

Capitolo 1

Networked Control System

1.1 Introduzione

La scelta dell'utilizzo di un sistema di controllo basato su rete è da ricercarsi nei diversi benefici che le applicazioni su reti offrono. In particolare, le reti rappresentano uno dei migliori modi per trasferire i dati in remoto e permettono lo scambio degli stessi dati tra utenti. Con l'avvento della tecnologia wireless, i benefici si sono moltiplicati: non lo solo si è offerta una maggiore facilità nell'installazione e nella manutenzione della rete, ma anche una maggiore flessibilità per quanto riguarda la topologia della stessa

[1]. A motivo di questi benefici, molte compagnie industriali ed istituti hanno mostrato interesse per l'utilizzo delle reti per funzioni di controllo industriale remoto e automazione industriale. Lo studio, centrato sull'applicazione delle reti per funzioni di controllo industriale, si è tradotto nella creazione di molteplici protocolli di rete. Ne sono esempio la *Controller Area Network* (CAN) e il *Profibus* [4]. Il primo, sviluppato nel 1983 dalla compagnia tedesca Bosch, è stato applicato in campo automobilistico ed ora ha trovato molte altre applicazioni nel controllo industriale. Il secondo, anch'esso ideato da istituti tedeschi nel 1987, è un protocollo broadcast bus che opera come sistema multimaster/slave. In entrambi i casi e nella maggior parte dei protocolli usati per il controllo industriale, si evince un'affidabilità e robustezza nei confronti di funzioni di controllo real-time [3].

L'avvento di nuove tecnologie su reti di computer, in modo particolare Ethernet, ha messo in discussione il ruolo delle vecchie reti industriali in un sistema di controllo. Infatti, l'aumento della velocità di trasferimento dei dati, la diminuzione dei prezzi, l'uso ad ampio raggio, l'aumento di software e delle applicazioni ha reso le

nuove reti una valida alternativa, se non la migliore soluzione, in applicazioni di controllo.

Come in qualsiasi sistema di controllo, i componenti principali sono rappresentati dai sensori, attuatori e controllori. Le informazioni scambiate tra tali componenti sono trasferiti attraverso reti di telecomunicazioni. Un sensore, un attuttore e un controllore possono presentarsi in due tipologie differenti: dispositivi *event-driven* oppure *time-driven*. I primi sono caratterizzati da una ricezione in ingresso e da una trasmissione in uscita sincronizzata mediante un periodo di campionamento. Tale periodo può essere realizzato attraverso un segnale di clock. I secondi, invece, elaborano i dati non appena ricevono un segnale di input. Quindi in quest'ultimo caso l'elaborazione avviene in maniera asincrona.

L'ultimo componente di un sistema di controllo, in generale, è rappresentato dal mezzo trasmissivo che interconnette controllori, attuatori e sensori. La rete di telecomunicazioni gioca un ruolo fondamentale nella stabilità del sistema da controllare. Infatti, pur considerando i grandi benefici apportati dalla rete, le prestazioni di un networked control system sono in ogni caso influenzate dai

ritardi di rete. Limitare gli effetti dei ritardi, i quali sono intersecati nella struttura e topologia di rete usata, implica un miglioramento delle prestazioni del sistema controllato. Infatti operazioni, quali la lettura di una misura da un sensore, l'invio del segnale di controllo e il trasferimento di tale comando all'attuatore, arrecano degli irrimediabili ritardi che dipendono dalle caratteristiche della rete. Inoltre la possibile perdita di dati nella rete può degradare le prestazioni e, nelle peggiori condizioni, rendere instabile il sistema da controllare. La scelta della metodologia usata dipende dalle caratteristiche della rete e dalla robustezza ai ritardi di rete. In un sistema di controllo ad anello aperto i ritardi non influenzano in modo significativo le prestazioni del sistema considerato. Altresì, la configurazione utilizzata non rappresenta quella ottimale in sistemi di tipo real-time, in quanto non solo queste applicazioni richiedono un feedback di dati nella rete per poter correggere gli errori in uscita ma anche non risultano adatte nel caso in cui i ritardi in gioco sono tempo-varianti. Quindi, la soluzione ottimale per il sistema trattato in questa tesi sarà l'utilizzo di una metodologia di controllo ad anello chiuso poiché il sistema da controllare (motore in corrente continua) appartiene alla categoria dei sistemi real-time.

1.2 Networked Control System: Definizione

Un *Networked Control System* (NCS) è un sistema dove gli anelli di controllo sono chiusi attraverso una rete di telecomunicazioni. Infatti in questo tipo di applicazioni il segnale in uscita viene corretto attraverso segnali di feedback fino a raggiungere il valore di regime da noi desiderato. Il compito della rete di telecomunicazioni è di trasferire i dati di controllo all'interno del sistema.

In generale esistono due diverse configurazioni di sistemi di controllo che utilizzano le reti: i *sistemi di controllo complessi* ed i *sistemi di controllo remoti* [4].

1.2.1 Sistemi di controllo complessi

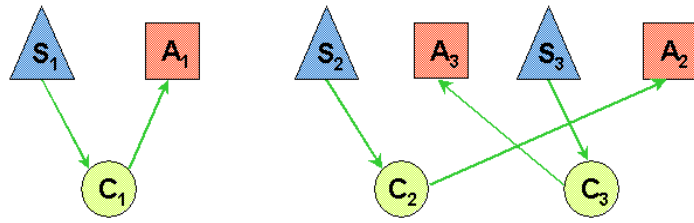
Un sistema di controllo complesso è un sistema su larga scala contenente diversi sottosistemi [5]. La peculiarità di un sistema di questo tipo è quella di rendere i vari sottosistemi tra loro indipendenti. Un sottosistema può essere costituito dai tre elementi di controllo: sensore, attuatore e controllore. In molti casi i sensori

e gli attuatori sono connessi al plant in locazioni remote rispetto al controllore. La complessità di questo sistema di controllo è da ricercarsi nel numero di sottosistemi da controllare. Infatti, all'aumentare dei sottosistemi aumentano anche il numero di connessioni. Perciò la connessione diretta tra i vari componenti del sottosistema si traduce nella realizzazione di circuiti molto complessi che complicano le operazioni d'installazione e manutenzione dell'intero sistema.

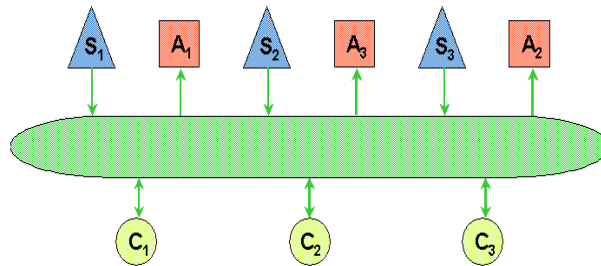
Per esempio, facciamo riferimento alla fig. 1.1 (a) [4], nella quale i numeri indicano l'indice del sottosistema e le frecce mostrano la direzione del flusso di dati tra due componenti. Se c'è un unico sottosistema, come il sistema mostrato a sinistra nella figura, le connessioni sono semplici. La complessità del sistema incrementa quando il sistema complesso ha più di un sottosistema, come mostrato a destra della figura. Le connessioni, inoltre, complicano ulteriormente il sistema quando i componenti non sono fisicamente vicini fra loro.

La complessità del sistema, mostrato a destra in fig. 1.1 (a), può essere ridotta notevolmente utilizzando una connessione su rete condivisa per trasferire le misure dai sensori ai controllori ed i

segnali di controllo dai controllori agli attuatori, come mostrato in fig. 1.1 (b) [4]. Questo metodo è molto più sistematico e strutturato delle connessioni dirette. I vantaggi maggiori sono nella flessibilità e facilità nell'installazione e manutenzione del sistema e sono particolarmente apprezzabili quando un anello di controllo scambia informazioni con altri anelli per realizzare tecniche di controllo più sofisticate in sistemi molto complessi, quali aerei, automobili e processi chimici.



(a)



(b)

Fig. 1.1 – Confronto tra (a) connessioni dirette e (b) connessioni su rete condivisa: S_i: l'i.esimo insieme dei sensori, A_i: l'i.esimo insieme di attuatori, C_i: l'iesimo insieme dei controllori

1.2.2 Sistemi di controllo remoti

Un sistema di controllo remoto è un sistema in cui i controllori sono posizionati in località remote rispetto al sottosistema a cui appartengono o rispetto al gruppo di sottosistemi che devono controllare. I sistemi di controllo remoti sono utilizzati per due ragioni: convenienza e sicurezza [4].

Per realizzare un sistema di controllo remoto è necessario innanzitutto stabilire una comunicazione tra il sito locale e il sito remoto. Per questo motivo, molti sistemi di controllo remoti hanno dei sistemi di comunicazioni proprietari. Queste connessioni sono di solito conservative e limitate a una singola piattaforma. Un semplice esempio è un aereo RC (*Radio-Controlled*): per controllare un aeroplano esiste una frequenza specifica, la quale non può essere utilizzata da altri aeroplani. Uno svantaggio di questo tipo di sistema è l'elevato costo dell'installazione e della manutenzione, sia in termini di tempo impiegato che in termini economici.

Un metodo più efficiente è connettere i sistemi remoti ai controllori mediante una rete a mezzo condiviso. Utilizzando questo schema, diversi sistemi di controllo remoti possono operare

utilizzando lo stesso mezzo di comunicazione. Con alcune modifiche su una rete, la riconfigurazione e l'espansione di un sistema di controllo remoto può essere realizzata con maggiore facilità. Questo schema effettivamente è più conveniente ed estremamente utile, soprattutto se usato su reti ad ampia disponibilità come Internet.

Ci sono in generale due diverse strutture per progettare un sistema di controllo su rete: la *struttura diretta* (direct structure) e la *struttura gerarchica* (hierarchical structure) [4].

La struttura diretta, mostrata nella fig. 1.2 [4], presenta i sensori e gli attuatori dell'anello di controllo connessi direttamente alla rete mediante una interface unit.

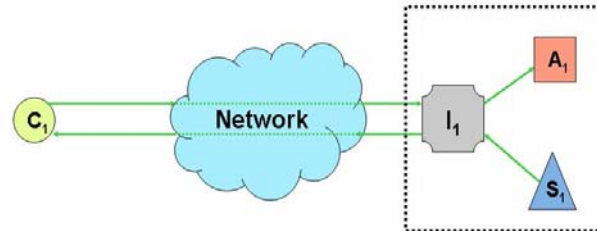


Fig. 1.2 – Struttura diretta: S_i : l'i.esimo insieme dei sensori, A_i : l'i.esimo insieme di attuatori, C_i : l'iesimo insieme dei controllori, I_i : l'iesimo insieme di interface unit

Sia il segnale di controllo, che viene inviato dal controllore al plant, sia l'uscita del sistema, che, viceversa, viene inviata dal plant al controllore, vengono incapsulate in un frame (pacchetto) per essere trasferite attraverso la rete di telecomunicazioni. Il compito dell'interface unit è, quindi, quello di interfacciare il controllore e il sottosistema, formato da sensore e attuatore, alla rete. Infatti, l'interface unit è un dispositivo che converte un frame di dati proveniente dal controllore in un segnale di controllo e,

viceversa, converte la misura del sensore in un frame di dati che viene riportato al controllore.

Poiché il controllore si trova in posizione remota rispetto al plant, deve effettuare i seguenti passi [4]:

- leggere le misure dei sensori provenienti dalla rete;
- elaborare i segnali di controllo ;
- inviare i segnali di controllo all'insieme di attuatori attraverso la rete.

Le operazioni svolte dal controllore sono tali da permettere una efficiente interazione con la restante parte restante del sottosistema.

La struttura gerarchica è costituita da diversi sottosistemi, ognuno dei quali contiene un insieme di sensori, attuatori e controllori [4]. I sottosistemi dipendono gerarchicamente da un controllore principale, collocato in posizione remota rispetto a quest' ultimi. Lo scambio di informazioni, sottoforma di frame di

dati, tra controllore principale e i vari sottosistemi avviene per mezzo di una rete di telecomunicazioni. La struttura appena descritta è mostrata in fig.1.3 [4].

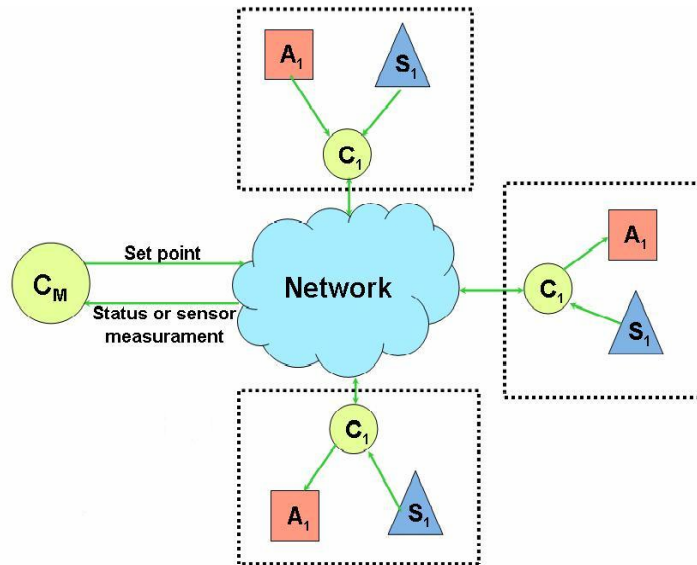


Fig. 1.2 – Struttura gerarchica: S_i : l'*i*.esimo insieme dei sensori, A_i : l'*i*.esimo insieme di attuatori, C_i : l'*i*.esimo insieme dei controllori, C_M : controllore centrale

Periodicamente il controllore centrale C_M riceve lo stato del sottosistema da controllare, elabora e invia il nuovo set point al controllore del sistema remoto in un frame o pacchetto di dati. Il controllore cerca di soddisfare autonomamente il segnale di riferimento ricevuto, realizzando così un vero e proprio sistema in anello chiuso locale. Come si può vedere, le misure acquisite dai

sensori e i segnali di stato, nonché il segnale di riferimento, vengono scambiati tra i sottosistemi remoti e il controllore centrale C_M attraverso una rete di telecomunicazioni. Poiché il controllore remoto deve soddisfare il segnale di riferimento prima che arrivi un nuovo set point dal controllore centrale, il periodo di campionamento del controllore centrale deve essere più elevato rispetto a quello dell'anello di controllo locale.

Entrambe le strutture presentano degli enormi vantaggi. La struttura gerarchica garantisce una modularità e una maggiore semplicità nella riconfigurazione degli anelli remoti. In pratica, una struttura di questo tipo può essere applicata in tutti quei sistemi più complessi formati da un certo numero di sottosistemi robusti. Per esempio, un manipolatore di robotica di solito richiede diversi motori ai giunti dei robot per farli ruotare dolcemente e simultaneamente. In questi casi, la struttura gerarchica rappresenta la soluzione ottimale, tenendo conto delle specifiche di progetto. Al contrario, la struttura diretta permette maggiore interazione tra i componenti del sistema. Infatti, mentre nella struttura gerarchica il controllore centrale è estraneo al sistema di controllo remoto e riceve solo da esso le misurazioni finali, nel

struttura diretta il controllore partecipa attivamente al raggiungimento del set point e perciò può essere più immediato nel rispondere a segnali di stato o segnali di allarme. Esso rappresenta la soluzione migliore in quei problemi in cui la velocità di risposta ad eventuali cambiamenti di stati gioca un ruolo importante per la stabilità del sistema. Ne è un esempio il motore in corrente continua DC (*Direct Current*): in tale sistema un cambiamento di velocità del motore elettrico potrebbe portare all'instabilità del sistema. Quindi, formulare il problema di controllo basandolo su struttura diretta permette di attenerci il più possibile alle specifiche di progetto richieste.

In generale quando si parla di network-based oppure networked control systems (NCS) ci si riferisce sempre ai sistemi che utilizzano la struttura diretta, i quali offrono una miglior interazione ed una maggior flessibilità nei sistemi di controllo. Spesso, però, le metodologie di analisi e di controllo pensate per la struttura diretta possono essere applicate anche alla struttura gerarchica trattando il sistema di controllo in anello chiuso remoto come un plant puro. In questo caso il sistema di controllo remoto è

rappresentato da un modello nello spazio di stato o da una funzione di trasferimento.

1.3 I ritardi di un Networked Control System

La stabilità di un sistema di controllo in anello chiuso è di gran lunga influenzato dai ritardi di rete (*network delays*). Dal momento che il tempo per effettuare la trasmissione dei segnali di misura dai sensori al controllore e dei segnali di controllo dal controllore ai sistemi di attuazione dipende esclusivamente dalle caratteristiche della rete, come la topologia e gli schemi di routing, le prestazioni e la stabilità di un sistema di controllo network-based possono essere influenzate in modo significativo dai ritardi di rete [3].

I sistemi NCS, che nella letteratura sono considerati quelli con struttura diretta, sono formati, come abbiamo detto in precedenza, da un insieme di sensori e sistemi di attuazione, da una rete di telecomunicazioni e da un insieme di controllori. La rete di telecomunicazioni è una rete condivisa ad accesso multiplo che

permette di collegare il plant (a cui è connesso un attuatore e un sensore) al rispettivo controllore. Mentre un sensore e un attuatore possono essere collegati ad un solo plant, quest'ultimo può connettersi a più sensori e controllori, creando un sistema più sofisticato. Un sistema NCS è un sistema tempo-discreto poiché, a causa dei ritardi di rete, lo scambio di informazioni non può avvenire istantaneamente. Quindi i segnali che giungono ad un controllore o ad un attuatore sono segnali tempo-discreti.

A causa dei tempi di trasmissione dei dati e di elaborazione da parte del controllore, l'anello, nella sua configurazione generale mostrata in fig.1.4 presenta dei ritardi di rete aggiuntivi a quelli derivanti dal campionamento di periodo T [4].

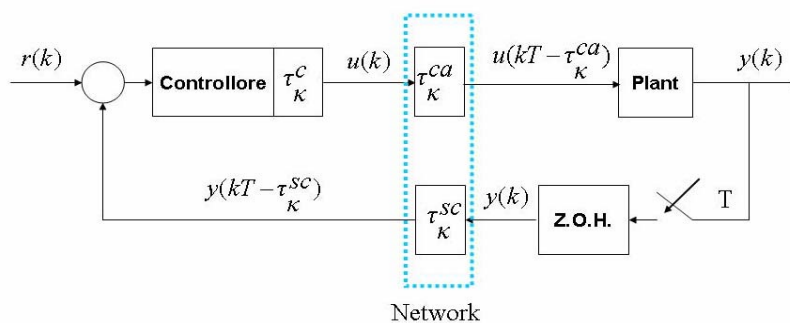


Fig. 1.4 – Configurazione generale di un NCS

Il diagramma a blocchi della configurazione generale dell'anello NCS mostrata in fig. 1.4 mette in evidenza alcuni importanti segnali e i ritardi di rete e computazionale:

$y(t)$: uscita continua del sistema

$r(k) \equiv r(kT)$: segnale di riferimento discreto

$u(k) \equiv u(kT)$: segnale di controllo discreto

$y(k) \equiv y(kT)$: uscita del sistema discreta

La fig. 1.5 mostra il corrispondente diagramma temporale della generazione e propagazione dei ritardi di rete.

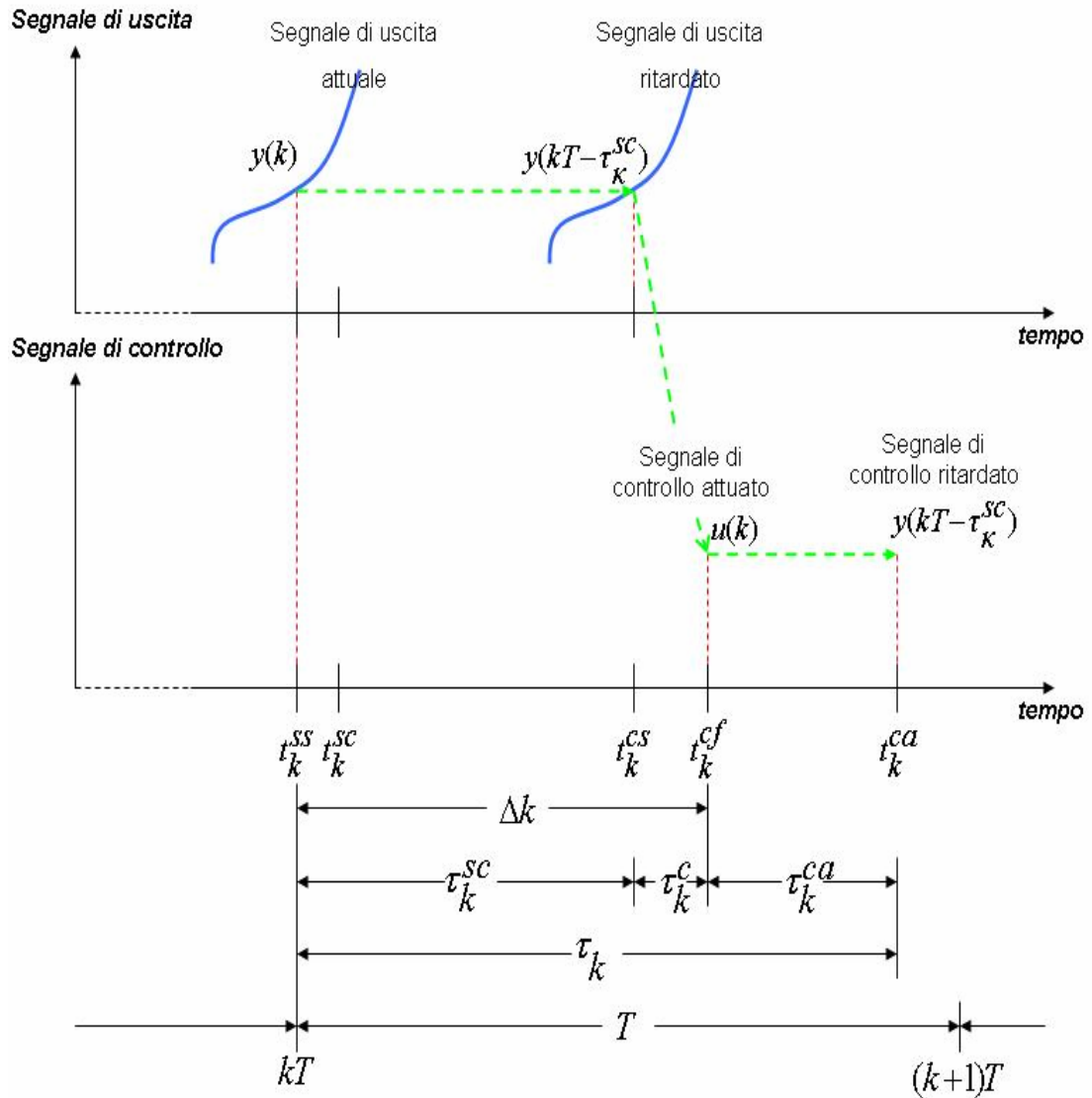


Fig. 1.5 – Diagramma temporale della generazione dei ritardi

I ritardi in un sistema di controllo network-based si possono classificare in tre differenti categorie, descritte come segue [4]:

a) τ_k^{sc} : ritardo sensore-controllore

Questo ritardo (detto anche *ritardo plant-controllore*) è generato quando un sensore trasmette il risultato di una misura al controllore. Il ritardo sensore-controllore all'istante generico k è calcolato come segue:

$$\tau_k^{sc} = t_k^{cs} - t_k^{ss}$$

dove t_k^{ss} è l'istante di tempo in cui il sistema remoto incapsula la misura in un frame o pacchetto da inviare al controllore, mentre t_k^{cs} è l'istante di tempo in cui il controllore inizia l'elaborazione della misura ricevuta dal sensore.

b) τ_k^c : ritardo computazionale

Il ritardo computazionale è il tempo necessario al controllore per determinare il segnale di controllo a partire dalle misurazioni

ottenute dal sensore. Dal punto di vista matematico, tale ritardo è descritto da:

$$\tau_k^c = t_k^{cf} - t_k^{cs}$$

dove t_k^{cf} è l'istante in cui il controllore termina l'elaborazione del segnale di controllo.

c) τ_k^{ca} : ritardo controllore-attuatore

Questo ritardo (detto anche *ritardo controllore-plant*) si genera quando il controllore invia un segnale di controllo all'attuatore ed è definito come:

$$\tau_k^{ca} = t_k^{as} - t_k^{cf}$$

dove t_k^{as} è l'istante di tempo in cui l'attuatore riceve il segnale di controllo ed inizia ad applicarlo sul sistema da controllare. Normalmente l'attuatore inizia ad effettuare la sua funzione immediatamente, non appena riceve il segnale di controllo.

La somma delle tre tipologie di ritardo viene di solito indicata con il nome di *ritardo di anello*. In alcune metodologie di controllo viene considerato solo il ritardo di anello, anziché le tre componenti costituenti, al fine di semplificare le operazioni di analisi.

Sebbene il ritardo computazionale esista sempre, di solito tale ritardo risulta così piccolo, se confrontato con le altre due componenti del ritardo di anello, da poter essere considerato trascurabile. Infatti, tale ritardo, generalmente, è dovuto all'elaborazione delle misure da parte di un calcolatore.

A sua volta, i ritardi plant-ctrllore τ_k^{sc} e ctrllore-plant τ_k^{ca} sono costituiti da tre componenti:

- ❖ *Waiting time delay* τ^W . Il waiting time delay (*ritardo di attesa*) è il tempo che la sorgente (il ctrllore principale o il sistema remoto) deve attendere per l'accodamento e la disponibilità della rete condivisa, prima di inviare effettivamente il frame o pacchetto attraverso la rete.

❖ *Frame time delay* τ^F . Il frame time delay (*ritardo di trasmissione*) è il periodo di tempo che intercorre tra l'istante in cui la sorgente inizia ad inviare il frame di dati e l'istante in cui l'intero frame si trova sulla rete. Tale ritardo rappresenta il tempo che impiega il trasmettitore per inviare sul canale della rete tutti i bit del frame dati.

❖ *Propagation delay* τ^P . Il propagation delay (*ritardo di propagazione*) è il tempo impiegato dal frame per attraversare il mezzo fisico (nel nostro caso la rete). In pratica, tale ritardo è calcolato come l'intervallo di tempo che intercorre dall'istante in cui il frame di dati viene completamente ricevuto dal destinatario e l'istante in cui il frame è totalmente trasferito su canale condiviso. Il ritardo di propagazione dipende dalla velocità di propagazione del segnale e dalla distanza tra la sorgente e la destinazione.

Queste tre componenti del ritardo di rete sono sempre presenti, in rapporti diversi, in qualsiasi tipo di *Local Area Network* (LAN). Inoltre, quando i segnali di controllo e di misura viaggiano attraverso la rete, ci potrebbero essere ritardi aggiuntivi dovuti ai

ritardi di propagazione tra i vari hop della rete e/o ad accodamenti dei pacchetti negli switch o nei router intermedi. Però, mentre i ritardi di propagazione sono deterministici poiché dipendono dalla topologia della rete, i ritardi dovuti all' accodamento sono aleatori poiché dipendono dal traffico di pacchetti nella rete. I ritardi plant-controllore τ_k^{sc} e controllore-plant τ_k^{ca} dipendono anche da altri fattori quali la massima larghezza della banda dettata dal protocollo utilizzato e dalla dimensione dei pacchetti.

I protocolli dei livelli OSI superiori, come ad esempio il TCP, potrebbero richiedere una ritrasmissione se si riscontrano errori nei pacchetti o se nel percorso qualche pacchetto viene perso. Nel caso degli NCS questo evento può essere gestito mediante un compromesso in quanto, anche se durante la trasmissione qualche pacchetto può essere perso, l'NCS è comunque in grado di operare in maniera accettabile. La realizzazione della ritrasmissione in un sistema di controllo network-based potrebbe essere addirittura dannosa in quanto potrebbe aumentare in maniera non tollerabile i ritardi facendone diminuire le prestazioni e, nelle peggiori condizioni, rendere instabile il sistema.