

Otimizando Topologia e Alocação de canais em Redes de Sensores sem Fio

Marcello Marques de Oliveira



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2018

Marcello Marques de Oliveira

Otimizando Topologia e Alocação de canais em Redes de Sensores sem Fio

Monografia apresentada ao curso Engenharia da Computação do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação

Orientador: Iguatemi Eduardo da Fonseca

Outubro de 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48o Oliveira, Marcello Marques de.
Otimizando Topologia e Alocação de canais em Redes de Sensores sem Fio / Marcello Marques de Oliveira. - João Pessoa, 2018.
0 f.

Orientação: Iguatemi Fonseca.
Coorientação: Ruan Gomes.
Monografia (Graduação) - UFPB/CI.

1. Redes de Sensores sem fio, Otimizações. I. Fonseca, Iguatemi. II. Título.

UFPB/BC



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação intitulado *Otimizando Topologia e Alocação de canais em Redes de Sensores sem Fio* de autoria de Marcelo Marques de Oliveira, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Fernando Menezes Matos
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Giorgia de Oliveira Mattos
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, 18 de setembro de 2018

Entre teses e antíteses.

DEDICATÓRIA

Esse trabalho é dedicado a todos que contribuem diretamente ou indiretamente com a pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que que contribuíram com a minha formação pessoal e profissional.

Agradeço em especial aos meus pais Analúcia e Edvaldo por tudo.

Por fazê-la possível e pela contribuição gigantesca a essa monografia agradeço especialmente também aos professores Iguatemi Eduardo da Fonseca e Ruan Delgado Gomes.

RESUMO

Usualmente utilizadas em operações de monitoramento de parâmetros críticos, as Redes de Sensores em ambiente Industrial buscam, frente a essa natureza, resultados com alto grau de confiabilidade e em tempo real. A fim de responder a essa demanda, a comunicação desse tipo de rede é usualmente via cabos, um processo de instalação de baixa flexibilidade, alto custo e difícil manutenção. Além disso, o dispositivo sensor pode ser necessário em lugares inacessíveis com o cabo, como por exemplo em uma ventoinha. Buscando contribuir com a tendência da comunicação entre dispositivos: de troca entre uma rede cabeada para uma rede sem fio, essa monografia mostra algumas saídas para melhorar a comunicação em Redes de Sensores sem Fio Industriais (RSSFIs). Dentre as saídas propostas temos para uma rede de baixa flexibilidade: uma realocação de canais, e para redes alta flexibilidade, também podemos utilizar do reposicionamento de nós. Para isso, é necessário lidar com diversos problemas característicos ao ambiente sem fio, como alto nível de atenuação e interferência bem como a variação temporal das características do canal sem fio, acentuados ainda pelo design Industrial. Para simular o ambiente em questão foi utilizado o simulador Castalia e verificada a eficiência de algoritmos de alocação de rede, posicionamento, e alocação de canal propostos na monografia.

Palavras-chave: Alocação de Canal, Redes de Sensores sem Fio, Posicionamento de Roteador, Simulação de Redes de Sensores sem Fio Industriais.

LISTA DE FIGURAS

1	Tipos de aplicações de RSSFI. [2]	21
2	Topologias suportadas pelo padrão IEEE 802.15.4. [2]	23
3	Indústria [6]	24
4	Arquitetura em três camadas. [2]	26
5	Estrutura de tempo (multi-slotframe) definida pelo ABMP. [2]	27
6	Círculo Mínimo de Inclusão (MEC) para posicionar CP	30
7	Modelo hexagonal utilizado em redes de telefonia	31
8	Modelo de posicionamento do CH em relação ao CP	32
9	PRRAPP - Simulações com posicionamento	33
10	PRRMAC - Simulações com posicionamento	34
11	Simulação de posicionamento S1 - sem algoritmo	35
12	Simulação de posicionamento S1 - com algoritmo	35
13	Simulação de posicionamento S2 - sem algoritmo	36
14	Simulação de posicionamento S2 - com algoritmo	36
15	Simulação de posicionamento S3 - sem algoritmo	37
16	Simulação de posicionamento S3 - com algoritmo	37
17	Simulação de posicionamento S4 - sem algoritmo	38
18	Simulação de posicionamento S4 - com algoritmo	38
19	Simulação de posicionamento S5- sem algoritmo	39
20	Simulação de posicionamento S5 - com algoritmo	39
21	Simulação de posicionamento S6 - sem algoritmo	40
22	Simulação de posicionamento S6 - com algoritmo	40
23	Simulação de posicionamento S7 - sem algoritmo	41
24	Simulação de posicionamento S7 - com algoritmo	41
25	Funcionamento do algoritmo de alocação de nós	42
26	Configuração ótima para alocação de nós	43
31	Alocação de nós não ótima	43
27	Distribuição 1 - Antes do realocação	44

28	Distribuição 1 - Depois da realocação	44
29	Distribuição 2 - Antes da realocação	45
30	Distribuição 2 - Depois da realocação	45
32	Alocação de nós ótima	46
33	PRRAPP - Simulações com Clusterização	47
34	PRRMAC - Simulações com Clusterização	48
35	Simulação S1 - sem algoritmo	49
36	Simulação S1 - com algoritmo	49
37	Simulação S2 - sem algoritmo	50
38	Simulação S2 - com algoritmo	50
39	Simulação S3 - sem algoritmo	51
40	Simulação S3 - com algoritmo	51
41	Simulação S4 - sem algoritmo	52
42	Simulação S4 - com algoritmo	52
43	Simulação S5 - sem algoritmo	53
44	Simulação S5 - com algoritmo	53
45	Simulação S6 - sem algoritmo	54
46	Simulação S6 - com algoritmo	54
47	Simulação S7 - sem algoritmo	55
48	Simulação S7 - com algoritmo	55
49	Topologia aleatória com 1σ , 0σ , -1σ e -2σ	57
50	Nós causando interferência global	58
51	Alto grau de interferência entre sub redes	59
52	3 subredes com 2 interferências	59
53	Rede com 1 sub rede	61
54	Rede com 4 sub redes e 3 interferências	61
55	Rede com 8 sub redes e 12 interferências	62
56	Primeira topologia planejada	63
57	Segunda topologia planejada	64

58	Terceira topologia planejada	64
59	PRRAPP - Algoritmos combinados	66
60	PRRMAC - Algoritmos combinados	67
61	Simulação S1 - sem algoritmos	68
62	Simulação S1 - com algoritmos	68
63	Simulação S2 - sem algoritmos	69
64	Simulação S2 - com algoritmos	69
65	Simulação S3 - sem algoritmos	70
66	Simulação S3 - com algoritmo	70
67	Simulação S4 - sem algoritmos	71
68	Simulação S4 - com algoritmos	71
69	Simulação S5 - sem algoritmos	72
70	Simulação S5 - com algoritmos	72
71	Outliers após algoritmo de distribuição de nó por Cluster Head	74
72	Trocas sugeridas para otimizar o desempenho da rede	75

LISTA DE TABELAS

1	Classes de aplicações industriais	21
2	Definição dos parâmetros do canal sem fio no script de simulação do Castalia e suas utilizações (Adaptado de [2])	28
3	Parâmetros usados na simulação (Adaptado de [2])	29
4	Parâmetros usados na simulação (Adaptado de [2])	29
5	Parâmetros observados na simulação.	65
6	Resultado da Simulação do Algoritmo de Alocação de Canais	65

LISTA DE ABREVIATURAS

ABMP – Protocolo Adaptativo Multi-Canal Baseado em Beacons (Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol)

ACK – Pacote de Reconhecimento

CH – Líder de Grupo (Cluter Head)

CP – Coordenador Principal

CSMA/CA – Acesso Múltiplo com Sensoriamento da Portadora e Prevenção de Colisão (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

DSME - Deterministic and Synchronous Multi-Channel Extension

FCP – Função Cumulativa de Probabilidade

ISA – Sociedade Internacional de Automação (International Society of Automation)

ISM - Industrial, Scientific and Medical

LQE – Estimador de Qualidade de Enlace (Link Quality Estimator)

MAC – Controle de Acesso ao Meio (Medium Access Control)

PRRAPP - Taxa de Recepção de Pacotes na Camada de Aplicação (Packet Received Rate Application)

PRRMAC - Taxa de Recepção de Pacotes na Camada de Acesso ao Meio (Packet Received Rate Medium Access Control)

QoS – Qualidade de Serviço (Quality of Service)

RNP – Número Requerido de Transmissões de Pacote (Required Number of Packet Transmissions)

RSSFIs – Redes de Sensores sem Fio Industriais

RSSFs – Redes de Sensores sem Fio

RSSI – Indicação da Intensidade do Sinal Recebido (Received Signal Strength Indication)

SNR – Relação Sinal-Ruído

TDMA – Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (Time Division Multiple Access)

TSCH – Time Slotted Channel Hopping

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização do Problema	18
1.2	Motivação	19
1.3	Principais contribuições	19
1.4	Estrutura da Monografia	20
2	REDES DE SENSORES SEM FIO INDUSTRIAIS: PADRÕES E DE- SAFIOS	21
2.1	Aplicações e Vantagens	21
2.2	Padrões	22
2.3	Ruído e Interferência Eletromagnética em RSSF	23
2.4	Perda de Caminho em Larga Escala	24
2.5	Atenuação em Pequena Escala e Multipercurso	25
3	PROTOCOLOS MULTICANAIS	26
3.1	Arquitetura Multicanal	26
3.2	Protocolo ABMP	27
3.3	Modelo para Simulação de Protocolos Multi-Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais	28
4	REPOSICIONANDO CLUSTER HEAD E COORDENADOR PRIN- CIPAL	30
4.1	Posicionamento do Coordenador Principal (CP)	30
4.2	Posicionamento dos Clusters Head (CH)	30
4.3	Simulações	32
5	ALOCAÇÃO DE NÓ POR CLUSTER HEAD	42
5.1	Estratégia utilizada	42
5.2	Simulações	46
6	ALOCAÇÃO E COMPARTILHAMENTO DE CANAL	56

6.1	Estratégia Utilizada	56
6.2	Redes Planejadas	63
6.3	Simulações	65
6.4	Conclusão	65
7	RESULTADOS	66
7.1	Combinando os Algoritmos	66
7.2	Conclusão	72
8	TRABALHOS FUTUROS	74
8.1	Alocando nó por Cluster Head: Outliers	74
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Sendo uma alternativa à construção de sistemas de monitoramento e controle em ambientes industriais, as Redes de Sensores sem Fio, formadas por nós equipados com sensores ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência, apresentam maior flexibilidade, maior manutenibilidade e menor custo se comparadas às redes cabeadas. Em sistemas de monitoramento baseados em redes cabeadas, o processo de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que os próprios sensores [1]. Além disso a capacidade de processamento local e meio de conexão compartilhado permite a inserção de sistemas inteligentes e autônomos abrindo espaço para algoritmos que contribuam com a capacidade de auto-organização da rede.

1.1 Contextualização do Problema

Normalmente utilizada para supervisão de parâmetros críticos, como pressão, vibração e temperatura, as RSSFIs enfrentam diversos problemas. Sendo um ambiente mais suscetível a ruídos e interferência na faixa do espectro utilizada para comunicação e também com maior variação do perfil de multipercurso - devido ao dinamismo do ambiente industrial - aliada à baixa confiabilidade inerente ao meio de transmissão temos comumente uma Qualidade de Sinal (Quality of Service - QoS) baixa . Além desses problemas devemos levar em conta também que os nós sensores têm restrições de recursos, possuindo usualmente baixo poder de processamento e em alguns casos há também restrições de consumo de energia.

Para lidar com essas limitações e desafios, alguns padrões têm sido propostos nos últimos anos com foco em aplicações industriais. O WirelessHart, bem como o ISA100.11a são baseados na camada física do IEEE 802.15.4, e apresentam diferentes definições para a camada de controle de acesso ao meio (Medium Access Control - MAC). Enquanto o IEEE 802.15.4 utiliza acesso múltiplo com sensoramento da portadora e prevenção de colisão (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA), esses padrões utilizam acesso múltiplo por divisão no tempo (Time Division Multiple Access - TDMA) para evitar colisões e otimizar o consumo de energia. Além do TDMA outros mecanismos são utilizados como Lista Negra e Salto em Frequência.

Em [2] é proposto um novo protocolo de camada MAC, denominado Adaptive and Beacon-based Multi-Channel Protocol (ABMP), utilizando nós dedicados e um nó especial LQE (Link Quality Estimator) que estima a qualidade do enlace sem causar sobrecarga em nenhum aspecto da rede. O ABMP utiliza salto em frequência como adaptação de canal, transmitindo pacotes em broadcast (beacons), que são usados para sincronizar os nós finais da rede. A transmissão de pacotes de dados unicast, é feita por meio de um mecanismo de adaptação de canal. As simulações realizada em [2] mostram que o ABMP

apresenta um desempenho superior aos protocolos de acesso ao meio definidos pelos novos padrões para RSSFI em termos de taxa de entrega de pacote, atraso e determinismo.

Devido aos resultados obtidos pelo ABMP, e a arquitetura da simulação utilizada, as ideias propostas por mim foram testadas utilizando como protocolo MAC em uma rede de topologia árvore com 48 Nós Sensores, 4 Clusters Heads(CH) e 1 Coordenador Principal(CP). Verificando a falta de definição para compartilhamento de canal, alocação de nós por Cluster Head e posicionamento de Clusters Heads na simulação realizada em [2] - sempre aleatória - essa monografia propõe 3 algoritmos diferentes para evoluir cada um dos aspectos citados.

1.2 Motivação

Essa monografia tem como motivação melhorar o grau de confiabilidade da comunicação, mesmo em um ambiente de baixo grau de confiabilidade característica de um ambiente industrial.

Além disso busco enriquecer a literatura de simulações de Redes de Sensores sem Fio utilizando os modelos propostos no simulador Castalia. E principalmente, por meio de análises dessas simulações propor algoritmos que melhoram alguns aspectos essenciais de uma RSSFI, como Taxa de recepção de pacotes.

1.3 Principais contribuições

As principais contribuições são:

- Desenvolvimento de um modelo para alocação e compartilhamento de canais.
- Desenvolvimento de um modelo para alocações de nós por Cluster Head.
- Desenvolvimento de um modelo para posicionamento dos Clusters Heads e do Coordenador Principal.
- Comparações dos algoritmos propostos com modelos aleatório da rede.
- Simulações dos modelos desenvolvidos utilizando o Castalia.
- Aspecto visual da rede.

Os modelos desenvolvidos contribuem para as RSSFI fornecendo caminhos que podem ser seguidos para atingir determinado objetivo, como uma boa taxa de recepção pacote. No modelo para posicionamento requerimos uma flexibilidade maior dos Clusters Heads e do Coordenador Principal. No modelo para alocação de nós por Cluster

Head e também no modelo para compartilhamento de canais requerimos apenas uma pré-configuração da rede.

O aspecto visual da rede proposto nesse trabalho oferece visão clara da topologia da rede, como ocorrem as conexões, e como estão estruturadas as sub-redes.

1.4 Estrutura da Monografia

Os capítulos subsequentes estão organizados da seguinte maneira:

- O conceito e os desafios de Rede de Sensores sem Fio Industrial são apresentados no Capítulo 2, incluindo uma descrição das características desse tipo de rede, exemplos de aplicação, os padrões existentes, os desafios para implementação de uma RSSFI são apresentados e sobre os modelos para caracterização do canal de comunicação sem fio em ambientes industriais.
- No Capítulo 3, os conceitos relacionados ao projeto de protocolos multi-canais para RSSFs. É discutido em detalhe a arquitetura multicanal e o protocolo ABMP, também é descrito o modelo utilizado para simulação no Castalia.
- O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de posicionamento dos Clusters Heads e sink node. Junto a ele também são apresentados os testes e resultados obtidos.
- O Capítulo 5 aborda o modelo proposto para alocação de nó sensor para Cluster head, são feitas as simulações e apresentados o resultados com essa nova abordagem.
- O Capítulo 6 apresenta um novo algoritmo para alocar e compartilhar canais a partir de um limiar aceitável de interferência entre sub-redes. Com o algoritmo são apresentadas também redes planejadas onde é possível utilizar o algoritmo alocação e compartilhamento de canais uma vez que o nível de interferência é atenuado pelo design do planejamento.
- O Capítulo 7 compara os resultados das redes utilizando as combinações dos algoritmos propostos.
- O Capítulo 8 descreve trabalhos futuros a serem realizados.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO INDUSTRIAIS: PADRÕES E DESAFIOS

2.1 Aplicações e Vantagens

A tabela 1 fornece as classes de aplicações industriais definidas pela Sociedade Internacional de Automação (International Society of Automation - ISA).

Tabela 1: Classes de aplicações industriais

Categoria	Classe	Aplicação	Descrição
Segurança	0	Ação de emergência	Sempre crítico
Controle	1	Controle de malha fechada	Frequentemente crítico
	2	Controle de malha fechada	Usualmente não crítico
	3	Controle de malha aberta	Controlado por humano
Monitoramento	4	Alerta	Consequência de curto prazo
	5	Log (download e upload)	Nenhuma consequência imediata

Entre as classes 1 e 5 não há problema em fazer uso de redes sem fio desde que as tecnologias e protocolos sejam capazes de satisfazer aos requisitos de cada aplicação. Para a classe 0 o uso de redes sem fio não é recomendado.

Em [2] é evidenciado por meio da Figura 1 o exemplo de taxonomia de aplicações industriais que podem ser implementadas utilizando RSSFI. Utilizando essa definição, temos 3 grupos de aplicações: sensoriamento ambiental, monitoramento de condição e automação de processos.



Figura 1: Tipos de aplicações de RSSFI. [2]

As aplicações de sensoriamento ambiental em aplicações industriais podem explorar o monitoramento de parâmetros críticos para o funcionamento dos processos industriais, a avaliação do nível de poluição, monitoramento de riscos e o monitoramento de parâmetros que possam comprometer a segurança dos processos, dos produtos sendo produzidos e das pessoas envolvidas nos processos [2].

Em [10] é apresentada a implementação e implantação de uma RSSFI para monitorar motores de indução trifásicos. Sistemas embarcados foram desenvolvidos para adquirir sinais de corrente e tensão a partir de sensores instalados nos terminais dos motores, realizar processamento local para estimar torque e eficiência, além de transmitir as informações através da rede sem fio. O método usado para estimar as variáveis é baseado no método de torque de entreferro. Antes da implantação na indústria, foram realizados experimentos para validar o sistema em laboratório. Finalmente, o sistema foi empregado em um ambiente industrial real, onde diferentes análises e diagnósticos de três motores em execução foram realizados.

Lima-Filho et al. [11] desenvolveram um sistema embarcado integrado a uma RSSFI para monitoramento de torque e eficiência em motores de indução trifásicos. O sistema foi validado em laboratório considerando uma rede com dois nós finais, em um galpão com características de ambientes industriais. Estudos sobre a influência da interferência de redes Wi-Fi e fornos microondas na qualidade de comunicação de rádios IEEE 802.15.4 foram conduzidos. Os resultados mostraram que a Taxa de Perda de Pacote (TPP) da RSSFI pode chegar a 90% caso exista uma rede Wi-Fi no ambiente operando em um canal que sobrepõe o canal da RSSFI. A interferência do forno microondas provocou uma TPP de cerca de 60%. É possível mitigar os problemas de interferência por meio de um gerenciamento adequado da alocação de canais ou por meio de mecanismos de alocação dinâmica de canal.

2.2 Padrões

IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi feito para o contexto de RSSF, define as camadas físicas e de acesso a meio, possui 27 canais para comunicação definidos e opera em bandas não licenciadas dessa forma ocorre compartilhamento do meio de comunicação com outras tecnologias, como Wi-Fi e Bluetooth. Entretanto a partir de uma maneira adequada da alocação de canais há a possibilidade de que as redes coexistam sem interferência.

A topologia da rede no padrão IEEE 802.15.4 pode ser organizada de três formas: estrela, árvore ou em malha, ver Figura 2. Na topologia em árvore, utilizada nas simulações dessa monografia, há a formação de uma hierarquia onde a comunicação ocorre dos nós sensores para os nós roteadores e só então para o nó coordenador. Esse é o tipo de

topologia mais comum para implantação de protocolos multi-canais [12]. Nessa topologia pode haver comunicação em simultâneo nas sub-redes. Caso todos os nós da RSSF se comuniquem utilizando o mesmo canal, pode haver colisões entre pacotes transmitidos em diferentes sub-redes, mas por meio da utilização de múltiplos canais pode-se diminuir a quantidade de colisões. Esse tipo de topologia é adequado para RSSFs com muitos nós e que abrangem uma grande área [2].

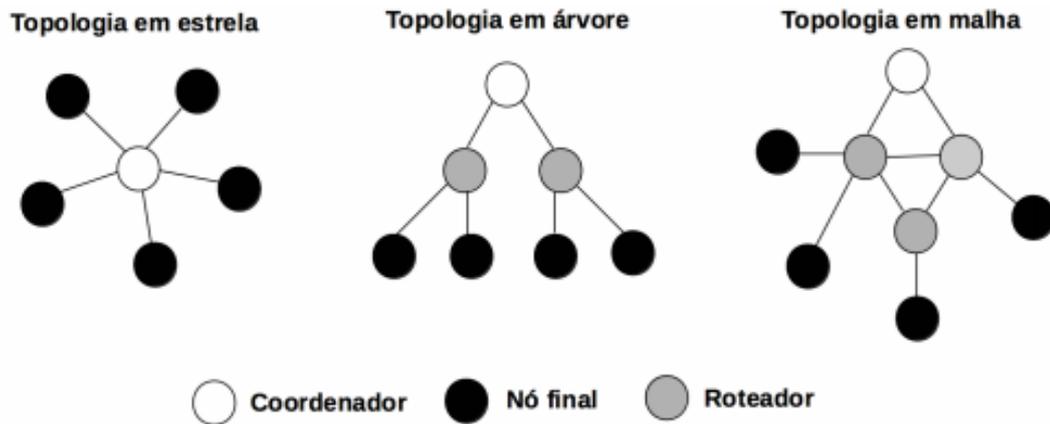


Figura 2: Topologias suportadas pelo padrão IEEE 802.15.4. [2]

IEEE 802.15.4e

Lançado em 2012 o padrão IEEE 802.15.4e propõe soluções para aplicações que requerem alta confiabilidade. Uma das principais diferenças com o padrão IEEE 802.15.4 é o uso de múltiplos canais. O modo DSME define o uso de salto em frequência ou adaptação de canal e o modo TSCH apenas o uso de salto em frequência.

Utilizando a adaptação de canal na rede, dois nós podem se comunicar utilizando o mesmo canal por um longo período de tempo. Uma troca de canal apenas ocorre quando o canal em uso passa a apresentar baixa qualidade.

Além dos padrões 802.15.04 e 802.15.04e há também os padrões WirelesHART e ISA100.11a amplamente utilizados no contexto de RSSF.

2.3 Ruído e Interferência Eletromagnética em RSSF

Com a diversidade de aplicações que utilizam radio comunicação, o espectro disponível para comunicação sofre muita interferência o que reduz a qualidade das redes.

Muitos dispositivos sem fio operam na banda destinada a aplicações industriais, científicas e médicas (Industrial, Scientific and Medical – ISM) de 2,4 GHz, como rádios Bluetooth, Wi-Fi e telefones sem fio. Além disso, outros dispositivos que não são destinados para comunicação podem causar interferência nessa faixa de frequências, como fornos

microondas. Os padrões de comunicação sem fio, como o IEEE 802.11 e o IEEE 802.15.4, definem um conjunto de canais ao longo da banda. Como eles compartilham a banda, existe uma sobreposição entre os canais definidos por esses padrões [2].

Algumas fontes de interferência usualmente encontradas nos ambientes industriais são motores elétricos, inversores de frequência e equipamentos de comunicação sem fio, como telefones sem fio e equipamentos para redes locais sem fio. Boa parte dessas interferências, principalmente as relacionadas aos equipamentos industriais, como motores e inversores de frequência, apresentam interferência na faixa de algumas centenas de MHz, o que pode atrapalhar a comunicação em sistemas proprietários que utilizam essa faixa de frequência, mas não interferem em sistemas que usam a banda ISM de 2,4 GHz [15] [16].

2.4 Perda de Caminho em Larga Escala

Em uma indústria há diversos objetos metálicos e móveis, o que influencia diretamente no desvanecimento em larga escala e na atenuação em pequena escala.

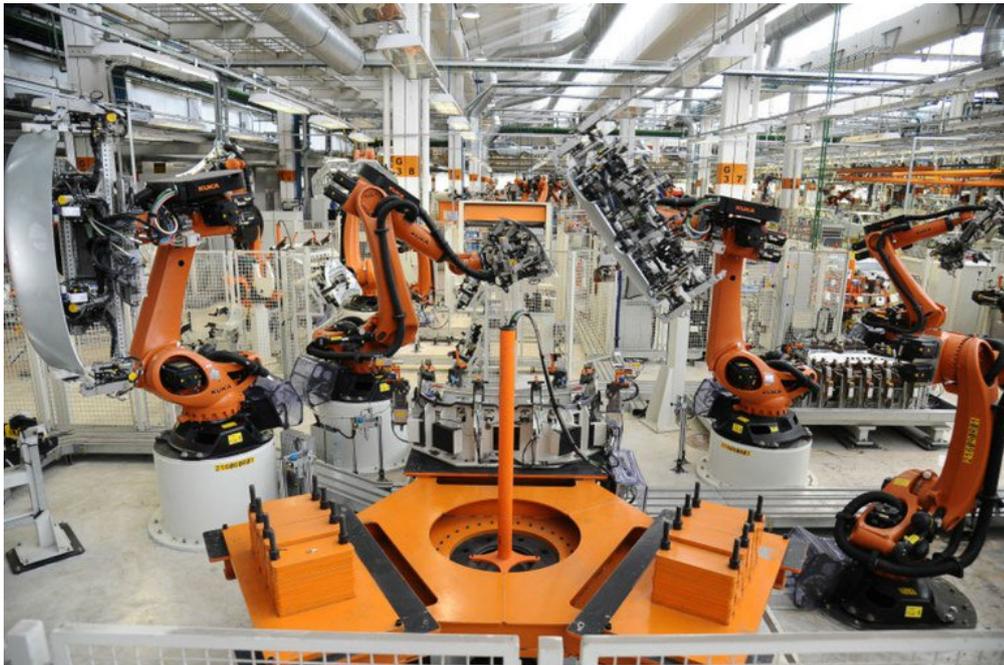


Figura 3: Indústria [6]

A perda de caminho na distância d , $L(d)$, depende da perda em uma distância de referência d_0 e de um expoente de perda n . O valor de $L(d_0)$ pode ser determinado utilizando a perda no caminho do espaço livre, por meio da equação $L(d_0) = 20\log(4\pi d_0/\lambda)$ onde λ é o comprimento de onda da portadora. As Equações 1 e 2 são propostas em [2].

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

Existe uma variação entre a potência do sinal recebido. Para capturar essa variação, uma variável aleatória X_σ é acrescentada. X_σ é uma distribuição Gaussiana de média zero e desvio padrão σ , ambos em dB. Essa variação na potência recebida em diferentes pontos com a mesma distância entre transmissor e receptor é conhecida como sombreamento log-normal [17].

A potência do sinal recebido depende então da potência de transmissão, do ganho das antenas, da distância entre transmissor e receptor e dos efeitos do ambiente. Então a potência de recepção é calculada de acordo com [18]

$$P_R(d) = P_T - L(d), \quad (2)$$

em que P_T é a potência de transmissão (em dBm) e $L(d)$ é a perda no caminho.

Em [2] podemos perceber que para uma $P_T = 0dBm$ no ambiente Industrial o ruído de fundo se igual a potência de transmissão com 34 metros aproximadamente, enquanto que para uma $P_T = 15dBm$ essa distância é aumentada para 270m aproximadamente.

Entretanto utilizar rádios com potência alta aumenta o consumo de energia da RSSF e diminui o tempo de vida da rede. Além disso, aumenta-se o nível de interferência entre nós da mesma RSSF. Por outro lado utilizar rádios com baixa potência (0 dBm) pode não ser viável devido a perda no caminho acentuada.

2.5 Atenuação em Pequena Escala e Multipercurso

Além da perda no caminho e sombreamento, deve-se também analisar a atenuação em pequena escala, devido a modificações rápidas que ocorrem no perfil de multipercurso do ambiente causado pelo movimento de objetos ao redor do transmissor e do receptor [2]. Experimentos realizados em ambientes industriais descritos em [15] mostraram que a atenuação temporal segue a distribuição de Rice, considerando transmissor e receptor fixos.

3 PROTOCOLOS MULTICANAIS

3.1 Arquitetura Multicanal

Para lidar com a variação temporal da qualidade dos canais uma saída é o desenvolvimento de protocolos que utilizam múltiplos canais traduzindo em uma melhor utilização do espectro e conseqüente aumento da capacidade de transmissão da rede.

Os protocolos multi-canais possuem uma grande dependência da arquitetura da RSSF. A arquitetura mais simples que pode ser utilizada para a implementação de protocolos multicanais é baseada em uma rede com topologia em estrela, em que os nós finais são agrupados em um conjunto de sub-redes [12]. Cada sub-rede pode operar em um canal diferente.

Utilizando uma arquitetura de três camadas, em que cada sub-rede se comunica com um nó intermediário (Cluster Head - CH), é possível comunicação simultânea em diferentes sub-redes. O CH é o responsável por agregar os pacotes dos nós finais para encaminhar para o nó sorvedouro.

Para aumentar a capacidade da rede, o CH pode ser equipado com múltiplos transceptores, de modo que cada sub-rede pode ser subdividida. Nesse cenário, que é ilustrado pela Figura 4, os nós finais de cada sub-rede podem transmitir em simultâneo utilizando canais diferentes e os nós CH também podem transmitir em simultâneo para o nó sorvedouro, caso ele também possua múltiplos transceptores.

As RSSFIs geralmente podem ser implantadas de forma planejada e os nós sorvedouro e CH podem ser instalados em locais com alimentação disponível [2].

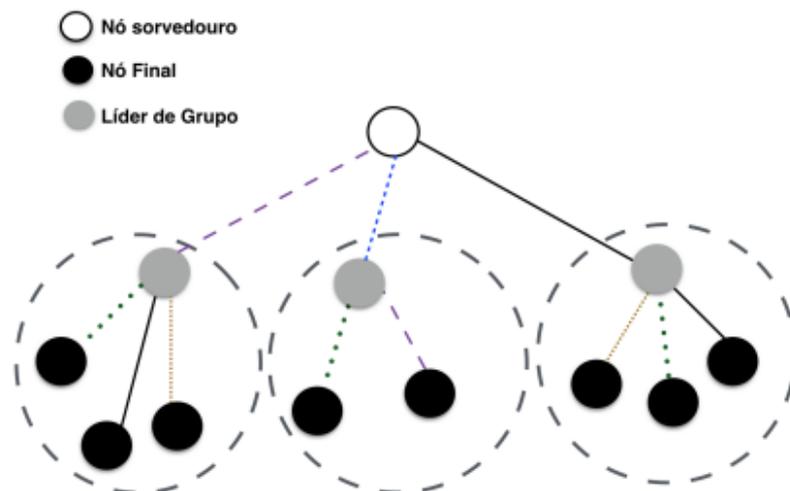


Figura 4: Arquitetura em três camadas. [2]

Os protocolos multi-canais podem ser divididos em estáticos, dinâmicos e semi-

dinâmicos [13].

Os protocolos estáticos são mais simples, mas menos flexíveis, uma vez que não são capazes de se adaptar a variações na qualidade dos canais. Os protocolos dinâmicos permitem a utilização de múltiplos canais em simultâneo e permitem lidar melhor com as variações na qualidade dos canais e com problemas de interferência. No entanto esses protocolos podem apresentar grande sobrecarga para sincronização dos nós sensores e também pode ser necessário realizar o gerenciamento dinâmico da lista de canais considerados para comunicação, de modo a manter uma boa qualidade de serviço. Os protocolos semi-dinâmicos aparecem como um meio termo, em que os nós sensores utilizam diferentes canais, mas as trocas de canal ocorrem com menos frequência [2].

3.2 Protocolo ABMP

O ABMP é utilizado em topologias árvore ou estrela considerando 4 tipos de nós: coordenador principal (CP), nós finais, nós que estimam a qualidade do enlace em tempo real e nós coordenadores. Os nós que estimam a qualidade do enlace estão integrados aos nós coordenadores.

No ABMP, o acesso ao meio é realizado com base em uma estrutura denominada multislotframe. Cada multi-slotframe é formado por um conjunto de slotframes, e cada slotframe é composto por um conjunto de intervalos de tempo, em que o primeiro é utilizado para a transmissão dos beacons e os remanescentes podem ser utilizados pelos nós para realizarem transmissões de pacotes de dados [2].

Em todo slotframe há um intervalo para transmissão do beacon e T intervalos para transmissão de pacotes de dados. Todos os slotframes dentro de um multi-slotframe possuem a mesma estrutura, com os intervalos de tempo alocados para os mesmos nós. Dessa forma, os nós finais da rede têm um ou mais intervalos de tempo dentro de cada slotframe.

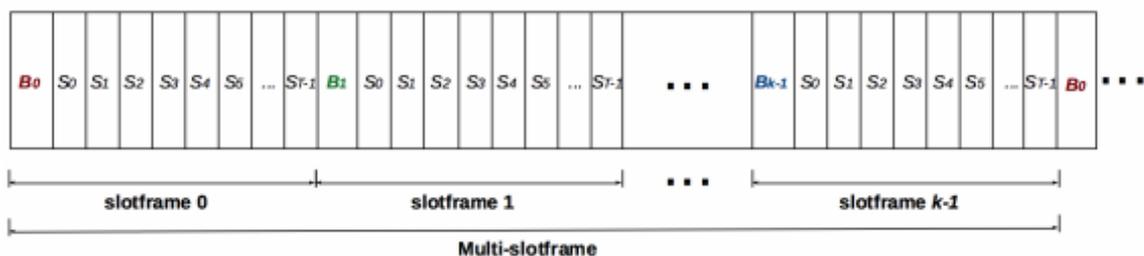


Figura 5: Estrutura de tempo (multi-slotframe) definida pelo ABMP. [2]

Os beacons são usados para manter a sincronização, e para permitir o uso de adaptação de canal [2]. O ABMP é um protocolo baseado em beacon, os nós finais

apenas transmitem seus pacotes se os beacons forem recebidos corretamente. Se muitos beacons forem perdidos o desempenho global da rede é degradado.

Os canais utilizados pelos nós finais para transmitir pacotes de dados dentro dos slotframes são definidos pelo coordenador, que envia esta informação para os nós finais utilizando os beacons.

3.3 Modelo para Simulação de Protocolos Multi-Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais

Devido à falta de uma estrutura de teste em comum e a carência de simuladores que apresentem modelos para simular ou emular características dos múltiplos canais simultaneamente, há uma grande dificuldade de avaliação.

O modelo utilizado na simulação foi implementado com o simulador Castalia - baseado no framework Omnet++. O Castalia é um simulador de código aberto e específico para redes de sensores onde é possível simular variações temporais na potência recebida utilizando amostras pré-definidas, que simulam o comportamento de um canal sujeito à atenuação por multipercurso.

Castalia também é baseado em eventos discretos desenvolvido em C++. Seu módulo de rádio é baseado em rádios reais utilizados em plataformas embarcadas para RSSF, incluindo o suporte aos transceptores CC2420 e CC1000, e ao modelo Modelo de sombreamento log-normal [2].

Para gerar os valores relativos à atenuação em pequena escala, seguindo a distribuição de Rice, foi utilizada uma biblioteca implementada em C++ denominada IT++.

Os parâmetros foram definidos no script de simulação de acordo com a tabela 2.

Tabela 2: Definição dos parâmetros do canal sem fio no script de simulação do Castalia e suas utilizações (Adaptado de [2])

SN.wirelessChannel.pathLossExponent = 1.69	perda no caminho e sombreamento
SN.wirelessChannel.PLd0 = 80.48	
SN.wirelessChannel.d0 = 15	
SN.wirelessChannel.sigma = 6.62	atenuação em pequena escala
SN.wirelessChannel.K = 12.3	
SN.wirelessChannel.K_sigma = 5.4	valores aleatórios de potência
SN.wirelessChannel.seed = 0	

Se quisermos comparar diferentes protocolos e algoritmos mantemos o valor de seed fixo.

Para realizar a integração do modelo proposto com o Castalia foram feitas modificações na classe WirelessChannel [2]. Após a integração, uma simulação foi realizada,

considerando um transmissor e um receptor. Os parâmetros utilizados nessa simulação são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros usados na simulação (Adaptado de [2])

Distância entre os nós	20 metros
Camada física e MAC	IEEE 802.15.4 - CSMA/CA
Taxa de bits	250 kbit/s
Potência de transmissão	0 dBm
Taxa de transmissão de pacotes	0,2 pacotes/s
Tempo médio de mudança (T_c)	85 minutos
Expoente de perda no caminho (n)	1,69
Distância de referência (d0)	15 metros
Perda no caminho na distância de referência (L(d0))	80,48 dB
Desvio padrão do sombreamento ($X\sigma$)	8,13 dB
Fator de Rice (K)	12,3 dB
Desvio padrão do fator de Rice ($K\sigma$)	5,4 dB

Para a simulação final foi utilizado os parâmetros descritos na tabela 4. Esses parâmetros foram obtidos por meio de experimentos descritos em [14].

Tabela 4: Parâmetros usados na simulação (Adaptado de [2])

Distância entre os nós	20 e 35 metros
Camada física e MAC	IEEE 802.15.4 - CSMA/CA
Taxa de bits	250 kbit/s
Potência de transmissão	0 dBm
Tempo de simulação	5 horas
Taxa de transmissão de pacotes	1 pacotes/s
Tempo médio de mudança (T_c)	85 minutos
Expoente de perda no caminho (n)	1,52
Distância de referência (d0)	15 metros
Perda no caminho na distância de referência (L(d0))	72,71 dB
Desvio padrão do sombreamento ($X\sigma$)	4,61 dB
Fator de Rice (K)	12,3 dB
Desvio padrão do fator de Rice ($K\sigma$)	5,4 dB
Ruído de fundo	-90 dBm

4 REPOSICIONANDO CLUSTER HEAD E COORDENADOR PRINCIPAL

4.1 Posicionamento do Coordenador Principal (CP)

Para posicionar o coordenador principal foi levada em consideração dois objetivos, o primeiro foi diminuir a maior distância entre o CP e um nó qualquer da rede, pois garantimos assim que mesmo a pior comunicação de um nó qualquer da rede com o CP é a melhor que conseguir dada a topologia. O segundo foi posicionar o CP garantindo regiões de tamanho uniforme para explorar ao máximo a área "soberana" de um Cluster Head. A área "soberana" de um Cluster Head é a área que somente aquele Cluster Head alcança, essa abordagem foi adotada para diminuir as áreas conjuntas onde um nó pertencente a essa área inviabiliza o compartilhamento de canais entre sub-redes por interferir com dois ou mais Clusters Heads. Para garantir isso foi utilizado um algoritmo de Minimum Enclose Circle posicionando o CP no centro dessa circunferência ver figura 6.

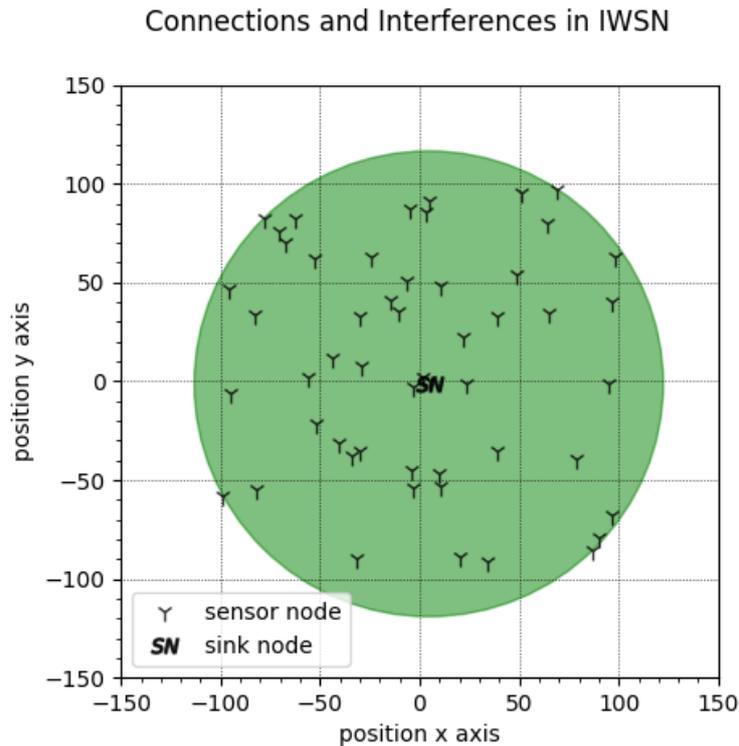


Figura 6: Círculo Mínimo de Inclusão (MEC) para posicionar CP

4.2 Posicionamento dos Clusters Head (CH)

Para posicionar os Clusters Head foi realizada uma busca na literatura e geometria. A tentativa de explorar ao máximo a área "soberana" de um Cluster Head continuava como norte do posicionamento.

Em redes de telefonia, são consideradas células hexagonais ver figura 7 devido ser uma forma já mais próxima da circunferência, e também pelo ângulo interno de 120 graus permitindo uma formação contínua de uma malha com encaixe livre em qualquer posição.

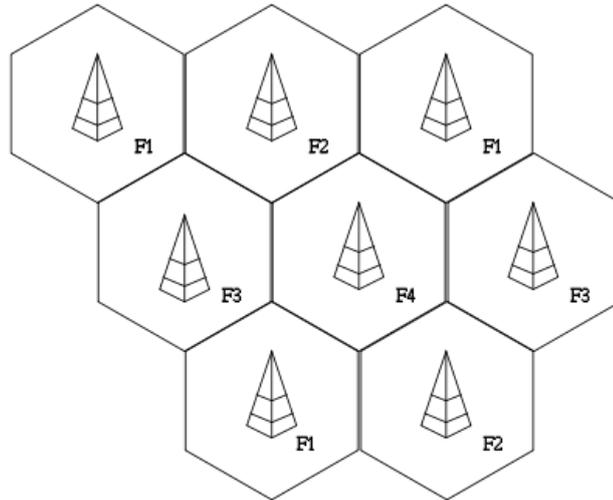


Figura 7: Modelo hexagonal utilizado em redes de telefonia

Entretanto uma angulação de 120° graus não confere a expectativa de 4 Clusters Head (topologia adotada em [2], e por conseguinte nesse trabalho), implicando em distâncias diferentes desses para o CP e portanto espaço "soberano" prejudicado. O próximo candidato foi, claro, o quadrado devido sua angulação de 90°, perfeita para uma topologia com 4 Clusters Head, as simulações com o quadrado revelou uma boa opção para o posicionamento e por isso, essa forma foi adotada.

Resolvida a forma, foi necessário ainda garantir a comunicação dos CH com o CP. Para isso os centros dos quadrados, onde os CH ficam, foram calculados utilizando 2σ e acrescido de 20% da distância mínima do CP para o CH em direção ao CP ver figura 8 garantindo, dessa forma, comunicação estável 100% do tempo.

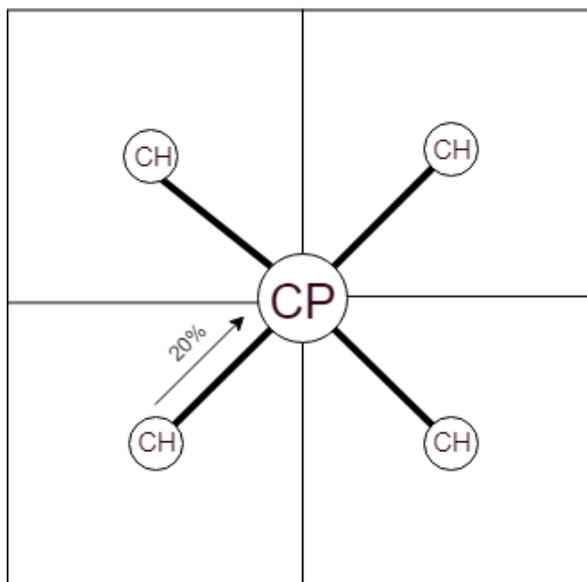


Figura 8: Modelo de posicionamento do CH em relação ao CP

4.3 Simulações

As simulações de posicionamento duraram 18.000 segundos e foram realizadas segundo as condições descritas no Capítulo 3. Foram objetos de análise dessas simulações a taxa de recepção de pacotes na camada de aplicação e a taxa de recepção de pacotes na camada de acesso ao meio, respectivamente: Taxa de recepção de pacote na camada de aplicação (PRRAPP) e Taxa de recepção de pacote na camada de acesso ao meio (PRRMAC).

Os valores no gráfico da Figura 9 mostram uma melhora significativa na taxa de recepção de pacotes na camada de aplicação. Sem o algoritmo de posicionamento temos um processo aleatório gerando as posições.

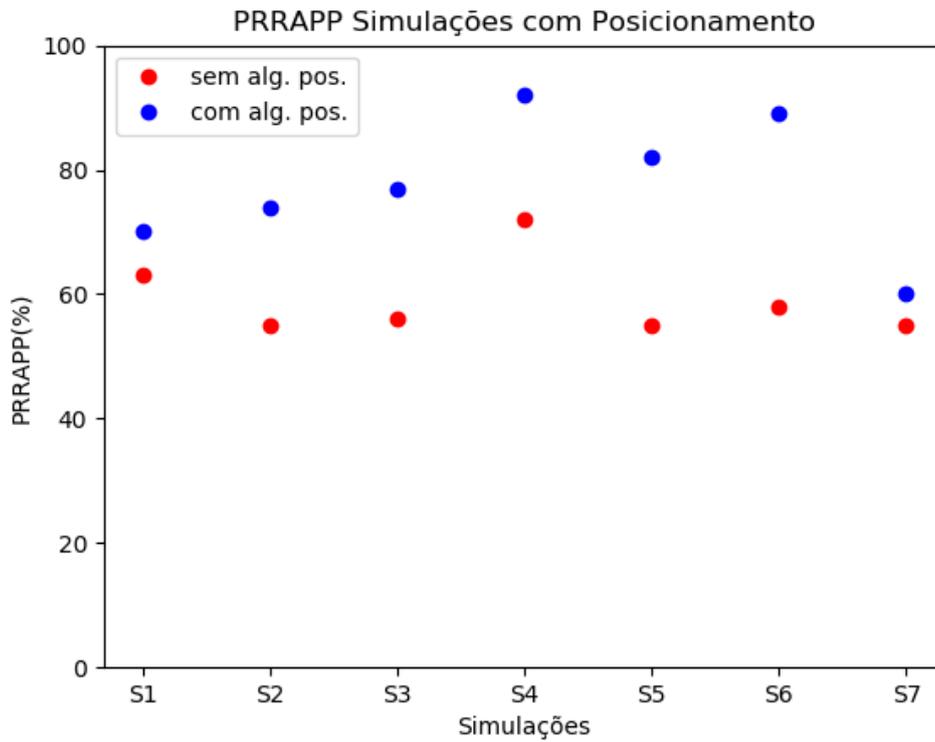


Figura 9: PRRAPP - Simulações com posicionamento

O gráfico da Figura 10 mostra o resultado para a taxa de recepção de pacotes na camada de acesso ao meio. Podemos notar uma melhora mais discreta se relacionada à mesma taxa na camada de aplicação.

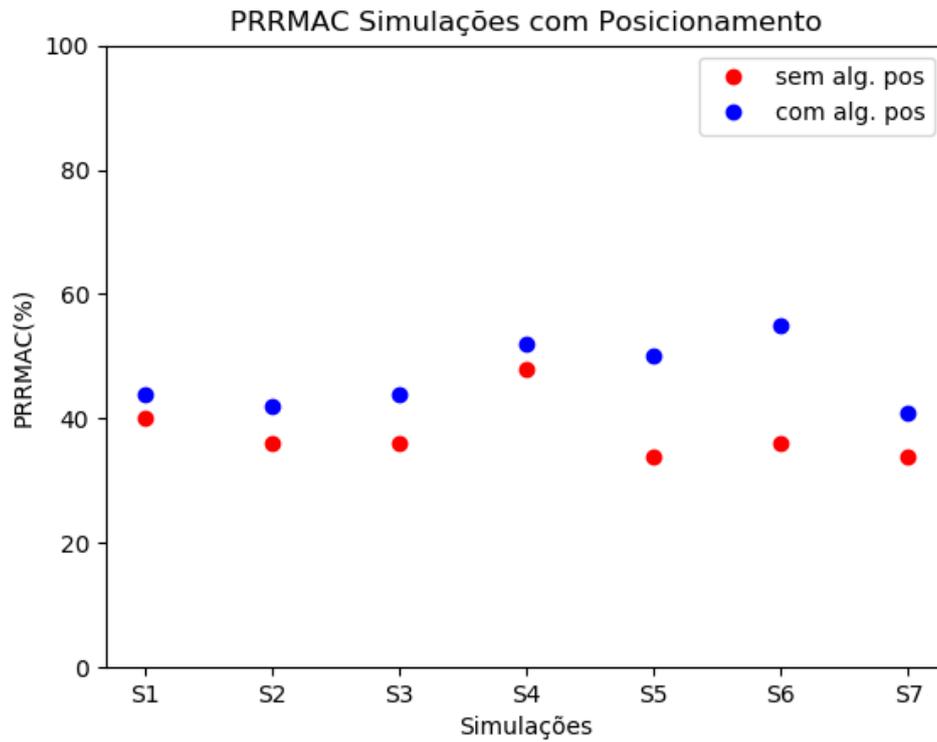


Figura 10: PRRMAC - Simulações com posicionamento

Abaixo podemos visualizar as topologias utilizadas nas simulações de posicionamento S1, S2, S3, S4, S5, S6 e S7 respectivamente. Nas imagens podemos perceber também arestas que indicam a probabilidade interferência ser maior ou igual a 50%.

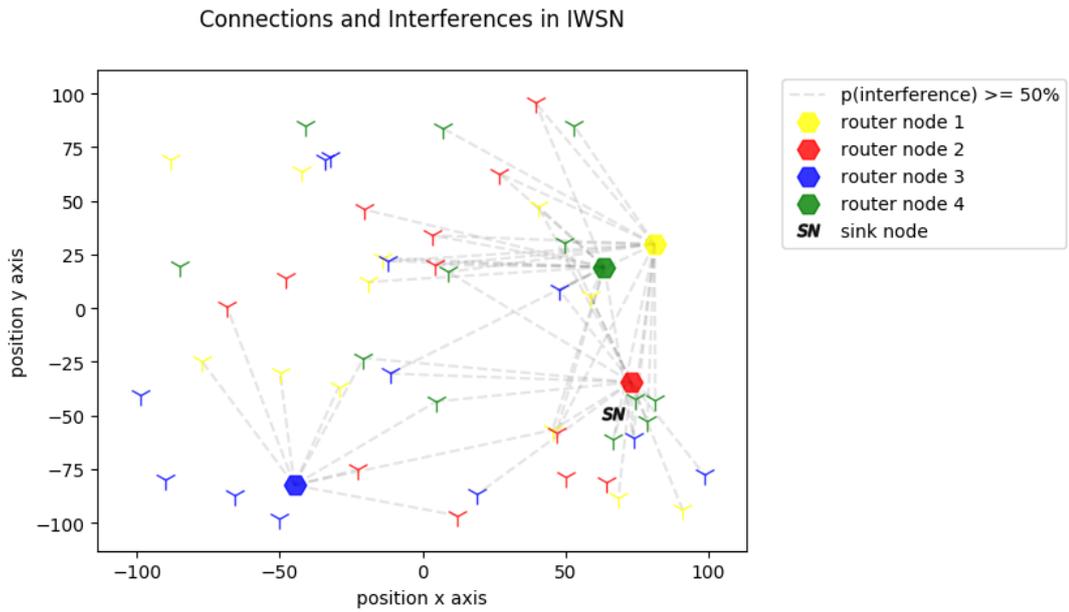


Figura 11: Simulação de posicionamento S1 - sem algoritmo

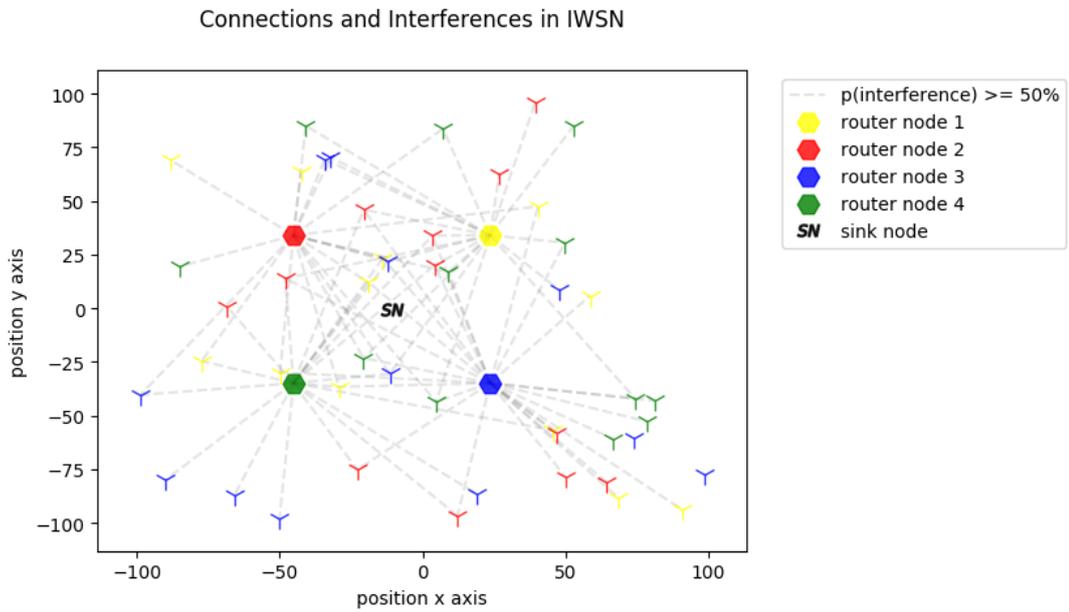


Figura 12: Simulação de posicionamento S1 - com algoritmo

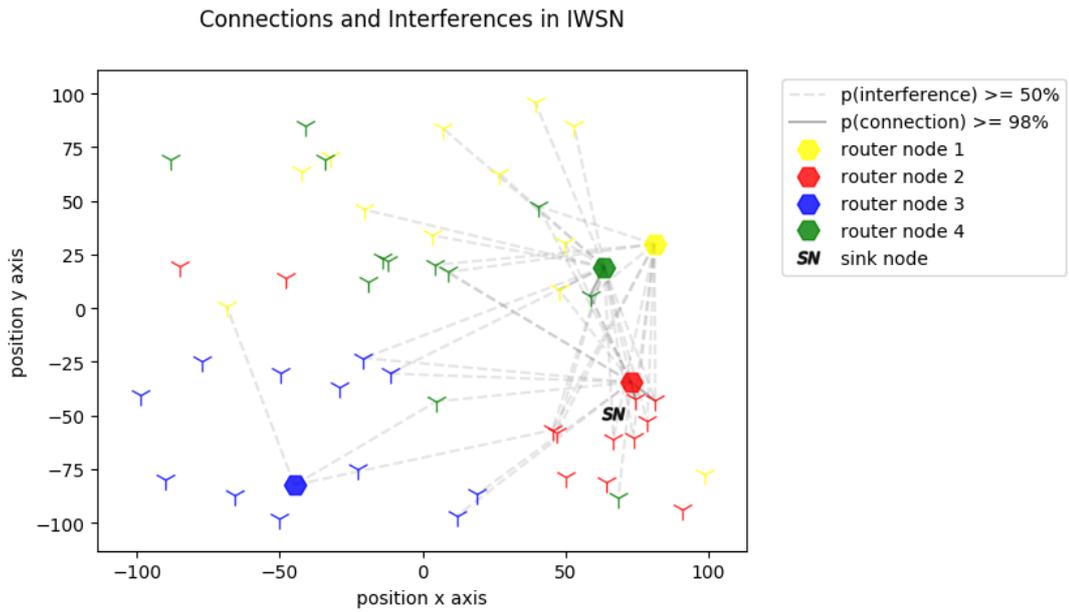


Figura 13: Simulação de posicionamento S2 - sem algoritmo

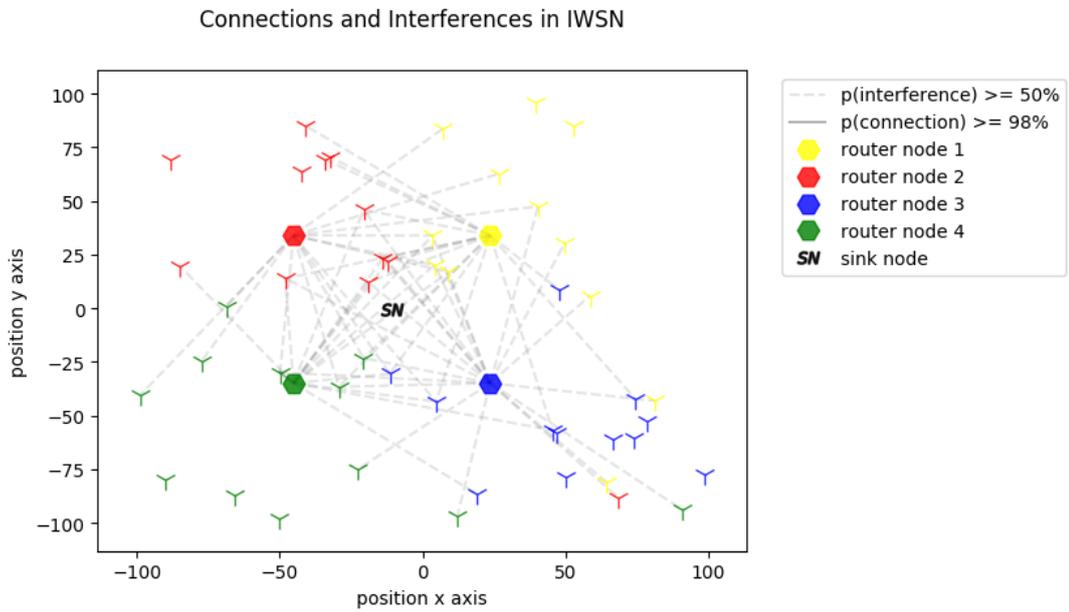


Figura 14: Simulação de posicionamento S2 - com algoritmo

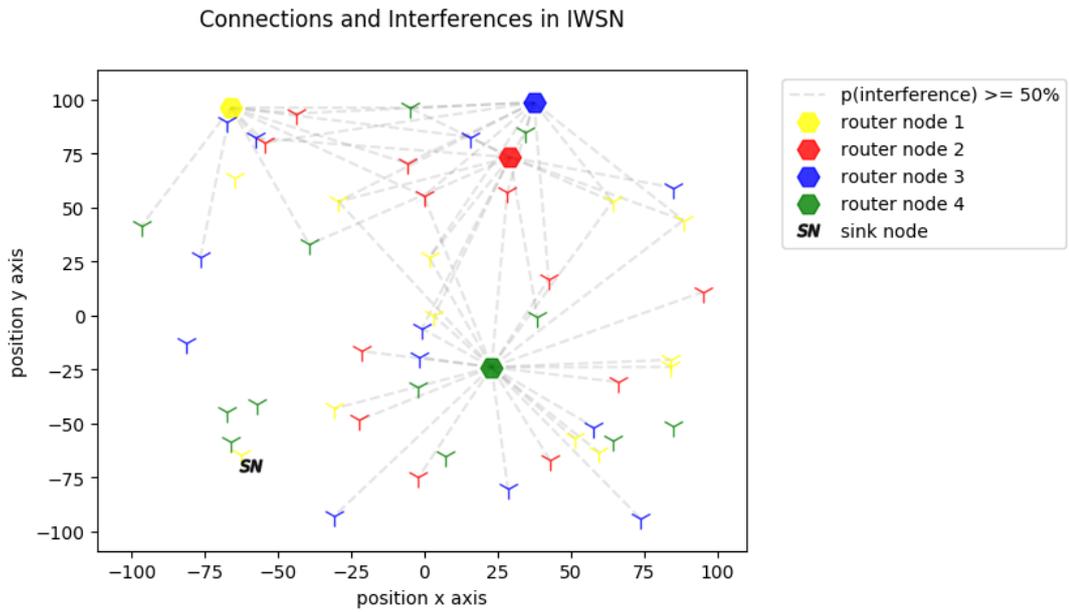


Figura 15: Simulação de posicionamento S3 - sem algoritmo

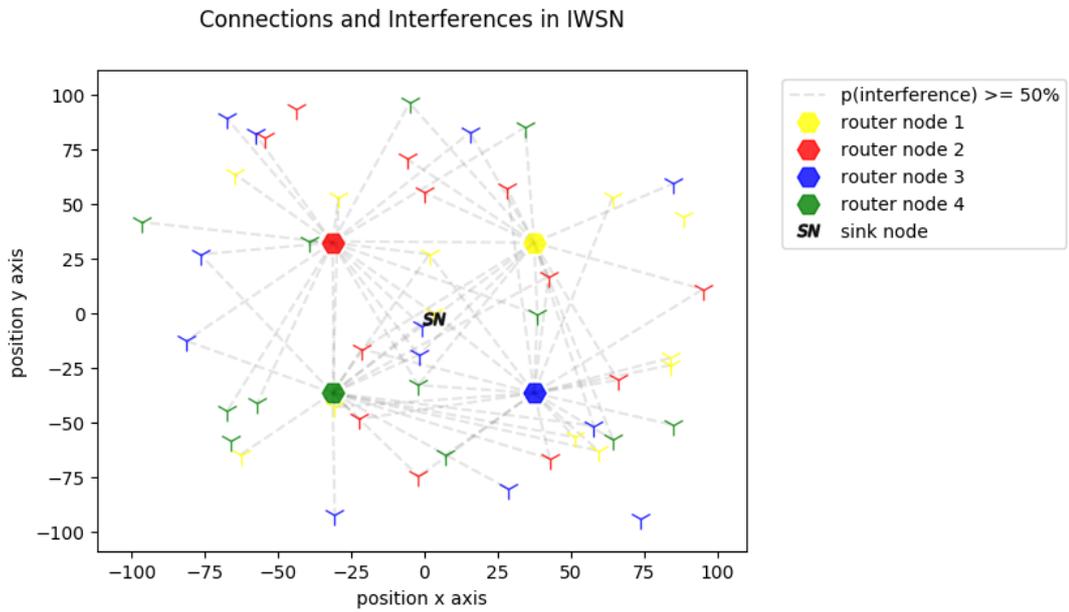


Figura 16: Simulação de posicionamento S3 - com algoritmo

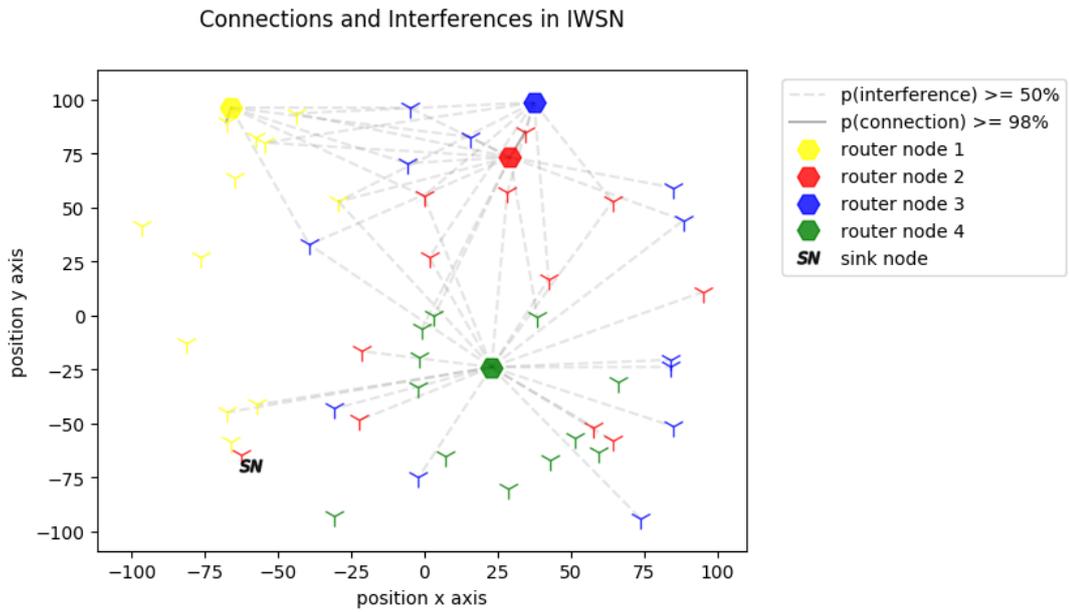


Figura 17: Simulação de posicionamento S4 - sem algoritmo

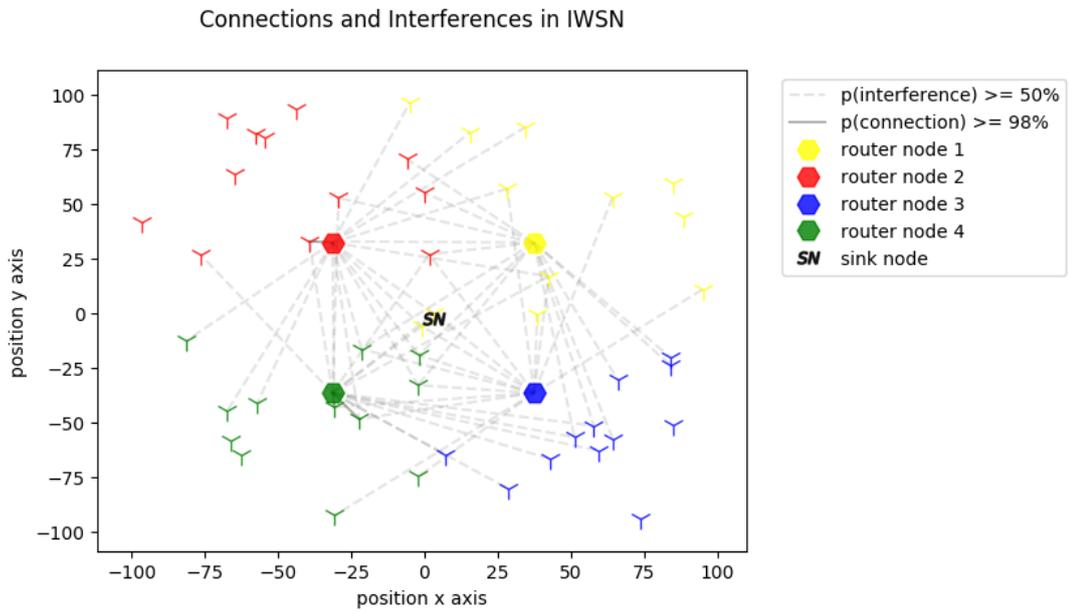


Figura 18: Simulação de posicionamento S4 - com algoritmo

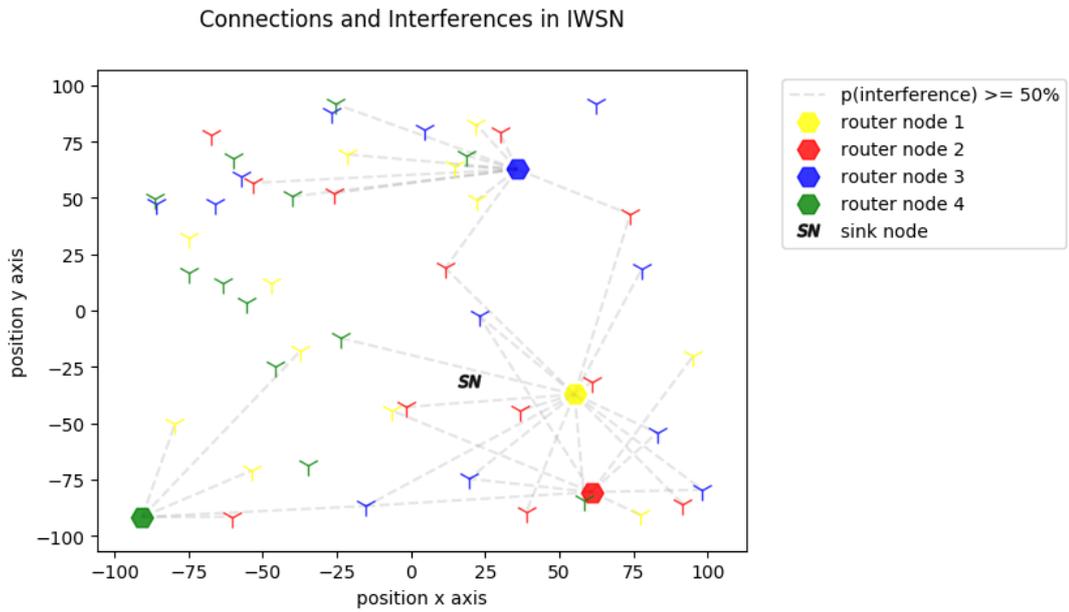


Figura 19: Simulação de posicionamento S5- sem algoritmo

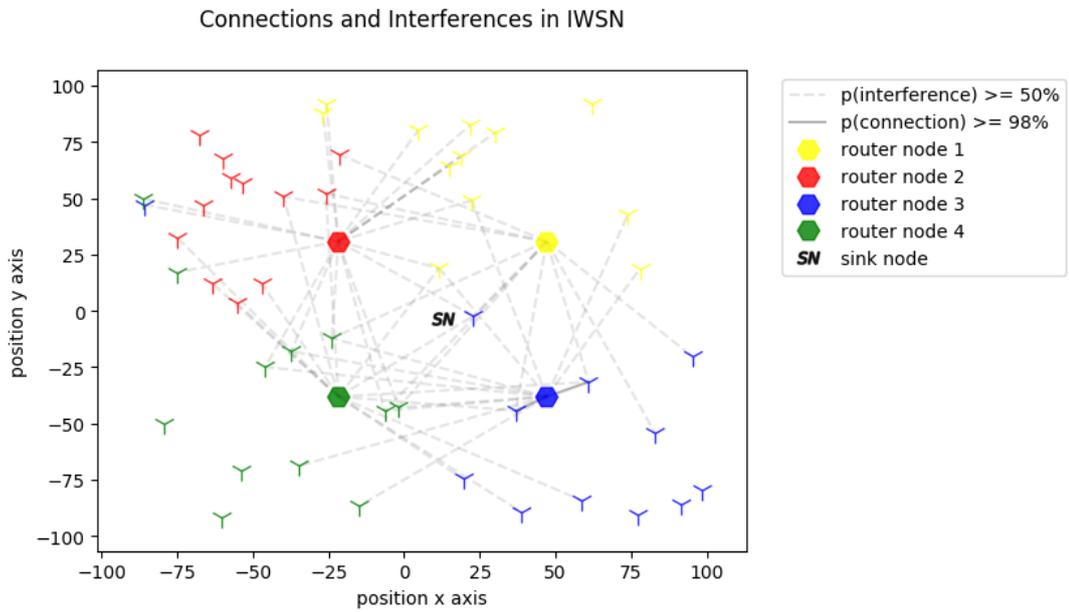


Figura 20: Simulação de posicionamento S5 - com algoritmo

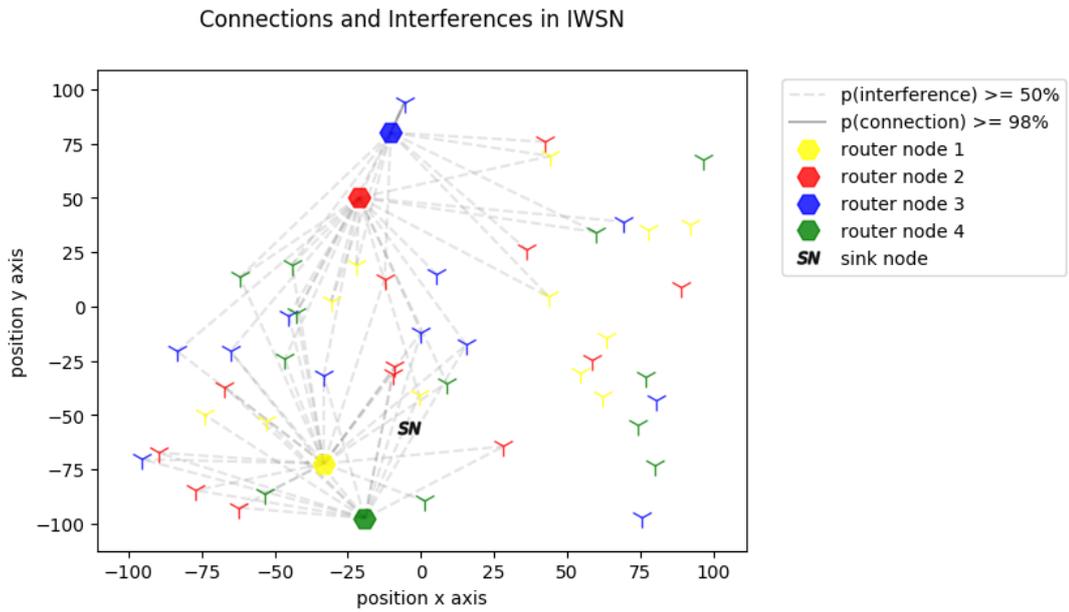


Figura 21: Simulação de posicionamento S6 - sem algoritmo

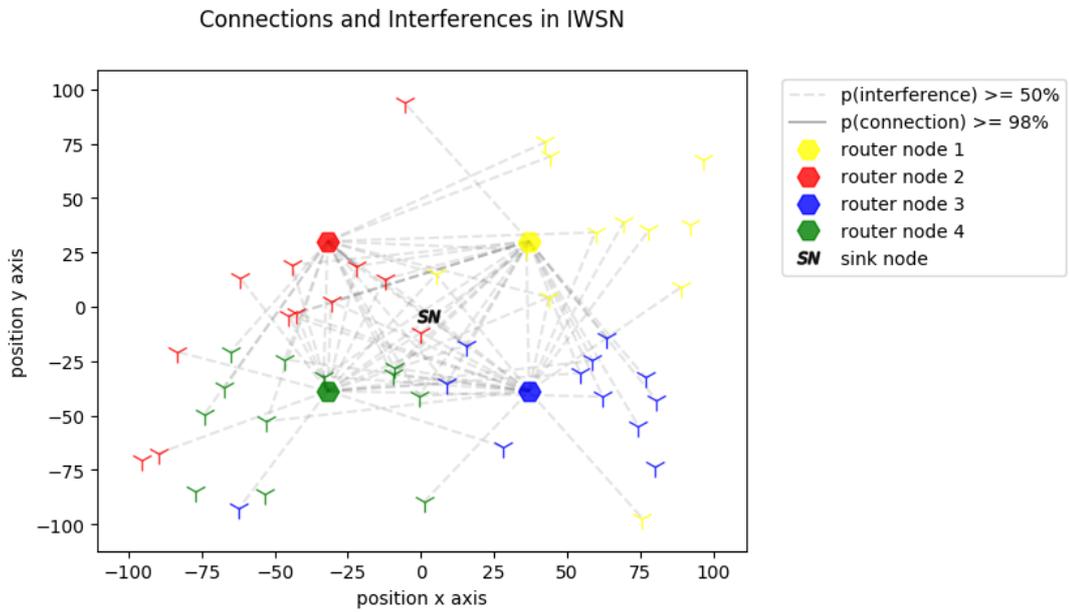


Figura 22: Simulação de posicionamento S6 - com algoritmo

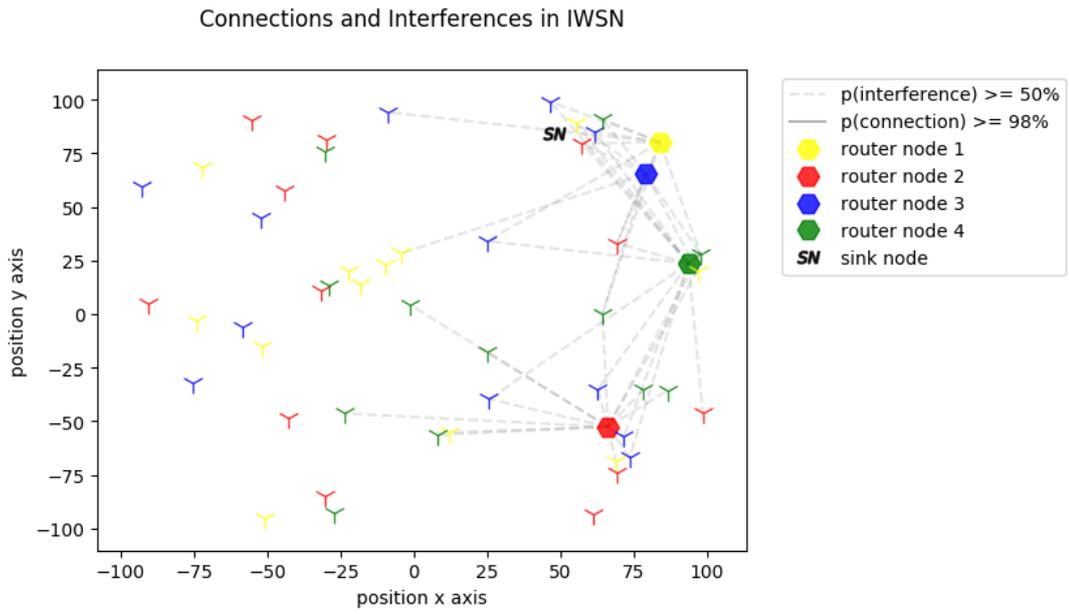


Figura 23: Simulação de posicionamento S7 - sem algoritmo

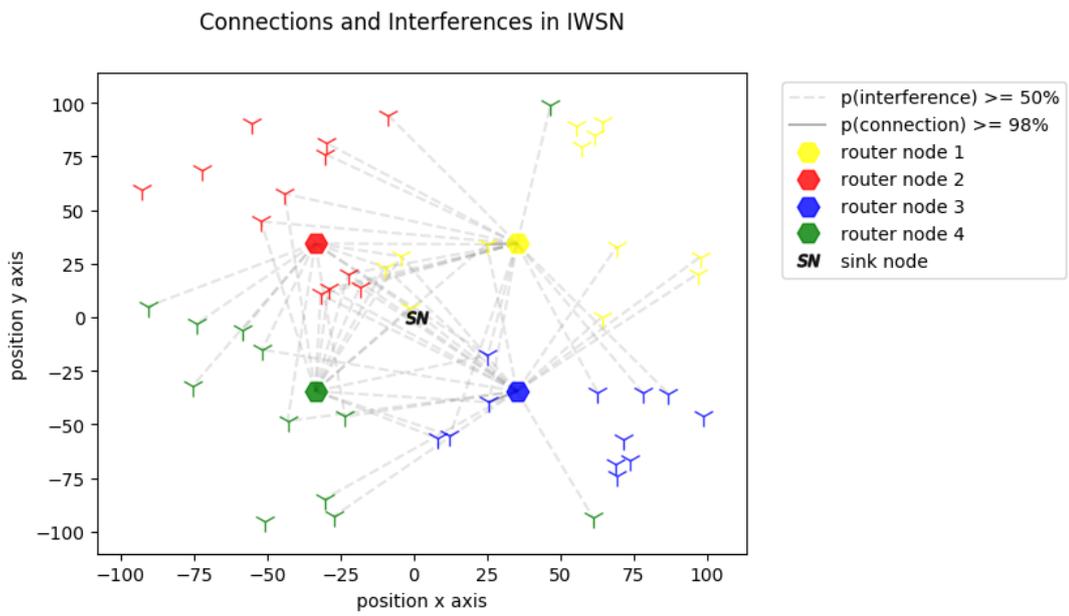


Figura 24: Simulação de posicionamento S7 - com algoritmo

5 ALOCAÇÃO DE NÓ POR CLUSTER HEAD

5.1 Estratégia utilizada

Para distribuir um único nó para um Cluster Head (o principal parâmetro a ser considerado é a distância com ela conseguimos verificar o quão hábil a comunicação está. Entretanto para escolher vários nós para Clusters Head precisamos considerar não somente o posicionamento de um único nó, mas também o posicionamento de todos os outros além da distribuição dos nós por Cluster Head. Por exemplo, pegar os mais próximos de uma vez para um Cluster Head pode ser prejudicial aos outros Clusters Head. Inspirado em um algoritmo simples e utilizado nos esportes amadores em grupo como por exemplo, o futebol. O algoritmo criado funciona tomando decisões gulosas por Cluster Head. Assim como no esporte o qual para formar n times balanceados alternamos entre os n capitães onde normalmente são escolhidos os melhores disponíveis. Os Clusters Head tomam sua melhor decisão, ou seja, capturam o nó com menor distância e disponível por vez garantindo uma boa distribuição e equalização dos nós por CH.

Para exemplificar vamos analisar a seguinte rede, e o funcionamento do algoritmo nela, (ver Figura 25). Onde no início não há alocações realizadas, e após a primeira rodada o CH1 escolhe o nó mais próximo (A) enquanto o CH2 escolhe o nó mais próximo (E), prosseguindo para a segunda rodada CH1 escolhe o nó mais próximo disponível (C) e CH2 faz o mesmo com (D), na terceira rodada CH1 escolhe B e CH2 escolhe F, finalizando o algoritmo.

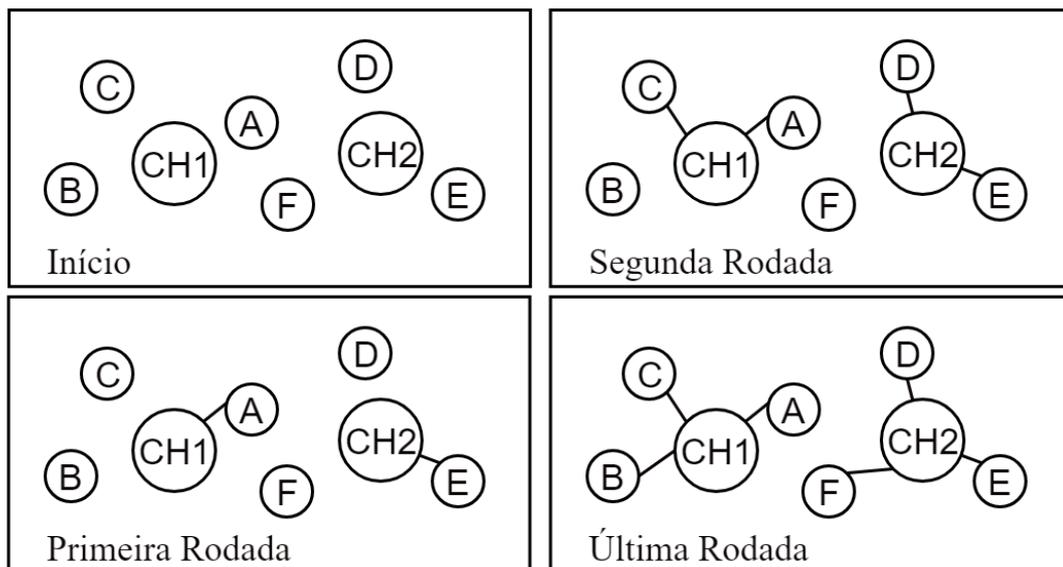


Figura 25: Funcionamento do algoritmo de alocação de nós

O algoritmo costuma funcionar muito bem para redes como na Figura 26 onde há nós muito próximos do Cluster Head, por isso é muito mais eficiente quando unido ao

algoritmo de posicionamento que coloca os Clusters Head com uma área "soberana" maior. Entretanto, apesar de ter uma boa eficiência, ver figuras 65, 66, 29 e 30 a natureza gulosa do algoritmo permite que alguns nós fiquem muito mal posicionados esse problema é abordado no capítulo 8.

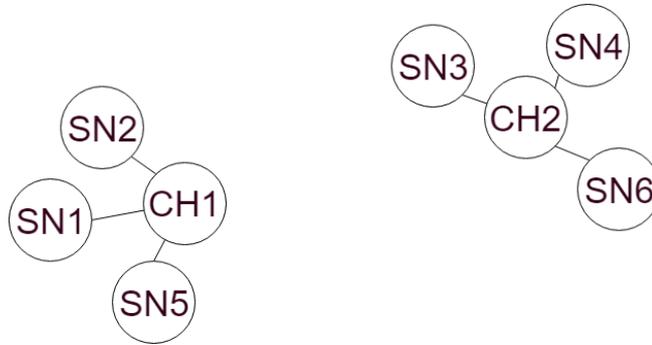


Figura 26: Configuração ótima para alocação de nós

Tomando melhores decisões por vez as últimas decisões do CH costumam não ser boas o que resulta em outliers. Outro problema do algoritmo se encontra na sua própria tomada de decisão ver Figura 31.

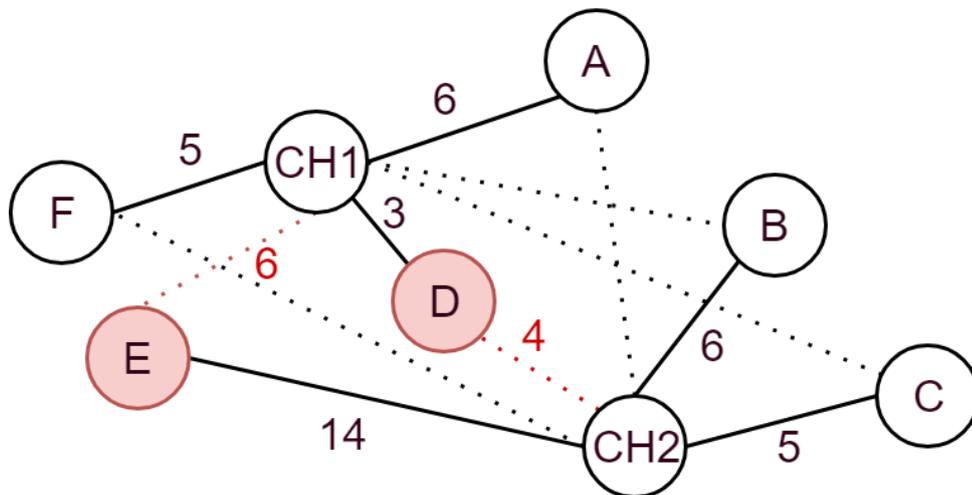


Figura 31: Alocação de nós não ótima

Na Figura 31 podemos notar que por ser a melhor escolha inicial o CH1 acaba tomando o nó D que também seria a melhor decisão para CH2. No final do algoritmo CH2 é forçado a tomar E na sua rede, enquanto o mesmo E seria uma boa decisão para CH1. Com essa configuração o que CH1 ganha por escolher D é muito pouco em relação ao que CH2 perde em escolher E, sendo assim, portanto, uma má disposição da rede. A melhor decisão para a rede está descrita na Figura 32.

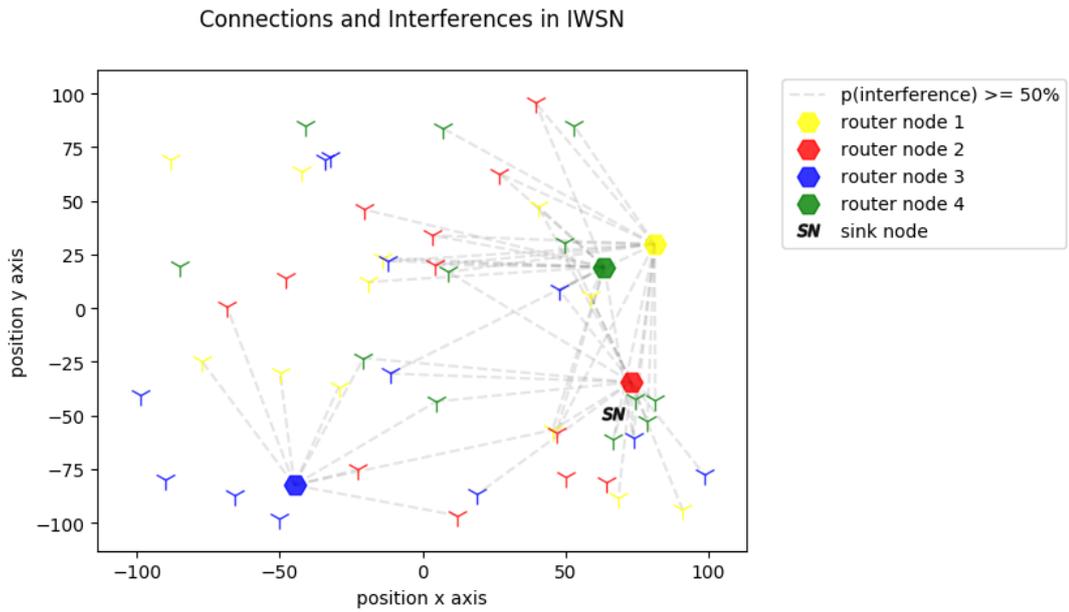


Figura 27: Distribuição 1 - Antes do realocação

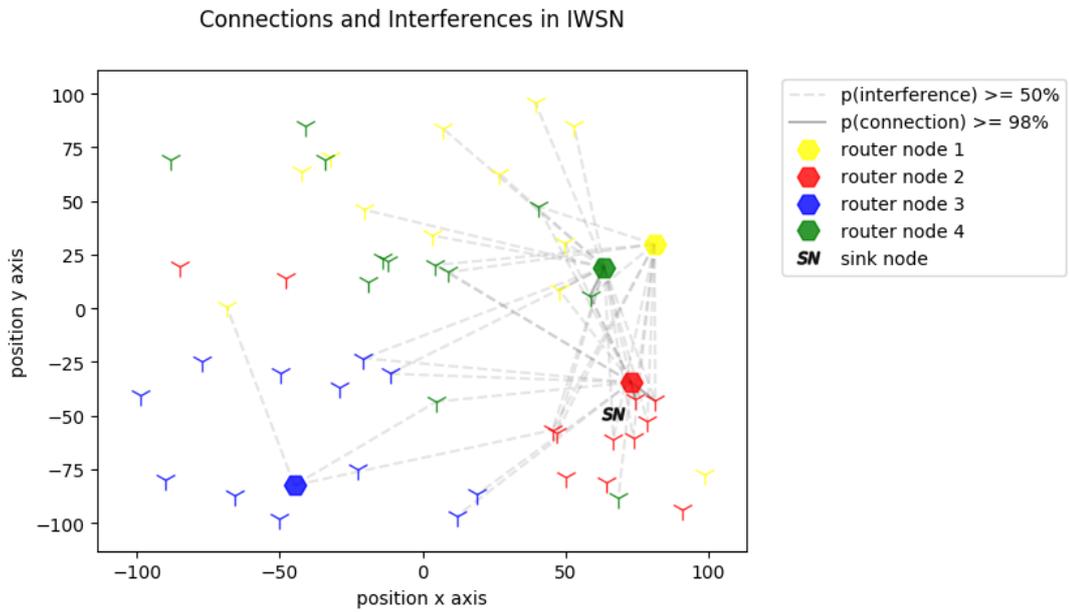


Figura 28: Distribuição 1 - Depois da realocação

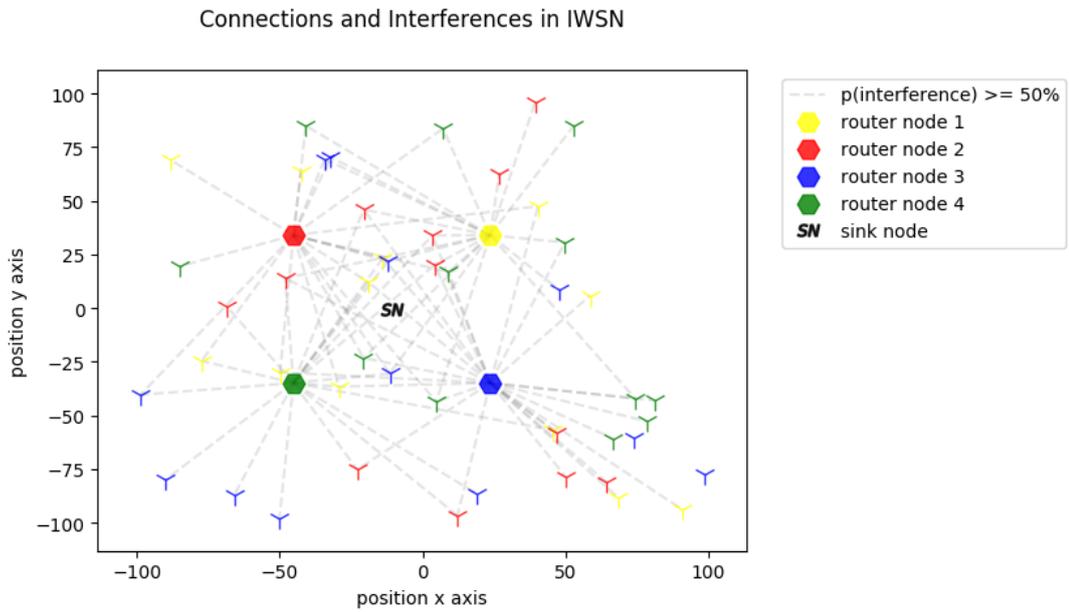


Figura 29: Distribuição 2 - Antes da realocação

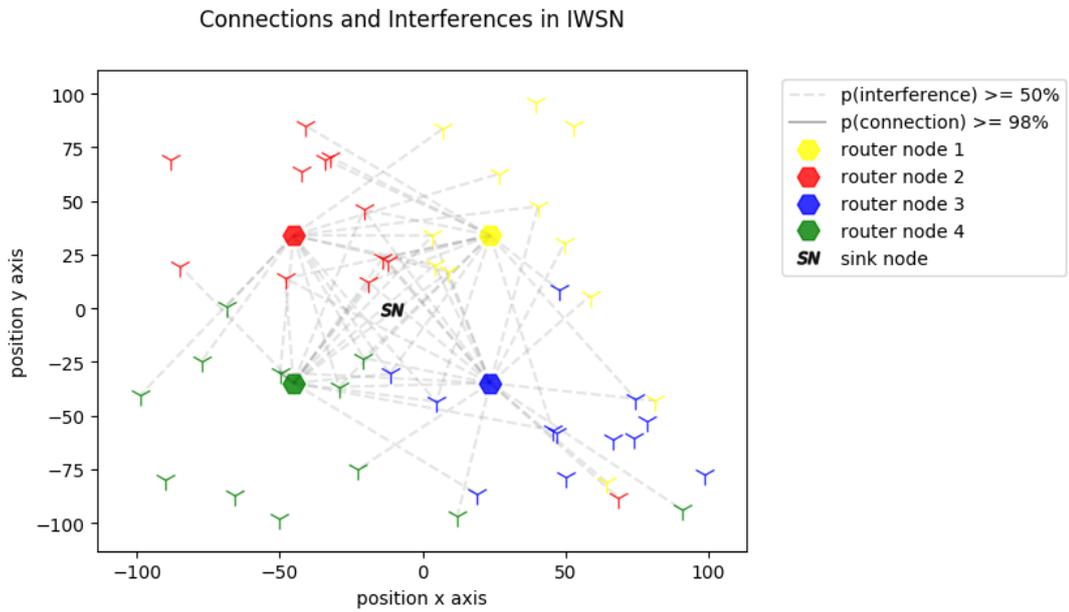


Figura 30: Distribuição 2 - Depois da realocação

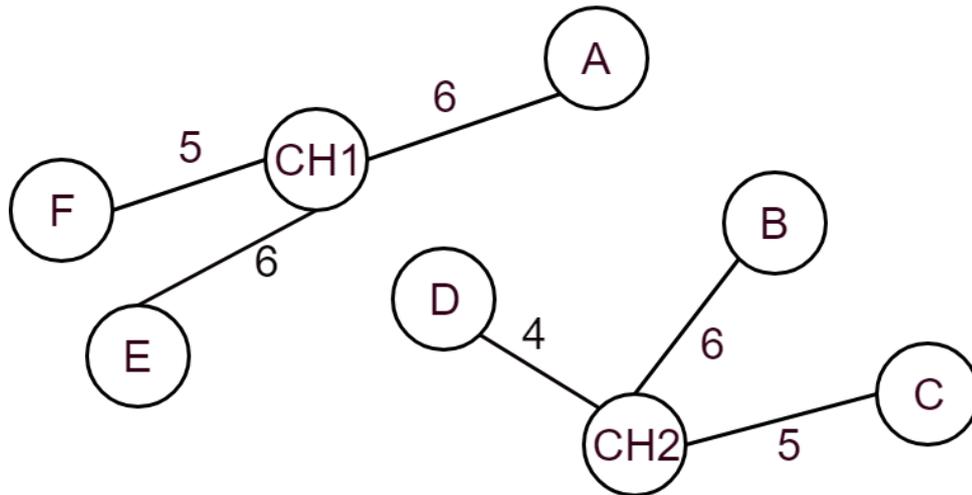


Figura 32: Alocação de nós ótima

Após escolhida a configuração da rede é rodado um algoritmo de diminuição da potência. Como discutido no Capítulo 2, os nós possuem restrições de energia e por isso diminuir a potência dos nós sempre que possível é desejado. Na simulação foi utilizado o Transceptor IEEE 802.15.4 fabricado pela Texas Instrument, e foi setado nele alguns níveis de potência aceitáveis: -25, -15, -10, -7, -5, -3, -1, 0.

A diminuição da potência ocorre por meio da verificação da comunicação de um nó com o seu CH é escolhida a menor potência que garanta comunicação por mais de 99,7% do tempo (3σ).

5.2 Simulações

Foram utilizados 18.000 segundos nas condições descritas no capítulo 3. E analisados novamente PRRAPP e PRRMAC.

Os valores no gráfico da Figura 33 mostram uma melhora significativa na taxa de recepção de pacotes na camada de aplicação. As simulações 4 e 6 chegam próximas ao 100%.

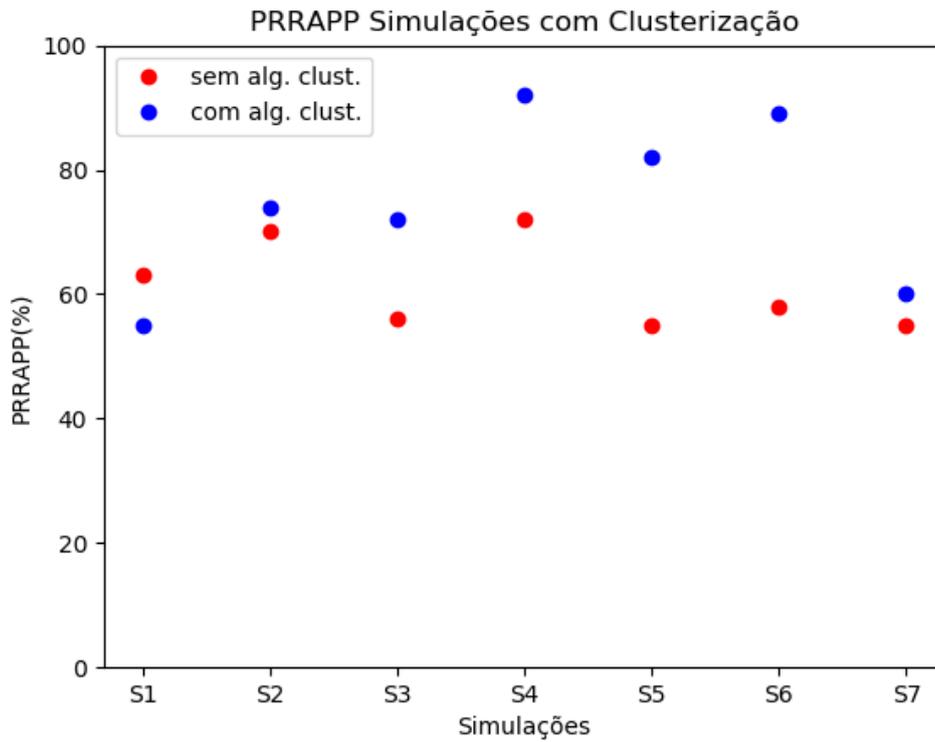


Figura 33: PRRAPP - Simulações com Clusterização

O gráfico da Figura 34 mostra o resultado para a taxa de recepção de pacotes na camada de acesso ao meio. Podemos notar que em alguns casos houve uma ligeira piora mas na maioria houve uma melhora significativa, principalmente as simulações S4, S5 e S6 onde a melhora na taxa de recepção foi de cerca de 17%.

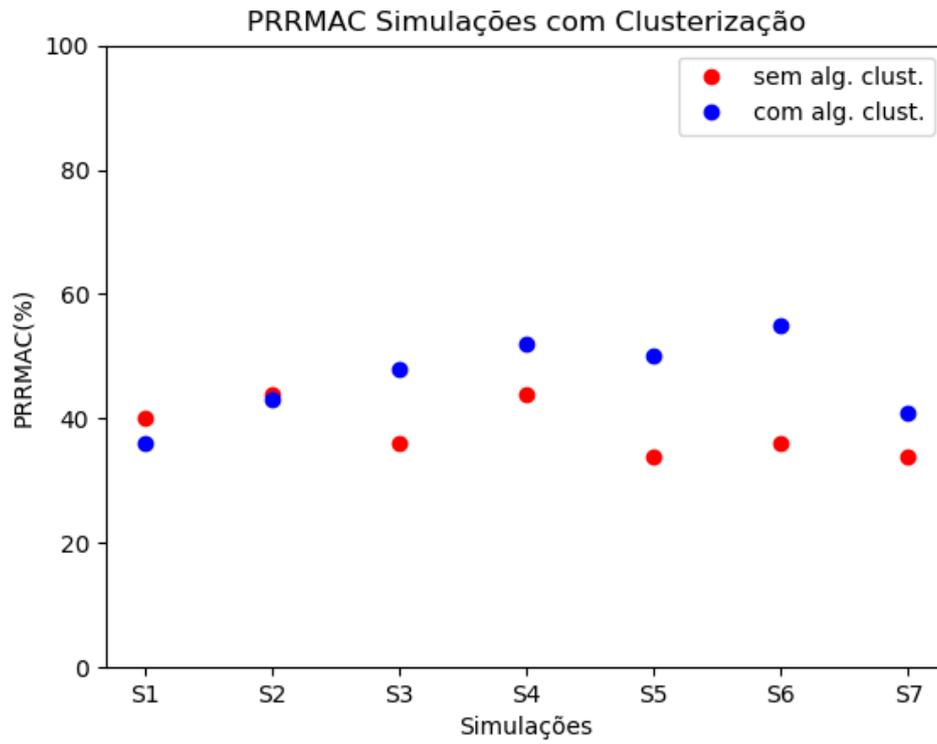


Figura 34: PRRMAC - Simulações com Clusterização

Abaixo podemos visualizar as topologias utilizadas nas simulações S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 respectivamente.

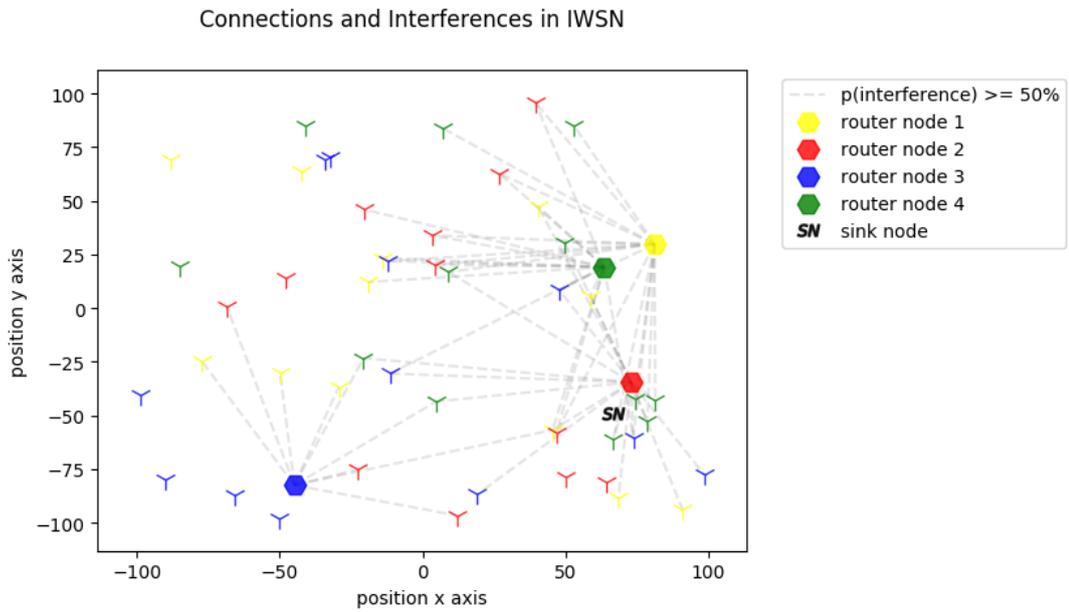


Figura 35: Simulação S1 - sem algoritmo

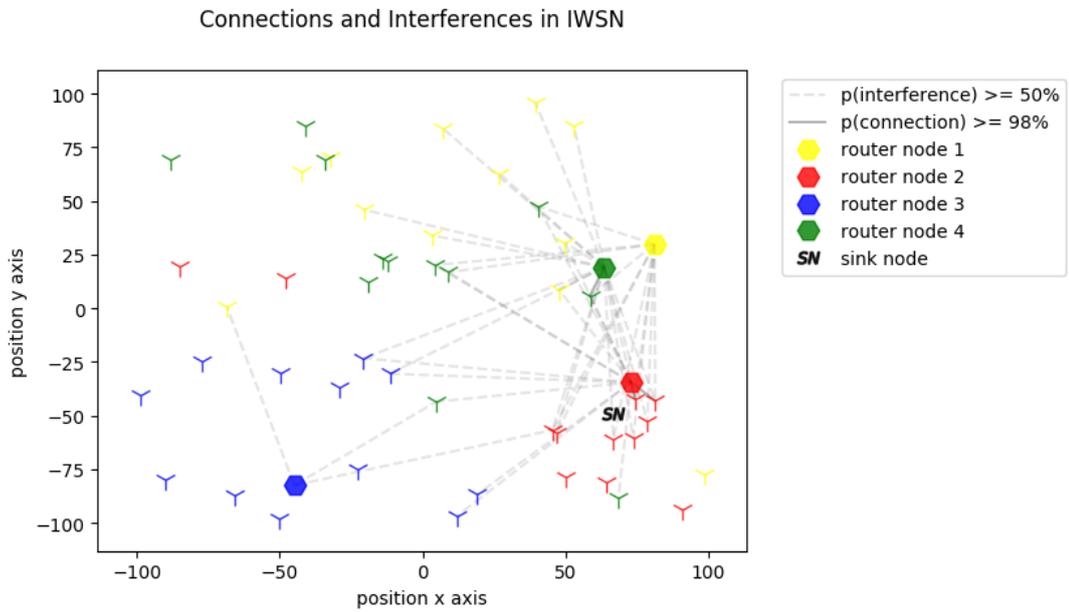


Figura 36: Simulação S1 - com algoritmo

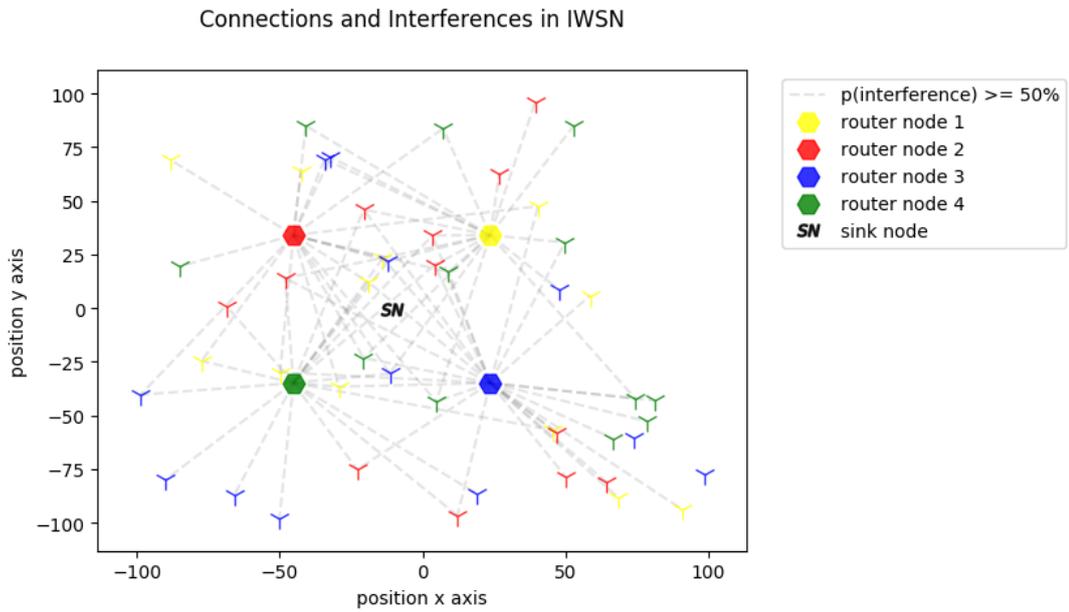


Figura 37: Simulação S2 - sem algoritmo

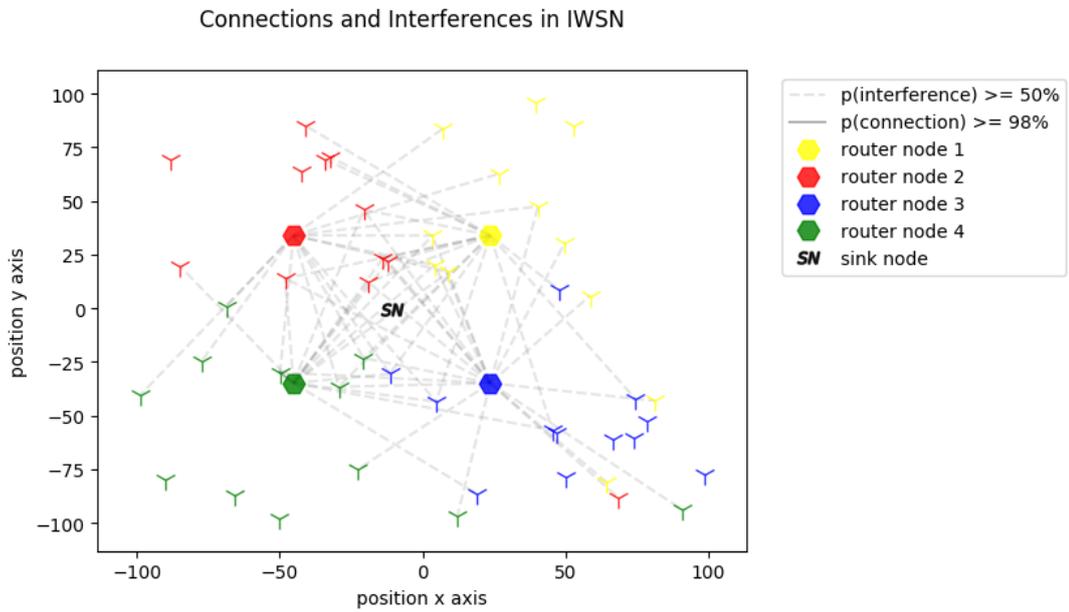


Figura 38: Simulação S2 - com algoritmo

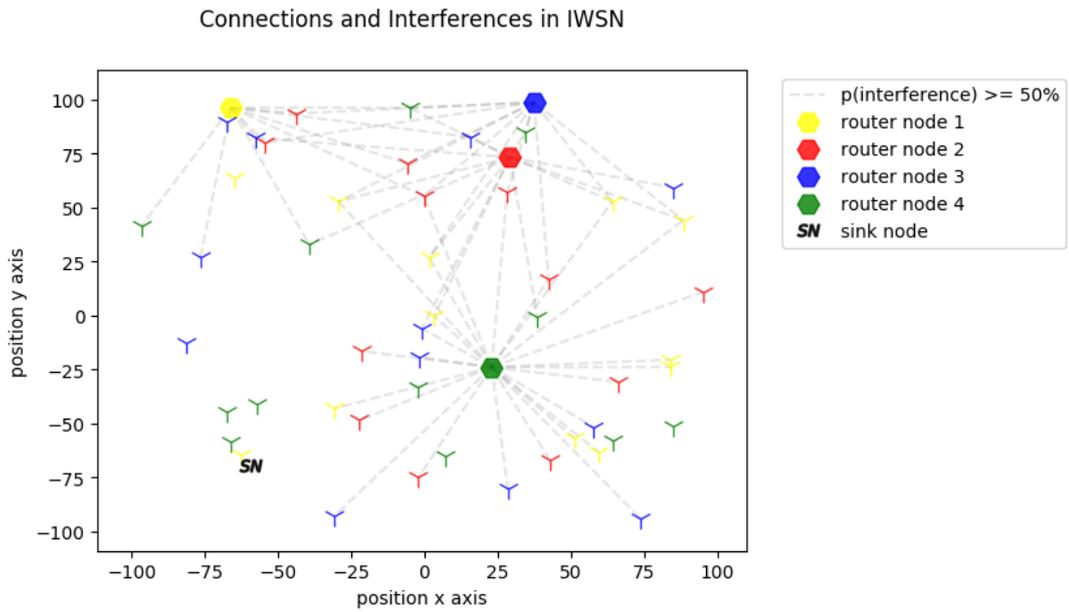


Figura 39: Simulação S3 - sem algoritmo

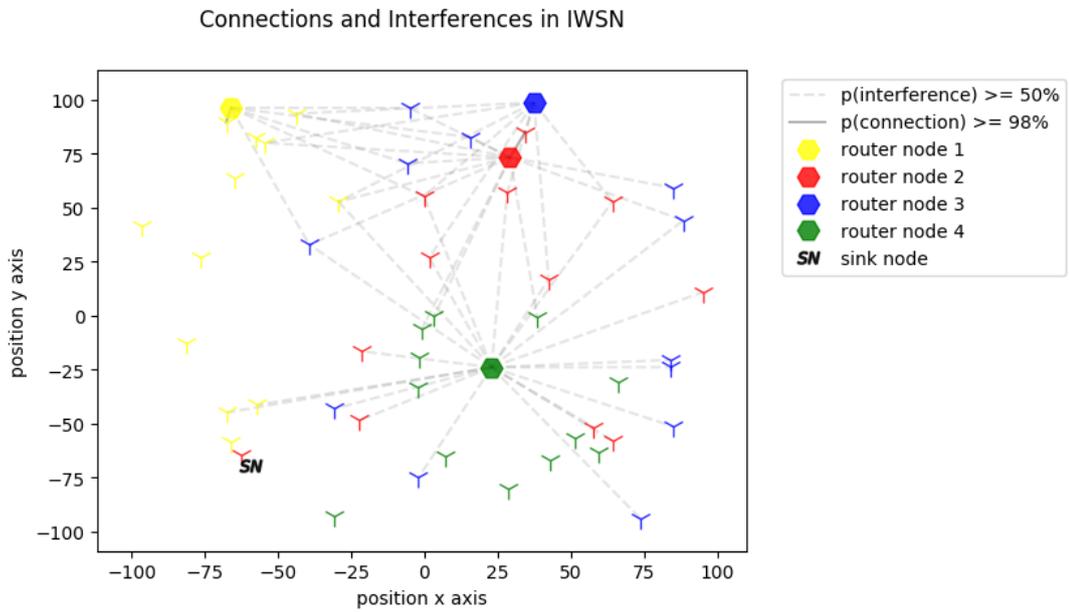


Figura 40: Simulação S3 - com algoritmo

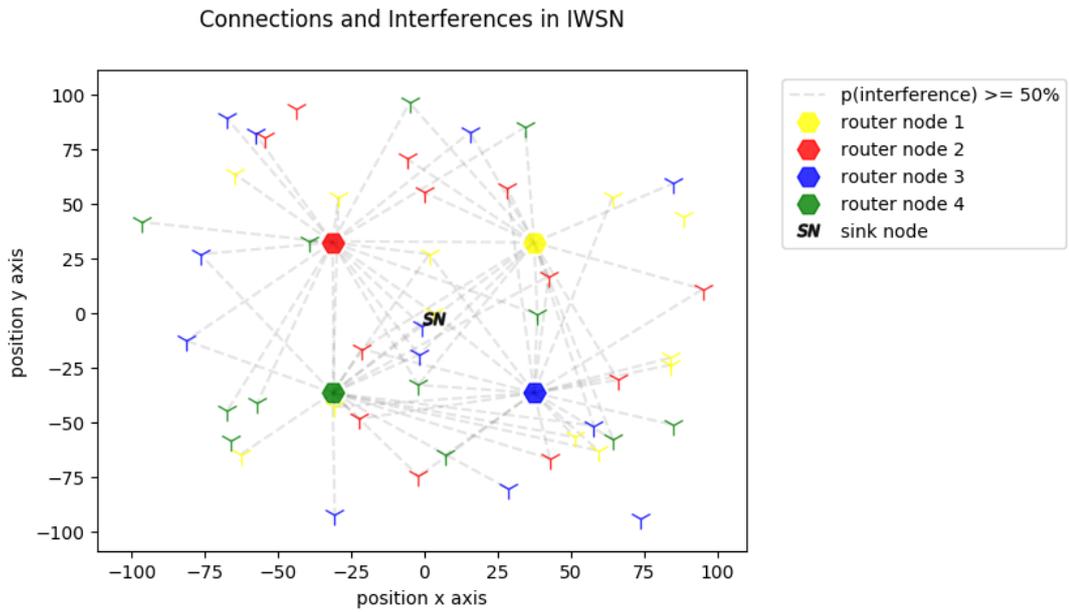


Figura 41: Simulação S4 - sem algoritmo

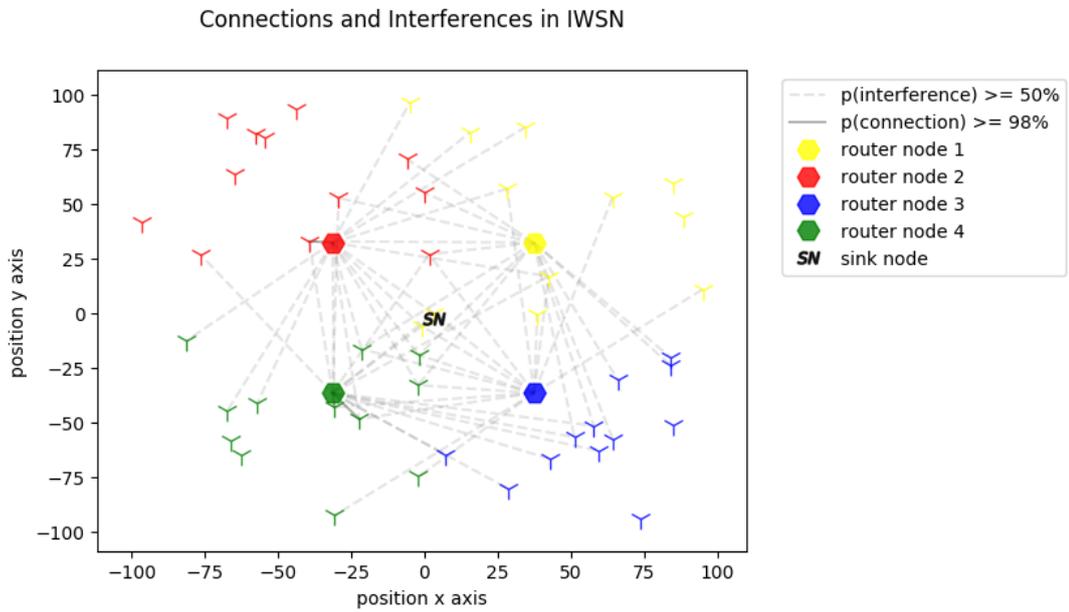


Figura 42: Simulação S4 - com algoritmo

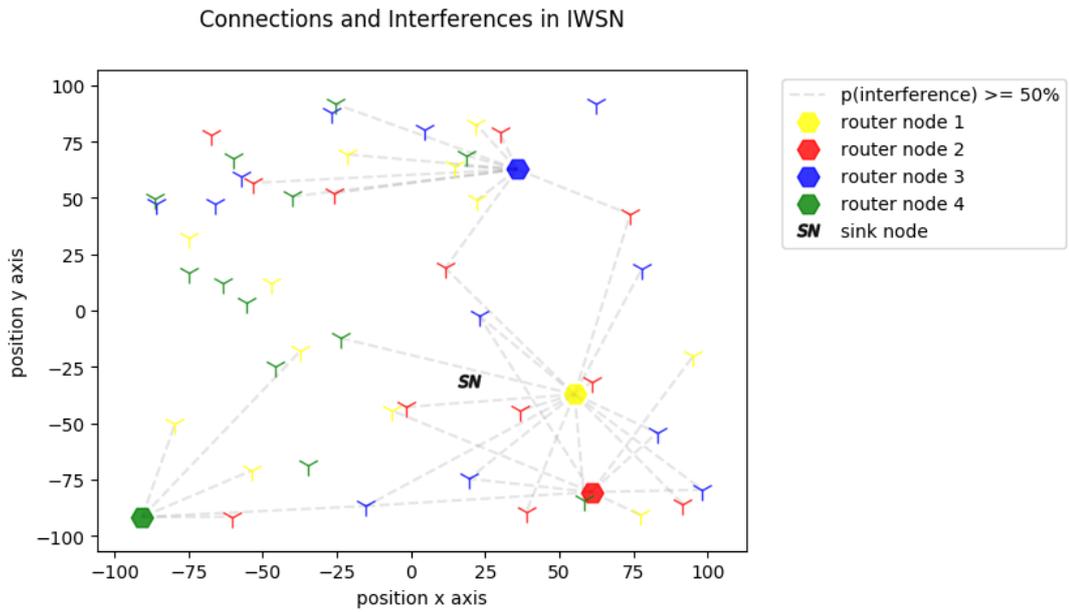


Figura 43: Simulação S5 - sem algoritmo

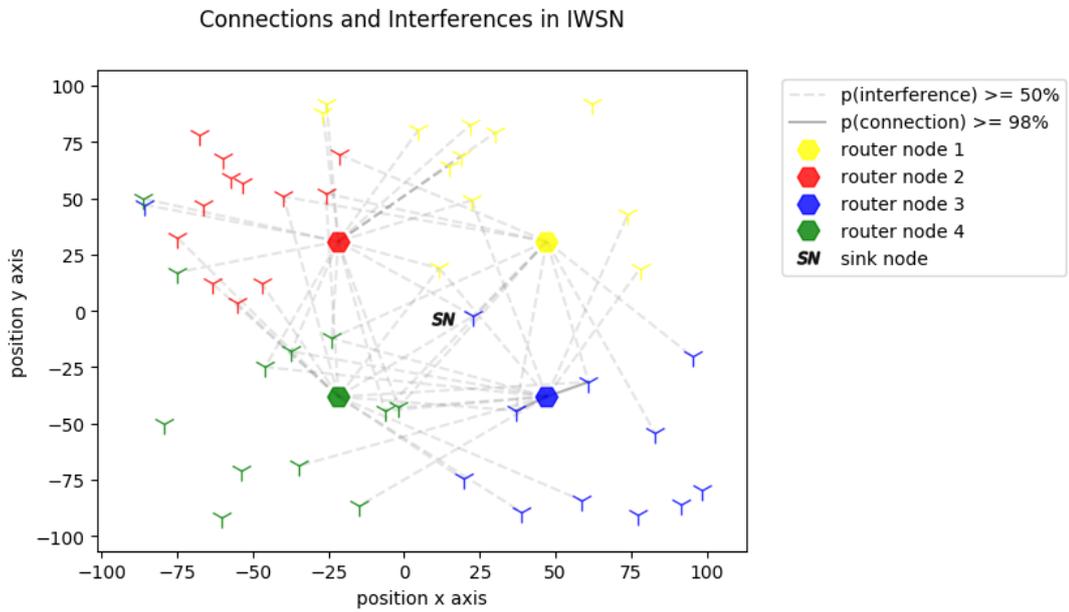


Figura 44: Simulação S5 - com algoritmo

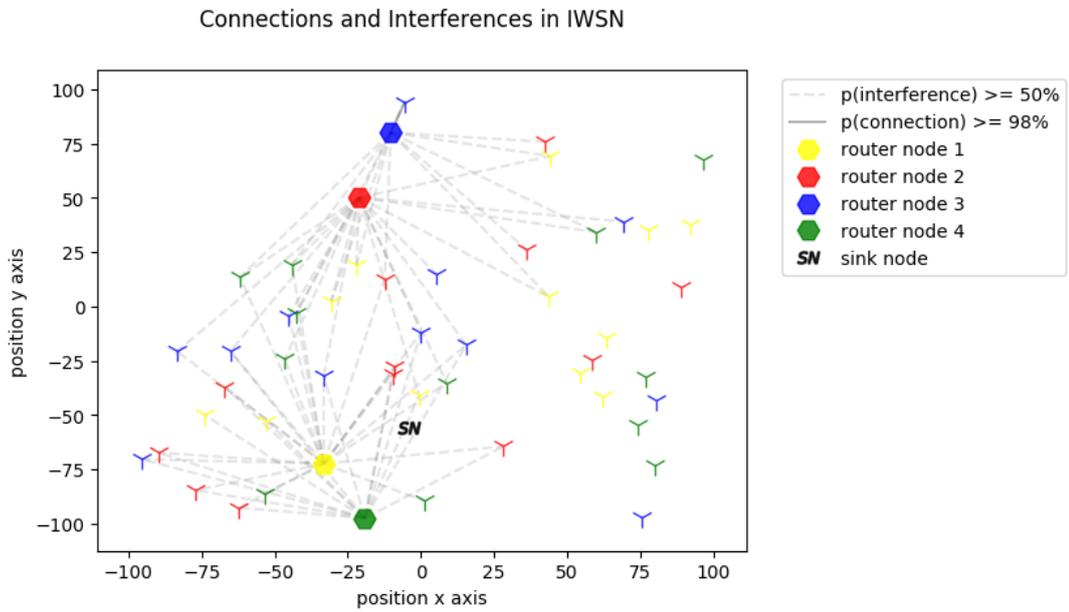


Figura 45: Simulação S6 - sem algoritmo

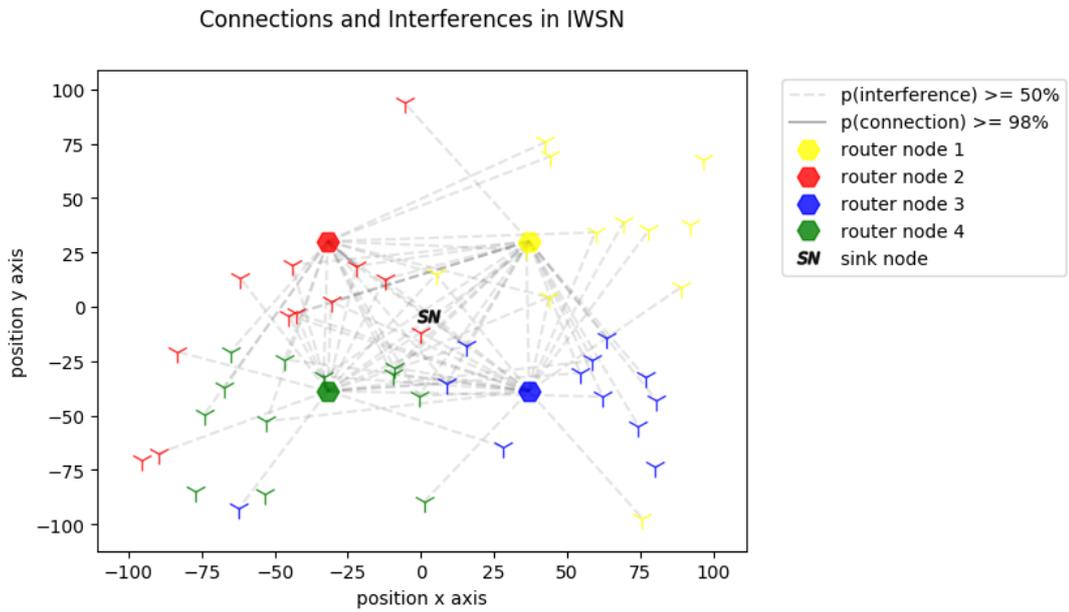


Figura 46: Simulação S6 - com algoritmo

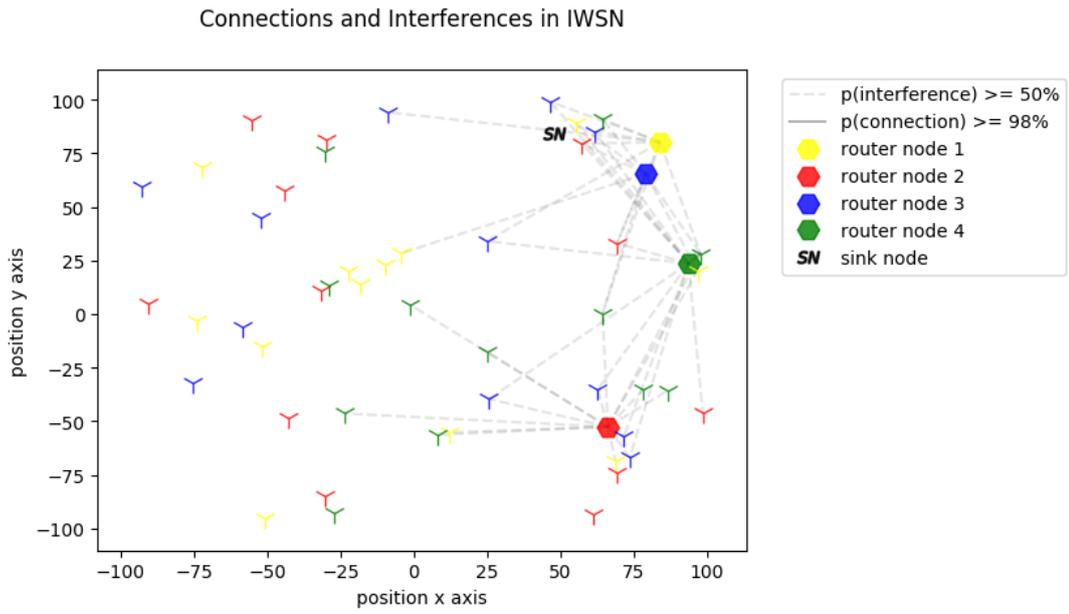


Figura 47: Simulação S7 - sem algoritmo

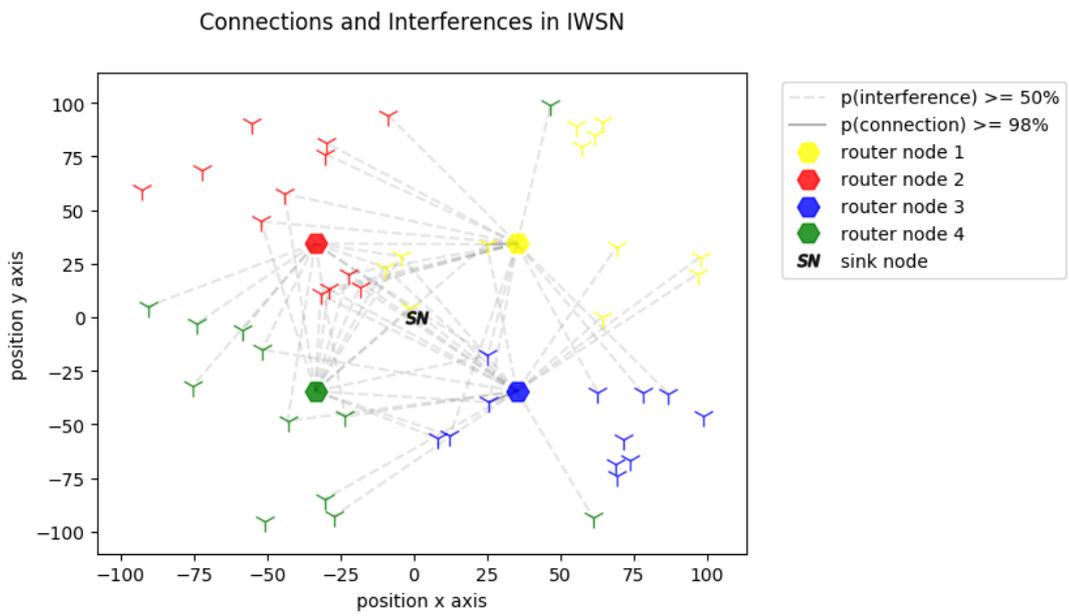


Figura 48: Simulação S7 - com algoritmo

6 ALOCAÇÃO E COMPARTILHAMENTO DE CANAL

6.1 Estratégia Utilizada

Foi criado um algoritmo de compartilhamento de canal. Objetivando reutilizar canais em diferentes sub redes, considerando a melhor alocação aquela que maximiza o número de canais utilizados em cada sub rede, além de buscar equalizar o número de nós por sub rede.

O algoritmo de alocação e compartilhamento de canais criado é de natureza gulosa, e utilizando os parâmetros de perda na distância e sombreamento log-normal calcula a probabilidade de haver interferência entre as sub redes sabendo as posições dos nós. Como o sombreamento depende de uma variável aleatória, a interferência é não determinística, ou seja, devemos calcular uma probabilidade de haver interferência, por isso, um limiar deve ser estabelecido.

Para esse algoritmo utilizamos o meio da distribuição lognormal - característica do sombreamento - como existência de interferência, isto é: se há mais de 50% de chance de interferir, então há interferência, uma medida conservadora.

Naturalmente, em uma rede conturbada como as RSSFIs a interferência é gigantesca. O valor do parâmetro de sombreamento adotado para admitir a existência de interferência tem grande influência, ver Figura 49. Para os valores do parâmetro de sombreamento foi variada apenas a constante multiplicadora utilizando a regra 50, 68, 95, 99.7 da distribuição normal.

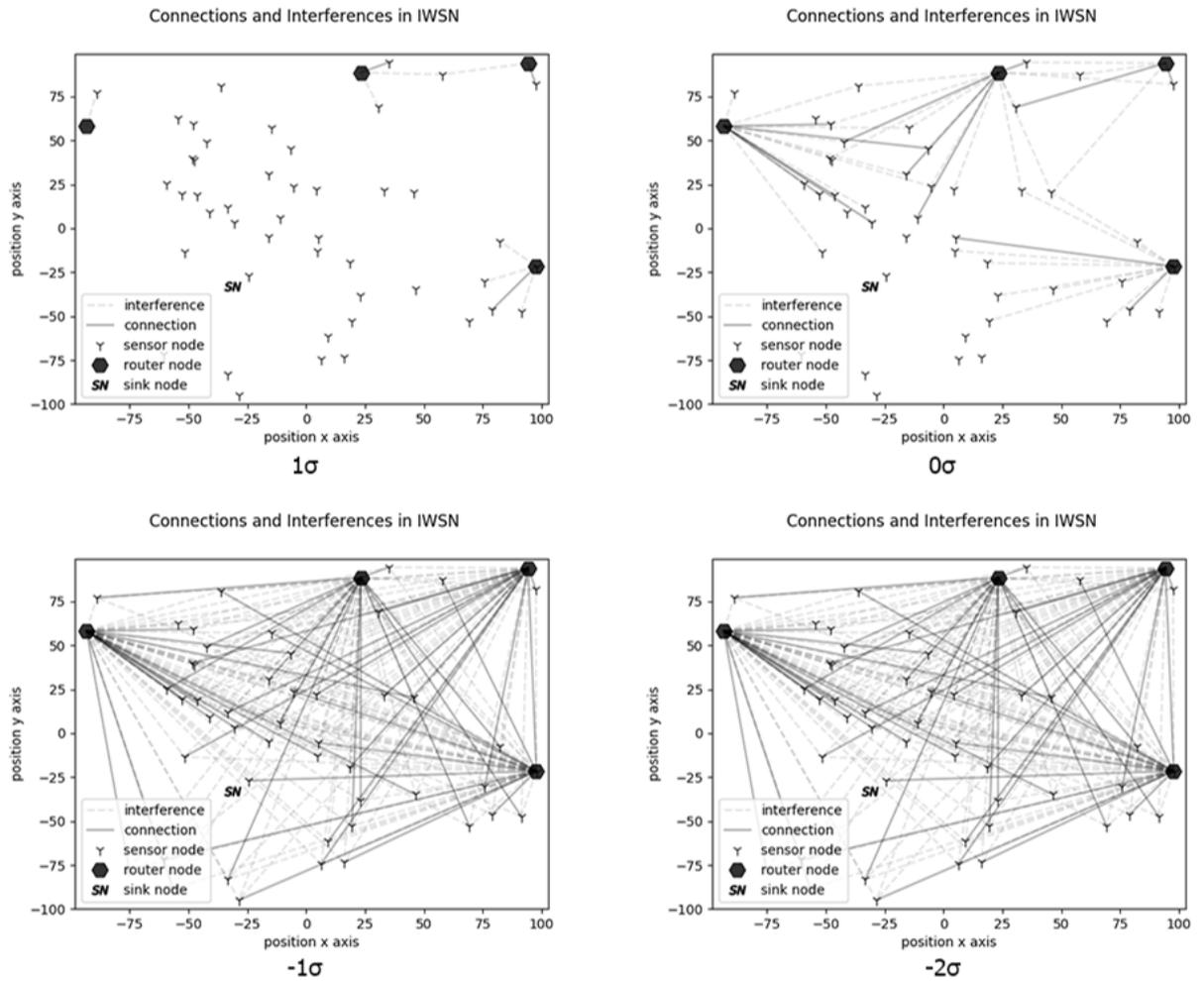


Figura 49: Topologia aleatória com 1σ , 0σ , -1σ e -2σ

Com o auxílio visual é fácil perceber o peso que a constante multiplicadora tem no alcance de um nó. Ficando claro também que para utilizar o algoritmo de alocação de canais com maior precisão precisamos ser menos conservador com o parâmetro de sombreamento. Um tradeoff claro: ganhamos mais canais, ganhamos mais interferência.

Outro parâmetro adotado para considerar a interferência entre sub-redes era basicamente:

Se 1 nó da sub-rede X interfere com o Cluster Head da sub-rede Y então as sub-redes X e Y estão em interferência.

Adotando esse parâmetro de sombreamento conservador aliado a essa regra de interferência entre sub-redes também conservadora se tornou impossível utilizar o algoritmo de alocação de canais para uma rede não planejada. Basta ver a Figura 50 onde dois nós causam interferência entre todas as sub-redes ou a Figura 51 onde há interferência quase de todos os nós para todos os outros nós.

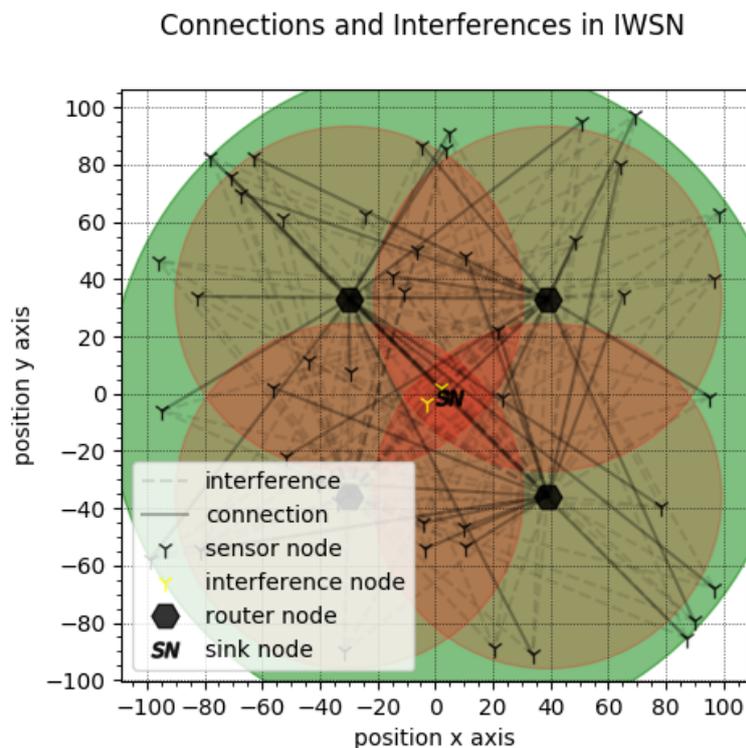


Figura 50: Nós causando interferência global

Connections and Interferences in IWSN

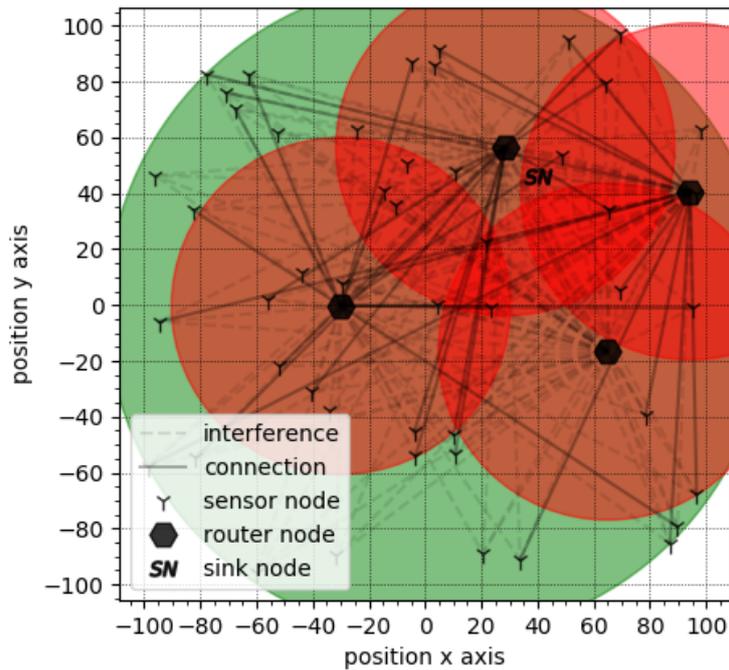


Figura 51: Alto grau de interferência entre sub redes

Para entender a importância do algoritmo de alocação de canais é necessário pensar em redes mais planejadas e em casos específicos de interferência entre sub-rede. Observe-mos o seguinte grafo de interferência

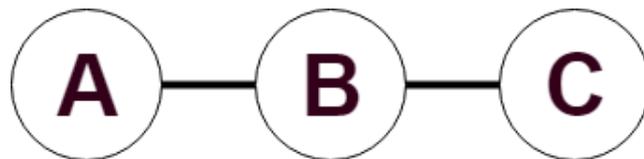


Figura 52: 3 subredes com 2 interferências

Podemos perceber pela Figura 52 que as sub redes A e B não podem compartilhar o mesmo canal de comunicação, pois interferem entre si, o mesmo ocorre com as sub redes B e C, entretanto A e C não interferem entre si e podem, portanto, compartilhar dos mesmos canais. Dessa forma da 5 canais para cada nó, se revela um desperdício da capacidade da rede uma vez que A e C não interferem entre si e por isso podem compartilhar canais.

Para executar esse algoritmo partimos das premissas:

- Se a sub rede A interfere com a sub rede B então elas não podem compartilhar o mesmo canal.
- Há um parâmetro de sombreamento adotado para calcular a existência ou não de interferência.

- Há canais disponíveis

Para diminuir as expressões utilizaremos o breve dicionário:

- ncd : número de canais disponíveis
- nc : número de canais
- $ncoi$: número de canais já ocupados com interferência
- $nsbrir$: número de sub-redes em interferência real (não conta interferências com nós que já possuem os canais alocados).
- $nsbri$: número de sub-redes em interferência
- $nsbric$: número de sub-redes em interferência já calculadas

Utilizamos as seguintes equações para simplificar a expressão:

- $ncd = nc - ncoi$
- $nsbrir = 1 + nsbri - nsbric$, isto é: número de sub-redes em interferência real = 1 + número de sub-redes em interferência - número de sub-redes em interferência já calculadas.

As etapas do algoritmo são:

1. Obter o grafo de interferência entre sub redes;
2. Obtemos o grau de cada nó;
3. Retiramos o nó com o maior número de conexão (maior grau), dessa forma caímos em uma instância menor do mesmo problema (raciocínio similar ao princípio da optamildade utilizado na programação dinâmica);
4. Para o nó retirado atribuímos a quantidade dada por $\text{floor}(\frac{ncd}{nsbrir})$ dos primeiros canais disponíveis, isto é, se a quantidade for 3 e os canais disponíveis forem: 5, 6, 9, 11, 12, então atribuímos 5, 6 e 9;
5. Diminuímos em 1 o grau de todos nós que possuíam conexão com o nó retirado;
6. Repetimos o passo 3 até não haver mais nós para serem retirados.

Vamos aplicar o algoritmo nos seguintes casos:

- Caso 1 (10 Canais Disponíveis):



Figura 53: Rede com 1 sub rede

Para o caso em que o nó tem grau 0, colocamos os canais disponíveis à disposição. Dessa forma atribuímos os 10 canais para o nó A.

- Caso 2 (12 Canais Disponíveis):

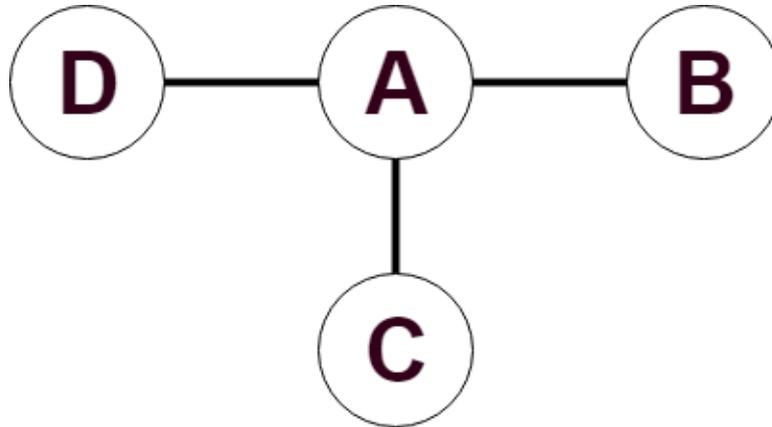


Figura 54: Rede com 4 sub redes e 3 interferências

Com esse caso temos os $grau[A, B, C, D] = [3, 1, 1, 1]$. Dessa forma começamos por A, calculamos $ncd = 12 - 0$ e $nsbrir = 1 + 3 - 0$ e atribuímos por tanto $floor(\frac{ncd}{nsbrir} = \frac{12}{4} = 3)$ canais para A, estando todos disponíveis A fica com os canais $[0,2]$. Diminuímos o grau de D, B e C ficando com $grau[B, C, D] = [0, 0, 0]$, portanto atribuímos os 9 canais restantes para B, C e D. Ou seja, B, C e D utilizam os canais $[3,11]$.

- Caso 3 (16 Canais Disponíveis):

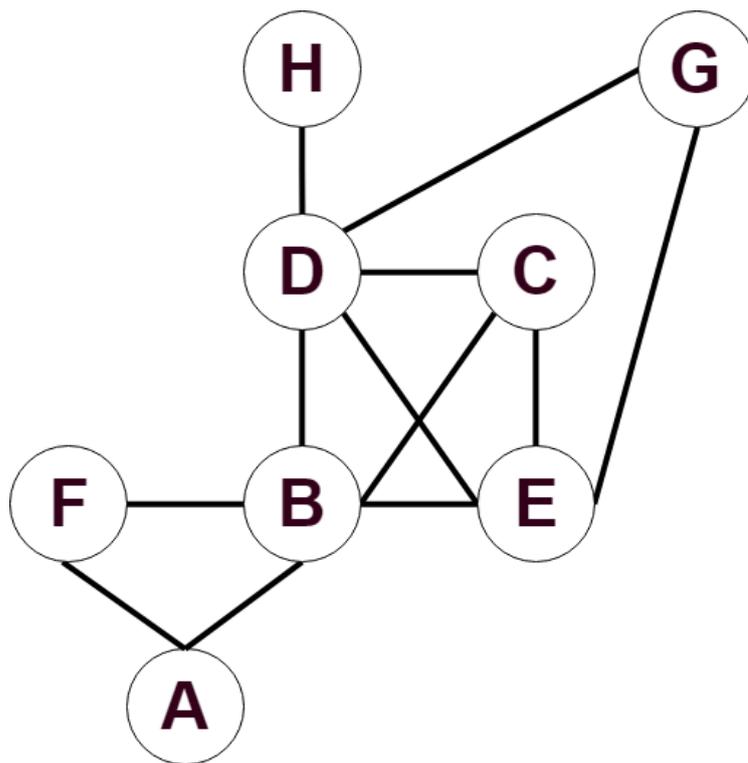


Figura 55: Rede com 8 sub redes e 12 interferências

Passando para um caso mais complexo, agora temos $grau[A, B, C, D, E, F, G, H] = [2, 5, 3, 5, 4, 2, 2, 1]$. Começando com D atribuímos $\frac{16}{6} = 2$ canais para D:[0, 1] (note 16 é o número total de canais e 6 é 1 + número de sub-redes em interferência com D) e diminuimos os graus de C, B, H, G, E. Ficamos com $grau[A, B, C, E, F, G, H] = [2, 4, 2, 3, 2, 1, 0]$. Atribuímos os canais restante para H:[2, 15]. Agora o nosso maior grau é B, atribuímos para ele $\frac{16-2}{1+5-1} = 2$ canais B:[2,3]. Os novos graus são $grau[A, C, E, F, G] = [1, 1, 2, 1, 1]$. Utilizamos E $\frac{12}{3} = 4$ E:[4,7], com o grau de C e G chegando a zero ficamos com C:[8,15] e G:([2,3]∪[8,15]). Agora $grau[A, F] = [1, 1]$, pegamos A $\frac{14}{2} = 7$ canais para A:([0,1]∪[4,8]) restando apenas F:[9,15].

Nesse algoritmo há uma tendência de ofertar mais canais quanto menor o grau de um nó, ou seja, quanto menor o nível de interferência desse nó, maior a quantidade de canais disponíveis na rede para esse nó. Tendência, pois depende também dos canais bloqueados pelos nós vizinhos. Por exemplo, no caso 3, apesar de F possuir o mesmo número de sub redes em interferência com G, F recebe 7 canais enquanto G recebe 10.

Essa tendência ocorre pois o número de canais que atribuímos é inversamente proporcional ao número de sub-redes em interferência real que tende a ser maior quanto maior o número de sub-redes em interferência (portanto, quanto maior o grau do nó).

6.2 Redes Planejadas

Para utilizar o algoritmo de alocação de canais nas simulações foi necessário gerar redes de modo a evitar interferências. Para isso foram criadas 3 topologias. A primeira não apresenta interferência nenhuma. A segunda possui interferência entre alguns pares. A terceira possui interferência entre todas as sub redes, entretanto, se aumentarmos o limiar para 60%, deixa de existir interferência entre as subredes 1 e 2, portanto a simulação 3 foi propositalmente um pouco menos conservadora.

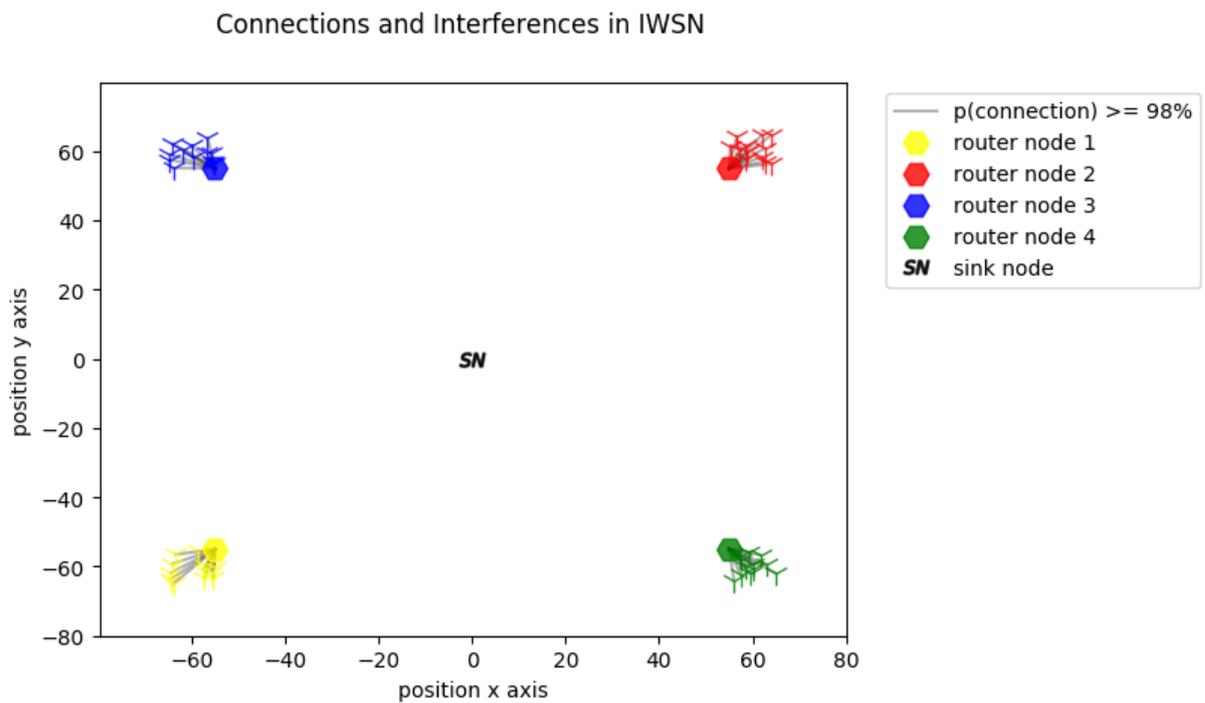


Figura 56: Primeira topologia planejada

Como não há interferência em 56, os 16 canais são utilizados por todas as 4 sub redes.

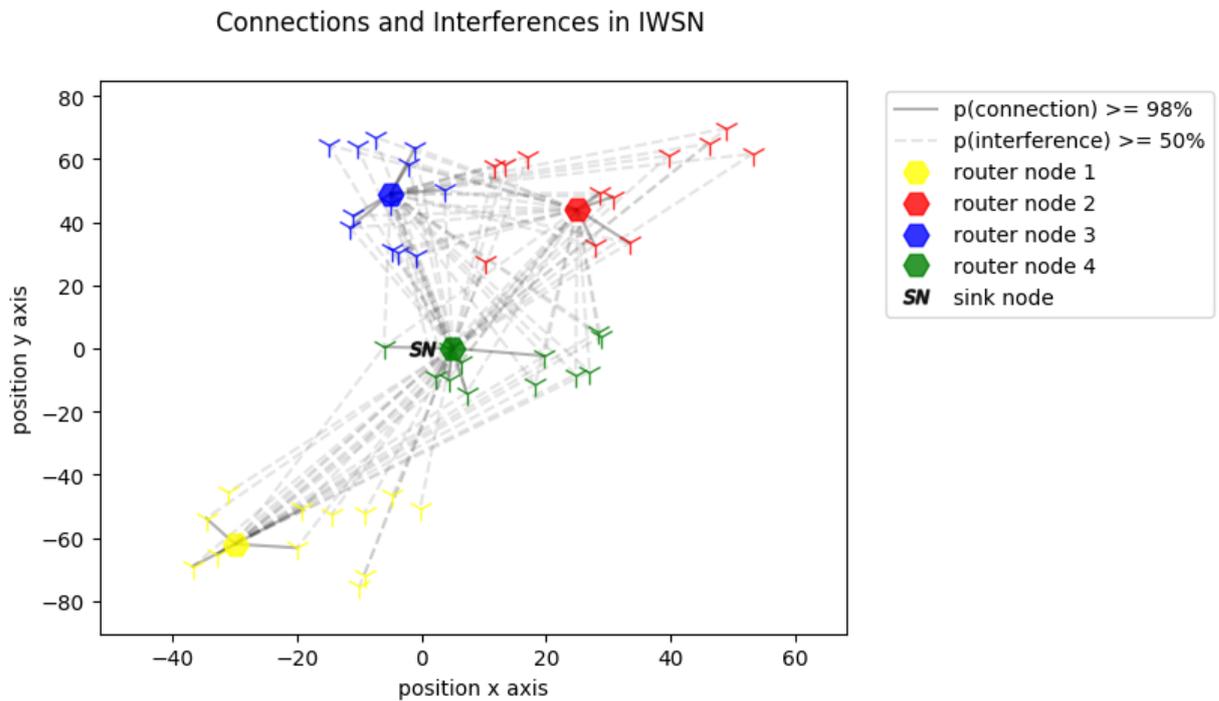


Figura 57: Segunda topologia planejada

Havendo interferência entre os pares de roteadores (1;4), (2;3), (2;4) (3;4) em 57. Utilizando o algoritmo de alocação de canais explorado na sessão anterior a sub rede 4 fica com 4 canais disponíveis, as sub redes 2 e 3 ficam 6 canais disponíveis cada e a sub rede 1 fica com 12 canais disponíveis.

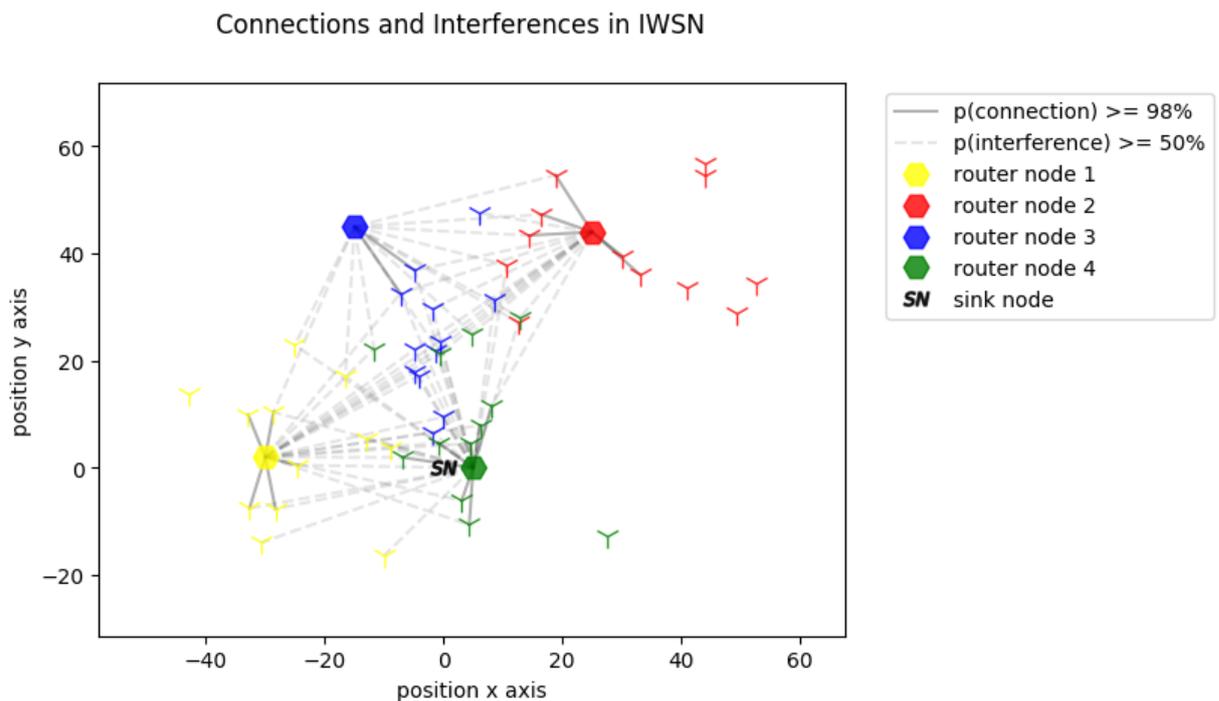


Figura 58: Terceira topologia planejada

Em 71 são consideradas interferência entre todos os pares excepto (1, 2). O algoritmo distribui, nesse caso, 4 canais para as sub redes 3 e 4 e 8 canais para as sub redes 2 e 1.

6.3 Simulações

Utilizando o algoritmo de alocação de canais o resultado foi inesperado. Não houve nenhuma mudança significativa em nenhum dos 5 parâmetros observados e listados na tabela 5. O resultado se encontra na tabela 6.

Tabela 5: Parâmetros observados na simulação.

PRRAPP	taxa de entrega de pacote na camada de aplicação
PRRMAC	taxa de entrega de pacote na camada MAC
RNP	número de tentativas de transmissão por pacote
RX	número de slots que o no ficou aguardando recepção de pacote
TX	número de slots em que o no transmitiu pacote

Tabela 6: Resultado da Simulação do Algoritmo de Alocação de Canais

		PRRAPP	PRRMAC	RNP	RX	TX
Planejada 1	sem alg.	0.9987	0.6226	1.0082	19723	18038
	com alg.	0.9883	0.6485	1.0446	19711	19459
Planejada 2	sem alg.	0.9986	0.6234	1.0040	19727	18090
	com alg.	0.9982	0.6252	1.0073	19725	18210
Planejada 3	sem alg.	0.9983	0.6230	1.0038	19726	18096
	com alg.	0.9883	0.6204	1.0164	19727	18561

6.4 Conclusão

Sob as condições citadas e utilizando o Simulador Castalia, o algoritmo de alocação de canais proposto teve efeito irrelevante nos parâmetros analisados.

7 RESULTADOS

7.1 Combinando os Algoritmos

Utilizando o algoritmo de posicionamento de nós coordenadores aliado com o algoritmo de alocação de nó por sub-rede foi observado um resultado melhor do que com eles isolados ou sem eles.

Podemos verificar o resultado para PRRAPP e PRRMAC nos gráficos nas figuras 59 e 60.

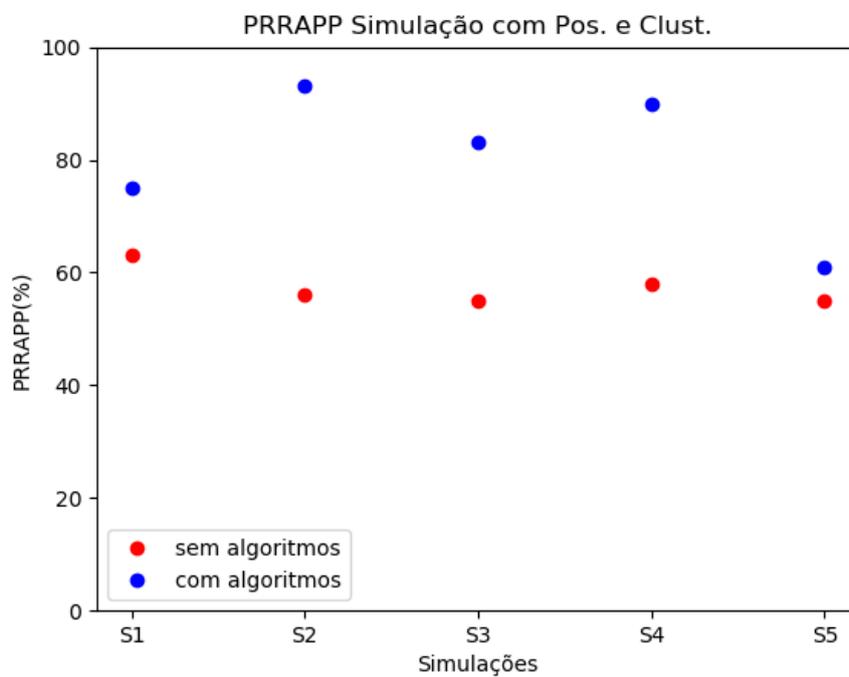


Figura 59: PRRAPP - Algoritmos combinados

Para o PRRAPP observamos uma melhora significativa, para as simulações 2 e 4 a melhora foi de 70% levando uma taxa de aceitação de cerca de 55% para cerca de 94%. Para a simulação 5 a melhora foi de cerca de 9% levando uma taxa de aceitação de cerca de 57% para cerca de 63%.

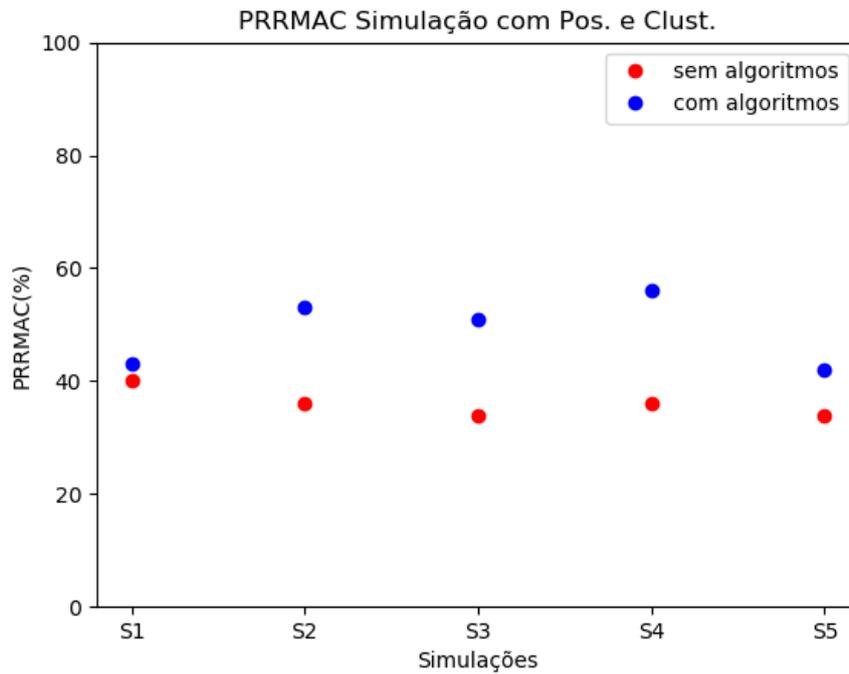


Figura 60: PRRMAC - Algoritmos combinados

Para o PRRMAC também observamos uma melhora significativa, para as simulações 2 e 4 a melhora foi de 55% levando uma taxa de aceitação de cerca de 36% para cerca de 56%. Para a simulação 1 a melhora foi de cerca de 7% levando uma taxa de aceitação de cerca de 40% para cerca de 43%.

Abaixo podemos visualizar as topologias utilizadas nas Simulações S1, S2, S3, S4 e S5 respectivamente.

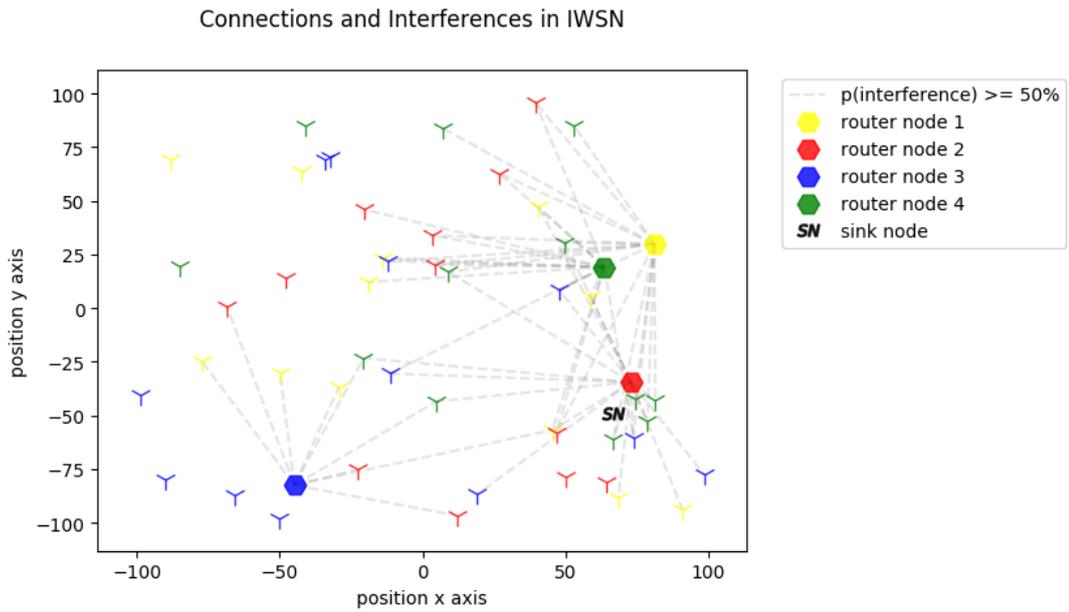


Figura 61: Simulação S1 - sem algoritmos

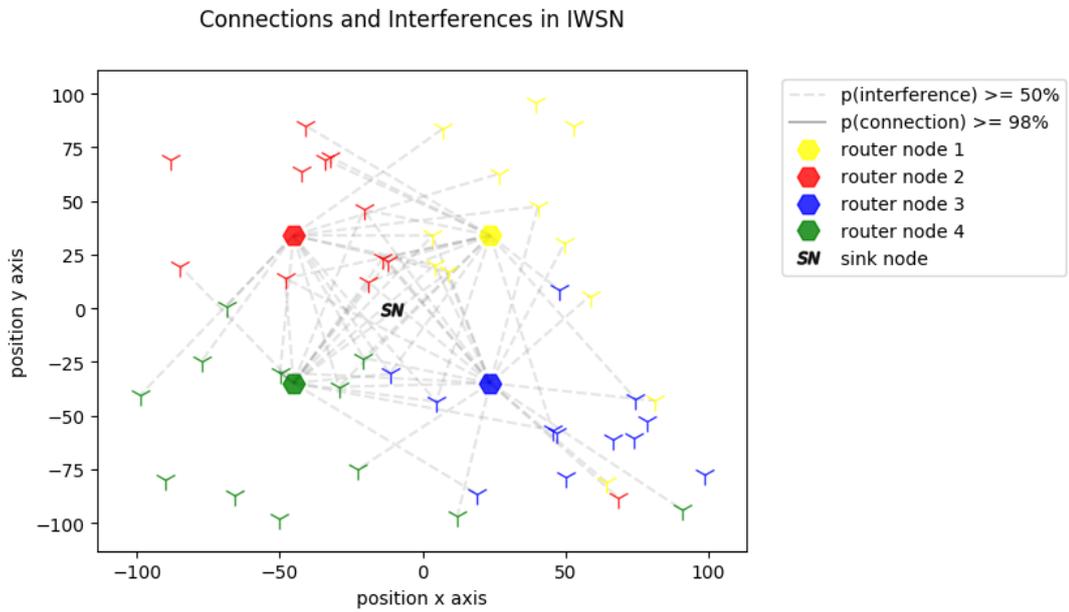


Figura 62: Simulação S1 - com algoritmos

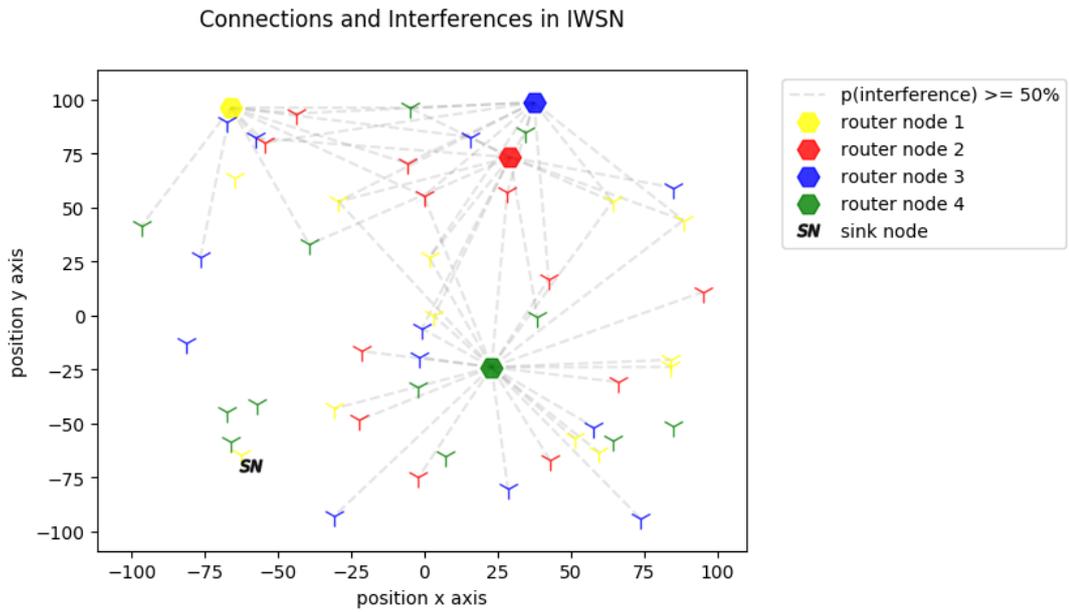


Figura 63: Simulação S2 - sem algoritmos

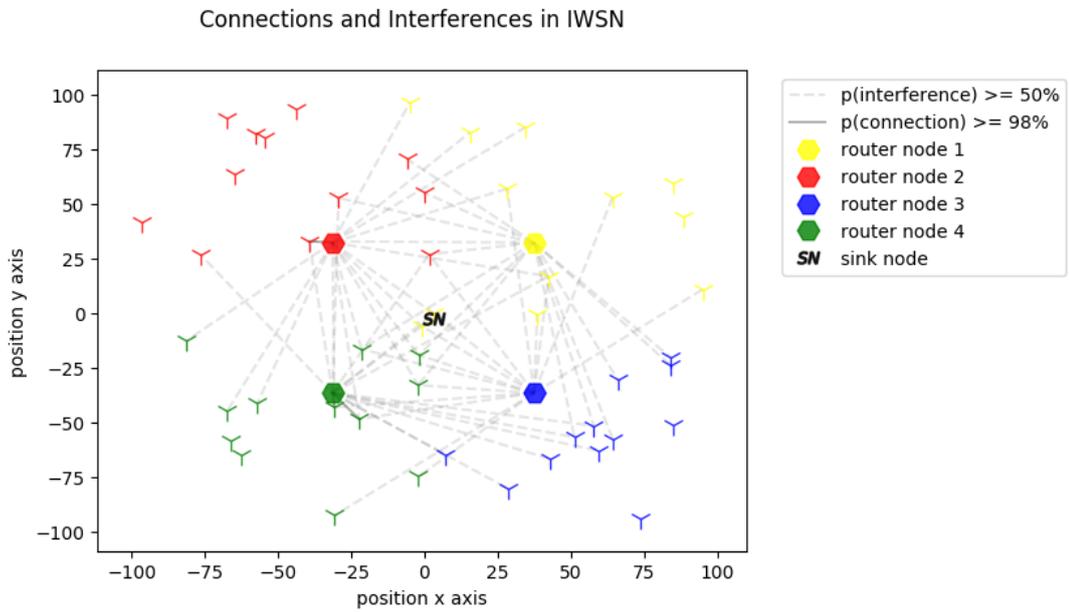


Figura 64: Simulação S2 - com algoritmos

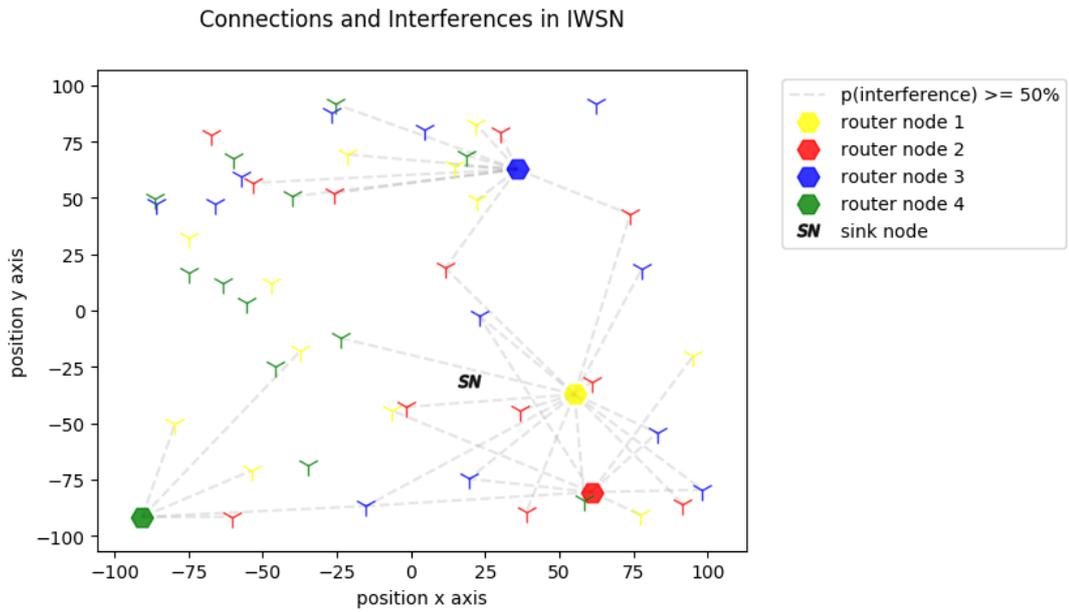


Figura 65: Simulação S3 - sem algoritmos

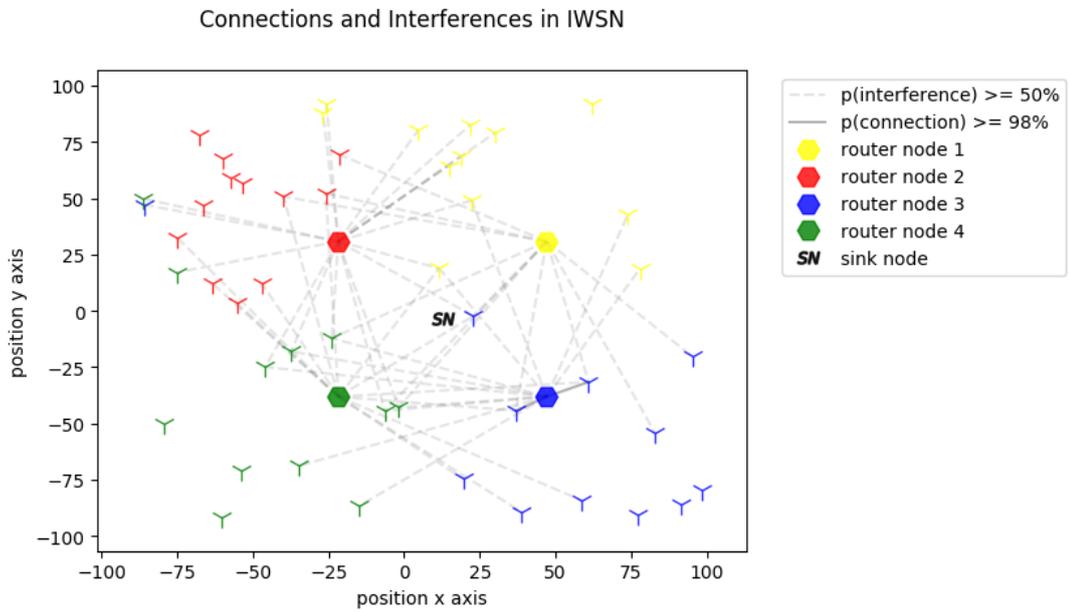


Figura 66: Simulação S3 - com algoritmo

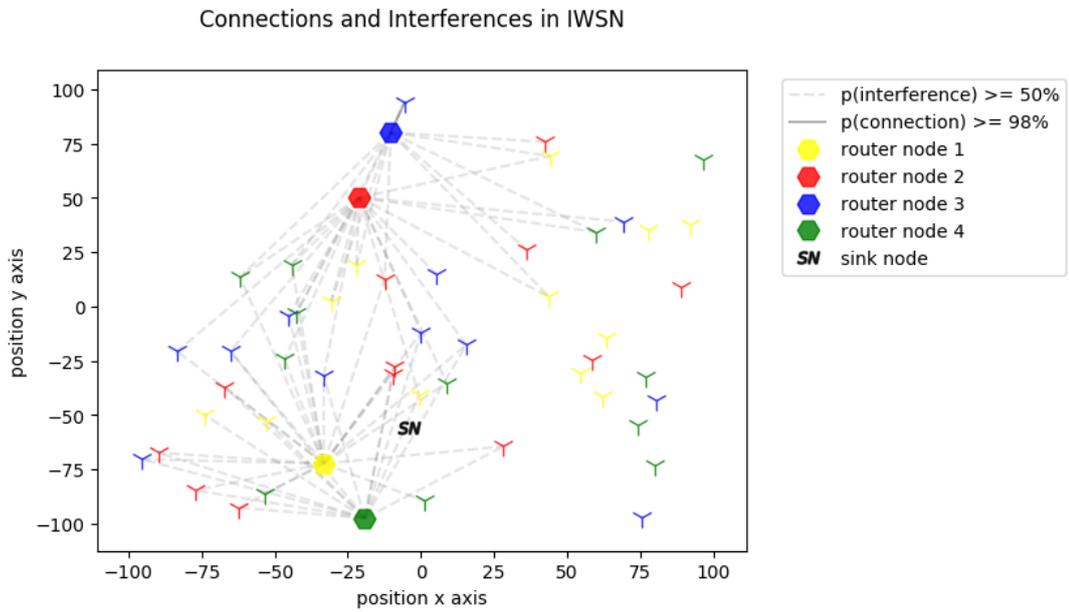


Figura 67: Simulação S4 - sem algoritmos

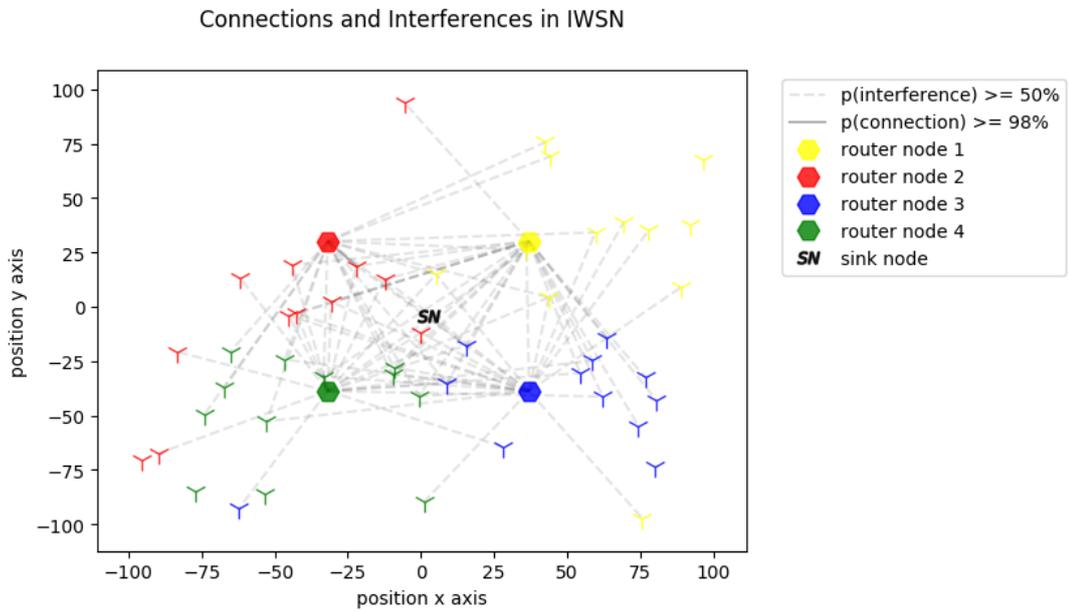


Figura 68: Simulação S4 - com algoritmos

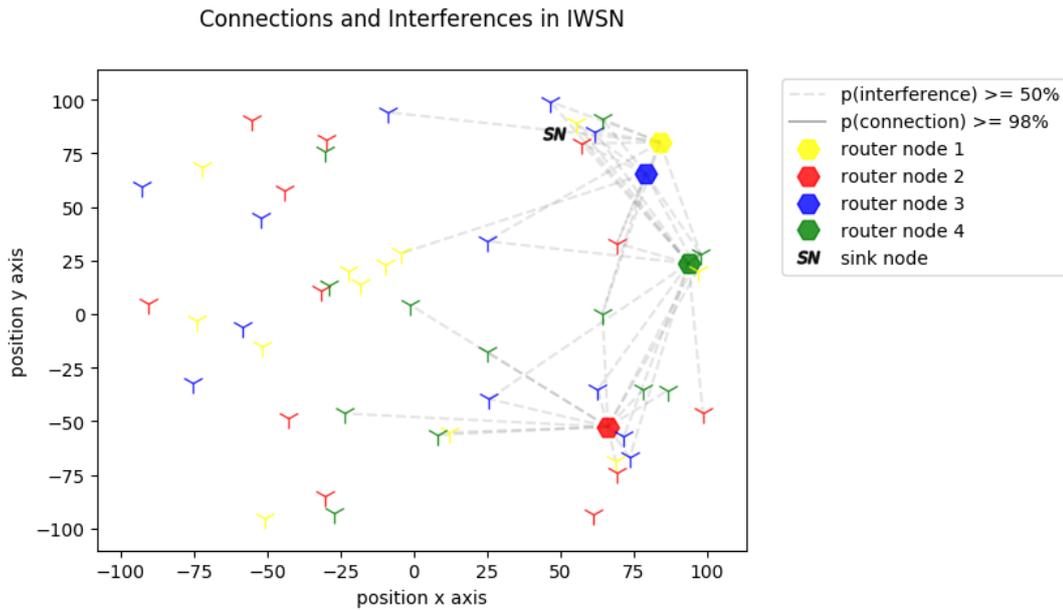


Figura 69: Simulação S5 - sem algoritmos

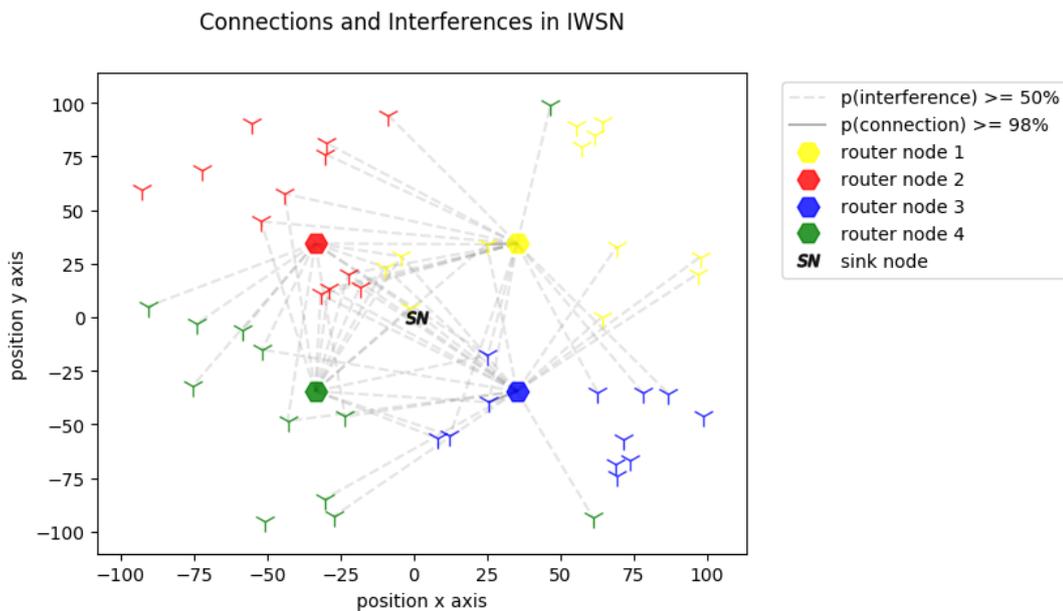


Figura 70: Simulação S5 - com algoritmos

7.2 Conclusão

Nesta monografia os desafios para a implantação de RSSFs em ambientes industriais foram apresentados. Bem como foram introduzidas mais simulações com a implementação de um novo protocolo e levando em consideração todos os aspectos que afetam o canal sem fio, como problemas de sombreamento, atenuação, variações espaciais na qualidade dos canais e o comportamento não estacionário do canal sem fio em longos períodos de tempo.

Utilizando o protocolo ABMPTREE foram simulados 3 algoritmos que buscam

melhorar o desempenho da rede e verificados os seus efeitos na taxa de aceitação de pacotes nas camadas de aplicação e acesso ao meio. O desempenho obtido pelos algoritmos de posicionamento e alocação de nós por coordenador foram muito bons se comparados a mesma rede sem eles. Dessa forma podem ser implementados tanto para uma rede já existente como pensados na etapa de planejamento de uma rede futura.

O algoritmo de alocação de canais não afetou o desempenho da RSSF. Mesmo compartilhando canais não houveram melhoras ou pioras significativas.

8 TRABALHOS FUTUROS

8.1 Alocando nó por Cluster Head: Outliers

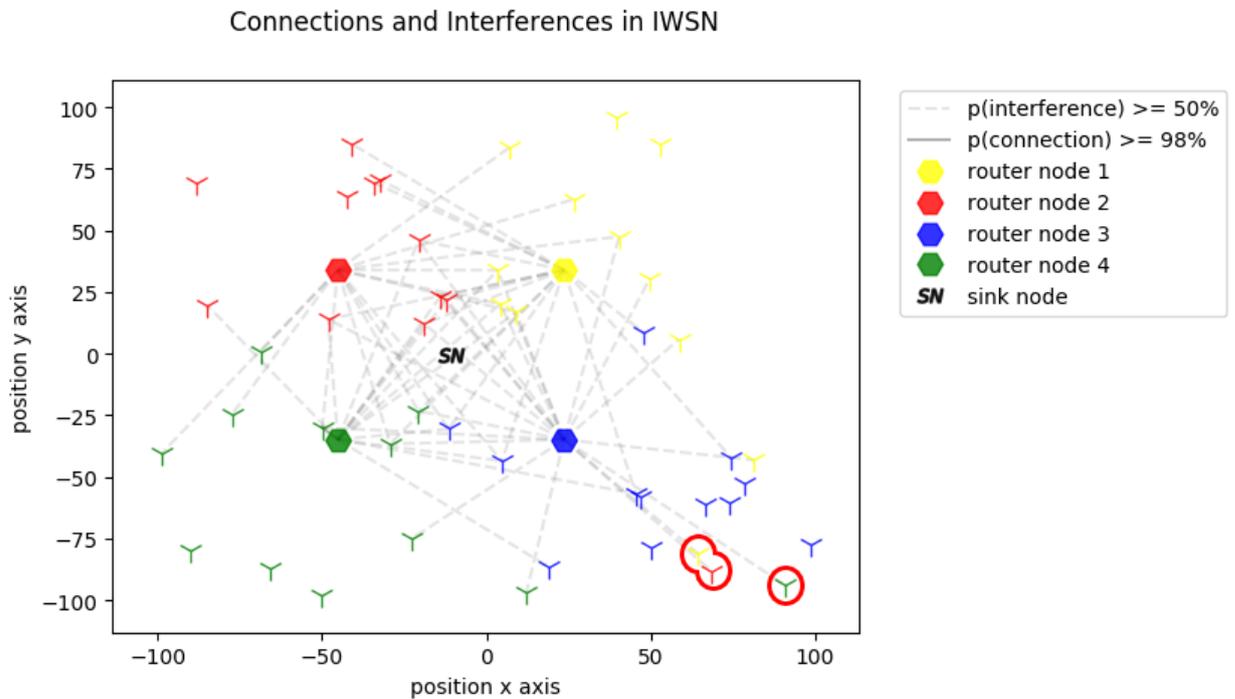


Figura 71: Outliers após algoritmo de distribuição de nó por Cluster Head

Como explicado no Capítulo 5 a natureza gulosa da alocação de nós acaba gerando outliers, isto é, nós más posicionados que acabam tendo a comunicação prejudicada, na Figura 71 verificamos que dos 48 nós há 3 nós mal alocados.

Como etapa posterior ao algoritmo de alocação de nós pode ser criado um algoritmo que identifique esses nós outliers e busque por trocas que melhore o desempenho total da rede, como na Figura 72.

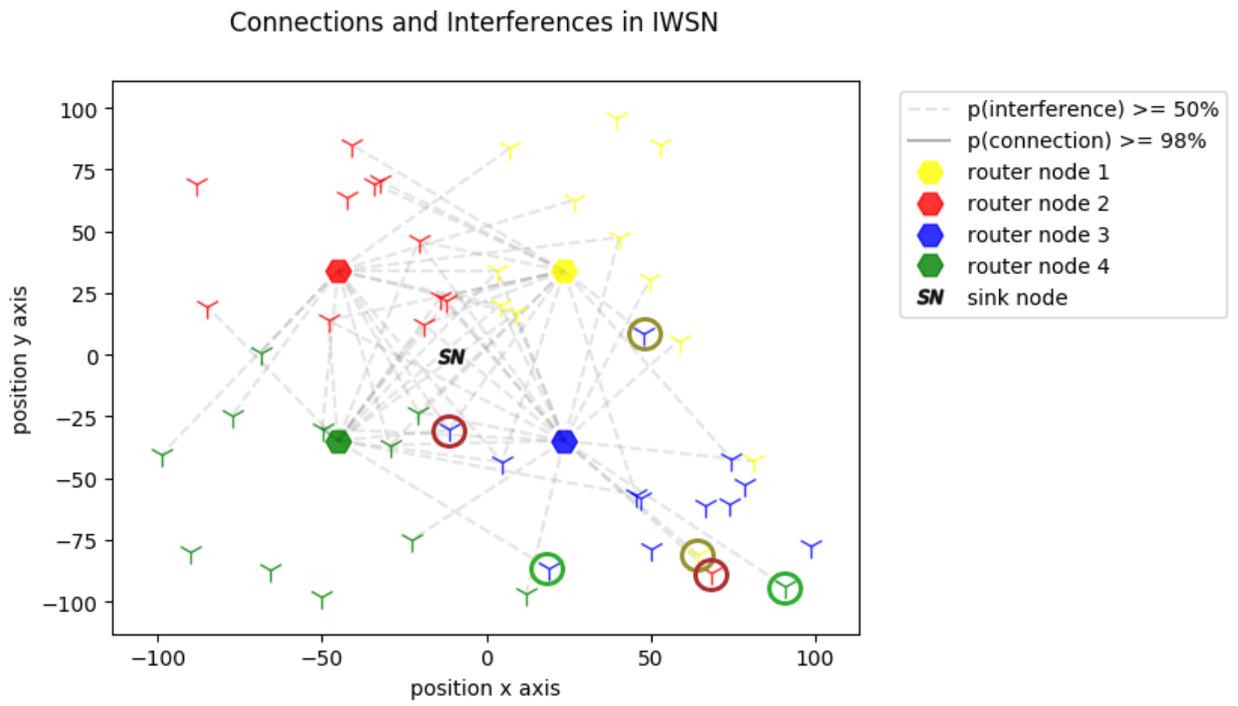


Figura 72: Trocas sugeridas para otimizar o desempenho da rede

REFERÊNCIAS

- [1] B. Lu and V. C. Gungor. "Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks". **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, vol.56, pp. 4651–4659, 2009.
- [2] GOMES, Ruan. **Estimação de Qualidade de Enlace e Alocação Dinâmica de Canais em Redes de Sensores sem Fio Industriais**. 2017. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.
- [3] KUROSE, Jim. **Computer Networking A Top-Down Approach 6th Edition**. Boston: Pearson, 2013.
- [4] NICTA. **Castalia A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks**. Athanassios Boulis, 2011.
- [5] WIKIPEDIA. 68–95–99.7 rule, ano. Disponível em: en.wikipedia.org/wiki/68-95-99.7_rule. Acesso em: 22 de Maio de 2018.
- [6] CATA CAPITAL. Indústria 4.0. Disponível em: <https://www.cartacapital.com.br/revista/978/industria-4.0>. Acesso em: 22 de Maio de 2018.
- [7] GOMES, Ruan and FONSECA, Iguatemi and SAMPAIO, Marcelo and QUEIROZ, Diego. **A Simulation Model for Industrial Multi-Channel Wireless Sensor Networks**. Journal of Communication and Information Systems.
- [8] GOMES, Ruan and FONSECA, Iguatemi and SAMPAIO, Marcelo and QUEIROZ, Diego.. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, vol.4, número 1, Julho de 2014.
- [9] GOMES, Ruan and FONSECA, Iguatemi and SAMPAIO, Marcelo and QUEIROZ, Diego.. Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, vol.5, número 2, Outubro de 2015.
- [10] Oliveira Adissi, Marcéu and Cavalcante Lima Filho, Abel and Gomes, Ruan and Montenegro Gomes de Brito Silva, Diógenes and Belo, Francisco. Implementation and Deployment of an Intelligent Industrial Wireless System for Induction Motor Monitoring. **Journal of Dynamic Systems Measurement and Control**, vol.139, Julho de 2017.
- [11] A. Lima-Filho, R. Gomes, M. Adissi, T. Borges da Silva, F. Belo and M. Spohn. Embedded System Integrated Into a Wireless Sensor Network for Online Dynamic

- Torque and Efficiency Monitoring in Induction Motors. **IEEE/ASME Trans. on Mechatronics**, vol.17, número 3, 2012.
- [12] R. Soua and P. Minet. **Multichannel Assignment Protocols in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey.** , vol. 16, pp. 2–21, 2015.
- [13] D. Incel. **A survey on Multi-Channel Communication in Wireless Sensor Networks.** Computer Networks, vol. 55, no. 13, pp. 3081–3099, 2011.
- [14] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. V. Herwegen and W. Vantomme. **The Industrial Indoor Channel: Large-Scale and Temporal Fading at 900, 2400, and 5200 MHz.** IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 7, pp. 2740–2751, 2008.
- [15] P. Stenumgaard, J. Chilo, P. Ferrer-Coll and P. Angskog. **Challenges and Conditions for Wireless Machine-to-Machine Communications in Industrial Environments.** IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 6, pp. 187–192, 2013.
- [16] J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo and P. Stenumgaard. **Characterisation of Highly Absorbent and Highly Reflective Radio Wave Propagation Environments in Industrial Applications.** IET communications, vol. 6, pp. 2404–2412, 2012.
- [17] M. Gürsu, M. Vilgelm, S. Zoppi and W. Kellerer. **Reliable Co-Existence of 802.15.4e TSCH-based WSN and Wi-Fi in an Aircraft Cabin.** In 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), pp. 663–668, May 2016