



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
CAMPUS DISTRITO INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO: TECNOLOGIA DE SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

RAMAN PIMENTEL ARAÚJO

REDES WI-FI MESH: uma revisão de literatura.

MANAUS – AM

2023

RAMAN PIMENTEL ARAÚJO

REDES WI-FI MESH: uma revisão de literatura.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal do
Amazonas como requisito para obtenção
do título de tecnólogo em Sistemas de
Telecomunicações.

Orientador: Prof. Esp. Celso Souza
Cordeiro

MANAUS – AM

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

| | |
|-------|---|
| A688r | <p>Araújo, Raman Pimentel. Redes Wi-Fi Mesh: uma revisão de literatura / Raman Pimentel Araújo. — Manaus, 2023. 34f.: il. (color.).</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, 2023. Orientador: Prof.º Celso Souza Cordeiro, Esp.</p> <p>1. Redes Mesh. 2. Wireless mesh. 3. Redes em malha. 4. Padrão IEEE 802.11s. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p> <p>CDD 621.382</p> |
|-------|---|

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734)

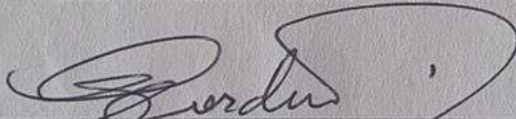
RAMAN PIMENTEL ARAÚJO

REDES WI-FI MESH: UMA REVISÃO DE LITERATURA

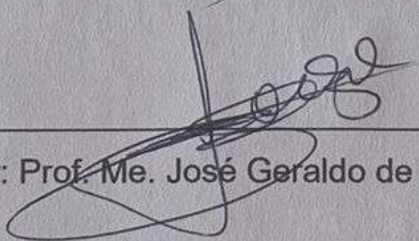
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial para obtenção do Título Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Aprovado em 02 de março de 2023.

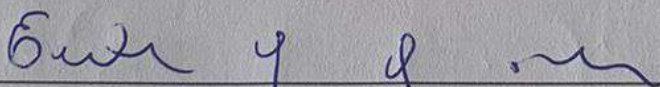
BANCA EXAMINADORA



Presidente-Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro.



1º Examinador: Prof. Me. José Geraldo de Pontes e Souza.



2º Examinador: Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho Ribeiro.

Manaus - AM

2023

Dedico esse trabalho de conclusão ao
meu filho tão esperado e amado Lucas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial a Deus por me conceder saúde frente a pandemia de 2020.

À minha esposa Fernanda por todo incentivo, orientação e paciência na jornada desta graduação. Também à nossa cadela Meg que passou tantas e tantas horas deitada em meus pés fazendo companhia durante as aulas remotas.

Agradeço também minha família pela base de formação educacional ao me prepararem para a sociedade.

Obrigado ao meu orientador, professores e colegas de curso do IFAM por toda troca de conhecimento e experiências durante esse período juntos.

RESUMO: A rede Wi-Fi mesh tem sido cada vez mais utilizada como uma solução eficiente para problemas de cobertura e desempenho em redes Wi-Fi tradicionais. Com a crescente demanda por conectividade sem fio em ambientes empresariais e residenciais, a tecnologia Wi-Fi Mesh apresenta-se como uma solução inovadora para expandir a cobertura da rede e melhorar a experiência do usuário. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar uma revisão de literatura sobre redes Wi-Fi *mesh*. Para isto realizou-se uma revisão de literatura sobre redes Wi-Fi *mesh* em bases de dados e publicações acadêmicas, teses, dissertações e capítulos de livros. Em conclusão, a tecnologia de redes Wi-Fi Mesh é uma solução inovadora e eficiente para lidar com problemas de cobertura e desempenho em redes Wi-Fi tradicionais. Com a capacidade de expandir a cobertura da rede sem comprometer a velocidade e a estabilidade da conexão, as redes Wi-Fi Mesh são especialmente úteis para ambientes com muitos dispositivos conectados e múltiplos pontos de acesso. Além disso, a configuração e o gerenciamento de uma rede Wi-Fi Mesh são relativamente simples e intuitivos, tornando essa tecnologia uma opção acessível para usuários domésticos e empresariais. Portanto, a tecnologia de redes Wi-Fi Mesh é uma solução valiosa e promissora para melhorar a conectividade e a experiência do usuário em ambientes Wi-Fi desafiadores.

Palavras-chave: redes mesh, wireless-mesh, redes em malha, padrão IEEE 802.11s.

ABSTRACT: Mesh Wi-Fi networking has been increasingly used as an efficient solution to coverage and performance issues in traditional Wi-Fi networks. With the growing demand for wireless connectivity in business and residential environments, Wi-Fi Mesh technology presents itself as an innovative solution to expand network coverage and improve the user experience. This course completion work aims to present a literature review on Wi-Fi mesh networks. For this, a literature review on Wi-Fi mesh networks was carried out in databases and academic publications, theses, dissertations and book chapters. In conclusion, Wi-Fi Mesh networking technology is an innovative and efficient solution to deal with coverage and performance issues in traditional Wi-Fi networks. With the ability to expand network coverage without compromising connection speed and stability, Wi-Fi Mesh networks are especially useful for environments with many connected devices and multiple access points. Additionally, setting up and managing a Wi-Fi Mesh network is relatively simple and intuitive, making this technology an affordable option for both home and business users. Therefore, Wi-Fi Mesh networking technology is a valuable and promising solution to improve connectivity and user experience in challenging Wi-Fi environments.

Keywords: mesh networks, wireless-mesh, mesh networks, IEEE 802.11s.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Rede sem fio infraestruturada | 19 |
| Figura 2 - Redes Ad-Hoc - Independent Basic Service Set | 20 |
| Figura 3 - Exemplo da arquitetura infraestrutura/backbone WMN | 24 |
| Figura 4 - Criação de um <i>peer link</i> entre nós mesh no IEEE 802.11s | 25 |
| Figura 5 - Representação do esquema de descoberta de rotas do modo sob demanda (<i>On-Demand Mode</i>) | 27 |
| Figura 6 - Representação do esquema de descoberta de rotas do modo Proativo (<i>Proactive Mode</i>) | 28 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV - Ad-Hoc On-Demand Distance Vector

AP – Access point

BATMAN - Better Approach To Mobile Adhoc Networking

BSA - Basic Service Area

CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance

CTS - Clear To Send

DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency

DS - Distribution System

EM – Estações móveis

ESS - Extend Service Set

HWMP - Hybrid Wireless Mesh Protocol

IBSS - Independent Basic Service Set

IEEE- Institute of Electrical and Electronics Engineers

MAC – Media Access control

MANET – Mobile ad-hoc network

MAP – Mesh Access Point

MBSS - Mesh Basic Service Set

MCE - Mesh Configuration Element

MP -Mesh Point

MPP – Mesh Portal Point

MPRs - Multipoint Relays

OLSR - Optimized Link State Routing

PERR - Path Error

PHY- Physical layer

PREP - Path Reply

PREQ - Path Request

RANN - Root Announcement

RTS - Request To Send

STA - Wireless LAN Station

TI – Information Technology

Wi-fi – Wireless Fidelity

WLAN – Wireless local network

WMN – Wireless mesh network

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 METODOLOGIA | 14 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 15 |
| 3.1 Redes Locais Sem Fio – Padrão IEEE 802.11 | 15 |
| 3.1.1 <i>Arquitetura 802.11</i> | 17 |
| 3.2 Redes Infraestruturadas | 18 |
| 3.3 Redes Ad Hoc | 19 |
| 3.4 Redes Wi-Fi <i>Mesh</i> | 21 |
| 3.4.1 <i>Arquitetura das redes Mesh no padrão IEEE 802.11s</i> | 23 |
| 3.4.2 <i>Descoberta de topologia mesh</i> | 24 |
| 3.4.3 <i>Protocolos de roteamento</i> | 25 |
| 3.4.3.1 <i>Sob demanda ou reativo</i> | 26 |
| 3.4.3.2 <i>Proativo</i> | 27 |
| 3.4.4 <i>Protocolo BATMAN</i> | 29 |
| 3.5 Cenários e aplicação da rede mesh | 30 |
| 3.5.1 <i>Residências e escritórios</i> | 30 |
| 3.5.2 <i>Indústrias</i> | 31 |
| 3.5.3 <i>Educação</i> | 32 |
| 3.5.4 <i>Saúde</i> | 32 |
| CONCLUSÃO | 34 |
| REFERÊNCIAS | 35 |

1 INTRODUÇÃO

O uso da rede sem fio está disponível hoje em diversos dispositivos, como notebooks, tablets e celulares usando tecnologias como Wi-fi (IEEE 802.11) e Bluetooth. Um atrativo para o uso dessas redes reside em seu baixo custo de implantação e na possibilidade de obter uma conexão de dados em qualquer ponto dentro de uma área de cobertura.

Atualmente, as redes locais sem fio costumam se organizar como redes infraestruturadas, em que uma estação base denominada ponto de acesso (AP – Access Point) encabeça um grupo de dispositivos, intermediando suas transmissões. Desta forma, para que dispositivos possam se comunicar pela rede sem fio devem primeiro se associar a algum AP. Assim, caso não exista um AP disponível, a comunicação não pode se efetuar.

No entanto outras possibilidades de organização existem, tais como redes ad hoc e redes Mesh. Uma rede Wi-Fi Mesh não necessita de um ponto de acesso para a comunicação entre dispositivos, pois por definição esses dispositivos podem se comunicar diretamente. Desta forma, cada dispositivo funciona como um roteador dentro da rede sem fio, encaminhando as informações vindas de seus vizinhos de forma cooperativa.

As redes Wi-Fi Mesh se caracterizam também pela capacidade de seus dispositivos se auto organizarem em caso de mudança da topologia, como devido à perda de um nó, quando então a rede estabelece novos caminhos. De forma análoga, devido à sua capacidade de auto-organização, a rede incorpora um novo nó Mesh de forma automática. Por fim, as redes Mesh possibilitam a comunicação por múltiplos saltos. Com isso estas redes apresentam desafios, tais como o desenvolvimento de protocolos de roteamento eficientes e também capazes de melhorar o aproveitamento do canal. A rede Wi-Fi Mesh possui diversas aplicações, entre elas citam-se redes domésticas, institucionais, industriais e metropolitanas.

Esse trabalho justifica-se pela necessidade de disseminar entre profissionais de telecomunicações, tecnologia de informação e áreas correlatas, material bibliográfico atualizado sobre redes *Wi-Fi Mesh* bem como sua arquitetura, protocolos e ainda disseminar informação para a sociedade em geral sobre a utilização e aplicação das redes *Wi-Fi Mesh* em diversos cenários como: uso doméstico, industrial, aplicações nos campos da saúde e educação.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para o entendimento e a difusão da tecnologia *Wi-Fi mesh*, auxiliando usuários, empresas e profissionais da área de redes de computadores na escolha e implementação de soluções de conectividade sem fio eficientes e confiáveis.

Considerando a necessidade de disseminar as informações e cenários de aplicação das redes *Wi-Fi mesh* na comunidade acadêmica e sociedade, evidencia-se o seguinte problema científico: qual a importância das redes *Wi-Fi mesh* e seus cenários de aplicação atual?

Neste contexto este trabalho tem como objetivo geral: apresentar uma revisão de literatura sobre redes *Wi-Fi mesh*. Deste objetivo decorrem três outros específicos, quais sejam: a) abordar sobre redes locais sem fio padrão IEEE 802.11 e IEEE 802.11s; b) descrever a arquitetura e os protocolos de rede *Wi-Fi mesh*; c) relatar os cenários de utilização e aplicação da rede *Wi-Fi mesh*.

2 METODOLOGIA

No presente trabalho foi realizada uma revisão de literatura enfocando as principais contribuições e publicações sobre redes Wi-Fi Mesh. Foram realizadas buscas a fim de identificar os estudos que mais se relacionaram ao assunto abordado. O critério utilizado para a seleção de estudos baseou-se na pesquisa de trabalhos dentro de quatro bases de dados (IEEE, ACM, Wiley e Springer), por terem uma grande cobertura e serem extensamente utilizadas para produção científica nas áreas de tecnologia, telecomunicações e ciência da computação.

Como estratégia de busca foram utilizadas as seguintes palavras chave: “mesh networks”, “wireless-mesh”, “IEEE 802.11s” e foi utilizado o string de busca: (*mesh networks* OR *redes mesh*) AND (*wireless-mesh*) AND (*IEEE 802.11s*).

Além das buscas realizadas em bases de dados, também foram feitas buscas em publicações de dissertações, teses, capítulos de livros disponíveis na biblioteca do Instituto Federal do Amazonas – IFAM. A seleção das referências foi realizada no período de agosto a outubro de 2022, quando se deu início a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

A seleção das referências foi realizada após leitura rápida de todo material selecionado a fim de verificar o interesse com o tema pesquisado. Em seguida foi realizada a leitura aprofundada dos artigos/livros e o registro das principais informações em todo o material pesquisado. Finalmente, as informações foram analisadas e discutidas e apresentadas em formato de referencial teórico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Redes Locais Sem Fio – Padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11, é definido por uma tecnologia de redes locais sem-fio (WLAN), conhecida como WiFi. Este padrão surgiu em 1990 por um grupo de pesquisa do *Institute of Electrical and Eletronics Engineers (IEEE)*, que criou padrões abertos que pudessem tornar a tecnologia sem fio cada vez mais realidade. Esta tecnologia ficou estagnada por sete anos por possuir baixa taxa de transferência de dados que esta tecnologia oferecia (na faixa de kbits/s). À medida que a taxa de transferência de dados atingiu a faixa de Mbits/s, esta rede começou a ser notada como uma tecnologia promissora e assim recebeu financiamentos para construção de equipamentos para comunicação sem fio entre computadores (ZHU et al., 2004; BULHMAN; CABIANCA, 2016).

Esse tipo de rede tem algumas características como: flexibilidade, por possuírem acesso a lugares onde a rede com fio não possui; facilidade na instalação, por não necessitar de cabeamento, utilizando melhor o espaço físico; sua topologia pode ser alterada facilmente, para atender algumas especificações, facilitando a expansão e tornando a manutenção reduzida e suporte à mobilidade do usuário dentro da área de cobertura sem perda da conexão (HIERTZ et al., 2010; BULHMAN; CABIANCA, 2016).

As redes sem fio também possuem desvantagens entre elas estão a dificuldade em atender requisitos de qualidade de serviço. Alguns fatores contribuem para isso como: maior sensibilidade a interferências causadas por outros equipamentos; taxa de transmissão baixa em comparação a rede cabeada e problemas de segurança, pois os dados podem ser interceptados mais facilmente através do uso de ondas de rádio. Embora tenham desvantagens, os benefícios citados superam os aspectos negativos, prova disso é a ampla disseminação de seu uso (BANERJI; CHOWDHURY, 2013).

As redes IEEE 802.11 são compostas por estações que se comunicam por um canal sem-fio. Usam o controle de acesso ao meio (MAC) do tipo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance), que nas redes cabeadas é utilizado para controlar as colisões, enquanto nas redes sem fio é utilizado para a tentativa de evitar colisões, devido ao uso do meio, que neste caso é o espaço. A

estação monitora a rede por um período de tempo para verificar se há transmissões, antes de tentar transmitir seus dados, para evitar colisões (BANERJI; CHOWDHURY, 2013).

Algumas ferramentas são utilizadas para tentar evitar colisões como RTS (Request To Send) e CTS (Clear To Send), antes da transmissão de quadro de dados. Isso acontece, pois, algumas estações não se enxergam mesmo estando ao alcance do mesmo AP. A estação que não escutar a transmissão de outra, irá receber o CTS transmitido pelo AP, para indicar que outra estação está transmitindo, evitando a transmissão durante este tempo. Durante o processo de escuta ao meio, se a estação verificar que este está livre para transmissão, a estação envia o RTS para o AP, que por sua vez, envia o CTS para as demais estações e inclusive para própria estação que solicitou, a qual inicia a troca de dados na rede (LEE; YEOM, 2009; BULHMAN; CABIANCA, 2016).

Desde a criação do padrão IEEE 802.11 praticamente nada foi alterado, porém houve aperfeiçoamento na camada física (PHY), que permitiu ampliação da capacidade de troca de dados com a criação das emendas IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n e 802.11s. Segundo Saade et al. (2008) as diferenças entre as principais emendas dos padrões da família IEEE são:

- A) 802.11a: atinge taxas de transferências de 54 Mbit/s, permitindo alta taxa de transmissão de dados. Trabalha em uma faixa de frequência de 5 GHz com 8 canais rádio;
- B) 802.11b: foi o primeiro a ter grande penetração no mercado, dando maior visibilidade as redes sem fio. Propões um débito teórico de 11 Mbit/s e trabalha na faixa de frequência de 2,4 GHz, com 3 canais rádio disponíveis;
- C) 802.11g: Oferece um elevado débito (54 Mbit/s teórico, 30 Mbit/s real) na banda de frequência dos 2.4 GHz. A norma 802.11g tem uma compatibilidade ascendente com a norma 802.11b, o que significa que materiais conformes à norma 802.11g podem funcionar em 802.11b;
- D) 802.11n: pode alcançar taxas de transferência de até 600 Mbit/s, contudo, os fabricantes produzem equipamentos que trabalham que operam a, no máximo, 450 Mbit/s;
- E) 802.11s: padrão utilizado nas redes mesh.

3.1.1 Arquitetura 802.11

A arquitetura das redes sem fio padrão IEEE 802.11 baseiam-se na divisão da área coberta pela rede em célula, essas são chamadas de BSA (*Basic Service Area* – Área básica de serviço). Conforme a característica de cada ambiente e com a sua configuração de cada transmissor e receptor, define-se o tamanho de cada BSA, assim, quanto maior potência, maior será a célula (BUDRI; BONILHA, 2013).

A topologia de uma rede WLAN IEEE 802.11 é composta pelos seguintes elementos:

- BSS (*Basic Service Set* – Conjunto básico de serviços), representa um grupo de estações que se comunicam por infravermelho ou radiofusão dentro de uma BSA;
- STA (*Wireless LAN Station* – Estações de Trabalho), representam as estações clientes presentes na rede;
- APs (*Access Point* – Ponto de acesso), são estações responsáveis por retransmitir de sua BSA a comunicação das STA para outras BSAs, através de um sistema de distribuição;
- DS (*Distribution System* – Sistema de distribuição), representa uma infraestrutura de comunicação responsável por interligar várias BSAs, permitindo a elaboração de redes que cobrem áreas superiores a uma célula;
- ESS (*Extend Service Set* – Conjunto de serviço estendido), representa um conjunto de estações formado pela junção de vários BSSs. Os APs de cada BSS estão conectados a uma mesma rede por um sistema de distribuição, sendo assim cada STA será capaz de se movimentar entre as células BSS e não será desconectado da rede. Este processo é chamado de *Roaming*.

O DS pode ser constituído por outra rede *wireless*, um *backbone* ou uma rede fixa e ter uma interconexão por meio de um gateway com qualquer rede local herdada fixa tipo IEEE 802.x ou Internet. O conjunto de diversos BSSs interligados pelo sistema de distribuição forma o chamado conjunto de serviços estendidos (ESS). Assim o sistema de distribuição (DS) não faz parte do escopo de padronização de WLANs do IEEE 802. 11 (ROCHOL, 2018).

Kurose (2007) define o modo de infraestrutura como sendo o modo como os hospedeiros estão associados à estação base onde todos os serviços tradicionais de rede (i.e. atribuição de endereço, roteamento, etc) são fornecidos pela rede com a qual estiver conectada por meio da estação-base. Diferente do modo de infraestrutura, no modo ad hoc os hospedeiros não dispõem de nenhuma infraestrutura conforme definido acima, dessa forma os próprios hospedeiros devem prover serviços como o roteamento e atribuição de endereço.

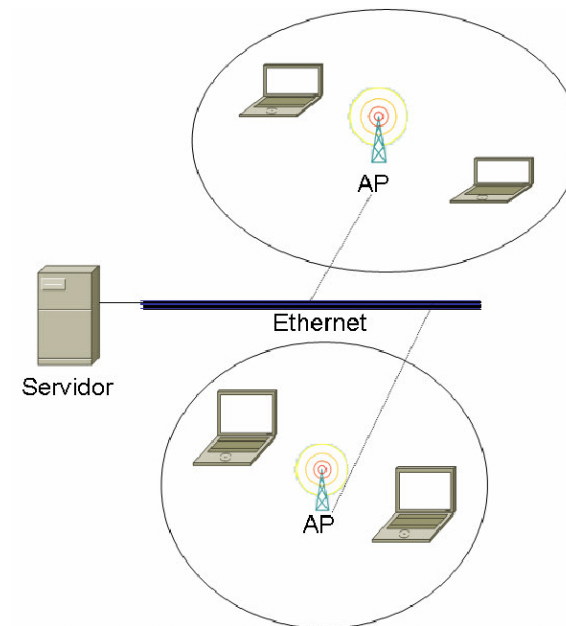
O padrão IEEE 802.11 pode se organizar em três tipos de topologia, são elas: redes infraestruturadas ou tipo *mesh* e as redes ad hoc ou MANET. A diferença principal entre elas são as frequências com que são transmitidos os dados dentro de uma rede (BULHMAN; CABIANCA, 2016).

3.2 Redes Infraestruturadas

A rede infraestruturada é bastante utilizada na instalação de redes sem fio em empresas e é composta basicamente de um ou mais Pontos de Acesso (AP) e vários dispositivos, Estações Móveis (EM) conectados a ele. Os APs são responsáveis pela conexão das EM com a rede fixa, cada ponto tem o controle de uma determinada Área de Cobertura BSA (Basic Set Area). A transferência de dados nessas redes, acontece sempre entre uma STA (*Wireless LAN Station* – Estações de Trabalho) e um AP. A transferência de dados nunca ocorre diretamente entre duas estações, conforme pode ser visto na FIGURA 1. O AP também pode agir como uma ponte para outra rede (cabeadas ou sem fio) (BUDRI; BONILHA, 2013; REZENDE, 2014).

A principal desvantagem da rede sem fio infraestruturada, se comparada com as redes Ad-Hoc e Mesh, é que caso não existe AP disponível a comunicação entre os dispositivos não será efetuada. Como por exemplo em casos de desastres naturais (terremotos) que provoquem a destruição de toda a infraestrutura da rede ou de seus APs, essa rede fica inutilizada perdendo a flexibilidade que Redes sem Fio podem oferecer (BULHMAN; CABIANCA, 2016).

Figura 1- Rede sem fio infraestruturada.



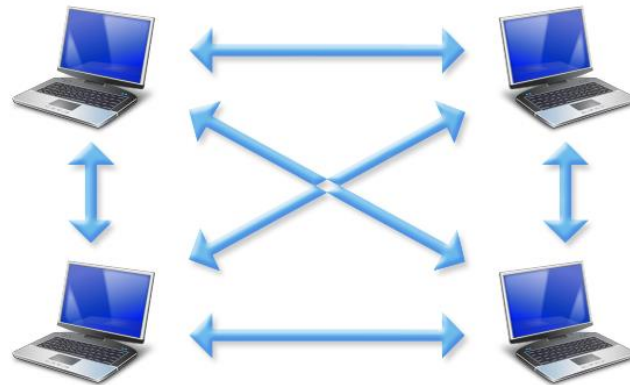
Fonte: (FELICE, 2005).

3.3 Redes Ad Hoc

A expressão Ad Hoc em latim significa “para este fim” e é utilizada para denominar situações que problemas são resolvidos de forma improvisada. Uma rede Ad Hoc permite que dispositivos móveis consigam formar uma rede em áreas sem infra-estrutura pré-definida de comunicações. Essa rede constitui um tipo de configuração de rede de dispositivos em que não existe um nó central para qual irão convergir todas as informações vindas de outros nós, portanto, não é necessário um dispositivo roteador central que faça comunicação da rede com outros pontos. Cada nó é independente das outras ligações da rede, de forma que, se uma ligação falhar, por falha no dispositivo ou perda de conexão, as outras continuam funcionando normalmente (GOLDSMITH, 2015).

O conjunto de estações que se comunicam a partir da rede Ad-Hoc recebe o nome de IBSS (Independent Basic Service Set), conforme mostra a figura a seguir:

Figura 2 - Redes Ad-Hoc - Independent Basic Service Set.



Fonte: (TAMIMI, 2006)

Ao comparar com as redes infraestruturadas, as redes Ad-Hoc possuem vantagens como: rápida instalação em locais onde não há rede infraestruturada instalada e quanto a conectividade nas redes Ad-Hoc as estações podem se comunicar diretamente, se estiverem na mesma área de alcance enquanto nas redes infraestruturadas as estações dependem dos pontos de acesso (BAUER, 2012).

Nas redes Ad-Hoc, em que as estações se movem aleatoriamente, a topologia da rede pode alterar de forma frequente e imprevisível. Assim, a conectividade entre as estações móveis pode mudar de forma constante, requerendo permanentemente adaptações e reconfigurações de rotas. A comunicação entre as estações, algoritmos de roteamento para redes Ad-Hoc, são divididos em protocolos reativos e proativos (XAUD, MORAES, 2009).

Protocolos do tipo reativos estabelecem uma rota ao destino, quando há pacotes a serem enviados. O AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) é um exemplo de protocolo reativo, que foi projetado para ser um protocolo adaptativo para situações de mudanças frequentes de topologia. Quando necessário envio de pacotes a uma estação destino que não possui tabela de roteamento, realiza a busca de descoberta de rotas. A estação de origem envia em broadcast o Path Request (PREQ) para seus vizinhos até encontrar a estação destino. Esta estação então envia um pacote Path Reply (PREP) em unicast para a estação origem, através do caminho que será formado a comunicação entre estação origem e estação destino, atualizando a tabela de roteamento das estações pertencentes a esta rota (BAUER, 2012).

Já no protocolo proativo as informações são enviadas para atualizações sobre as estações da rede, em intervalos de tempo fixos para manter as tabelas de roteamento atualizadas. Como exemplo de protocolo proativo, o OLSR (Optimized Link State Routing) é usado para evitar a redundância de informação, baseado no estado de enlace. Através da escolha de estações para exercerem funções especiais, os MPRs (Multipoint Relays), ele utiliza uma técnica que diminui substancialmente o overhead causado pelas trocas de mensagens de roteamento característico de protocolos proativos. O protocolo OLSR se beneficia da rápida atualização das informações topológicas da rede, muito importante em redes dinâmicas como as Ad-Hoc, e da pouca latência no estabelecimento de rotas (SAADE et al., 2008).

Cada estação da rede selecionam um conjunto de estações para atuarem como MPR. Apenas as estações MPR irão repassar os pacotes quando a estação seletora enviar uma informação pela rede (broadcast). A diminuição do overhead se dá por conta do menor número de retransmissões. O processo de seleção de estações MPR deve se preocupar em escolher um conjunto de MPRs que possam cobrir todos os seus vizinhos de 2 saltos, com isto ele assegura que nenhuma estação irá deixar de receber os pacotes (BAUER, 2012).

3.4 Redes Wi-Fi *Mesh*

Através de financiamentos realizados na década de 90 por militares norte-americanos do Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), as redes mesh vinham com o objetivo de retirar a necessidade de um elemento central em uma comunicação fim a fim. Neste período, diversas equipes militares que estavam na Guerra do Iraque utilizaram essa tecnologia para se comunicarem com suas equipes, cada elemento tinha a função de uma estação da rede. Dessa forma, evitava um ataque a uma estação central caso ela existisse e tornaria o sistema de comunicação frágil (TEIXEIRA, 2004).

Em situações em que é utilizada uma rede infra estruturada sem fio, um nó central é necessário para que os roteadores se comuniquem entre si, pois todos eles se conectam a esse ponto de acesso à internet. Na rede mesh a ideia é que todos os roteadores se comuniquem entre si formando uma malha e levando os dados/pacotes de forma independente. Na medida que um único roteador cai, os outros permanecem funcionando por rotas alternativas (ESLAMI; KARIMI; KHODADADI, 2014).

Substituir um cabo Ethernet por um link sem fio foi um avanço e trouxe muitos benefícios como:

- Flexibilidade de um link sem fio sobre um link com fio: quando todos os AP's se conectam a um switch são necessárias portas de switch e AP, sendo que estes devem estar dentro de um alcance de 100 metros do switch. Nas redes sem fio, é necessário um primeiro AP para se conectar a switch e à rede com fio, mas muitos outros AP's podem se conectar por meio desse primeiro AP, mesmo que estejam a quilômetros de distância do switch e mesmo que estejam ligados objetos em movimento (guindastes, trens, etc.) O benefício da flexibilidade também está no(s) caminho(s) percorrido(s) pelo link sem fio, com um cabo Ethernet, há apenas um caminho possível do AP até o switch e com um link sem fio, qualquer AP pode estar no alcance de um ou vários AP's podendo escolher o melhor caminho (HENRY, 2011).
- Ampla área de cobertura: Com a ligação de vários roteadores mesh uma maior área é coberta com sinal e isso acontece a um custo reduzido (HENRY, 2011).
- Baixo custo de instalação: A não utilização de cabos para ligar os roteadores na malha barateia o custo da infraestrutura da rede (HENRY, 2011).
- Autoformação e auto recuperação: Se um algoritmo estiver embutido em um AP em malha para detectar o melhor caminho para a rede com fio, construir ou expandir uma rede em malha sem fio pode ser tão simples quanto adicionar novos AP's e garantir que eles estejam dentro do alcance de outros AP's. Ou ainda se um AP tiver vários caminhos possíveis para a rede com fio e se o AP for capaz de escolher automaticamente o melhor caminho, a remoção de um ponto de acesso na nuvem mesh simplesmente força os outros pontos de acesso a encontrar o novo melhor caminho para a rede com fio, sem a necessidade de um engenheiro sem fio ser implantado para substituir o ponto de acesso ausente (HENRY, 2011).
- Aumento de Confiança: Na WMN, os roteadores proveem caminhos redundantes entre o emissor e o destinatário na comunicação sem fio. Desta forma quando algum nó falha na malha é possível ainda se chegar ao destino através de uma rota alternativa (HENRY, 2011).

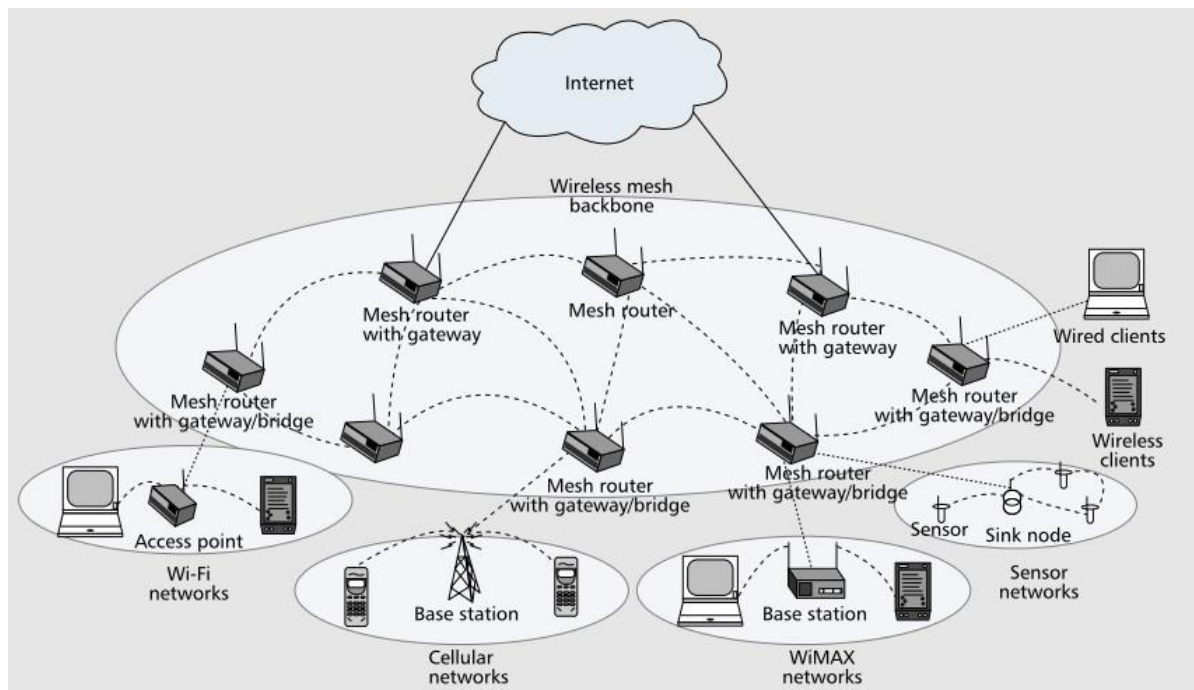
A partir de 2003, surgiu uma grande necessidade de uma estrutura que fornecesse uma terminologia mais clara, uma lista de recursos e comportamentos que pudessem ser interligados ao padrão 802.11. Para isso foi criado um grupo de estudo IEEE 802.11 para redes mesh, então um grupo de trabalho em julho de 2004. Levou mais de sete anos para o grupo de trabalho chegar a uma emenda final para redes mesh. Esta alteração foi finalmente aprovada em julho de 2011 e publicada no outono de 2011 como 802.11s. Esta alteração foi fundamental para um entendimento comum das redes mesh sem fio porque define os protocolos e funcionalidades da rede mesh (LIU et al., 2017; XHAFa et al., 2015).

3.4.1 Arquitetura das redes Mesh no padrão IEEE 802.11s

As redes mesh são constituídas por estações, que funcionam como roteadores e são totalmente autônomas. As estações podem se comunicar de forma direta ou indireta, a partir de múltiplos saltos, ou seja, para que as estações transmitam informações é necessário passar por nós vizinhos até chegar ao seu destino. Além disso, podem disponibilizar acesso a outras estações, não participantes da de Mesh, e até mesmo acesso à Internet. Para que a rede mesh funcionasse de acordo com as necessidades foi introduzido a ela os seguintes elementos (AKYILDIZ; WANG, 2005):

- Estação/Cliente – Station (STA): é uma estação ou nó que recebe serviços, mas não repassa dados e não participa da descoberta de caminhos feita pelos protocolos de roteamento;
- Mesh Point (MP): é uma estação que participa da formação e operação da rede Mesh, tem a função de repassar dados e descobrir rotas;
- Mesh Access Point (MAP): é agregado a um Mesh Point, que provê serviços a clientes (STA);
- Mesh Portal Point (MPP): é um MP com função de atuar como gateway, possibilitando a comunicação entre a rede mesh e uma rede externa podendo ser a Internet;
- Mesh Basic Service Set (MBSS): É um grupo de estações que formam a rede mesh. Podendo conter MP, MAP e MPP. Um MBSS pode conter mais de um MPP.

Figura 3 – Exemplo da arquitetura infraestrutura/backbone WMN.



Fonte: (AKYILDIZ; WANG, 2005).

3.4.2 Descoberta de topologia mesh

Quando uma estação mesh inicializa, ela precisa estabelecer relacionamentos de mesmo nível com outras estações mesh para se juntar a uma rede mesh. A principal diferença com o quadro do padrão 802.11 é que as transmissões de *probe* (pedidos e respostas) dos MPs contém vários elementos novos. Estes elementos formam o que é chamado de “perfil” da rede Mesh. Um perfil é um conjunto de parâmetros que especificam os atributos de um MBSS. Esses atributos consistem de um Mesh ID e o Mesh Configuration Element. Em um MBSS todos os MPs utilizam o mesmo perfil (HENRY, 2011).

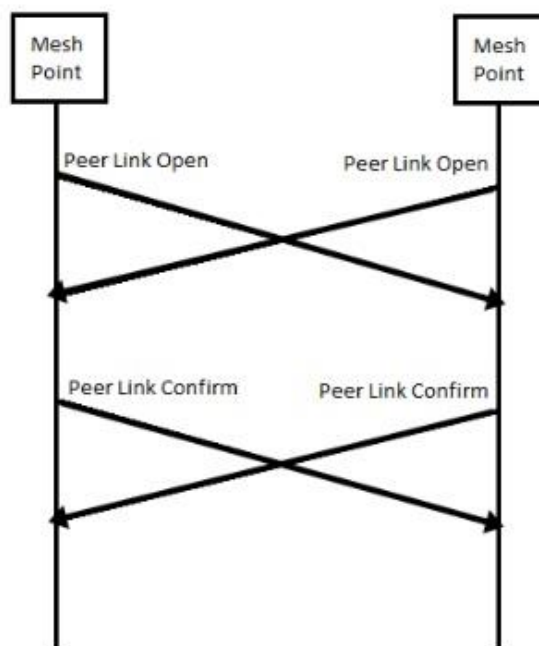
O Mesh ID é um dos três elementos que caracterizam a rede mesh. Os outros dois são o protocolo de seleção de caminho e a métrica de seleção de caminho. Juntos, estes três elementos definem um perfil. Um nó mesh pode suportar diferentes perfis, mas todos os nós da nuvem mesh, num dado momento, devem compartilhar o mesmo perfil. O Mesh Configuration Element contém diversos subcampos que descrevem as capacidades da estação na rede Mesh. Como por exemplo o protocolo de roteamento e a métrica para a seleção de

caminho (SAADE et al., 2008).

Segundo Saade et al. (2008), após a descoberta das estações na MBSS, com a varredura ativa ou passiva, os MPs criam e mantem enlaces com outros MPs vizinhos, compartilhando o mesmo perfil. Para criação de um enlace, os MPs utilizam o protocolo *Mesh Peer Link Managent* para abrir um *peer link*.

Um *peer link* é univocamente identificado pelo endereço MAC de ambos os participantes e por um par de identificadores de enlaces, gerados por cada um dos MPs para minimizar reuso em intervalos de tempo pequenos. Para estabelecer um *peer link*, ambos os MPs trocam quadros *Peer Link Open* e *Peer Link Confirm*. Sempre que um MP quer fechar um *peer link*, ele deve mandar um quadro *Peer Link Close* para o MP par.

Figura 4 - Criação de um *peer link* entre nós mesh no IEEE 802.11s.



Fonte: SAADE et al., 2008.

3.4.3 Protocolos de roteamento

Os protocolos de roteamento são algoritmos que constituem rotinas com o objetivo de mapear a topologia da rede. Esse mapeamento é feito através das tabelas

de roteamento, cuja construção, atualização e manutenção variam de acordo com o método de roteamento escolhido.

O IEEE 802.11s propõe como base para o uso de roteamento para as redes Mesh, o protocolo HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol). O protocolo HWMP foi baseado no protocolo AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), adaptado para operar na camada de enlace. O protocolo HWMP fornece dois modos de operação: roteamento sob demanda e o roteamento proativo (ROCHOL, 2018).

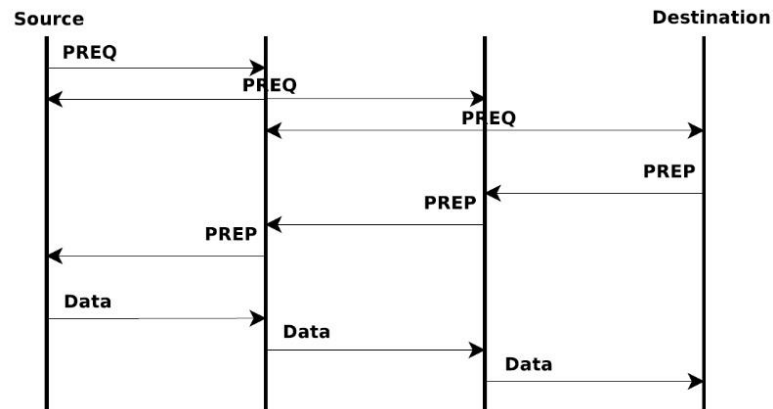
3.4.3.1 Sob demanda ou reativo

A funcionalidade deste modo está sempre disponível, independentemente se uma estação raiz ou MPP é configurado na MBSS ou não. A descoberta dos caminhos é realizada somente quando necessário (ANDREEV; BOYKO, 2010).

No modo sob demanda, a descoberta do caminho começa quando uma estação da malha tem dados para transmitir para um destino desconhecido. Ele transmite um pedido de caminho (*Path Request* - PREQ) informando o destino para os demais nós. Cada estação ao que recebe esta PREQ, cria uma rota para a origem, com métricas de atualizações e mensagens de encaminhamento. Se a estações ao tiver uma informação ao de roteamento válida para o destino ou a estação é o próprio destino, é gerado um quadro de gerenciamento de resposta de caminho (*Path Reply* - PREP) (ROCHOL, 2018; IEEE, 2021).

A descoberta das rotas nesse modo, é realizada somente quando necessário. Como exemplo, se uma estação ao precisar transmitir um quadro a um destino, porém não conhece uma rota adequada até esse destino, inicia-se a descoberta de caminho sob demanda. Esse modo possibilita que os MPs se comuniquem usando caminhos fim a fim, além de não congestionar a rede, visto que a comunicação para descoberta de rotas só é iniciada quando a transmissão é requerida (ANDREEV; BOYKO, 2010).

Figura 5 - Representação do esquema de descoberta de rotas do modo sob demanda (*On-Demand Mode*).



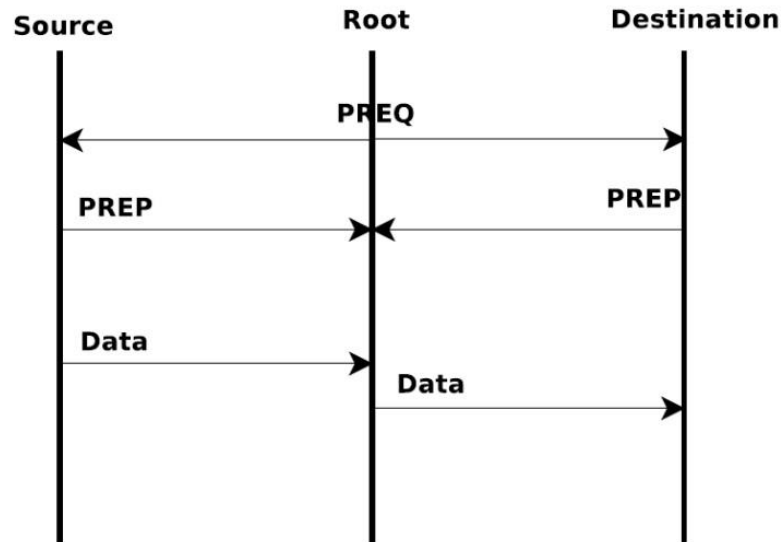
Fonte: (ANDREEV; BOYKO, 2010).

3.4.3.2 Proativo

Nesse modo, a funcionalidade de construção proativa de uma árvore de caminhos é adicionada ao modo sob demanda. Essa árvore tem como base um MP, em que se usam os mecanismos PREQ (Path Request) ativo ou RANN (Root Announcement) para descobrir caminhos para todas as demais estações da rede. O mecanismo PREQ ativo cria os caminhos a partir de cada MP para a estação origem da transmissão, podendo ser bidirecional. O mecanismo RANN cria caminhos bidirecionais entre a estação origem e cada MP da rede (IEEE, 2021).

O HWMP conta com a flexibilidade da descoberta de rotas do modo sob demanda, além de um roteamento eficiente do modo proativo, para os seus portais Mesh. Durante o processo de descoberta de um caminho, cada estação irá contribuir com seus cálculos de métrica acrescentando ou atualizando dados nos quadros de gerenciamento dedicados à troca de informações de encaminhamento (ROCHOL, 2018).

Figura 6 - Representação do esquema de descoberta de rotas do modo Proativo (*Proactive Mode*).



Fonte: (ANDREEV; BOYKO, 2010).

Independente do modo de operação (proativo ou reativo) as funções do HWMP são implementadas pelos seguintes agentes de gerenciamento (IEEE, 2021):

- Path Request (PREQ): Requisição de caminho - estes quadros são enviados em broadcast por um MP que deseja encontrar um caminho para outro MP;
- Path Reply (PREP): Resposta de Caminho - estes quadros são enviados pelo MP de destino, em resposta ao recebimento de uma requisição de caminho PREQ;
- Path Error (PERR): Erro no caminho - estes quadros são utilizados para notificação de que um caminho não está mais disponível;
- Root Announcement (RANN): Anúncio da estação origem - estes quadros são utilizados pela estação que se anuncia como estação de origem daquela transmissão. Como visto antes, existem duas formas de comportamento do HWMP, sendo o quadro RANN utilizado em um deles.

3.4.4 Protocolo BATMAN

O Protocolo Batman (Better Approach To Mobile Adhoc Networking) é um protocolo de roteamento ad hoc de malha (MANET) que permite a comunicação direta entre nós (dispositivos) em uma rede móvel, sem a necessidade de um roteador central. Ele funciona da seguinte forma (BAUER, 2012; LEE, 2008):

1. Identificação dos nós: cada nó na rede é identificado por um identificador exclusivo.
2. Descoberta de rotas: o protocolo Batman utiliza um algoritmo de "routing em grade" para descobrir rotas através da rede. Quando um nó precisa enviar um pacote para outro nó, ele envia o pacote em broadcast para todos os nós na rede.
3. Seleção da melhor rota: cada nó na rede recebe o pacote e utiliza informações de vizinhança (como a intensidade do sinal) para determinar a melhor rota para encaminhar o pacote. Cada nó mantém uma tabela de roteamento com informações sobre os nós vizinhos e as rotas conhecidas.
4. Encaminhamento dos pacotes: uma vez selecionada a melhor rota, o nó encaminha o pacote para o próximo nó na rota, até que o pacote alcance o seu destino.
5. Balanceamento de carga: o Protocolo Batman também utiliza técnicas de balanceamento de carga para evitar congestionamento em determinados nós da rede. Quando um nó está sobrecarregado, ele pode enviar pacotes para outros nós na rede para ajudar a distribuir a carga.
6. Adaptação a mudanças na rede: o Protocolo Batman é capaz de lidar com a mobilidade dos nós na rede, adaptando-se rapidamente a novas condições e mantendo a conectividade da rede. Ele também é capaz de lidar com a perda de pacotes e falhas na rede.

Em geral, o Protocolo Batman é um protocolo de roteamento dinâmico e adaptável, que permite a comunicação direta entre nós em uma rede móvel sem a necessidade de uma infraestrutura centralizada. Ele é especialmente útil em redes *ad hoc*, onde a conectividade precisa ser mantida em condições adversas e com grande mobilidade dos nós (IEEE, 2021).

3.5 Cenários e aplicação da rede mesh

Os cenários onde se podem aplicar as redes mesh são bem amplos, pois com a característica da topologia ser dinâmica e pelos nós serem conectados, possibilita o emprego das redes mesh em diversos cenários, como por exemplo, em empresas, em redes domésticas ou metropolitanas.

3.5.1 Residências e escritórios

A rede Wi-Fi mesh é uma solução ideal para residências e escritórios que precisam de uma conexão Wi-Fi forte e estável em toda a casa, com facilidade de configuração e gerenciamento, maior velocidade e largura de banda e recursos de segurança aprimorados. A seguir algumas vantagens da rede *Mesh* em residências.

- Cobertura estendida: a rede Wi-Fi mesh usa vários pontos de acesso (nós) espalhados pela casa/escritórios para garantir uma cobertura de Wi-Fi uniforme e forte em toda a residência, mesmo em áreas que normalmente têm sinal fraco.
- Conexão estável: a rede Wi-Fi mesh usa a tecnologia de roaming para conectar automaticamente um dispositivo ao nó mais próximo, garantindo uma conexão Wi-Fi forte e estável em todos os momentos.
- Fácil de configurar: a maioria dos sistemas de rede Wi-Fi mesh inclui um aplicativo para smartphone ou tablet que facilita a configuração e gerenciamento da rede, incluindo a adição ou remoção de nós, mudança de senhas e controle de acesso.
- Maior velocidade e largura de banda: a rede Wi-Fi mesh pode lidar com uma maior quantidade de tráfego de rede do que uma única rede Wi-Fi, permitindo que vários dispositivos usem a rede simultaneamente sem impactar a velocidade da conexão.
- Segurança aprimorada: muitos sistemas de rede Wi-Fi mesh incluem recursos avançados de segurança, como criptografia de dados e controle de acesso de usuários, que podem ajudar a proteger sua rede de intrusos e hackers.

- Flexibilidade: a rede Wi-Fi mesh é escalável, o que significa que você pode adicionar ou remover nós da rede conforme necessário, permitindo que você adapte a rede às necessidades da sua casa ou escritório.

3.5.2 Indústrias

As redes Wi-Fi *mesh* são aplicáveis para ambientes industriais que precisam de uma conectividade sem fio confiável e escalável para suportar uma variedade de dispositivos e equipamentos, com aplicações em monitoramento de equipamentos, automação de processos, controle de estoque, comunicação de equipes e controle de acesso. Aqui estão algumas aplicações comuns da rede Wi-Fi mesh em indústrias (CARDOSO; MARQUES, 2012):

- Monitoramento de equipamentos: a rede Wi-Fi mesh pode ser usada para monitorar equipamentos em tempo real, permitindo que as equipes de manutenção monitorem o desempenho de equipamentos críticos e identifiquem possíveis problemas antes que eles ocorram;
- Automação de processos: a rede Wi-Fi mesh pode ser usada para automatizar processos de produção, permitindo que os operadores monitorem e controlem o processo de produção em tempo real e tomem medidas para melhorar a eficiência;
- Controle de estoque: a rede Wi-Fi mesh pode ser usada para monitorar o estoque de materiais e produtos em tempo real, permitindo que as equipes de logística gerenciem o inventário de forma mais eficiente e evitem a falta de estoque;
- Comunicação de equipes: a rede Wi-Fi mesh pode ser usada para fornecer comunicação de voz e dados em tempo real entre as equipes de produção, manutenção e gerenciamento, melhorando a colaboração e a tomada de decisões;
- Controle de acesso: a rede Wi-Fi mesh pode ser usada para controlar o acesso de funcionários e visitantes a áreas restritas, garantindo que apenas pessoas autorizadas possam acessar essas áreas.

3.5.3 Educação

A implantação das redes mesh em universidades, escolas, provê o acesso à Internet a alunos e professores, promovendo a comunicação rápida e a troca de informações. Não há necessidade de cabeamento, pois são instalados diversos pontos de acesso wireless que podem ser internos e externos (CARDOSO; MARQUES, 2012).

3.5.4 Saúde

Como nem todas as construções são adaptadas para receber uma infraestrutura de rede, a rede mesh é ideal nesses casos. Em hospitais, principalmente em prédios mais antigos, a rede mesh pode enviar sinais a curtas distâncias, através de vidros espessos. Isso garante a conectividade confiável e rápida que é crucial para garantir a segurança e eficiência dos processos de atendimento médico. Algumas vantagens incluem (CARDOSO; MARQUES, 2012):

- Cobertura uniforme: fornece cobertura uniforme em todas as áreas do hospital, independentemente da estrutura do prédio ou da presença de obstáculos que possam interferir no sinal. Isso significa que os médicos, enfermeiros e pacientes podem se conectar à Internet em qualquer lugar do hospital, sem interrupções;
- Confiabilidade: por garantir conectividade contínua, mesmo em áreas onde o sinal Wi-Fi é fraco. Isso é especialmente importante em hospitais, onde o acesso à Internet pode ser crítico para o atendimento médico, como em procedimentos cirúrgicos, monitoramento de pacientes e acesso a registros médicos eletrônicos.
- Segurança: podem ser configuradas com recursos avançados de segurança, como autenticação de usuários, criptografia de dados e proteção contra ameaças cibernéticas. Isso é fundamental em hospitais, onde as informações médicas dos pacientes são altamente confidenciais e precisam ser protegidas contra acesso não autorizado.
- Escalabilidade: são facilmente expandidas para cobrir novas áreas do hospital ou acomodar um aumento no número de dispositivos conectados. Isso é

importante em hospitais, onde a demanda por conectividade pode mudar rapidamente, como em momentos de pico de atendimento médico.

- Gerenciamento centralizado: por meio de um software são gerenciadas permitindo que os administradores de TI monitorem e gerenciem a rede de forma eficiente. Isso pode ajudar a identificar problemas de conectividade rapidamente e a tomar medidas proativas para melhorar o desempenho da rede.

As redes mesh também podem ser aplicadas também em cenários de desastres, para facilitar a comunicação entre as cidades devastadas por furacões, terremotos, pois por possuírem uma rede totalmente versátil, permite com que as pessoas se comuniquem entre si, sem precisar de uma infraestrutura fixa (CARDOSO; MARQUES, 2012).

CONCLUSÃO

As redes WiFi Mesh oferecem uma solução avançada e eficiente para problemas de conectividade em ambientes domésticos e empresariais. Com a sua capacidade de cobrir áreas maiores com uma rede sem fio forte e confiável, essas redes eliminam as lacunas e pontos cegos que podem ser encontrados nas redes tradicionais de roteadores.

Além disso, a capacidade das redes WiFi Mesh de se auto-organizarem e se adaptarem às necessidades dos usuários, torna-as ainda mais atraentes para aqueles que procuram uma solução de rede simples e eficaz. Porém, é importante ressaltar que a implementação adequada e a configuração correta dessas redes são cruciais para obter os melhores resultados.

Por fim, com a sua capacidade de fornecer uma conectividade confiável e de alta qualidade em toda a casa ou escritório, as redes WiFi Mesh são definitivamente uma tecnologia a ser considerada para quem busca uma rede sem fio avançada e eficiente.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F.; WANG, X. A survey on wireless mesh networks. *IEEE Communications Magazine*, [s.l.], v. 43, nº 9, p. 23–30, 2005. ISSN: 01636804, DOI: 10.1109/MCOM.2005.1509968.
- ANDREEV, K.; BOYKO, P. IEEE 802.11s Mesh Networking NS-3 Model. *NS-3 Workshop*, [s.l.], p. 8, 2010. ISSN: 0018-9219.
- BANERJI, S.; CHOWDHURY, R. S. On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics*, [s.l.], v. 3, nº 4, p. 45–64, 2013. DOI: 10.5121/ijmnc.2013.3405.
- BAUER, M. **Redes sem fio Mesh: Padrão 802.11s** Monografia. 59 p. - Instituto Federal de Santa Catarina, 2012.
- BUDRI; Amaury; BONILHA; Caio. Wireless LAN (WLAN). *TELECO*, 2013. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlan/default.asp>>. Acesso em: 10 de ago. 2022.
- BULHMAN; Haroldo José; CABIANCA, Luís Antônio. Redes LAN/MAN Wireless I: Padrões 802.11 a, b e g. *TELECO*, 2016. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrwanman1/default.asp>>. Acesso em: 10 de ago. 2022.
- CARDOSO, T. M.; MARQUES, P. C. F. Rede Mesh: topologia e aplicação. *Revista ITEC*, [s.l.], v. 4, nº 4, p. 16–25, 2012.
- ESLAMI, M.; KARIMI, O.; KHODADADI, T. A survey on wireless mesh networks: Architecture, specifications and challenges. *Proceedings - 2014 5th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2014*, [s.l.], p. 219–222, 2014. ISBN: 9781479956920, DOI: 10.1109/ICSGRC.2014.6908725.
- FELICE, Fernando. Análise do Desempenho de Enlaces Ponto-a-Ponto utilizando a faixa de Frequência não Licenciada de 2,4GHz em Tecnologia *Spread Spectrum*. Curitiba: UFPR / Setor de Tecnologia / Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

GOLDSMITH, A. *Wireless Communications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015.

HENRY, J. 802.11s Mesh Networking. *Whitepaper*, [s.l.], v. 1, n° November, p. 1–30, 2011.

HIERTZ, G. R. D., et al. The IEEE 802.11 universe. *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, 2010. doi: 10.1109/MCOM.2010.5394032. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5394032>

IEEE, Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016), pp.1-4379, 2021.

LEE, H. Wireless mesh networks. *Mobile Communications Handbook, Third Edition*. [s.l.]: [s.n.], 2008. 683–694 p. ISBN: 9781439817247, DOI: 10.1201/b12494.

LEE, J.; YEOM, I. Avoiding collision with hidden nodes in IEEE 802.11 wireless networks. *IEEE Communications Letters*, [s.l.], v. 13, n° 10, p. 743–745, 2009. ISSN: 10897798, DOI: 10.1109/LCOMM.2009.090975.

LIU, Y. et al. Wireless Mesh Networks in IoT networks. *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition, iWEM 2017*, [s.l.], p. 183–185, 2017. ISBN: 9781509063925, DOI: 10.1109/iWEM.2017.7968828.

REZENDE, N. S. de. *Redes Móveis Sem Fio Ad-Hoc*. [S.l.]: Núcleo de Computação Eletrônica - UFRJ, 2014.

ROCHOL, Juergen. **Sistemas de comunicações sem fio: conceitos e aplicações**. Porto Alegre: Bookman, 2018.

SAADE, Débora Christina Muchaluat, et al. Multihop MAC: Desvendando o Padrão 802.11s. 2008. Disponível em: <http://www.ic.uff.br/~celio/papers/minicurso-sbrc08.pdf>.

TAMIMI, A.-K. R. A. *Security in Wireless Data Networks: A Survey Paper*. 2006. http://http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wireless_security. Acesso em 10 set de 2022.

TEIXEIRA, E. R. D. Wireless Mesh Networks. 2004. Disponível em: <http://http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwmn>.

XAUD, A. L. D.; MORAES A. F. S. Redes Ad Hoc Protocolos DSR, AODV, OLSR, DSDV. 2009. Disponível em: http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/aodv.html.

XHAFA, F. et al. Solving mesh router nodes placement problem in Wireless Mesh Networks by Tabu Search algorithm. *Journal of Computer and System Sciences*, [s.l.], v. 81, n° 8, p. 1417–1428, 2015. ISSN: 10902724, DOI: 10.1016/j.jcss.2014.12.018.