



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

**TIME CRITICAL SERVICES IN 5G**

**Relatore: Prof.ssa GIADA GIORGI**

**Laureando: GIUSEPPE TRETTI**

**ANNO ACCADEMICO 2024 – 2025**



# INDICE

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO I .....</b>	<b>5</b>
<b>CARATTERISTICHE DI UNA RETE .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 La latenza.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 La larghezza di banda.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Affidabilità e disponibilità .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Throughput .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO II.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUZIONE 5G.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Cenni storici e valutazioni .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Sviluppo e applicazioni .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPITOLO III .....</b>	<b>15</b>
<b>TIME CRITICAL SERVICES .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Cosa sono e requisiti fondamentali .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPITOLO IV.....</b>	<b>21</b>
<b>PRECISION TIME PRTOCOL .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Funzionamento.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPITOLO V .....</b>	<b>27</b>
<b>SISTEMI DI SINCRONIZZAZIONE.....</b>	<b>27</b>
<b>CAPITOLO VI.....</b>	<b>31</b>
<b>DISTRIBUZIONE DELLA TEMPORIZZAZIONE.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Distribuzione del GM TSN 802.1AS.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Generatore timer nel 5G Core (NW-TT) .....</b>	<b>33</b>
<b>6.3 Generatore timer nel DS-TT .....</b>	<b>34</b>
<b>CAPITOLO VII .....</b>	<b>35</b>
<b>REQUISITI PER L'INTEGRAZIONE TSN SU 5G .....</b>	<b>35</b>
<b>CAPITOLO VIII.....</b>	<b>39</b>
<b>RILEVAMENTO DEL BRIDGE 5G.....</b>	<b>39</b>
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>46</b>



## ABSTRACT

I Time Critical Services (TCS) sono tutti quei servizi che necessitano di essere svolti o soddisfatti in un tempo ben definito e limitato. Prima dell'avvenimento del 5G, i metodi utilizzati per gestire i TCS erano soprattutto reti cablate dedicate, fibra ottica e reti locali; queste soluzioni però prevedevano costi di realizzazione e di manutenzione particolarmente elevati. Un'altra soluzione che veniva adottata era l'ottimizzazione delle reti mobili precedenti al 5G: queste però non garantivano un livello di latenza minimo necessario e un'affidabilità sufficiente. Con lo sviluppo della quinta generazione di reti mobili, sono state introdotte nuove tecnologie, come l'Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) e il Time Sensitive Networking (TSN), in grado di rispettare i requisiti particolarmente stringenti dei TCS. Nella tesi viene analizzata l'integrazione del 5G all'interno di questi specifici casi d'uso, mettendo in evidenza l'importanza della sincronizzazione dei dispositivi di rete e i diversi sistemi di distribuzione temporali necessari per tale sincronizzazione; in particolar modo verrà analizzato il Precision Time Protocol, ovvero un protocollo di sincronizzazione temporale in grado di garantire un'accuratezza inferiore al microsecondo. Questi messaggi di sincronizzazione (generati da PTP o da altri protocolli) possono essere inviati tramite 5G il quale fungerà da "ponte" tra i dispositivi di rete. Il bridge 5G però necessita di una configurazione iniziale: questa richiede l'intervento dello User Plane Function (UPF), della Policy Control Function (PCF) e della Session Management Function (SMF), le quali consentono un trattamento adeguato alle informazioni che i dispositivi di rete si scambiano garantendo così i requisiti stringenti richiesti dei TCS.



# CAPITOLO I

## CARATTERISTICHE DI UNA RETE

In questo capitolo vengono spiegati i significati di alcuni termini fondamentali che si utilizzano nell'ambito delle reti mobili; questo è importante, non solo per la comprensione dei capitoli successivi, ma anche per mettere in evidenza alcuni parametri fondamentali che definiscono la "qualità della rete" utilizzata.

### 1.1 La latenza

La latenza viene molto spesso intesa come la misurazione del ritardo di un sistema. In particolar modo la latenza di rete, misurata in millisecondi (ms), è la quantità di tempo necessaria affinché i dati vengano trasferiti da un dispositivo all'altro attraverso una rete. Quindi una rete ad alta latenza avrà tempi di risposta più lenti, mentre una rete a bassa latenza avrà tempi di risposta più rapidi. Una volta compreso il suo significato diventa importante definire le sue principali cause:

- **Distanza percorsa dai dati:** la distanza da percorrere influisce sulla latenza perché i dati devono "viaggiare" dal punto in cui il dispositivo effettua la richiesta al punto in cui il server di riferimento si trova, quindi più lunga è la distanza, maggiore sarà la latenza. È necessario evidenziare che, se ad esempio viene inviata una richiesta a due server diversi, il primo situato fisicamente più vicino del secondo, la latenza dovuta alla distanza dal secondo potrebbe essere una decina di millisecondi maggiore della prima. Anche se questa differenza può sembrare piccola, è possibile che subentrino ulteriori fattori (come, ad esempio, una larghezza di banda insufficiente) che provocano un aumento del ritardo particolarmente significativo, soprattutto per alcune applicazioni.
  
- **Mezzo di trasmissione:** si riferisce al percorso fisico esistente tra il punto in cui i dati iniziano il loro percorso e il punto in cui terminano. Il tipo di mezzo di trasmissione influisce notevolmente sulla latenza; ad esempio, l'uso di

cavi in rame invece di cavi in fibra ottica, può aumentare la latenza, a causa della differenza di velocità con cui i dati viaggiano nei due diversi mezzi. Inoltre, è importante considerare che i dati spesso, devono spostarsi da un segmento di rete a quello successivo (hop) prima di raggiungere la loro destinazione. Maggiore è il numero di “salti di rete” maggiore è la latenza.

- Volume di dati inviati: un volume di dati simultaneo elevato può aumentare i problemi di latenza della rete perché i dispositivi di rete possono avere una capacità di elaborazione limitata. Se il volume di dati supera tale capacità, è possibile che si verifichi il fenomeno della congestione di rete, generando dei “colli di bottiglia”, ovvero code in vari punti della rete dove i dati possono essere sottoposti a ritardi aggiuntivi. Questi fenomeni possono essere mitigati mediante tecniche particolari, ma soprattutto mediante un’infrastruttura con capacità di rete appropriata.
- Prestazione dei server: può capitare che i server non abbiano le risorse sufficienti per poter riuscire a gestire grandi quantità di dati. Quando questo si verifica, i tempi di risposta aumentano con un conseguente aumento della latenza di rete percepita. Compreso questo è possibile dire che l’aumento della latenza non è dovuto alla sola rete, ma anche all’incapacità dei server di gestire un volume di dati particolarmente elevato.

## **1.2 La larghezza di banda**

La larghezza di banda di una rete si riferisce alla massima capacità di trasferimento dati di una rete in un dato momento. Si misura in megabit per secondo (Mbps) oppure in gigabit per secondo (Gbps) e identifica il volume di dati che può essere trasmesso con una connessione di rete in un intervallo di tempo. È importante sottolineare che molto spesso il concetto di larghezza di banda viene confuso con quello di velocità della rete: quest’ultima si riferisce a quanto rapidamente i dati possono essere trasferiti da un punto ad un altro, mentre la larghezza di banda si riferisce alla massima quantità di dati che può essere trasferita in una volta. Perciò una rete con grande larghezza di banda potrebbe non essere necessariamente veloce.

### **1.3 Affidabilità e disponibilità**

L'affidabilità di una rete si riferisce alla sua capacità di funzionare in modo stabile e continuo, garantendo la disponibilità costante di servizi e dati che "veicola", anche in presenza di guasti o quando subisce interruzioni. Un concetto differente invece è quello della disponibilità della rete: questa misura il tempo di attività del sistema, concentrandosi sulla percentuale di tempo in cui i servizi sono accessibili, indipendentemente dalla qualità e dalle prestazioni.

### **1.4 Throughput**

Il throughput di una rete è la quantità effettiva di dati che viene trasferita con successo attraverso una rete o un suo segmento in un dato periodo di tempo. Infatti, mentre la larghezza di banda si riferisce alla capacità teorica massima di una connessione, il throughput è la quantità di dati che effettivamente passa. Anche quest'ultimo viene misurato in megabit per secondo (Mbps) oppure in gigabit per secondo (Gbps) e può essere influenzato da diversi fattori come, per esempio, la congestione della rete, la latenza, l'hardware di rete, server e dispositivi di destinazione.



## CAPITOLO II

### INTRODUZIONE 5G

#### 2.1 Cenni storici e valutazioni

Il termine 5G (acronimo di 5th generation) indica la quinta generazione del sistema di connessione Internet Mobile che utilizza onde radio per trasmettere dati, proprio come le reti 4G e precedenti. Per poter comprendere al meglio le necessità e le funzionalità di questo sistema, è utile conoscere lo sviluppo delle precedenti generazioni di reti mobili. La prima generazione (1G), utilizzata per la prima volta nel 1989, era basata su tecnologia analogica e permetteva la sola trasmissione di chiamate vocali caratterizzate però da una scarsa sicurezza, da un'efficienza dello spettro molto bassa e da una velocità di trasmissione molto limitata (circa 2.4 Kbps). La seconda generazione (2G), introdotta all'inizio degli anni '90, segnò il passaggio dall'analogico al digitale raggiungendo una velocità di trasmissione di circa 64Kbps. Questa nuova tecnologia rese possibili i primi servizi di SMS (Short Message Service) e MMS (Multimedia Messaging Service). Lo standard 2G più diffuso era il GSM (Global System for Mobile Communications), tecnologia che permise, non solo di supportare il roaming internazionale, ma aumentò anche drasticamente il livello di sicurezza della comunicazione. La terza generazione (3G), sviluppata e utilizzata in Giappone per la prima volta nel 2005, incrementò la velocità di trasmissione dei dati raggiungendo anche i 2Mbps. Questa generazione abilitò per la prima volta lo scambio mobile di e-mail e download ovvero di tutti i "dati non voce". La quarta generazione (4G) segnò un incremento della capacità di scambiare dati nell'unità di tempo arrivando ad una velocità massima di trasmissione teorica pari a 1Gbps, consentendo così applicazioni multimediali molto più avanzate. Tra gli standard 4G più famosi c'è il Long Term Evolution LTE (ancora oggi utilizzato nelle reti cellulari). La quinta generazione (5G) è stata introdotta negli ultimi anni, ma tutt'ora è in continua evoluzione ed espansione. Permette di raggiungere una velocità di trasmissione massima teorica pari a 20 Gbps, un'affidabilità molto elevata e una latenza molto bassa.

Vengono riportati nel seguito alcuni dei vantaggi e degli svantaggi che lo sviluppo della rete 5G comporta:

- Evita il congestionamento della rete: uno dei grandi vantaggi del 5G è quello di utilizzare nuovi standard di trasmissione a frequenze diverse. Questo permette di “accogliere” sempre più dispositivi che necessitano di collegarsi ad una rete dati, senza il rischio che la rete collassi.
- Maggiore velocità: come evidenziato in precedenza il 5G è nettamente più veloce delle generazioni precedenti sia per quanto riguarda l’upload sia per il download, garantendo tempi più rapidi per il funzionamento dei device e aprendo nuove possibilità di utilizzo.
- Maggiore stabilità: la rete 5G si presenta come una rete molto più stabile rispetto alla generazione precedente e con minori rischi di perdita di segnale. Questo grazie all’utilizzo di maggiori punti di connessione e un migliore sfruttamento della banda.
- Minor consumo energetico: la rete 5G è più efficiente; infatti, essa non è solamente più performante, ma necessita anche di minore potenza, riducendo così il consumo energetico rispetto alla rete 4G.
- Difficoltà e complessità della diffusione di rete: il 5G necessita di un maggior numero di antenne per garantire la stessa copertura garantita in precedenza dal 4G. Tutto ciò richiede importanti lavori infrastrutturali e sforzi economici che rallentano la diffusione della nuova rete.
- Sicurezza: Una maggiore larghezza di banda e l’utilizzo di un numero molto elevato di snodi di connessione richiedono necessariamente sforzi maggiori per il controllo della rete e rendono sicuramente più complesso il corretto monitoraggio per garantire la massima sicurezza.

## 2.2 Sviluppo e applicazioni

Un lavoro cruciale per lo sviluppo di queste nuove tecnologie di comunicazione viene svolto dal 3GPP (Third Generation Partnership Project): una collaborazione mondiale tra organizzazioni di telecomunicazioni che lavorano tutt'ora, allo sviluppo di specifiche applicabili a livello globale per i sistemi di telefonia mobile. Il 3GPP garantisce la standardizzazione e l'interoperabilità tra le varie reti e dispositivi mobili, armonizzando le tecnologie di rete presenti in tutto il mondo. Compito del 3GPP è anche quello di rilasciare nuove versioni (Release) che racchiudono miglioramenti, ulteriori funzionalità e nuove tecnologie di accesso radio. Infatti, a partire della Release 16 del 3GPP, il 5G è stato migliorato per essere utilizzato in nuovi settori di applicazione, tra cui quello industriale, i Time Critical Services (casi di utilizzo per situazioni critiche) e consegne in tempi precisi (come l'invio di un pacchetto dati in un determinato tempo). Sono state introdotte nuove tecnologie come l'Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) e il Time Sensitive Networking (TSN), le quali consentono di fornire servizi particolarmente ottimizzati a consumatori e aziende, supportando grandi quantità di dispositivi connessi come sensori, macchinari industriali e dispositivi indossabili.

In particolare, gli utenti aziendali possono sfruttare il 5G per soddisfare i severi requisiti di disponibilità e prestazioni necessari per i processi produttivi e manifatturieri industriali. Di seguito vengono elencati alcuni ambiti di applicazione della rete 5G mettendo in evidenza i vantaggi che quest'ultima offre nei rispettivi settori:

- **Monitoraggio a distanza:** grazie al contributo di tecnologie complementari, quali oggetti intelligenti, sensori e algoritmi di intelligenza artificiale, il 5G trova ampia applicazione nel monitoraggio da remoto. Alcuni esempi possono essere lo sviluppo di sistemi per la gestione a distanza di città (smart parking, illuminazione intelligente, cestini intelligenti per la raccolta rifiuti) o di campi agricoli o il monitoraggio dei consumi energetici delle abitazioni o delle fabbriche. Un ulteriore esempio di monitoraggio da remoto, sono le soluzioni in ambito Healthcare & Wellness: il 5G potrebbe

consentire l'analisi continua e in tempo reale dei parametri vitali di determinati pazienti oppure di performance sportive degli atleti.

- **Enhanced Experience:** la tecnologia 5G viene utilizzata per migliorare la User Experience dei consumatori. Queste applicazioni trovano ampio sviluppo in ambito Media & Entertainment fornendo servizi di film, serie TV, e Musica. In continua espansione è invece il settore dei videogiochi che cerca di integrare sempre di più la realtà virtuale (VR) e la realtà aumentata (AR) per fornire all'utente esperienze immersive.
- **Sorveglianza e sicurezza:** i sistemi di sorveglianza intelligenti che integrano il 5G, sono in grado di rilevare e segnalare automaticamente comportamenti anomali o sospetti. Questi servizi potrebbero essere utilizzati per sorvegliare a distanza, stazioni e altri luoghi pubblici particolarmente affollati. Sempre in questo ambito, il 5G può essere considerato un valido alleato per le Forze dell'Ordine per prevenire e monitorare delle situazioni di allerta ed emergenza.
- **Operazioni da remoto:** ancora in fase di sviluppo è l'ambito delle operazioni da remoto in campo industriale e sanitario. Nel primo caso, ad esempio, un operatore sul campo potrà essere guidato da remoto ed in tempo reale da un operatore più esperto, o ancora potrà usufruire di maggiori informazioni su strumenti e macchinari grazie all'utilizzo di visori che sfruttano la realtà aumentata. Nell'ambito sanitario invece si assisterà ad uno sviluppo del teleconsulto medico ed alle prime applicazioni di telechirurgia medica robotica (utile anche per la pratica di studenti universitari di medicina).
- **Veicoli autonomi e connessi:** questo ambito di applicazione si offre di migliorare la sicurezza a bordo del guidatore e di scambiare costantemente informazioni con gli altri veicoli connessi (facilitando sempre di più la guida completamente autonoma). Le prime sperimentazioni stanno riguardando in

particolare l'utilizzo di mezzi per effettuare consegne di prodotti in città per ridurre sensibilmente l'impatto di inquinamento del traffico (ad esempio tutti i servizi di corrieri).

- Robot collaborativi: Il 5G consentirà l'utilizzo di robot collaborativi senza l'utilizzo della tecnologia via cavo (attualmente quella più utilizzata per la realizzazione di queste iniziative), permettendo una maggiore flessibilità del layout dell'ambiente lavorativo. Le prime applicazioni sviluppate in tale ambito riguardano robot umanoidi per fornire informazioni alla clientela o robot in fabbrica che automatizzano le operazioni più semplici.



## **CAPITOLO III**

### **TIME CRITICAL SERVICES**

#### **3.1 Cosa sono e requisiti fondamentali**

Il 5G viene utilizzato in particolar modo, in tutti quei servizi che vengono definiti come “Time Critical Services” (TCS), ovvero tutti quei servizi che devono essere svolti o soddisfatti in un tempo ben definito e limitato. Questo avviene mediante le funzionalità URLLC e TSN presenti nel 5G, garantendo quindi bassa latenza e alto livello di affidabilità. Di seguito vengono riportati due esempi di Time Critical Services, nei quali si utilizza il 5G per poterli soddisfare adeguatamente:

- **Gestione delle calamità naturali:** in questo ambito la comunicazione a bassa latenza risulta essere particolarmente importante in quanto garantisce una previsione accurata dell’eventuale disastro naturale, consentendo un allarme precoce e una preparazione preliminare. Successivamente è fondamentale riuscire a coordinare rapidamente gli sforzi di salvataggio, fornire aiuto a chi ne ha bisogno e garantire la sicurezza e il benessere delle comunità colpite. Questo complesso sistema di comunicazione si basa su dispositivi IoT (Internet of Things) in grado di raccogliere, elaborare e comunicare costantemente dati, utili alla prevenzione di vittime umane durante le calamità naturali.
  
- **Smart grid:** a differenza della rete elettrica tradizionale che segue un modello di generazione centralizzata di energia, la smart grid (chiamata anche “rete intelligente”), prevede la presenza di sistemi di generazione distribuiti. Si tratta di sistemi di produzione di elettricità da fonti rinnovabili, allacciati direttamente alla rete elettrica di distribuzione. Visto che le fonti rinnovabili non sono programmabili, è necessario rendere “intelligente” la rete per consentirle di gestire a livello locale eventuali surplus di energia ridistribuendoli in aree vicine, prevedendo o riducendo al minimo una potenziale interruzione. La rete viene resa intelligente tramite misuratori e dispositivi intelligenti, tali da permettere uno scambio continuo e a bassa

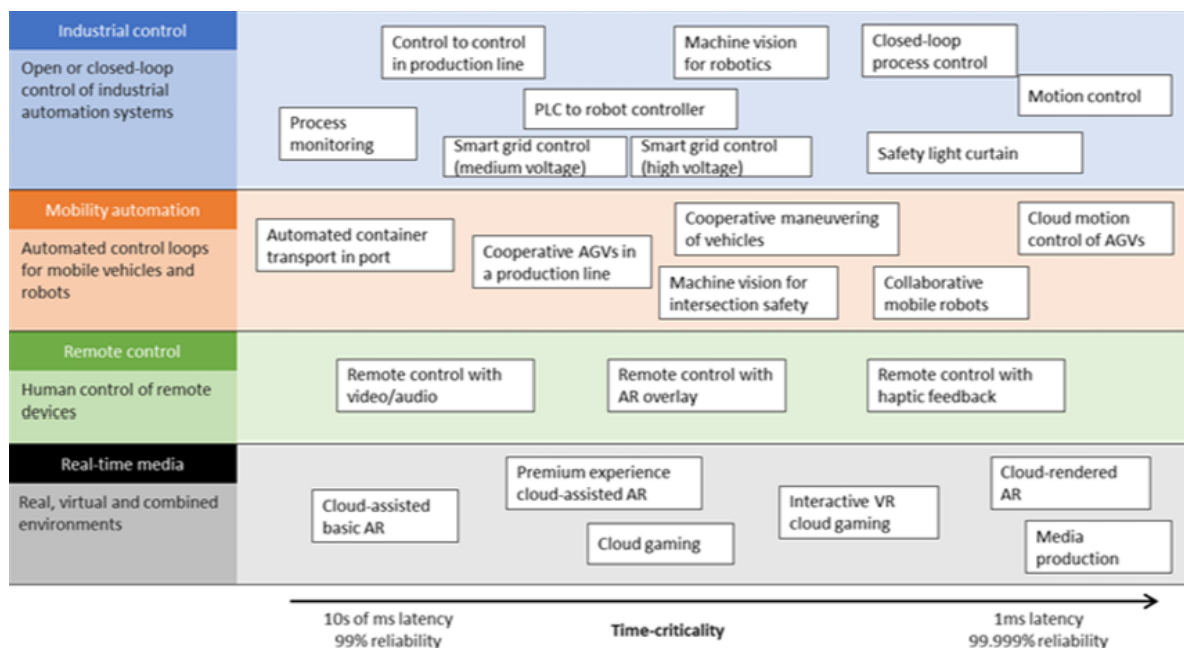
latenza di informazioni tra tutti i nodi, garantendo una gestione particolarmente efficiente dell'energia.

È possibile suddividere i TCS in quattro famiglie di applicazioni:

- **Industrial Control:** questo termine collettivo, viene utilizzato per descrivere diverse tipologie di sistemi di controllo e la relativa strumentazione, che includono dispositivi, sistemi, reti e controlli per gestire e automatizzare i processi industriali. Esempi di questo campo sono il controllo delle smart grid, il machine vision e il control to control del processo produttivo.
- **Mobility Automation:** questo termine si riferisce all'utilizzo di tecnologie per automatizzare o migliorare i vari aspetti della mobilità. I campi maggiormente coinvolti da questo settore sono: la guida autonoma di veicoli stradali, la gestione del traffico e la logistica dei trasporti consentendo una migliore efficienza e un minor consumo in termini di carburante.
- **Remote Control:** con questo termine ci si riferisce alla possibilità di visualizzare lo stato, le prestazioni e il comportamento di una macchina a distanza. Questo consente di conoscere lo stato della macchina in qualsiasi momento, e quindi in caso di guasto, poter accelerare l'intervento di assistenza (possibilmente anche questo da remoto).
- **Real Time Media:** il termine si riferisce alla distribuzione e visualizzazione istantanea di contenuti audio e video nel momento in cui accadono. Vengono coinvolte tecnologie che consentono la codifica, la trasmissione e la decodifica di flussi multimediali con un ritardo minimo. Fanno parte di questo settore la realtà virtuale, la realtà aumentata, lo streaming video e il gaming.

All'interno di ciascuna famiglia, questi casi d'uso possono essere ulteriormente classificati in diverse categorie in base ai diversi "tempi di risposta" richiesti, come è possibile osservare dalla tabella 3.1.

Tab. 3.1 - Famiglie di applicazioni dei Time Critical Services (Fonte: Zong Ping Ping e Ulupinar Fatih (2022), Understanding 5G & Time Critical Services, p. 4)



Prima dello sviluppo del 5G, era importante valutare il livello di copertura che doveva essere garantito per ogni TCS in quanto questi venivano gestiti tramite reti cablate dedicate, fibra ottica, reti locali e ottimizzazioni delle reti mobili precedenti. Con lo sviluppo del 5G, che prevede una copertura a livello mondiale (ancora oggi in espansione), la valutazione precedente diventa non determinante nella gestione dei TCS, i quali potranno essere soddisfatti praticamente ovunque essi si trovino. Riassumendo, nell'analisi dei TCS è importante garantire una latenza minima e un elevato livello di affidabilità e soddisfare un'ampia gamma di requisiti di criticità temporali.

Per poter supportare i TCS è necessario implementare protocolli di comunicazione in grado di gestire lo scambio di dati riducendo al minimo i tempi di latenza. Di questo compito se ne occupa il Time Sensitive Networking (TSN), ovvero una raccolta di standard che stabilisce le linee guida per la trasmissione di dati sensibili al tempo su una rete. Lo standard IEEE 802.1 TSN sta diventando la tecnologia di rete (soprattutto per le fabbriche), per consentire comunicazioni a bassa latenza e comunicazioni deterministiche, ovvero in grado di assicurare che tutti i nodi della rete vengano aggiornati in una sequenza predeterminata ed entro limiti temporali

ben precisi. Con le nuove funzionalità della Release 16 del 3GPP, è stata resa possibile l'integrazione 5G-TSN, ovvero la possibilità di far in modo che la comunicazione che avviene con Ethernet tramite gli standard TSN, possa essere estesa alle reti 5G. Attualmente la connessione cablata non è completamente sostituita dal 5G, che piuttosto funge da "ponte" tra i dispositivi, come verrà analizzato nei capitoli successivi. Nella Release 16 del 3GPP, è incluso anche:

- Il supporto della distribuzione della sincronizzazione dei clock TSN basata su IEEE 802.1AS tramite 5G. Questo standard si occupa di gestire il comportamento degli switch per consentire le funzionalità di sincronizzazione fra i diversi componenti, facendo in modo che la rete sia in grado di supportare una sincronizzazione molto spinta, anche al di sotto del microsecondo.
- Il funzionamento del bridge TSN basato su IEEE 802.1Q. Questo standard definisce il concetto di Virtual LAN (VLAN), ovvero permette di segmentare una rete locale basata su switch, in più reti locali logicamente non comunicanti tra loro, ma che condividono la stessa infrastruttura fisica di rete locale.
- La topologia del bridge TSN basata su IEEE 802.1AB. Questo standard, noto come Link Layer Discovery Protocol (LLDP), definisce un protocollo di collegamento utilizzato dai dispositivi per pubblicizzare la propria identità, capacità ed elenco dei dispositivi in una rete locale. Quindi permette ai dispositivi di rete di "parlare" tra loro e scoprire informazioni sui dispositivi adiacenti.

È importante evidenziare che per rispettare gli esigenti requisiti dei TCS, la sincronizzazione tra i dispositivi di rete è fondamentale. Storicamente si faceva affidamento su sistemi di navigazione satellitare, come il Global Navigation Satellite Systems (GNSS), per fornire la precisione temporale richiesta. Oggi la tecnologia 5G, a partire dalla Release 16 e ulteriormente migliorata con la Release 17, fornisce un simile livello di sincronizzazione ai sistemi in grado di soddisfare i

TCS. Tipiche applicazioni TCS che richiedono una stringente sincronizzazione sono:

- Gestione dei flussi finanziari, scambi di beni e trading ad alta frequenza, richiedono da 1us al 1ms di accuratezza temporale a seconda degli standard normativi e da altri fattori. Questi casi d'uso risultano essere particolarmente impegnativi per i sistemi di temporizzazione di precisione esistenti, come il GNSS, poiché sono implementazioni in ambienti interni.
- Nelle applicazioni di smart grid è fondamentale che la potenza generata sia sincronizzata in fase per ogni generatore. Questi sistemi utilizzano tipicamente il sistema GNSS perché sono implementazioni esterne e quindi il 5G può fornire una seconda sorgente di tempo come sistema di backup.
- Nelle fabbriche operano diversi tipi di macchinari che devono operare in completa coordinazione con il resto del sistema dell'azienda. Per raggiungere un alto livello di coordinamento, è necessario un sistema preciso di sincronizzazione temporale tra i macchinari (di solito circa 1us). Attualmente vengono utilizzati il PTP (Precision Time Protocol) o le sue varianti, come IEEE 802.1AS.



## CAPITOLO IV

### PRECISION TIME PROTOCOL

#### 4.1 Funzionamento

Lo standard IEEE 1588, conosciuto meglio come Precision Time Protocol (PTP), è stato adottato per la prima volta nel 2002 nei sistemi di automazione e controllo, misura e test, produzione energetica, trasmissione, distribuzione e telecomunicazioni. La caratteristica principale di questo protocollo è quella di offrire un metodo per la sincronizzazione dei dispositivi con una precisione al microsecondo.

In una rete che utilizza PTP per sincronizzare i dispositivi, è possibile individuare i seguenti elementi, rappresentati in figura 4.1:

- Il Master clock: è la fonte di riferimento temporale più precisa all'interno di una rete PTP, in quanto idealmente è controllato da un ricevitore GPS. Questo clock invia periodicamente messaggi di sincronizzazione e, a volte, risposte a richieste di ritardo per comunicare il proprio tempo ai clocks degli altri dispositivi della rete.
- Lo Slave clock: è un dispositivo che riceve le informazioni di sincronizzazione dal Master clock, grazie alle quali calcola il ritardo di rete e l'offset. Successivamente, conoscendo i due valori precedenti, aggiusta il proprio clock per allinearsi al tempo del Master. È importante sottolineare che lo Slave clock non agisce come fonte di tempo per altri dispositivi PTP.
- Il boundary clock (BC): è un dispositivo (spesso uno switch di rete) che funge da intermediario, comportandosi sia come uno Slave Clock sia come un Master clock. Il BC possiede almeno due interfacce PTP: quella a monte che si comporta come uno Slave clock sincronizzandosi con il Master clock o con un altro boundary clock di "livello superiore". Sull'interfaccia a valle, invece, si comporta come un Master clock, fornendo informazioni di

sincronizzazione agli Slave clocks o ad altri boundary clocks di “livello inferiore”. I boundary clocks vengono utilizzati molto spesso nelle reti PTP più grandi o complesse.

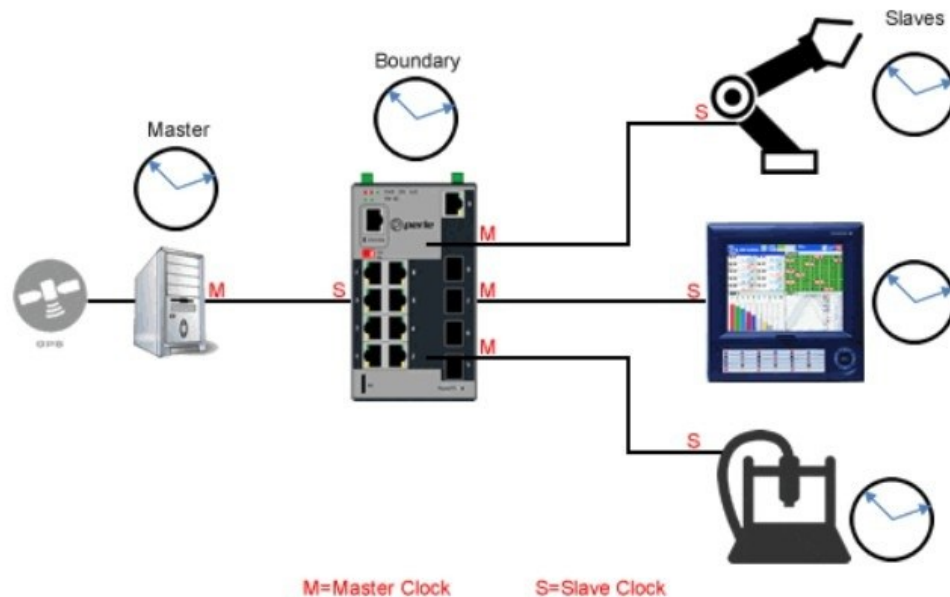


Fig.4.1 - Tipologie di clocks in una rete PTP

Una semplice soluzione per la sincronizzazione dei clocks richiede l’invio agli Slave di un messaggio con il valore del tempo del Master. Al ricevimento di tale messaggio, gli Slave reimpostano i propri clocks in modo da far corrispondere il proprio riferimento orario con quello del Master. Tuttavia, a causa del tempo necessario per l’invio del messaggio, dovuto ai ritardi di propagazione su rete, dai tempi di attesa nelle varie code del sistema, latenza e creazione dei messaggi, il tempo in cui il messaggio viene ricevuto dallo Slave, non coincide con il tempo indicato dal Master. PTP risolve questo inconveniente attraverso l’utilizzo di messaggi fra i diversi nodi PTP per determinare gli scarti dei clocks e i ritardi di rete. Il funzionamento del protocollo PTP risulta essere molto più comprensibile mediante un esempio. I valori temporali riportati in questo esempio (e di conseguenza nelle immagini), non rappresentano dei valori reali, ma vengono utilizzati solo per motivi esplicativi.

Il diagramma rappresentato in figura 4.2 illustra le operazioni necessarie per sincronizzare lo Slave con il Master. In questo esempio, lo Slave inizia con un offset dal Master di 20 secondi, ovvero il Master si trova a 100 secondi e lo Slave a 80 secondi. Al tempo 100 secondi il Master costruisce un messaggio di sincronizzazione da inviare allo Slave. Tuttavia, a causa della latenza e coda interna, il messaggio viene inviato e contrassegnato con un timestamp interno di  $T_1 = 101$  secondi dell'orario del Master locale. A causa dei ritardi di rete, lo Slave riceve il messaggio di sincronismo due secondi dopo, cioè al tempo  $T_2 = 83$  secondi. Quindi il Master invia un messaggio di follow-up a 103 secondi contenente il valore  $T_1$ , il quale arriverà allo Slave al tempo locale di 85 secondi. Quindi, lo Slave acquisisce il tempo  $T_1$  e sottrae il valore precedentemente contrassegnato  $T_2$ , ottenendo un offset calcolato di 18 secondi. Tale offset viene aggiunto al tempo corrente ottenendo un nuovo orario dello Slave di 103 secondi. Tuttavia, il Master e lo Slave non sono ancora completamente sincronizzati. La nuova regolazione non ha preso in considerazione il ritardo di rete.

Si avvia quindi una seconda fase, in cui PTP stima il ritardo di rete. Lo Slave invia un messaggio di delay request al Master al tempo  $T_3 = 108$  secondi. Il Master riceve il messaggio e memorizza il tempo  $T_4 = 112$  secondi, ovvero l'orario del Master locale in cui è stata ricevuta la delay request. All'istante di 115 secondi del Master locale, quest'ultimo invia un messaggio di delay reply allo Slave contrassegnato dal timestamp di valore  $T_4$ . Il messaggio viene ricevuto dallo Slave al suo orario locale di 115 secondi. Lo Slave può quindi determinare il ritardo di rete, il quale si ottiene sottraendo il tempo  $T_3$  al tempo  $T_4$ , ovvero il tempo in cui è stata inviata la delay request dallo Slave al tempo in cui quest'ultima è stata ricevuta dal Master. Si ottiene così un ritardo di 4 secondi. È necessario mettere in evidenza che quest'ultimo valore calcolato deve essere diviso per 2, perché con la prima fase di calcolo dell'offset (pari a 18 secondi) è stato possibile sincronizzare i clocks a meno del ritardo di rete; quindi, dopo la prima correzione, il Master e lo Slave si trovavano ad una differenza temporale pari esattamente al ritardo di rete. Perciò il valore ottenuto dalla differenza tra  $T_4$  e  $T_3$  è pari alla somma tra l'offset fra Master e Slave dopo la prima correzione e il ritardo di rete, ovvero due volte il ritardo di rete. Lo

Slave regola il proprio orologio di 2 secondi, sincronizzandosi perfettamente con il master.

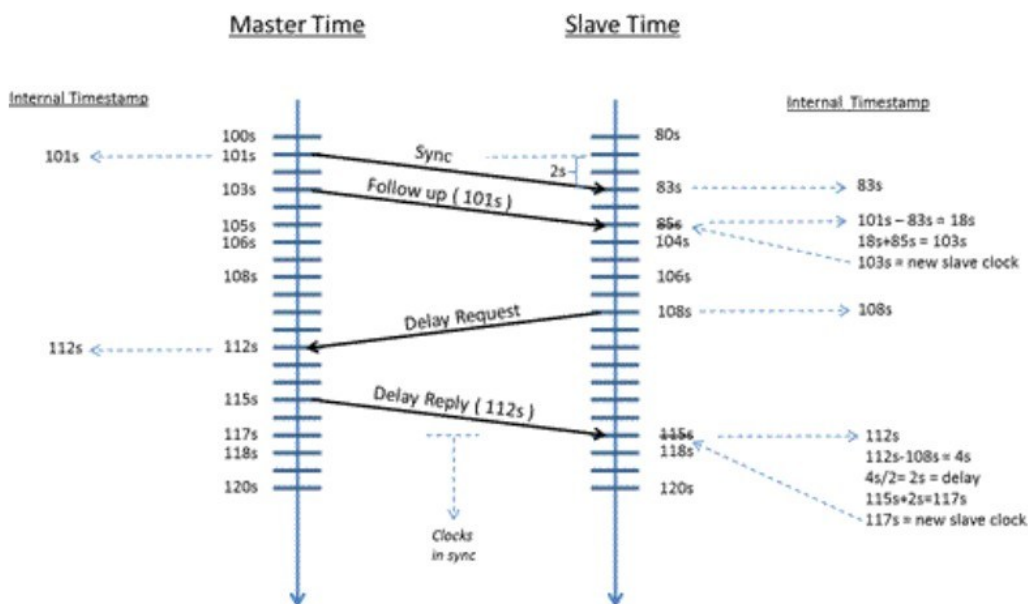


Fig. 4.2 - Diagramma illustrativo del procedimento di sincronizzazione temporale

Di seguito vengono riportate le principali formule che permettono di riassumere il procedimento appena spiegato:

- $T_2 - T_1$ . Effettuando questa prima correzione, è possibile sincronizzare il Master e lo Slave a meno del ritardo di rete.
- $\frac{T_4 - T_3}{2}$ . Grazie al calcolo e alla correzione effettuati al punto precedente, è possibile determinare il ritardo di rete, sincronizzando perfettamente il Master e lo Slave.

I clocks utilizzati nei dispositivi tendono normalmente a “slittare” con il tempo. Per compensare questo fenomeno, il Master invia periodicamente dei messaggi di sincronizzazione verso gli Slaves per garantire la sincronizzazione di questi dispositivi. Inoltre, utilizzando degli switch fra Master e Slaves, le eventuali

variazioni dei ritardi interni degli switch possono causare imprecisioni nell'invio dei messaggi fra Master e Slaves. Infatti, è possibile che si verifichino gli “effetti coda” che possono rallentare la trasmissione in alcune circostanze, generando in alcuni casi delle fluttuazioni. Con un basso carico di rete, questa operazione può avere un effetto limitato, ma durante i periodi di carico superiore può influenzare in maniera considerevole la precisione della sincronizzazione. È possibile risolvere questo problema utilizzando switch dotati di funzionalità IEEE 1588 PTP. Questi dispositivi contengono una propria istanza PTP in cui operano come slave PTP e si sincronizzano rispetto al Master clock connesso. Per gli Slaves PTP a valle, ciascuna porta dello switch agisce come Master PTP per sincronizzare gli Slaves con il proprio orario interno. In questo modo è possibile compensare tutte le fluttuazioni al momento dell'esecuzione e i tempi di attesa degli switch, ottenendo il massimo della precisione anche in reti molto estese.



## CAPITOLO V

### SISTEMI DI SINCRONIZZAZIONE

Per supportare la TSN su 5G, la Release 16 del 3GPP ha introdotto un sistema time-aware compatibile con lo standard IEEE 802.1AS, basato su PTP. Quest'ultimo, come è stato appena spiegato, fornisce il meccanismo di base per la sincronizzazione temporale, mentre lo standard IEEE 802.1AS stabilisce le regole e i parametri specifici per l'uso di PTP nelle reti TSN. Il 5G supporta molteplici modalità di sincronizzazione mediante PTP che consistono tutte però in due sistemi di sincronizzazione cooperanti, come rappresentato in figura 5.1:

- Sistema di distribuzione del tempo allo strato di accesso 5G: viene utilizzato per la sincronizzazione Radio Access Network (RAN). L'utente (UE), il gNodeB (gNB), la User Plane Function (UPF), il traduttore TSN lato rete (NW-TT) e il traduttore TSN lato dispositivo (DS-TT), sono tutti sincronizzati con l'orologio 5G Grandmaster (GM), ovvero l'elemento che funge da fonte principale per la sincronizzazione di tutti componenti della rete 5G.
- Sincronizzazione del dominio PTP: viene utilizzata per distribuire la sincronizzazione del dominio PTP della rete esterna su 5G.

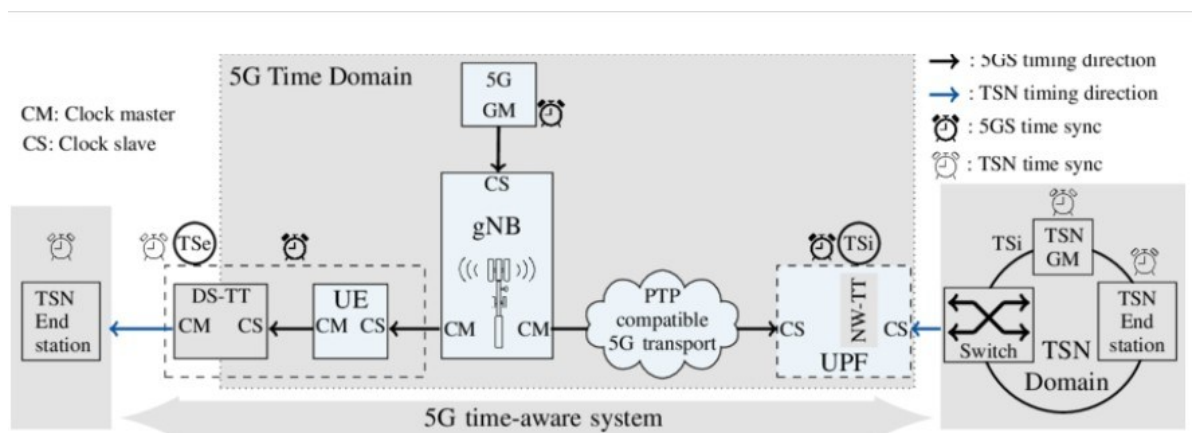


Fig. 5.1 - Rappresentazione dei due sistemi di sincronizzazione cooperanti

Una volta identificati i due sistemi di sincronizzazione, è possibile comprendere come questi interagiscono tra di loro, consentendo la comunicazione tra dispositivi della rete TSN tramite 5G. Inizialmente è necessario considerare i due processi di sincronizzazione indipendenti tra di loro: per esempio, il gNB deve essere solo sincronizzato con l'orologio 5G GM e fornire il processo di sincronizzazione RAN 5G indipendentemente dal PTP della rete esterna. Le due reti comunicano tra loro grazie alla presenza di due dispositivi che fungono da punti di interfaccia logici situati ai margini della rete 5G. Questi sono:

- Il DS-TT (Device-side TSN Translator): chiamato anche “traduttore lato dispositivo”, consente di tradurre i messaggi del traffico TSN in messaggi in formato 5G in caso di uplink (cioè, dalla rete TSN alla rete 5G) o viceversa in caso di downlink (ovvero dalla rete 5G alla rete TSN). Oltre a questo, il DS-TT svolge il compito di compensare i ritardi presenti nella rete 5G, causati per esempio dalla congestione di rete, dalla distanza tra i dispositivi oppure dalla scarsa qualità del segnale. Questo procedimento prende il nome di “aggiornamento dei timestamp” e garantisce ai dispositivi della rete TSN di rimanere sincronizzati con un alto livello di precisione temporale.
- Il NW-TT (Network-side TSN Translator): chiamato anche “traduttore lato rete”, consente di tradurre i messaggi del traffico 5G in messaggi in formato TSN inoltrandoli ai dispositivi appropriati in caso di uplink (cioè, dalla rete 5G alla rete TSN) o viceversa in caso di downlink (ovvero dalla rete TSN alla rete 5G). Anche il NW-TT è coinvolto nell'aggiornamento dei timestamp tramite la comunicazione con il DS-TT, garantendo anche la QoS prevista dalla rete 5G.

Quindi, grazie a questi punti di interfaccia, è possibile che i dispositivi si sincronizzino tra loro, inviandosi messaggi di sincronizzazione PTP tramite 5G. È importante però specificare che la rete TSN e la rete 5G, possono non essere sincronizzate tra loro; infatti, quest'ultima è soggetta a ritardi variabili (jitter),

instabilità di frequenza e soprattutto non è stata progettata per supportare e mantenere la precisione e l'affidabilità della sincronizzazione PTP su rete cablata. Proprio per questi motivi i NW-TT e i DS-TT intervengono sui messaggi PTP per registrare gli eventuali ritardi introdotti dalla rete 5G. A questo punto il 5G può essere considerato come un "ponte" tra i dispositivi TSN, consentendo a questi ultimi di inviare pacchetti di messaggi PTP (quindi per la sincronizzazione) tramite l'utilizzo dei traduttori lato rete e lato dispositivi. Per comprendere al meglio il funzionamento dei sistemi spiegati fino ad ora, viene riportato un esempio di funzionamento di trasmissione di un messaggio PTP tramite l'utilizzo della rete 5G. Quando un dispositivo della rete TSN deve comunicare con un altro macchinario appartenente alla medesima rete, il messaggio PTP viene inviato al DS-TT (presente in tutti i device della rete TSN). Quest'ultimo traduce il traffico TSN, invia il messaggio attraverso la rete 5G e registra i timestamp di ingresso. NW-TT che riceve il messaggio, lo traduce nuovamente in formato TSN, lo inoltra al dispositivo di destinazione e registra i timestamp di uscita. Grazie questi due dati è possibile calcolare il tempo di permanenza del messaggio all'interno della rete 5G (o meglio, attraverso il segmento gestito dal traduttore). Il tempo appena calcolato viene inserito nel campo di correzione (chiamato correction field) dei messaggi di sincronizzazione PTP, il quale è progettato per accumulare i ritardi di transito attraverso i nodi intermedi della rete. Il dispositivo slave della rete TSN utilizza le informazioni contenute nel messaggio PTP (incluse quelle inserite precedentemente nel campo di correzione), per sincronizzare il proprio orologio con l'orologio "master della rete locale".



## **CAPITOLO VI**

### **DISTRIBUZIONE DELLA TEMPORIZZAZIONE**

Quando dei dispositivi si devono sincronizzare tra loro tramite 5G, è possibile utilizzare tre diversi sistemi di distribuzione della sincronizzazione:

- Il sistema 5G (5GS) trasferisce il tempo definito da un orologio Grand Master (GM) TSN 802.1AS, ovvero il tempo di riferimento interno ad una rete TSN.
- Il 5GS trasferisce il tempo generato all'interno del Core 5G, tramite NW-TT.
- Il dispositivo, sincronizzato con il 5GS, trasferisce al DS-TT il tempo UTC (Coordinated Universal Time).

Di seguito, verranno analizzati brevemente i tre sistemi di distribuzione evidenziandone le differenze.

#### **6.1 Distribuzione del GM TSN 802.1AS**

La figura 6.1 mostra l'architettura di un 5GS che trasporta messaggi di sincronizzazione temporale dal GM TSN 802.1AS ai dispositivi finali. Questo tipo di distribuzione viene utilizzata soprattutto in ambienti industriali e nell'automazione di fabbrica. Nella figura è possibile distinguere i seguenti componenti principali:

- Il GM TSN 802.1AS che fornisce informazioni di temporizzazione ai dispositivi, utilizzando il protocollo IEEE 802.1AS. Tramite quest'ultimo fornisce la propria temporizzazione, rappresentata in figura dall'orologio blu.
- NW-TT, che funge da destinatario del messaggio proveniente dal GM TSN 802.1AS, inoltra tale messaggio al Core 5G. Allo stesso tempo cattura e invia i timestamp di ingresso

- Il sistema costituito da NW-TT, Core 5G, gNB, UE e DS-TT sono tutti sincronizzati con il sistema di temporizzazione del 5G (rappresentato in figura dall'orologio bianco). È importante notare che la temporizzazione del 5G può essere diversa da quella del GM TSN 802.1AS e che l'UE è sincronizzato al sistema 5G tramite il System Information Block 9 (SIB9), ovvero il blocco di informazioni relativo alla temporizzazione.
- DS-TT inoltra i messaggi IEEE 802.1AS ai dispositivi a valle, solitamente tramite porta Ethernet. Inoltre, cattura il timestamp di uscita del messaggio e calcola il tempo di permanenza del messaggio sul sistema 5G, grazie al timestamp di ingresso fornito dall'NW-TT.

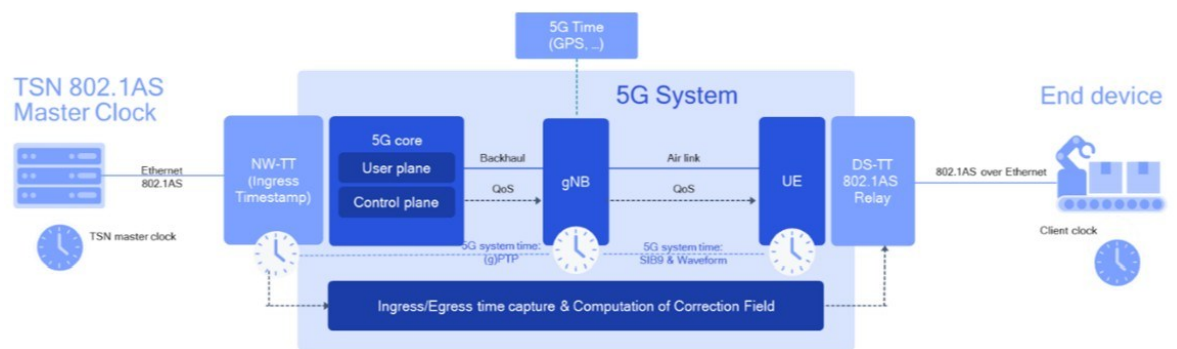


Fig.6.1 – Distribuzione del GM TSN 802.1AS

Quindi il GM TSN 802.1AS invia il messaggio di temporizzazione, il quale viene ricevuto dall'NW-TT e successivamente inoltrato al gNB. A sua volta quest'ultimo invia il messaggio all'UE per inoltrarlo infine al DS-TT. Questo aggiorna il Correction Field del messaggio IEEE 802.1AS utilizzando il tempo di permanenza calcolato (tramite l'aggiornamento dei timestamp), per poi inoltrare definitivamente il messaggio TSN a tutti i dispositivi finali con una precisione temporale di circa 1 microsecondo.

## 6.2 Generatore timer nel 5G Core (NW-TT)

L'architettura di questo sistema è mostrata in figura 6.2. Lo standard 5G consente la generazione del tempo presso l'NW-TT anziché in un GMT TSN. Questo significa che la temporizzazione dei dispositivi si basa sul sistema di distribuzione temporale della rete 5G. Il funzionamento di questo sistema è molto simile al precedente, con la differenza che l'NW-TT si occupa di “annunciare” la temporizzazione del sistema 5G (basato su UTC), consentendo una maggiore interoperabilità e precisione. Questo tipo di sistema è utilizzato molto spesso in grandi implementazioni, come nelle smart grid.

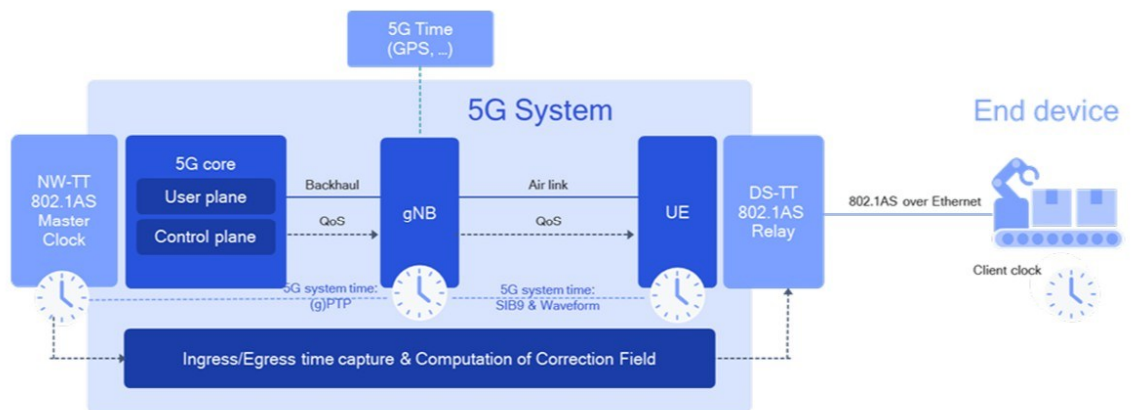


Fig. 6.1 – Generatore timer nel 5G Core (NW-TT)

### 6.3 Generatore timer nel DS-TT

L'architettura di questo sistema è mostrata in figura 6.3. In questo sistema di distribuzione della sincronizzazione, l'UE si sincronizza con il clock del 5G Core, utilizzando SIB9, trasferendo il tempo al DS-TT. Quest'ultimo opera come un GM TSN 802.1AS e trasferisce la temporizzazione del 5G ai nodi a valle, utilizzando il protocollo IEEE 802.1AS. È possibile infine notare che il tempo di permanenza, non è più necessario in questo sistema di distribuzione temporale.

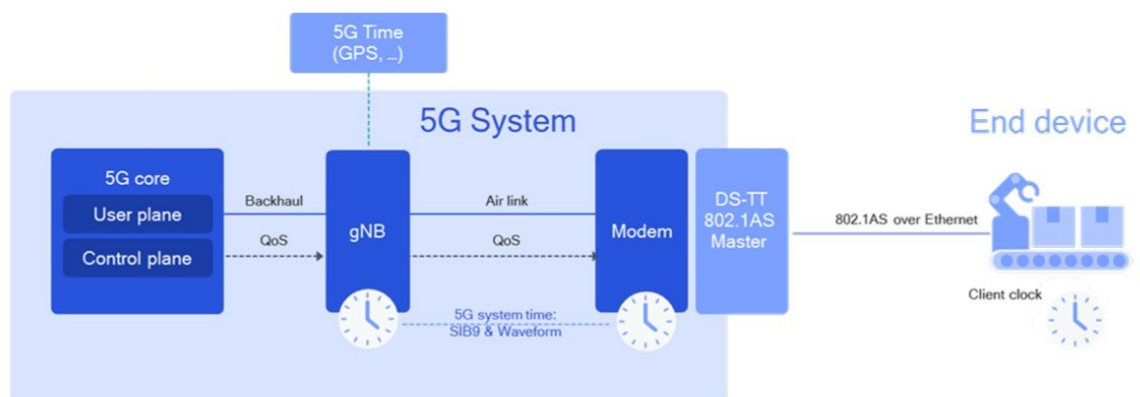


Fig. 6.3 – Generatore timer nel DS-TT

## CAPITOLO VII

### REQUISITI PER L'INTEGRAZIONE TSN SU 5G

Quando una rete TSN viene integrata su 5G, è possibile immaginare che quest'ultimo funga da “ponte di livello 2”, ovvero un canale di comunicazione al di sopra della rete locale con cui comunicano i dispositivi TSN. Questo ponte deve essere conforme agli standard IEEE 802.1Q, 802.1AS, 802.1AB e consentire il trasporto del traffico TSN nelle direzioni downlink (ovvero dalla rete all' UE) e uplink (ovvero dall' UE alla rete) tramite le porte di ingresso-uscita tra il DS-TT di ciascun dispositivo utente e il NW-TT dell'UPF (User Plane Function). Le funzioni chiave per abilitare l'integrazione TSN su 5G sono:

- La sincronizzazione TSN su bridge 5G (come descritto nel capitolo precedente).
- La segnalazione e la configurazione delle capacità TSN e delle porte 5G.
- La scoperta, la segnalazione e la gestione della topologia dei vicini TSN tramite bridge 5G.
- La gestione dei dati 5G per mappare i flussi di traffico TSN ai flussi QoS del 5G tramite meccanismi di binding.

È importante comprendere al meglio quest'ultimo punto prima di procedere con la spiegazione del meccanismo di integrazione della rete TSN su 5G. Ogni flusso di traffico TSN, ovvero l'insieme dei dati sensibili al tempo generati dai dispositivi TSN, possiede delle caratteristiche specifiche in termini di priorità (urgenza di consegna dei dati), latenza minima ammissibile (ritardo massimo tollerato) e bandwidth (larghezza di banda richiesta dal flusso). La sessione PDU dell'UE (User Equipment Protocol Data Unit Session) rappresenta una connessione logica tra il dispositivo utente e la rete dati. Quindi tramite una sessione PDU, l'UE invia un flusso di dati TSN al 5G, il quale può stabilire diversi flussi QoS. Ogni flusso QoS rappresenta un “percorso specifico” all'interno della rete 5G, caratterizzato da una determinata garanzia di bandwidth, priorità di trasmissione, latenza massima e affidabilità. Perciò, una volta ricevuto il flusso dati TSN, avviene il meccanismo di binding che rappresenta l'azione di “collegare” o “associare” uno specifico flusso

di traffico TSN ad un particolare flusso QoS 5G, sulla base delle caratteristiche del flusso di dati TSN. Il meccanismo di binding è fondamentale affinché i dati sensibili al tempo ricevano il trattamento prioritario necessario per il corretto funzionamento delle applicazioni TSN su rete 5G.

Nella Release 16, è stata introdotta una nuova funzione nel piano di controllo della rete 5G, che prevede il coinvolgimento di due nuovi elementi: il Central Network Controller (CNC) e la Funzione Applicativa TSN (TSN-AF). Il primo è un'entità software o hardware centralizzata responsabile della configurazione, gestione e monitoraggio dell'intera rete TSN; può essere considerato come il "cervello" della rete TSN, il quale ha il compito fondamentale di garantire la comunicazione deterministica e sincronizzata nel tempo tra i vari dispositivi che costituiscono la rete TSN. La seconda è una funzione di controllo che si trova all'interno del 5G Core specificatamente progettata per facilitare l'integrazione e l'interoperabilità tra la rete 5G e le reti TSN; la TSN-AF agisce come un "intermediario intelligente" che permette al CNC di una rete TSN esterna, di gestire la rete 5G come se fosse una parte nativa della rete TSN. In questo modo TSN-AF, DS-TT, e NW-TT insieme consentono l'integrazione del bridge 5G con la rete TSN in modo completamente trasparente per il CNC. Per poter gestire l'integrazione TSN su 5G, è necessario che il CNC e la TSN-AF comunichino costantemente tra loro; in particolare è possibile raggruppare le informazioni scambiate nelle seguenti categorie:

- Informazioni fornite dalla TSN-AF al CNC:
  - Aggiornamento delle porte virtuali del bridge 5G
  - Capacità di sincronizzazione temporale del bridge 5G
  - Risultati della scoperta dei vicini connessi alle porte virtuali del bridge 5G, ottenuti tramite LLDP (Link Layer Discovery Protocol)
  - Informazioni sui cambiamenti nello stato del bridge 5G o delle sue porte
- Informazioni fornite dal CNC alla TSN-AF
  - Richieste di configurazione per le porte virtuali del bridge 5G
  - Configurazione della trasmissione del traffico TSN per specifiche classi di traffico

- Obiettivi di sincronizzazione temporale
- Informazioni sulla topologia generale della rete TSN, inclusi gli altri ponti ed endpoint
- Definizione dei flussi di traffico TSN end-to-end e i loro requisiti

Nella Release 16 e nella Release 17, sono presenti delle limitazioni su come TSN-AF può derivare informazioni sufficienti sulla base delle informazioni che il CNC può fornire con le attuali specifiche IEEE 802.1Q rispetto alle informazioni di QoS e di assistenza della pianificazione per un flusso TSN. Un esempio specifico di questa limitazione è rappresentato da quando il CNC, utilizzando il protocollo Pre-Stream and Policing (PSFP) di IEEE 802.1Q, non fornisce alla TSN-AF informazioni esplicite sulla porta di ingresso specifica (il DS-TT) da cui proviene un determinato flusso TSN uplink dal dispositivo UE. Questo risulta essere un problema in quanto un dispositivo utente può avere più sessioni PDU attive contemporaneamente. L'informazione del numero di porta consentirebbe alla TSN-AF di conoscere a priori l'origine del flusso di dati TSN e quindi associare a questo, il flusso QoS specifico in grado di soddisfare tutti i requisiti richiesti da tale flusso di dati TSN.



## **CAPITOLO VIII**

### **RILEVAMENTO DEL BRIDGE 5G**

In questo capitolo verrà spiegato come avviene il rilevamento del bridge 5G, ovvero lo scambio di informazioni necessario affinché i requisiti di comunicazione di una rete TSN vengano rispettati tramite l'utilizzo della rete 5G. Prima però è necessario introdurre alcuni “elementi” fondamentali (rappresentati nella figura 8.1) che verranno coinvolti in questo processo:

- **User Plane Function:** l'UPF è responsabile della gestione e del trasporto del traffico dati utente; può essere considerato come il “condotto principale” attraverso il quale passano tutti i dati in formato 5G. Si occupa principalmente di instradare, inoltrare e ispezionare i pacchetti dati, garantendo l'applicazione delle QoS. Funge anche da punto di ancoraggio per la mobilità e raccoglie dati sull'utilizzo del traffico 5G.
- **Policy Control Function:** la PCF è responsabile della definizione e della gestione delle policy di rete; può essere considerata come l'elemento che “decide le regole” su come il traffico dati deve essere instradato. Si occupa di definire le regole di policy, gestisce la QoS e accede alle informazioni sull'abbonamento per ottenere dati sull'utente.
- **Session Management Function:** la SMF è responsabile della gestione delle sessioni PDU; essa funge da “intermediario” all'intero della comunicazione tra UPF e PCF, stabilita mediante sessione PDU.
- **Packet Forwarding Control Protocol:** il PFCP è un protocollo fondamentale che permette all'SMF di configurare l'UPF affinché quest'ultimo possa gestire correttamente il traffico TSN con i requisiti di bassa latenza e alta affidabilità.

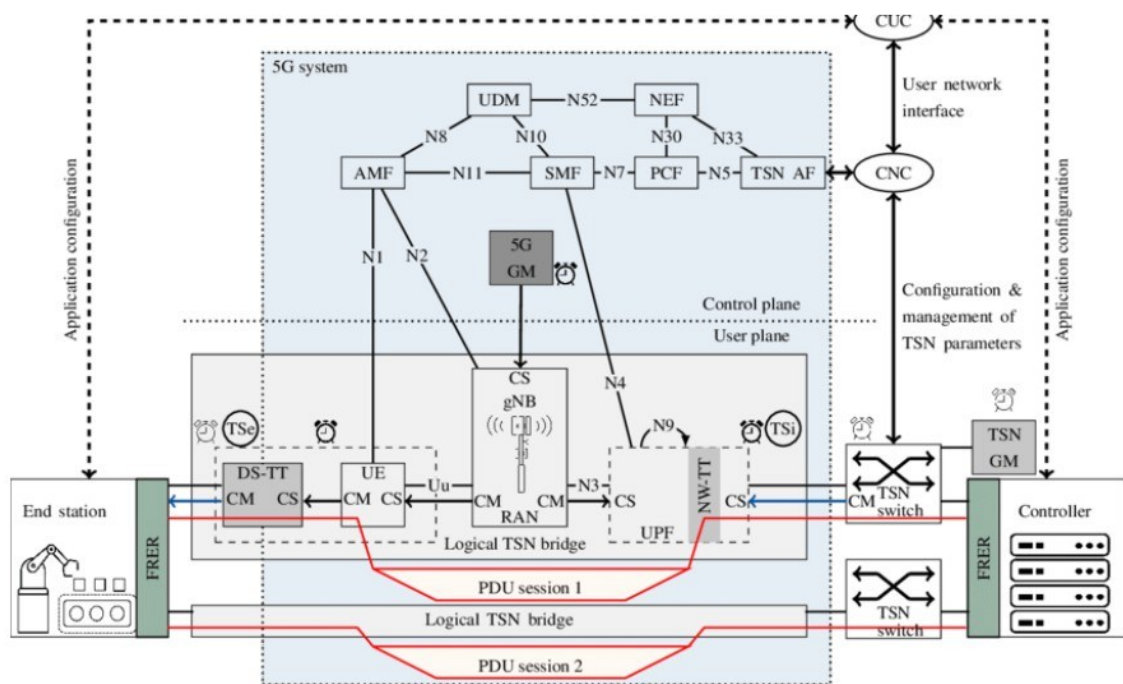


Fig. 8.1: Elementi coinvolti nel rilevamento del bridge 5G

La spiegazione si limiterà all'interazione tra un solo dispositivo utente e la rete 5G, ma ovviamente il processo di comunicazione si estenderà ad ogni UE che costituisce l'intera rete TSN.

Il dispositivo utente, con capacità TSN e funzione DS-TT, richiede l'avviamento di una sessione PDU di tipo Ethernet; specificare che la sessione è di tipo Ethernet, è fondamentale in quanto grazie a questa informazione è possibile individuare già delle policy adatte ad una comunicazione che prevede flussi di dati TSN. La procedura di avviamento della sessione PDU richiede l'invio di alcuni parametri fondamentali: il tempo di residenza del DS-TT (ricavato tramite i timestamp), l'indirizzo MAC del DS-TT e il supporto del Port Management Information Container (PMIC). La SMF riceve tale richiesta di sessione PDU e seleziona un appropriato UPF con capacità TSN e funzione NW-TT, ovvero in grado di supportare l'integrazione con reti TSN e di fungere da traduttore lato rete. Successivamente la SMF inizia una comunicazione con la PCF, fornendole il nome

della rete (DNN) e/o il Single Network Slice Selection Assistance Information (SNSSAI), grazie ai quali la PCF capisce che la sessione PDU è per un servizio TSN. Viene quindi avviata la SM Policy Association grazie alla quale la PCF comunica alla SMF il modo in cui trattare il flusso di dati (ovvero stabilisce la QoS), sulla base delle informazioni precedentemente fornitele e le indica la volontà di ricevere notifiche su eventi specifici relativi alla gestione del bridge TSN. Quest'ultima indicazione viene esplicitata dalla PCF inserendo il trigger "TSN-BRIDGE\_INFO" all'interno dell'attributo `policyCtrlReqTriggers` della struttura dati `SMPolicyDecision` inviata alla SMF. L'inclusione di questo Trigger istruisce l'SMF a monitorare gli eventi relativi alle informazioni dei ponti TSN. Quando uno di questi eventi si verifica, il trigger si presenta e l'SMF deve avviare una nuova interazione con la PCF. Esempi di questi eventi possono essere: abilitazione o disabilitazione di un bridge TSC (Time Sensitive Communication), cambiamenti nello stato delle porte del bridge e modifiche della configurazione del bridge. Una volta che l'SMF possiede tutti i dati inviatele dalla PCF (compresa anche la struttura dati `SMPolicyDecision`), comunica con l'UPF tramite la PFCP stabilendo le regole di instradamento del flusso di dati TSN. Contemporaneamente però l'SMF, richiede all'UPF di affidare un numero identificatore di porta per le funzionalità DS-TT che sarà associato all'UE, il quale fungerà da riferimento per la gestione del traffico TSN proveniente o diretto verso l'UE e l'identificatore ID della rete (in questo caso del 5G). Quindi l'UPF, in risposta alle richieste, invia all'SMF complessivamente: il numero di porta allocato per le funzionalità DS-TT dell'UPF, utilizzato per identificare e gestire il traffico TSN specifico per una particolare sessione PDU; l'ID del bridge 5G (nella Release 16) o del nodo del piano utente (nella Release 17) e il numero di porta NW-TT, il quale rappresenta l'interfaccia logica dell'UPF verso la rete TSN che verrà utilizzato per la comunicazione con quest'ultima. Man mano che le informazioni vengono acquisite, l'SMF avvia il servizio `Npcf_SMPolicyControl_Update`, il quale consente di comunicare alla PCF il rilevamento di queste nuove informazioni raggruppate del bridge 5G. Queste ultime vengono inserite all'interno del parametro "tsnBridgeInfo" e del contenitore NW-TT PMIC all'interno del quale si trovano complessivamente: l'ID del bridge, il numero di porta del DS-TT e del NW-TT, gli indirizzi MAC del DS-TT e il tempo

di residenza UE-DS-TT. Dopo aver ricevuto le informazioni sul bridge 5G (tramite il servizio `Npcf_SMPolicyControl_Update` precedentemente descritto), la PCF comunica tutte queste informazioni alla TSN-AF, aggiornandola sulla presenza e sulle caratteristiche del bridge 5G configurato per supportare il traffico TSN. Tale comunicazione avviene tramite il servizio `Npcf_PolicyAuthorization_Notify`; è importante però specificare che questa notifica avviene mediante una funzione applicativa (AF) tra PCF e TSN-AF, le quali si erano già “registrate” a vicenda per lo scambio di informazioni relative a servizi TSN. Dopo aver ricevuto tale notifica da parte della PCF, la TSN-AF avvia un’ulteriore AF con la PCF, ma questa volta la TSN-AF possiede la conoscenza specifica del dispositivo TSN identificato dall’indirizzo MAC DS-TT; questo in particolar modo, permette alla PCF di applicare policy più granulari e mirate al dispositivo utente. Contemporaneamente è consentito alla TSN-AF di essere a conoscenza delle policy applicate a quel particolare dispositivo TSN e tramite la `Npcf_PolicyAuthorization_Subscribe` la TSN-AF si registra per ricevere notifiche da parte della PCF quando si verificano eventi rilevanti per il servizio TSN associato a quella specifica sessione AF (quindi a quel particolare dispositivo TSN con indirizzo MAC DS-TT). Lo scopo di questa sottoscrizione è permettere alla TSN-AF di essere avvisata dei cambiamenti di stato della rete 5G o di ulteriori eventi che potrebbero influenzare la comunicazione TSN del dispositivo specifico e richiedere alla PCF modifiche delle policy per garantire il corretto funzionamento del dispositivo utente appartenente alla rete TSN. Dopo che un bridge 5G è stato rilevato e il collegamento tra la sessione TSN-AF e la sessione PDU 5G è stato completato, TSN-AF fornisce ulteriori configurazioni del bridge TSN per gestire la conoscenza dei dispositivi e la segnalazione di informazioni aggiuntive tramite il servizio `Npcf_PolicyAuthorization_Update`.

Dopo questa fondamentale fase di set up, è possibile sintetizzare la comunicazione tra dispositivi TSN nei seguenti passaggi:

- Da TSN a 5G: Il traffico TSN che entra nella rete 5G attraverso il DS-TT dell’UE viene trattato sulla base delle policy di QoS configurate dalla PCF. Questo assicura la priorità, la bassa latenza e la garanzia di banda

necessarie. I dati TSN vengono poi instradati attraverso la rete 5G verso la destinazione (l'UE o un altro segmento TSN).

- Da 5G a TSN: Il traffico diretto verso la rete TSN, una volta raggiunto l'UPF, viene inoltrato attraverso l'NW-TT verso la rete TSN, sempre rispettando le policy configurate.

È importante mettere in evidenza che la comunicazione descritta mediante i punti precedenti, avviene in maniera più “diretta” rispetto a tutta la fase di rilevamento del bridge 5G. Il sistema però, si mantiene in costante aggiornamento tramite comunicazioni periodiche (in particolar modo tra TSN-AF e PCF) per poter reagire prontamente a eventuali cambiamenti sulle caratteristiche dei dispositivi TSN o dello stesso bridge 5G.



## CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi svolto consente la comprensione di alcuni meccanismi fondamentali che si instaurano nell'interazione tra dispositivi utenti appartenenti ad una rete TSN e 5G. In particolar modo si è messo in evidenza come il 5G, grazie alla URLLC e alla TSN, abbia trovato applicazione in alcuni settori in cui la rete cablata dedicata sembrava essere la sola ed unica soluzione ammissibile a causa di requisiti particolarmente stringenti. Il 5G viene oggi utilizzato per svolgere e soddisfare un'ampia gamma di Time Critical Services, in quanto riesce a garantire una latenza minima e un elevato livello di affidabilità. Esistono però situazioni "ultra critiche" in cui l'utilizzo del 5G non è ancora possibile. Ad esempio, la trasmissione di dati non compressa e ad altissima larghezza di banda necessita ancora di una rete cablata e dedicata per poter rispettare dei requisiti particolarmente stringenti; il 5G non è in grado di sostenere un livello di sicurezza adeguato in tutti quegli ambienti in cui questo è fondamentale, ma soprattutto è molto più vulnerabile a disturbi elettromagnetici in luoghi caratterizzati da forti interferenze. Proprio per questi motivi si pensa che la generazione attuale di rete mobile non sostituirà completamente le reti cablate, ma piuttosto ci sarà una crescente complementarità e, solo in alcuni ambiti, una sostituzione parziale o significativa. L'integrazione 5G-TSN, introdotta con la Release 16 del 3GPP e ulteriormente migliorata con le Release successive, ha aperto le porte ad una vasta gamma di casi d'uso critici che possono essere attualmente gestiti con maggiore flessibilità, ma soprattutto con una latenza minima e un'affidabilità adeguate.

## BIBLIOGRAFIA

Alriksson, F., Phillips, C., Pradas, J. L., & Zaidi, A. (2021), *XR and 5G: Extended reality at scale with time-critical communication*, *Ericsson technology review*, 2021(8), pp. 2-13.

Benvenuto Nevio e Zorzi Michele (2011), *Principles of Communications Networks and Systems*, Chichester, Wiley.

Chatfield, A. T., Scholl, H. J. J., & Brajawidagda, U. (2013), *Tsunami early warnings via Twitter in government: Net-savvy citizens' co-production of time-critical public information services*, *Government information quarterly*, 30(4), pp. 377-386.

Larrañaga, A., Lucas-Estañ, M. C., Martinez, I., Val, I., & Gozalvez, J. (2020), *Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0*, In *2020 25th IEEE International conference on emerging technologies and factory automation*, 1, pp. 1-4.

Nguyen, V. G., Grinnemo, K. J., Cheng, J., Taheri, J., & Brunstrom, A. (2020), *On the use of a virtualized 5G core for time critical communication in smart grid*, In *2020 8th IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering (MobileCloud)*, pp. 1-8.

Rost, P. M., & Kolding, T. (2022), *Performance of integrated 3GPP 5G and IEEE TSN networks*, *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(2), pp. 51-56.

Sasiain, J., Franco, D., Atutxa, A., Astorga, J., & Jacob, E. (2024), *Towards the integration and convergence between 5G and TSN technologies and architectures for industrial communications: A survey*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(1), pp. 4-25.

Welte, D., Lehmann, C., Schappacher, M., Höschele, T., Sikora, A., & Fitzek, F. H. (2024), *Tsn over 5g: Overcoming challenges and realizing integration*, In *2024 IEEE 20th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, pp. 1-8.

Willars P., Wittenmark E., Ronkainen H., Ostberg C., Johansson I., Strand J., Lédli P., Schnieders D. (2021), *Enabling time-critical applications over 5G with rate adaption*, pp. 4-15.

Zong Ping Ping e Ulupinar Fatih (2022), *Understanding 5G & Time Critical Services, 5G Americas*, pp. 2-24.

[fortinet.com/it/resources/cyberglossary/what-is-5g](https://fortinet.com/it/resources/cyberglossary/what-is-5g)

[ibm.com/it-it/topics/5g](https://ibm.com/it-it/topics/5g)

[mobatime.com/technology/ptp-precision-time-protocol/](https://mobatime.com/technology/ptp-precision-time-protocol/)

[perlesystems.it/supportfiles/precision-time-protocol.shtml](https://perlesystems.it/supportfiles/precision-time-protocol.shtml)

[redhat.com/it/topics/5g-networks/what-is-5g](https://redhat.com/it/topics/5g-networks/what-is-5g)