

# Reti Ethernet a efficienza energetica per applicazioni industriali. Parte A: lo standard IEEE 802.3az

Conti Matteo

26 settembre 2013

## Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Energy Efficient Ethernet</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>EEE per applicazioni Real Time Ethernet</b>	<b>7</b>
3.1	Tempo nello stato di quiet . . . . .	7
3.2	Ritardo di attivazione . . . . .	8
3.3	Tempi critici di ciclo . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Esempi di applicazioni EEE</b>	<b>9</b>
4.1	Applicazione dell'EEE a PROFINET IO . . . . .	11
4.2	Applicazione dell'EEE a POWERLINK . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Introduzione alle misure in laboratorio</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Misure in laboratorio</b>	<b>18</b>
6.1	Misure temporali . . . . .	18
6.2	Misure di potenza . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>20</b>

*Pagina lasciata intenzionalmente bianca*

## Elenco delle figure

1	Percentuale di utilizzo della rete Ethernet . . . . .	6
2	Transizioni nel ciclo di EEE . . . . .	7
3	Stati dell'EEE . . . . .	9
4	Schema della rete Ethernet PROFINET IO . . . . .	11
5	Ciclo di rete Ethernet POWERLINK . . . . .	11
6	Apparato per misurazioni . . . . .	14
7	Tempi di ping da terminale . . . . .	16
8	Tempi di ping da wireshark . . . . .	16
9	Tempi di ping da terminale . . . . .	16
10	Tempi di ping da wireshark . . . . .	16
11	Tempi di ping da terminale . . . . .	17
12	Tempi di ping da wireshark . . . . .	17
13	Tempi di ping da terminale . . . . .	17
14	Tempi di ping da wireshark . . . . .	17
15	Cavo Ethernet . . . . .	18
16	Schema PIN cavo Ethernet . . . . .	18
17	Segnale pacchetto Ethernet su oscilloscopio . . . . .	18
18	Schema del segnale Ethernet . . . . .	18
19	Regolazione dei voltaggi di alimentazione . . . . .	19

## Elenco delle tabelle

1	Tempistiche dell'EEE . . . . .	6
2	Consumo energetico di link a diverse bitrate . . . . .	9
3	Periodi di scambio dati da IOC a IODs . . . . .	12
4	Tempo in LPI e consumo di potenza . . . . .	12
5	Periodo di scambio dati tra MN e CNs . . . . .	13
6	Tempo in LPI e consumo di potenza . . . . .	13

*Pagina lasciata intenzionalmente bianca*

## Sommario

Nel 2010 è stato pubblicato da parte dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) l'emendamento 802.3az, volto ad aumentare l'efficienza energetica delle reti Ethernet. Tale standard, chiamato *Energy Efficient Ethernet (EEE)* introduce una nuova modalità operativa, denominata *Low Power Idle (LPI)*, che riduce notevolmente il consumo energetico della scheda Ethernet.

Nella parte A di questa tesi viene esposto lo standard Ethernet nel suo aspetto teorico, con particolare attenzione per le reti *Real Time Ethernet (RTE)*, reti di comunicazione caratterizzate da tempistiche molto ristrette, di interesse per l'automazione industriale. Successivamente vengono spiegate alcune possibili misurazioni effettuabili su una scheda che implementa l'EEE per verificare che rispetti lo standard.

Nella parte B della tesi sono illustrate le suddette misure, eseguite sulla scheda Ethernet *Intel I210-T1*, focalizzando l'attenzione sulla descrizione dell'apparato di misura, i risultati ottenuti e le osservazioni relative ad essi.

Il lavoro di misura è stato svolto presso il laboratorio di *Compatibilità Elettromagnetica e Misure Elettroniche* del dipartimento di Ingegneria dell'Informazione DEI.

## 1 Introduzione

Lo standard 802.3az specifica le caratteristiche di cui deve disporre una scheda Ethernet per implementare l'*Energy Efficiency*. L'emendamento introduce un nuovo stadio operativo della scheda la quale, secondo strategie decise dal produttore, entra in uno stato detto *Low Power Idle* dove raggiunge l'effettivo risparmio energetico.

Lo stato di energy saving può essere instaurato solamente se non sono in atto comunicazioni sul link che collega la scheda Ethernet EEE al resto della rete: sotto tale condizione, dunque, la scheda può mutare il suo normale stato di funzionamento in uno stato in cui il consumo di potenza è minore rispetto a quello che si verifica durante la normale trasmissione di dati. La richiesta di entrare nello stato LPI può essere inoltrata da un partner qualsiasi del link che collega due schede EEE. La segnalazione che uno dei due partner del link ha raggiunto lo stato di quiete avviene in modo puramente elettrico tramite il mezzo fisico. Una volta che la segnalazione elettrica raggiunge l'altro estremo del link anche il nodo che vi si trova entra in risparmio energetico. Nella direzione opposta, se un nodo ha dei dati da inviare, in maniera del tutto autonoma opera la riattivazione del link, inviando nuovamente un segnale elettrico verso l'altro estremo del collegamento causandone la riattivazione. La necessità di introdurre questo nuovo stato operativo è stato dettato dall'osservazione che la potenza consumata da un link Ethernet non impegnato in una trasmissione di dati differisce di poco da quella richiesta durante la trasmissione. In altre parole, il consumo energetico di una scheda che sta inviando dati, e quello di una scheda a riposo, sono pressoché gli stessi. Inoltre, misure volte a rilevare l'utilizzo effettivo di una rete Ethernet dimostrano che in media un link viene impiegato meno del 5% del tempo, richiedendo energia anche quando di fatto non è necessaria. Considerando i dati di queste osservazioni l'introduzione dello standard EEE può potenzialmente tradursi in un grosso risparmio energetico.

La problematica maggiore per quanto riguarda le reti Energy Efficient Ethernet consiste nella scelta della strategia più efficiente di ingresso e uscita dallo stato LPI. La transizione che la circuiteria della scheda Ethernet deve effettuare per passare dallo stato attivo a quello di quiete e viceversa introduce dei tempi di ritardo nella trasmissione. Viste le tempistiche ristrette delle reti RTE, l'introduzione di tali ritardi aggiuntivi potrebbe rivelarsi fatale per il corretto funzionamento della trasmissione. Tuttavia, nelle applicazioni industriali, dove le reti RTE sono largamente impiegate, il traffico Ethernet è coordinato o schedato, generato spesso da operazioni cicliche. Di conseguenza, tale predicibilità può rivelarsi di notevole aiuto nella definizione di adeguate strategie EEE.

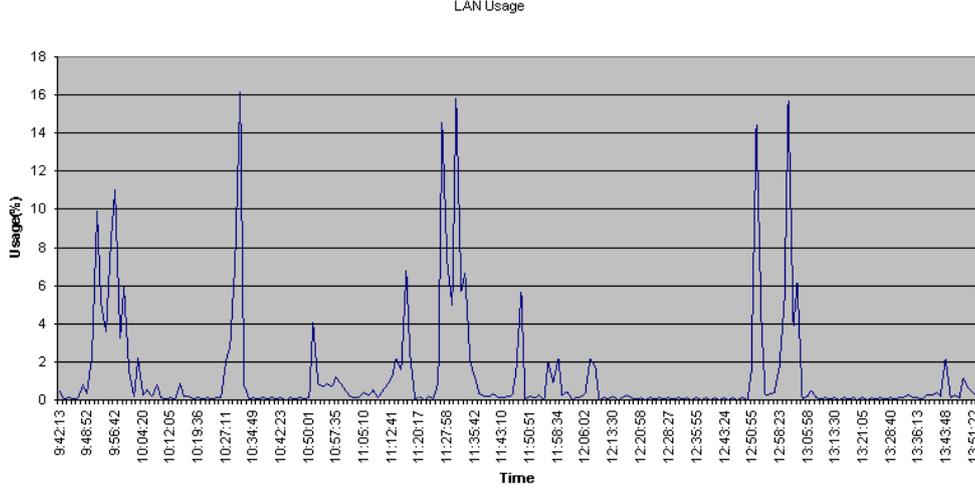


Figura 1: Percentuale di utilizzo della rete Ethernet

## 2 Energy Efficient Ethernet

In questa tesi verranno presentate le specifiche tecniche previste dallo standard 802.3az per reti Ethernet con diverso bitrate, in particolare per reti da 100Mbit/s, 1Gbit/s e 10Gbit/s. Le misurazioni illustrate nella seconda parte della tesi fanno riferimento alle sole reti da 100Mbit/s e 1Gbit/s.

Il funzionamento di un link che implementa EEE può essere descritto nel modo seguente:

1. Quando uno dei due partner vuole adottare la modalità LPI, entra in uno stato di *sleep*, che dura un tempo  $T_s$ , al termine del quale raggiunge effettivamente lo stato di *quiet*.
  - per le reti da 100Mbit/s e 1Gbit/s la transizione da stato di *sleep* allo stato di *quiet* può essere interrotta in qualsiasi momento dall'arrivo di un nuovo *frame* da trasmettere.
  - per la rete a 10Gbit/s, invece, si deve attendere il completamento della transizione dallo stato *sleep* allo stato *quiet* prima di intraprendere il processo di risveglio della scheda.
2. una volta che un partner raggiunge lo stato di *quiet*, esso deve impegnarsi a preservare la linea su cui può tornare a trasmettere. Per fare questo genera dei segnali elettrici con periodo  $T_q$ , detti segnali di *refresh*. Il segnale, della durata  $T_r$ , ha il compito di mantenere la sincronizzazione degli oscillatori presenti ai due capi del link così da assicurare la corretta decodifica del segnale che viaggia sul cavo Ethernet durante lo scambio di dati.
3. infine, se uno dei partner deve trasmettere dei dati, compie una transizione dallo stato di *quiet* allo stato di *wake* nel tempo  $T_w$ , dove viene ripristinato lo stato attivo del link.

PHY	$T_s^{min}$	$T_s^{max}$	$T_q^{min}$	$T_q^{max}$	$T_r^{min}$	$T_r^{max}$	$T_w^{max}$
100Mbit/s	200	220	22000	24000	200	220	20.5
1Gbit/s	182	202	20000	24000	198	218.2	16.5
10Gbit/s	2.88	3.2	39.68	39.68	1.28	1.28	4.48

Tabella 1: Tempistiche dell'EEE

Le transizioni intraprese avvengono tramite l'invocazione di alcune primitive. In particolare, per entrare in LPI viene utilizzata la primitiva **LP\_IDLE.req**, con il parametro di **LPI-REQUEST** impostato su **ASSERT**. Il layer fisico riceve tale richiesta e inizia ad entrare nello stato di quiete, che raggiunge una volta scaduto il tempo  $T_s$ .

Se invece la stazione decide di lasciare lo stato di quiete, esegue la primitiva **LP\_IDLE.req** con il parametro di **LPI-REQUEST** impostato su **DE-ASSERT**. Lo stato attivo è raggiunto dopo il tempo  $T_w$ .

Per tutti i mezzi fisici che implementano l'EEE, è previsto che la permanenza nello stato di quiete possa essere interrotta in ogni istante, anche durante un periodo di refresh. Esiste una differenza tra le reti a 100Mbit/s, 1Gbit/s e la rete a 10Gbit/s, per la quale in particolare non è prevista la possibilità di interrompere la transizione da active a quiet in un istante qualsiasi a causa di una trasmissione, bensì è necessario attendere il completamento dell'operazione nel tempo  $T_s$ .

Un'ulteriore distinzione tra le reti a diverse bitrate consiste nel poter entrare in modalità LPI in modo autonomo nelle due direzioni. In pratica, un estremo del link può essere contemporaneamente in stato di quiete in ricezione mentre è attivo in trasmissione. Questa modalità è possibile per reti da 100Mbit/s e 10Gbit/s ma non per quella da 1Gbit/s.

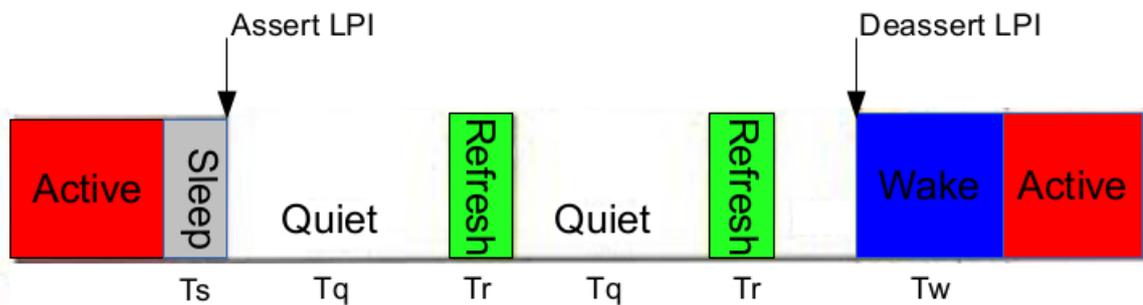


Figura 2: Transizioni nel ciclo di EEE

### 3 EEE per applicazioni Real Time Ethernet

Nell'ambito industriale il traffico di rete è caratterizzato da piccole quantità di dati cicliche, come trasmissioni di set-point o campionamenti sui sensori spesso trasmessi con periodi molto bassi, e da dati aciclici, prevalentemente dovuti ad allarmi. Le operazioni cicliche sono particolarmente invitanti per le applicazioni EEE in quanto predicibili. Esse permettono l'attivazione e lo spegnimento dei link Ethernet con tempistiche molto precise, portando a compimento delle strategie di Energy Efficiency molto accurate.

Per ottenere il più grande risparmio energetico possibile, il link deve essere mantenuto nello stato di quiete per il maggior tempo possibile.

Nelle prossime sezioni vengono analizzati in dettaglio i tempi aggiuntivi introdotti dalle variazioni di stato.

#### 3.1 Tempo nello stato di quiet

La permanenza nello stato di quiete garantisce il risparmio energetico.

Supponendo che

- le trasmissioni cicliche siano programmate con un periodo  $T_p$
- il tempo per trasmettere i dati ciclici o aciclici siano, rispettivamente,  $T_{TX}^C$  e  $T_{TX}^A$
- il link si trovi per un tempo  $T_{OH}$ , detto di *overhead*, in stati diversi da quelli di quiet e active

allora il periodo durante il quale il link è nello stato di quiet vale

$$T_Q = T_p - T_{TX}^C - T_{TX}^A - T_{OH} \quad (1)$$

E' necessario osservare che tale equazione ha senso solo sotto l'ipotesi conservativa per cui, nei periodi sottratti al tempo  $T_p$ , il consumo di potenza sia uguale a quello dello stato active.

Inoltre, supponendo che avvengano  $n$  trasmissioni acicliche e una sola ciclica nell'arco di un periodo, e che queste arrivino tutte mentre il link è nello stato di quiete, il massimo tempo di overhead è dato da

$$T_{OH} = (n + 1)(T_s + T_w) + mT_r \quad (2)$$

dove  $m$  è il numero di refresh che avvengono tra una richiesta di trasmissione e la successiva.

Nel caso di assenza di trasmissioni acicliche, perché non previste in un periodo oppure non permesse, il numero di refresh è dato da

$$m = \left\lfloor \frac{T_p - T_{TX}^C}{T_q} \right\rfloor \quad (3)$$

### 3.2 Ritardo di attivazione

Il ritardo di attivazione di un singolo link è stato riportato precedentemente nella tabella 1. Nel caso in cui siano presenti tra due partner  $k + 1$  links che si diramano dalla prima stazione, attraverso  $k$  switches, fino alla seconda stazione, il ritardo per le molteplici attivazioni va ricalcolato.

Supponendo che nell'istante iniziale tutti i link siano in stato di quiet, la loro riattivazione non può avvenire a priori poiché non è noto l'istante in cui questi devono essere riattivati. Le uniche eccezioni sono rappresentate dalla stazione di partenza con il relativo link, che conosce per certo quando deve iniziare a trasmettere, e la stazione di ricezione con relativo link, nel caso il traffico sia sincronizzato. I rimanenti link intermedi devono essere risvegliati sequenzialmente all'arrivo del frame. Il ritardo totale introdotto dalle procedure di EEE è

$$T_D = (k - 1)T_w \quad (4)$$

Diversamente, per una trasmissione aciclica, la formula (4) diventa  $T_D = (k + 1)T_w$  in quanto nessun link può essere attivato preventivamente.

### 3.3 Tempi critici di ciclo

Il risparmio energetico maggiore è ottenuto mantenendo il link nello stato di quiet il più a lungo possibile. Per raggiungere questo scopo possono essere adottate diverse strategie:

- la strategia più semplice e immediata consiste nel far andare il link in quiet alla fine di ogni pacchetto trasmesso. Per questa operazione occorre far trascorrere il tempo di sleep  $T_s$ , che per le reti da 100Mbit/s e 1Gbit/s si aggira intorno ai  $200\mu s$ . Tuttavia, questo tempo è molto vicino ai tempi di campionamento di alcuni sensori quindi renderebbe la strategia poco efficace, producendo solamente delle continue oscillazioni tra stato attivo e di quiete per tutta la durata del campionamento, senza di fatto ottenere un gran risparmio energetico.
- una seconda opzione consiste nella creazione di una coda, la quale accoglie i pacchetti che successivamente dovranno essere inviati, e li conserva fino al raggiungimento di una soglia, dopodiché li invia. A sfavore di tale approccio, esistono applicazioni o situazioni in cui l'arrivo di pacchetti alla scheda Ethernet è molto lento, con grandi latenze tra un frame e il successivo. Questa situazione introduce quindi dei tempi di attesa a volte non desiderati e potenzialmente problematici.
- la seconda strategia si può migliorare introducendo alla coda un tempo di time-out, al termine del quale si inviano i pacchetti in rete anche se non si è raggiunto il valore definito per la coda.

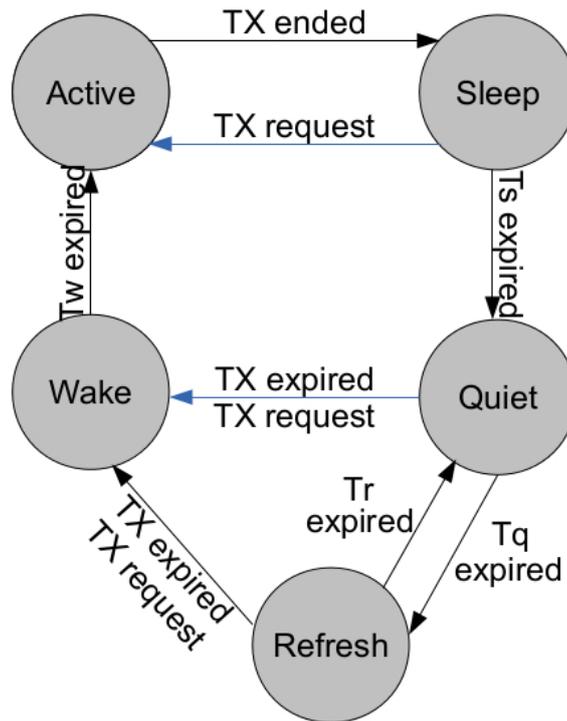


Figura 3: Stati dell'EEE

Per rendere efficace l'uso dell'EEE occorre definire quindi una strategia adatta al tipo di applicazione che si sta progettando.

Nella seguente tabella 2 sono riportati i consumi energetici per link Ethernet. Tali valori sono stati reperiti da datasheet forniti da Intel. La colonna LPI indica il consumo rilevato quando i link in entrambe le direzioni sono in stato di quiete, la colonna LPI-partial invece fa riferimento al consumo della scheda quando solo una delle due direzioni è in stato di quiete, nelle reti dove questa modalità è consentita.

PHY	Active [mW]	LPI [mW]	LPI-parziale [mW]
100Mbit/s	351	58	188
1Gbit/s	697	53	—
10Gbit/s	2600	390	1430

Tabella 2: Consumo energetico di link a diverse bitrate

## 4 Esempi di applicazioni EEE

In questa sezione vengono presentati due esempi di applicazione EEE a una rete RTE: la prima applicazione riguarda la rete **PROFINET IO**. Questa rete è disponibile in due versioni, **PROFINET IO IRT (Isochronous Real Time)** e **PROFINET IO RT (Real Time)**. Su entrambe le versioni sono impiegati prevalentemente due tipi di componenti denominati **IO controllers (IOCs)**, generalmente PLC o PC che svolgono operazioni di automazione, e **IO devices (IODs)**, sensori e attuatori.

La differenza sostanziale tra le due versioni di PROFINET IO riguarda l'aspetto della sincroniz-

zazione e, conseguentemente, la performance che offre la rete. In particolare, in PROFINET IO IRT

1. tutte le stazioni sono mantenute in stretta sincronia.
2. le operazioni di rete sono definite in un ciclo diviso in quattro parti, periodicamente eseguito.
  - (a) le prime due fasi, rossa e arancione, sono dedicate al traffico real time isocrono.
  - (b) la terza fase, verde, è utilizzata per i rimanenti tipi di traffico.
  - (c) la quarta e ultima fase, gialla, è un periodo di inattività che precede il successivo inizio del ciclo.
3. la sincronia sulla rete è garantita da un clock che, tramite appositi frame inviati su Ethernet, assicura che tutte le stazioni abbiano la stessa informazione sul tempo.
4. i tempi di ciclo variano da  $31.25\mu s$  fino a  $4ms$ .

Al contrario, in PROFINET IO RT

1. le stazioni non sono mantenute in sincronia tra di loro.
2. l'uso delle priorità dei frame permette ancora la trasmissione di dati real time, ma la precisione della versione IRT non è raggiungibile.

Lo scambio di dati su entrambe le versioni di PROFINET IO avviene tramite communications relationship (CRs) che devono essere stabilite inizialmente tra IOCs e IODs. Tra due dispositivi devono essere creati almeno due CRs: il primo dedicato al traffico ciclico, il secondo per quello aciclico. Ne segue che il traffico gestito dalla CR ciclica è schedato, in particolare, per la versione IRT i periodi possono essere impostati come multipli del ciclo della rete, mentre per la rete RT i valori variano tra 1 e  $128ms$ . Il traffico della CR aciclica non è prevedibile a priori.

Entrambe le versioni di PROFINET sono adatte per l'EEE, a patto di adottare alcuni accorgimenti: prima di tutto l'EEE si rivela efficace su reti IRT con tempi di ciclo molto maggiori della somma dei tempi di sleep e wake ( $T_s + T_w$ ) per garantire la possibilità che i link entrino o escano dalla modalità di LPI all'interno di un ciclo. In secondo luogo, nella versione IRT, i clock frame devono essere inviati periodicamente dal master clock, IOC, che invia i dati di sincronizzazione ogni  $30ms$  durante la fase verde. Durante questa operazione tutti i link devono essere mantenuti attivi per garantire che l'informazione arrivi a destinazione correttamente. Infine, per applicazione IRT su reti 100Mbit/s o 1Gbit/s, occorre tener conto dei tempi di refresh: nel caso in cui i clock frame vengano inviati a ogni ciclo IRT allora i link vengono forzatamente riattivati con periodi minori di  $T_q^{max}$ , al contrario, se i clock frame sono inviati ogni  $30ms$  i refresh saranno necessari solo per i link che vengono attivati con periodo maggiore di  $T_q^{max}$ .

Il secondo esempio di applicazione di Energy Efficiency è rappresentato dalla rete Ethernet **POWERLINK (EPL)**, la quale utilizza due tipi di dispositivi: i **Managing Node (MN)**, ovvero i dispositivi che svolgono le operazioni di automazione, e i **Controlled Nodes (CNs)**, dispositivi passivi su cui è implementata la routine di automazione. Secondo le specifiche dello standard, il bitrate del mezzo fisico della rete è di 100Mbit/s, ma ad oggi è possibile sfruttare anche le reti da 1Gbit/s o 10Gbit/s. Il protocollo di accesso al mezzo utilizzato è il Time Division Multiple Access (TDMA), che permette a tutte le stazioni di accedere al mezzo senza che avvengano collisioni. Seguendo questa modalità le operazioni di rete seguono un ciclo che si ripete con periodo  $T_{epl}$ .

All'inizio del ciclo, il MN invia un frame chiamato **Start of Cycle (SoC)**, che effettua la sincronizzazione di tutti i CNs. Successivamente, inizia la fase di **Isochronous Period**. In questo intervallo di tempo il MN effettua il polling a dei CNs, assegnando uno slot di tempo a ogni CN nel quale si scambiano due frame, chiamati rispettivamente PReq e PRes. Il primo, che trasporta i dati in uscita, è generato dal MN verso il CN, mentre il frame PRes, che contiene la risposta del CN, trasporta

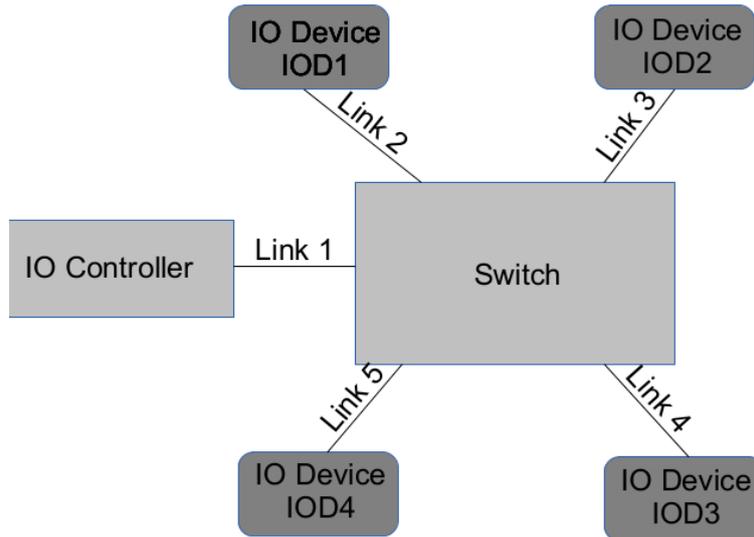


Figura 4: Schema della rete Ethernet PROFINET IO

i dati in ingresso al MN. Occorre precisare che, mentre il PReq è indirizzato a un solo CN, i PRes sono inviati a tutta la rete, così che ogni CN conosca lo stato del sistema.

Gli slot temporizzati possono essere continui oppure multiplexed:

- Continuo significa che un CN associato a uno slot interrogato ad ogni ciclo
- Multiplexed significa che sono assegnati degli slots ad alcuni CNs che sono interrogati con un periodo che è multiplo intero di un ciclo

Dopo che l'ultimo CN è stato contattato secondo la modalità sopra descritta, il MN invia il frame chiamato **Start of Acyclic (SoA)**, che fa da trigger per l'inizio del periodo aciclico. In questa fase un messaggio asincrono può essere trasmesso da un CN che ne ha fatto richiesta durante la fase isocrona. Al termine di questo periodo la rete EPL entra nello stato di Idle, cessando ogni attività sulla rete, in attesa del successivo ciclo.

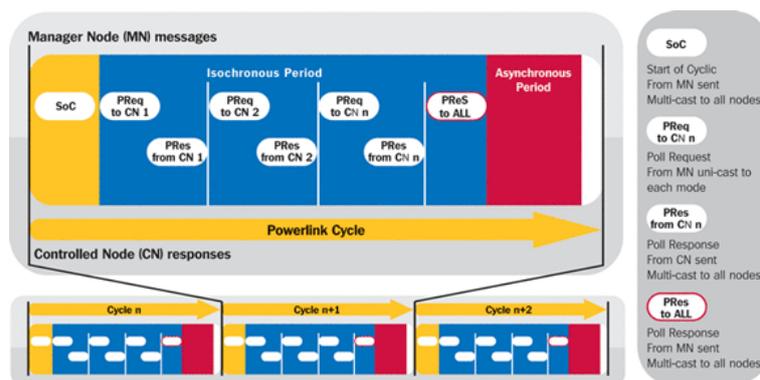


Figura 5: Ciclo di rete Ethernet POWERLINK

#### 4.1 Applicazione dell'EEE a PROFINET IO

Per comprendere i concetti espressi precedentemente viene portato in esempio una rete PROFINET IO IRT composta da un IOC e quattro IODs, numerati in modo crescente. IOD1 scambia dati con IOC durante la fase rossa, mentre il traffico generato dagli altri IODs avviene nella fase verde. Le

stazioni sono collegate tra di loro attraverso uno switch, utilizzando cinque link. Il tempo di ciclo è settato a  $1ms$ , mentre le varie fasi hanno durata rispettivamente di

- rossa/arancione  $200\mu s$
- verde  $700\mu s$
- gialla  $100\mu s$

Il trasferimento dati dall'IOC agli IODs avviene durante le CRs cicliche. Si suppone, inoltre, che la dimensione dei frame Ethernet utilizzati sia minima. Risulta possibile attivare in anticipo i link che saranno impiegati nella trasmissione, evitando l'introduzione di ulteriori ritardi.

Nella tabella 3 che segue sono elencati i periodi di tempo durante i quali i link sono impegnati per gli scambi dati tra IOC e IODs

IO Device	Periodo
IOD1	$1ms$
IOD2	$1ms$
IOD3	$5ms$
IOD4	$10ms$

Tabella 3: Periodi di scambio dati da IOC a IODs

Il ciclo della rete PROFINET IO IRT inizia con i link 1 e 2 attivi, che si trovavano già in questo stato al termine del ciclo precedente per via della sincronizzazione distribuita. Durante la fase rossa/arancione la IOC trasmette informazioni cicliche a IOD1 come prima cosa, successivamente, trasmette il frame di clock per la sincronizzazione. Per permettere la corretta ricezione del frame di clock tutti i link devono essere attivati in anticipo.

Il link 1 deve essere mantenuto attivo solo per il tempo necessario a IOC per inviare dati agli altri IODs, mentre il link 2 entra immediatamente lo stato di LPI, dal momento che nella porzione di ciclo rimanente non c'è traffico su di esso. I link 3, 4 e 5, che sono attivati al termine della fase rossa/arancione allo scopo di ricevere l'informazione di clock, rimangono in questo stato per il tempo necessario a sincronizzarsi con il IOC.

I link 4 e 5, dopo aver ricevuto il frame di clock, rimangono nello stato attivo anche se non devono trasmettere alcuna informazione, dal momento che l'intervallo di tempo tra l'arrivo del frame di clock e la ricezione di dati dagli altri IODs non è sufficientemente grande per entrare nello stato LPI. Occorre sottolineare che, nelle applicazioni reali, i link vengono riattivati con un margine ulteriore di sicurezza, riducendo di fatto il tempo di quiet. Ciò nonostante i risultati esposti nella tabella 4 confermano che l'utilizzo dell'EEE può portare a un risparmio significativo senza avere ripercussioni negative sulla performance di rete.

# Link	1	2	3	4	5
$T_{lpi}[\%]$	54.4	56	74.9	74.4	73.9
Senza EEE [W]	2.68				
Con EEE [W]	1.55				

Tabella 4: Tempo in LPI e consumo di potenza

## 4.2 Applicazione dell'EEE a POWERLINK

La forte sincronizzazione delle reti EPL permettono l'applicazione di strategie EEE. La rete presa in considerazione è la stessa illustrata in Fig. 4, dove l'IO Controller deve essere sostituito dal Managing Node, mentre gli IO Devices sono rimpiazzati dai Controlled Nodes. I valori riportati nella tabella 5 sono i tempi impiegati per lo scambio di dati tra MN e CNs.

# CN	Periodo
1	1ms
2	1ms
3	5ms
4	5ms

Tabella 5: Periodo di scambio dati tra MN e CNs

Per funzionare correttamente con i tempi indicati, il ciclo di EPL, indicato con  $T_{epl}$ , è fissato a 1 ms, ed è strutturato con due slots continui e uno slot multiplexed. Gli slot continui sono assegnati ai CN 1 e 2, mentre gli slot multiplexed sono assegnati alternativamente ai CN 3 e 4 in modo tale da accedere a questi CNs con un periodo pari a  $5T_{epl}$ .

Il valore del ciclo assicura che tutte le azioni che devono essere eseguite terminino con un margine di sicurezza. Se si ipotizza l'assenza di traffico aciclico, che ridurrebbe il periodo asincrono lungo quanto serve per inviare il frame SoA, il minimo ciclo EPL si riduce a  $119.38\mu s$ .

La tabella 6 mostra il tempo di quiet dei diversi CNs, espresso come percentuale dei loro periodi di polling, insieme alla potenza media consumata dalla rete.

Le ipotesi applicate a tale analisi sono:

- Tutti i links sono disattivati all'inizio della fase asincrona, e ritornano allo stato attivo al termine del periodo di Idle
- I frames PRes sono ricevuti da tutti i CNs, il che richiede che tutti i links dei CNs siano attivi durante il Periodo Isocrono, ad ogni ciclo
- La direzione del link per quello che riguarda le strategie EEE è indipendente, in particolare, i links che trasmettono ai CNs multiplexed rimangono disattivati nei cicli in cui quegli stessi CNs non sono raggiunti dal polling

# CN	1	2	3	4
$T_{lpi}[\%]$	63.96	63.96	92.79	92.79
Senza EEE [W]	2.74			
Con EEE [w]	1.28			

Tabella 6: Tempo in LPI e consumo di potenza

Anche in questo caso si riescono ad ottenere significativi risparmi energetici attraverso una strategia di Energy Efficiency. I risultati sono riassunti in tabella 6.

## 5 Introduzione alle misure in laboratorio

Nell'ultima parte della tesi viene introdotta la parte di misurazioni effettuate in laboratorio sulla scheda Ethernet Intel I210-T1 che implementa l'EEE.

L'apparato utilizzato per le misurazioni è costituito da:

- un PC su cui è stata montata la scheda Intel I210-T1, a cui è assegnato l'IP 10.90.90.91
- lo switch Dlink DGS-1100-16 EasySmart, che implementa l'EEE
- un secondo PC non equipaggiato con una scheda EEE, a cui è assegnato l'IP 10.90.90.92

I due PC sono collegati tra loro tramite lo switch, come illustrato in Fig. 6.



Figura 6: Apparato per misurazioni

Il sistema operativo installato su entrambi i PC è Ubuntu 13.04, sul quale è possibile utilizzare un software chiamato Ethtool, che permette di modificare una serie di parametri della scheda Ethernet dove i driver lo permettono. Le operazioni di maggiore interesse che possono essere eseguite sono:

- abilitare/disabilitare l'opzione di Energy Efficiency
- modificare il bitrate della scheda (sulla scheda Intel I210-T1 i bitrate disponibili sono 100Mbit/s e 1Gbit/s)

Il tool inoltre dà la possibilità di visualizzare informazioni sullo stato della scheda, in particolare:

- stato dell'EEE
- stato di LPI
- bitrate attuale

Al fine di stimolare il sistema vengono inviati pacchetti di ping da un PC all'altro, monitorando tramite Ethtool lo stato della scheda I210-T1. Per assicurare che la scheda parta da uno stato di quiete l'opzione di EEE viene inizialmente disabilitata e, in assenza di traffico sulla rete, riabilitata, così che tramite Ethtool si possa notare che lo stato di EEE passi da *disabled* a *enabled - inactive*, dove il valore *inactive* fa riferimento allo stato in cui si trova la scheda, ovvero quello di LPI.

La successione precisa delle operazioni è la seguente:

1. `ethtool -set -eee eth1 eee off` disabilita l'EEE, impedendo alla scheda di entrare in LPI
2. `ethtool -set -eee eth1 eee on` riabilita l'EEE

3. `ethtool -show -eee` restituisce l'informazione sullo stato della scheda. In particolare, dopo queste operazioni, l'EEE risulta abilitato ma nello stato inattivo (LPI)
4. si effettua un ping da uno dei due terminali in modo da introdurre del traffico sulla rete
5. `ethtool -show -eee` ora restituisce il valore `enabled-active`

Per monitorare il flusso di pacchetti in entrata e in uscita, viene utilizzato su entrambi i terminali il programma *sniffer* **wireshark**, tramite il quale è possibile osservare il tempo di arrivo e partenza dei pacchetti di ping, il mittente, il destinatario e il tipo di pacchetto.

Un approccio per osservare se appaiono differenze nei tempi di reazione della scheda con l'opzione di Energy Efficiency abilitata o meno, consiste nel misurare i tempi medi di ping, con diverse configurazioni del sistema. Per semplicità, si indica con *A* il PC con IP 10.90.90.91 equipaggiato con la scheda Intel I210-T1, con *B* il PC con IP 10.90.90.92. Le configurazioni sono le seguenti, (viene anche indicato su quale PC è attivo wireshark per il monitoraggio del traffico):

- Ping da *A* a *B*
  1. *A*: EEE off; *B*: misura con wireshark
  2. *A*: EEE on; *B*: misura con wireshark
  3. *A*: EEE off; *A*: misura con wireshark
  4. *A*: EEE on; *A*: misura con wireshark
- Ping da *B* ad *A*
  1. *A*: EEE off; *B*: misura con wireshark
  2. *A*: EEE on; *B*: misura con wireshark
  3. *A*: EEE off; *A*: misura con wireshark
  4. *A*: EEE on; *A*: misura con wireshark

Il bitrate della scheda Intel I210-T1 è impostato a 1Gbit/s.

Il ping è lanciato tramite riga di comando dal terminale di Ubuntu con l'istruzione

$$ping -i \alpha -c \beta \gamma \tag{5}$$

dove  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono rispettivamente l'intervallo di tempo tra un ping e il successivo, il numero di ping generati dal comando, l'IP di destinazione.

Il valore di  $\alpha$  è scelto appositamente per rendere possibile l'ingresso della scheda nello stato di LPI: nelle misure sotto riportate, tale valore è di  $1ms$ . Per quanto riguarda la quantità di pacchetti, il numero di campioni utilizzati è fissato a 1000.

Nei grafici, la colonna più rilevante è quella della **media**, dove si osserva costantemente una differenza di alcune decine di microsecondi nei tempi di ping, a seconda che la scheda stia lavorando con l'EEE abilitato o meno. La scheda è mediamente più performante quando non impiega l'Energy Efficiency, come è logico aspettarsi, in quanto i ritardi dovuti a *wake* e *sleep* non sono introdotti.

In ogni grafico, nella colonna della *media*, si nota un gradino di circa  $40\mu s$  a seconda che l'opzione di EEE sia abilitata o meno.

La differenza tra le medie è apprezzabile sia dai dati raccolti tramite terminale, sia dalle informazioni di wireshark. Si deve notare che i tempi misurati da wireshark sono leggermente inferiori a quelli riportati dal terminale, e questo è dovuto ai riferimenti diversi che usano i due programmi:

- il terminale inizia a misurare il tempo di ping dalla generazione del pacchetto fino al ritorno del pacchetto di Acknowledgement

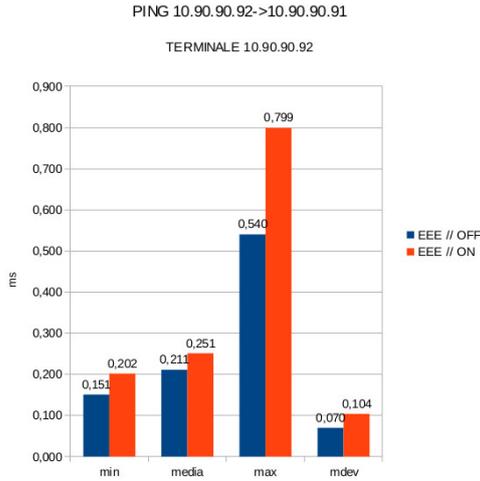


Figura 7: Tempi di ping da terminale

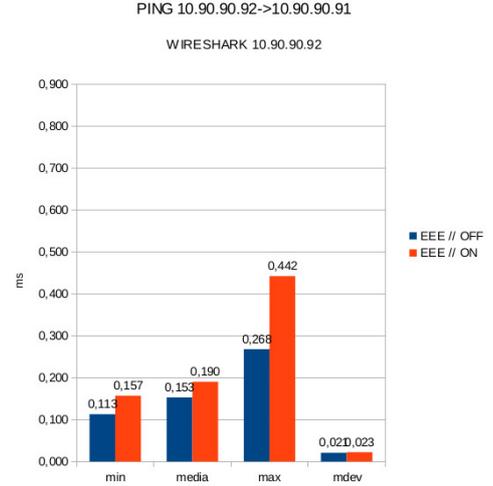


Figura 8: Tempi di ping da wireshark

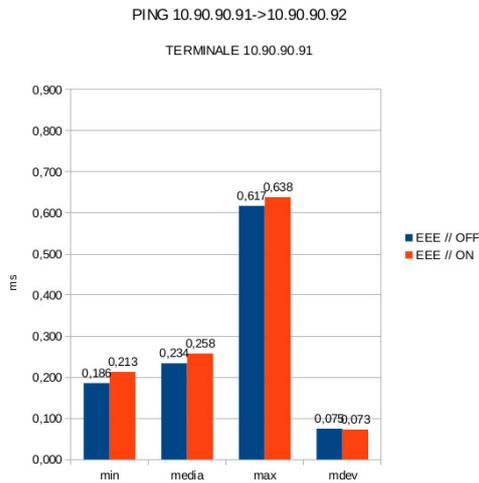


Figura 9: Tempi di ping da terminale

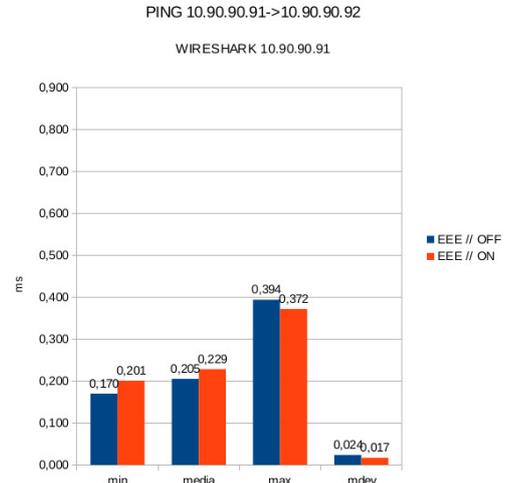


Figura 10: Tempi di ping da wireshark

- wireshark inizia a misurare il tempo di ping dal passaggio del pacchetto nel buffer della scheda Ethernet fino all'arrivo del pacchetto di Acknowledgement nella scheda stessa

In altre parole, il  $\Delta T$  misurato da wireshark non tiene conto dei tempi di generazione e ricezione del pacchetto da parte del sistema, al contrario, il terminale include anche questi tempi.

I grafici in Fig. 11, 12, 13 e 14, non presentano un confronto interessante tra tempi di terminale e di wireshark: infatti, in queste configurazioni del sistema, wireshark è eseguito dal PC che riceve il ping. Il  $\Delta T$  misurato è dato dal lasso di tempo che incorre tra l'arrivo del pacchetto di ping e la partenza del pacchetto di Acknowledgement, restituendo un valore di pochi microsecondi. La misura inizia quando la scheda è già stata attivata per l'invio o l'arrivo nel buffer di un pacchetto e termina quando il buffer è stato svuotato, ma non costituisce un caso interessante per lo studio dell'Energy Efficiency.

Le misure ottenute con questo metodo, purtroppo, offrono un risultato approssimativo della performance della scheda Ethernet, in quanto influenzate dai tempi del sistema operativo. Infatti, sia il terminale che wireshark sono programmi eseguiti sul computer, di conseguenza le misure temporali che compiono sono rese imprecise dai ritardi introdotti dalla elaborazione dei dati effettuata dal computer, prima di visionarli a schermo. I ritardi introdotti sono di solito piccoli, dell'ordine di

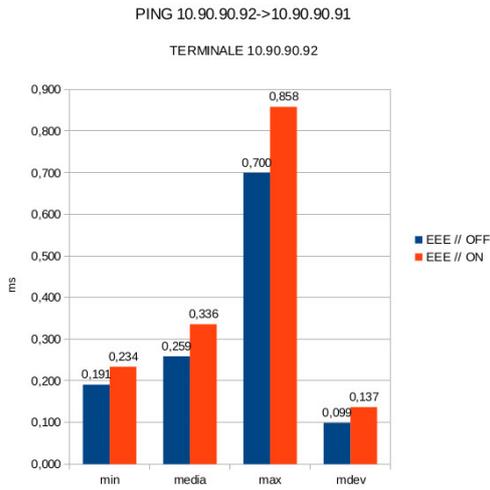


Figura 11: Tempi di ping da terminale

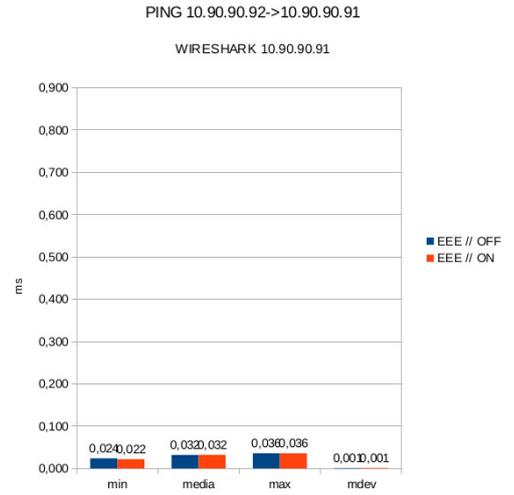


Figura 12: Tempi di ping da wireshark

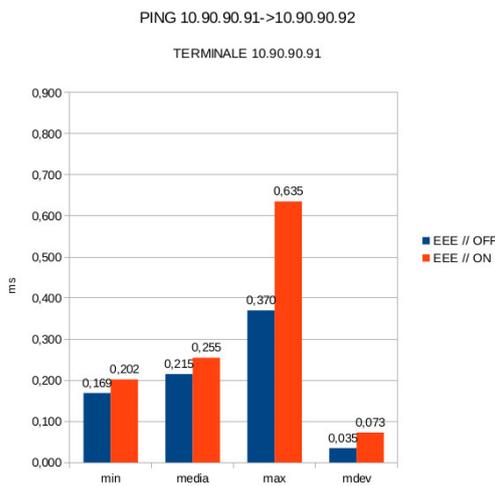


Figura 13: Tempi di ping da terminale

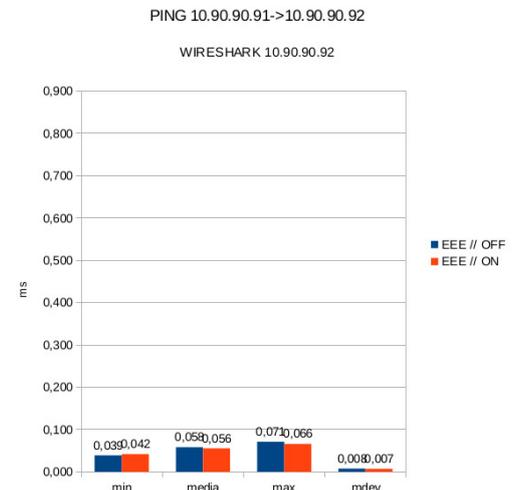


Figura 14: Tempi di ping da wireshark

qualche microsecondo, ma dal momento che i tempi misurati sono dello stesso ordine di grandezza, questo rende i dati raccolti non sufficientemente precisi.

## 6 Misure in laboratorio

Nell'ultima sezione della tesi vengono esposti alcuni metodi che sono stati usati in laboratorio per effettuare le misurazioni volte a comprendere il comportamento della scheda Ethernet I210-T1. I dati raccolti con queste misurazioni sono esposti in modo dettagliato nella parte B della tesi.

Lo strumento impiegato in laboratorio è l'oscilloscopio *Agilent InfiniVision DSO-X 3024A*, con sonde di tensione e sonda di corrente *Agilent 1147A 50 MHz*.

Le sonde di tensione vengono applicate sui fili del cavo Ethernet, tenendo in considerazione quali fili vengono utilizzati dalla porta Ethernet a seconda del bitrate impostato.

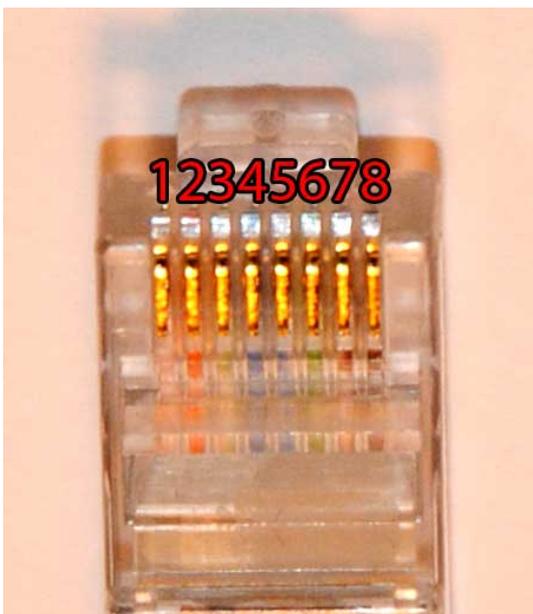


Figura 15: Cavo Ethernet

PIN	100Mbit/s	1Gbit/s
1	Trasm +	Bi-dir A+
2	Trasm -	Bi-dir A-
3	Ricez +	Bi-dir B+
4	INUTIL	Bi-dir C+
5	INUTIL	Bi-dir C-
6	Ricez -	Bi-dir B-
7	INUTIL	Bi-dir D+
8	INUTIL	Bi-dir D-

Figura 16: Schema PIN cavo Ethernet

### 6.1 Misure temporali

L'apparato originale viene leggermente modificato, sostituendo al secondo PC un dispositivo Arduino Ethernet, un microcontrollore programmabile che ha la possibilità di generare e inviare in rete pacchetti UDP. Il motivo di tale scelta è legato alla dimensione dei frame da inviare: mentre il ping da terminale consente l'invio di pacchetti di dimensione fissa (64 byte), Arduino può essere appositamente programmato specificando il payload dell'UDP.



Figura 17: Segnale pacchetto Ethernet su oscilloscopio

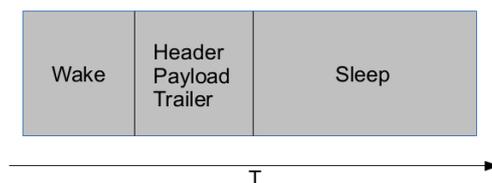


Figura 18: Schema del segnale Ethernet

Nella Fig. 17 è riportato il segnale in tensione misurato dall'oscilloscopio sul cavo Ethernet, nella Fig. 18 la schematizzazione della sua struttura, divisa in tempo di wake, pacchetto, tempo di sleep. I riferimenti per la misura temporale con l'oscilloscopio sono fissati all'inizio e alla fine del picco di tensione che si verifica sul link Ethernet durante il passaggio del pacchetto. Programmando a piacere Arduino si può modificare la parte centrale del segnale Ethernet incrementando il numero di byte di payload e quindi il tempo che la rete impiega a spedire il pacchetto totale. Eseguendo diverse misurazioni con payload crescente e interpolando i risultati su un grafico, si ottiene un andamento lineare del tempo di pacchetto, descritto da una retta generica

$$T_p = mB + T_{ws} \quad (6)$$

dove  $T_p$  è la durata del picco di tensione sul cavo Ethernet,  $m$  è il tempo di bit,  $B$  è il numero di bit del pacchetto, comprensivo di header, payload e trailer,  $T_{ws}$  è la somma dei tempi di wake e sleep. Il valore di maggior interesse è chiaramente  $T_{ws}$ , che si ottiene ponendo  $B = 0$ . La somma dei tempi di wake e di sleep deve essere confrontata con la somma dei tempi previsti dallo standard. Infine, per ottenere i singoli tempi di wake e di sleep, può essere utilizzato un oscilloscopio in grado di individuare il frame sul cavo Ethernet: in questo modo, una volta localizzato l'inizio dell'header, è semplice ricavare il tempo di wake e sottrarlo alla somma  $T_{ws}$ , ottenendo il tempo di sleep.

## 6.2 Misure di potenza

Lo standard prevede un consumo di potenza ridotto per le schede che implementano l'EEE. Per ridurre la potenza consumata, la scheda in stato di quiet modifica la propria alimentazione, riducendo il voltaggio.

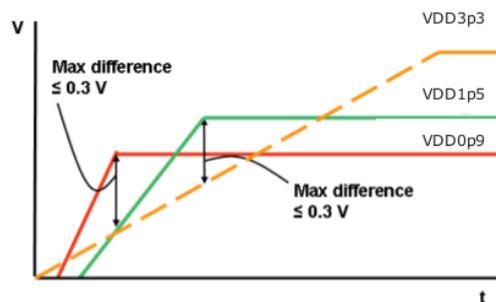


Figura 19: Regolazione dei voltaggi di alimentazione

In laboratorio, per misurare correttamente l'energia richiesta in fase di quiet o in fase di active, viene utilizzata la sonda di corrente applicata ai terminali di alimentazione a 3.3V della scheda. Una volta ottenuto il valore della corrente che richiede la scheda nei diversi stati, è sufficiente moltiplicarlo per il valore della tensione, ricavando quindi la potenza totale. Per quanto riguarda la fase di quiete, in cui l'unico segnale presente sul cavo è il refresh, il calcolo della potenza è ponderato:

- durante il periodo di quiete la potenza richiesta dalla scheda è data dalla corrente misurata dalla sonda moltiplicata per la tensione di alimentazione minima (indicata in Fig. 19).
- durante il periodo di refresh la potenza richiesta è data dalla corrente misurata volte la tensione di alimentazione massima.
- la potenza media richiesta è data da:

$$P_{avg} = \frac{V_{min}I_{min}T_q + V_{max}I_{max}T_r}{T_q + T_r} \quad (7)$$

## 7 Conclusioni

In questa tesi è stato presentato il concetto di Energy Efficient Ethernet, con interesse per le applicazioni industriali. L'introduzione dell'EEE nelle reti RTE rappresenta un campo di ricerca e sviluppo nello scenario delle comunicazioni.

Il focus sulle reti PROFINET e POWERLINK rivela come questa tecnologia porti ad un effettivo risparmio energetico, raggiungibile senza sacrificare la performance della rete. In futuro, molte attività sono previste per migliorare i vantaggi che questa soluzione offre, in particolare, la progettazione di strategie efficienti per le reti RTE più popolari sarà la strada più battuta. Tale percorso, sebbene da una parte sia facilitato dalla predicibilità del traffico ciclico, dall'altra deve tenere conto dell'impatto che ha sulle tempistiche l'avvento del traffico aciclico.

Inoltre è fondamentale confrontare i risultati teorici con quelli pratici di applicazioni reali, in quanto minime differenze tra i due comportamenti possono rappresentare dei rischi concreti per il sistema che utilizza la rete.

Per questo motivo le strategie di EEE ideate devono essere verificate tramite applicazioni reali, da cui si ricavano le differenze dai modelli ideali, allo scopo di rendere più accurati questi ultimi.

## Riferimenti bibliografici

- [1] S. Vitturi and F. Tramarin, Energy Efficient Ethernet for Real-Time Industrial Networks, *IEEE*, data.
- [2] F. Tramarin and S. Vitturi, Energy Efficient Ethernet for the Industrial Communication Scenario, *IEEE*, data.
- [3] Intel I210-T1 datasheet.