

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA A
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

MARCOS VINICIUS ZIMMERMANN OTANI

**REDES *ETHERNET* EM APLICAÇÕES VEICULARES:
uma revisão do estado da arte das soluções da aplicação**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2015

MARCOS VINICIUS ZIMMERMANN OTANI

**REDES *ETHERNET* EM APLICAÇÕES VEICULARES:
uma revisão do estado da arte das soluções da aplicação**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Juliano Mello

CURITIBA
2015

RESUMO

ZIMMERMANN OTANI, Marcos Vinicius. **Redes *Ethernet* em aplicações veiculares**: uma revisão do estado da arte das soluções da aplicação. 2016. 42 f. Monografia (Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O uso da tecnologia embarcada nos automóveis têm aumentado consideravelmente nos últimos anos. A cada ano, surgem novas tecnologias tanto de entretenimento quanto de auxílio na direção, e essas tecnologias demandam cada vez mais banda entre as muitas ECUs de um veículo. Os atuais protocolos automotivos não são escaláveis para as demandas futuras desses sistemas, e um substituto será necessário em um futuro próximo. Esse trabalho buscará demonstrar a viabilidade do protocolo *Ethernet* como substituto das redes automotivas atuais, fazendo um comparativo entre as tecnologias, e buscando o estado da arte da aplicação desse protocolo como rede automotiva, demonstrando as possíveis modificações necessárias ao protocolo para torná-lo viável como rede veicular.

Palavras chave: Redes veiculares. CAN. Protocolo *Ethernet*. *Ethernet* AVB. TTE-*thernet*.

ABSTRACT

ZIMMERMANN OTANI, Marcos Vinicius. **Ethernet networks in vehicular applications:** a review of the state of the art of the application solutions. 2016. 42 f. Monografia (Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The use of embedded technology on automotive applications has been increasing in the last few years. Every year, new technologies are available for the automotive domain, from entertainment purpose to driving auxiliary systems. These technologies demand progressively more bandwidth between the many ECUs inside a vehicle. The current automotive protocols do not scale to the point of the future requirements, and a substitute will be in need in the next few years. This work presents the feasibility of the Ethernet protocol as a substitute for the present automotive networks, comparing both technologies, and displays the state of art in the application of this protocol as an automotive network, showing the plausible modifications needed to turn it into a viable solution as vehicular network.

Keywords: Automotive networks. CAN. Ethernet protocol. Ethernet AVB. TTEthernet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Sistema de barramento empregado no protocolo CAN.....	15
Figura 2- Detalhamento de um quadro CAN.....	17
Figura 3- Possíveis topologias utilizadas pelo protocolo Flexray.....	18
Figura 4- Detalhamento de um ciclo de comunicação do protocolo Flexray.....	19
Figura 5- Detalhamento de um quadro Flexray.....	19
Figura 6- Detalhamento de um quadro LIN.....	21
Figura 7- Quadro Ethernet.....	24
Figura 8- Quadro Ethernet destacando VLAN.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AVB	Audio Video Bridge
CAN	Controller Area Network
CDMA/CD	Code Division Multiple Access/Collision Detection
DVD	Digital Video Disc
ECU	Electronic Control Unit
FCS	Frame Check Sequence
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAN	Local Area Network
LIN	Local Interconnect Network
MAC	Media Access Control
MOST	Media Oriented System Transport
MTU	Maximum Transmit Unit
OSI	Open System Interconnection
QoS	Quality of Service
SAE	Society of Automotive Engineers
SAE	Society of Automotive Engineers
SOF	Start of Frame
STP	Shielded Twisted Pair
TDM	Time Division Multiplexing
TTEthernet	Time Triggered Ethernet
UTP	Unshielded Twisted Pair
VLAN	Virtual Local Area Network

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 TEMA.....	8
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	8
1.3 PROBLEMA.....	9
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 Objetivo Geral.....	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9
1.5 JUSTIFICATIVA.....	10
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	11
1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	12
1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2 REDES AUTOMOTIVAS ATUAIS.....	14
2.1 CAN.....	15
2.2 FLEXRAY.....	17
2.3 LIN.....	20
2.4 MOST.....	21
2.5 RESUMO DAS REDES ATUAIS.....	22
3 PROTOCOLO <i>ETHERNET</i> COMO REDE AUTOMOTIVA.....	23
3.1 CAMADA FÍSICA.....	23
3.2 CAMADA DE ENLACE DE DADOS.....	24
3.3 VLAN.....	25
3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO – QOS.....	25
3.5 <i>ETHERNET</i> VS PROTOCOLOS ATUAIS.....	26
4 PROPOSTAS DE ADAPTAÇÕES VISANDO VIABILIDADE.....	29
4.1 CAMADA FÍSICA.....	29
4.2 <i>ETHERNET</i> E 802.1Q.....	30
4.3 <i>ETHERNET</i> 802.1 AVB.....	32
4.4 TTETHERNET.....	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Os avanços tecnológicos nas áreas de sensoriamento, segurança e entretenimento a bordo têm contribuído para um forte aumento no número de unidades controladoras nos veículos. Segundo Bello (2001, p. 1), no segmento de veículos *premium* é possível encontrar mais de 70 dessas unidades.

Essa solução descentralizada de unidades controladoras separadas impôs o uso de uma rede de comunicação entre esses dispositivos, que necessitam trocar mensagens para que o sistema opere de forma holística e harmoniosa. Contudo, os sistemas de comunicação atuais já não atendem o aumento de demanda na banda de comunicação, e novas soluções têm sido buscadas pelos fabricantes.

Dentre essas possíveis soluções, o protocolo *Ethernet* se destaca por uma série de motivações, em especial por atender diretamente as exigências de banda atuais e futuras. Porém, esse protocolo não foi projetado para o rigoroso ambiente veicular, e diversas limitações são impostas ao modelo.

Esse trabalho buscará demonstrar a viabilidade do uso do protocolo *Ethernet* como rede intraveicular, demonstrando vantagens e desvantagens do seu uso, assim como listar e comparar o estado da arte das soluções encontradas pela academia para permitir sua utilização na aplicação.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Esse trabalho trata da aplicação do protocolo *Ethernet* como alternativa às redes intraveiculares para atender atuais e futuras demandas. Com o objetivo de delimitar o foco do trabalho, não serão abordados soluções para comunicações entre veículos (e.g. sistemas anticollisão, compartilhamento de informações de tráfego) nem do veículo com o mundo exterior (postos de abastecimento, estações de controle de tráfego, sistemas de controle de estacionamento).

Ainda, devido ao fato das necessidades dos sistemas de veículos pessoais se diferirem dos veículos de carga, as soluções têm convergido para resolver os

problemas dos automóveis de pequeno porte. Portanto, soluções aplicadas a veículos de carga não serão incluídas nessa pesquisa, embora algumas soluções apresentadas aqui possam ser utilizadas conjuntamente em veículos de qualquer porte.

Também não será alvo da pesquisa comparar novas propostas de protocolos de redes veiculares com o protocolo proposto, já que a aplicabilidade de novos protocolos fica vinculada a extensos testes de susceptibilidade e de empregabilidade no mercado; testes esse que seriam menos intensos para adaptações a um protocolo em uso, demonstrando clara desvantagem em relação a solução proposta.

1.3 PROBLEMA

Redes *Ethernet* podem ser aplicadas em automóveis? Resolverão requisitos atuais e novos? Qual o estado da arte das soluções que permitirão a aplicação de protocolos *Ethernet* em redes automotivas?

1.4 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.4.1 Objetivo Geral

Identificar o estado da arte na aplicação do protocolo *Ethernet* como rede veicular.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar vantagens e desvantagens no uso de protocolos *Ethernet* como rede automotiva;
- Comparar o protocolo *Ethernet* com redes automotivas atualmente utilizadas (LIN, CAN, Flexray, MOST);
- Identificar impedimentos para o uso direto do protocolo em veículos

- Listar adaptações existentes no protocolo para tornar seu uso em veículos viável;
- Identificar artigos e papéis demonstrando a possibilidade de uso do protocolo *Ethernet* como rede automotiva.

1.5 JUSTIFICATIVA

Com o aumento nas regulamentações de emissões de poluentes veiculares na década de 80, fabricantes buscaram novas soluções para que seus motores atendessem os cada vez mais restritivos níveis de poluentes sem que houvesse perdas na potência e consumo dos motores da época.

A solução encontrada foi a adoção de unidades de controle de motor (*ECUs*, na sigla em inglês), que, através de sua eletrônica embarcada, permitiram o atendimento aos rígidos limites de emissões impostos. O sucesso demonstrado pela utilização de um controle eletrônico foi tão grande que, rapidamente, esse recurso passou a ser utilizado para não somente controlar o motor, mas também para o controle de outros componentes, como freios e transmissão. Logo notou-se que, para que todos esses componentes funcionassem harmoniosamente e em conjunto, seria necessária uma espécie de comunicação entre eles.

Para solucionar esse problema de comunicação, tentou-se na época aplicar algumas comunicações seriais já existentes, porém sem sucesso para o severo ambiente veicular. Engenheiros da Bosch iniciaram em 1983 o desenvolvimento de um novo protocolo de comunicação serial voltado a cobrir as deficiências dos outros protocolos em relação as demandas veiculares. Com isso, surgiu em 1986 o protocolo CAN.

Nos dias atuais, o protocolo CAN ainda é o mais utilizado na comunicação veicular, apesar do surgimento de muitos outros protocolos voltados a automóveis desde a sua criação.

Entretanto, com os rápidos avanços na área de eletrônica embarcada e sensoriamento, os veículos passaram a adotar um número cada vez maior de ECUs. Novas demandas de controles de emissão, segurança, e mesmo de entretenimento a bordo fizeram disparar a demanda de banda nas agora múltiplas redes intraveiculares. Mesmo com atualizações, o protocolo CAN, e até mesmo protocolos veicular-

res mais recentes, não têm conseguido atender novos requisitos de escalabilidade e banda.

Surge a tona então o protocolo *Ethernet*, que, por sua extensa utilização como protocolo de comunicação entre computadores e suas consideráveis características de flexibilidade, custo reduzido e expansibilidade, se tornou uma alternativa aos protocolos atuais ou mesmo ao desenvolvimento de um novo protocolo específico para atender as novas demandas.

O protocolo *Ethernet*, entretanto, não foi desenvolvido para satisfazer as características ambientais veiculares prontamente, e necessita de várias adaptações para seu funcionamento como substituto para as redes automotivas atuais. Vários trabalhos propõem isoladamente soluções para essas questões, porém não existe um agregado comparativo entre elas.

Esse trabalho pretende esclarecer as vantagens e desvantagens do uso do protocolo *Ethernet* como rede veicular, comparar o protocolo com outros protocolos utilizados atualmente, compilar o estado da arte das soluções para o uso do protocolo como rede veicular, e demonstrar qual o estado da viabilidade do uso do protocolo.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Considerando a abordagem do método de pesquisa, essa terá um caráter bibliográfico no presente trabalho. A maior parte das fontes abordadas terá cunho acadêmico, sendo em sua maioria artigos recentes publicados na área, demonstrando a atual relevância do assunto e focando em seu estado da arte. Eventualmente, como embasamento teórico, serão utilizadas fontes como livros da área do assunto, assim como *folders*, panfletos e informes técnicos de fabricantes de produtos que tragam a visão da indústria na área pesquisada.

Este trabalho terá também um caráter exploratório, já que têm como fundamento explorar e explicitar as soluções atuais ao problema, como cita Gil, (2010, p. 41), “com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses”, demonstrando aquilo que já foi encontrado no assunto no meio acadêmico.

Seu desenvolvimento se dará pela pesquisa pelo assunto nas fontes acadêmicas, preferencialmente pelos artigos disponibilizados por meio da biblioteca digital *IEEE Xplore*. Em seguida, será feita a coleta dos artigos que apontam os pro-

blemas na utilização do protocolo *Ethernet* em veículos, e artigos demonstrando as possíveis soluções encontradas. Será feito também um comparativo do desempenho do protocolo, baseado nessas soluções, em relação aos protocolos empregados atualmente pela indústria.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Alguns autores claramente se destacam na pesquisa do protocolo *Ethernet* como rede automotiva. Bello (2011, 2014), nos trabalhos em que é autora e nos que é coautora, sempre busca demonstrar a viabilidade do uso do protocolo em veículos. Navet (2005, 2008, 2015) será consultado como referência na utilização atual dos protocolos automotivos, assim como Tuohy (2013, 2015).

Trabalhos executados junto ao projeto SEIS, como o de Kern (2010, 2011), Lim (2011), entre outros, serão consultados como referência no estado da arte nas soluções para utilização do protocolo. Também será referenciado a tese de doutorado de Rahmani (2009).

Fabricantes como BWM, Daimler, NXP, Broadcom e Micrel, serão referenciados como propulsores da tecnologia por meio de seus pesquisadores.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

O seguinte trabalho terá a estrutura de capítulos a seguir apresentada:

Capítulo 1 – Introdução: nesse capítulo serão introduzidos o tema, delimitações do estudo, o problema motivador do trabalho, os objetivos gerais assim como os específicos, a justificativa para a sua realização, seus procedimentos metodológicos, o embasamento teórico e a estrutura aqui apresentada.

Capítulo 2 – Redes automotivas atuais: serão apresentados os protocolos automotivos mais utilizados atualmente.

Capítulo 3 – Protocolo *Ethernet* como rede automotiva: será apresentado o protocolo *Ethernet*, assim como suas vantagens, desvantagens e potenciais problemas no seu uso como substituto para as redes automotivas atuais.

Capítulo 4 – Propostas de adaptações visando viabilidade: serão apresentadas e comparadas as soluções já propostas para os problemas levantados no capítulo anterior em relação a utilização do protocolo em veículos.

Capítulo 5 – Considerações finais: nesse capítulo será verificado se o problema foi solucionado, assim como se os objetivos foram atingidos por meio desse trabalho. Por fim, trabalhos futuros serão sugeridos.

2 REDES AUTOMOTIVAS ATUAIS

A utilização de redes para a comunicação entre *ECUs* ocorre há mais 20 anos, sendo que, segundo Navet (2005), uma das primeiras utilizações de uma rede automotiva não ponto a ponto foi em um veículo da marca Mercedes no início dos anos 90.

Logo após a adoção dos primeiros modelos de veículos dotados de *ECUs*, notou-se a necessidade de implementar uma comunicação entre essas unidades controladoras para estabelecer funcionalidades mais complexas. Por exemplo, a *ECU* de controle do ar-condicionado pode se comunicar com a *ECU* de controle do motor para que essa proveja mais potência ao motor caso o sistema de refrigeração esteja ligado.

Inicialmente, adotou-se a estratégia de comunicação ponto a ponto entre as unidades. Porém, como explica Tuohy (2015, p. 1), o número de canais de comunicação necessário para adotar essa estratégia aumenta exponencialmente conforme unidades controladoras são agregadas: para cada n *ECUs* em um veículo, serão necessárias n^2 conexões. Em outro trabalho, Navet (2010) afirma que um veículo de luxo pode conter mais de 100 unidades controladoras; no caso de uma rede com conexão ponto a ponto entre todas *ECUs*, a cifra chegaria em exorbitantes 10.000 conexões.

Um número alto de conexões gera uma série de problemas para os fabricantes de veículos. Para estabelecer cada conexão, é preciso ao menos um cabo e conectores em suas extremidades. Isso adiciona peso e custo ao veículo, sem contar com a complexidade e os potenciais problemas de compatibilidade eletromagnética adicionados pelo excesso de cabeamento.

Essas adversidades foram detectadas pelo fim da década de 80, quando alguns fabricantes passaram a estudar o uso de uma rede dedicada para auxiliar na comunicação entre as *ECUs*, reduzindo assim a necessidade da comunicação ponto a ponto. Desses estudos, surgiu em 1986 o protocolo CAN, dedicado a ser uma solução para ambientes que requerem uma solução mecanicamente robusta e que sofram o mínimo de interferências eletromagnéticas. O protocolo CAN é um dos protocolos mais utilizados até hoje pela indústria automotiva.

Com o avanço das tecnologias presentes nos automóveis, uma série de outros protocolos foram criados desde o início da utilização do protocolo CAN para suplementá-lo quando este não atingia os requerimentos necessários. Muitos desses protocolos atendiam requisitos que variavam entre maior banda e menor custo. Algumas vezes, a simples competição entre as indústrias provocava a ensejo de criação de um protocolo para superar os concorrentes. Porém, muitos desses protocolos caíram em desuso ao longo dos anos, e não são mais utilizados em veículos fabricados nos dias de hoje.

Desses protocolos, existem quatro bastante utilizados pela indústria atual: CAN, Flexray, LIN e MOST. Cabe notar que esses protocolos praticamente se complementam uns aos outros, de forma que é comum encontrar dois ou três protocolos embarcados em um mesmo veículo.

2.1 CAN

O protocolo foi desenvolvido pelo fornecedor de autopeças Bosch como CAN 2.0 A/B, e “se tornou um padrão internacional nas séries ISO 11898 desde 1993” (CAN..., 2015, tradução minha).

Navet afirma que o protocolo CAN se tornou um padrão utilizado pelas montadoras, devido à “seu baixo custo, sua robustez, e seu restrito *delay* em comunicações” (2005, p. 1207).

Um dos maiores benefícios do protocolo é funcionar em um sistema de barramento, i.e. onde todas as ECUs são interligadas em um único conjunto de linhas de comunicação, como ilustrado na Figura 1. Dessa forma, é possível economizar cabeamento e ainda assim permitir uma comunicação organizada entre todas as ECUs.

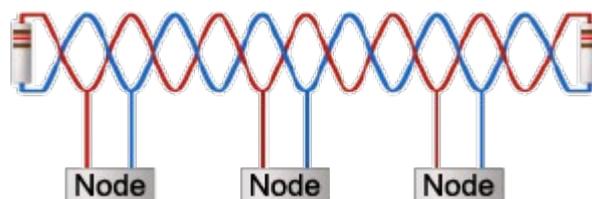


Figura 1- Sistema de barramento empregado no protocolo CAN

Fonte: CAN Knowledge (CAN..., 2015)

Segundo as especificações Bosch, publicadas pela Freescale (FREESCALE..., 1998, pp. 1-2), o protocolo pode ser dividido em três camadas:

- Camada de objeto
- Camada de transferência
- Camada física

As três camadas CAN são equivalentes a duas camadas do modelo OSI, sendo as camadas de objeto e de transferência equivalentes à camada de enlace de dados, e a camada física equivalente a camada de mesmo nome.

A camada de objeto é responsável por “determinar quais mensagens serão transmitidas, decidir quais mensagens recebidas pela camada de transferência serão realmente usadas, e prover uma interface à camada de aplicação” (FREESCALE..., 1998, pp. 1-2).

A camada de transferência é responsável pela transferência em si dos dados, sendo diretamente responsável por “realizar o arbitramento, checagem de erros, sinalização de erros e confinamento de falhas” (FREESCALE..., 1998, pp. 1-2). É por meio dessa camada que o protocolo CAN arbitra se uma mensagem está sendo transmitida no barramento, ou se este está livre para transmissão.

O tratamento dessas duas camadas permite que umas das características mais marcantes do protocolo: as mensagens são enviadas por evento, e não periodicamente em intervalos definidos de tempo. Isso significa que a qualquer momento, uma ECU pode verificar se o barramento está livre e iniciar uma transmissão. Eventuais conflitos podem ser tratados através do próprio protocolo.

A camada física é responsável pela transferência de bits entre as ECUs, em relação as propriedades elétricas do barramento. O principal formato de linhas de comunicação adotado é o de par trançado sem blindagem, que permite um barramento com até 40 m a uma taxa de 1 Mb/s, ou 250 m a 250 kb/s (Navet, 2005, pp. 1207-1208).

O formato do pacote utilizado pelo protocolo é relativamente simples, composto por um bit de início de quadro, um cabeçalho, os dados a serem transmitidos, um código de correção de erros, alguns bits finais de controle e, por fim, mais alguns bits de encerramento de quadro.

O cabeçalho, por sua vez, é composto por 18 bits contendo um identificador, bits de controle e 4 bits indicando o tamanho dos dados transmitidos. Os dados a serem transmitidos formam conjuntos de 8 bits, sendo que um quadro pode levar

de zero a oito desses conjuntos. Dessa forma, um quadro CAN pode conter de 44 a 108 bits. Na Figura 2, é possível ver em detalhes os campos de um quadro CAN.

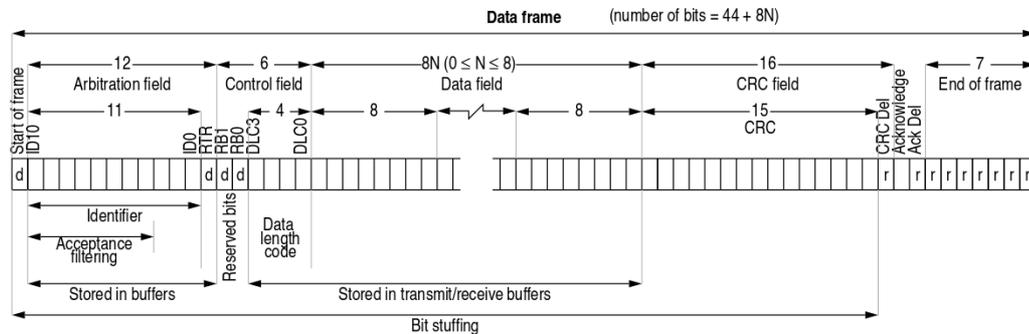


Figura 2- Detalhamento de um quadro CAN
Fonte: FREESCALE, 1998, p. 3-11

2.2 FLEXRAY

No final da década de 90, tecnologias como *drive-by-wire*, controle da dinâmica veicular e assistência de direção tornaram-se cada vez mais proeminentes. O protocolo CAN, já na época o mais utilizado, não atendia os requisitos de banda e temporização dessas tecnologias (SCHEDL, 2007, p. 2)

Para atender essas novas necessidades, os fabricantes BMW e Daimler se uniram para criar o protocolo Flexray. A primeira especificação pública do protocolo foi liberada em 2004, e o primeiro veículo a utilizá-lo foi um BMW X5 em 2006 (FREESCALE..., 2009).

O protocolo Flexray foi desenvolvido para utilizar o mesmo barramento físico do protocolo CAN, utilizando um par trançado para enviar os dados ao barramento.

Além da comunicação em um único canal, o protocolo Flexray implementou a possibilidade de utilização de comunicações usando dois canais, assim provendo redundância, tolerância a falhas e aumento de banda.

Em relação à topologia, o protocolo permite operar não somente em barramento, mas também com topologia "estrela" ou mesmo em topologia híbrida entre as duas, como mostra a Figura 3.

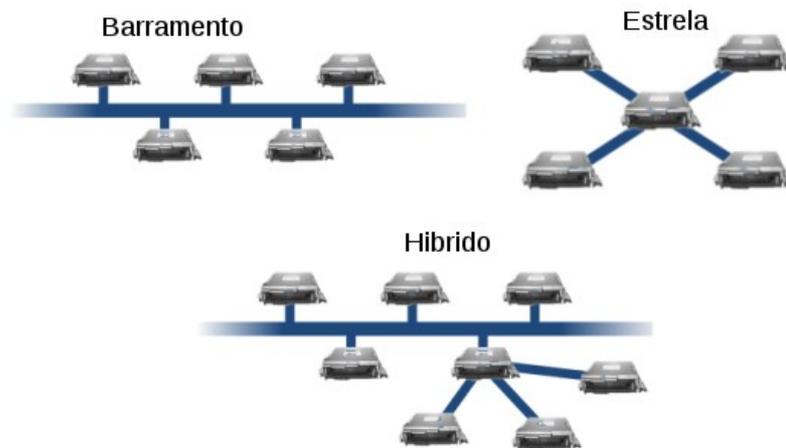


Figura 3- Possíveis topologias utilizadas pelo protocolo Flexray
 Fonte: adaptado de FREESCALE..., 2009

Para solucionar os problemas do protocolo CAN envolvendo garantias de tempo real, o protocolo Flexray utiliza quadros sincronizados, ao invés dos quadros disparados por eventos. Dessa forma, é possível evitar colisões distribuindo o tempo do quadro entre as várias ECUs, que então sub-distribuem o tempo entre seus vários sinais. Isso evita o *overhead* que ocorreria em uma colisão, e ainda traz a vantagem de estabelecer um tempo exato para a chegada das informações, já que elas sempre estarão presentes a cada intervalo de tempo.

Ainda, para acomodar todos os possíveis eventos do veículo sem tornar o quadro demasiadamente grande, o quadro possui uma sessão para transmissão de eventos não-periódicos, em que qualquer ECU pode transmitir qualquer evento, de maneira similar ao que o protocolo CAN permite.

Dessa forma, o protocolo define ciclos de comunicação, no qual parte é reservada à transmissão de quadros periódicos – segmento estático, e parte à transmissão livre de quadros de eventos não-periódicos – segmento dinâmico. A Figura 4 demonstra um ciclo de comunicação, demonstrando também a presença de uma janela de símbolos, usada no controle da transmissão do próprio quadro.

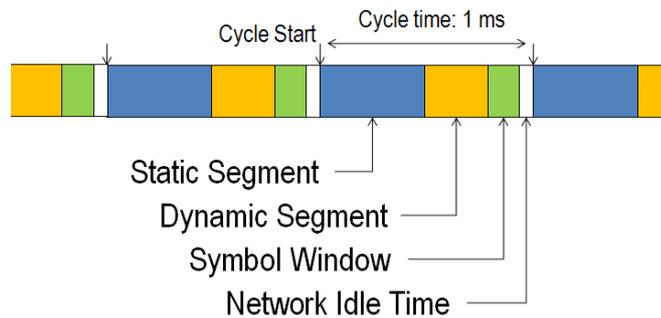


Figura 4- Detalhamento de um ciclo de comunicação do protocolo Flexray
 Fonte: NATIONAL..., 2009, p. 2

O quadro utilizado pelo protocolo Flexray é bastante semelhante ao utilizado pelo protocolo CAN, diferenciando-se basicamente pela quantidade máxima de dados transmitidos. Enquanto o protocolo CAN permite a transmissão de até 8 bytes por quadro, o protocolo Flexray nativamente suporta até 254 bytes, aumentando consideravelmente a eficiência do quadro.

A Figura 5 detalha o quadro do protocolo Flexray desde o ciclo de comunicação, demonstrando o cabeçalho do protocolo e o tamanho possível dos dados transmitidos.

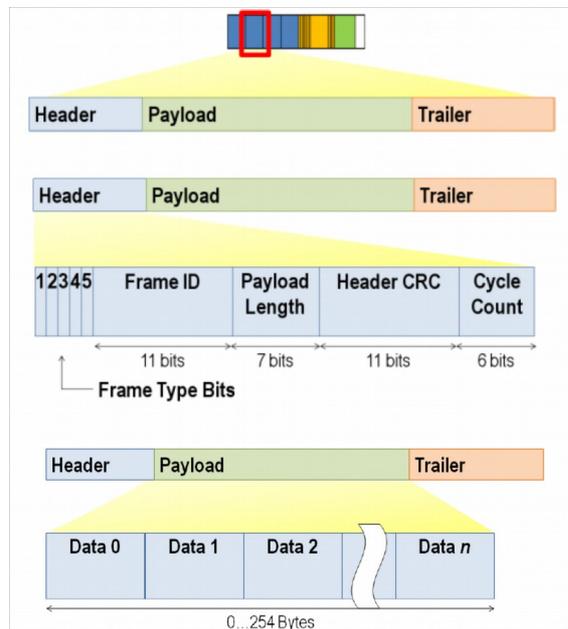


Figura 5- Detalhamento de um quadro Flexray
 Fonte: NATIONAL..., 2009, p. 2

O protocolo Flexray, por suas características de banda e de temporização, seria uma excelente alternativa ao protocolo CAN para atender as novas demandas veiculares. Porém, como afirma Tuohy (2013, p.778), a implementação do protocolo Flexray é muito complexa e assim muito cara, o que “pode se tornar desastrosa para manufatura em alto volume”. Tuohy ainda nota que o consórcio Flexray

foi desmembrado em 2009, indicando uma provável descontinuação da adoção do protocolo.

2.3 LIN

Para a comunicação de dispositivos periféricos de menor importância, como vidros elétricos, retrovisores, limpadores de para-brisa, é necessária somente uma banda muito estreita, já que poucos bits são necessários para controlar a atuação desses dispositivos. Tampouco é necessário um intervalo de tempo restrito nessa comunicação, já que pequenos atrasos na atuação desses dispositivos não afeta nenhum aspecto de segurança do veículo.

Nessa situação, o protocolo CAN se torna demasiado caro, tendo largura de banda e restrições temporais excessivos para os modestos requisitos desses dispositivos periféricos. Surge então no final da década de 90 o protocolo LIN (Rede de Interconexão Local, da sigla em inglês *Local Interconnect Network*), desenvolvido a partir do desejo de fabricantes de utilizar uma alternativa mais barata ao protocolo CAN (TUHOY, 2013, p.778).

Por formar uma rede de baixo custo, usada primordialmente para interligar periféricos, as redes LIN costumam ser utilizadas como redes complementares a outra rede principal – usualmente uma rede CAN –, que então são interligadas através de um *gateway* (NOLTE, 2005, p.p. 987 – 988).

O protocolo LIN trabalha em um sistema de mestre único com múltiplos escravos, sendo que no uso de um *gateway*, esse normalmente é o mestre do barramento. O barramento utiliza um único cabo para a transmissão, permitindo que fabricantes utilizem menos cabeamento justamente nos periféricos mais distantes, o que permite uma maior redução de custos e diminuição de peso do veículo. O protocolo permite transmissões de até 20 kbits/s (LIN, 2010, p. 10).

O protocolo LIN utiliza uma tabela de tempo contendo uma lista de quadros a serem transmitidos e seus *slots* de tempo relacionados, garantindo assim determinismo na sua transmissão (NAVET, 2008, p. 4-6).

Durante a transmissão, o mestre inicia a comunicação enviando um cabeçalho contendo um identificador protegido solicitando uma resposta de um nó escravo. Os escravos então utilizam esse identificador para verificar qual nó deve responder à solicitação. A resposta é então inserida no mesmo quadro de comunicação ini-

ciado pelo mestre, de tal forma que não é necessário o escravo enviar um quadro com todo um cabeçalho para responder uma requisição. A Figura 6 demonstra o quadro LIN em detalhes, em que é possível notar o identificador protegido e a resposta enviada pelo escravo.

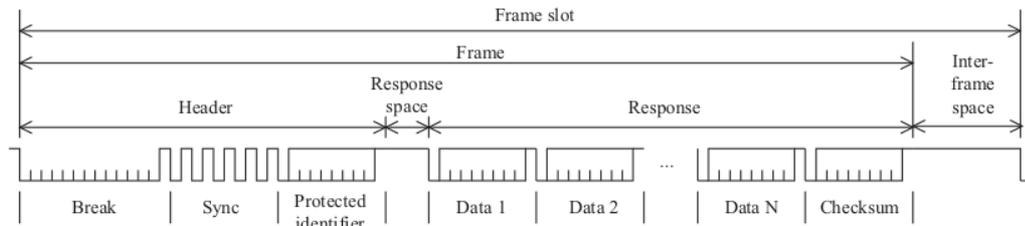


Figura 6- Detalhamento de um quadro LIN
Fonte: NAVET, 2008

2.4 MOST

Com o avanço das opções de entretenimento a bordo e *infotainment*, como aparelhos de GPS, DVD, *Blu-ray*, telefones celulares integrados, vários fabricantes se uniram para criar um padrão de comunicação específico para esse tipo de mídia. Em 1998, surge um consórcio para a implementação do protocolo MOST (Sistema de Transporte Orientado a Mídia, do original *Media Oriented System Transport*) (NAVET, 2008, p. 4-8).

Ao atender especificamente mídias, o protocolo MOST tem maior foco em permitir uma larga banda de transmissão em detrimento de características temporais, como atrasos de comunicação e latência constante. Isso permite a transmissão de vídeos a uma taxa satisfatória em uma rede independente das redes que trafegam dados de tempo crítico do veículo, como o de controle do motor, por exemplo.

O protocolo MOST permite várias velocidades de transmissão, chegando a velocidades de 150 Mb/s (TUOHY, 2013, p. 778). Para permitir essas velocidades, a camada física suporta o uso não somente de cabecamentos elétricos, mas também de fibra óptica plástica

De forma semelhante ao protocolo Flexray, um quadro MOST é dividido em duas sessões: a primeira para dados síncronos, em que a transmissão é constante, e uma sessão assíncrona, que permite a transmissão de dados por eventos, como informações de navegação *internet*.

Como afirma Tuohy (2015, p.535), o protocolo MOST define a maior parte dos detalhes de sua implementação como conteúdo sob licença, e o acesso a tal se dá somente a licenciados. Isso acaba restringindo o acesso a informações e torna mais difícil um comparativo entre os vários protocolos.

2.5 RESUMO DAS REDES ATUAIS

Dadas as características das redes, é possível estabelecer um quadro comparativo entre elas, como na Tabela 1.

	CAN	FlexRay	LIN	MOST
Aplicação	Sistemas de tempo real – chassi, <i>power train</i>	Sistemas de tempo real crítico – <i>X-by-wire</i> , sistemas de direção autônoma	Comunicações de baixo custo – controle climático, acionamentos em geral	Multimedia, <i>infotainment</i> , entretenimento
Banda	100 kb/s a 1 Mb/s	20 Mb/s	19,2 kb/s	150 Mb/s
Atrasos de comunicação	Baixo	Constante	Pode ser alto	Baixo
Mídia física	Elétrico (par trançado)	Elétrico ou óptico	Elétrico (cabo único)	Óptico, suporta elétrico
Custo	Médio	Elevado	Baixo	Médio

*Tabela 1- Comparativo entre protocolos automotivos atuais
Fonte: adaptado de TUOHY, 2015, p. 535*

3 PROTOCOLO *ETHERNET* COMO REDE AUTOMOTIVA

O protocolo *Ethernet* (IEEE 802.3) foi desenvolvido pela Xerox Co. em co-operação com DEC e Intel em 1976, e define as camadas física e de enlace de dados do modelo OSI. Seu uso é bastante disseminado para o acesso à Internet, no qual normalmente é utilizado em conjunto com o protocolo de camada de rede *IP*. Atualmente é a tecnologia de rede mais utilizada nas redes locais (LAN), como afirma Rahmani (2009, p. 19).

Atualmente, o protocolo suporta velocidades de transmissão de 10 Mb/s, 100 Mb/s, 1 Gb/s e 10 Gb/s, com suporte a velocidade de 100 Gb/s iniciado por alguns fabricantes.

3.1 CAMADA FÍSICA

A primeira implementação do protocolo previa a utilização de cabos coaxiais como meio de transmissão. Com a evolução dos meios físicos, rapidamente passou-se a utilizar cabos de par trançado (UTP – *unshielded twisted pair* em inglês) como meio de transmissão usual. Para maior confiabilidade eletromagnética, cabos de par trançado blindados (STP – *shielded twisted pair* em inglês) podem ser utilizados, e fibras ópticas são comumente utilizadas para permitir alta banda a longas distâncias.

Na implementação inicial do protocolo, todos os dispositivos se interligavam através de um barramento formado por um cabo coaxial. Isso levou a utilização de um método de arbitragem para o caso de colisão, o CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Colision Detection* – do inglês acesso múltiplo com sensoramento da portadora/detecção de colisões). Com esse método, uma vez detectada uma colisão no barramento, os dispositivos deverão esperar por um tempo aleatório antes de reenviar os dados colididos. Isso soluciona de maneira simples o problema de envios simultâneos no barramento.

Com a adoção dos cabos UTP ligando dispositivos dois a dois, foi possível adotar a estratégia de envio simultâneo de dados em ambas as direções, o que se tornou conhecido como transmissão *full-duplex*.

3.2 CAMADA DE ENLACE DE DADOS

O cabeçalho de um quadro *Ethernet* é bastante simples, sendo composto por um preâmbulo, um bit de início de quadro (SOF – do inglês *start of frame*), endereços de origem e destino, o tamanho dos dados carregados, os dados em si e uma sequência de verificação do quadro (FCS – *frame check sequence*). A Figura 7 demonstra um quadro *Ethernet* e o tamanho do cabeçalho em bytes.

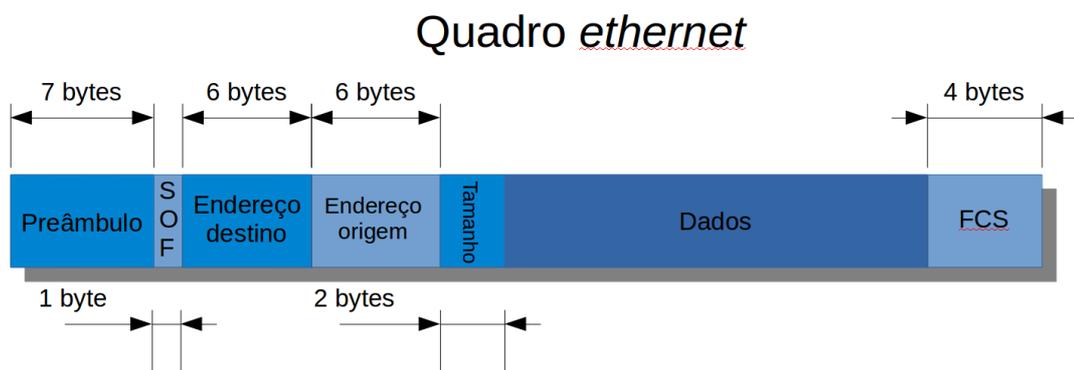


Figura 7- Quadro Ethernet
 Fonte: adaptado de IEEE, 2012, p. 53

Os endereços de destino e origem identificam um *hardware* único através do endereço MAC (Controle de Mídia de Acesso, do original em inglês *Media Address Control*). Os endereços MAC são formados por 6 bytes, e identificam o fabricante do *hardware* e a porta são atribuídos a um único dispositivo – ou seja, não existem dispositivos com endereços MAC iguais.

Os bytes que identificam o tamanho dos dados carregados podem servir também para um segundo propósito: identificar qual o tipo do cabeçalho na sequência. Isso porque muitas vezes o protocolo *Ethernet* envelopa um outro cabeçalho de camada superior, como é o caso do protocolo *IP*, que é comumente utilizado em conjunto. Como o tamanho do quadro do protocolo é limitado a 1500 bytes, valores de tamanho dos dados maiores que 1536 (0600 hexadecimal) são utilizados para identificar o tipo do próximo cabeçalho, conforme definido na norma 802.3 da IEEE (IEEE, 2012, p. 56). Esse identificador é chamado de *ethertype*.

A sequência de verificação de dados é utilizada para verificar a integridade dos dados do cabeçalho *Ethernet*. Essa sequência não é utilizada para verificação dos dados carregados pelo protocolo.

3.3 VLAN

O conceito de rede local virtual (VLAN – *Virtual Local Area Network*) surgiu para dividir uma rede física em várias redes lógicas independentes que não se comunicam entre si. Com o uso de VLANs, é possível separar o tráfego em redes distintas, mesmo que essas trafeguem nos mesmos meios físicos.

O rótulo que identifica que um quadro pertence a uma certa VLAN é inserido após o cabeçalho inicial do protocolo *Ethernet*, como pode ser visto na Figura 8. O rótulo contém, além do número da VLAN do quadro, um identificador de cabeçalho semelhante ao *ethertype*, além de 3 bits que definem a prioridade do pacote na rede, que varia de 0 a 7. São permitidas as VLANs de 1 a 4094.

A norma IEEE 802.1Q define as diretrizes de uso de VLANs.

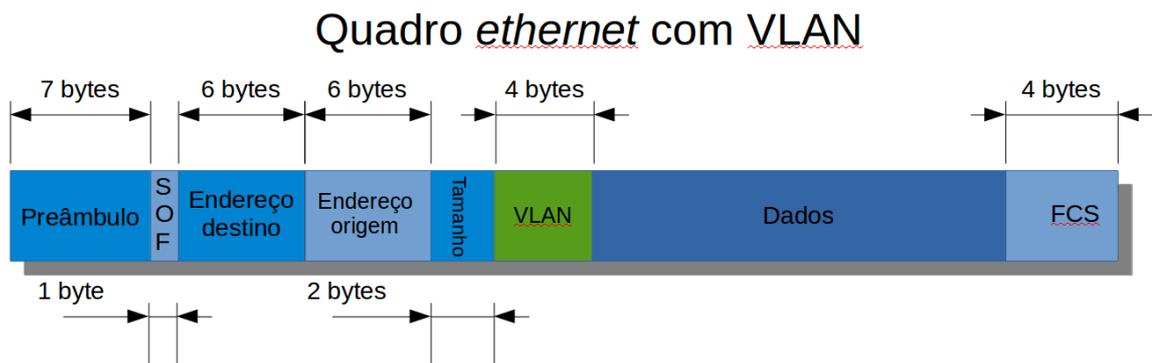


Figura 8- Quadro Ethernet destacando VLAN
Fonte: adaptado de IEEE, 2012, p. 53

3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO – QOS

O uso do rótulo de VLAN traz consigo um campo de prioridade do quadro. Isso foi inserido para permitir que identificar quais quadros têm maior prioridade sobre outros, permitindo o gerenciamento de situações de congestão da rede.

Em situações de congestão, deve-se permitir que quadros que carregam dados de maior importância, ou dados de que possuem restrições no tempo de entrega, sejam enviados antes de dados de menor importância ou com maior tolerância a atrasos. Por exemplo, dados de uma transmissão de vídeo em tempo real podem ser priorizados em relação a dados de navegação de uma página web.

Vários fabricantes de equipamentos de telecomunicação implementam estratégias para permitir o controle do encaminhamento dos pacotes de maneira controlada. Esse trabalho não entrará nos detalhes das diversas implementações; basta que seja conhecida a existência dessas estratégias para efeito de comparação com outros protocolos nas seções seguintes.

3.5 ETHERNET VS PROTOCOLOS ATUAIS

Bello (2011, pp. 1 e2) explica dois fatos que motivam o uso do protocolo *Ethernet* como rede veicular. O primeiro fato é a necessidade por maior banda que surge com novas aplicações para assistência na condução (ADAS – *Advance Driver Assistance Systems*, sistemas avançados de assistência ao condutor). Bello firma que sistemas como “sistemas de aviso de troca de faixa, reconhecimento de semáforo/sinais de trânsito, requerem qualidade de imagem e resolução de sensores aprimorados” (Bello, 2011, p. 2).

O protocolo *Ethernet* nativamente suporta aplicações de alta requisição de banda, como a transmissão de vídeo em alta qualidade – requisito para a maioria dos sistemas ADAS. Os protocolos automotivos atuais, em contrapartida, ou suportam uma banda restritiva para transmissões de vídeo, ou seu custo é extremamente elevado para permitir o transporte de vídeos.

O tamanho dos *firmwares* utilizados nas ECUs também um fator crítico no estabelecimento de uma rede que suporte maior banda. Bello cita o caso do *update* da ECU de uma BMW série 7 de quarta geração. O *update* de uma de suas ECUs, que tinha o tamanho de 81Mb, levava cerca de 10 horas sobre a rede CAN utilizada. Na quinta geração do modelo, foi adotado o protocolo *Ethernet* como solução de *update* do *firmware* das ECUs. Como comparação, um *update* de 10 Gb leva apenas 20 minutos no novo modelo.

O segundo fato explicado por Bello é que uma tecnologia comum a todas as aplicações veiculares reduziria a complexidade das comunicações. Na solução adotada pelos fabricantes, cada domínio de comunicação é realizado por um protocolo diferente (vide Tabela 1, linha “Aplicação”). Como explicado no capítulo anterior, os protocolos mais utilizados têm características bem definidas para atender um domínio específico, sendo que nenhum é capaz de atender todos os requisitos necessários para os diferentes domínios de aplicação dos veículos. Isso leva os fabrican-

tes a adotar complexos *gateways* para estabelecer a comunicação entre os diferentes protocolos adotado em um único veículo.

A adoção do protocolo *Ethernet* como único protocolo permitiria simplificar a estrutura das redes, o que levaria a uma redução drástica nos custos de fabricação dos veículos. Outro fator crucial para a redução nos custos seria a utilização de componentes fabricados em massa, já que esses são amplamente adotados nas redes e computadores, e os fabricantes não ficariam limitados a componentes específicos para veículos.

Existem porém algumas limitações na adoção do protocolo *Ethernet* diretamente em veículos. A primeira preocupação que surge é em relação a compatibilidade do protocolo ao ambiente interior de um automóvel. O cofre do motor geralmente opera a altas temperaturas, e a radiação eletromagnética gerada pelo centelhamento das velas do motor pode ser bastante alto. Toda rede atuante em um veículo deve ser capaz de tolerar esse rigoroso ambiente.

Jones (2009, p. 1) afirma que altas temperaturas não devem ser um problema para redes *Ethernet*, já que essas operam com baixo consumo. Segundo o autor, aplicações industriais já fazem uso de redes *Ethernet* em condições de temperatura mais extremas que um veículo. O mesmo também é válido para a susceptibilidade a descargas eletroestáticas, segundo o mesmo autor.

Já a interferência eletromagnética pode ser um problema para a adoção do protocolo. Em um teste com uma rede *Fast Ethernet* (100Mb/s), ao se utilizar cabos UTP e enviar um tráfego perto do limite da rede, pode-se observar que as emissões eletromagnéticas superavam o limite adotado por outros protocolos veiculares (Jones, 2009, p. 2). Ao se realizar o mesmo teste com cabos STP, os limites não foram ultrapassados, porém os cabos STP são muito mais caros que os cabos UTP, além de requererem conectores especiais e de ter peso superior por metro. Fibras plásticas também poderiam ser adotadas, já que não emitem radiação eletromagnética, porém os custos das fibras e dos conversores ópticos supera até mesmo a solução com cabos STP.

A segunda preocupação é relacionada a garantia de entrega das informações nos tempos adequados. Rahmani afirma que “o tráfego intraveicular consiste de vários tipos diferentes de tráfego, de dados de controle em tempo real a *streams* de áudio e vídeo e dados *best effort*¹” (2009, p. 2). Com isso, em casos de conges-

¹Tráfego *best effort* é todo tráfego que potencialmente pode ser descartado em casos de congestão.

tão dos meios de transmissão, é necessário garantir a entrega de informações críticas. Ainda, certos dados precisam ser entregues em tempo real – i.e., existe uma limitação de tempo na validade dos dados transmitidos –, o que exige que esses dados sejam encaminhados antes que outros dados. Rahmani ainda afirma que o protocolo *Ethernet* nativo não suporta garantias de qualidade de serviço e de entregas em tempo real.

Solucionar esses problemas permitirá o uso do protocolo como rede automática. A próxima seção abordará as diferentes soluções propostas atualmente pelo meio acadêmico, comparando as diferentes abordagens escolhidas.

4 PROPOSTAS DE ADAPTAÇÕES VISANDO VIABILIDADE

Uma busca em na base de artigos da IEEE revela uma quantidade razoável de artigos relacionados a aplicação do protocolo *Ethernet* como rede automotiva. Muitos desses artigos propõe soluções para viabilizar o uso do protocolo, já que esse ainda apresenta algumas restrições, como apresentado no final da seção anterior.

A próxima seção se dividirá nas diferentes propostas analisadas pelo meio acadêmico, agrupados em soluções semelhantes.

4.1 CAMADA FÍSICA

O uso de cabos UTP ultrapassa limites de emissões eletromagnéticas impostos para redes veiculares. Cabos STP ou fibras plásticas são demasiadamente caras para uma aplicação veicular.

Hank et. al. divulga em dois trabalhos (2012, pp. 79 – 87) (2013, p. 3) a utilização de uma solução apresentada pela Broadcom, o BroadR-Reach, que permite a utilização de cabos UTP no interior do veículo mantendo uma velocidade de transmissão de 100 Mb/s. Ainda, a solução reduz o uso de cabos para apenas um par trançado, em relação aos três pares necessários para a transmissão convencional à mesma velocidade.

A solução, de fato, têm apoio de muitos fabricantes. O consórcio OPEN Alliance SIG foi formado com o objetivo inicial de promover a adoção da tecnologia BroadR-Reach como padrão de rede automotiva, e atualmente conta como membros fabricantes como BMW, Daimler AG, Hyundai, Volvo, Toyota, Renault, entre outros, como membros divulgadores. Mais de uma centena de fabricantes de componentes automotivos e instituições acadêmicas são membros do consórcio, indicando um alto interesse na tecnologia.

Em uma busca nos acervos da IEEE, os poucos artigos que tratam de soluções para a camada física citam os trabalhos de Hank et. al. e o consórcio OPEN Alliance SIG. Embora nenhuma outra solução seja discutida, o que indicaria que a

solução proposta atende os requisitos, nenhum trabalho expõe testes quantitativos indicando o atendimento da questão.

4.2 ETHERNET E 802.1Q

Alguns dos trabalhos iniciais buscando utilizar o protocolo *Ethernet* como rede automotiva utilizam de características mais comuns do protocolo, como rotulamento de VLAN e priorização de pacotes, para garantir qualidade de serviço e entregas de pacotes em tempo real.

Kern et. al. (2011) apresentam um conceito inicial de migração do protocolo CAN. Em seu trabalho, os autores simulam o tráfego de uma rede CAN cujos quadros foram envelopados em quadros *Ethernet/IP*. São utilizados dados de vários veículos na simulação. Três variantes de envelopamento são comparadas, desde o envelopamento direto do quadro CAN até agrupamento de vários quadros CAN em um único quadro *Ethernet*. Os resultados apresentados indicam ser possível essa abordagem, sendo que a banda consumida até na variante mais simples permanece abaixo de 25MB/s. Apesar dos resultados iniciais promissores, nenhuma restrição de entrega em tempo real foi analisada no trabalho, o que poderia prejudicar a abordagem. Ainda, não foi encontrado nenhum outro trabalho que aprofunde a análise inicial do autor, o que potencialmente indica que a abordagem não foi muito bem-sucedida.

Já Lim et. al. (2011) buscam diretamente em seu trabalho demonstrar que aplicações de envio de dados em tempo real é possível no cenário automobilístico. Na simulação realizada, os autores utilizam dados de aplicações de entretenimento, como transmissão de áudio e vídeo, dados de aplicações de sistemas de auxílio ao condutor (ADAS), como câmeras frontais e laterais, e dados de aplicações de controle do veículo, e simulam a transmissão desses dados em uma única rede veicular. A transmissão é realizada por uma única rede padrão *Fast Ethernet*, e a performance de várias topologias são avaliadas. Como cada domínio de aplicação tem diferentes requerimentos de banda e restrições de atraso máximo de entrega, os autores utilizaram algoritmos de priorização em conjunto com a marcação de prioridade dos pacotes, que são priorizados em até quatro categorias.

Os autores conseguiram comprovar que nessa situação, o protocolo *Ethernet* atende todos os requisitos de banda e atraso das aplicações, até mesmo

quando o algoritmo de priorização não foi utilizado. A deficiência do trabalho, segundo até os próprios autores, é que em nenhum caso foi testada uma situação de congestão da rede, situação de maior criticidade em uma rede e com maior potencial para gerar atrasos incompatíveis com requisitos apontados.

Lee e Park (2013) apresentam uma simulação de uma situação hipotética de congestão da rede, verificando se é possível o envio de dados de controle com restrição de atraso de apenas 100 μ s nessa situação. A restrição de atraso de até 100 μ s atende até casos de mensagens de controle críticas, e é semelhante ao requisito de atraso máximo de protocolos como CAN e Flexray.

Lee e Park analisam que uma situação crítica para o envio de dados pode ocorrer mesmo quando existe um algoritmo de priorização extremamente eficiente. Nessa situação, um quadro com o tamanho máximo de transmissão (1528 bytes, considerando os intervalos de transmissão) comece a ser encaminhado por um *switch*. Em sequência, um quadro de alta prioridade, com restrição de atraso de 100 μ s chega no *switch* para ser encaminhado. Como a transmissão do primeiro quadro já foi iniciada, o algoritmo de priorização deverá aguardar o fim de sua transmissão antes de transmitir o quadro de alta prioridade. Porém, a transmissão de um quadro de 1528 bytes em uma rede 100 Mb/s demora ao menos 122,08 μ s, o que invalidaria o quadro de alta prioridade aguardando para ser transmitido.

Para contornar esse problema, os autores propuseram uma alteração no tamanho máximo do quadro (MTU). Para validar o conceito, os autores simularam uma topologia com dois *switches*, e iniciaram o encaminhamento de pacotes com diferentes características. Foram encaminhados simultaneamente quatro fluxos de dados de alta prioridade, com atraso máximo de 100 μ s, quatro fluxos de dados provenientes de câmeras, com banda total de 25 Mb/s, e quatro fluxos de dados com características distintas. Com a redução do MTU para valores em torno de 400 bytes, foi possível atender todos os requisitos de atraso para todos os fluxos. Esse resultado é bastante promissor, e indica que é possível a transmissão de dados de controle de alta prioridade simultaneamente com outros dados que requerem alta banda em uma mesma rede *Ethernet*.

4.3 ETHERNET 802.1 AVB

O padrão 802.1 AVB (*Audio Video Bridging* – comutação de áudio e vídeo, em tradução livre do original) foi concebido como um grupo de normas técnicas para prover a transmissão de serviços sincronizados e de baixa latência através das redes *Ethernet*.

Bello (2014, p. 3) afirma que as principais especificações da norma são os padrões IEEE 802.1AS, 802.1Qat e 802.1Qav. O padrão 802.1AS é uma variação do bastante utilizado padrão IEEE 1588, e prevê a sincronização de *clock* nos dispositivos de uma rede *Ethernet* com uma precisão maior que 1 μ s. O padrão 802.1Qat permite a reserva de recursos como *buffers* e filas de transmissão nos *switches* ao longo do caminho da transmissão do conteúdo. Já o padrão 802.1Qav separa tráfegos de tempo crítico do tráfego não crítico, separando-os em diferentes classes e estendendo o protocolo 802.1Q (rotulamento de VLAN). Por fim, o padrão ainda define duas classes de tráfego de transmissão reservada: Classe A, com latência máxima de 2ms, e Classe B, com latência de 50ms.

Devido a essas características de transmissão garantida, além dos atributos de escalabilidade, custo e performance, o padrão 802.1 AVB tem sido bastante considerado como um facilitador na utilização do protocolo *Ethernet* como rede veicular. O primeiro alvo é a substituição do protocolo MOST, que por ser utilizado especialmente para transmissão de conteúdos de entretenimento, é o que possui características mais semelhantes com as transmissões para o qual o 802.1 AVB foi originalmente concebido. Seu uso também é avaliado para a transmissão de vídeo para sistemas ADAS, como aviso de troca de faixa. Para tráfegos de dados de tempo crítico serão necessários aprimoramentos no protocolo, já que a latência máxima na Classe A ainda é muito superior aos 0,1ms de latência requerida para esse tipo de tráfego.

Zinner (2011) propõe uma implementação de um *gateway* entre redes MOST e Flexray através de uma rede 802.1 AVB. Sua detalhada proposta detalha como realizar a sincronização dos pacotes entre essas redes através do tráfego *Ethernet*, e protótipos para o *gateway* foi construído para avaliar tal proposta. Os *gateways* foram ligados entre si, e em seguida tráfegos MOST e Flexray foram trocados entre os *gateways*. A latência média foi analisada, e a latência atingida pelo tráfego Flexray foi relativamente alta, em torno de 20ms. O próprio autor salienta que

os resultados de latência podem ser um pouco maiores, já que o tráfego Flexray era simulado. Porém, o tráfego MOST surgiu a partir de uma rede real, e os resultados encontrados para o esse tráfego foram bastante encorajadores.

Bello (2014), em sua publicação, faz uma análise qualitativa do estado da arte no uso do 802.1 AVB em automóveis. A autora lista as características do AVB e seus benefícios para os tráfegos em automóveis, e lista alguns estudos realizados com o AVB para reduzir a latência na transmissão do tráfego. Bello argumenta a favor do trabalho de Alderisi (2013), no qual é coautora, em que é apresentado o conceito de priorizar o tráfego periódico (*scheduled traffic*) em uma rede AVB. A proposta é criar uma classe de tráfego acima das Classes A e B para o tráfego periódico, que teria prioridade irrestrita e superior às outras classes – Classe ST. Como o tráfego periódico em uma rede automotiva contém uma quantidade pequena de dados, sua transmissão priorizada não deve afetar os outros tráfegos. De fato, o trabalho de Alderisi simula a uma rede com tráfego periódico simultaneamente com tráfego priorizado nas Classes A e B, e a inclusão da Classe ST permitiu que esse tráfego atingisse baixas latências sem afetar significativamente os tráfegos das outras classes. Os resultados dos tráfegos são apresentados, e os tráfegos periódicos obtiveram latências inferiores a 100 μ s, um resultado bastante promissor.

Alderisi (2012), em outro trabalho, compara a aplicação do protocolo 802.1 AVB como rede veicular com outro protocolo derivado do protocolo *Ethernet*, o *Time Triggered Ethernet* – TTEthernet. O protocolo TTEthernet será brevemente exposto na próxima sessão. A autora utiliza o mesmo cenário simulado do trabalho em que avalia o protocolo 802.1 AVB isoladamente, citado no parágrafo anterior. Na simulação, são gerados tráfegos de várias câmeras simulando um sistema ADAS, junto ao tráfego de sistemas de entretenimento a bordo, como tráfego de áudio e vídeo. São simuladas redes AVB e TTEthernet, e a latência e a taxa de transferência dos tráfegos são analisados e comparados nas duas redes. Os resultados apresentados indicam uma leve vantagem do TTEthernet nos dois quesitos, ainda que ambos atinjam os requisitos necessários para futuros sistemas ADAS e de entretenimento a bordo. A autora ainda sugere que ambos os protocolos poderiam ser usados conjuntamente no futuro, sendo o TTEthernet adequado para a transmissão de dados de tempo crítico, enquanto o AVB seria adequado para transmissões de tráfego de entretenimento, em que a banda é bastante variável.

4.4 TTETHERNET

Segundo Tuohy (2013, pp. 780), o protocolo TTEthernet foi proposto como um candidato para comunicações em tempo real, tanto para redes automotivas como para redes industriais. O protocolo é projetado para permitir a comunicação de dados periódicos e sincronizados em tempo real, junto a um tráfego de baixa prioridade baseado em eventos. O protocolo propõe implementar uma multiplexação por divisão de tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) em cima do protocolo *Ethernet*.

O protocolo divide o tráfego em três tipos: periódico (*time triggered*), com taxa restrita (*rate constrained*) e *best effort*. O primeiro tráfego têm prioridade total sobre os demais, enquanto o segundo têm garantias de entrega dentro da banda requerida. O protocolo ainda permite a preempção de quadros – i.e. se um quadro de maior prioridade é recebido em um *switch* enquanto um quadro de menor prioridade é transmitido, a transmissão do quadro de menor prioridade é interrompida e o quadro de maior prioridade é transmitido; a transmissão do quadro interrompido é retomada assim que a transmissão do outro quadro é finalizada. A preempção de quadros resolve o problema apresentado por Lee e Park (2013), citado na seção 4.4.

O protocolo TTEthernet ainda não tem reconhecimento pelo IEEE, sendo um padrão definido pela SAE (*Society of Automotive Engineers* – Sociedade dos Engenheiros Automotivos) na norma SAE AS6802. Não existem ainda muitos trabalhos avaliando a eficácia do protocolo TTEthernet, sendo o trabalho de Steinbach (2011) um dos mais citados, em seguida pelo trabalho de Alderisi (2012).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do protocolo *Ethernet* como rede automotiva é uma possibilidade viável em um futuro próximo. Apesar das deficiências ainda apresentadas pelo protocolo, é possível identificar muitos autores pesquisando formas de modificar e melhorar o protocolo para superar essas falhas.

Dos obstáculos apresentados, o problema na camada física aparenta estar resolvido. Muitos fabricantes apoiam a adoção do modelo Broad-R-Reach, de tal forma que um consórcio foi montado com o intuito de promover e normatizar o modelo como padrão de comunicação automotiva.

Alguns problemas na priorização de pacotes ainda não estão completamente sanados, em especial no tráfego de dados de alta prioridade em tempo real. Os estudos apresentados indicam resultados promissores, mas para que o protocolo seja realmente adotado, algumas das soluções devem ser ainda padronizadas.

A solução com o protocolo AVB com a adição da classe de *scheduled traffic* é bastante favorável, porém a sua adoção provavelmente dependa primeiro de uma padronização da solução como norma IEEE para que os fabricantes de equipamentos comecem a utilizá-la.

O padrão TTEthernet também parece bastante promissor, apesar de seu desenvolvimento ser realizado praticamente por uma única empresa, além de sua padronização ter ocorrido somente pela SAE, indicando um possível uso somente no domínio automotivo. A adoção do protocolo *Ethernet* é buscado justamente pela sua ampla utilização em vários domínios, e um protocolo especificamente desenvolvido para o ambiente veicular não traria muitas vantagens sobre os protocolos utilizados hoje.

Deve-se atentar ainda que muitos dos resultados dos trabalhos apresentados são provenientes de simulações. A utilização das simulações permite demonstrar um conceito muito próximo à realidade, mas para um cenário tão restritivo como o ambiente veicular testes com implementações reais serão necessárias antes de indicar uma possível adoção do protocolo.

Cabe finalmente citar que em alguns veículos o protocolo já é utilizado no diagnóstico de falhas e no *upgrade* de *firmware* de ECUs. Porém, esse uso é restrito ao veículo estacionado, e o seu uso em situações normais ainda não foi verificado.

Após a verificação da plausibilidade da adoção do protocolo em implementações reais, a primeira adoção do protocolo *Ethernet* deve ser na substituição do protocolo MOST. O MOST é utilizado na transmissão de conteúdo de entretenimento a bordo do veículo, e a sua troca por uma rede *Ethernet* AVB é natural tanto pelo formato do conteúdo transmitido, quanto pela baixa preocupação com relação a falhas, que não prejudicariam a segurança do veículo.

Próximos trabalhos podem focar na utilização do protocolo AVB, tanto em uma implementação prática, quanto na busca do estado da arte das soluções demonstradas pela academia para resolver seus problemas de priorização de tráfego em tempo real.

REFERÊNCIAS

ALDERISI, Giuliana et. al.. **Introducing Support for Scheduled Traffic over IEEE Audio Video Bridging Networks**. 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), pp. 1-9. Cagliari, Itália, set. 2013

ALDERISI, Giuliana et. al.. **Simulative Assesments of IEEE 802.1 Ethernet AVB and Time-Triggered Ethernet for Advanced Driver Assistance Systems and In-Car Infotainment**. Vehicular Networking Conference (VNC), pp. 187-194. Seoul, Coreia do Sul, nov. 2012.

AMPG BODY ELECTRONICS SYSTEMS ENGINEERING TEAM. **Future Advances in Body Electronics**. Freescale, 2013. Disponível em < http://cache.freescale.com/files/automotive/doc/white_paper/BODYDELECTRWP.pdf >. Acesso em: 25 ago. 2015, 23:52.

BELLO, Lucia L. **The case for Ethernet in Automotive Communications**. ACM SIGBED Review - Special Issue on the 10th International Workshop on Real-time Networks, v 8, n.4. Nova York; dez 2011.

BELLO, Lucia L. **Novel Trends in Automotive Networks: A Perspective on Ethernet and the IEEE Audio Video Bridging**. Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), pp. 1-8. Barcelona, Espanha, set 2014.

CAN IN AUTOMATION. **CAN Knowledge**. Disponível em < <http://www.can-cia.de/can-knowledge/> >. Acesso em: 10 set. 2015, 0:21.

FLEXRAY CONSORTIUM. **FlexRay Requirements Specification**. Versão 2.1, 19 dez. 2005.

FREESCALE SEMICONDUCTORS. **Bosch Controller Area Network (CAN) Version 2.0**. Rev. 3, 1998. Disponível em < http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/BCANPSV2.pdf >. Acesso em: 12 set. 2015, 18:38.

FREESCALE SEMICONDUCTORS. **FlexRay Communication System**. 2009. Disponível em <http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/fact_sheet/FLEXCOMMSYSTM4FS.pdf>. Acesso em: 12 set. 2015, 18:54.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

HANK, Peter et. al. **Automotive Ethernet, a hollistic approach for a next generation in-vehicle networking standard**. Advanced Microsystems for Automotive Applications. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag, 2012, pp. 79 – 89.

HANK, Peter et. al. **Automotive Ethernet: In-vehicle Networking and Smart Mobility**. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Grenoble, França, mar 2013.

HELGE ZINNER, Josef et.al. **Application and Realization of Gateways between convetional Automotive and IP/Ethernet-based Networks**. Design Automation Conference (DAC), pp. 1-6. Nova York, jun. 2011.

IEEE COMPUTER SOCIETY. **IEEE Standard for Ethernet**. Revisão da norma IEEE Std 802.3-2008. Nova York, 2012.

JONES, Mike. **EMI Challenge to Ethernet in the Car**. San Jose: Micrel Inc., 2009. Disponível em <http://www.micrel.com/_Products/LanSolutions/automotive_ethernet_emi.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2016, 23:35.

KERN, Andreas et. al. **An Automated Data Structure Migration Concept – From CAN to Ethernet/IP in Automotive Embedded System (CANoverIP)**. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Grenoble, França, mar 2013.

LEE, Youngwoo; KYOUNGSOO, Park. **Meeting the Real-time Constrins with Standard Ethernet in an In-Vehicle Network**. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 1313 – 1318. Gold Coast, Australia, jun 2013.

LIN CONSORTIUM. **LIN Specification Package**. Rev 2.2A, 31 dez. 2010.

LIM, Hyung-Taek; VÖLKER, Lars; HERRSCHER, Daniel. **Challenges in a Future IP/Ethernet-based In-Car Network for Real-Time Applications**. Design Automation Conference (DAC), 2011 48th ACM/EDAC/IEEE. Nova York, EUA, jun 2011.

KOOPMAN, Philip. **The FlexRay Protocol**. Pittsburgh, Novembro 2013. Disponível em <https://www.ece.cmu.edu/~ece649/lectures/22_flexray.pdf>. Acesso em: 12 set. 2015, 18:39.

MANDERSCHIED, Martin; LANGER, Falk. **Network Calculus for the Validation of Automotive Ethernet in-Vehicle Network Configurations**. International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), pp. 206 – 211, out 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS. **FlexRay Automotive Communication Bus Overview**. Agosto 2009. Disponível em <<http://www.ni.com/white-paper/3352/en/pdf>>. Acesso em: 12 set. 2015, 18:22.

NAVET, Nicolas et. al. **Trends in Automotive Communication Systems**. Proceedings of the IEEE, v. 93, n. 6, jun 2005.

NAVET, Nicolas et. al. **Multicore scheduling in automotive ECUs**. Toulouse, maio 2010. Disponível em <http://nicolas.navet.eu/publi/ERTSS2010_MulticoreScheduling.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015, 23:57.

NAVET, Nicolas; SIMONOT-LION, Françoise. **A Review of Embedded Automotive Protocols**. Automotive Embedded Systems Handbook, Industrial Information Technology Series, p. 4-1, abril 2008.

NOLTE, Thomas; HANSSON, Hans; BELLO, Lucia L. **Automotive Communications – Past, Current and Future**. In: 10th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, v. 1, p. 992, set. 2005.

RAHMANI, Mehrnoush. **A Resource-Efficient IP-based Network Architecture for In-Vehicle Communication**. 2009. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Informática, Univeridade Técnica de Munique, Munique, Alemanha, 2009.

ROBERT BOSCH GMBH. **CAN Specification**. Versão 2.0. Stuttgart, 1991.

SCHEDL, Anton. **Goals and Architecture of FlexRay at BMW**. In: Vector FlexRay Symposium, 6 mar. 2007.

STEINBACH, Till et. al. **Real-time Ethernet for Automotive Applications: A Solution for Future In-Car Networks**. International Conference on Consumer Electronics, pp. 216-220. Berlim, Alemanha, set. 2011.

TUOHY, Shane et. al. Next Generation Wired Intra-Vehicle Networks, A Review. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM (IV). **Anais eletrônicos...** Gold Coast, jun 2013.

TUOHY, Shane et. al. Intra-Vehicle Networks, A Review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 16, n. 2, abril 2015.