

### **3 Padrão 802.11n**

Com o intuito de desenvolver um padrão que atendesse a crescente demanda por maior vazão, em julho de 2003 foi formado o grupo de trabalho para desenvolver o padrão 802.11n. O objetivo deste grupo era realizar melhorias na camada física e MAC do padrão 802.11 de forma que os modos de operação deste novo padrão fossem capazes de atingir uma vazão maior, e que esta vazão máxima deveria ser pelo menos de 100 Mb/s, sendo esta medida realizada na camada MAC SAP (Data Service Access Point) [6].

Uma grande quantidade de contribuições foram feitas. Muitas tinham em comum o uso de MIMO e OFDM, uso de canais com largura de banda 20 e 40 MHz e o uso de técnicas de agregação de pacotes.

Em setembro de 2007 o IEEE ratificou o *Draft 2.0* do padrão, que já contemplava as principais alterações de *hardware* necessárias para suportar o padrão 802.11n. A partir de então muitos fabricantes iniciaram a venda de produtos certificados pela *Wi-Fi Alliance* como compatíveis com o Draft 2.0. Em julho de 2009 o IEEE aprovou o *Draft 11* do padrão que foi aprovado como a versão final em outubro do mesmo ano.

#### **3.1. Principais características e implementações na Camada Física**

O padrão 802.11n, em sua especificação, contempla o uso tanto da frequência 2,4 GHz quanto a frequência 5 GHz. Este padrão permite uma vazão teórica máxima de 600 Mb/s, o que é bem mais elevada quando comparado não só a taxa suportada pelos padrões legados da família 802.11 mas também aos 100 Mb/s que é suportado pelas redes cabeadas *Fast Ethernet*. Outro aspecto relevante é o alcance teórico da rede, que é 3 vezes maior que o alcance do padrão 802.11g que é de 100 metros.

	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Tecnologias de camada física	DSSS	OFDM	DSSS/CCK	OFDM/DSSS	SDM/OFDM
Taxas de transmissão	1, 2 Mb/s	6–54 Mb/s	5.5 e 11 Mb/s	1–54 Mb/s	6–600 Mb/s
Frequência	2.4 GHz	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 e 5 GHz
Espaçamento de canal	25 MHz	20 MHz	25 MHz	25 MHz	20 e 40 MHz

Tabela 3.1 - Comparativo entre o padrão 802.11n e os padrões legados da família 802.11

Alguns itens ou melhorias são considerados obrigatórios e estão contemplados no modo *Mixed*, tais como compatibilidade com dispositivos legados da família 802.11, realização de MIMO básico com até 2 *streams* espaciais e o uso da faixa de frequência de 20 MHz. Outros itens ou configurações estão contemplados no modo *Greenfield* onde não há possibilidade para comunicação com os dispositivos legados. Neste modo somente é possível a troca de informação entre dispositivos do padrão 802.11n. Desta forma estão contemplados o uso de uma faixa de frequência de 40 MHz assim como o uso de 3 e 4 *streams* espaciais. A Figura 3.1 demonstra os itens obrigatórios e os opcionais.



Figura 3.1 - Relação de itens obrigatórios e opcionais na camada física do padrão 802.11n

A camada física do padrão 802.11n possui uma taxa de transmissão dos dados significativamente superior que os padrões legados, 802.11g e 802.11a. Os principais elementos que possibilitaram esta maior taxa, foram o uso de transmissão e recepção em MIMO, multiplexação espacial e o aumento da banda para 40 MHz. O aumento de um único *stream* espacial e de uma única antena para quatro *streams* espaciais e quatro antenas eleva a taxa de transmissão em um fator de quatro.

Entretanto, existe um aumento de custo associado a este acréscimo na quantidade de transmissores/receptores e antenas. Por conta disto o uso de três e quatro *streams* espaciais são opcionais conforme a Figura 3.1.

Para permitir que dispositivos móveis tais como aparelhos celulares também utilizem a versão 802.11n, o uso de dois *streams* espaciais é obrigatório somente no *Access Point* (AP).

Além das alterações citadas, outras alterações também foram feitas na camada física. Estas alterações também contribuem para elevar a taxa de transmissão, são elas: criação de um modo o qual permite o uso do intervalo de guarda de 400 ns ao invés de 800 ns, aumento da taxa de codificação para 5/6 a qual nos padrões 802.11a/g é de 3/4, entre outras.

### 3.1.1.

#### **MIMO-OFDM**

Conforme mencionado anteriormente, um dos principais elementos que possibilitaram que o padrão 802.11n alcançasse taxas de transmissão de 600 Mb/s na camada física é a utilização de múltiplos transmissores, receptores e antenas para transmissão e recepção dos dados em conjunto com a modulação OFDM. Essa técnica é conhecida por MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) e foi incorporada em um padrão de rede sem fio da família 802.11 pela primeira vez. Todos os padrões 802.11 legados faziam uso de somente um transmissor/receptor.

Sistemas que utilizam a técnica MIMO fazem usos de múltiplas antenas, conforme ilustrado na Figura 3.2. O número de antenas e de

transmissores/receptores no Access Point (AP) não necessita ser o mesmo da estação, por isso que o padrão define como obrigatório somente o AP a possuir dois *streams* espaciais. No caso de ser usadas duas antenas no receptor e duas no transmissor (configuração 2x2), a capacidade do sistema também fica multiplicada por 2.

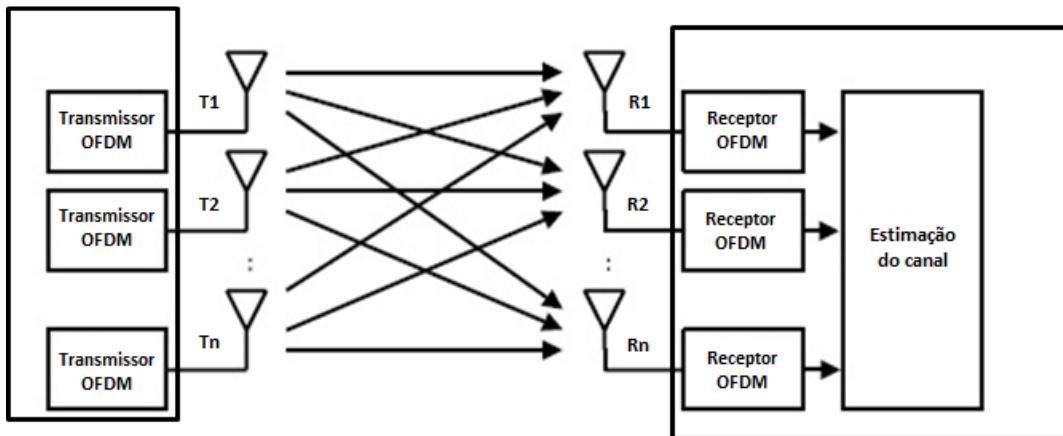


Figura 3.2 - Sistema de transmissão e recepção utilizando a técnica MIMO.

A técnica MIMO faz uso dos ganhos de diversidade espacial e multiplexação espacial para aumentar a capacidade de transmissão através da redução da taxa de erro de bits [22]. Para termos diversidade espacial no receptor, duas ou mais antenas são espaçadas, de modo que estas recebam sinais que tenham percorrido caminhos diferentes (diversidade multi-percurso). Os sinais recebidos pelas antenas são comparados e o melhor deles é utilizado na decodificação da informação.

Com o uso da multiplexação espacial, a informação que será transmitida é dividida em múltiplos pedaços (*streams*) de forma que cada *stream* possua uma parte da informação. Estes *streams* são enviados no mesmo momento e através do mesmo canal, ou seja, utilizam na mesma frequência, estes porém são transmitidos por antenas diferentes.

A multiplexação espacial faz uso do efeito do multi-percurso para que os *streams* cheguem ao receptor em momentos distintos. Isso só é possível, pois cada *stream* é enviado por uma antena diferente. Como diferentes informações são enviadas ao mesmo tempo e utilizando mesmo canal, isso faz com que se

tenha uma maior capacidade de transmissão e consequentemente uma maior vazão.

De forma análoga a técnica MIMO que através da multiplexação espacial divide a informação que será transmitida em *streams*, a modulação OFDM, divide os bits que serão transmitidos em diversos *streams* e assim os transmite em sub canais paralelos com uma taxa de transmissão menor, consequentemente o tempo de transmissão de cada símbolo é maior, o que torna os sinais menos sensíveis a ruídos e a interferência intersímbolo. Por isso, a técnica MIMO funciona melhor em sistemas que fazem uso da modulação OFDM.

O padrão 802.11n faz o uso destas duas técnicas combinadas para obter melhores resultados e assim permitir maior resiliência e robustez para as redes sem fio.

### 3.1.2.

#### Largura de banda

Uma das formas mais simples de elevar a capacidade de transmissão da rede é aumentar a largura de banda, pois, basta dobrar a largura de banda que dobra também a taxa máxima de transmissão. Entretanto os padrões legados contemplam a transmissão em apenas um canal de 20 MHz. Para que haja compatibilidade do padrão 802.11n com os padrões legados, a utilização da largura de banda de 40 MHz foi inserida no padrão como opcional e a largura de banda de 20 MHz foi definida como obrigatória. Desta forma é possível garantir a que os dispositivos legados poderão ser comunicar com dispositivos deste novo padrão .

Quando utilizada a largura de banda de 40 MHz, o padrão 802.11n utiliza uma técnica conhecida por *Channel Bonding*, a qual combina dois canais de 20 MHz adjacentes para formar um único canal de 40 MHz. Com o uso dessa técnica o padrão dobra a capacidade de transmissão. Porém essa técnica é mais efetiva quando utilizada na faixa de frequência de 5 GHz, pelo fato desta faixa de frequência possuir um maior número de canais não sobrepostos disponíveis. Na frequência de 2,4 GHz existem somente 3 canais de 20 MHz que não são sobrepostos, sendo assim se utilizarmos a largura de banda de 40MHz estaremos utilizando dois canais dos 3 canais não sobrepostos existentes nesta frequência e

consequentemente estaremos utilizando mais de 60% dos canais disponíveis. Para evitar que isso corra o IEEE definiu algumas regras para garantir um melhor desempenho quando os dispositivos estão utilizando o canal com 40 MHz em frequência de 2.4 GHz.

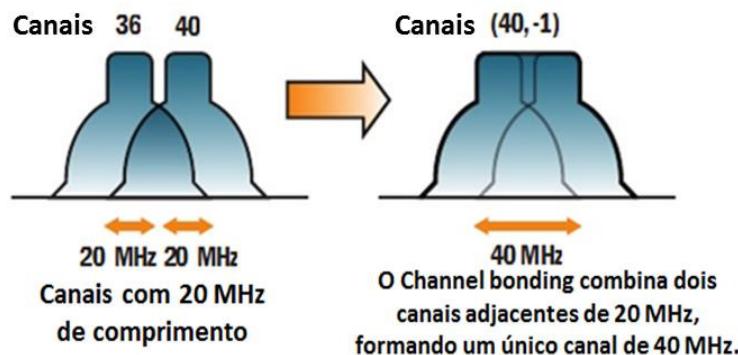


Figura 3.3 - Unificação de canais através do Channel Bonding

### 3.2.

### Principais características e implementações na Camada MAC

Para que as altas taxas proporcionadas pela camada física pudessem ser utilizadas pelas aplicações, era necessária a realização de alterações na camada MAC, para que essa fosse mais eficiente na transmissão dos dados. Dentre as melhorias implementadas na camada MAC podemos citar, a agregação de quadros (*frames*); a implementação de um intervalo entre quadros menor, conhecido por RIFS (*Reduced Interframe Space*); o envio de confirmação de recebimento em blocos (*Block acknowledgements*), mecanismo que foi incorporado do padrão 802.11e; a utilização da janela de transmissão conhecida como *Transmit opportunity*, entre outras implementações. Assim como na camada física, na camada MAC existem itens obrigatórios e outros opcionais. A Figura 3.4 ilustra a classificação destes.

**Obrigatório**

Block ACK

Utilização da janela de transmissão TXOP

Agregação de Quadros: A-MPDU e A-MSDU

Mecanismo de proteção para interoperabilidade com dispositivos legados

**Opcionais**

RIFS (reduced interframe space)

Protocolo de direção reversa

Rápida adaptação do link

Figura 3.4 - Relação de itens obrigatórios e opcionais na camada MAC do padrão 802.11n

Entre os itens opcionais está o uso do RIFS, o protocolo de direção reversa e a rápida adaptação do *link*. O RIFS reduz o intervalo de envio dos pacotes e pode ser utilizado durante a transmissão de uma rajada de quadros para reduzir a quantidade de *overhead* em comparação ao até então utilizado SIFS (*Short InterFrame Space*).

O protocolo de direção reversa (RDP - *Reverse Direction Protocol*) é capaz de melhorar o desempenho de alguns tipos de tráfego de dados, dos quais necessitam de confirmação imediata da transmissão realizada. Esse protocolo permite que uma parte do TXOP obtido por um dispositivo (estação ou AP) seja utilizado pelo dispositivo receptor (AP ou estação) para enviar a resposta. Desta forma evita que o dispositivo que esteja recebendo a informações necessite solicitar acesso ao meio para poder enviar a resposta.

Usualmente os métodos de adaptação do *link* possuem como base somente na medida de PER (*Packet Error Rate*), porém muitas vezes as condições do

canal são alteradas de forma mais rápida do que a PER possa ser mensurada e, consequentemente, não se consegue escolher o melhor MCS (*Modulation and Coding Scheme*) de forma dinâmica. Então no padrão 802.11n foi incluído o campo de MCS feedback dentro do campo de controle, para que este atue fornecendo realimentação sobre a qualidade do canal em que os dados chegam para o receptor, assim como as características e condições do canal. O uso da medida da PER em conjunto com as informações recebidas através do campo MCS *feedback* permitem que o transmissor saiba de forma mais rápida condição do canal e determine o melhor MCS mais rapidamente. Devido a essa maior agilidade em determinar o MCS que o método de adaptação do *link* é denominado no padrão 802.11n de rápida adaptação do *link* (*Fast link adaptation*)

Os itens que são obrigatórios tais como: TXOP, Block ACK e mecanismos de proteção serão apresentados ao longo deste capítulo. A técnica de agregação de quadros devido a sua relevância será detalhada no capítulo seguinte.

### 3.2.1.

#### **TXOP - Transmit opportunity**

Foi contemplado no padrão 802.11n uma janela de transmissão conhecida como *Transmit Opportunity* ou simplesmente TXOP. O conceito do TXOP foi primeiramente utilizado no padrão 802.11e. Esta técnica consiste em um período de tempo no qual a estação pode transferir uma maior quantidade de dados pertencentes a uma determinada classe. Esse período é definido pelo momento de seu inicio e por sua máxima duração.

Quando ao dispositivo é concedida uma oportunidade de transmissão, que é fornecida pelo mecanismo EDCA (*Enhanced Distributed Channel Access*), ele tem a sua disposição o meio físico para realizar a transmissão de forma continua de pacotes com os dados do usuário, controle e gerenciamento e ainda receber os quadros de resposta sem que haja interferência de outros dispositivos.

Como mencionado anteriormente o EDCA é uma extensão do DCF (*Distributed Coordination Function*). O DCF permite apenas a entrega de quadros de melhor esforço, ou seja, o DCF não é capaz de lidar com Qualidade

de Serviço (QoS – Quality of Service), sendo assim todos os pacotes possuem a mesma prioridade para o DCF. O EDCA supre essa deficiência, pois com este é possível realizar a priorização de acordo com o QoS desejado para cada tipo de tráfego. O EDCA define quatro categorias de acesso (ACs - *Access Categories*) onde cada AC possui um grupo de valores específicos com os parâmetros do mecanismo de acesso que permitem priorizar estatisticamente o acesso ao canal de uma AC sobre outra AC. Os valores de cada AC assim como as quatro categorias existentes estão listados na Tabela 3.2.

AC	CW min	CW max	AIFSN	AIFS(μs)
<i>Legacy</i>	<b>15</b>	<b>1023</b>	<b>2</b>	<b>34</b>
<b>AC_VO</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>34</b>
<b>AC_VI</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>34</b>
<b>AC_BE</b>	<b>15</b>	<b>1023</b>	<b>3</b>	<b>43</b>
<b>AC_BK</b>	<b>15</b>	<b>1023</b>	<b>7</b>	<b>79</b>

Tabela 3.2 - Categorias de acesso (AC) do EDCA com seus respectivos parâmetros.

São parâmetros do EDCA: AIFSN, AIFS, CWmin e CWmax sendo o AIFS (*inter-frame space*) o período no qual o canal é monitorado para verificar se o mesmo está livre e é associado a cada AC.

O AIFS pode ser obtido pela seguinte relação:

$$\text{AIFS[AC]} = \text{SIFS} + \text{AIFSN[AC]} \times \text{Slot Time},$$

onde AIFSN[AC] é o número AIFS, o qual determina a prioridade da classe ao qual este está associado.

O menor valor do AIFS é o valor do DIFS utilizado nos padrões legados do 802.11. CWmin e CWmax são respectivamente os valores mínimo e máximo da janela de contenção de cada AC. Quanto menor estes valores maior é a prioridade de acesso ao canal.

A utilização do TXOP visa promover uma equidade dos recursos do canal em termos de tempo de utilização, ao invés da capacidade de transmissão igual

para todas as estações. Porém se as estações acessarem a rede requisitando acesso para transmissão de dados e esses dados de todas as estações pertencerem à mesma classe (AC), na média o canal estará igualmente disponível para todas as estações.

### 3.2.2.

#### **Block acknowledgement**

O protocolo de envio de confirmação de recebimento em blocos conhecido por *block acknowledgements* ou ainda *block ACK*, visa aumentar a eficiência de utilização do canal através da transmissão de um único bloco de confirmação (BA - *Block Acknowledgement*) contendo a confirmação de recebimento de diversos pacotes de dados. Esse protocolo foi incorporado primeiramente no padrão 802.11e e substitui o envio de pacotes unitários de confirmação (ACK) para envio em destes Ack's em bloco.

Esse protocolo funciona da seguinte forma: no momento em que o AP ou a estação recebem o TXOP estes transmitem os pacotes de dados. Porém, nenhuma confirmação de recebimento é enviada de volta durante a transmissão. Depois de finalizada a transmissão o AP ou a estação envia um quadro de controle denominado de BAR (*Block Ack Request*), ao receber o BAR a estação ou AP responde com o BA.

### 3.3.

#### **Mecanismos de proteção**

Devido ao fato dos dispositivos legados não serem capazes de identificar as transmissões de dispositivos que possuem o padrão 802.11n, se fez necessário no desenvolvimento do padrão 802.11n não somente possibilitar a compatibilidade com os padrões 802.11 legados, mas também criar mecanismos que previnam que dispositivos que utilizam os padrões 802.11 legados venham a interferir nas transmissões dos dispositivos com padrão 802.11n.

Então com o intuito de permitir a compatibilidade e prevenir interferências foi inserido no padrão 802.11n mecanismos de proteção tanto na camada física quanto na camada MAC, desta forma equipamentos no padrão 802.11n são compatíveis com equipamentos legados.

Quando os equipamentos 802.11n identificam que existe pelo menos um equipamento legado se faz necessário que os equipamentos 802.11n passem a operar em modo *mixed*.

Esse modo permite a interoperabilidade com dispositivos legados e para prevenir que colisões ocorram é enviado um pacote com os dados da transmissão que irá ocorrer para estes dispositivos legados.

Essa informação é enviada em baixa taxa de forma que os equipamentos legados possam receber este pacote e assim serem informados que irá ocorrer uma transmissão e quando tempo essa transmissão irá durar.

Neste pacote com os dados da transmissão estão contidas informações do tamanho do pacote e em qual taxa este será transmitido. Essas informações são suficientes para os demais dispositivos saibam quanto tempo irá durar a transmissão e consequentemente o tempo em que o meio estará sendo usado por outro equipamento.

Após o envio desta informação em baixa taxa, os dados enviados entre equipamentos do padrão 802.11n são enviados em alta taxa.

A proteção na camada MAC é feita de forma semelhante o mecanismo utilizado no padrão 802.11g em relação ao 802.11b, no qual, se existir uma estação com padrão legado no alcance do padrão mais recente, o mesmo deve utilizar o mecanismo de proteção CTS-to-self ou RTS/CTS prevenindo assim que ocorram colisões.

No padrão 802.11n foram definidos dois formatos de quadros de preâmbulo, um para o modo *Mixed* e outro para o modo *Greenfield* (GF). Quando detectada a presença de um dispositivo legado o formado do modo *Mixed* deve ser usado, caso não exista nenhum elemento legado o modo GF pode ser utilizado.

Todos os equipamentos 802.11n são obrigados a suportar o formato do quadro do modo *Mixed* e permitir assim a compatibilidade com os equipamentos legados. O quadro no modo *mixed* contém os campos LSTF (*Short Training Field*), L-LTF (*Long Training Field*) e L-SIG (*Signal Field*) que podem ser lidos pelos equipamentos nos padrões 802.11a/g. Com essas informações os equipamentos legados podem determinar quanto tempo o meio está sendo utilizado por outro equipamento. O formato do quadro do modo *mixed* é mostrado na Figura 3.5.

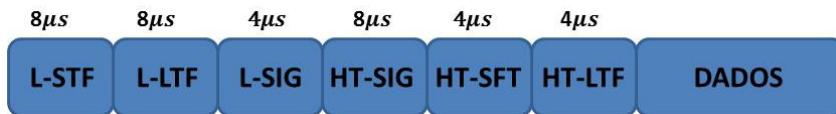


Figura 3.5 - Formato do quadro do preâmbulo utilizado no modo mixed

O suporte ao quadro do modo GF é opcional assim como a utilização do próprio modo GF é opcional. Este modo somente é usado se não houver a presença de equipamentos de padrões diferentes ao 802.11n. Sendo assim, quando este modo é utilizado não existe a necessidade de envio de informações para os dispositivos legados. Desta forma o preâmbulo deste modo é menor e consequentemente é transmitido em menor tempo. O formato do quadro do modo GF é mostrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Formato do quadro do preâmbulo utilizado no modo Greenfield