

Rede Sensível ao Tempo: Um Estudo do Mapeamento Sistemático

Fernando Henrique Nascimento de Souza



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2019

Fernando Henrique Nascimento de Souza

Rede Sensível ao Tempo:
Um Estudo do Mapeamento Sistemático

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

Orientador: Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca

Maio de 2019

S729r Souza, Fernando Henrique Nascimento de. Rede Sensível ao Tempo: Um estudo do Mapeamento Sistemático / Fernando Henrique Nascimento de Souza. - João Pessoa, 2019. 62 f. : il.

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

1. mapeamento sistemático. 2. mecanismos. 3. padrões. 4. TSN. I. Fonseca, Iguatemi. II. Título.

UFPB/CI



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Ciência da Computação intitulado ***Rede Sensível ao Tempo: Um Estudo do Mapeamento Sistemático*** de autoria de Fernando Henrique Nascimento de Souza, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

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

Prof. Dr. Hugerles Sales Silva
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho
Universidade Federal da Paraíba

Coordenador(a) do Departamento de Informática
Gustavo Henrique Matos Bezerra Motta
Centro de Informática - Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, 27 de maio de 2019

"Continuous effort — not strength or intelligence — is the key to unlocking our potential." (Winston Churchill)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me incentivaram nos estudos, mesmo quando eu fazia de tudo pra não estudar. Eles ofereceram todo o suporte, além de sempre estarem presentes durante minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me mostrar que a vontade Dele é melhor que a minha e por colocar pessoas honestas, competentes e confiáveis ao meu lado.

Agradeço à minha família, minha mãe Gilvaneide, meu pai Fernando, minha avó Givonete e minha irmã Layse, por estarem sempre a postos quando precisei, por serem meu porto seguro e por todo esforço que me permitiu seguir em frente.

Agradeço especialmente a minha namorada, Maiara, minha companheira de anos. Ela foi (e é) um pilar absoluto de honestidade, apoio, organização e paciência durante os anos da graduação.

Ao meu orientador, Iguatemi e ao meu colega Aellison Cassimiro, por toda paciência e por sempre auxiliarem nas minhas dúvidas e decisões relacionadas ao Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

A todos os membros do LaR – Laboratório de Redes da UFPB - Universidade Federal da Paraíba, pela ajuda na compreensão do tema nos debates semanais, tornando esse trabalho possível.

Aos colegas do Counter-Strike: Global Offensive (CS:GO) que me ajudaram a relaxar nos momentos difíceis durante a realização deste trabalho.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

RESUMO

A rede sensível ao tempo (TSN) é uma tecnologia que visa fornecer um nível de determinismo totalmente novo. Ela é formada por um conjunto de padrões, os quais ainda estão sendo desenvolvidos pelo grupo de trabalho IEEE 802.1. Eles visam fornecer uma rede com perda de pacotes extremamente pequena além de latências calculáveis e *jitter* limitado. Por ser razoavelmente recente, há uma certa dificuldade de encontrar materiais relevantes para a realização uma pesquisa ou para o desenvolvimento da mesma. Visando essa problemática, o objetivo deste trabalho é realizar um mapeamento sistemático reunindo as informações importantes sobre esta nova tecnologia. A TSN é um conjunto de vários mecanismos. Cada um deles pertence a um padrão do grupo 802.1. O trabalho realizado aqui, fala sobre oito dos principais mecanismos. Deste modo o leitor, que possua algum nível de informação sobre redes, é capaz de compreender os mecanismos mais relevantes e por conseguinte entender como a rede sensível ao tempo funciona e todo o seu potencial.

Palavras-chave: mapeamento sistemático, mecanismos, padrões, TSN.

ABSTRACT

The time sensitive network (TSN) is a technology that aims to provide a whole new level of determinism. It is made up of a set of standards, which are still being developed by the IEEE 802.1 working group. Its goal is to provide a network with extremely small packet loss in addition to calculable latencies and jitter. Because it is fairly recent, there is a certain difficulty finding relevant materials for conducting research or developing it. Based on this problem this problem, the objective of this work is to perform a survey, gathering the important information about this new technology. The TSN is a set of several mechanisms. Each of them belongs to the 802.1 standard group. The work done here, talks about eight of the main mechanisms. In this way, a reader who has some level of information about networks, is able to understand the most relevant mechanisms and therefore can understand how the time sensitive network works, and its full potential.

Key-words: mechanisms, standards, survey, TSN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Componentes das redes TSN.	21
Figura 2	Distribuição de trabalhos (Anos de Publicação).	27
Figura 3	Distribuição de publicações em relação aos países.	28
Figura 4	Distribuição de publicações por base de dados.	28
Figura 5	Gráfico de Bolha.	30
Figura 6	Exemplo de intervalos de tempo.	32
Figura 7	Exemplo de priorização de quadros nos intervalos de tempo.	32
Figura 8	Exemplo da lista de controle.	34
Figura 9	Exemplo da rede sem a preempção de quadros.	36
Figura 10	Exemplo da rede com preempção de quadros.	36
Figura 11	Exemplo da rede com a Banda de Guarda.	37
Figura 12	Exemplo da atuação do CQF.	39
Figura 13	Exemplo do funcionamento do FRER.	44
Figura 14	Arquitetura totalmente distribuída.	47
Figura 15	Arquitetura híbrida.	47
Figura 16	Arquitetura totalmente centralizada.	48

LISTA DE ABREVIATURAS

AVB - Audio Video Bridging

BMCA - Best Master Clock Algorithm

CI - Centro de Informática

CNC - Centralized Network Configuration

CQF - Cyclic Queuing and Forwarding

CUC - Centralized User Configuration

EPs - Explicit Paths

FIFO - First In First Out

FPE - Frame Pre-emption

FRER - Frame Replication and Elimination for Reliability

GLC - Gate Control List

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT - Internet of Things

IP - Internet Protocol

IPV - Internal Priority Value

IS-IS - Intermediate System to Intermediate System

LAN - Local Area Network

LLC - Logical Link Control

MAC - Media Access Control Address

MMRP - Multiple Mac Registration Protocol

MSL - Mapeamento Sistemático da Literatura

MSRP - Multiple Stream Reservation Protocol

MVRP - Multiple VLAN Registration Protocol

OSI - Open Systems Interconnection

OSPF - Open Shortest Path First

PCE - Path Control Element

PCR - Path Control and Reservation

PnP - Plug and Play

PSFP - Per-Stream Filtering and Policing

PTP - Precision Time Protocol

QoS - Quality of Service

SDN - Software Defined Networking

SPB - Shortest Path Bridging

SRP - Stream Reservation Protocol

STP - Spanning Tree Protocol

TAS - Time Aware Shaper

TI - Tecnologia da Informação

TO - Tecnologia da Operação

TSN - Time Sensitive Networking

UNI - User Network Interface

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

VLAN - Virtual Local Area Network

WANs - Wide Area Networks

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contextualização	18
1.2	Conhecimentos Prévios	19
1.2.1	Terminologia de Latência	19
1.2.2	Grupo IEEE 802	20
1.3	Organização da Monografia	21
2	ESTUDO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO	23
2.1	Visão Geral	23
2.2	Mapeamento Sistemático em Redes Sensíveis ao Tempo	24
2.2.1	Definição do Tema	24
2.2.2	Questões de Pesquisa	24
2.2.3	Termos de Busca	25
2.2.4	CrITÉrios de Exclusão	25
2.2.5	Taxonomia	26
2.3	Execução do Mapeamento Sistemático e Resultados	26
2.4	Sumário do Mapeamento	30
3	MECANISMOS	31
3.1	Controle de Fluxo	31
3.1.1	Modelador Sensível ao Tempo: IEEE 802.1Qbv	31
3.1.2	Preempção de Quadros: IEEE 802.1Qbu	35
3.1.3	Enfileiramento e Encaminhamento Cíclico: IEEE 802.1Qch	38
3.2	Sincronização do Fluxo	39
3.2.1	Temporização e Sincrinização: IEEE 802.1AS-Rev	40
3.3	Integridade do Fluxo	41
3.3.1	Controle de Caminho e Reserva: IEEE 802.1Qca	41
3.3.2	Replicação de Quadros e Eliminação Para Confiabilidade: IEEE 802.1CB	43

3.3.3	Filtragem e Policiamento Por Fluxo: IEEE 802.1Qci	44
3.4	Gerenciamento de Fluxo	46
3.4.1	Aprimoramentos do Protocolo de Reserva de Fluxo e Melhorias de Desempenho: IEEE 802.1Qcc	46
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	50
	ANEXO A – ARTIGOS APROVADOS NO MAPEAMENTO	52
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Tendo em vista as novas demandas tecnológicas, a tecnologia Rede Sensível ao Tempo (TSN - Time Sensitive Networking) surge como um novo advento, capaz de fornecer pequena perda de pacotes, além de *jitter* limitado e também garantir latências calculáveis de ponta a ponta, com foco na velocidade e segurança da qualidade da comunicação em tempo real.

Tendo sua origem nos padrões IEEE 802, objetivando oferecer o controle da latência da rede, a fim de promover um novo nível de determinismo. Os padrões têm sido implementados como uma nova sugestão no campo industrial, a chamada indústria 4.0. Sendo usada para atingir os baixos tempos de ciclo, menores que 1 milissegundo. Neste sentido, os ciclos são compreendidos por segmentos de tempo de mesmo comprimento. Ou seja, o tempo é dividido em tamanhos iguais e cada um dos segmentos representa um ciclo que são sempre iguais.

Para a chegada da indústria 4.0 existiu um grande processo evolutivo. Esta evolução teve seu início com a Revolução Industrial realizada nos séculos XVIII e XIX. Durante esta revolução algumas máquinas foram inventadas, uma delas foi a máquina a vapor, dando início a indústria chamada de indústria 1.0. Caracterizada pela produção em série que veio para substituir a antiga produção artesanal. Neste momento houve então o início da mecanização do trabalho, a partir da força das águas, dos moinhos, das máquinas a vapor e alguns outros métodos.

Após a invenção da eletricidade foi chegada a hora da indústria 2.0. Motores e iluminação artificial tornaram possível estabelecer linhas de montagem e, com isso, gerou-se um grande aumento na produção. As indústrias 4.0 vêm com o intuito de substituir as indústrias atuais, as 3.0, estas por conseguinte são representadas pela utilização de robôs e computadores para otimizar as linhas de produção e são interpretadas como sendo uma pirâmide. Esta nova versão, a 4.0, tem surgido a partir da evolução da Web, sendo caracterizada pelo grande uso da inteligência coletiva e da inteligência artificial, juntamente com a automação em algumas etapas das indústrias, etapas estas que são realizadas por pessoas nas indústrias atuais [1].

Outras características importantes das redes TSN é que, segundo [2], elas permitem a convergência de dados, com isso a Tecnologia da Operação (TO), a Tecnologia da Informação (TI) e a Internet das Coisas (IoT - Internet of Things) possuem um único padrão, criando assim um pilar ao contrário de uma pirâmide, normalmente encontrada nas indústrias atuais.

Como foi citado anteriormente, as redes TSN utilizam um conjunto de padrões já

conhecidos, isso faz com que não haja a necessidade da criação de padrões totalmente novos. Por ser razoavelmente recente, há uma certa dificuldade de encontrar materiais relevantes para a realização uma pesquisa ou para o desenvolvimento da mesma. Visando essa problemática, o objetivo deste trabalho é realizar um mapeamento sistemático reunindo as informações importantes sobre esta nova tecnologia. Sabendo que a TSN é um conjunto de vários mecanismos e cada um deles pertence a um padrão do grupo 802.1, este trabalho apresenta oito dos principais mecanismos. Deste modo o leitor, que possua algum nível de informação sobre redes, é capaz de compreender os mecanismos mais relevantes e por conseguinte entender como a rede sensível ao tempo funciona e todo o seu potencial.

Tendo em vista a necessidade de um embasamento na área, a seção 1.2 discute sobre os conhecimentos prévios necessários para um melhor entendimento deste trabalho.

1.2 Conhecimentos Prévios

1.2.1 Terminologia de Latência

O termo TSN refere-se a um conjunto de padrões que tem como um dos objetivos fornecer baixas latências, por exemplo, na ordem de alguns milissegundos ou menos de um milissegundo. A latência mencionada anteriormente refere-se ao atraso total do pacote de ponta a ponta, ou seja, o atraso desde o instante do início da transmissão pelo emissor até a recepção completa pelo receptor. As aplicações das redes TSN requerem frequentemente latência determinística, isto é, todos os quadros de um determinado fluxo de tráfego de aplicação não devem exceder um determinado limite [3]. Um motivo para este requisito, é que dessa maneira é possível assegurar o funcionamento adequado dos sistemas, como por exemplo, os sistemas de automação industrial.

Latência e o *jitter* são as duas principais métricas de Qualidade de Serviço (QoS - Quality of Service) para redes sensíveis ao tempo. O *jitter*, refere-se às variações do atraso dos pacotes. Os sistemas TSN frequentemente requerem que estas variações sejam baixas a fim de garantir a QoS e a entrega dos pacotes no tempo esperado ou o mais próximo dele. Os requisitos de QoS podem variar, ou seja, a latência e o *jitter* podem mudar de acordo com a aplicação e sua necessidade. Por exemplo, algumas aplicações de controle industrial têm limites de atraso muito restritos, como de apenas alguns microssegundos, enquanto outras aplicações de controle industrial têm um atraso mais amplo de até um milissegundo. É importante ressaltar que, a depender da aplicação, esta diferença de limites pode não ser tão importante. Existem casos onde as aplicações possuem barreiras físicas que impedem que as grandes máquinas, usando o setor industrial como exemplo, usufruam deste estreitamento de requisito, fazendo assim com que a relação custo-benefício, em diminuir o limite de atraso nestes casos, não seja algo viável [4].

1.2.2 Grupo IEEE 802

O Grupo de Trabalho IEEE 802 é formado por vários grupos menores, conhecidos como grupos de tarefa. Este grupo de trabalho está em operação desde março de 1980 e tem como objetivo desenvolver padrões para redes de área locais (LANs - Local Area Networks) e metropolitanas (MANs - Metropolitan Area Networks), focando principalmente nas camadas físicas e de enlace do modelo OSI [5].

O grupo de tarefas do IEEE, mais especificamente o IEEE 802.1, possui padrões e protocolos que estendem os tradicionais padrões de camada de enlace da Ethernet a fim de garantir transmissão de dados com latências pequenas e limitadas, além do baixo *jitter* e da baixa perda de pacotes, sendo assim ideal para controle industrial e aplicações automotivas [6] [7]. Segundo [8] este grupo está encarregado de desenvolver padrões e práticas recomendadas nas seguintes áreas: arquitetura de rede de área local e de área metropolitana, interconexão entre redes locais, metropolitanas e outras redes de longa distância, segurança, gerenciamento geral de redes e camadas de protocolo acima das camadas MAC e de controle de enlace lógico (LLC- Logical Link Control).

O IEEE 802.1 divide seu trabalho nos seguintes grupos de tarefas:

- Segurança.
- Rede Sensível ao Tempo (TSN).
- OmniRAn.
- Manutenção.

O grupo de tarefas responsável pela Rede Sensível ao Tempo (TSN - Time Sensitive Networking), que é o foco deste trabalho, teve seu surgimento apenas em 2012. Isto se dá ao fato de que sua aparição o é o resultado da renomeação de um outro grupo já existente, o grupo de tarefas Ponte de Áudio e Vídeo (AVB - Audio Video Bridging). O AVB por sua vez surgiu em 2005 e tinha foco nas transmissões de áudio e vídeo, porém os recursos deste grupo tornaram-se interessantes para outros casos de uso, como os industriais e os automotivos. Somando isto ao fato de que o nome AVB não é um nome apropriado para cobrir todos os casos de uso, foi-se necessário então a alteração do nome do grupo de tarefas de “Grupo de Tarefas AVB” para “Grupo de Tarefas TSN”.

Ainda de acordo com [8], a nomenclatura dos projetos 802.1 são identificados usando nomes de projeto como 802.1Q, 802.1ad e 802.1Qat. Após o “802.1” podem existir uma, duas, três ou até quatro letras. Os padrões com letras maiúsculas, como por exemplo o 802.1Q ou 802.1AX são padrões independentes. Já letras minúsculas identificam as alterações a estes padrões, as chamadas ementas, como por exemplo os padrões

802.1ah, 802.1Qbg ou 802.1AEbn. Os formulários de três e quatro letras foram introduzidos para melhor identificar as emendas. Neste esquema, a primeira ou as duas primeiras letras (sempre maiúsculas) identificam o padrão que está sendo alterado, e as duas últimas (sempre minúsculas) identificam o projeto que está alterando este padrão.

De acordo com [5], as emendas são incorporadas periodicamente em uma revisão do padrão principal. Por sua vez a notação 802.1Q-REV é usada para identificar uma revisão de um padrão existente. Essas revisões consistem em mudanças mais extensas no texto existente do que as que podem ser realizadas por uma emenda.

Como é possível ver na Figura 1 a pesquisa aqui realizada sobre os mecanismos e princípios padronizados da TSN é organizada em termos das propriedades dos padrões que compõem a TSN. Pois o 802.1Q segundo [5], pode ser considerado como muitos padrões individuais integrados em um único documento.

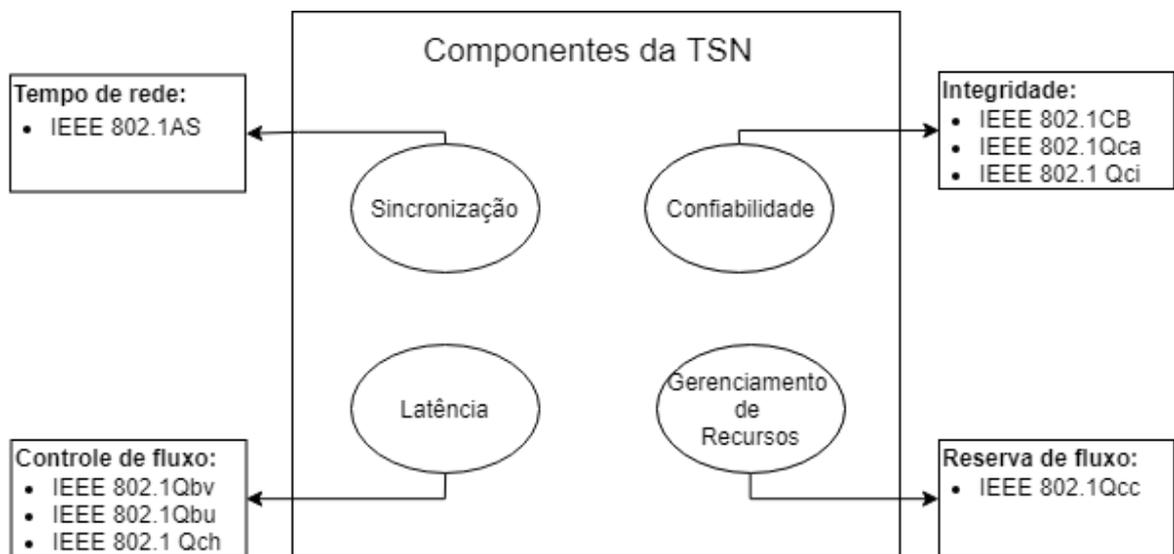


Figura 1: Componentes das redes TSN.

1.3 Organização da Monografia

O Capítulo 2 traz um estudo de mapeamento sistemático com o objetivo de apresentar o estado da arte na área de rede sensível ao tempo, com informações importantes sobre as publicações científicas na área. O principal resultado do estudo de mapeamento é o chamado gráfico de bolha, no qual é possível ter uma visão geral sobre as publicações científicas, encontrando as sub-áreas mais pesquisadas, como também as lacunas, nos quais inexitem trabalhos.

Em seguida, no Capítulo 3, os principais mecanismos que compõem a rede são organizados de acordo com suas propriedades. A primeira subseção retrata os mecanismos que têm como objetivo realizar controle de fluxo. Em seguida, é apresentado o principal

mecanismo utilizado para a sincronização do fluxo, seguido pelos principais mecanismos que têm objetivo garantir a integridade do fluxo são apresentados na área. Por último, o principal mecanismo para gerência da rede é apresentado.

Por fim, uma conclusão é apresentada no Capítulo 4.

2 ESTUDO DE MAPEAMENTO SISTEMÁTICO

2.1 Visão Geral

É fundamental para qualquer pesquisador sempre procurar entender como estão as publicações na sua área de pesquisa, para isso os cientistas normalmente realizam pesquisas periódicas nas suas áreas. Segundo [9], ao se realizar uma pesquisa, existe uma sequência a ser seguida onde o pesquisador inicia seu trabalho pelos estudos primários, sendo estes estudos empíricos que investigam uma questão de pesquisa específica. Em seguida ele segue para um estudo secundário, responsável por revisar os estudos primários relacionados com a sua questão de pesquisa, objetivando integrar e sintetizar as evidências encontradas.

De acordo com [10], é importante ressaltar que a escolha dos trabalhos que serão incluídos nos estudos primários e secundários nem sempre têm um processo formal estabelecido. Nestes cenários, o pesquisador realiza buscas em revistas e periódicos mais importantes de sua área, procurando por publicações que possuem alguma ligação com a sua questão de pesquisa. Conforme [11], uma das razões para a realização de revisões sistemáticas é que ela resume as evidências existentes em relação a um tratamento ou tecnologia. Entretanto, existe ainda o problema em que o pesquisador, naturalmente, não irá conseguir juntar todos os trabalhos encontrados, o que pode acabar deixando algumas lacunas no processo de revisão sistemática da literatura [12].

Em linhas gerais, tudo aquilo que contém um método para funcionar é sistemático, pois significa que é constituído de uma organização própria para que seja posto em prática. Um mapeamento sistemático é uma forma de identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis relevantes para uma questão de pesquisa particular, esta ideia é suportada por [13] quando o mesmo afirma que o mapeamento é um tipo de estudo secundário que permite ao pesquisador ter resultados consistentes sobre as publicações em uma determinada área. O processo de Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL), segundo [14], tem como objetivo fazer uma pesquisa em largura na literatura e não em profundidade, ou seja, um estudo de mapeamento sistemático objetiva fornecer uma visão geral sobre uma área de pesquisa identificando a quantidade, os tipos de pesquisa e os resultados disponíveis [15]. De acordo com [16], esta metodologia tem sido utilizada em algumas pesquisas de engenharia de software, mostrando assim o seu potencial.

Não foi encontrado na literatura nenhum tipo de estudo de mapeamento sistemático em português na área de redes sensíveis ao tempo. Além de ser uma oportunidade inédita para pesquisa brasileira, o mapeamento sistemático nesta área ajudou a definir o tema deste trabalho. A principal contribuição deste estudo de mapeamento é a possibilidade de identificação de lacunas, ou seja, áreas de pesquisa ainda não desenvolvidas, sendo muito

útil para a definição de temas de pesquisa para diversos alunos e pesquisadores. Desta forma é possível perceber que o mapeamento exige um planejamento, isto é, a definição do tema, os termos de busca juntamente com as bases de dados usadas e também os critérios de inclusão e exclusão das evidências encontradas, os quais serão apresentados em um subtópico mais adiante.

2.2 Mapeamento Sistemático em Redes Sensíveis ao Tempo

Como foi visto anteriormente o primeiro passo para o estudo é definir o tema a ser mapeado. Em seguida, é preciso identificar as perguntas que serão respondidas ao final do processo, isto é, as questões de pesquisa. Usando como base estas questões de pesquisa, os termos de buscas que serão submetidos às bases de dados escolhidas devem ser criados. Desta maneira, os trabalhos listados após a utilização dos termos de busca nas bases são analisados utilizando os critérios de exclusão que devem ser definidos no protocolo do estudo. O último passo, conforme [17], é classificar os trabalhos selecionados com a ajuda de uma taxonomia.

O protocolo de pesquisa, mencionado anteriormente, é um documento que tem como objetivo definir os passos que devem ser seguidos pelos pesquisadores do estudo de mapeamento sistemático. No estudo que está sendo apresentado o protocolo está definido nos seguintes tópicos:

2.2.1 Definição do Tema

O tema escolhido para este estudo foi “Rede Sensível ao Tempo”. O motivo da escolha deste tema se dá ao fato de ser uma nova tecnologia, além de não possuir pesquisas brasileiras na área.

2.2.2 Questões de Pesquisa

- Como estão distribuídas as publicações nos últimos anos sobre redes sensíveis ao tempo?
- Como estão distribuídas as publicações em relação aos países dos autores?
- Como estão distribuídas as publicações de acordo com as bases de dados?
- As publicações podem ser distribuídas segundo uma taxonomia? Se sim, como é essa distribuição?

2.2.3 Termos de Busca

Para realizar este trabalho foi escolhido um processo de busca automática. Desta maneira, o primeiro passo foi definir um termo de busca genérico, isto é, um único termo de busca. Em seguida este termo foi adaptado para cada base, a fim de possibilitar seu uso para a realização das pesquisas nos mesmos. Os termos escolhidos para realização das buscas foram:

(TSN OR “Time Sensitive Networking”)

Com base na quantidade de artigos encontrados, as seguintes base de dados foram utilizadas:

1. ACM Digital Library;
2. IEEE Xplore;
3. Science Direct (Elsevier);

Estas bases foram escolhidas pois, além de permitirem o livre acesso da rede de computadores da UFPB, também permitem serem acessadas por meio do site de periódicos da CAPES, onde os alunos de várias instituições podem acessar.

2.2.4 Critérios de Exclusão

Foram excluídos da pesquisa os trabalhos que se enquadrem com pelo menos um dos critérios apresentados abaixo:

- Artigos duplicados;
- Artigos relacionados com a rede sensível ao tempo, mas que não explicam nenhum mecanismo;
- Artigos relacionados com a rede sensível ao tempo, mas que não explicam o seu funcionamento;
- Artigos relacionados com a rede sensível ao tempo, mas que não explicam a sua necessidade;
- Artigos que não possuem relacionamento com rede sensível ao tempo.

2.2.5 Taxonomia

O protocolo de pesquisa aplicado aqui classifica os trabalhos encontrados de acordo com a seguinte taxonomia:

- Algoritmo: sequência de instruções ou passos bem definidos utilizados em um estudo para uma tarefa específica;
- Análise: estudos que permitem separação em partes de um todo, visando explorar melhor cada parte independentemente das outras;
- Avaliação: método para se determinar como uma técnica é implementada na prática.
- Estudo de Caso: simulação de um ambiente a fim de se tirar conclusões acerca deste ambiente;
- Ferramenta: aplicativo utilizado em um estudo para realizar uma determinada tarefa;
- Modelo: referência proposta a ser seguida no estudo para realizar uma determinada tarefa.

2.3 Execução do Mapeamento Sistemático e Resultados

O estudo do mapeamento sistemático seguiu os passos definidos no protocolo de pesquisa, mencionados anteriormente. Todos os trabalhos encontrados foram submetidos ao processo de exclusão definido em 2.2.4 e em seguida foram classificados com a taxonomia definida em 2.2.5. Os resultados coletados, após o processo de exclusão, foram armazenados em planilhas eletrônicas, cujo objetivo é auxiliar a extração de informações com a taxonomia, ano de publicação, país dos autores e quantidade de artigos em cada base de dados.

O principal resultado da execução do estudo de mapeamento sistemático é entender como estão as publicações na área de pesquisa do cientista, respondendo as questões definidas na subseção 2.2.2. A primeira questão de pesquisa está relacionada às publicações de trabalhos ao longo dos anos na área de Rede Sensível ao Tempo. De acordo com a Figura 2, é possível notar que no ano de 2012 e 2013 não houve nenhum trabalho publicado. O motivo deste acontecimento é que o grupo responsável pela pesquisa nessa área foi criado apenas em 2012, possibilitando pouco tempo para a obtenção de resultados relevantes a este mapeamento. Por outro lado, o crescimento do número de publicações na área vem aumentando a cada ano, principalmente após 2015, evidenciando um crescente interesse da comunidade científica a respeito do tema de rede sensível ao tempo.

Ainda sobre a Figura 2, observa-se que em 2018 houve o maior número de publicações quando comparado aos outros anos. Entretanto, é possível observar uma diminuição nas publicações no ano de 2019. Isto ocorreu pois o período de coleta dos artigos para o estudo de mapeamento sistemático aconteceu no primeiro quadrimestre do ano de 2019. Desta maneira, acredita-se que a comunidade científica, ainda no ano de 2019, publique mais artigos que se encaixem no protocolo utilizado neste mapeamento.

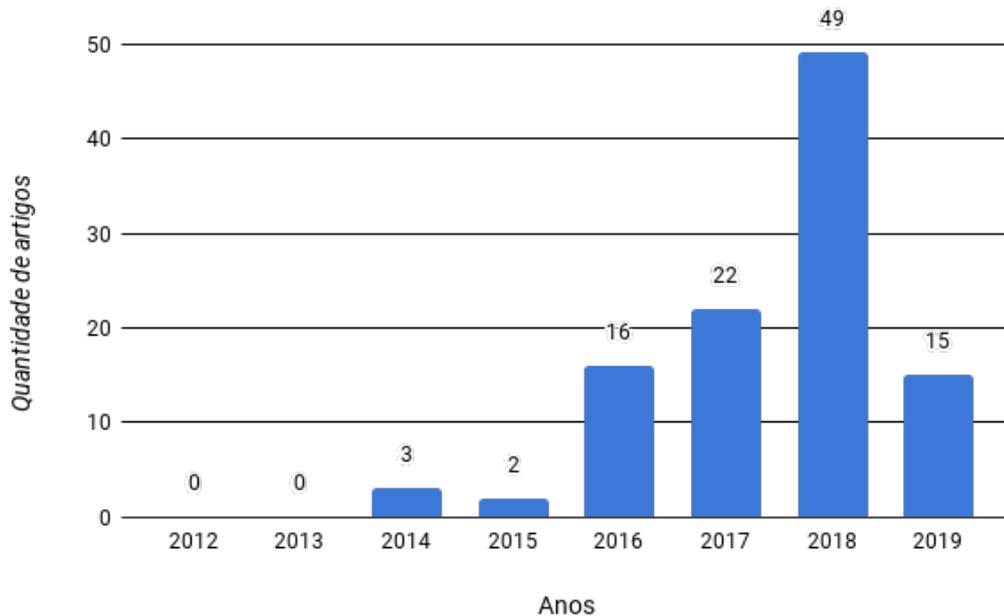


Figura 2: Distribuição de trabalhos (Anos de Publicação).

Outra questão de pesquisa definida no protocolo está relacionada com a distribuição de trabalhos publicados em relação aos países dos autores. Para um melhor entendimento do gráfico mostrado na Figura 3 é preciso saber que os números indicam os pontos que cada país obteve. A contagem desses pontos foi feita da seguinte maneira: Para cada escritor do artigo, o país o qual o autor está afiliado ganhou um ponto. Desta maneira, se um artigo possui cinco escritores filiados a Dinamarca, este país deve obter 5 pontos pelo artigo em questão. Após fazer esta contagem com todos os artigos, a Figura 3 apresenta a distribuição total dos pontos, na qual pode-se observar que a Alemanha possui o maior índice de publicações científicas na área de rede sensível ao tempo. Uma possível explicação para isso é que nos países da Europa, principalmente a Alemanha, existe um forte investimento das indústrias na questão de automação industrial. Os Estados Unidos da América é um dos poucos países não europeus que ultrapassou a marca dos 25 pontos, acredita-se isto se dá ao fato de que eles são os responsáveis pelos padrões, os quais ainda estão em desenvolvimento pelo IEEE que é uma organização norte-americana. Na Figura 3, observa-se também que o Brasil não esteve presente nas estatísticas apresentadas, demonstrando a deficiência do país em pesquisas científicas

relacionadas a este tema.

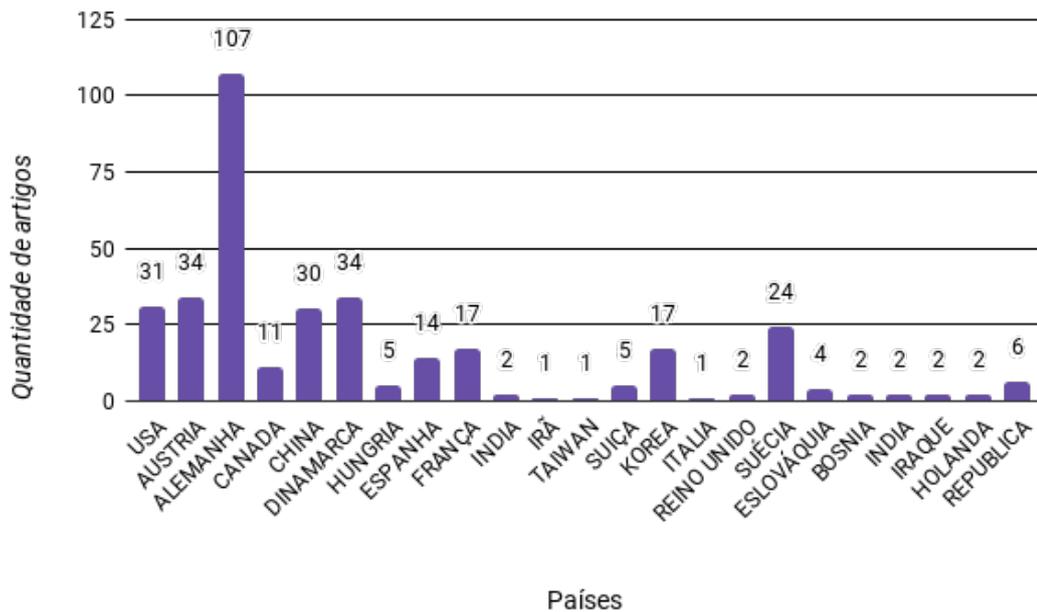


Figura 3: Distribuição de publicações em relação aos países.

A distribuição de publicações em relação as bases de dados está na Figura 4. Como esperado, é possível observar que a base de dados que mais indexou trabalhos foi o *IEEE Xplore*. Acredita-se que isto ocorreu pois o grupo de estudo responsável pelo tema de rede sensível ao tempo é o grupo IEEE 802.1. O *ACM Digital Library* teve segundo maior número de artigos. Já a *Science Direct* teve o menor número de artigos indexados.

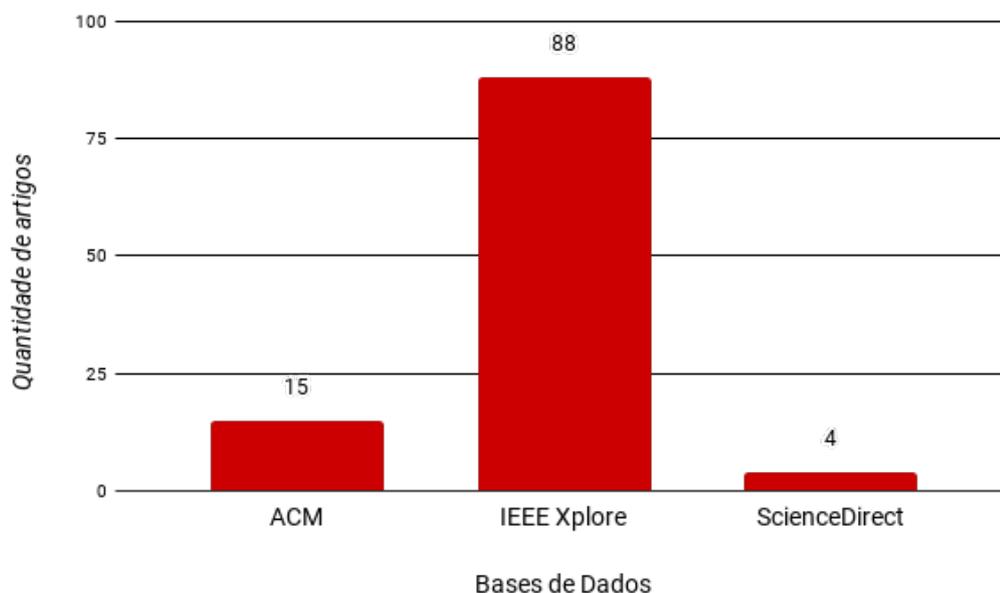


Figura 4: Distribuição de publicações por base de dados.

Outra questão de pesquisa respondida neste estudo de mapeamento é se as publicações seguem alguma taxonomia. Tal pergunta é respondida utilizando um gráfico de bolha como é mostrado na Figura 5. Este gráfico é composto por três variáveis: taxonomia, faceta e intensidade. A intensidade representada pela quantidade de artigos encontrados no encontro de uma das taxonomia e uma das faceta. O mais interessante deste gráfico é a possibilidade de se ter uma visão holística da área em particular, encontrando subáreas que são bem desenvolvidas, bem como as lacunas existentes, que são os tópicos que não possuem publicações. Essa informação sobre o comportamento da comunidade científica da área de rede sensível ao tempo pode ser relevante para direcionar novos projetos de pesquisa.

Algumas conclusões acerca do mapeamento, a partir da observação da figura 5 são descritas a seguir:

- As lacunas existentes representam a inexistência de trabalhos;
- Existe um foco nos mecanismos que compõem o tema;
- Há muitos modelos para realizar alguma tarefa;
- Muitos trabalhos propõem análises pois o tema ainda está em desenvolvimento;
- Existe apenas um trabalho que fala sobre interconexão de redes;
- Poucos trabalhos são sobre redes sem fio.

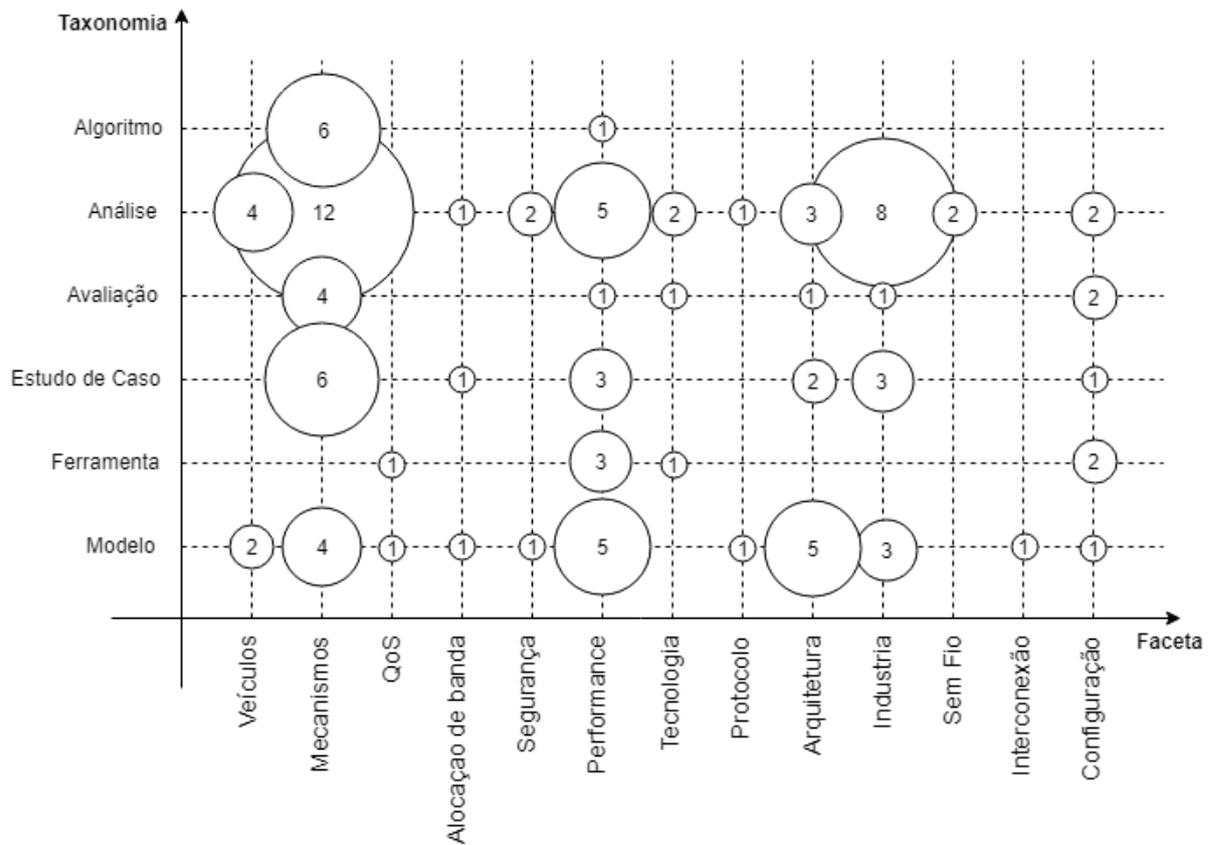


Figura 5: Gráfico de Bolha.

2.4 Sumário do Mapeamento

Este capítulo tratou do planejamento, execução e apresentação dos resultados de um estudo de mapeamento sistemático sobre o tema de rede sensível ao tempo. Os conceitos fundamentais de mapeamento sistemático foram apresentados, de forma a permitir o entendimento mínimo sobre esse tipo de estudo. A execução do estudo foi precedida pela construção de um protocolo de pesquisa, que serviu de apoio para os pesquisadores executarem os passos necessários para a obtenção dos resultados. Estes foram apresentados neste capítulo com destaque para o gráfico de bolha, qual possibilitou visualizar com mais detalhes as áreas que possuem um maior índice de publicações, bem como as áreas que apresentam alguma deficiência em relação ao número trabalhos científicos publicados.

No próximo capítulo, cada um dos mecanismos, os quais estão organizados de acordo com suas propriedades, serão apresentados.

3 MECANISMOS

3.1 Controle de Fluxo

O controle de fluxo especifica como os quadros pertencentes a uma classe de tráfego prescrita são manipulados dentro de pontes habilitadas para a TSN. Este controle aplica, principalmente, regras para encaminhar e enfileirar os quadros de maneira eficiente, de acordo com suas classes de tráfego associadas. Sendo assim, o controle de fluxo colabora com o gerenciamento e a integridade do fluxo para garantir que recursos adequados estejam disponíveis para fluxos do TSN. A seguir, serão explicados os principais padrões da rede sensível ao tempo que possuem como característica o controle de fluxo.

3.1.1 Modelador Sensível ao Tempo: IEEE 802.1Qbv

O Modelador Sensível ao Tempo (TAS - Time-Aware Shaper), foi especificado no padrão IEEE 802.1Qbv no ano de 2015 e é considerado o mais importante para coordenar as comunicações de uma rede, pois torna possível realizar uma priorização baseada no tempo. Este mecanismo evita que surjam gargalos durante a transmissão de dados e ainda minimiza o efeito de enfileiramento, que contribuem para a latência e para o *jitter*. Para poder utilizar este modelador, o *switch Ethernet* deve ser capaz de identificar quadros com diferentes prioridades, pois para cada prioridade o *switch* irá possuir uma fila. Devido ao padrão IEEE 802.1Q as redes virtuais locais (VLANs - Virtual Local Area Networks) já possuem este recurso de prioridades integrado. Estas prioridades podem variar de 0 à 7 de acordo com a necessidade dos dados que estão sendo transmitidos. Conforme [18], os valores das prioridades permitem o suporte simultâneo de tráfego agendado, de modelador de tráfego baseado em crédito e a outros tráfegos em ponte sobre redes de áreas locais (LANs - Local Area Networks).

Diante do contexto de enfileiramento, os quadros de baixa prioridade que já estão em transmissão podem acabar atrasando os quadros de prioridade mais alta em cada *switch* ao longo do caminho de transmissão. Da mesma forma que uma ambulância em situação de emergência, não pode se locomover até que os outros veículos a sua frente saiam do caminho, os quadros de baixa prioridade podem bloquear a passagem de quadros de prioridade mais alta em um *switch Ethernet* [19]. Objetivando resolver este problema e minimizar a latência e especialmente a sua variação, as filas de transmissão dos *switch Ethernet* estão idealmente vazias quando o tráfego de alta prioridade passa, assim como é ideal que os cruzamentos estejam livres para uma ambulância.

Para deixar o *switch Ethernet* livre para quadros de alta prioridade, o modelador sensível ao tempo executa a seguinte abordagem:

1. O mecanismo divide o tempo em ciclos.

2. Dentro de cada ciclo existem intervalos de tempo dedicados para os quadros com diferentes níveis de prioridades.
3. Os usuários podem configurar de acordo com as necessidades da aplicação, não só os tempos dos ciclos, mas também os intervalos de tempo de dentro do ciclo, como é mostrado no exemplo da Figura 6.
4. É possível também atribuir diferentes níveis de prioridades para cada intervalo de tempo do ciclo, um exemplo disto é mostrado na Figura 7.

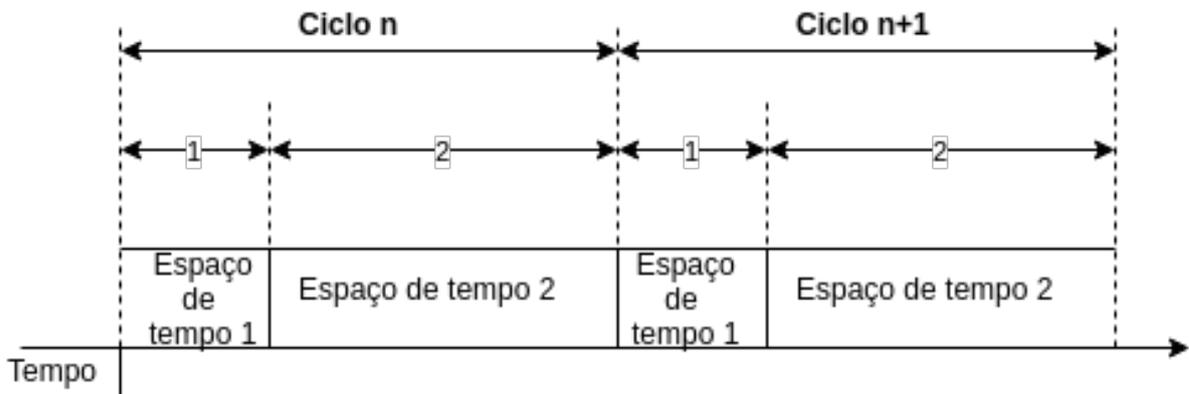


Figura 6: Exemplo de intervalos de tempo.

Fonte: Adaptada de [19]

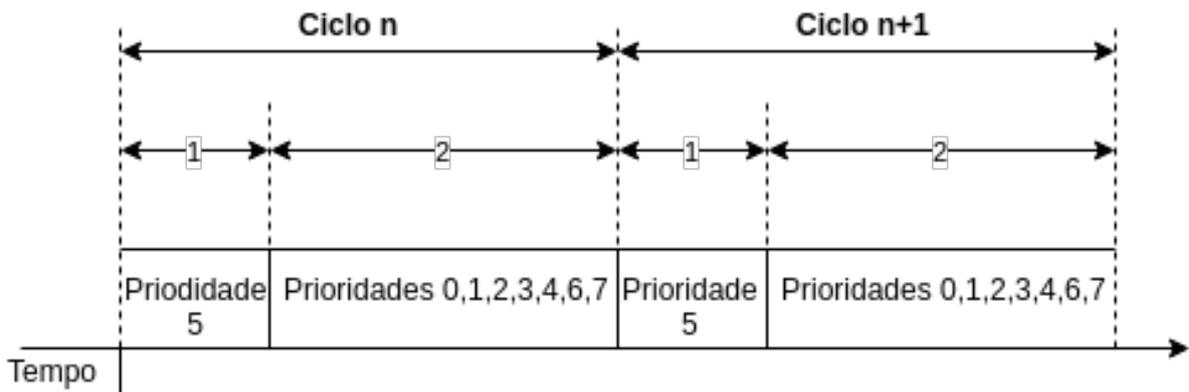


Figura 7: Exemplo de priorização de quadros nos intervalos de tempo.

Fonte: Adaptada de [19]

Visto que a VLAN contém os *bits* com as informações sobre a prioridade de cada quadro, os quadros são identificados e atribuídos às respectivas filas com base na prioridade. Vale ressaltar que a prioridade 2, por exemplo, não é necessariamente maior ou menor do que a prioridade 3; cabe ao usuário da rede informar quais são os níveis de importância de cada prioridade. A Figura 7 mostra um exemplo do uso de prioridades mencionado anteriormente. Neste exemplo é possível visualizar que a fila associada aos

quadros com prioridade 5 além de possuir um intervalo de tempo especial, que foi chamado de "1", está localizada no início do ciclo. Desta maneira, pode-se compreender que, neste caso, a prioridade 5 é a maior de todas as oito existentes. Este intervalo de tempo especial para as filas com prioridade mais alta seria um tipo de fila exclusiva, para que carros com maiores prioridades, como ambulâncias por exemplo, possam trafegar sem serem prejudicadas pelos demais carros.

É possível observar o fato de que é preciso uma sincronização de relógios dos *switches* e dos dispositivos finais para que todos possuam o mesmo relógio global. O mecanismo incluso no padrão IEEE 802.1AS-Rev é o responsável por esta sincronização e será explicado um pouco mais a frente. A razão desta sincronização é que existe apenas um cabo Ethernet, tornando assim necessário o uso das prioridades para permitir o acesso ao cabo em tempos distintos. O Modelador Sensível ao Tempo, pela primeira vez, introduz a possibilidade de priorizar a transmissão de dados de quadros Ethernet convencionais com base no tempo de transmissão e assim garantir seu encaminhamento e entrega em um ponto definido no tempo.

Segundo [20], uma ponte ou uma estação final pode suportar aprimoramentos que permitem que a transmissão de cada fila seja programada em relação a uma escala de tempo conhecida. Para realizar isto, [21] afirma que o TAS emprega o conceito de portas, onde cada fila está associada a uma porta de transmissão, que por sua vez possuem dois estados, 'aberto' e 'fechado'. Quando a porta está no estado aberto, os quadros da respectiva fila podem ser selecionados para a transmissão na ordem em que o primeiro a entrar deve ser o primeiro a sair (FIFO - First In First Out). Se a porta estiver no estado fechado, os quadros da respectiva fila não serão selecionados.

Para realizar a referente priorização de dados dos quadros com base no tempo, os *switches* abrem as portas de transmissão, também chamadas de portas com reconhecimento de tempo, para os quadros de alta prioridade com o intuito de não interromper o tráfego prioritário. Assim os pacotes comuns param de trafegar, pois as portas das filas de menor prioridade são fechadas, e o pacote de dados crítico passa na frente para que este possa ser entregue antes dos demais, permitindo assim uma comunicação crítica baseada no tempo. Neste sentido, é possível perceber os dispositivos finais precisam saber quando as portas de transmissão estão abrindo nos *switches* para que eles possam sincronizar a transmissão de quadros de alta prioridade adequadamente. Isso significa que o atraso em cada *switch* é determinístico e que a latência da mensagem através de uma rede de componentes habilitados para TSN pode ser garantida.

A lista de controle de portas (GLC - Gate Control List) é responsável por abrir as portas do *switch* no tempo correto e é responsabilidade do usuário da rede configurar esta lista para que os *switch* funcionem como pretendido. De acordo com [20], em uma implementação que não suporta aprimoramentos para o tráfego agendado, todas as portas

são consideradas permanentemente no estado aberto.

A Figura 8 mostra um modelo do uso da lista de controle de portas, usando como base os exemplos da Figura 7 que possuem apenas dois espaços de tempo dentro de um ciclo. Os quadros com prioridade 5 representam o trafego de maior prioridade e afim de priorizar o fluxo destes dados críticos, é possível perceber que no espaço de tempo 0 todas as portas se fecham e a porta de transmissão da fila dos quadros com prioridade 5 é aberta. Quando o intervalo de tempo do ciclo muda para 2, a porta da fila 5 se fecha e todas as outras portas se abrem, permitindo o trafego de dados não críticos.

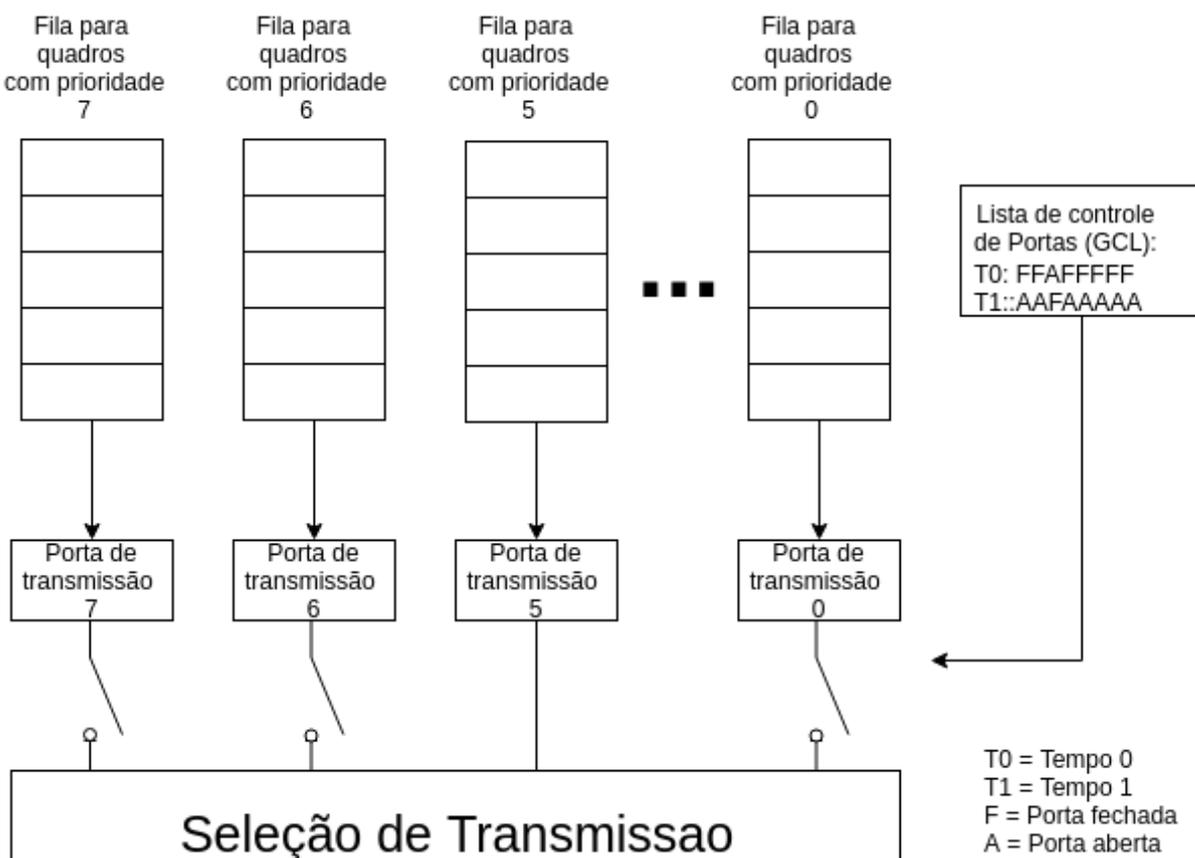


Figura 8: Exemplo da lista de controle.

Fonte: Adaptada de [19]

O Modelador Sensível ao Tempo minimiza a latência e o *jitter* mas em contrapartida, para alcançar esse desempenho as redes Ethernet que utilizam o mecanismo especificado neste padrão perderam a sua propriedade de ligar e usar (PnP - Plug and Play). Agora, as redes que têm a intenção de utilizar este mecanismo precisam ser configuradas. Em resumo, conforme [22], o TAS é essencialmente um mecanismo de portas que ativa ou desativa dinamicamente a seleção de quadros das filas de saída com base na GLC. É importante mencionar que nem todas as aplicações exigem o menor *jitter* e nem a menor latência, para tais cenários é possível considerar outras opções e até mesmo combinar estas outras opções com o TAS. Ainda em [21], embora este mecanismo garanta que as mensa-

gens críticas sejam protegidas contra a interferência de outros tráfegos de rede, isso não resulta necessariamente no uso ideal da largura de banda ou na latência de comunicação mínima. Quando esses fatores são importantes, um mecanismo de preempção, como por exemplo o IEEE 802.1Qbu que será explicado mais a frente, pode ser utilizado.

3.1.2 Preempção de Quadros: IEEE 802.1Qbu

A Preempção de Quadros (FPE - Frame Pre-emption) é mais um dos mecanismos da TSN. Segundo [23], o FPE tem a função de definir meios sobre como pausar a transmissão de quadros e dar lugar a quadros de maior prioridade, principalmente em sistemas que possuem escalonamento com base no tempo. Com o intuito de ajudar a Rede Sensível ao Tempo a reduzir a latência e o *jitter*, o FPE é um mecanismo que permite que um quadro de maior prioridade não tenha sua latência aumentada devido a transmissão de outro com menor prioridade. Ou seja, um quadro de menor prioridade é interrompido para não ocupar o espaço de tempo reservado ao tráfego de quadros com maior prioridade. Vale ressaltar que de acordo com [24], a antecipação de um quadro pode ocorrer mais de uma vez, isto é, o mesmo quadro, o com menor prioridade, pode ser interrompido mais de uma vez.

Existem dois tipos de abordagens básicas para filas de prioridade: as preemptivas e as não-preemptivas. No caso das filas não-preemptivas, se um quadro crítico for recebido pelo sistema durante a transmissão de um quadro não crítico, o de maior prioridade é inserido no início da fila de prioridades. Deste modo, quando a transmissão que está em andamento for finalizada, é garantido que o quadro crítico será transmitido assim que possível, pois é o primeiro da fila [25]. Como é possível observar na Figura 9, os quadros críticos possuem uma janela de tempo reservada para sua transmissão e se eles tiverem que aguardar a finalização de um quadro que foi iniciado no final do ciclo anterior será gerado uma latência excessiva para quadros com dados críticos.

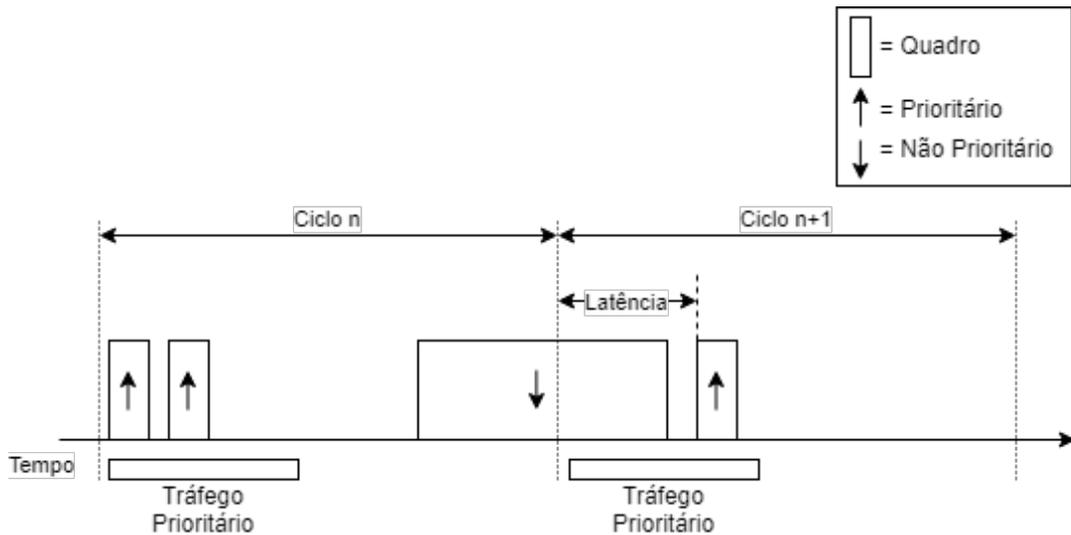


Figura 9: Exemplo da rede sem a preempção de quadros.

O IEEE 802.1Qbu traz a abordagem preemptiva que tem como objetivo evitar o atraso de quadros críticos. Utilizando o mesmo cenário que foi mencionado anteriormente, este mecanismo faz com que o quadro não crítico, que iria invadir o intervalo de tempo reservado a quadros prioritários do ciclo seguinte, pare o seu processamento antes do início do próximo ciclo. Assim, os quadros críticos do próximo ciclo não precisam aguardar a finalização de um quadro que foi iniciado no final do ciclo anterior. Após o término do espaço de tempo reservado ao tráfego prioritário, o sistema retorna a processar o restante do quadro não prioritário, como pode ser observado na Figura 10. Deste modo, os quadros críticos são processados assim que chegam, diminuindo então a latência dos quadros prioritários [26].

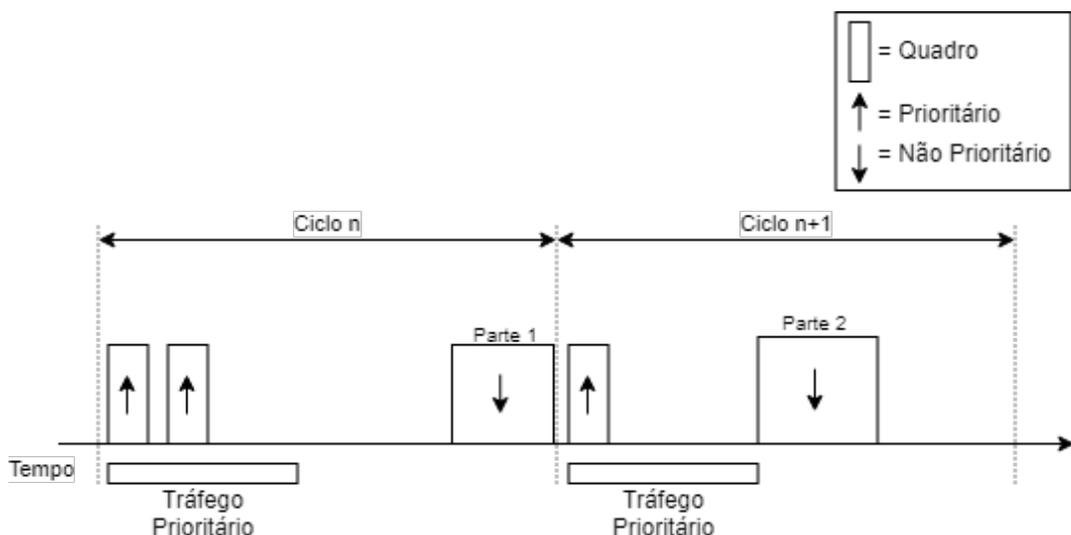


Figura 10: Exemplo da rede com preempção de quadros.

Devido ao alto custo, nem sempre se faz necessária a utilização deste mecanismo

para a interrupção de quadros. A fim de evitar o mesmo tipo de problema existem outros métodos que podem ser usados, como a Banda de Guarda. Ele possui o mesmo objetivo do 802.1Qbu, que é prevenir que quadros não prioritários invadam o intervalo de tempo do próximo ciclo reservado a quadros prioritários. Porém para alcançar seu objetivo, diferente da preempção de quadros, este método atrasa a transmissão de pacotes grandes que iriam invadir o espaço de tempo reservados aos pacotes críticos no próximo ciclo. Para garantir que nenhum quadro irá invadir um ciclo subsequente, a Banda de Guarda evita que um quadro comece a ser transmitido após o seu início. Para isso, como pode ser visto na Figura 11, a Banda de Guarda, segundo [27], possui o tamanho do maior quadro *Ethernet*. Desta maneira, o quadro não crítico terá que aguardar o final da janela de tempo reservada ao tráfego prioritário do próximo ciclo para começar a sua transmissão. Esse método, infelizmente, faz com que exista uma certa ociosidade dentro do ciclo porém, como foi dito anteriormente, diferente da preempção de quadros ele tem um baixo custo de processamento.

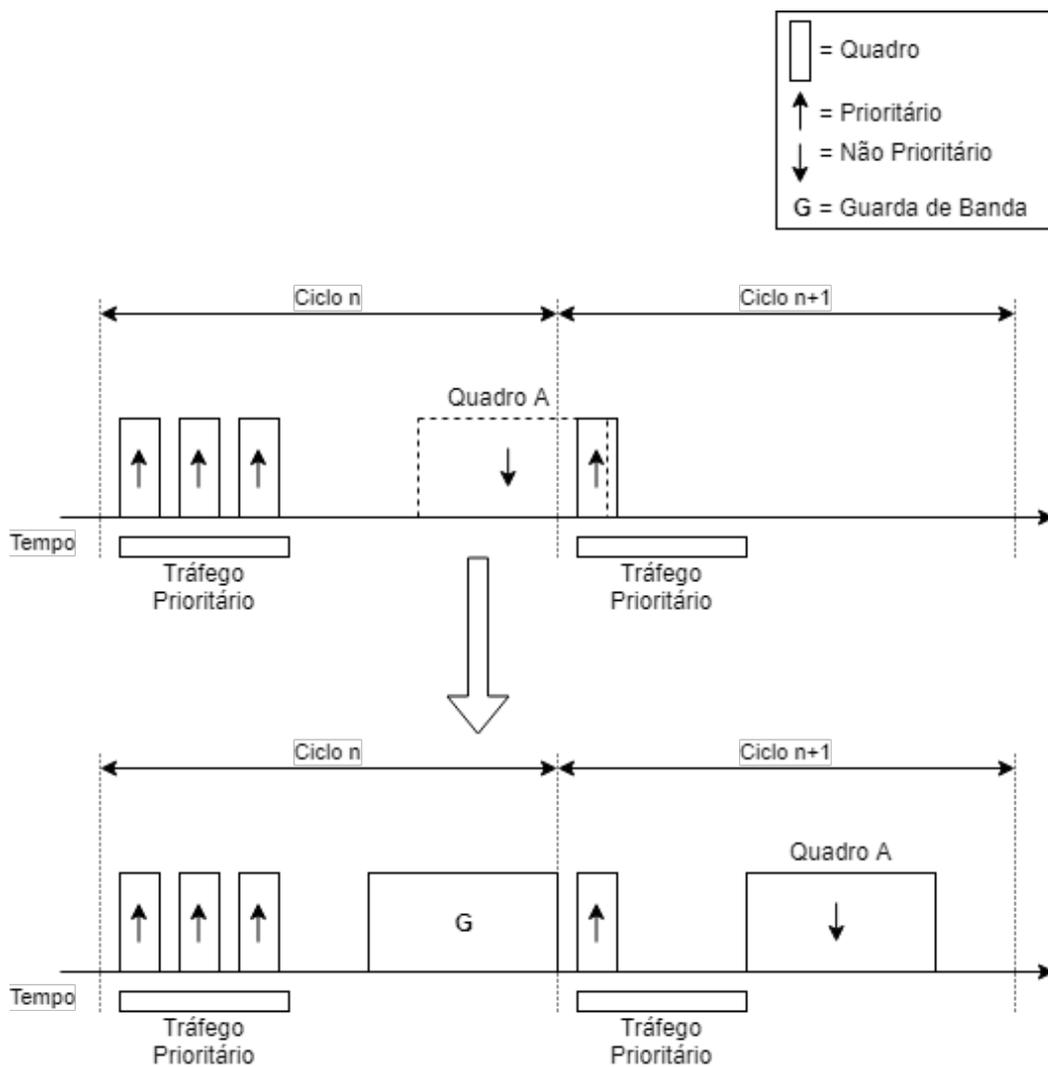


Figura 11: Exemplo da rede com a Banda de Guarda.

Fonte: Adaptada de [27]

3.1.3 Enfileiramento e Encaminhamento Cíclico: IEEE 802.1Qch

O Enfileiramento e Encaminhamento Cíclico (CQF - Cyclic Queuing and Forwarding) é um método de modelagem de tráfego que pode fornecer latência determinística facilmente calculada para fluxos de tráfego sensíveis ao tempo, e como o nome indica, o princípio fundamental do CQF é que o tráfego de fluxo é transmitido e enfileirado para transmissão ao longo de um caminho na rede de uma maneira cíclica [28], independente da topologia da rede. Este modelador de tráfego reduz significativamente os requisitos relativos à precisão do tempo de transmissão além de funcionar sem a necessidade de um controlador central.

Algumas aplicações possuem barreiras físicas, isto é, em algumas indústrias, por exemplo, o grande tamanho das máquinas impossibilita baixos tempos de ciclos. Com isso é possível que a rede possua um certo nível de latência e de *jitter*, devido a estas barreiras. Por este motivo, o grupo de trabalho IEEE 802 especificou o padrão IEEE 802.1Qch, que por sua vez têm o intuito de fornecer menos precisão na latência e no *jitter*. No entanto, este novo mecanismo requer muito menos esforço de configuração.

O Enfileiramento e Encaminhamento Cíclico, de acordo com [7], utiliza recursos de outros padrões pois é baseado em um entendimento comum do tempo e na configuração de ciclos de comunicação. Como é mostrado na Figura 12, o conceito básico deste método de modelagem é coletar os quadros que possuem a largura de banda reservada (quadros críticos) recebidos dentro de um ciclo e transmiti-los como “priorizados” no início do próximo ciclo. No entanto ele garante a transmissão de quadros para apenas um salto de rede por ciclo, este salto de rede é o movimento de um *switch Ethernet* para o próximo. Desta maneira, este algoritmo de encaminhamento isso faz com que a latência possua um limite inferior e superior.

Fazendo uma simples analogia, este mecanismo garante que um veículo, por exemplo, seria parado em cada semáforo mas esperaria apenas um período de tempo específico antes de seguir para o próximo [19]. Isto é, se for necessário passar por cinco *switches* e para cada um tenha que esperar 10 ms, a pior latência seria de 50ms. Sendo assim, a fim de garantir a transmissão, este mecanismo coleta os quadros críticos recebidos dentro de um ciclo e os transmite de modo que no *switch* seguinte, eles estejam no início do próximo ciclo, como é mostrado na Figura 12.

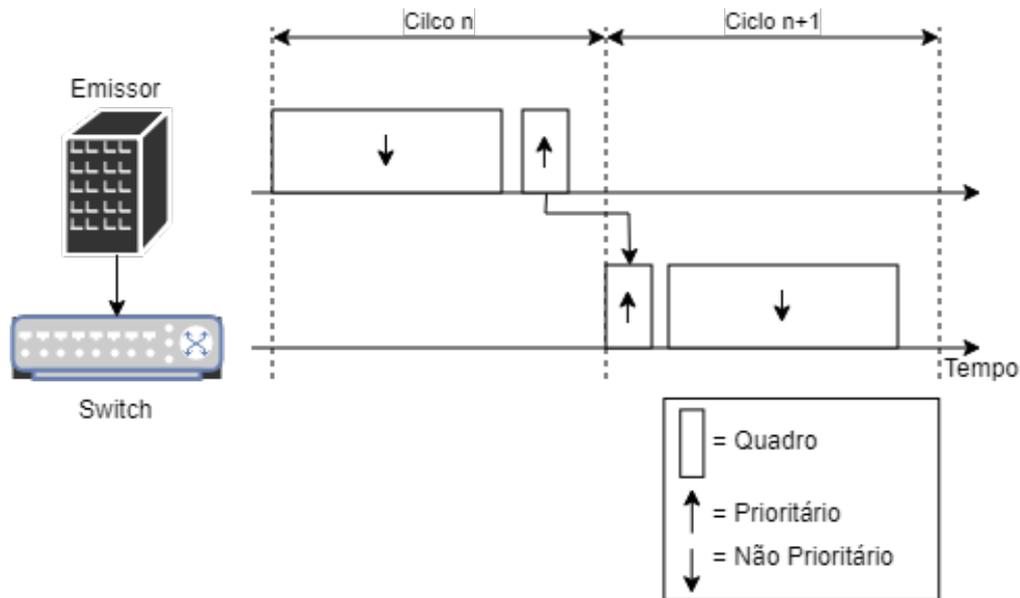


Figura 12: Exemplo da atuação do CQF.

Fonte: Adaptada de [27]

Neste cenário, as garantias de tempo e de entrega obtidas possuem uma variação de um ciclo por salto, porém não é necessário configurar os intervalos de tempo dentro do ciclo. Para descobrir o limite superior do intervalo de tempo da latência, é preciso realizar um simples cálculo utilizando o número de saltos ou *switches* da rede e a duração do ciclo. Como mencionado anteriormente, trata-se de uma janela de tempo e o resultado representa o pior caso de atraso, isto é, o limite superior. Desta maneira, o tempo que um pacote leva para percorrer a rede é dominado pelo tempo de ciclo do mecanismo de encaminhamento, em vez de atrasos de fila ou tempos de transmissão [7].

Com isso, se a aplicação suporta ações que podem possuir uma janela de tempo de atraso, seja devido a barreiras físicas ou a algum outro problema, o IEEE 802.1Qch é uma boa escolha. Segundo [28], ele basicamente escolhe o que fazer com quadros que ainda não foram transmitidos e possuem tempo de transmissão expirado, evitando assim cálculos e configurações pesadas.

3.2 Sincronização do Fluxo

Os mecanismos com características de controle de fluxo e gerenciamento de fluxo, como por exemplo o IEEE 802.1Qbv e o IEEE 802.1Qcc, podem utilizar a sincronização de tempo para fornecer precisão no limite de latência, uma baixa perda de pacotes e ainda um pequeno *jitter* para aplicações TSN. A seguir será explicado o principal padrão da rede sensível ao tempo que possui como característica realizar a sincronização do fluxo.

3.2.1 Temporização e Sincrinização: IEEE 802.1AS-Rev

A TSN é uma tecnologia focada no tempo. Sendo assim, o tempo é o seu principal aspecto [29]. Este conjunto de padrões foi desenvolvido para fornecer uma maneira de garantir que a informação possa viajar do ponto A ao ponto B em um período de tempo fixo e previsível, permitindo assim uma maior eficiência. Existe assim um requisito implícito para que os dispositivos de rede que implementam a TSN (dispositivos finais e pontes) compartilhem um senso comum de tempo. O protocolo de precisão de tempo (PTP - Precision Time Protocol) é usado para manter este senso comum. Os perfis PTP escolhidos para trabalhar com a TSN são IEEE 802.1AS e IEEE 802.1ASRev. A chave para fornecer o determinismo é um conceito compartilhado de tempo. A implementação do 802.1AS (antecessor do 802.1ASRev) por todos os elementos de rede é necessária para a TSN. O perfil PTP 802.1AS permite que todos os elementos da rede TSN compartilhem o mesmo conceito de tempo, podendo também ser usado para ativar a comunicação acionada por tempo, bem como para coordenar ações distribuídas em redes industriais.

Este mecanismo aproveita o trabalho do IEEE 1588, desenvolvendo as especificações adicionais necessárias para atender aos requisitos dos sistemas TSN. O IEEE 1588 é um padrão que utiliza o protocolo PTP para sincronização de relógio. Ele transmite uma mensagem PTP por meio da rede de pacotes para permitir a sincronização de tempo e suporta a precisão de microssegundos. Em 2008, o IEEE 1588 Versão 2 foi introduzido com uma melhora na precisão e na exatidão do padrão pois normalmente, em uma rede industrial, pretende-se obter uma precisão de menos de um microssegundo. O IEEE 1588 pode ser implementado por meio de registro de tempo utilizando apenas *software* ou assistido por *hardware*. Quando apenas o *software* é utilizado para obter o *timestamp*, tem-se como resultado longos atrasos e *jitters*. Por outro lado, método de *timestamp* assistido por *hardware* fornece uma capacidade mais precisa [30].

De acordo com [31], o IEEE 802.1AS define um protocolo mestre-escravo com eleição de líder, ou seja, o protocolo elege automaticamente um mestre no sistema utilizando o algoritmo de melhor relógio mestre (BMCA - Best Master Clock Algorithm). E, caso ocorra algum problema de conexão como mestre, um novo mestre é selecionado. Neste algoritmo informações são trocadas entre todos os relógios pertencentes à rede. Em seguida, as informações são avaliadas e o melhor relógio é selecionado, que é então chamado de “grande mestre” enquanto todos os outros passam a ser chamados de “escravos”. Este grande mestre sincroniza os relógios na rede ao longo de uma árvore de sincronização automaticamente estabelecida, da qual ele é a raiz e todos os outros são seus escravos, desta maneira todos os escravos possuem uma única fonte de referência de tempo.

O parâmetro de qualidade mais importante de um protocolo de sincronização é a “precisão”, que é definida como a diferença máxima dos relógios locais na rede de

nós não defeituosos em qualquer momento durante a operação do sistema. A precisão da sincronização é um parâmetro crucial quando usada em conjunto com um princípio de comunicação acionado pelo tempo, como por exemplo o IEEE 802.1Qbv (Time Aware Shaper), que permite maximizar a utilização de rede alcançável ou coordenar com precisão as atividades distribuídas no sistema [32].

A sincronização de relógio é um mecanismo vital para obter comunicação determinística com latência de mensagem limitada no TSN. Um mecanismo robusto para fornecer um protocolo para sincronização de tempo entre nós da rede, fornecendo uma referência de relógio global, [33], estabelece a base para o agendamento de filas de tráfego por meio de cada componente de rede participante. O projeto IEEE 802.1ASrev está trabalhando para criar um perfil do protocolo de sincronização IEEE 1588 PTP para TSN. Este perfil permitirá a compatibilidade da sincronização do relógio entre diferentes dispositivos TSN. O trabalho está acontecendo em paralelo com um projeto no grupo de trabalho IEEE 1588, a fim de harmonizar os dois padrões, de modo que o IEEE 802.1AS eventualmente se torne um perfil do IEEE 1588 [21].

3.3 Integridade do Fluxo

A fim de garantir a integridade do fluxo, alguns mecanismos fornecem redundância de caminho, seleção de múltiplos caminhos, filtragem e o policiamento das filas, e evitam também, fluxos não autorizados ou mal gerenciados na rede. A seguir será explicado os principais padrões da rede sensível ao tempo que possuem como característica garantir a integridade do fluxo.

3.3.1 Controle de Caminho e Reserva: IEEE 802.1Qca

O controle de caminho e reserva (PCR - Path Control and Reservation), de acordo com [34], tem como objetivo integrar protocolos de controle necessários para fornecer controle de caminho de encaminhamento explícito. Para isso, este mecanismo estende as aplicações do protocolo Sistema Intermediário para Sistema Intermediário (IS-IS - Intermediate System to Intermediate System), permitindo que o protocolo IS-IS possa controlar redes em pontes além das capacidades da ponte de caminho mais curto (SPB - Shortest Path Bridging) e especifica protocolos, procedimentos e objetos gerenciados adicionais. Sendo assim, [35] afirma que este novo padrão fornece para cada fluxo um controle de caminho explícito, largura de banda e reserva de fluxo, redundância (proteção e restauração) para fluxos de dados, distribuição de parâmetros de controle para mensagens de sincronização e de controle de fluxo e também suportará transportar informações de controle de usando IS-IS para sincronização e programação de tempo segundo [34].

Este mecanismo aqui explicado foi baseado no IEEE 802.1aq que por sua vez tem como base o protocolo IS-IS, que é um protocolo de roteamento definido como padrão internacional, similar ao Caminho Aberto Mais Curto Primeiro (OSPF - Open Shortest Path First). Algumas diferenças entre eles é que o IS-IS é executado diretamente sobre a segunda camada das camadas de rede, próximo ao IP, enquanto o OSPF acaba por ser executado na terceira camada. Ainda segundo [36], o IS-IS faz uso de um sistema de métricas simples, que na maioria dos casos tem que ser adaptado para condições específicas.

O protocolo SPB, mencionado anteriormente, substituiu os antigos protocolos de árvore de abrangência (STP - Spanning Tree Protocol). A diferença entre estes dois protocolos é que este último troca apenas informações sobre a quantidade de saltos, enquanto no SPB, os nós trocam informações sobre seus nós adjacentes fazendo com que cada *switch* na rede possua, eventualmente, o estado de todos os outros e acabe anunciando estas informações para seus vizinhos. Deste modo, o SPB permite apenas um único caminho e bloqueia qualquer caminho redundante que possa resultar em um laço. Assim, o controle do caminho de envio explícito permite o uso de caminhos além do caminho mais curto. Para isto ele utiliza o elemento de cálculo do caminho (PCE - Path Computation Element), que é uma entidade capaz de calcular uma topologia para encaminhamento com base em uma topologia de rede, seus atributos e possíveis restrições. Informações estas que são obtidas de maneira externa ao PCE. Um único PCE ou vários PCEs determinam árvores explícitas para uma região, nas quais não é necessário seguir o caminho mais curto. Mesmo se houver vários elementos em uma região, cada árvore explícita será determinada por apenas um deles, que é referido como o PCE proprietário da árvore. Essas e outras informações mais específicas sobre este elemento podem ser encontradas em [37].

Em geral, o 802.1Qca especifica pontes de caminhos explícitos (EPs - Explicit Paths) para transmissão de quadros e também protocolos para determinar várias topologias ativas. Para isto ele incorpora uma abordagem híbrida de Rede Definida por Software (SDN - Software Defined Networking) [34]. Nesta abordagem híbrida, o protocolo IS-IS trata de funções básicas como a descoberta da topologia, por exemplo. Enquanto isso, [38] afirma que o SDN utiliza o elemento de cálculo para gerenciar os caminhos explícitos [35]. O PCE por sua vez interage com o protocolo IS-IS para manipular e instalar as requisições para que a rede possa interagir com o protocolo de reserva de fluxo (SRP - Stream Reservation Protocol) para reservar recursos necessários ao longo do caminho explícito.

3.3.2 Replicação de Quadros e Eliminação Para Confiabilidade: IEEE 802.1CB

Este mecanismo é descrito como replicação de quadros e eliminação por segurança (FRER - Frame Replication and Elimination for Reliability). Sendo assim ele não se preocupa com a criação de múltiplos caminhos pelos quais as duplicações são transmitidas. Ele especifica procedimentos, objetos gerenciados e protocolos para pontes e sistemas finais que fornecem identificação e replicação de pacotes para uma transmissão redundante.

O objetivo deste padrão é aumentar a probabilidade da entrega de um determinado pacote. Afim de reduzir a taxa de perda de pacotes, aumentando assim a confiabilidade, este mecanismo enumera sequencialmente e replica cada pacote no sistema de origem ou de retransmissão da rede e envia estes pacotes por diferentes caminhos. Já a eliminação dos pacotes replicados ocorre no sistema final ou em sistemas de retransmissão. Quando o FRER é usado em caminhos fixados a uma topologia específica, que pode ser calculada utilizando o padrão PCR - IEEE 802.1Qca, e protegidos contra perda de congestionamento (por exemplo, usando técnicas descritas pelo IEEE Std 802.1BA), o FRER pode reduzir substancialmente a probabilidade de perda de pacotes devido a falhas de equipamento. Estas informações, assim como informações mais específicas sobre este mecanismo, podem ser encontrada em [39].

A Figura 13 mostra um exemplo do funcionamento da replicação de quadros e eliminação por segurança. Como é possível observar na figura, o emissor A replica o pacote e os envia por diferentes caminhos para o receptor B, passando por alguns sistemas de retransmissão ao longo do percurso. Os sistemas de retransmissão neste caso são representados por *switches*. Neste exemplo os *switches* 1 e 2 podem acabar por enviar cópias duplicadas de um para o outro, porém os pacotes possuem um número de sequência. Desta maneira os retransmissores são capazes de fazer com que as duplicatas sejam eliminadas, evitando assim o repasse das mesmas. Entretanto ainda é necessário que o destino possua esta funcionalidade de eliminar pacotes duplicados, pois como é possível observar na figura, é provável que pacotes cheguem duplicados no destino e é responsabilidade do mesmo eliminar estes pacotes.

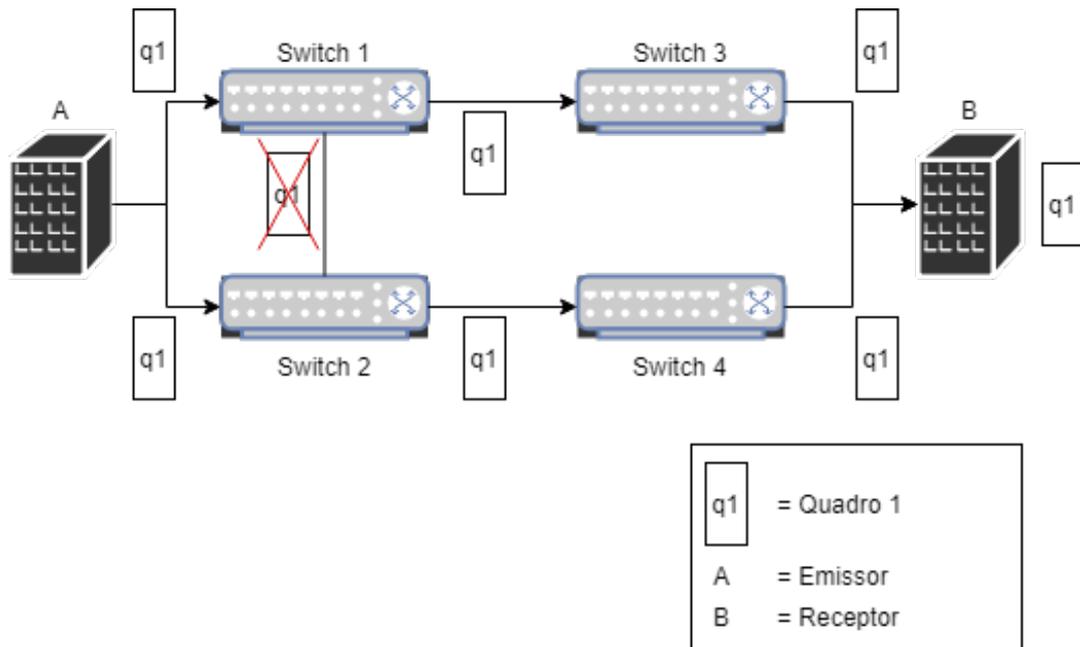


Figura 13: Exemplo do funcionamento do FRER.

Segundo [21], o mecanismo de gerenciamento de redundância combina essas mensagens redundantes para gerar um único fluxo de informações para o(s) receptor(es). Embora o grupo de trabalho do TSN ainda não tenha finalizado a padronização de um mecanismo específico de gerenciamento de redundância, é provável que ele seja baseado em números de sequência. Os números de sequência (e meta informações adicionais em potencial) serão transportados em uma *tag* de redundância dedicada dentro do quadro *Ethernet* semelhante à *tag* de VLAN. Esse mecanismo de redundância eliminará duplicatas (ou seja, cópias redundantes da mesma mensagem), mas provavelmente não garantirá a entrega das mensagens em ordem.

3.3.3 Filtragem e Policiamento Por Fluxo: IEEE 802.1Qci

O desenvolvimento de padrões para redes TSN mostrou que não existem padrões interoperáveis que permitam que uma ponte detecte se alguns sistemas em uma rede estão ou não em conformidade com comportamentos acordados [40]. Desta maneira, a filtragem e policiamento por fluxo (PSFP - Per-Stream Filtering and Policing), segundo [41], define filtragem e policiamento para cada fluxo. Assim as pontes podem executar contagem de quadros, filtragem, policiamento e seleção de classe de serviço para quadros. As funções de policiamento e filtragem incluem a detecção e a atenuação de transmissões disruptivas, realizadas por outros sistemas em uma rede, resultando na melhoria da robustez da rede.

O IEEE 802.1Qci, conforme [35], evita condições de sobrecarga de tráfego, que são causadas, por exemplo, pela entrega incorreta devido ao mau funcionamento do equipamento e ataques de negação de serviço (DoS - Denial of Service), que afetam as portas

de pontes intermediárias e a estação final que irá receber os quadros, ou seja, melhoram a robustez da rede. Ele pode ser usado não só para proteger contra erros de *software* em terminais ou em pontes, mas também contra ataques e dispositivos hostis. Este mecanismo, ainda com [35], especifica a filtragem em uma base por fluxo, identificando fluxos individuais com um identificador chamado *StreamID*, os fluxos identificados podem então ser agregados, processados e finalmente enfileirados em uma porta de entrada.

De acordo com [7] este mecanismo utiliza os recursos de identificação de fluxo do padrão 802.1CB, para fornecer a cada fluxo uma porta com funções de filtragem e policiamento. Os fluxos são identificados através do mapeamento das combinações dos campos do cabeçalho e através de um valor de prioridade interno (IPV - Internal Priority Value), usado para determinar a classe de tráfego. Várias combinações do endereço MAC de origem, do endereço de destino, dos campos VLAN e IP dos cabeçalho e até mesmo os esquemas de classificação proprietários podem ser usados para identificar os fluxos. O PSFP melhora os métodos de identificação de fluxo para poder definir filtros, o que permite melhorar classificação em diferentes fluxos, com base em quando o pacote foi recebido dentro de um ciclo e no valor de prioridade do quadro. Através das portas estes filtros acabam por direcionar o tráfego para uma fila de saída, passando por um medidor de vazão, podendo então detectar e bloquear determinadas condições de erro, sendo estas baseadas em uma função de policiamento.

A porta do fluxo, com base nas capacidades cíclicas do padrão 802.1Qbv, irá permitir a passagem ou poderá realizar o bloqueio de quadros com base na função de policiamento. Os quadros que conseguem passar pelas portas recebem um IPV. Como mencionado, as portas podem detectar certas condições de erro, como por exemplo o recebimento de um quadro quando a porta está fechada ou que exceda a largura de banda, e podem, opcionalmente, permanecer fechadas até que ocorra uma intervenção do gerenciamento, pois conforme [40], dispositivos que excedam a largura de banda alocada para um fluxo podem impedir que a rede atinja os benefícios do TSN para qualquer um ou todos os fluxos, não apenas o fluxo mal-comportado. Uma porta de fluxo pode possuir também uma lista de operações de controle que são executadas em ordem, permitindo que o ciclo seja subdividido em períodos de tempo em que a porta está aberta ou fechada, e alterando o IPV.

Neste sentido, a porta faz com que os Receptores e os Emissores cumpram com os comportamentos acordados pelas trocas de configuração e/ou protocolo, como por exemplo excesso de largura de banda, tamanho de rajada, tamanho dos pacotes, uso indevido de rótulos, entre outros. Esse recurso forma a base do CQF - IEEE 802.1Qch.

3.4 Gerenciamento de Fluxo

O gerenciamento de fluxo permite o provisionamento e o gerenciamento dos recursos de redes distribuídas e centralizadas, criando canais protegidos em redes heterogêneas compartilhadas de maneira eficiente. Além disso, o gerenciamento de fluxo oferece aos usuários e administradores funções de operação, administração e manutenção para monitorar, relatar e configurar condições de rede. Isso permite um suporte refinado dos serviços de rede, ao mesmo tempo em que impõe alocações de longo prazo dos recursos de rede com controle flexível de recursos por meio de reconfigurações automáticas e adaptativas. A seguir será explicado o principal padrão da rede sensível ao tempo que possui como característica o gerenciamento do fluxo.

3.4.1 Aprimoramentos do Protocolo de Reserva de Fluxo e Melhorias de Desempenho: IEEE 802.1Qcc

A TSN além de ser capaz de fornecer um conjunto de ferramentas para gerenciar e controlar a rede globalmente, também fornece mecanismos para melhorar os protocolos de reserva de fluxo existentes. Este padrão segundo [42], especifica aprimoramentos em protocolos, em procedimentos e em objetos gerenciados, com objetivo de configurar os recursos da rede para atenderem aos requisitos das aplicações sensíveis ao tempo, isto é com latência limitada. Para isto, esse mecanismo acaba por especificar a chamada interface de rede do usuário (UNI - User/Network Interface) que é uma interface de *software* entre o usuário, que é a aplicação sensível ao tempo, e os componentes de rede. A interface possibilita que a aplicação forneça requisitos de fluxo, por exemplo a latência limitada, e a rede configure os recursos dos emissores para os receptores de modo a atender a esses requisitos.

Diante da perspectiva de [21], além da interface informada anteriormente, este mecanismo estende o protocolo de reserva de fluxo original (Stream Reservation Protocol: IEEE 802.1Qat) para incluir mecanismos de fluxo para a TSN com o objetivo de melhorar os protocolos já existentes. Para isso ele reduz o tamanho e a frequência das mensagens de reserva de modo a atender aos requisitos de aplicações sensíveis ao tempo. Conforme [43], foi proposto as extensões Ethernet que incluem o SRP para implementar o controle de admissão e reserva de recursos para garantir a QoS, bem como esquemas de redundância paralela.

Ainda com [42], o SRP usa três protocolos de sinalização, MMRP, MVRP e MSRP, para estabelecer reservas de fluxo em uma rede interligada. O Protocolo de Registro de Múltiplos MACs (MMRP) é opcionalmente usado para controlar a propagação de registros do emissor em toda a rede interligada. Já o Protocolo de Registro de Múltiplos VLAN (MVRP) permite que a prioridade do quadro de dados seja propagada ao longo do caminho

do emissor para o receptor(es), e por último, o MSRP controla a admissão dos fluxos.

De acordo com [44], esta extensão suporta a reconfiguração do tempo de execução, pois define a UNI, mencionada anteriormente, que por sua vez permite ao usuário especificar requisitos de fluxo sem o conhecimento da rede, tornando a configuração de rede transparente para o usuário. Isto pode ser alcançado por meio de três arquiteturas. São elas:

- Completamente distribuídos onde os requisitos de fluxo se propagam pela rede. Sendo assim, a UNI se encontra entre uma estação final e o seu *switch* de acesso.



Figura 14: Arquitetura totalmente distribuída.

Fonte: Adaptada de [42]

- Rede centralizada com usuário distribuído, que introduz uma entidade, chamada de configurador de rede centralizado (CNC), com conhecimento completo de todos os fluxos na rede, e todas as mensagens de configuração originadas no CNC. A UNI ainda está entre a estação final e o *switch* de acesso, mas nessa arquitetura o *switch* de acesso se comunica diretamente com o CNC.

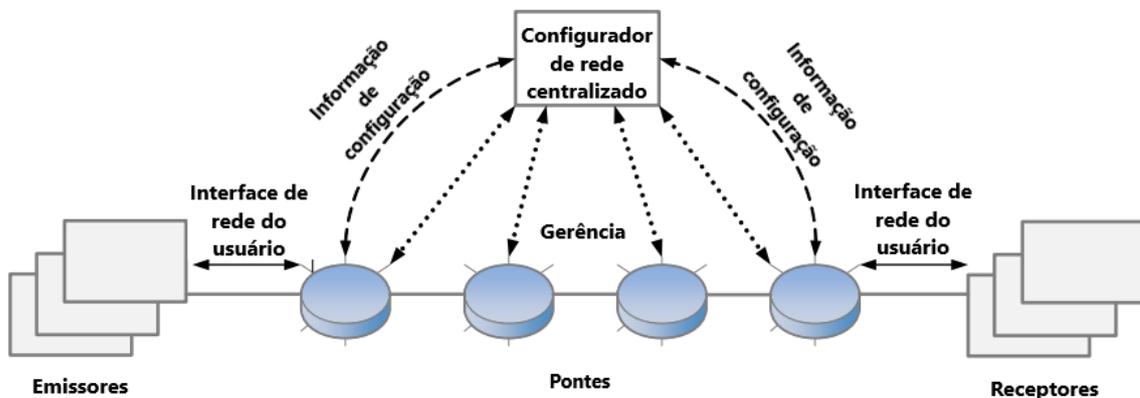


Figura 15: Arquitetura híbrida.

Fonte: Adaptada de [42]

- Totalmente centralizado, onde permite que uma entidade do configurador de usuário central (CUC) recupere os recursos da estação final e configure os recursos do TSN nas estações finais. Neste modelo a UNI está entre o CUC e o CNC.

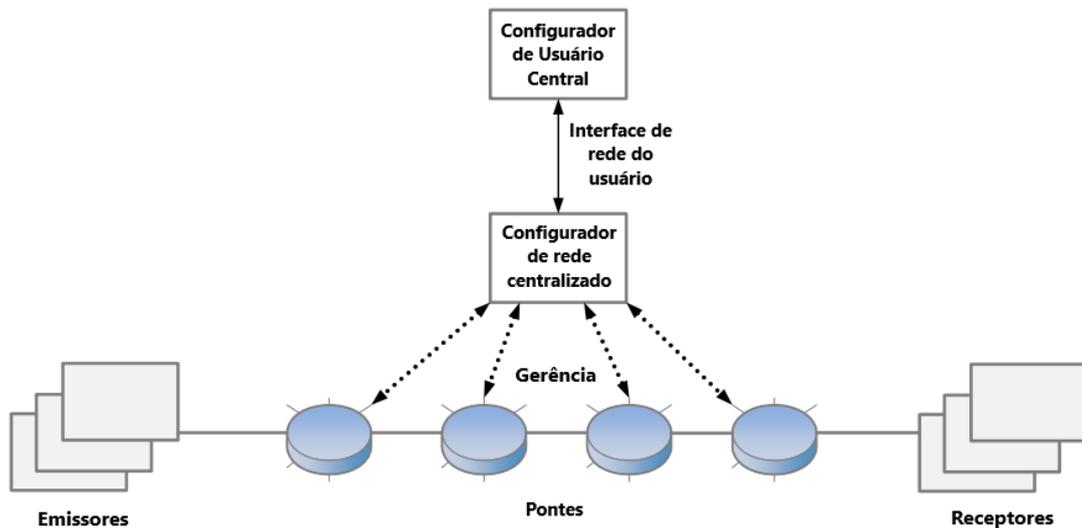


Figura 16: Arquitetura totalmente centralizada.

Fonte: Adaptada de [42]

Nas Figuras 14, 15 e 16, as linhas sólidas representam o protocolo que é usado como UNI para troca de informações de configuração entre usuários (Emissores/Receptores) e a rede (Pontes).

Por sua vez as linhas tracejadas na Figura 14, arquitetura totalmente distribuída, representam o protocolo que transporta as informações de configuração do usuário e da rede do TSN, bem como informações adicionais específicas da configuração da rede. Já as linhas tracejadas na Figura 15, por sua vez, representam o protocolo que transfere informações de configuração entre as Pontes localizadas nas extremidades e o CNC.

Por fim, as linhas pontilhadas das Figuras 15 e 16 representam o protocolo de gerenciamento de rede remota. Em que o CNC atua como o cliente de gerenciamento e cada ponte atua como o servidor de gerenciamento. O CNC usa o gerenciamento remoto para descobrir a topologia física, recuperar os recursos da ponte e configurar os recursos do TSN em cada ponte. Os Emissores e Receptores não são obrigados a participar deste protocolo de gerenciamento.

Conforme [42], nas duas últimas arquiteturas, a totalmente centralizada e a com rede centralizada e usuários distribuídos os mecanismos IEEE 802.1Qbu, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1CB, IEEE 802.1Qci e IEEE 802.1Qch podem ser configurados pelo CNC. O IEEE 802.1Qcc é uma grande especificação com muitos aspectos e é focado na definição de interfaces de gerenciamento e aprimora protocolos existentes para permitir a adminis-

tração da rede TSN. Porém, [45] informa que este padrão ainda não possui muitos detalhes sobre a funcionalidade a ser incluída no CNC e nem como ele irá garantir o gerenciamento das Pontes.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com a ajuda deste trabalho foi possível compreender que a rede sensível ao tempo (TSN) visa permitir a troca de informações em tempo real. Mas além disso, foi possível entender os objetivos e como cada um dos principais mecanismos presentes na rede funcionam. O seu desenvolvimento está sendo realizado pelo grupo de trabalho IEEE 802.1 e recebe um forte apoio do setor industrial. Este setor é um dos principais ambientes onde sistemas que necessitam de uma comunicação em tempo real podem ser encontrados. Com isso já é possível perceber quais e como estes padrões podem ser usados para uma determinada aplicação que se tenha em mente. Por outro lado, dado ao fato de ser uma tecnologia nova, existem ainda muitos problemas de pesquisa das redes TSN em aberto. Para finalizar este trabalho, serão apresentados alguns problemas que estão em aberto segundo [35].

- Prazo do tráfego de baixa prioridade: Como foi visto anteriormente, os nós TSN interrompem a transmissão de quadros de baixa prioridade em andamento para transmitir um quadro de alta prioridade, objetivando garantir o mínimo de atraso possível ao quadro de alta prioridade. Dependendo da intensidade do tráfego de alta prioridade, um quadro de baixa prioridade pode ser interrompido várias vezes. Deste modo é possível observar que se a intensidade de tráfego de alta prioridade for significativamente maior do que a intensidade de tráfego de baixa prioridade, o atraso de ponta a ponta do tráfego de baixa prioridade pode aumentar bastante. Geralmente, o tráfego de baixa prioridade transporta dados sensíveis a atrasos, que são menos críticos do que os dados de tráfego de alta prioridade, mas ainda devem ser entregues dentro do prazo final de pior caso. No atual estado da técnica, não existe nenhum mecanismo em pesquisa nem padrões para garantir o pior atraso de ponta a ponta do tráfego de baixa prioridade.
- Impacto da imprecisão na sincronização: Foram desenvolvidas várias técnicas para redes TSN que visam melhorar a precisão da sincronização, minimizando os erros de sincronização. Porém existe uma falta de estudos que quantifiquem as implicações das imprecisões de sincronização no desempenho da rede sensível ao tempo em termos de atraso de ponta a ponta e de atrasos ao longo da rede. Devido a erros de sincronização em nós TSN, as transmissões agendadas pelo modelador sensível de tempo em um determinado intervalo de tempo podem estender ou avançar para o intervalo de tempo adjacente, o que pode afetar o mecanismo geral de planejamento em um nó TSN. Por isso, o impacto no desempenho devido a erros de sincronização requer uma investigação detalhada.
- Coordenação entre agendadores: Os modeladores sensíveis ao tempo implementam princípios de agendamento locais específicos para cada nó TSN. As características

sensíveis ao tempo de ponta a ponta de um fluxo são estabelecidas sob a suposição de que cada nó TSN no caminho do fluxo garante as características sensíveis ao tempo. No entanto, se um nó TSN intermediário não conseguir impor as características do TSN devido à sobrecarga ou devido a imprecisões do cronômetro ou do cronograma ou por algum outro motivo, as características gerais do fluxo de ponta a ponta poderão ser comprometidas. Essa situação pode ser mais provável para os nós TSN que estão posicionados onde vários fluxos podem ser agregados, ao contrário dos nós de borda que são utilizados por apenas alguns fluxos. Por isso, é importante encontrar um meio coordenar os agendadores para assegurar que todos os nós da rede sempre garantam as características sensíveis ao tempo.

- Redes de longa distância: Os mecanismos de protocolo sensíveis ao tempo que são aplicados a microambientes, como redes automotivas, também podem ser aplicados a macroambientes, como redes de longa distância (WANs - Wide Area Networks). Na maioria das situações, o atraso de rede de ponta a ponta é comandado pelo tempo de espera nas filas dos nós intermediários. Aplicando-se as regras do TSN aos nós, o atraso global no final de um fluxo em uma rede WAN pode ser reduzido significativamente. No entanto, as redes de longa distância normalmente lidam com um grande número de fluxos e operam com capacidades muito grandes, tornando o gerenciamento de fluxo do TSN muito desafiador.

Estas foram apenas algumas dentre várias outras questões em aberto no tema de Rede Sensível ao Tempo e o intuito disto é incentivar outros pesquisadores a se relacionarem mais com este tema. Estes problemas podem ser estudados, explorados e pesquisados com o objetivo de contribuir para o melhoria do mecanismo que ainda está em desenvolvimento. Vale ressaltar que estes não são os únicos problemas relacionados ao tema, se o gráfico de bolhas for analisado várias outras lacunas podem ser encontradas.

ANEXO A – ARTIGOS APROVADOS NO MAPEAMENTO

Nesta sessão é apresentado os artigos que foram aprovados no protocolo utilizado para a realização do mapeamento sistemático feito neste trabalho. Eles estão divididos de acordo com suas facetas:

Veículos

- Analysis of Ethernet-switch traffic shapers for in-vehicle networking applications.
- Formally Verifiable Modeling of In-Vehicle Time-Sensitive Networks (TSN) Based on Logic Programming.
- Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's burst-limiting shaper.
- An ontology-based Plug-and-Play approach for in-vehicle Time-Sensitive Networking (TSN).
- New interconnection methodology of TSNs using V2X communication.
- Level 5 by Layer 2: Time-Sensitive Networking for Autonomous Vehicles.

Mecanismos

- A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication and Automation Systems.
- Time-aware preemption to enhance the performance of Audio/Video Bridging (AVB) in IEEE 802.1 TSN.
- Ultra-Low Latency (ULL) Networks: The IEEE TSN and IETF DetNet Standards and Related 5G ULL Research.
- IEEE/ISO/IEC International Standard-Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 1CB: Frame replication and elimination for reliability.
- IEEE/ISO/IEC International Standard - Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 1Q: Bridges and bridged networks- AMENDMENT 6: Per-stream filtering and policing.
- Implementing time-triggered communication over a standard ethernet switch.

- A comparison of fault-tolerance concepts for IEEE 802.1 Time Sensitive Networks (TSN).
- TSimNet: An Industrial Time Sensitive Networking Simulation Framework Based on OMNeT++.
- Effects of port congestion in the gate control list scheduling of time sensitive networks.
- Towards a time redundancy mechanism for critical frames in time-sensitive networking.
- Synchronization Quality of IEEE 802.1AS in Large-Scale Industrial Automation Networks.
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Frame Replication and Elimination for Reliability.
- Multilevel ingress scheduling policy for Time Sensitive Networks.
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing.
- Redundancy Management for Safety-Critical Applications with Time Sensitive Networking.
- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks – Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements.
- A Time-sensitive Networking (TSN) Simulation Model Based on OMNET++.
- Timing Analysis of AVB Traffic in TSN Networks Using Network Calculus.
- Demo Abstract: Slate XNS—An Online Management Tool for Deterministic TSN Networks.
- IEEE 802.1Qbv Gate Control List Synthesis Using Array Theory Encoding.
- Time-Sensitive Networking: An Introduction.
- Introduction to Time-Sensitive Networking.
- Traffic Planning for Time-Sensitive Communication.
- Distributing Deterministic, Accurate Time for Tightly Coordinated Network and Software Applications: IEEE 802.1AS, the TSN profile of PTP.

- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network–Bridges and Bridged Networks.
- Evaluation of Time-Triggered Traffic in Time-Sensitive Networks Using the OPNET Simulation Framework.
- Genetic Algorithm for Scheduling Time-Triggered Traffic in Time-Sensitive Networks.
- Prevailing and emerging cyber threats and security practices in IoT-Enabled smart grids: A survey.
- Routing algorithms for IEEE802.1Qbv networks.
- An Analysis of Frame Replication and Elimination for Time-Sensitive Networking.
- Analysis and implementation of packet preemption for Time Sensitive Networks.
- Scheduling Real-Time Communication in IEEE 802.1Qbv Time Sensitive Networks.

QoS

- Time-slotted software-defined Industrial Ethernet for real-time Quality of Service in Industry 4.0.
- Poster: Formal QoS Compatibility Verification for Components on Time-Sensitive Networking.

Alocação de Banda

- Research on Optimal Bandwidth Allocation for the Scheduled Traffic in IEEE 802.1 AVB.
- An independent yet efficient analysis of bandwidth reservation for credit-based shaping.
- Size-based queuing: an approach to improve bandwidth utilization in TSN networks.

Segurança

- Invited: Cooperation or competition? Coexistence of safety and security in next-generation Ethernet-based automotive networks.
- Secure and Time-sensitive Communication for Remote Process Control and Monitoring.
- Simplifying functional safety communication in modular, heterogeneous production lines.

Performance

- Industrial Communication Systems and Their Future Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G.
- Performance Comparison of IEEE 802.1 TSN Time Aware Shaper (TAS) and Asynchronous Traffic Shaper (ATS)
- No-wait Packet Scheduling for IEEE Time-sensitive Networks (TSN).
- New automatic de-registration method utilizing a timer in the IEEE802.1 TSN.
- Formal worst-case performance analysis of time-sensitive Ethernet with frame pre-emption.
- Towards a quantization based accuracy and precision characterization of packet-based time synchronization.
- Load balancing routing in Time-Sensitive Networks.
- Routing optimization of AVB streams in TSN networks.
- XpressEth: Concise and efficient converged real-time Ethernet.
- ILP-Based Joint Routing and Scheduling for Time-Triggered Networks.
- Optimizing message routing and scheduling in automotive mixed-criticality time-triggered networks.
- Poster: Performance Evaluation of an Open-Source Audio-Video Bridging/Time-Sensitive Networking Testbed for Automotive Ethernet.
- Exploring Practical Limitations of Joint Routing and Scheduling for TSN with ILP.
- Timing Analysis of AVB Traffic in TSN Networks Using Network Calculus.
- Analysis and modeling of asynchronous traffic shaping in time sensitive networks.
- Incorporating TSN/BLS in AFDX for mixed-criticality applications: Model and timing analysis.
- Stability-aware integrated routing and scheduling for control applications in Ethernet networks.
- Performance enhancement of extended AFDX via bandwidth reservation for TSN/BLS shapers.

Tecnologia

- Coexistence Standardization of Operation Technology and Information Technology.
- Next generation real-time networks based on IT technologies.
- Work-in-Progress: Towards Real-Time Smart City Communications using Software Defined Wireless Mesh Networking.
- Overview and effect of deterministic ethernet on test strategies.

Protocolo

- IEEE Standard for a Transport Protocol for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks.
- Hardware Assisted Clock Synchronization with the IEEE 1588-2008 Precision Time Protocol

Arquitectura

- Architecture of a synchronized low-latency network node targeted to research and education.
- Automotive E/E-architecture enhancements by usage of ethernet TSN.
- Time-triggered Switch-Memory-Switch Architecture for Time-Sensitive Networking Switches.
- Towards a Fault-Tolerant Architecture Based on Time Sensitive Networking.
- End-to-end Redundancy between Real-time I4.0 Components based on Time-Sensitive Networking.
- Investigation on a distributed SDN control plane architecture for heterogeneous time sensitive networks.
- Trends in industrial communication and OPC UA.
- Emerging COTS architecture support for real-time TSN ethernet.
- Fault-tolerant topology and routing synthesis for IEEE time-sensitive networking.
- A graphical modeling tool supporting automated schedule synthesis for time-sensitive networking.
- Time-sensitive Software-defined Network (TSSDN) for Real-time Applications.

Industria

- Recent IEEE 802 developments and their relevance for the avionics industry.
- Formal and simulation-based timing analysis of Industrial-Ethernet sercos III over TSN.
- The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0.
- Comparison of Time Sensitive Networking (TSN) and TTEthernet.
- TSN-Enabled OPC UA in Field Devices.
- Open Source OPC UA PubSub Over TSN for Realtime Industrial Communication.
- Enabling Fog Computing for Industrial Automation Through Time-Sensitive Networking (TSN).
- Software- Defined Networking as an Enabler for Future Industrial Network Management.
- Design Aspects of Low-Latency Services with Time-Sensitive Networking.
- Towards integration of Industrial Ethernet with 5G mobile networks.
- Scheduling in time sensitive networks (TSN) for mixed-criticality industrial applications.
- An Evaluation of the Applicability of OPC UA Publish Subscribe on Factory Automation use Cases.
- Real- Time Capable Internet Technologies for Wired Communication in the Industrial IoT-a Survey.
- Dynamic Real-time Orchestration of I4.0 Components based on Time-Sensitive Networking.
- Fogification of industrial robotic systems: research challenges.

Sem fio

- SHARP: Towards the Integration of Time-Sensitive Communications in Legacy LAN/WLAN.
- Precise Clock Synchronization in High Performance Wireless Communication for Time Sensitive Networking.

Interconexão

- Deterministic Hybrid Architecture with Time Sensitive Network and Wireless Capabilities.

Configuração

- A hardware/software co-design approach for Ethernet controllers to support time-triggered traffic in the upcoming IEEE TSN standards.
- Time-sensitive networking (TSN): An experimental setup.
- Runtime reconfiguration of time-sensitive networking (TSN) schedules for Fog Computing.
- Self-configuration of IEEE 802.1 TSN networks.
- Fault-Resilient Topology Planning and Traffic Configuration for IEEE 802.1Qbv TSN Networks.
- A Reconfigurable Architecture for Packet Based 5G Transport Networks.
- Software-defined networking in cyber-physical systems: A survey.
- SDN-based configuration solution for IEEE 802.1 time sensitive networking (TSN).

Referências

- [1] J. H. Marcos Santos. (jan. de 2018). Indústria 4.0, Web 3.0 e a Transformação Digital, endereço: <https://www.aquare.la/industria-4-0-web-3-0-e-transformacao-digital/> (acesso em 10/02/2019).
- [2] M. Felser, M. Rentschler e O. Kleineberg, “Coexistence Standardization of Operation Technology and Information Technology”, *Proceedings of the IEEE*, pp. 1–13, 2019.
- [3] K. Qian, F. Ren, D. Shan, W. Cheng e B. Wang, “XpressEth: Concise and efficient converged real-time Ethernet”, em *2017 IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [4] L. L. Bello e W. Steiner, “A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication and Automation Systems”, *Proceedings of the IEEE*, pp. 1–25, 2019.
- [5] IEEE. (maio de 2017). Introduction to IEEE 802.1, endereço: <http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2017/tsn-farkas-intro-0517-v01.pdf> (acesso em 14/04/2019).
- [6] N. Finn, “Introduction to Time-Sensitive Networking”, *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, n° 2, pp. 22–28, 2018.
- [7] J. L. Messenger, “Time-sensitive networking: An introduction”, *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, n° 2, pp. 29–33, 2018.
- [8] IEEE. (2012). IEEE 802.1 Working Group, endereço: <https://1.ieee802.org> (acesso em 14/04/2019).
- [9] F. Kenju. (2010). Introdução à revisão sistemática da literatura, endereço: <https://pt.slideshare.net/fkenjikamei/introduo-reviso-sistematica-da-literatura> (acesso em 14/04/2019).
- [10] L. C. de Almeida, V. G. Pinheiro, F. G. dos Santos e I. E. da Fonseca, “A systematic mapping study on identifying attack traffic in IP networks”, pp. 1–4,
- [11] B. Kitchenham, “Procedures for performing systematic reviews”, *Keele, UK, Keele University*, vol. 33, n° 2004, pp. 1–26, 2004.
- [12] L. C. de Almeida, “Ferramenta computacional para identificação e bloqueio de ataques de negação de serviço em aplicações web”, diss. de mestrado, 2013, pp. 1–70.
- [13] S. da Silva Jacinto, “Um Mapeamento Sistemático da Pesquisa sobre a Influência da Personalidade na Engenharia de Software”, pp. 1–35, 2010.

- [14] S. Keele et al., “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering”, Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE, rel. téc., 2007, pp. 1–65.
- [15] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba e M. Mattsson, “Systematic mapping studies in software engineering.”, em *Ease*, vol. 8, 2008, pp. 68–77.
- [16] J. Bailey, D. Budgen, M. Turner, B. Kitchenham, P. Brereton e S. Linkman, “Evidence relating to Object-Oriented software design: A survey”, em *First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM 2007)*, IEEE, 2007, pp. 482–484.
- [17] B. Kitchenham e S. Charters, “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering”, 2007.
- [18] IEEE. (2016). 802.1Qbv - Enhancements for Scheduled Traffic, endereço: <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1bv.html> (acesso em 25/03/2019).
- [19] A. S. Oliver Kleineberg, *Time-Sensitive Networking for dummies*. John Wiley & Sons, 2018, pp. 1–53.
- [20] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Bridges and Bridged Networks - Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic”, Standard, mar. de 2016, pp. 1–57. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7572858.
- [21] TTTech, “IEEE TSN (Time-Sensitive Networking): A Deterministic Ethernet Standard”, pp. 1–9, 2015.
- [22] R. S. Oliver, S. S. Craciunas e W. Steiner, “IEEE 802.1 Qbv gate control list synthesis using array theory encoding”, em *2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, IEEE, 2018, pp. 13–24.
- [23] P. Heise, F. Geyer e R. Obermaisser, “TSimNet: An industrial time sensitive networking simulation framework based on OMNeT++”, em *2016 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [24] T. Wan e P. Ashwood-Smith, “A performance study of CPRI over Ethernet with IEEE 802.1 Qbu and 802.1 Qbv enhancements”, em *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [25] Y. Shimokawa e Y. Shiobara, “Real-time Ethernet for industrial applications”, em *Proc. of IECON*, 1985, pp. 829–834.
- [26] G. A. Ditzel e P. Didier, “Time sensitive network (tsn) protocols and use in ethernet/ip systems”, em *2015 ODVA Industry Conference & 17th Annual Meeting*, 2015, pp. 1–24.

- [27] R. Hummen, S. Kehrer e O. Kleineberg, “White paper: TSN-Time Sensitive Networking”, *Belden, St. Louis, MI, USA, Tech. Rep.*, pp. 1–12, 2017.
- [28] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding”, Standard, jun. de 2017, pp. 1–30. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.7961303.
- [29] “Time-Sensitive Networking: A Technical Introduction”, *Cisco*, pp. 2–6, 2017.
- [30] Y. J. Kim, J. H. Kim, B. M. Cheon, Y. S. Lee e J. W. Jeon, “Performance of IEEE 802.1 AS for automotive system using hardware timestamp”, em *The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)*, IEEE, 2014, pp. 1–2.
- [31] “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks”, Standard, mar. de 2011, pp. 1–192. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.5741898.
- [32] M. Gutiérrez, W. Steiner, R. Dobrin e S. Punnekkat, “Synchronization quality of IEEE 802.1 AS in large-scale industrial automation networks”, em *2017 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, IEEE, 2017, pp. 273–282.
- [33] S. S. Craciunas, R. S. Oliver e W. Steiner, “Demo Abstract: Slate XNS—An Online Management Tool for Deterministic TSN Networks”, em *2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, IEEE, 2018, pp. 103–104.
- [34] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks— Bridges and Bridged Networks - Amendment 24: Path Control and Reservation”, Standard, mar. de 2016, pp. 1–120. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7434544.
- [35] A. Nasrallah, A. S. Thyagaturu, Z. Alharbi, C. Wang, X. Shao, M. Reisslein e H. ElBakoury, “Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF Det-Net standards and related 5G ULL research”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, n° 1, pp. 88–145, 2018.
- [36] O. Rusu e V. Vraciu, “IS-IS metric optimization”, em *9th RoEduNet IEEE International Conference*, IEEE, 2010, pp. 282–286.
- [37] “ISO/IEC/IEEE International Standard – Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 1Q: Bridges and bridged networks AMENDMENT 1: Path control and reservation”, Standard, jul. de 2017, pp. 1–122. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.8511100.

- [38] F. Bannour, S. Souihi e A. Mellouk, “Distributed SDN control: Survey, taxonomy, and challenges”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, n° 1, pp. 333–354, 2018.
- [39] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Frame Replication and Elimination for Reliability”, Standard, out. de 2017, pp. 1–102. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.8091139.
- [40] IEEE. (2016). Per-Stream Filtering and Policing, endereço: <https://1.ieee802.org/tsn/802-1qci/> (acesso em 25/03/2019).
- [41] A. Gupta, A. Anpalagan, G. H. Carvalho, L. Guan e I. Woungang, “Prevailing and emerging cyber threats and security practices in iot-enabled smart grids: A survey”, *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 1–31, 2019.
- [42] “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks–Bridges and Bridged Networks – Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements”, Standard, out. de 2018, pp. 1–218. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8514112.
- [43] E. Molina e E. Jacob, “Software-defined networking in cyber-physical systems: A survey”, *Computers & Electrical Engineering*, vol. 66, pp. 407–419, 2018, ISSN: 0045-7906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.05.013>. endereço: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790617313368>.
- [44] P. Pop, M. L. Raagaard, M. Gutierrez e W. Steiner, “Enabling fog computing for industrial automation through time-sensitive networking (TSN)”, *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, n° 2, pp. 55–61, 2018.
- [45] S. B. H. Said, Q. H. Truong e M. Boc, “SDN-based configuration solution for IEEE 802.1 time sensitive networking (TSN)”, *ACM SIGBED Review*, vol. 16, n° 1, pp. 27–32, 2019.



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

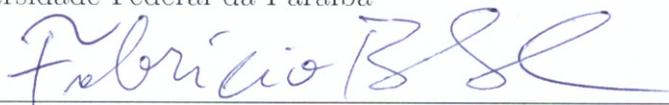
Trabalho de Conclusão de Curso de Ciência da Computação intitulado *Rede Sensível ao Tempo: Um Estudo do Mapeamento Sistemático* de autoria de Fernando Henrique Nascimento de Souza, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:



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



Prof. Dr. Hugerles Sales Silva
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho
Universidade Federal da Paraíba



Coordenador(a) do Departamento de Informática
Gustavo Henrique Matos Bezerra Motta
CI/UFPB

João Pessoa, 10 de maio de 2019