer atributos dos canais. As cores são tratadas de forma homogênea todas com o mesmo peso.

Na segunda fase, o algoritmo proposto, já de posse do número máximo de cores irá trabalhar tentando maximizar o uso de uma cor, testando nó a nó se o uso desta cor não acarretará em conflitos, e caso realmente não cause problemas, a cor do nó será substituída pela cor que esta em processo de maximização. Na Figura 4 (Exemplo de UGC para IEE 802.22) pode-se ver um grafo, antes e depois do processo de maximização de uma cor.

Figura 4 - Exemplo de UGC para IEE 802.22



Fonte: SENGUPTA et al. (2011, p. 7).

Depois de maximizar o uso de uma das cores, os autores propõem a divisão do espectro seguindo uma das três estratégias.

A primeira delas, que leva em conta uma quantidade mínima de banda, é chamada de Bmin, deve ser configurada manualmente pelo usuário. Devemos entregar para todas as cores

encontradas, exceto uma, certa quantidade de banda, e todo o espaço de espectro que sobrou, ou seja, toda a banda restante deve ser atribuída para uma única cor, justamente a que mais se repete no grafo, sendo assim esta cor teria o máximo de banda e estaria na maior parte das redes. Em seu artigo, os autores chamam esta estratégia de *minimum fairness*.

Na segunda, a quantidade de banda de cada canal é obtida da seguinte maneira. Inicialmente, divide-se o total de banda pelo total de nós existentes. No passo seguinte, para cada cor existente, multiplicamos o valor obtido no passo anterior pela quantidade de vezes que a cor se repete. Sendo, assim, quanto mais uma cor se repete maior será sua banda em relação aos demais. Em seu artigo, os autores chamam esta estratégia de *proportional fairness*.

Na terceira estratégia o total de banda será dividido igualmente pelo total de cores necessárias. Neste caso, todos os nós terão a mesma banda, em seu artigo. Os autores chamam esta estratégia de *complete fairness*.

Durante a demonstração de resultados, em qualquer uma das três funções, os autores aplicam uma equação demonstrando a utilidade do espectro pelos nós do grafo. Nesta equação a utilidade total de banda do espectro é obtida, multiplicando-se o total de nós que usam determinada cor, pelo total de banda que esta cor representa, e somando o resultado desta multiplicação. O cálculo da utilidade é dado pela equação 1, onde  $U$  é a total utilidade,  $C_i \in C$  é o conjunto de cores, e  $B(C_i)$  é a banda determinada pelo algoritmo para cada cor  $C_i$ ,  $Y_i$  é a quantidade de vezes que a cor  $C_i$  se repete, e  $|C|$  é o número de elementos do conjunto  $C$ , ou seja, a quantidade de cores existentes no grafo (SENGUPTA et al, 2011).

$$U = \sum_{i=1}^{|C|} Y_i \cdot B(C_i) \quad (1)$$

Fonte: SENGUPTA et al (2011).

Esta abordagem chama atenção em diversos aspectos inicialmente, pelo uso de uma técnica bastante conhecida, a técnica de coloração de grafos, que possui diversos algoritmos clássicos para sua implementação.

A distribuição de maneira desigual, das bandas é outro aspecto relevante da proposta já que vem de encontro com as especificações do IEEE 802.22 de levar em conta o QOS. Porém, em nenhum momento os autores levam em consideração a quantidade de banda requisitada pelos nós, uma vez que o objetivo do algoritmo é maximizar a utilidade  $U$  calculada pela equação 1.

O cálculo usado para avaliar a utilidade do espectro em certo espaço é muito objetivo e seu resultado torna muito prática a comparação entre as diferentes estratégias.

Neste artigo, no entanto, em todos os casos sempre se considerou que todos os nós fazem uso do mesmo espaço do espectro, ou seja, todos tem a visão do mesmo conjunto de canais, e isto pode não ser necessariamente o caso dentro padrão IEEE 802.22, onde operadores primários podem proibir o uso de certo espaço para um ou mais nós de maneira específica sem, no entanto, bloquear o mesmo para os demais, como foi discutido na seção 2.2.1 (Métodos de gerência de espectro).

As características apresentadas demonstram a relevância do uso desse artigo para a avaliação da nossa proposta, tendo sido selecionado como base de comparação. As três estratégias propostas por (SENGUPTA et al, 2011) serão avaliadas e comparadas com a nossa proposta, e por motivos de simplificação do texto serão referenciadas de maneira abreviada. As estratégias *minimum fairnes*, *proportional fairnes*, e *complete fairness* serão referenciadas como UGC-F1, UGC-F2 e UGC-F3, respectivamente.

No trabalho Fan e Zhang (2009) sugerem também o uso de coloração de grafos, onde a exemplo de Sengupta et al. um processo de coloração é inicialmente executado com o objetivo de obter o número cromático mínimo, em seguida a banda disponível para o uso em redes no padrão IEEE 802.22 é dividida por este número cromático, a quantidade de banda para cada cor obedece também a critérios específicos que podem torna-la desigual.

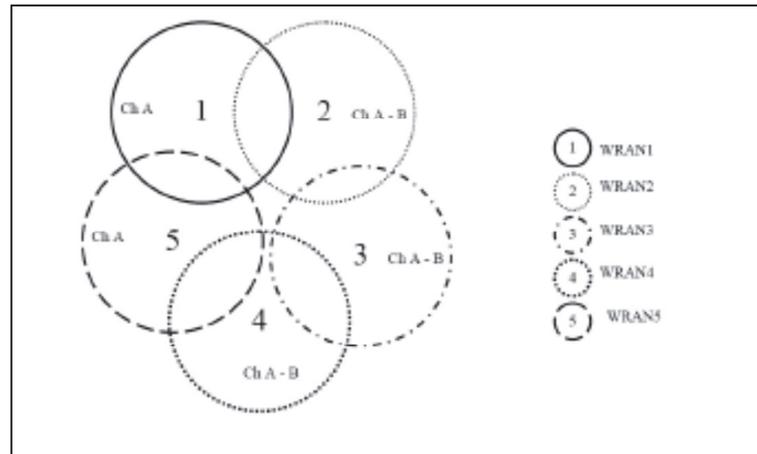
Camarda, Cormio e Passiatore (2010) sugerem uma solução para o caso onde existe falta de canais, em um cenário onde os BSs reúnem-se em uma comunidade para compartilhar o uso dos espaços livres no espectro com a tecnologia do padrão IEEE 802.22. Esta comunidade deve eleger um coordenador que mantém a organização no uso de canais disponíveis e atribui a cada BS o seu canal, propondo um método que deve ser executado de maneira centralizada.

Os membros desta comunidade devem trocar informações com o coordenador por meio de pacotes, de *Co-existence Beacon Protocol* (CBP) ou *Beacons* do protocolo de coexistência.

Neste cenário pressupõem que cada BS é capaz de reconhecer as WRANs que se sobrepõem a si mesmo, sendo responsável por informar ao coordenador sobre esta propriedade, bem como sobre os canais disponíveis e sua necessidade de banda para atender os requisitos de QOS.

Este coordenador, de posse dos dados referentes à sobreposição de BS, montará uma tabela de sobreposições. Na Figura 5 tem-se um exemplo de uma comunidade com 5 WRANs, onde os números (de 1 a 5) representam as BSs e cada circunferência em torno de uma BS representa a região de interferência de cada WRAN.

Figura 5 – Comunidade de WRAN's operando no padrão 802.22.



Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 129).

A Tabela 1 ilustra a tabela de sobreposições montada pelo coordenado para a rede exemplo da Figura 5, onde o valor 1 representa interferência entre as WRANs e o valor 0 representa que não existe interferência.

Tabela 1 – Comunidade de Wrans representada no formato de tabela.

	Wran 1	Wran 2	Wran 3	Wran 4	Wran 5
Wran 1	1	1	0	0	1
Wran 2	1	1	1	0	0
Wran 3	0	1	1	1	0
Wran4	0	0	1	1	1
Wran5	1	0	0	1	1

Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 129).

Também de acordo com a disponibilidade de canais no espectro, o mesmo coordenador montará uma segunda tabela, que indicará os canais disponíveis para cada WRAN. Um exemplo de tabela de canais, para a rede exemplo da Figura 5 pode ser visto na

Tabela 2. Nesse exemplo existem 2 canais possíveis (A e B), e a disponibilidade por WRAN está representada na tabela pelo número 1, enquanto a indisponibilidade por 0.

Tabela 2 – Canais disponíveis para cada WRAN de acordo com a figura 5.

Wran	Canal A	Canal B
Wran 1	1	0
Wran 2	1	1
Wran 3	1	1
Wran 4	1	1
Wran 5	1	0

Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 129).

Ao cruzarmos os valores da Tabela 1, com os valores da Tabela 2, os autores sugerem unir WRANs que podem operar sobre o mesmo canal em pares. Para a rede exemplo da Figura 5 podemos visualizar estes pares na Tabela 3. Nesta tabela a segunda coluna (WRANS) demonstra a lista de WRANs que podem operar simultaneamente sobre o mesmo canal sem conflitos e a terceira coluna (*state-vector*) demonstra a mesma informação existente na coluna dois através de um vetor de elementos binários, sendo que o valor 0, informa que a WRAN naquela posição não pode operar e o valor 1 informa que a WRAN naquela posição pode operar normalmente. A primeira coluna da tabela, nomeia os diferentes pares como possibilidade seguidas de uma numeração sequencial.

Tabela 3 – Tabela de possibilidades

Possibilidades	WRAN	State-vector
Possibilidade 1	1,3	1,0,1,0,0
Possibilidade 2	1,4	1,0,0,1,0
Possibilidade 3	2,4	0,1,0,1,0
Possibilidade 4	2,5	0,1,0,0,1
Possibilidade 5	3,5	0,0,1,0,1

Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 129).

Caso exista mais de um canal disponível para a comunidade de WRANs, os autores propõem agrupar as possibilidades da Tabela 3, levando em conta o uso de diferentes canais listados na Tabela 2, gerando assim uma nova tabela. Um exemplo desta tabela, para a rede exemplo da Figura 5 pode ser visto, na Tabela 4, onde as oportunidades que podem ser executadas simultaneamente em canais diferentes foram agrupadas. Neste exemplo a segunda e terceira coluna representam a lista de WRANs que podem comunicar-se no canal A e no canal B, respectivamente, enquanto que a quarta coluna representa em um vetor binário estas WRANs onde, na mesma maneira que na Tabela 3. O valor 0 informa que a WRAN não deve operar e o valor 1 informa que a WRAN pode operar normalmente. A primeira coluna da tabela nomeia as diferentes combinações como oportunidades seguidas de uma numeração sequencial.

Tabela 4 – Tabela de oportunidades

Oportunidade	Canal A	Canal B	State-vector
Oportunidade 1	1,3	2,4	1,1,1,1,0
Oportunidade 2	3,5	2,4	0,1,1,1,1

Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 130).

Com a posse destas informações os autores propõem um algoritmo de otimização que permitirá encontrar uma solução até mesmo em casos onde não se tenha canais suficientes para todas as WRANs existentes, executando uma multiplexação temporal como resultado do algoritmo. O resultado da execução do algoritmo proposto resulta em uma sequência de uso de oportunidades, da tabela 4 (quando mais de um canal estiver disponível para as WRANs), ou de possibilidades da tabela 3 (quando apenas um canal estiver disponível para as WRANs) até que se atinja a demanda existente para cada WRAN.

Para a execução deste algoritmo, o coordenador da comunidade, já de posse das informações de demanda de cada WRAN, e com todas as tabelas construídas, calcula um valor normalizado que representa a demanda de cada WRAN de acordo com a equação 2, onde  $p_i$  é o valor normalizado para a WRAN  $i$ ,  $request_i$  é a demanda requisitada pela WRAN  $i$  e  $N$  é a quantidade de WRANs do problema .

$$p_i = \frac{request_i}{\sum_{i=1}^N request_i} \quad (2)$$

Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 130).

Uma vez calculado o valor de  $p_i$  é possível obter através da equação 3 um valor ( $y$ ) que representa o quanto cada oportunidade ou possibilidade no caso de existir apenas um canal disponível irá contribuir para alcançarmos o valor de  $p_i$ . A quantidade de slot times que serão atribuídos para WRAN  $i$  em determinada oportunidade e é representada pela variável  $n_i$ .

$$y = \sum_{i=1}^N p_i \ln(n_i + 1) \quad (3)$$

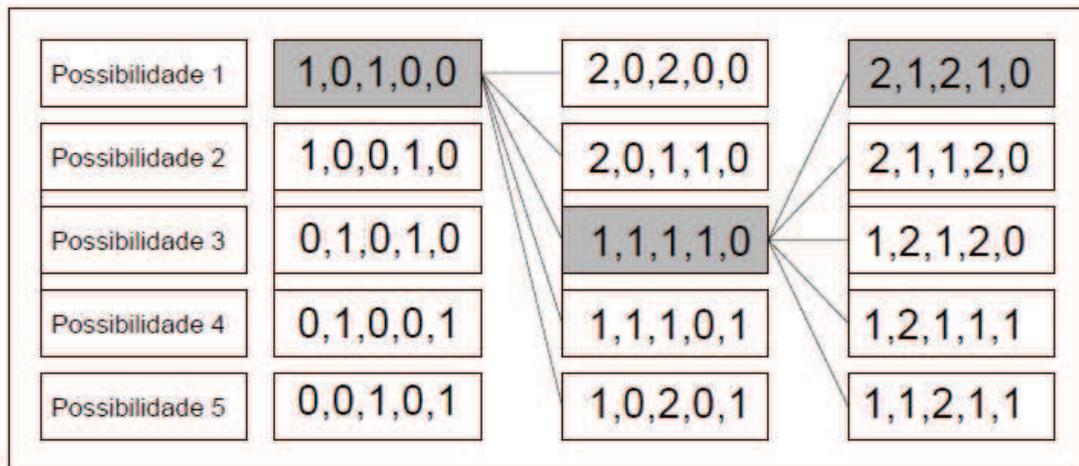
Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 130).

Se escolhermos sempre a oportunidade, ou possibilidade que mais contribui para alcançarmos  $p_i$  teremos a melhor sequência de *slot-times* para alcançar a demanda.

A cada execução da equação 3 do algoritmo, a oportunidade  $n_i$  que gerou o maior valor de  $y$ , representa o *state-vector* que somado aos valores já atribuídos a  $n_i$ , irá manter uma melhor proporcionalidade entre a demanda e os valores de  $p_i$ . Podemos entender que este *state-vector* é uma interação de atribuição contribuído para atingir a demanda registrada em  $p_i$ . Então se recalculam os valores usando a equação 3, até que todos os elementos  $n_i$  tenham um valor igual ou maior que  $p_i$ .

Com o uso das equações (2) e (3) é possível atribuir uma sequência de *slot-times* para as redes, mantendo sempre a proporcionalidade entre o que foi solicitado e a demanda. Um exemplo desta sequência, cujo objetivo é distribuir 2 slot times para a primeira e terceira WRAN e apenas 1 slot time para a segunda e quarta WRAN para a topologia vista na Figura 5, no caso do uso de apenas um canal (usando portanto a tabela 3) pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de sequência de escolhas realizadas com base nas equações 2 e 3.



Fonte: CAMARDA et al. (2010, p. 132).

Nesta proposta, os autores alegam encontrar soluções ótimas. Visto que o problema apresentado é uma distribuição de recursos, pode-se entender que, mesmo não fazendo uso de nenhuma técnica considerada clássica de coloração de grafos, este é um problema de distribuição de recursos, e é, portanto, um problema NP-completo. Como foi visto em 2.3 uma solução ótima, que é a característica apresentada pelo autor, pode rapidamente tornar-se inviável à medida que se aumenta os canais ou os nós envolvidos.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TRABALHOS RELACIONADOS

O principal foco deste capítulo foram propostas que sugerissem maneiras de distribuir canais entre diferentes redes, pudemos concluir neste capítulo que devido à característica NP – completo do problema, muitas propostas levam a soluções válidas porém subótimas.

Uma proposta que influenciou consideravelmente o nosso trabalho foi aquela feita por Camarda, Cormio e Passiatore (2010), pois introduz uma maneira de manter a proporcionalidade na distribuição de recursos, respeitando a demanda por banda de cada WRAN. Além de distribuir mais de uma vez os recursos disponíveis, quando isto for possível e necessário.

O estudo de Sengupta et al. (2011) também foi especialmente importante para a proposta apresentada no capítulo 4, pois também faz uso da coloração de grafos, para a distribuição de canais, onde a distribuição desigual de espaços disponíveis no espectro eletromagnético contribuem para uma solução sub-ótima que visa maximizar o aproveitamento destes.

A proposta apresentada em Sengupta et al. (2011) se aproxima dos algoritmos propostos na seção 4, com as seguintes limitações: (i) não levar em conta a demanda das WRANs, e (ii) - somente ser aplicável em cenários onde todos as WRANS fazem uso do mesmo espaço do espectro.

Além disso, o método de avaliação proposto Sengupta et al. (2011), permite analisar de maneira objetiva a eficiência de sua aplicação facilitando o entendimento da sua contribuição.

Pelos motivos apresentados, a proposta apresentada por Sengupta et al. (2011) foi escolhida como base de comparação para os algoritmos propostos na seção 4.

Os algoritmos propostos farão uso de coloração de grafos, mas foram concebidos de forma a suportar ambientes onde as WRANs têm diferentes canais disponíveis para operar entre si, além de considerar a demanda durante a distribuição de canais. Estas características tornam nossa proposta única, frente às demais vistas neste capítulo.

## CAPÍTULO 4

### 4 ALOCAÇÃO DE CANAIS PARA COEXISTÊNCIA DE ESTAÇÕES BASE EM REDES PADRÃO IEEE 802.22

Neste capítulo é apresentada a contribuição deste trabalho para a distribuição de canais entre WRANs operando no padrão IEEE 802.22, usando técnicas de coloração de grafos, executadas de maneira centralizada.

Nesta proposta sugere-se a divisão do espaço disponível para usuários secundários, em canais, e a atribuição por coloração de grafos destes canais aos nós. Uma vez que o padrão IEEE 802.22 nos permite alocar mais de um canal a uma WRAN, propomos que a banda disponível seja distribuída até seu esgotamento.

A distribuição de canais excedentes pode ser feita com base apenas nas premissas de coloração de grafos ou, então, levando em conta a demanda por canais das WRANs coexistentes.

Nas funções apresentadas que visam garantir a proporcionalidade entre a demanda por espaço no espectro eletromagnético e o distribuído, utilizamos as fórmulas demonstradas pelos autores Camarda et al. (2010) para definir qual será a ordem dos nós a receberem novos canais.

Para situações onde ocorrerem falta de canais, e não for possível que uma WRAN opere em um canal de maneira exclusiva, desenvolvemos uma função que calcula uma multiplexação dos canais (divisão em sub-canais), possibilitando a partilha do mesmo com mais de uma WRAN.

Este capítulo possui a seguinte estrutura: Na seção **4.1 Considerações iniciais**, delimitamos o trabalho para assim compreender melhor a proposta; Na seção **4.2** descrevemos a maneira como **modelamos o problema** e suas variáveis; Na seção **4.3** descrevemos como pretendemos utilizar a coloração de grafos para realizar a **distribuição de canais**, em todos os seus aspectos seja em situações em que temos canais excedentes, ou em situações que temos falta de canais; Na seção **4.4** detalhamos os **algoritmos propostos** e todas as suas funções que tem como objetivo executar todas as tarefas vistas na seção 4.3.

Ao final deste capítulo, na seção **4.5**, são feitas algumas **considerações** em relação à proposta.

#### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O principal objetivo desta proposta é encontrar um método para distribuir os canais disponíveis para o uso em WRANs que trabalham no padrão IEEE 802.22.

Na hipótese de haver casos de sobreposição de WRANs, o método sugere uma atribuição que não gere conflitos entre as redes envolvidas. O método proposto pode levar em conta a demanda por banda que cada uma das WRANs necessita, de tal forma que a escolha do canal reflita uma opção válida para todos os envolvidos. Em casos onde existirem canais excedentes será considerada a possibilidade de atribuir múltiplos canais a uma mesma WRAN.

Tendo em vista as características do padrão discutidas no capítulo anterior e a abrangência do problema, as considerações iniciais aqui apresentadas delimitam a discussão do problema, que pode, facilmente, se estender a outras propriedades do uso de rádios cognitivos em WRANs.

Para objeto deste estudo será considerado que qualquer algoritmo proposto deve ser capaz de trabalhar em ambientes onde nem todas as WRANs possuam o mesmo conjunto de canais. E que, caso não existam canais disponíveis para todas as WRANs, será feito o uso de multiplexação de canais. Embora o padrão IEEE 802.22 realize a multiplexação temporal o algoritmo deve apontar apenas a necessidade, bem como, a quantidade de partes em que o canal deve ser dividido. O objetivo é manter o algoritmo genérico, permitindo que possa ser usado em cenários de multiplexação temporal ou de frequência.

A infraestrutura necessária para uma rede IEEE 802.22 citada na seção 2.2 (Rádios cognitivos usando padrão IEEE 802.22) possui processamento próprio e é instalado de modo fixo, ou seja, para este trabalho serão desconsideradas características próprias para equipamentos móveis.

Outra premissa importante na formulação do problema é que os equipamentos que trabalham com padrão IEEE 802.22 com visto na seção 2.7 possuem a capacidade de prever a demanda dos canais, que será levada em conta na formulação do problema, com o objetivo de atender aos requisitos de QoS.

Para a proposta apresentada neste capítulo leva-se em consideração que a solução tem um processamento centralizado. Este processamento ficará portanto, sobre a responsabilidade de uma única entidade, que irá determinar os canais que todas as WRANs devem operar. Para

isto, consideramos que todas as WRANs envolvidas possuem uma relação de confiança com esta entidade, em muitos casos esta confiança somente será possível se todas as WRANs envolvidas pertencerem a uma única organização. Observa-se que essa premissa é equivalente àquela adotada em Camarda et al. (2010).

A possibilidade de um CPE deixar de pertencer a uma WRAN e passar a pertencer à outra, de propriedade de uma organização diferente, não será considerada neste trabalho. Portanto as soluções que envolvem diminuir a potência do sinal tanto dos BSs, quanto dos CPEs somente podem ser consideradas até o ponto onde nenhum envolvido deixa de pertencer a WRAN, portanto, não iremos abordar esta possibilidade neste trabalho.

Para efeito deste estudo será considerado que a troca de mensagens entre WRANs distintas se dará de forma análoga aos CBPs, ou seja, poderá trocar mensagens diretamente pelos BSs ou ainda por intermédio de CPEs para alcançar as WRANs conflitantes. Assumimos portanto que as WRANs terão sempre uma maneira de entrar em contato com o nó responsável por executar o algoritmo tanto para enviar as informações resultantes do sensoriamento como também para receber as atribuições determinadas por ele.

Conforme discutido em 2.2.1 (Métodos de gerência de espectro) vemos que tanto os BSs quanto os CPEs que formam a WRAN realizam um sensoriamento do espectro. Considera-se assim que todas as BSs envolvidas em conflito têm conhecimento dos canais que estão disponíveis para uso em sua área bem como a existência de outras WRANs em seu alcance. Além disto, como pode se ver em 2.2.2 (Auto coexistência - interferência e o problema de alocação de canais) as diferentes WRANs trocam estas informações entre si através de CBPs, inclusive usando CPEs como ponte. Neste caso, é possível concluir que as WRANs conflitantes conhecem a localização dos CPEs que estão dentro da área de conflito, e os canais disponíveis para cada uma delas.

Aqui apresentamos todas as colocações e observações que delimitam o escopo do trabalho, sendo elas:

- Não serão levadas em conta características próprias para redes móveis, como por exemplo roaming entre células por parte dos CPEs;
- Todas as WRANs conseguem detectar os canais disponíveis para si;
- Todas as WRANs conseguem detectar outras WRANs que estão sobrepostas sobre ela;
- Todas as WRANs conseguem comunicar-se com o nó responsável por executar o algoritmo e o método como isto ocorre não faz parte do escopo desta discussão;

- Todas as WRANs confiam nas informações recebidas pelo nó responsável pela execução do algoritmo;
- A possibilidade de um CPE trocar de WRAN não é considerada;
- Soluções que envolvem diminuir a potência do sinal tanto dos BSs quanto do CPEs não são abordadas.
- As redes que operam no padrão IEEE 802.22 possuem a capacidade de prever a demanda por canais.

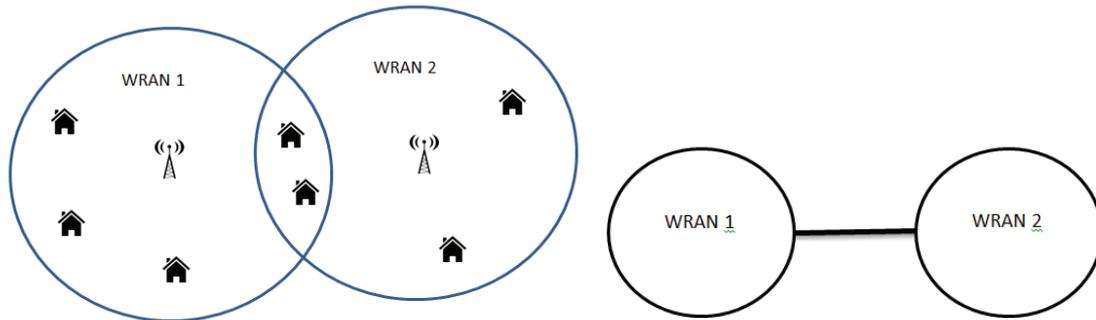
## 4.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

Conforme definido em 1.3.1 (objetivo geral) o objetivo deste trabalho é propor e avaliar algoritmos de alocação de canais que possam ser usados para resolver os conflitos de comunicação em áreas de sobreposição de sinais em WRANs usando IEEE 802.22, levando em conta o resultado do sensoriamento realizado pelos equipamentos que compõe este tipo de rede e a demanda por canais.

Para isto, será proposto um algoritmo centralizado de coloração de grafos que indique quais canais serão atribuídos a cada WRAN ou, em caso de necessidade de multiplexação, indique quais segmentos de canais serão atribuídos a cada uma delas.

Com a finalidade de representar as diferentes WRANs e as respectivas interferências utilizamos um grafo, onde as WRANs são simbolizadas pelos nós e a interferência entre elas por arestas, como ilustrado na Figura 7. Deve-se atribuir canais ou segmentos de canais diferentes para nós unidos por uma aresta. A escolha de canais deve ser a melhor possível dentro destas atribuições. Neste contexto, tem-se um problema que pode ser representado como uma coloração de grafos, onde os diferentes canais ou segmentos de canais são representados como cores a serem atribuídas aos nós do grafo, onde cores distintas devem ser atribuídas a nós adjacentes. Desta forma, o problema será modelado como um problema de coloração de grafos, e o termo nó, neste trabalho, refere-se sempre a um nó do grafo, e refere-se a uma WRAN.

Figura 7 – WRANs interferentes e sua representação em grafos.



Fonte: O autor.

Levando em conta os elementos relacionados acima, pode-se formular o problema da seguinte maneira:

A topologia lógica é representada por um grafo  $\mathbf{G}=(V,E)$ , onde  $V$  é o conjunto de vértices  $V=\{V_1,\dots,V_N\}$  representando o conjunto de WRANs e  $E$  é o conjunto de arestas representando as interferências entre as WRANs. O número de WRANs é dado por  $N=|V|$ .

Os canais (não multiplexados) são identificados por um número inteiro  $m$  iniciando em 1 até  $M$  ( $M<1000$ ), onde  $M$  é a quantidade de canais não multiplexados disponíveis no problema. Quando um canal é multiplexado cada subcanal é identificado usando-se o identificador original  $i$  multiplicado por 1000, somado a um identificador sequencial iniciado em 1 para cada subcanal. O valor múltiplo de 1000 permite identificar o grau de multiplexação, sem interferir na identificação dos subcanais que ocupam no máximo 3 casas. Quando um canal precisa ser multiplexado, todos são multiplexados. O número total de subcanais disponíveis para atribuição em uma dada interação do algoritmo é igual a  $T$ .

O conjunto de subcanais que podem ser atribuídos a cada uma das WRANs, sem interferir com os usuários primários, será representado em uma matriz  $\mathbf{cd}$  de dimensão  $N \times T$  onde  $\mathbf{cd}[i,j] = i \cdot 1000 + \text{mod}(j, M)$ , se o subcanal identificado está disponível para a WRAN  $i$  e  $\mathbf{cd}[i,j]=0$ , caso contrário,  $i=1, \dots, N; j = 1, \dots, T$ . A equação 4 ilustra um exemplo da matriz  $\mathbf{cd}$  para três WRANs que podem trabalhar com os canais de 1 a 3, com exceção da WRAN 3 onde o canal 1 está impedido. No exemplo o grau de multiplexação é igual a 1.

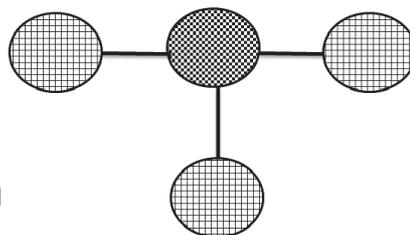
$$cd = \begin{bmatrix} 1001 & 1002 & 1003 \\ 1001 & 1002 & 1003 \\ 0 & 1002 & 1003 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A distribuição de canais para as WRANs é feita usando coloração de grafos, que atribui um canal ou mais para cada nó, sendo que os nós unidos por arestas e que estão em conflito não podem receber o mesmo canal. Por simplicidade e para caracterizar o algoritmo como coloração de grafos, chamar-se-á o item atribuído a um nó (WRAN) de cor, que corresponde a uma identificação de canal ou subcanal.

Inicialmente para cada nó em  $G$  deve-se atribuir uma cor. Com o objetivo de armazenar as atribuições de cores o resultado dos processos de atribuições serão armazenados na matriz  $ca$  de dimensão  $N \times k$ , onde  $ca[i,k]$  contém a cor atribuída ao nó  $i$  no ciclo de distribuição  $k$ ;  $ca[i,k]=0$  se não foi atribuído nenhuma cor para o nó  $i$ , no ciclo  $k$ , e  $ca[i,k]=\infty$ , se foi identificado no ciclo  $k$  que não é mais possível atribuir uma cor para o nó  $i$ , ou seja foram esgotadas todas as cores que poderiam ser atribuídas a este nó sem gerar conflitos com os demais vizinhos.

Os ciclos de distribuição de cores serão descritos na seção 4.3. Um exemplo de um grafo já colorido e sua representação em  $ca$ , pode ser visto na Figura 11 (Grafo já colorido e sua representação em  $ca$ ), onde se demonstra um grafo com apenas uma cor atribuída a cada nó ou ainda como ilustrado na figura 9, (grafo já colorido com mais de uma cor e sua representação em  $ca$ ), com mais de uma cor atribuída a cada nó.

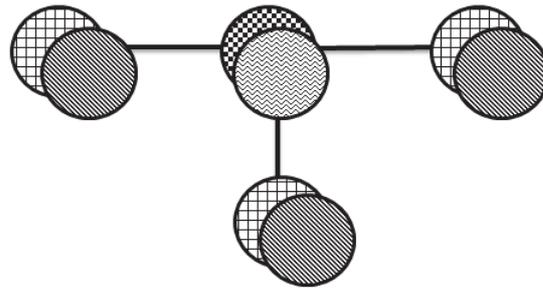
Figura 8 – Grafo já colorido e sua representação



$$ca = \begin{bmatrix} 1001 \\ 1002 \\ 1001 \\ 1001 \end{bmatrix}$$

Fonte: O autor

Figura 9 – Grafo já colorido com mais de uma cor e sua representação em  $\mathbf{ca}$



$$\mathbf{ca} = \begin{bmatrix} 1001 & 1003 \\ 1002 & 1004 \\ 1001 & 1003 \\ 1001 & 1003 \end{bmatrix}$$

Fonte: o autor

A demanda é representada pelo vetor  $\mathbf{dm}$ , onde  $\mathbf{dm}[i]$  representa a demanda do nó  $i$ ,  $i=1, \dots, N$ . Por fim, ainda associada à demanda temos a variável  $tm$  que contém o tamanho em MHz associado a cada cor (canal ou subcanal) em uma interação de coloração.

### 4.3 DISTRIBUIÇÕES DE CANAIS

Nesta seção será discutida a maneira como os canais serão distribuídos entre as diversas WRANs, o procedimento para garantir uma quantidade mínima para que as redes possam operar e como serão tratados os canais excedentes.

#### 4.3.1 Distribuição de canais

##### A) Procedimento para multiplexação de canais

Ao atribuir-se os canais deve-se levar em conta que, se nenhum canal puder ser atribuído a uma WRAN, a mesma não terá um meio físico para comunicar-se e estará, portanto, inoperante. Deve se levar em consideração o caso de impossibilidade de atribuição de canal a um operador secundário mesmo quando existem canais disponíveis, devido a existência de conflitos com operadores igualmente secundários. Essa situação tornaria um operador secundário inoperante, e deve ser evitada por ser uma solução injusta.

Se em qualquer ciclo de distribuição de cores, um nó  $v$  qualquer receber a cor representada por  $\infty$  (infinito) na matriz  $\mathbf{ca}$ , devemos entender que foram esgotadas todas as possibilidades existentes na matriz de cores disponíveis  $\mathbf{cd}$ , e que nenhuma cor pode ser atribuída ao nó  $v$ , e portando deste ponto em diante, qualquer nova tentativa de interação também resultará em  $\mathbf{ca}[v,k]=\infty$ .

Caso algum elemento da matriz  $\mathbf{ca}$  receba o valor de infinito ainda na primeira interação, ou seja, quando  $k=1$ , saberemos que este nó, não terá nenhum canal atribuído, e também não será possível atribuir canais a este nó em futuras interações. Faz-se necessário então um processo de multiplexação. A multiplexação aumenta o número de cores mas reduz a quantidade de banda atribuída a cada cor.

Em alguns casos, apenas uma multiplexação pode não ser suficiente e será necessário executar a multiplexação mais de uma vez. Iremos, então, contar o número de vezes em que o processo de multiplexação foi invocado através de uma variável nomeada  $mp$ .

Cada vez que o processo de multiplexação for invocado obtém-se um novo grupo de canais disponíveis  $\mathbf{cd}$ , pois, todos os canais serão re-divididos, de acordo com o grau de multiplexação  $mp$ . Nesse caso será possível atribuir apenas uma parte de um canal a um nó, aumentando o número de cores disponíveis para cada coloração dos nós (variável  $T$ ). Consequentemente, é incrementada a quantidade de colunas em  $\mathbf{cd}$ .

Um exemplo do conteúdo de  $\mathbf{cd}$  original ( $mp = 1$ ) e seu conteúdo após uma multiplexação ( $mp=2$ ) é apresentado nas equações 5 e 6, respectivamente.

$$\mathbf{cd} = \begin{bmatrix} 1001 & 1002 & 1003 \\ 1001 & 1002 & 1003 \\ 0 & 1002 & 1003 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{cd} = \begin{bmatrix} 1001 & 1002 & 1003 & 2001 & 2002 & 2003 \\ 1001 & 1002 & 1003 & 2001 & 2002 & 2003 \\ 0 & 1002 & 1003 & 0 & 2002 & 2003 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Após a multiplexação, deve-se reiniciar o processo de atribuição de canais, agora levando em conta os novos elementos de **cd**. É importante lembrar que cada cor tem apenas uma parte de sua capacidade, e isto deve ser considerado, quando for necessário utilizar atribuições que levem em conta a demanda.

Se a multiplexação atingir o seu limite máximo, ou seja, um patamar indesejado pelos operadores, sem, no entanto conseguir atribuir cores a todos os nós, considera-se o problema sem solução.

O tratamento da falta de canais é realizado na função principal, cujo pseudocódigo e detalhes da implementação podem ser vistos na seção 4.4. Temos também uma função própria para tratar a multiplexação que é apresentada nesta mesma seção.

## B) Procedimentos para tratar as sobras de canais

Levando em conta que existe a possibilidade que, ao final do processo de coloração, ainda existam cores que podem ser atribuídas aos nós e que, se disponibilizadas, aumentariam a largura de banda para os meios físicos, o algoritmo disponibiliza estas cores, incluindo novos ciclos de distribuição em **ca**, de maneira que mais de uma cor, quando for possível, seja atribuída a cada elemento  $v$  em **ca**. Estas cores, porém, não podem entrar em conflito, nem com as cores que estão sendo atribuídas a nós vizinhos ao que se deseja atribuir cores nesta interação, nem com as cores que foram atribuídas em ciclos anteriores a estes nós, sob pena de criarmos sobreposição de uso dos subcanais entre as WRANs.

Da mesma forma, não se deve atribuir mais uma vez a mesma cor a qualquer nó, uma vez que esta atribuição não seria verdadeiramente um ganho de cores.

Um exemplo de um grafo já colorido com mais de uma cor e sua representação em **ca**, pode ser visto na Figura 10 (grafo já colorido com mais de uma cor e sua representação em **ca**).

Estas atribuições subsequentes podem ser feitas de maneira igualitária dentro da disponibilidade de canais existentes em **cd** e, neste caso, ignorando o vetor de demanda **dm**. Este modo de distribuir as cores será chamado de coloração LF, em referência ao método de coloração LF visto na seção 2.3 (Distribuição de recursos com base em coloração de grafos), e que se pretende usar para distribuir os canais no ciclo inicial do algoritmo e também para distribuir os canais subsequentes sem levar em conta a demanda. O pseudocódigo pode ser visto em 4.4.

Outra maneira de distribuir os canais excedentes é levando em conta a demanda existente em **dm** e entregando novos canais para cada nó até atingirmos a demanda ou até que não seja mais possível realizar novas distribuições, pois esgota-se os canais existentes para o nó em **cd**. Esta maneira de distribuir canais será chamada de coloração por demanda, cujo pseudocódigo está apresentado também em 4.4.

Uma vez que a distribuição de canais até atingir a demanda pode terminar com sobra de canais, uma terceira maneira de distribuir os canais onde também levamos em conta a demanda, sem nos limitarmos a ela, é distribuir os canais de maneira proporcional à demanda, até esgotar-se os canais existentes para cada nó em **cd**. Chamaremos esta maneira de distribuir os canais de coloração proporcional, pois não será igual e sim irá manter a proporcionalidade em relação à demanda em **dm**. O pseudocódigo e detalhes de como ele foi implementado podem ser vistos em 4.4 (O algoritmo proposto).

Estas três maneiras refletem três estratégias de distribuição de canais, uma delas igualitária entre os nós, a segunda estratégia visando atender a demanda e a última proporcional a demanda.

#### 4.4 O ALGORITMO PROPOSTO

Nesta seção apresentamos o algoritmo proposto, composto pela *função principal*, pela *função de multiplexação* e pelas três *funções de coloração*, sendo elas a função de Coloração\_LF, a função de Coloração\_Demanda e a função de Coloração\_Proporcional.

##### a) A Função Principal

A Função Principal tem como objetivo controlar as interações e estabelecer critérios de parada para a função de Coloração\_LF, invocar as demais colorações quando for necessário, ativar a função de multiplexação dos canais e encerrar o algoritmo, seja porque conseguiu encontrar uma solução ou porque não foi possível solucionar devido a um excesso de multiplexação. Também é responsável por iniciar a maioria das variáveis globais.

O pseudocódigo da Função Principal segue na Figura 15 (Função Principal) e o Quadro 8 (Variáveis e funções da Função Principal) contém a descrição das variáveis e das funções:

Quadro 7 – Variáveis e funções da Função Principal.

### Variáveis Globais e funções chamadas pela Função Principal

**G**( $V, E$ ): Grafo a ser colorido, onde  $V$  é o conjunto de nós e  $E$  o conjunto de enlaces

**F**: Variável controlada pelo operador, que pode receber os valores 1, 2 ou 3 sendo que 1 significa que a coloração será do tipo LF, 2 significa que a coloração será com o objetivo de atingir a demanda e 3 significa que a coloração será proporcional à demanda;

**M**: Variável que contém o número canais originalmente existentes no problema;

$N = |V|$ : Quantidade de nós existentes no grafo  $G$ ;

**T**: Variável contendo a quantidade de cores (subcanais) disponíveis para coloração

**K**: Variável contendo a quantidade de colunas existentes na matriz **ca**;

**mp**: Variável onde se registram o número de multiplexações já ocorridas;

**mp<sub>max</sub>**: Variável controlada pelo operador onde se define o máximo de multiplexações permitidas;

**ca**: Matriz onde se armazenam os canais alocados para cada nó. **ca**[ $i, k$ ] = identificador da cor alocada para o nó  $i$  na interação  $k$ ,  $i = 1, \dots, N$ ;  $k = 1, \dots, K$ . A segunda dimensão da matriz é variável.

**cd<sub>0</sub>**: Matriz de dimensão  $N \times M$  onde **cd**[ $i, j$ ] =  $mp \cdot 1000 + j$  se o subcanal identificado está disponível para a WRAN  $i$  e **cd**[ $i, j$ ] = 0, caso contrário, onde  $mp$  é o grau de multiplexação dos canais,  $i = 1, \dots, N$ ;  $j = 1, \dots, M$ .

**cd**: Matriz de dimensão  $N \times T$  onde **cd**[ $i, j$ ] =  $mp \cdot 1000 + j$  se o subcanal identificado está disponível para a WRAN  $i$  e **cd**[ $i, j$ ] = 0, caso contrário, onde  $mp$  é o grau de multiplexação dos canais,  $i = 1, \dots, N$ ;  $j = 1, \dots, T$ . A segunda dimensão da matriz é variável, e definida pelo número de cores disponíveis para coloração ( $T$ ).

**cd<sub>t</sub>**: Matriz temporária utilizada para construir uma nova versão multiplexada de **cd** a partir da versão anterior de **cd** e da matriz original **cd<sub>0</sub>**.

**dm**: Vetor contendo as demandas para cada nó. **dm**[ $i$ ] = demanda do nó  $i$ ,  $i = 1, \dots, N$

**tm**: Variável inteira contendo a capacidade dos canais em MHZ;

Coloração\_LF(**G**, **ca**, **cd**,  $K$ ): função que recebe como argumento, o grafo, a matriz **ca**, a matriz **cd<sub>t</sub>**, e a variável  $K$ , e realiza a uma coloração de grafos, e retorna a  $K$ -ésima interação de coloração.

Coloração\_Demanda(**G**, **ca**, **cd**, **dm**,  $K$ ): função que recebe como argumento, o grafo, a matriz **ca**, a matriz **cd**, e a variável  $K$ , e o vetor **dm** e realiza a uma coloração de grafos, com o objetivo de atender a demanda em **dm**, e retorna a matriz **ca** com as novas colorações.

Coloração\_Proporcional(**G**, **ca**, **cd**, **dm**,  $K$ ): função que recebe como argumento, o grafo, a matriz **ca**, a matriz **cd<sub>t</sub>**, e a variável  $K$ , e o vetor **dm** e realiza a uma coloração de grafos, com o objetivo de distribuir canais de maneira proporcional a **dm**, e retorna a matriz **ca** com suas colorações.

Multi( $mp$ ,  $mp_{max}$ , **cd**, **ca**,  $K$ ): função que recebe como argumentos  $mp$ ,  $mp_{max}$ , a matriz **ca**, a matriz **cd**, a variável  $K$ , e retorna a matriz **cd** multiplexada, a variável  $mp$  incrementada de uma unidade, variável  $K$  reiniciada em 1, a matriz **ca** com uma única coluna zerada.

Fonte: O autor.

Figura 10 - Função Principal.

### Função Principal

```

1.   Início
2.    $K = 0$ 
3.    $mp = 1000$ 
4.    $\mathbf{ca}[:, K] = \mathbf{0}_{N \times 1}$  //cria a primeira coluna da matriz ca com zeros
5.    $\mathbf{cd} = \mathbf{cd}_t = \mathbf{cd}_{t1} = \mathbf{cd}_o$  // primeiro nível de multiplexação
6.    $soma\_cd\_antes = 0$  // As variáveis  $soma\_cd\_antes$  e  $soma\_cd\_depois$  são
7.    $soma\_cd\_depois = \infty$  // usadas como critério de parada do algoritmo.
8.   // Se houver alguma alocação de canal na interação
9.   // elas serão diferentes.
10.
11.  Executa enquanto  $soma\_cd\_antes \sim= soma\_cd\_depois$ 
12.     $soma\_cd\_antes = soma\_cd\_depois$ 
13.
14.     $K = K + 1$ 
15.     $\mathbf{ca}[:, K] = \mathbf{0}_{N \times 1}$  //cria a  $K$ -ésima coluna da matriz ca com zeros
16.
17.    Se  $F=1$  ou  $K=1$ 
18.       $\mathbf{ca} = \text{Coloração\_LF}(\mathbf{G}, \mathbf{ca}, \mathbf{cd}, K)$ 
19.    Fim do se
20.
21.    Se  $F=2$  e  $K \geq 2$ 
22.       $\mathbf{ca} = \text{Coloração\_Demanda}(\mathbf{G}, \mathbf{ca}, \mathbf{cd}, \mathbf{dm}, K)$ 
23.    Fim do se
24.
25.    Se  $F=3$  e  $K \geq 2$ 
26.       $\mathbf{ca} = \text{Coloração\_Proporcional}(\mathbf{G}, \mathbf{ca}, \mathbf{cd}, \mathbf{dm}, K)$ 
27.    Fim do se
28.
29.     $soma\_cd\_depois = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T \mathbf{cd}[i, j]$ 
30.
31.    Se  $\sum_{i=1}^N \mathbf{ca}[:, 1] = \infty$  // verifica-se a necessidade de multiplexar canais
32.       $\text{multi}(mp, mp_{\max}, \mathbf{cd}, \mathbf{ca}, K)$ 
33.       $soma\_cd\_depois = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \mathbf{cd}[i, j]$ 
34.    Fim do se
35.
36.  Fim do enquanto
37.
38.   $tm = tm / ((mp / 1000) + 1)$  //capacidade de transferência do canal em MHz
39.  // ao final do processo
40.  Fim

```

Fonte: O autor.

Como podemos observar no pseudocódigo da Figura 10, da linha 2 até a linha 10 inicializam-se as variáveis, sendo  $K$  o contador de interações com o valor de 1(um) sinalizando que o algoritmo deve realizar a primeira interação. A variável  $mp$  que registra o grau de multiplexação é inicializada com o valor de 1000, uma vez que no início do programa ainda não foi necessária nenhuma multiplexação. A matriz  $ca[i, k]$  foi definida na seção 4.3, e recebe em suas linhas os canais para cada WRAN e em suas colunas um canal diferente em cada interação. O processo é iniciado com a quantidade de linhas igual à quantidade de nós do grafo e com apenas uma coluna. Todos os elementos de  $ca$  são iguais a zero, pois, nenhum nó teve qualquer canal atribuído neste momento.

Na linha 5, a matriz  $cd$  é criada a partir da matriz  $cd_0$ , que contém a lista de canais original (sem multiplexação). A matriz temporária  $cd_t$  é criada com o propósito de preservar os valores originais antes de qualquer atribuição de canais durante o processo de multiplexação.

As variáveis  $soma\_cd\_antes$  e  $soma\_cd\_depois$  servem como critério de parada para o laço de repetição que inicia na linha 11 e se encerra na linha 38, englobando uma parte considerável do código e deve se repetir enquanto as duas variáveis sejam diferentes.

Inicialmente, para  $soma\_cd\_antes$  atribui-se o valor de 0 (zero) e para  $soma\_cd\_depois$  atribui-se o valor infinito, garantido assim que o laço de repetição será executado ao menos uma vez. Porém, na linha 12, logo depois do início do laço de repetição do algoritmo, a variável  $soma\_cd\_antes$ , irá receber o valor de  $soma\_cd\_depois$ .

Observa-se que na linha 29, após terem sido executadas as funções de coloração,  $soma\_cd\_depois$  recebe a soma de todos os elementos da matriz  $cd$ , isto é feito, pois, quando são executadas as funções de coloração, como será apresentado a diante, altera-se o conteúdo de  $cd$  cada vez que se atribui uma cor a um nó.

Realiza-se a soma na linha 29, pois, enquanto as funções de coloração conseguirem atribuir ao menos uma cor, a variável  $soma\_cd\_depois$ , sempre será diferente de  $soma\_cd\_antes$ . Porém, o laço de repetição que inicia na linha 11 será encerrado quando não for mais possível atribuir qualquer cor a qualquer nó e os valores atribuídos a  $soma\_cd\_depois$  serão consequentemente os mesmos da última interação.

Nas linhas 14 e 15 cria-se uma nova coluna na matriz  $ca$ ; esta coluna deve receber atribuições adicionais de cores. A variável  $K$ , que registra a quantidade de interações e a

quantidade de colunas da matriz **ca** também é controlada neste trecho. A variável  $K$  pode também ser alterada nas funções `Coloração_Demanda` e `Coloração_Proporcional`.

No pseudocódigo a linha 17 chama a função de coloração LF, que será discutida na seção 4.4c. Uma vez que se entende que, para que o sistema consiga operar cada nó deve receber ao menos uma cor, a primeira coluna de **ca** será atribuída usando esta função, que desconsidera qualquer relação com a demanda. Caso a variável  $F$ , que controla a estratégia de coloração tenha o valor igual a 1, todas as demais interações também invocarão esta função.

Na linha 22 do pseudocódigo é chamada a função de coloração por demanda, que será executada toda vez que o valor de  $K$  for maior ou igual a 2 e o valor de  $F$  for igual a 2, sinalizando que a estratégia de coloração escolhida é por demanda.

Na linha 25 do pseudocódigo é chamada a função de coloração proporcional, ela será executada toda a vez que o valor de  $K$  for maior ou igual a 2 e o valor de  $F$  for igual a 3, sinalizando que a estratégia de coloração escolhida é proporcional à demanda.

Na linha 31 verificamos se o valor de infinito foi atribuído a algum nó na primeira coluna de **ca**, caso isto tenha acontecido, sabe-se que em ao menos em um nó, não será possível atribuir qualquer canal e que, portanto deve-se executar a função de multiplexação que será detalhada a seguir.

Na linha 38 calculamos a capacidade de transferência dos subcanais, registrado na variável  $tm$ , levando em conta a multiplexação, que pode diminuir esta capacidade. Esta informação é importante para que se possa calcular a capacidade de transferência em **ca**.

## b) Função de Multiplexação

A Função de Multiplexação, chamada aqui de `Multi`, é invocada sempre que for detectado ao menos um nó com uma cor definida como infinito ainda na primeira interação pois este não terá um meio físico para realizar a troca de dados. A estratégia de multiplexação, como discutido na seção 4.3 (Distribuições de canais), será dividir um canal original em segmentos e reiniciar o processo atribuindo estes segmentos como cores no algoritmo.

O pseudocódigo descrevendo a abordagem para esta situação pode ser visto na Figura 11 (Pseudocódigo Função `Multi`). Os argumentos recebidos pela função de multiplexação, a partir da função principal, bem como as variáveis locais, podem ser vistos no **Quadro 8** (Argumentos recebidos pela função `Multi`, e variáveis locais).

Quadro 8 - Argumentos recebidos pela função Multi, e variáveis locais.

<p>Argumentos recebidos: <math>mp</math>, <math>mp_{max}</math>, <math>\mathbf{cd}</math>, <math>\mathbf{ca}</math>, <math>K</math></p> <p><b>Variáveis locais</b></p> <p><math>\mathbf{cd}_t</math>: Matriz originalmente igual a <math>\mathbf{cd}</math> será utilizada para armazenar o valor de <math>\mathbf{cd}</math> da interação anterior.</p>
--

Fonte: O autor.

Figura 11 - Pseudocódigo Função Multi

### Pseudocódigo Função Multi

1. **Início**
2.  $mp = mp + 1000$  // usada para determinar o nível de multiplexação
3. //do canal.
- 4.
5. **Se**  $mp > mp_{max}$  //encerra o algoritmo por ter atingido limite de
6. // multiplexação
7. **Fim** // o algoritmo não encontrou uma solução
8. **Fim do se**
- 9.
10.  $K = 1$  // reinicia o contador de interações
11.  $\mathbf{ca}[:, K] = \mathbf{0}_{N \times 1}$  // reinicia a matriz de canais alocados
12.  $\mathbf{cd}_t = \mathbf{cd}_0 + mp$  // cria um novo bloco de canais multiplexados
13.  $\mathbf{cd} = [\mathbf{cd}_t \ \mathbf{cd}_t]$  // concatena  $\mathbf{cd}_t$  com  $\mathbf{cd}_t$
14.  $\mathbf{cd}_t = \mathbf{cd}$
- 15.
16. **Fim**

Fonte: O autor.

A função Multi, é responsável por criar mais cores a partir da multiplexação dos canais disponíveis, como ilustrado na equação 5 e 6. A variável  $mp$  controla o nível de multiplexação e é iniciada com o valor 1000 ainda na Função Principal. Todas as vezes que a

função Multi for executada, a variável  $mp$  é acrescida de 1000, registrando assim o nível de multiplexação que atingimos até então.

Caso a multiplexação atinja um valor indesejável a partir do qual não seja mais do interesse do operador continuar a multiplexar os canais, significa que atingimos o valor de multiplexação máximo que é definido na variável  $mp_{Max}$ . Caso a função Multi seja executada até o ponto de atingir um valor superior de  $mp_{max}$  a função Multi será responsável por encerrar a execução de todo o algoritmo. Este controle de multiplexação máxima pode ser visto entre as linhas 5 e 8 do pseudocódigo demonstrado na Figura 11 (Pseudocódigo Função Multi).

Uma vez que, no final da multiplexação, será reiniciada as atribuições de cores, a variável  $K$ , que controla a quantidade de interações para a distribuição de cores e a matriz  $ca$  que armazena as cores atribuídas a cada nó, devem ser reiniciadas.

A matriz  $cd_t$  é construída a partir da matriz  $cd_o$ , que contém os canais disponíveis para cada nó, porém, com a diferença que o valor de cada canal, será somado com o valor da variável  $mp$ . Entende-se, portanto, que  $cd_t$  é uma matriz de tamanho igual a  $cd_o$ , porém com valores inéditos, uma vez que contém o número do canal acrescido do rótulo atribuído por  $mp$ .

Em seguida, como se descreve na linha 13, concatena-se a matriz  $cd_t$  à matriz  $cd_{t1}$  que terá em seu conteúdo todos os canais que já estavam nela registrados antes da coloração, acrescidos dos canais criados a partir da multiplexação.

### c) As Funções de Coloração

Nesta seção será descrita como as funções de colorações atribuem cores aos nós e registram os mesmos na matriz  $ca$ . Embora todas as funções tenham suas particularidades, quanto aos critérios de parada e a escolha do nó do grafo que será colorido, todas as três são muito semelhantes quanto às tarefas realizadas para atribuir uma cor ao nó.

Nas funções de coloração, a variável  $alvo$  registra o nó a ser colorido. A cada iteração, a variável  $alvo$  é recalculada, de acordo com a estratégia de coloração.

Cada nó do grafo  $G$  possui seu próprio conjunto de cores disponíveis representados em  $cd[i,j]$ , que onde cada linha  $i$  representa um nó e cada coluna  $j$ , contém as cores disponíveis para o nó. O vetor **CorDisp** mantém as cores válidas para o nó indicado por  $alvo$ , que são extraídas a partir da matriz  $cd$ , excluindo-se as posições onde o valor seja 0 (zero). Em todas as funções de coloração temos também a variável  $cor$ , que serve como um indexador para percorrer o vetor **CorDisp**, que é iniciada em 1.

A dinâmica de coloração de grafos nos permite entender que o nó definido em *alvo*, não pode receber cores iguais aos nós, que estejam interconectados a ele através de uma aresta. A informação de quais nós estão interconectados ao nó alvo será armazenada no vetor **vi** e é gerada pela função vizinhos, que recebe o grafo **G** e a variável *alvo*. A variável *i*, por sua vez, serve como indexador para **vi** e é iniciada em 1.

Além disto, a cor atribuída ao nó registrado em *alvo* não pode ser igual à cor atribuída aos elementos **vi**, nem mesmo em interações anteriores. Desta forma, é necessário testar a cor candidata não só na interação corrente, mas, em todas as interações anteriores existentes em **ca**.

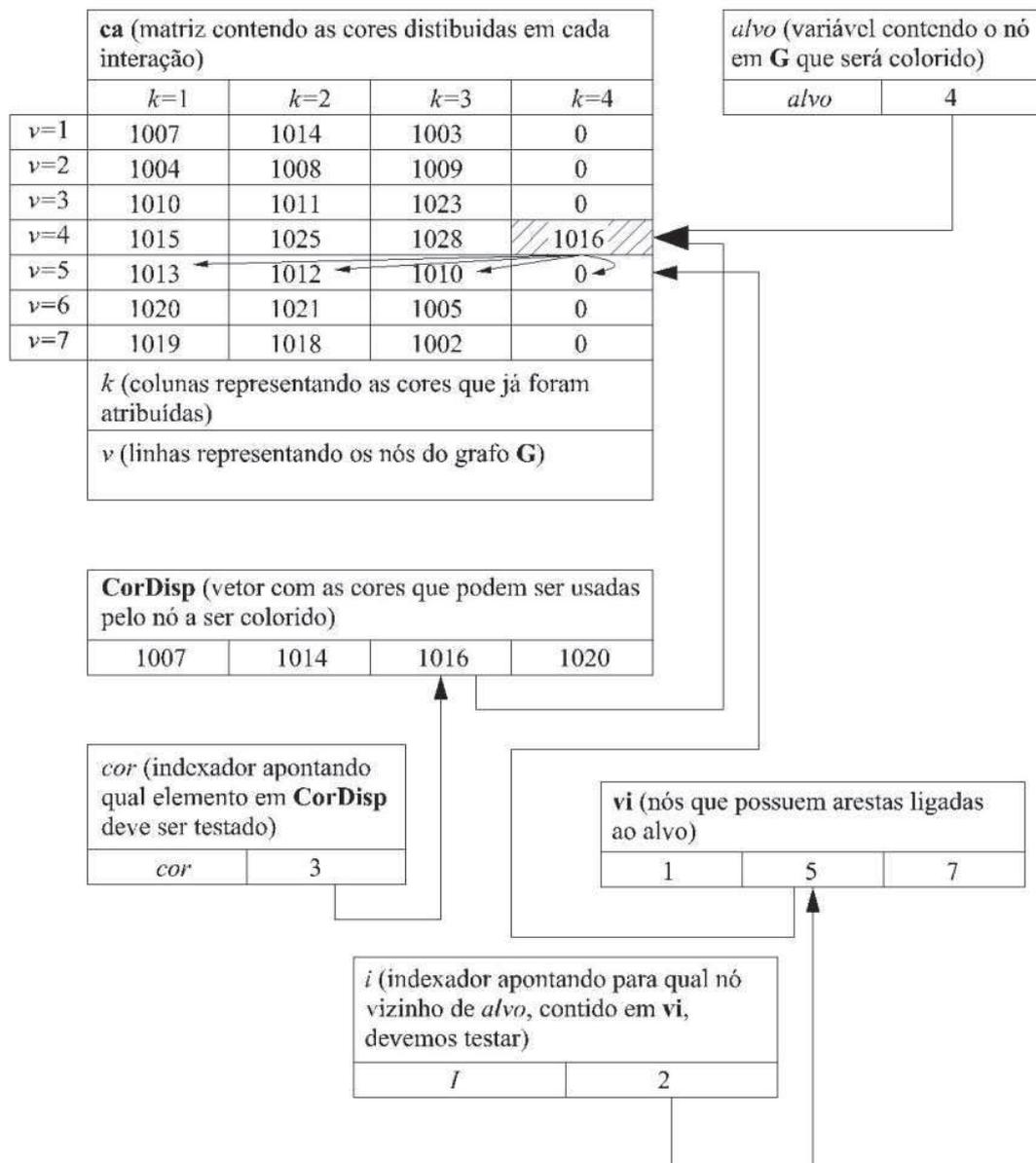
A variável bloqueio recebe o valor de 1 (um) quando, em qualquer nó, em qualquer interação, a cor existente em **CorDisp**, indexada pela variável *cor*, estiver em uso. Neste caso, a variável *cor* é incrementada em 1 e o teste dos nós é reiniciado.

Caso a variável *cor* tenha atingindo um valor maior do que a quantidade de elementos em **CorDisp**, o nó representado pela variável *alvo* recebe o valor de infinito e o próximo nó será testado.

Se os testes se encerrem com a variável bloqueio registrada como 0 (zero), a cor **CorDisp[*cor*]** pode ser atribuída ao nó e deve ser armazenado na matriz **ca**, na linha indicada pela variável *alvo*, na coluna indicada pela variável *K*, além disto, a cor deve ser removida de **cd**, para que não possa ser atribuída em novas interações.

A Figura 12 (Figura de um processo de atribuição de cores) ilustra um exemplo de interação com as atividades realizadas para validar a atribuição de uma cor a um elemento.

Figura 12 - Figura de um processo de atribuição de cores.



Fonte: O autor.

## d) A Função de Coloração LF

A Função de Coloração\_LF é responsável por atribuir ao menos uma cor para cada nó e, caso seja esta a estratégia de coloração escolhida, a tentativa será distribuir ao menos uma cor a cada nó. A função Coloração\_LF pode ser vista na Figura 13 (Pseudocódigo da função Coloração\_LF). As variáveis e funções locais e os argumentos recebidos estão apresentados no Quadro 9 (Variáveis e funções locais e argumentos recebidos pela função Coloração\_LF).

Quadro 9 - Variáveis e funções locais e argumentos recebidos pela função Coloração\_LF.

<p>Argumentos: (<b>G,ca,cd,K</b>)</p> <p>Vizinhos(G, n): função que recebe como argumento o grafo (G) e um de seus nós (n) e retorna um vetor com os vizinhos de n;</p> <p>Numerador(<b>Cd</b>, alvo): função que recebe como argumento a matriz <b>Cd</b> e o nó que será colorido, retornando um vetor com os números dos canais que estão disponíveis, para este nó</p> <p><i>cor</i>: variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor <b>CorDisp</b>.</p> <p><b>K</b>:variável que serve como contador de interações que serão percorridas.</p> <p><i>alvo</i>: variável que indica o nó que deve ser colorido durante esta interação.</p> <p><b>ordenado</b>: vetor contendo os nós de <b>G</b> por ordem decrescente de grau.</p> <p><i>n</i>: variável contendo o índice do vetor <b>ordenado</b> identificando o nó a ser colorido;</p> <p><b>CorDisp</b>: vetor que contendo as cores (canais) que podem ser utilizados no nó que desejamos atribuir</p> <p><b>vi</b>: vetor contendo os nós vizinhos de alvo.</p> <p><i>i</i>: variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor <b>vi</b>.</p> <p><i>bloqueio</i>: variável que serve como flag, valendo 0 (zero), quando não existem restrições para o uso da cor e 1 quando existem restrições para o uso da cor.</p>
--

Fonte: O autor.

Figura 13 - Pseudocódigo da função Coloração\_LF.

## Pseudocódigo Função Coloração\_LF

```

1.  Início
2.   $n = 1$  // índice do nó no vetor ordenado
3.   $cor = 1$  // índice em CorDisp
4.  Enquanto  $n \leq N$  Faça
5.     $alvo = \text{ordenado}[n]$  // nó a ser colorido
6.    CorDisp = Numerador(Cd,  $alvo$ )
7.     $vi = \text{Vizinhos}(G, alvo)$  // vizinhos do nó a ser colorido
8.     $i = 1$  // indexador de  $vi$ 
9.     $bloqueio = 0$ 
10.    $k = 1$  // contador de interações
11.   Enquanto  $i \leq |vi|$  Faça
12.     Enquanto  $k \leq K$  Faça // comparando k posições entre vetores
13.       Se  $ca[vi[i], k] = \text{CorDisp}[cor]$ 
14.          $bloqueio = 1$  // flag que impede o uso da cor
15.       Fim do se
16.        $k = k + 1$ 
17.     Fim do enquanto
18.      $i = i + 1$ 
19.   Fim do enquanto
20.
21.   Se  $bloqueio = 0$  // se não temos nada que impede de usar a cor.
22.      $ca[alvo, K] = \text{CorDisp}[cor]$  //salva a cor definida em ca
23.      $cd[alvo, \text{CorDisp}[cor]] = 0$  // tornando a cor utilizada indisponível para
24.     //futuras interações
25.      $cor = 1$  // reiniciamos a pesquisa de cores
26.      $n = n + 1$  // próximo nó em ordenado
27.   Se não // reiniciamos com uma nova cor
28.      $cor = cor + 1$  // testa com a próxima cor
29.      $bloqueio = 0$ 
30.     Se  $cor > |\text{CorDisp}|$  // todas as cores foram testadas e nenhuma pode ser
31.     //atribuída.
32.      $ca[alvo, K] = \infty$  // indica que não existe nenhuma cor disponível
33.      $cor = 1$ 
34.      $n = n + 1$  // próximo nó em ordenado
35.   Fim do se
36. Fim do se
37. Fim do enquanto
38. Fim

```

Fonte: O autor.

Nesta função, o objetivo é atribuir uma cor a cada nó do grafo **G**. Para que isto aconteça, de forma a maximizar o uso de cores, o vetor **ordenado** contém nós em ordem decrescente de arestas e a variável  $n$  é usada como um indexador deste vetor, que servirá para atribuir à variável *alvo* o nó que está sendo colorido.

Entre a linha 3 e a linha 37 criou-se um laço de repetição que contém a maior parte do código e irá se repetir até a variável  $n$  atingir a quantidade de vértices do grafo **G**. Dentro deste laço ocorrem todas as verificações necessárias para validar uma cor. E para que o processo seja realizado com sucesso, internamente foram criados dois laços adicionais.

O laço mais externo pode ser visto entre as linhas 11 e 19 do pseudocódigo (Figura 13 - Pseudocódigo da função Coloração\_LF), e sua função é percorrer dentro da matriz **ca** os vizinhos do nó *alvo* (registrados no vetor **vi**). O laço mais interno, que pode ser visto entre as linhas 12 e 17, tem como função percorrer as cores que já foram atribuídas ao nó em interações anteriores também na matriz **ca**.

Se, em qualquer interação, algum elemento contido em **ca**, pesquisado pelos laços de repetição, já estiver usado a cor **CorDisp**[*cor*], o valor de 1 será atribuído à variável *bloqueio*, como podemos verificar entre as linhas 13 e 15.

O passo seguinte neste algoritmo é o processo de atribuição de cor, entre a linha 21 e 25, tratam-se da situação onde o *flag bloqueio* indica que não existem impedimentos para o uso da cor, nesta situação, iremos registrar na matriz **ca**. Na linha indicada pela variável *alvo*, na coluna indicada por  $K$ , à cor existente em **CorDisp** indexada por *cor*.

Altera-se também o valor da cor na matriz **cd** para 0 (zero), desta forma esta cor não será mais incluída no vetor **CorDisp** em futuras interações e a função principal, desta maneira, detecta que nesta interação a atribuição foi realizada com sucesso.

Uma vez que todo o processo para colorir o nó apontado por *alvo* foi concluído, a variável  $n$  é incrementada em 1 (um), apontando assim para o próximo nó, em uma próxima interação, enquanto  $n \leq N$ .

Entre a linha 27 e 36, trata-se da situação onde foi detectado um bloqueio e, portanto, a cor em **CorDisp** indexada por *cor*, não pode ser atribuída ao nó devido a conflitos. Nesta situação, a variável *cor* é incrementada em 1 (um) e a variável *bloqueio* volta a receber 0 (zero) permitindo assim que todo o processo possa ser refeito testando uma nova cor.

Existe ainda a possibilidade que a variável *cor*, que serve como indexador, acabe por apontar para um valor maior do que o tamanho do vetor **CorDisp**. Nesta situação, deve-se registrar na matriz **ca**[*alvo*, $k$ ] o valor infinito, sem alterar qualquer elemento em **cd** e

incrementando em 1 (um) a variável  $n$ , visando colorir o próximo nó, ou alcançar o fim das interações.

#### e) A Função Coloração\_Demanda

A Função Coloração\_Demanda irá distribuir cores até ser possível atingir a demanda ou o valor de infinito, então, encerra-se a distribuição, mesmo que ainda restem cores que podem ser atribuídas aos nós.

O Quadro 10 (Argumentos, variáveis e funções locais da função Coloração Demanda) apresenta os argumentos recebidos, funções e variáveis locais desta função. A Figura 14 (Pseudocódigo função Coloração\_demanda) apresentado seu pseudocódigo.

Quadro 10 - Argumentos, variáveis e funções locais da função Coloração\_Demanda.

<p>Argumentos: (<b>G</b>, <b>ca</b>, <b>cd</b>, <b>K</b>, <b>dm</b>)</p> <p>Variáveis e funções locais:</p> <p><b>dm<sub>x</sub></b>: vetor com a demanda de canais por nó. <b>dm<sub>x</sub>[i]</b> = demanda do nó <math>i</math>, levando em conta se ocorreu alguma multiplexação (<math>i = 1, \dots, N</math>).</p> <p><b>p</b>: vetor de demandas normalizadas (valores entre 0 e 1). <b>p[i]</b> = demanda normalizada do nó <math>i</math> (<math>i = 1, \dots, N</math>).</p> <p><b>CorDisp</b>: vetor que contendo os canais (cores) que podem ser utilizados no nó que desejamos atribuir.</p> <p><b>y</b>: vetor de tamanho igual a <b>dm</b>, onde os elementos em <b>mc</b> são classificados de acordo com sua contribuição para atingir o valor esperado em <b>dm<sub>x</sub></b>.</p> <p><b>vi</b>: vetor contendo os nós vizinhos de um nó.</p> <p><i>alvo</i>: variável que indica o nó que deve ser colorido durante esta interação</p> <p><i>bloqueio</i>: flag de restrição de uso de cor. <i>bloqueio</i> = 0 quando não existem restrições para o uso da cor; e <i>bloqueio</i> = 1 quando existem restrições para o uso da cor.</p> <p>Vizinhos(<b>G</b>, <math>n</math>): função que recebe como argumento o grafo (<b>G</b>) e um de seus nós (<math>n</math>) e retorna um vetor com os vizinhos de <math>n</math>.</p> <p>Numerador(<b>cd</b>, <i>alvo</i>): função que recebe como argumento a matriz <b>cd</b> e o nó que será colorido, retornando um vetor com os números dos canais que estão disponíveis, para este nó.</p> <p><b>mc</b> vetor de dimensão <math>N</math> contendo a quantidade de canais já alocada para cada nó do grafo, onde cada elemento representa uma contribuição diferente ao <i>alvo</i>.</p> <p><math>i</math>: variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor <b>vi</b></p>
--

**obj**: vetor de tamanho igual à **dm** onde cada elemento representa um flag para um nó  $v$  em  $G$ , **obj**[ $i$ ] = 0(zero) quando ainda podem ser alocados canais e **obj**[ $i$ ] = 1 quando já atingimos o valor de infinito e portando não existem mais cores para serem alocadas ao nó.

Fonte: O autor.

Figura 14 - Pseudocódigo função Coloração\_Demanda.

```

1. Início
2. mc =  $dm^0$  //vetor contendo as contribuições já atribuídas para cada nó
3. obj = dm*0
4.  $dm_x = dm * ((mp/1000)+1)$  // recalcula a demanda com base na multiplexação
5. cor = 1 // índice no vetor CorDisp
6.  $p = \frac{dm_x}{\sum_{j=1}^N dm_x[j]}$  // p recebe as demandas normalizadas
7.
8. Para  $i$  de 1 até  $N$  faça // verifica se algum elemento já atingiu a demanda
9.   Se  $mc[i] = dm_x[i]$  // durante a Coloração_LF
10.    obj[ $i$ ]=1
11.   Fim do se
12. Fim para
13.
14. Enquanto  $\sum_{i=1}^N obj[i] \neq N$  Faça
15.
16.   Para  $i$  de 1 até  $N$  faça // vetor y onde os elementos em mc
17.      $y[i] = p[i] \cdot \ln(mc[i] + 1)$  // são classificados de acordo com sua contribuição
18.   Fim para // para atingir a demanda
19.
20.    $alvo = \max(y)$  // nó a ser colorido é o maior elemento em y
21.   CorDisp = Numerador(cd,  $alvo$ ) // cores disponíveis ao nó a ser colorido (alvo)
22.   vi = Vizinhos(G,  $alvo$ ) // vizinhos do nó a ser colorido (alvo)
23.    $i = 1$  // indexador de vi
24.   bloqueio = 0
25.
26.   Se  $ca[alvo, k] \neq 0$  // inclui, caso necessário, uma
27.      $K = K + 1$  //nova coluna zerada na matriz ca
28.      $ca[:, K] = 0_{N \times 1}$ 
29.   Fim do se
30.
31.   Enquanto  $i \leq |vi|$  Faça
32.      $k = 1$  // contador de interações
33.     Enquanto  $k \leq K$  Faça // comparando k posições entre vetores
34.       Se  $ca[vi[i], k] = CorDisp[cor]$ 
35.         bloqueio = 1 // flag que impede o uso da cor
36.       Fim do se
37.        $k = k + 1$ 
38.     Fim do enquanto
39.      $i = i + 1$ 
40.   Fim do enquanto
41.
42.   Se bloqueio = 0 // se nada impede o uso da cor.
43.      $ca[alvo, k] = CorDisp[cor]$  // salvar a cor definida na matriz ca
44.      $cd[alvo, CorDisp[cor]] = 0$  // tornar a cor utilizada indisponível para
45.     // futuras interações
46.     cor=1 // reiniciar a pesquisa de cores

```

```

47         mc[alvo, alvo] = mc[alvo, alvo]+1 // registrar a contribuição na matriz mc
48         Se mc[alvo] ≥ dmx[alvo]
49             obj[alvo]=1
50         Fim do se
51     Se não // reiniciar com uma nova cor
52         cor=cor+1 // testar com a próxima cor
53         bloqueio=0
54         Se cor > |CorDisp| // todas as cores foram testadas e nenhuma pode
55             //ser atribuída.
56         ca[alvo, k]=∞ // indica que não existe nenhuma cor disponível
57         cor=1
58         mc[alvo]= mc[alvo]+1 // registra a contribuição na matriz mc
59         Se mc[alvo] ≥ dmx[alvo]
60             obj[alvo]=1
61         Fim do se
62     Fim do se
63 Fim do se
64 Fim do enquanto
65 Fim

```

Fonte: O autor.

Na função *Coloração\_Demanda*, o objetivo é distribuir todas as cores possíveis até atingir a quantidade de cores atribuídas em **dm** a todos os nós. Para isto, a função de *Coloração\_Demanda* sofre algumas modificações em relação à função *Coloração\_LF*. Estas modificações são descritas a seguir: os demais elementos do pseudocódigo são os mesmos e aplicados da mesma maneira da *Coloração\_LF*.

No início desta função, levamos em conta a possibilidade de termos cores que representam canais multiplexados. Os canais que sofreram este processo de multiplexação foram divididos e, como consequência, têm menos capacidade de transferência de dados, portanto, os valores existentes no vetor **dm** deixam de representar a demanda real. Devido a este motivo, o vetor **dm<sub>x</sub>**, de dimensão igual à **dm**, registra a demanda de cores, considerando a multiplexação realizada pela função *Multi*. O vetor **dm<sub>x</sub>**, é criado na linha 3 do pseudocódigo.

O vetor **obj**, de dimensão igual a *N* é criado. Cada elemento de **obj**, é um flag para o nó *v* em **G**, onde 0(zero) significa que ainda podem ser atribuídas novas cores ao nó e 1 significa que não é mais possível atribuir novas cores. Todos os elementos em **obj** são iniciados com o valor 0 (zero).

A primeira distribuição de cores, sempre é realizada pela *coloração\_LF*, entre as linhas 8 e 12 verificamos se durante esta primeira coloração a demanda já não foi atendida, em caso positivo o elemento **obj**[*i*] recebe o valor de 1 sinalizando que a WRAN *i* já foi atendida.

O vetor **p** de dimensão *N* recebe a demanda por cores de **dm<sub>x</sub>** de maneira normalizada.

Na linha 2 é criado o vetor **mc** onde cada elemento **mc[i]** da diagonal representa a quantidade de cores alocadas para o nó *i*

O passo seguinte é a criação do vetor **y**, que contém um valor numérico representando o quanto que cada elemento do vetor **mc** contribui para atingirmos a demanda em **p**.

O vetor **y**, onde **y[i]** recebe os valores resultantes da equação 7. Esta equação, a exemplo descrito Camarda et al. (2010) é usada para registrar a contribuição de cada nó *i* (armazenada em **mc[i]**) para que seja atingida a demanda normalizada em **p**.

$$\mathbf{y}[i] = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}[i] \ln(\mathbf{mc}[i] + 1) \quad (7)$$

A variável *alvo*, que em todas as funções de coloração registra em qual o nó em G o algoritmo deve atribuir uma cor, corresponderá a posição em que o vetor **y** possui o maior valor e, portanto, irá contribuir mais para se atingir a demanda.

Entre as linhas 26 e 29, cria-se, sempre que necessário, uma nova coluna em **ca**. Isto se deve, pois, devido à característica de proporcionalidade em **y**, a função pode indicar a coloração de um mesmo nó várias vezes, nestes casos são necessárias novas colunas em **ca**, para que se possa, desta maneira armazenar todas as cores que forem atribuídas.

Toda a vez que uma cor ou o valor de infinito for atribuído a um nó, incrementa-se no elemento **mc[alvo]**, o valor de 1. Desta forma na próxima interação durante o calculo do vetor **y**, esta atribuição será considerada.

Sempre que o valor do elemento **mc[alvo]** for igual a demanda existente em **dm<sub>x</sub>[alvo]** ou se atingir o valor igual a infinito, o elemento **obj[alvo]** receberá o valor de 1. Sinalizando que a **WRAN[alvo]**, já recebeu as atribuições de cores necessárias. O algoritmo irá repetir os processos de atribuição contidos entre a linhas 14 e 64 do pseudocódigo até que a soma dos elementos do vetor **obj** seja igual a *N*.

#### f) A função Coloração\_Proporcional

A função Coloração\_Proporcional tem como objetivo distribuir todas as cores, mas, de maneira proporcional a demanda. O pseudocódigo referente à função pode ser visto na Figura 15 (Pseudocódigo Coloração\_Proporcional). As variáveis e funções locais, bem como os argumentos recebidos, podem são apresentados no Quadro 11 (Variáveis e funções locais da função Coloração\_Proporcional).

Quadro 11 – Variáveis e funções locais da função Coloração\_Proportional.

Argumentos: (**G**, **ca**, **cd**,  $K$ , **dm**)

Variáveis e funções locais:

**dm<sub>x</sub>**: vetor com a demanda de canais por nó. **dm<sub>x</sub>[i]** = demanda do nó  $i$ , levando em conta se ocorreu alguma multiplexação ( $i = 1, \dots, N$ ).

**p**: vetor de demandas normalizadas (valores entre 0 e 1). **p[i]** = demanda normalizada do nó  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ).

**obj**: vetor de tamanho igual à **dm** onde cada elemento representa um flag para um nó  $v$  em  $G$ , **obj[i]** = 0(zero) quando ainda podem ser alocados canais e **obj[i]** = 1 quando já atingimos o valor de infinito e portanto não existem mais cores para serem alocadas ao nó.

**CorDisp**: vetor que contendo os canais (cores) que podem ser utilizados no nó que desejamos atribuir.

**y**: vetor de tamanho igual à **dm**, onde os elementos em **mc** são classificados de acordo com sua contribuição para atingir o valor esperado em **dm<sub>x</sub>**.

**vi**: vetor contendo os nós vizinhos de um nó.

*alvo*: variável que indica o nó que deve ser colorido durante esta interação

*bloqueio*: flag de restrição de uso de cor. *bloqueio* = 0 quando não existem restrições para o uso da cor; e *bloqueio* = 1 quando existem restrições para o uso da cor.

Vizinhos( $G$ ,  $n$ ): função que recebe como argumento o grafo ( $G$ ) e um de seus nós ( $n$ ) e retorna um vetor com os vizinhos de  $n$

Numerador(**cd**, *alvo*): função que recebe como argumento a matriz **cd** e o nó que será colorido, retornando um vetor com os números dos canais que estão disponíveis, para este nó.

**mc** vetor de dimensão  $N$  contendo a quantidade de canais já alocada para cada nó do grafo, onde cada elemento representa uma contribuição diferente ao *alvo*.

$i$ : variável que serve como índice para os elementos contidos no vetor **vi**

Fonte: O autor.

Figura 15 – Pseudocódigo Coloração Proporcional  
Pseudocódigo Coloração\_Proporcional

```

1. Início
2. mc = 1 //vetor contendo as contribuições para cada nó
3. obj=dm*0 // vetor de flags registrando nós que atingiram o infinito
4. dmx=dm*((mp/1000)+1) // recalcula a demanda com base na multiplexação
5. cor = 1 // índice no vetor CorDisp
6. 
$$p = \frac{dm_x}{\sum_{j=1}^N dm_{x[j]}}$$
 // p recebe as demandas normalizadas
7.
8. Enquanto  $\sum_{i=1}^N \mathbf{obj}[i] \neq N$  Faça
9.
10. Para i de 1 até N faça // vetory onde os elementos em mc
11. y[i] = p[i].ln(mc[i] +1) // são classificados de acordo com sua contribuição
12. Fim para // para atingir a demanda
13.
14. alvo = max(y) // nó a ser colorido é o maior elemento em y
15. CorDisp = Numerador(cd, alvo) // cores disponíveis ao nó a ser colorido (alvo)
16. vi = Vizinhos(G, alvo) // vizinhos do nó a ser colorido (alvo)
17. i = 1 // indexador de vi
18. bloqueio = 0
19.
20. Se ca[alvo, k]≠0 // inclui, caso necessário, uma
21. K=K+1 //nova coluna zerada na matriz ca
22. ca[:, K]=0Nx1
23. Fim do se
24.
25. Enquanto i ≤ |vi| Faça
26. k = 1 //inicia-se o contador de interações
27. Enquanto k ≤K Faça // comparando k posições entre vetores
28. Se ca[vi[i], k] = CorDisp [cor]
29. bloqueio = 1 // flag que impede o uso da cor
30. Fim do se
31. k = k + 1
32. Fim do enquanto
33. i = i + 1
34. Fim do enquanto
35.
36. Se bloqueio = 0 // se nada impede o uso da cor.
37. ca[alvo, K] = CorDisp [cor] //salvar a cor definida na matriz ca
38. cd[alvo, CorDisp [cor]] = 0 // tornar a cor utilizada indisponível para
39. //futuras interações
40. cor=1 // reiniciar a pesquisa de cores
41. mc[alvo] = mc[alvo]+1 // registrar a contribuição na matriz mc
42. Se não // reiniciar com uma nova cor
43. cor=cor+1 // testar com a próxima cor
44. bloqueio=0
45. Se cor > |CorDisp| // todas as cores foram testadas e nenhuma pode
46. //ser atribuída.
47. ca[alvo, k]=∞ // indica que não existe nenhuma cor disponível
48. cor=1

```

```

49             mc[alvo]= mc[alvo]+1 // registra a contribuição na matriz mc
50             obj[alvo]=1           // indica que o nó alvo atingiu o valor infinito
51         Fim do se
52     Fim do se
53 Fim do enquanto
54 Fim

```

Fonte: O autor.

Este algoritmo realiza as interações e manipula os elementos de maneira idêntica a Coloração\_Demanda, com as seguintes exceções.

O vetor **obj**, de dimensão igual a  $N$  é criado. Cada elemento de **obj**, é um flag para o nó  $v$  em  $G$ , onde 0(zero) significa que ainda podem ser atribuídas novas cores ao nó e 1 significa que não é mais possível atribuir novas cores. Todos os elementos em **obj** são iniciados com o valor 0 (zero).

O principal laço de verificação que repete as funções alternando o indexador alvo irá repetir até o valor a soma dos elementos do vetor **obj**, ser igual a  $N$ .

Na linha 50 do pseudocódigo observa-se que toda a vez que  $ca[alvo,k]$  for igual a infinito, **obj**[alvo]=1.

Desta forma, a função será encerrada quando novas atribuições de cores não forem mais possíveis para nenhum elemento  $v$  em  $G$ .

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foram apresentadas as funções que compõem nossa solução para distribuição de espectro eletromagnético disponível entre WRANs fazendo uso de coloração de grafos. Descrevemos agora algumas considerações sobre a proposta:

- Com o objetivo de representar as diferentes porções do espectro-eletromagnético disponível, dividimos o espaço disponibilizado por usuários primários para cada WRAN em canais, mas, que para facilitar o entendimento do algoritmo será chamado de cor;
- Quando determinada WRAN não puder fazer uso de qualquer canal devido a restrições impostas por seus vizinhos, uma função de multiplexação, que dobra a quantidade de cores é executada, diminuindo, entretanto, a capacidade de transferência de cada cor;
- Independente da estratégia de coloração escolhida, a primeira distribuição de cores será feita pelo método LF, garantindo assim que ao menos ao menos uma cor será atribuída para cada nó do grafo;

- Os métodos de coloração que levam em conta a demanda executam operações para determinar qual nó será colorido em cada iteração de maneira que a distribuição mantenha-se sempre proporcional;
- Em distribuições que entregam todas as cores possíveis, o critério de parada é estabelecido, observando-se as cores ainda disponíveis para distribuição são as mesmas antes e depois da execução das funções. Em caso afirmativo, não existiu qualquer progresso na execução das funções e não é necessário continuar executando as mesmas.

## CAPÍTULO 5

### 5 RESULTADOS

Neste capítulo descreve-se o ambiente onde os algoritmos propostos no capítulo 4 foram implementados, bem como, os testes realizados com eles e a comparação de seus resultados com outra proposta, o algoritmo *Utility Graph Colouring* (UGC) citado na seção 3.2.

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: na seção **5.1** descrevemos as **ferramentas utilizadas** para implementar os algoritmos propostos; na seção **5.2** definimos os **procedimentos metodológicos**, incluindo variáveis que são alteradas durante as simulações e as métricas utilizadas para avaliar os resultados; na seção **5.3** descrevemos como os **resultados das simulações serão representados graficamente**; na seção **5.4** demonstramos os **resultados das simulações variando o espaço utilizado por usuários primários**; na seção **5.5** demonstramos os **resultados das simulações variando a densidade média dos grafos**; na seção **5.6** demonstramos os **resultados das simulações variando a quantidade de nós existentes no grafo**; e, por fim, na seção **5.7** são feitas algumas **considerações** sobre as simulações realizadas.

#### 5.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Os algoritmos descritos no capítulo 4 foram implementados utilizando o Matlab, um aplicativo voltado a realização de cálculos com matrizes. O Matlab foi instalado no sistema operacional Microsoft Windows 7 64 bits, em um computador Intel Core i3 370M 2.4GHz, com dois núcleos e 3GB de memória RAM.

#### 5.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nos experimentos propostos para este trabalho três variáveis serão manipuladas: o grau do grafo; o número de nós do grafo; e a quantidade de espectro utilizada por operadores primários. Em cada experimento, no entanto, alteramos apenas um elemento e mantemos os outros demais fixos, criando desta maneira três conjuntos diferentes de dados.

Embora os algoritmos propostos neste trabalho, possam ser executados em um cenário onde a disponibilidade de canais é variável entre as WRANs, para que possa ser comparado com a proposta do algoritmo UGC, o ambiente vai sempre apresentar o mesmo conjunto de canais para todas as WRANs, ou seja todas as WRANs conflitantes terão disponíveis os mesmos canais para operar.

Os grafos que representam as WRANs são conexos e gerados randomicamente.

Para as simulações que envolvam uma quantidade crescente de nós, em nossos experimentos utilizaremos sempre o mesmo vetor **dm** contendo as demandas por canais de cada nó. Este vetor será fixo e terá um tamanho igual aos nós da maior rede testada, para os testes envolvendo conjuntos de redes que tiverem uma quantidade  $V$ , de nós inferior a **dm**, serão ignorados os elementos excedentes em **dm**.

Os experimentos realizados avaliaram os algoritmos a partir de três métricas: o aproveitamento ou utilidade do espectro eletromagnético em MHZ; a média quadrática de erro entre o demandado pelas WRANs e o determinado pelos algoritmos; e, por fim, a proporcionalidade entre o espaço demandado e o espaço obtido por cada um dos nós que compõem o grafo, em relação ao total. Em todas as avaliações as três funções de distribuição do algoritmo UGC e, também, as três funções do nosso algoritmo de coloração foram incluídas.

Para o cálculo de utilidade do espectro multiplicamos o total de cores válidas distribuídas para todos os nós pelo tamanho em MHZ do canal, da mesma maneira como foi realizado na proposta UGC Sengupta et al. (2011) que pode ser vista na seção 3.2.

Um exemplo de como obter o resultado esperado desta operação pode ser visto no Quadro 12 (Resultado esperado). Neste quadro a matriz **ca** que representa os canais alocados, nos informa que foram atribuídos 2 canais para cada um dos 2 nós existentes. Portanto, foram distribuídos 4 canais no total, este valor, no exemplo abaixo será armazenado na variável *Distribuido*, na variável *tm* podemos observar que cada canal tem um tamanho de 6 Mhz, consequentemente podemos entender que a utilidade do espectro foi de 24 Mhz pois alocamos 4 canais de 6 MHZ cada um. No exemplo abaixo armazenamos este valor na variável *utilidade*.

Quadro 12 – Exemplo de resultado esperado

$\mathbf{ca} = \begin{bmatrix} 1004 & 1005 \\ 1006 & 1008 \end{bmatrix}$
$\text{Distribuído}(\mathbf{ca}) = 4$
$tm=6\text{Mhz}$
$\text{utilidade} = \text{Distribuído} \cdot tm = 24\text{Mhz}$

Fonte: O autor.

O cálculo da utilidade do espectro pelo algoritmo UGC segue características próprias da proposta como foi discutido na seção 3.2.

Como o objetivo de verificarmos a proporcionalidade entre o demandado e o distribuído pelo algoritmo calculamos também o erro quadrático médio normalizado. Inicialmente calculamos o erro quadrático médio (*erro*) entre a demanda e a quantidade determinada pelo algoritmo através da equação 8, levando-se em conta os valores demandados e entregues em MHz.

$$\text{erro} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{dm}_i - \mathbf{ca}_i)^2} \quad (8)$$

Onde  $N$  é a quantidade de nós do grafo,  $\mathbf{dm}_i$  é a demanda em MHz do nó  $i$ , e  $\mathbf{ca}_i$  é o total em MHz alocado para o canal  $i$ .

O erro quadrático médio normalizado ( $\text{erro}^{nor}$ ) é calculado a partir da normalização da demanda e da banda atribuída, conforme Equações (9) e (10).

$$\mathbf{dm}_i^{nor} = \frac{\mathbf{dm}_i}{\sum_{i=1}^N \mathbf{dm}_i} \quad (9)$$

$$\mathbf{ca}_i^{nor} = \frac{\mathbf{ca}_i}{\sum_{i=1}^N \mathbf{ca}_i} \quad (10)$$

Onde  $\mathbf{dm}^{nor}$  e  $\mathbf{ca}^{nor}$  são os vetores onde são armazenadas a demanda normalizada e a banda atribuída normalizada, respectivamente.

Por fim calculamos o erro quadrático médio normalizado através da Equação 11.

$$erro^{nor} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{dm}_i^{nor} - \mathbf{ca}_i^{nor})^2} \quad (11)$$

Nesta seção apresentaram-se os procedimentos metodológicos que foram aplicados durante os experimentos realizados com os algoritmos propostos em comparação com o algoritmo UGC.

### 5.3 A REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

Nos gráficos apresentados nesta seção, as legendas que caracterizam os valores obtidos durante a execução dos testes, levam os seguintes nomes “UGC-F1”, “UGC-F2”, e “UGC-F3”, referindo-se às três funções propostas no artigo Sengupta et al. (2011) discutidas na seção 3.2. As curvas obtidas a partir de nossa proposta são legendadas, por sua vez, como “Coloração-LF”, “Coloração-Demanda”, e “Coloração-Proporcional”, referindo-se as funções de coloração expostas anteriormente no Capítulo 4.

Todas as simulações foram executadas 30 vezes e os resultados representam a média dos valores obtidos nestas 30 execuções.

### 5.4 SIMULAÇÃO VARIANDO A OCUPAÇÃO POR USUÁRIOS PRIMÁRIOS

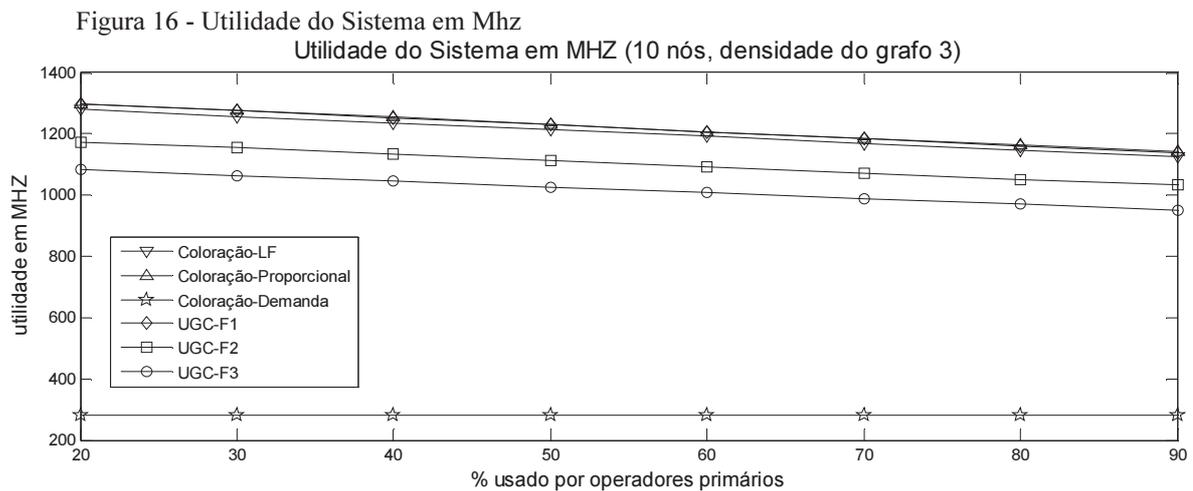
Nessa simulação manteve-se fixo o número de nós e o grau do grafo, variando-se o percentual do espaço utilizado no espectro por operadores primários.

Os parâmetros aplicados podem ser vistos no Quadro 13. A simulação foi executada 30 vezes com grafos conexos gerados aleatoriamente. A utilidade em Mhz pode ser vista na Figura 16, enquanto que o erro quadrático médio em relação à demanda está representado na Figura 17. Finalmente, o erro quadrático médio proporcional está representado na figura 18.

Quadro 13 - Parâmetros aplicados.

Parâmetros	Valores
Densidade média do grafo	3
Número de nós do grafo	10
Tamanho original do canal (largura de banda)	6 MHz
Total de canais disponíveis (primários + secundários)	60
Banda mínima para uma WRAN entrar em operação (Bmin)	6
Demanda em canais de 6 MHz de cada nó (dm)	1 5 5 5 3 5 7 5 5 6
Percentual do espectro utilizado por usuários primários (parâmetro modificado)	20 30 40 50 60 70 80 90

Fonte: O autor.

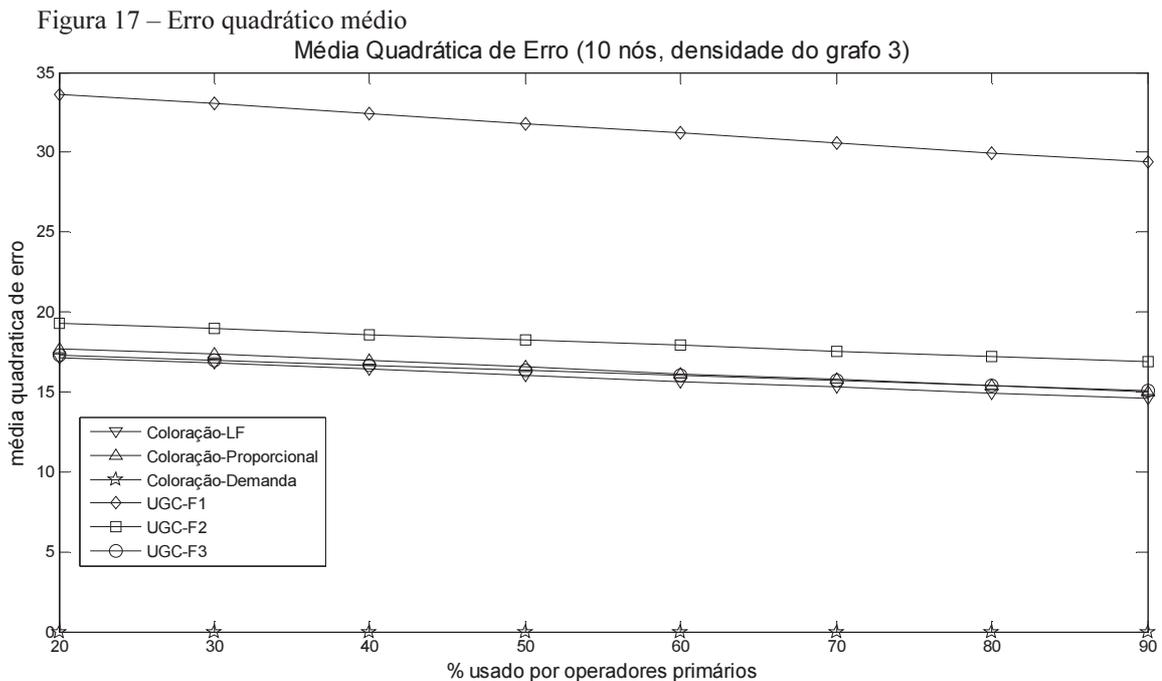


Fonte: O autor.

No gráfico apresentado na Figura 16 (Utilidade do Sistema em Mhz) observa-se que, de maneira geral, a quantidade de espectro eletromagnético destinado às redes IEEE 802.22 diminui à medida que os espaços liberados pelos usuários primários também diminui.

O pior resultado em relação à utilidade em Mhz, que é visto na Figura 16 é dado por Coloração-Demanda, pois neste método, o algoritmo encerra a execução assim que atinge o valor demandado pelo sistema, ignorando a possibilidade de distribuição de novos canais. A Coloração-Proporcional e a função UGC-F1 distribuem uma quantidade muito parecida de MHz para os nós do grafo, sendo as que apresentaram melhor desempenho. A distribuição LF tem um desempenho, na maior parte da simulação, apenas um pouco abaixo das duas primeiras.

Estas diferenças tornam-se menores à medida que a quantidade de soluções válidas diminui, devido, a redução de cores disponíveis para serem atribuídas. Outros fatores que também podem influenciar a quantidade de soluções válidas são por exemplo, o aumento da densidade do grafo ou a redução de nós do grafo possibilidades estas que são discutidas na seção 5.5 e seção 5.6, respectivamente.



Fonte: O autor.

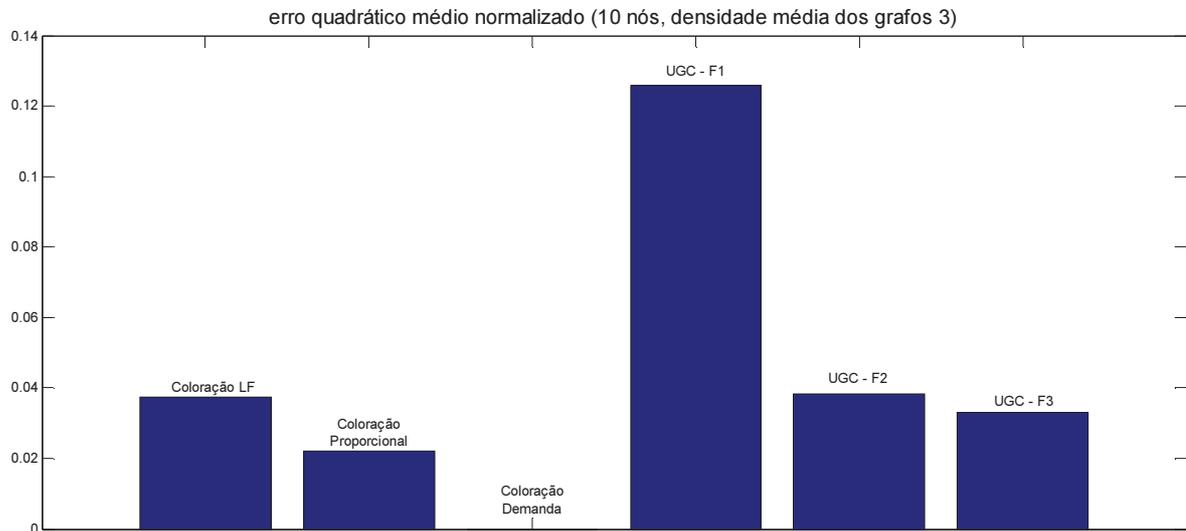
Quando se observa o erro quadrático médio (ver Figura 17), percebe-se que a função UGC-F1 introduz um erro maior do que as demais propostas, devido à sua característica de priorizar uma cor em detrimento de outras. A função Coloração-Demanda não apresenta erros, uma vez que isto seria possível apenas em situações onde não existam frequências suficientes para atender a demanda.

As demais funções UGC-F3, Coloração-Proporcional e Coloração-LF têm um erro quadrático médio muito semelhante e o UGC-F2 tem um erro um pouco maior pois também prioriza a utilizada de do espectro muito embora de maneira menos agressiva que UGC-F1 ver como pode ser observado na seção 3.2.

Nos métodos onde o erro quadrático médio é diferente de zero, observa-se que a medida que o espaço disponível para as redes IEEE 802.22 diminui, o erro quadrático médio também cai. Isto se deve à propriedade, que estes algoritmos possuem de distribuir o espaço excedente e este excesso distribuído é computado como um erro. Se levarmos em conta este

propriedade, a medida que este espaço excedente diminui é realmente esperado que este erro caia.

Figura 18 - Erro quadrático médio normalizado



Fonte: O autor.

O erro quadrático médio normalizado em relação à demanda manteve-se constante, independente do espaço de espectro ocupado pelos usuários primários, como se observa na Figura 18 (Erro quadrático médio normalizado). O maior erro proporcional à demanda é induzido pela função UGC-F1, enquanto que o menor erro é apresentado pela função Coloração-Demanda.

Dentro dos métodos que distribuem os canais excedentes, o melhor resultado é o da Coloração-Proporcional, pois, o método procura distribuir o excesso de frequência de maneira proporcional à demanda.

Os valores apresentados nas simulações de Coloração-Proporcional, porém, são diferentes de zero, isto pode ser explicado quando se leva em conta a combinação de nós vizinhos pode gerar restrições que impedem a livre distribuição de cores e o próprio conjunto de cores pode não ser múltiplo exato da demanda. Em todos estes casos não será possível, para a Coloração-Proporcional, apresentar neste teste, um erro igual a zero.

## 5.5 SIMULAÇÃO VARIANDO A DENSIDADE MÉDIA DOS GRAFOS

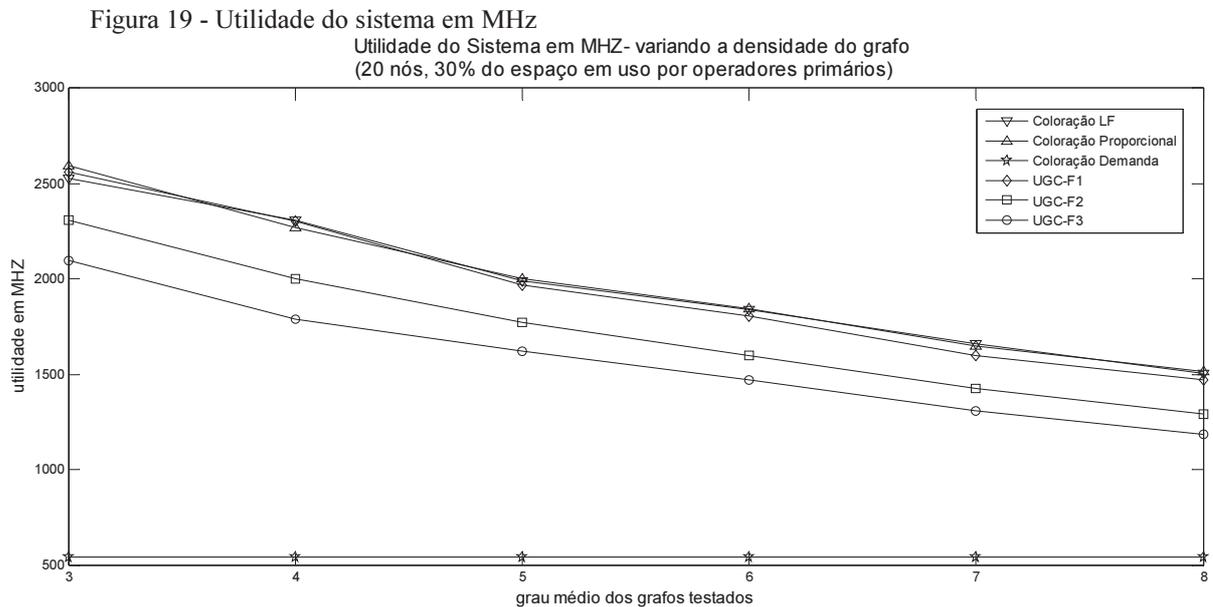
Nessa simulação, manteve-se fixo o número de nós e o percentual do espaço utilizado por usuários primários e, variando-se a densidade média do grafo.

Os parâmetros aplicados podem ser vistos no Quadro 14. A simulação foi executada 30 vezes com grafos, conexos, gerados aleatoriamente. A utilidade em Mhz está apresentada na Figura 19 (Utilidade do sistema em MHz), o erro quadrático médio em relação à demanda pode ser visto na Figura 20, enquanto que o erro quadrático médio normalizado é demonstrado na Figura 21.

Quadro 14 – Parâmetros aplicados

Parâmetros	Valores
Densidade média do grafo (parâmetro modificado)	3,4,5,6,7,8
Quantidade de nós do grafo	20
Tamanho original do canal (largura de banda)	6 MHz
Total de canais disponíveis (primários + secundários)	60
Banda mínima para uma WRAN entrar em operação (Bmin)	6 MHz
Demanda em canais de 6 MHz de cada nó ( <b>dm</b> )	1,5,5,5,3,5,7,5,5,6,2,4,4,4,6,8,1,3,5,6
Percentual do espectro utilizado por usuários primários	30

Fonte: O autor.



Fonte: O autor.

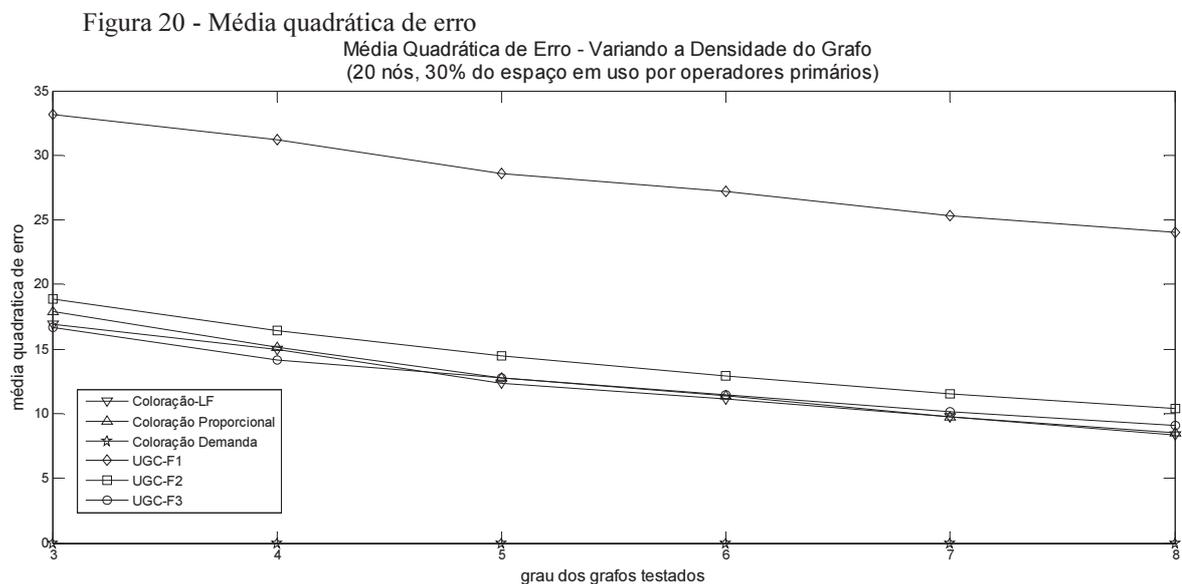
No gráfico apresentado na Figura 19 (Utilidade do sistema em MHz) pode-se observar que todas as propostas, exceto a Coloração-Demanda, diminuem a utilidade à medida que a densidade média do grafo aumenta. Isto ocorre, pois, um grafo mais denso normalmente

apresenta mais restrições ao uso de cores se comparado a um grafo menos denso, mesmo tendo a mesma quantidade de nós.

Como a Coloração-Demanda para de distribuir canais quando atinge a quantidade desejada, e o espaço de espectro disponível era suficiente para atender a demanda mesmo na densidade mais alta, ela não foi afetada pela variação da densidade média.

As funções Coloração-LF, Coloração-Proporcional e UGC-F1, apresentam uma utilidade muito próxima, em todas as densidades médias, coincidindo bastante com os resultados obtidos na primeira simulação onde variamos o espaço disponível. Observando que o objetivo da coloração UGC-F1 é maximizar a utilidade, enquanto que o objetivo da Coloração-Proporcional é buscar uma solução válida que mantenha a proporcionalidade com a demanda, demonstramos que a distribuição proporcional, é também competitiva. Isso por que a Coloração-Proporcional, também distribui todos os canais possíveis, e as soluções válidas para estas distribuições podem não apresentar muitas diferenças.

As distribuições de espaço realizadas pelas colorações UGC-F2 e UGC-F3 conseguiram uma utilidade menor do espectro refletindo sua menor agressividade na maximização do uso de uma cor.

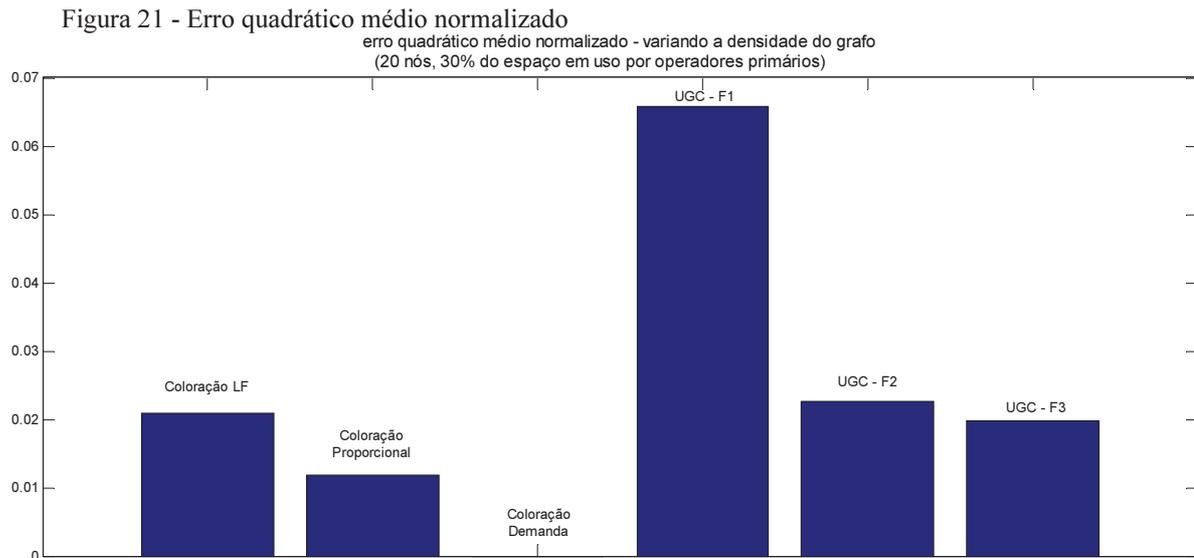


Fonte: O autor.

O erro quadrático médio entre a banda demandada pelos nós e a banda entregue pelo algoritmo pode ser observado na Figura 20. Excluindo-se a Coloração-Demanda quando se relaciona ao demandado pelo entregue pelas funções de coloração, o erro quadrático médio diminui à medida que a densidade do grafo aumenta. Isto ocorre porque as chances de

reaproveitar uma cor diminuem com as novas restrições e, conseqüentemente, diminuem o reaproveitamento.

A Coloração-Demanda tem um erro igual à zero porque foi possível atender a todas as demandas e a coloração UGC-F3 tem o maior erro para todas as densidades de grafo experimentadas, devido a sua característica de concentrar a maior parte da banda em uma só cor.



Fonte: O autor.

Na Figura 21 pode-se observar o erro quadrático médio normalizado durante a variação do grau médio dos nós, onde se compara a proporção do total distribuído, com a proporção de canal demandada pelos nós do grafo.

Nos testes, variando a densidade média do nó, novamente a Coloração-Demanda não apresentou erros e a distribuição UGC-F1 apresentou o maior erro, entre os métodos envolvidos.

Se considerarmos apenas os métodos que procuram distribuir todos os canais, a Coloração-Proporcional é o método que apresenta o menor erro proporcional. Quando levamos em conta que existe todo um tratamento para tentar manter esta proporcionalidade no algoritmo visto na seção 4.4 b, é esperado que esta função realmente tivesse um resultado superior às demais.

A coloração proporcional, entretanto só terá um resultado igual a 0 (zero), se a quantidade de cores disponibilizadas para uso em todos os nós do grafo  $G$  estejam em quantidades múltiplas da demanda, mesmo levando em conta os conflitos.

## 5.6 SIMULAÇÃO VARIANDO A QUANTIDADE DE NÓS DOS GRAFOS

Nessa simulação manteve-se fixo a densidade do grafo e o espaço utilizado por usuários primários e, em seguida, variou-se a quantidade de nós do grafo.

Os parâmetros aplicados podem ser vistos no Quadro 15. O teste foi executado 30 vezes com grafos, conexos, gerados aleatoriamente. A utilidade em Mhz pode ser vista na Figura 22 (Utilidade do sistema em MHz), o erro quadrático médio em relação à demanda está representado na Figura 23, e o erro quadrático médio normalizado é visto na figura 24.

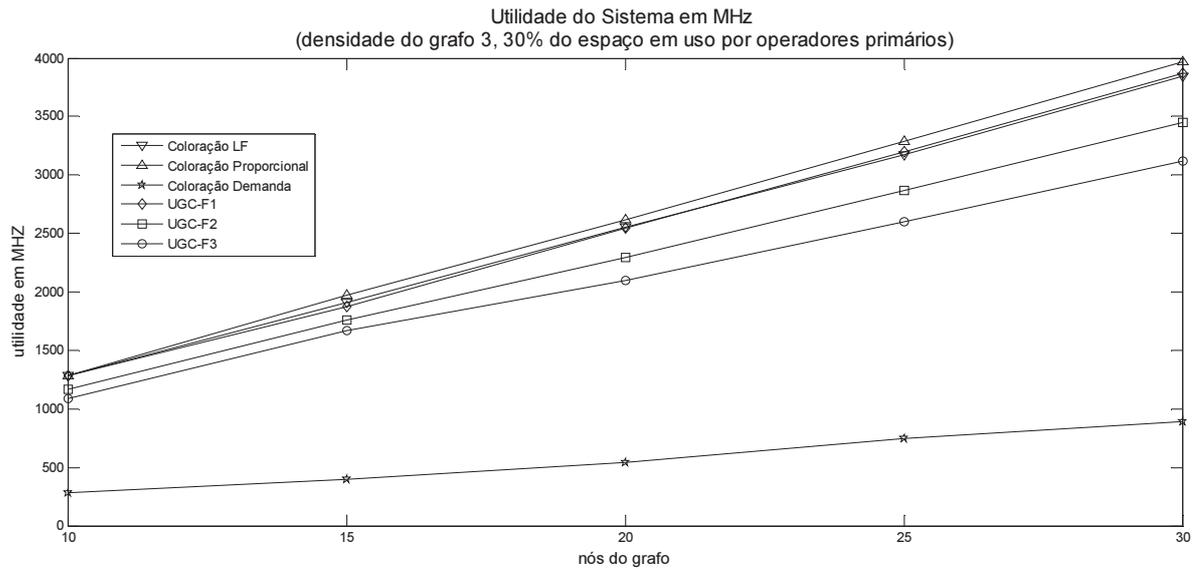
Se você achar melhor chamar de erro quadrático médio proporcional tem que colocar a mesma denominação no texto inteiro. Escolha ou erro quadrático normalizado ou erro quadrático proporcional e use de maneira coerente em todo o texto

Quadro 15 – Parâmetros aplicados

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Densidade média do grafo	3
Número de nós do grafo (parâmetro modificado)	10,15,20,25,30
Tamanho original do canal	6 MHZ
Total de canais disponíveis (primários + secundários)	60
Banda mínima para uma WRAN entrar em operação (Bmin)	6 MHZ
Demanda em canais de 6 MHZ de cada nó ( <b>dm</b> )	1,5,5,5,3,5,7,5,5,6,2,4,4,4,6,8, 1,3,5,6,10,5,8,4,7,7,1,5,4,8
Percentual do espectro utilizado por usuários primários	30

Fonte: O autor.

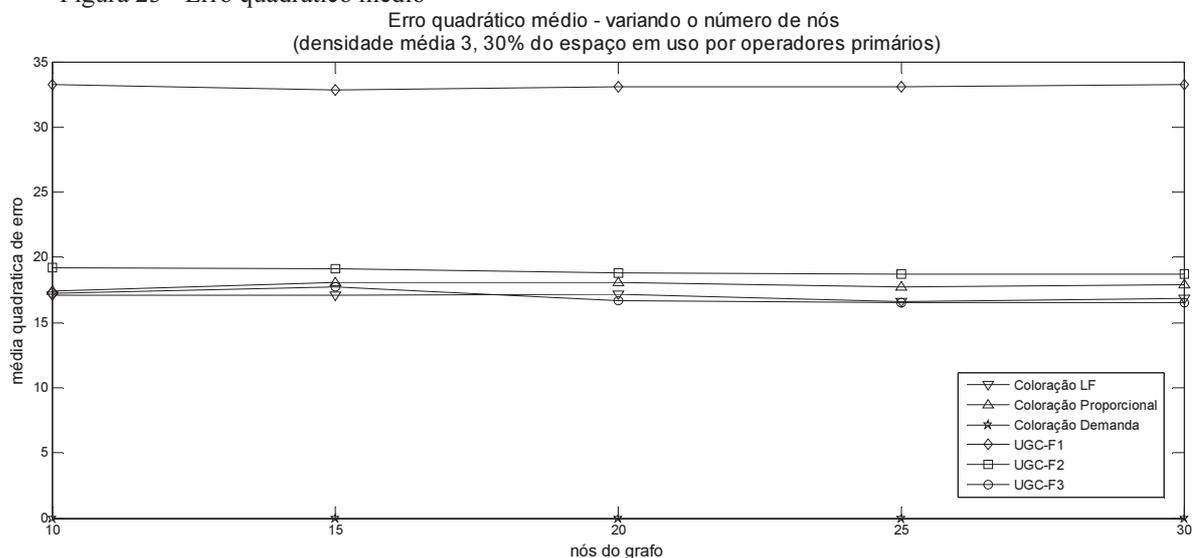
Figura 22 - Utilidade do sistema em MHz



Na Figura 22 observa-se o aumento da utilidade do espectro à medida que a quantidade de nós aumenta. Isto é observado porque quanto mais nós tivermos no grafo, teremos mais oportunidades de reaproveitar o espectro. E isto pode ser observado até mesmo na Coloração-Demanda que nos testes vistos na Figura 23 (Erro quadrático médio) apresentou-se estática.

A coloração usando as funções UGC-F1, Coloração-LF e Coloração-Proporcional, apresentam a maior utilidade e resultados muito semelhantes, mas, à medida que o tamanho do grafo aumenta a diferença entre as estratégias também aumenta, isto ocorre por que em um grafo menor possuímos um conjunto de soluções válidas também menor, sendo o inverso também verdadeiro.

Figura 23 - Erro quadrático médio

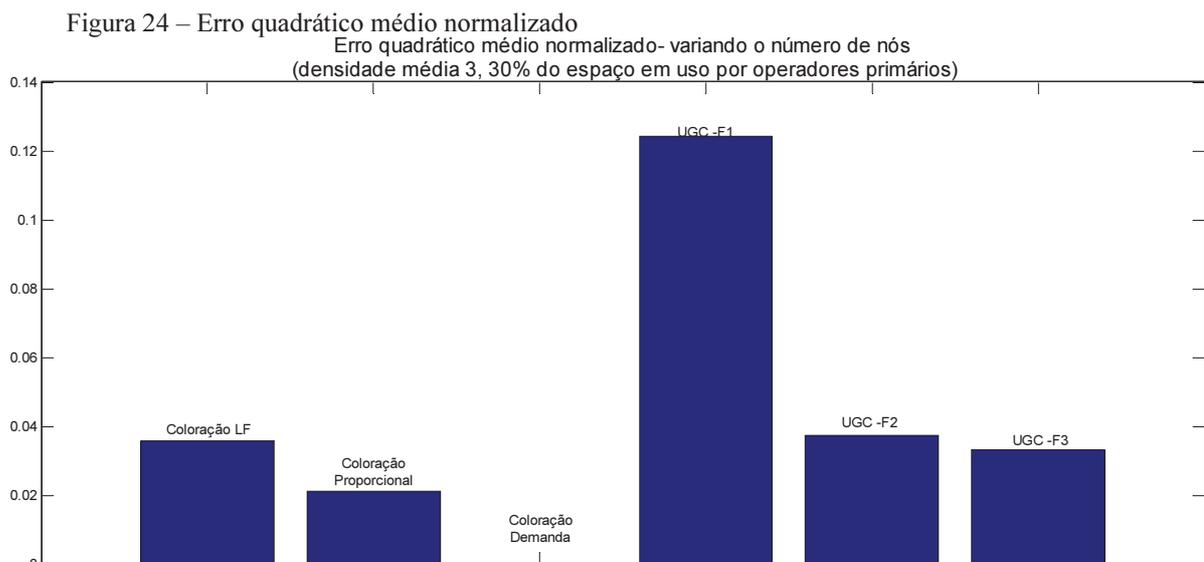


Fonte: O autor.

O erro quadrático médio em relação à demanda pode ser visto na Figura 23 e se mantém praticamente estável independente do número de nós. Assim, como nas simulações anteriores (seção 5.5 e seção 5.6), o maior erro em relação à demanda é obtido no UGC-F1, o UGC-F2 possui o segundo maior erro, sendo que a Coloração-Demanda, a exemplo dos demais testes, não apresentou erros.

A Coloração-Proporcional, UGC-F3, Coloração-LF, e Coloração-Proporcional apresentaram um erro quadrático médio menor se comparados a UGC-F1, e UGC-F2, pois estes últimos procuram beneficiar certas cores com mais banda que outras, já que o objetivo dessas estratégias é de maximizar a utilidade.

Por outro lado a Coloração-Demanda, não apresenta erros porque encerra sua execução assim que atinge a demanda requisitada pelas WRANs



Fonte: O autor.

O erro quadrático médio proporcional pode ser visto na Figura 24 e a exemplo das simulações anteriores, a Coloração-Proporcional é o método entre os que envolvem a distribuição do excesso de canais, o que apresenta o menor erro, enquanto que a coloração UGC-F1 o que apresenta o maior erro.

A Coloração-LF, assim, como o observado em outros testes, apresenta um erro quadrático médio proporcional semelhante UGC-F3, isto por que ambos os métodos aplicam uma coloração de grafos de maneira direta, sem qualquer estratégia adicional, sendo que a única diferença entre eles é que o UGC-F3 atribui apenas uma cor com o total e banda que

pode ser disponibilizado para o canal correspondente, e a Coloração-LF, aplica várias cores com uma banda pré-determinada.

## 5.7 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo pode-se concluir que os três métodos propostos são capazes de trazer uma solução válida para a distribuição de canais, mesmo em ambientes onde cara WRAN possui um conjunto de canais diferentes. Evidencia-se também que, independente do espaço, densidade ou número de nós do grafo, quando relacionamos à demanda ao efetivamente entregue pela proposta, o erro proporcional é menor no método Coloração-Demanda e Coloração-Proporcional em relação a todos os demais, evidenciando assim que as características de proporcionalidade implementadas nesta proposta (ver seção 4.4 b), trabalham em benefício desta proporcionalidade.

A Coloração-LF apresenta um erro muito semelhante ao UGC F3, em todos os casos, pois ambos os métodos são aplicações do mesmo método clássico de coloração de grafos, diferindo apenas em alguns aspectos quanto à quantidade de cores atribuídas por nó, e o tamanho das mesmas. Esta diferença de abordagem, reflete as diferentes maneiras de como o problema foi abordado.

Observou-se que, à medida que se diminui o espaço disponível para usuários secundários seja pela presença maior de operadores primários, seja pela maior densidade dos grafos que representam as interferências, diminuimos o conjunto de possíveis soluções válidas e, assim, a diferença entre qualquer proposta é menor. O mesmo efeito, pelos mesmos motivos, pode ser observado quando diminuimos o número de nós.

## CAPÍTULO 6

### 6 CONCLUSÃO

#### 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho elaborou-se uma proposta para a distribuição de canais para WRANs 802.22 que trabalham em espaços conflitantes. O objetivo não era apenas distribuir os canais mas também, maximizar o uso do espaço não utilizado por operadores primários.

Demonstrou-se neste trabalho que a coloração de grafos pode ser uma opção para realizar esta tarefa. Para isto, foram representadas as redes conflitantes como um grafo. Segmentou-se o espaço do espectro disponível em canais e subcanais e distribuíram-se os mesmos, aos nós deste grafo tal como se atribuem cores aos nós em um sistema de coloração de grafos.

O processo de coloração e grafos considera, ao colorir um nó, apenas as cores que estão disponíveis especialmente para este nó, não levando em conta a disponibilidade de cores para os demais, evidenciando assim que os conjuntos de cores são independentes entre si, e portanto podem ser diferentes.

Para ambientes onde existam cores excedentes, criou-se três propostas que possibilitam a distribuição das mesmas. Na primeira proposta, as cores são distribuídas uma para cada nó sem levar em conta a demanda, até esgotar as possibilidades de distribuição. Nas outras duas propostas, leva-se em conta a demanda, sendo que em uma delas a demanda limita a distribuição de canais e na outra a demanda serve como um parâmetro de proporcionalidade. Em ambos os casos esgota-se as possibilidades de distribuição.

Com o objetivo de garantir que a proposta possa funcionar mesmo quando não se tem canais suficientes, foi criada uma função que divide o tamanho original dos canais em tamanhos menores sempre que necessário. Desta forma, a solução pode ser aplicada também em sistemas em que faltam canais para distribuir ao menos um para cada WRAN.

Por fim, foi feita a comparação dos resultados obtidos com esta proposta com a proposta de Segupta et al. (2011), que também utiliza coloração de grafos, e também procura distribuir ao máximo o espaço disponível para 802.22.

Foi possível observar que a utilidade do espectro apresentada na nossa proposta é bastante próxima àquela alcançada na proposta de Segupta et al. (2011), principalmente, a

Coloração-LF e Coloração-Proporcional, com a vantagem que superamos a limitação que nos obrigava a trabalhar em ambientes onde nem todas as WRANs no padrão IEEE 802.22 possuem os mesmos canais disponíveis.

A função de Coloração-Proporcional que procura distribuir os canais até o esgotamento, levando em conta a proporcionalidade, apresentou uma utilidade do espectro muito próxima a UGC-F1, porém, com um menor erro quadrático médio em relação à demanda. Fato que leva a concluir que a distribuição respeitou muito mais a proporcionalidade entre o que foi solicitado com o que foi distribuído pelo algoritmo.

A principal contribuição deste estudo foi conseguir distribuir os canais utilizando coloração de grafos, que possibilitam conseguir a distribuição de canais, mesmo em ambientes onde nem todas as WRANs no padrão IEEE 802.22 possuem os mesmos canais disponíveis, e criar estratégias competitivas de distribuição que levam em consideração a demanda durante as atribuições.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho, pode-se sugerir o uso de outras técnicas de coloração de grafos que podem garantir um aproveitamento melhor do espaço disponível no espectro eletromagnético.

Outras estratégias, além da apresentada no artigo de Camarda et al. (2010), no que se refere a garantir a proporcionalidade entre o demandado e o distribuído, podem ser adaptadas e aplicadas neste trabalho.

Neste trabalho também não foram abordadas técnicas que envolvam alteração de potência do sinal ou a troca de CPEs entre os BSs. Em trabalhos futuros estes fatores podem ser considerados.

Este algoritmo que trabalha de maneira centralizada, depende da confiança entre os nós que formam uma comunidade e dos nós para com o equipamento que executa o processo de atribuição. Neste sentido uma versão distribuída deste trabalho, pode aumentar a confiabilidade do sistema por parte dos operadores.

Por fim, nossa proposta, embora tenha sido feita para o padrão IEEE 802.22 pode ser aplicada em outros sistemas envolvendo rádios cognitivos.

## REFERÊNCIAS

AL-ZUBI, R.; SIAM, M. Z.; KRUNZ, M.; Coexistence Problem in IEEE 802.22 Wireless Regional Area Networks. **Global Telecommunications Conference**. Honolulu, Hi, USA: GLOBECOM, 2009. p.1-6.

ARAUZ, J.; MILLER, Z. Self-coexistence in the dense case for white spaces. **Wireless Days (WD)**. USA: IFIP, 2012, p.1-3

BERBERT, Lúcia. **Programa de telecomunicações rurais completa um ano sem avanços**. Disponível em: < <http://www.telesintese.com.br/index.php/plantao/75-plantao-2010/plantao-2010/9858-programa-de-telecomunicacoes-rurais-completa-um-ano-sem-avancos> >. Acesso em: 21 jul. 2010.

BIAN, Kaigui; PARK, Jung-Min Park. **A coexistence-aware spectrum sharing protocol for 802.22 WRANs**. San Francisco: Computer Communications and Networks, p. 1-6, set. 2009.

BIRD enfatiza importância da Internet para o desenvolvimento econômico. **KIOSKEA.NET**. Disponível em: <<http://pt.kioskea.net/news/11332-bird-enfatiza-importancia-da-Internet-para-o-desenvolvimento-economico>>. Acesso em: 27 ago. 2010.

BRASIL. Ministério das Comunicações. **Inclusão digital**. Disponível em: <<http://www.mc.gov.br/inclusao-digital-mc>>. Acesso em: 03 dez. 2010.

BRASIL. Senado Federal. **Acesso à Internet pode ser incluído como direito social na Constituição**. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/noticias/verNoticia.aspx?codNoticia=107774&codAplicativo=2>>. Acesso em: 03 mar. 2011.

BANDA larga para área rural. **HIPERLINQUE NEWS**. Disponível em: <<http://www.lsitec.org.br/newsletters/janeiro-fevereiro-2011/Em%20foco.htm>>. Acesso em: <01 fev. 2011.

CAMARDA, P.; CORMIO, C.; PASSIATORE, C. **An exclusive self-coexistence (ESC) resource sharing algorithm for cognitive 802.22 networks**. *International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 5. Itália, 2010.

CHEN, Ray; LI, Weiyang; Li, Jiandong. **Auction-based inter BS spectrum sharing for IEEE 802.22 WRAN systems**. *ICIEA*, 2009.

CORDEIRO, Carlos; CHALLAPALI, Kiran; BIRRU, Dagnachew. IEEE 802.22: an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios. USA, **Journal of Communications**, v. 1, n. 1, abr. 2006.

CPqD. **Microsoft e CPqD fecham acordo para a pesquisa de banda larga por rádio**. Disponível em: <<http://www.cpqd.com.br/imprensa-e-eventos/the-news/5038-microsoft-e-cpqd-fecham-acordo-para-pesquisa-de-banda-larga-por-radio.html>>. Acesso em: 28 set. 2010.

DHOPE, Tanuja Satish; SIMUNIC, Dina. Spectrum Sensing Algorithm for Cognitive Radio Networks for Dynamic Spectrum Access for IEEE 802.11 af standard. **International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks (IJRRWSN)**, v. 2, n.1, mar. 2012.

DONG, Huang et al. A game theory approach for self-coexistence analysis among IEEE 802.22 networks. **Conference Proceedings**. The Seventh International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 2009. *Macau: ICICS 2009*. p.1-5, dec. 2009

ETGES, Virginia E.; WERNER, Benício; WEBER, Elton. Êxodo rural é uma realidade prejudicial a toda a sociedade: parte dos jovens rurais opta por não dar continuidade às atividades dos pais. Entrevista concedida à **Revista Expoagro Afubra 2013**. p.08-13.

FAN, Zhong; ZHANG, R. Spectrum allocation and medium access in cognitive radio wireless networks. **Wireless Conference**, 2009. EW 2009. European, p.90-95, may 2009.

GARDELLIN, V.; DAS, S. K.; LENZINI, L. A fully distributed game theoretic approach to guarantee self-coexistence among WRANs. **INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications Workshops**. San Diego, Californiam USA: 2010, p.1-6, march 2010.

GARDIN, Edson; HERNANDES, Fábio. Aplicação da coloração em grafos fuzzy no problema de distribuição de aulas. **Revista Eletrônica Lato Sensu**, v. 3, n.1, mar. 2008.

GHOSH, C.; ROY, S.; CAVALCANTI, D. Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in TV white spaces. **Wireless Communications**. USA: IEEE , v.18, n.4, p. 22-31, august 2011.

HAYKIN, Simon; THOMSON, David J.; REED, Jeffrey H..Spectrum Sensing for Cognitive Radio. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, n. 5, maio, 2009.

HOSSAIN, Ekram; NIYATO, Dusit; HAN, Zhu. **Dynamic Spectrum Access and Management in CognitiveRadio Networks**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands: IEEE Std 802.22™-2011. In: \_\_\_\_\_. **IEEE Standard for Information Technology...** USA: IEEE, 2011.

KIM, Hyoil; K. G., Shin. Asymmetry-aware real-time distributed joint resource allocation in IEEE 802.22 WRANs. **Proceedings IEEE INFOCOM**. San Diego, USA: INFOCOM, Proceedings IEEE, 2010, p.1-9.

KO, Chun-Han; WEI, Hung-Yu. Game Theoretical Resource Allocation for Inter-BS Coexistence in IEEE 802.22. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**. Canada, USA: 2010, v.59, n.4, p.1729-1744, may 2010.

KOSOWSKI, Adrian; MANUSZEWSKI, Krzysztof. Classical coloring of graphs. In: **Graph colorings**. 2004, p.1-16.

LEE, Jae-Kwon; YOON, Ju-Hyun; KIM, Jin-Up. **A new spectral correlation approach to spectrum sensing for 802.22 WRAN system**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT PERVASIVE COMPUTING, 2007. Canadá, maio, 2007.

LIEN, Shao-Yu et al. Cognitive Radio Resource Management for QoS Guarantees in Autonomous Femtocell Networks. **Communications (ICC)**. USA: IEEE International Conference on, 2010, p. 1-6, may 2010.

LOZANO, Daniele. Tópicos em teoria dos grafos e poliedros. In: \_\_\_\_\_. **Modelagem matemática e aplicações do problema de coloração em grafos**. São José do Rio Preto: UNESP, 2007, p.3-19.

MITOLA III, J.; MAGUIRE JR., G. Q. Cognitive radio: making software radios more personal. **IEEE Personal Communications**, v. 6, n. 4, p. 13-18, ago 1999.

MONTEIRO, Tânia Lúcia. **Otimização de redes WLAN através da solução do problema de alocação de canais como um Distributed Constraint Optimization Problem**. 2010. 44 f. (Projeto de Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Informática) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

MONTEIRO, Tânia L, et al. An Optimal Channel Assignment Strategy for WLANs using Distributed Optimization. In: **NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM (NOMS)**. 2012. Maui, Hi, USA: IEEE, 2012. p. 286–292.

NGUYEN Minh-Viet; LEE, Hwang Soo. Effective Scheduling in Infrastructure-Based Cognitive Radio Networks. **Mobile Computing**. USA: IEEE Transactions on, v.10, n.6, p. 853-867, june 2011.

SENGUPTA, Shamik et al. Self-coexistence among interference-aware IEEE 802.22 networks with enhanced air-interface. **Pervasive and Mobile Computing: Elsevier**. ago. 2011.

STENVENSON, Carl R.; SHELLHAMMER, Stephen J. IEEE 802.22: the first cognitive radio wireless regional area network standard. USA, **IEEE Communications Magazine**, v. 163, n. 6804, jan. 2009.

WALENGA JR., Paulo R. et al. ZAP: um algoritmo de atribuição distribuída de canais para mitigação de interferências em redes com rádio cognitivo. **Journal on Wireless Communications and Networking**. Special Issue on Multiple Access Communications in Future-Generation Wireless Networks, 2011.

YÜCEK, Tevfik ; ARSLAN, Hüseyin. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. **IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS**, v. 11, n. 1, 2009.

YANG, Shun-Fang; WU, Jung-Shyr. A spectrum sharing method based on fuzzy logic in IEEE 802.22 WRAN. **Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)**. USA: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010. p.1-5.

