

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria dell'Automazione



**ANALISI DI UN SISTEMA DI COMUNICAZIONE MODBUS AI
FINI DELLA STESURA DI UN CAPITOLATO DI PROVA
INDUSTRIALE PER SISTEMI DI SUPERVISIONE**

Relatore: Prof. Matteo Giovanni ROSSI

Co-relatore: Ing. Giovanni CASSINELLI

Tesi di Laurea di:

Giovanni VINCI

Matr. 783183

Anno Accademico 2012 – 2013

Ringraziamenti

Esprimo la mia gratitudine al Prof. Matteo Giovanni Rossi, relatore della mia tesi, all'Ing. Giovanni Cassinelli, che mi ha dato l'opportunità di lavorare su questo progetto all'interno dell'azienda Bticino, all'Ing. Giorgio Vedani e a Roberto Federici, tecnici del laboratorio di compatibilità elettromagnetica che hanno seguito il mio lavoro.

Questa tesi non è soltanto il frutto di un progetto durato sei mesi ma è anche il risultato di cinque anni di preparazione, perciò ringrazio i miei genitori che mi hanno fiduciosamente dato la possibilità di intraprendere questo percorso di studi e hanno sempre cercato di aiutarmi in ogni modo a sostenere il peso di questo impegno. Ringrazio mio fratello perché la sua presenza non è mai mancata nei momenti di sconforto in cui ho avuto bisogno di una mano per non fermarmi di fronte alle difficoltà.

Ringrazio tutti gli amici e parenti che hanno sempre mostrato interesse nei confronti del mio percorso formativo perché mi hanno trasmesso motivazione e incoraggiamento.

Un ultimo ringraziamento va a Sara, lei è la serenità che mi ha accompagnato negli ultimi anni di studio.

INDICE

1	Introduzione	11
2	La tecnologia.....	17
2.1	Livello di campo	18
2.2	Il modbus	20
2.3	Specifiche tecniche	22
3	Modello del sistema.....	25
3.1	Modello matematico della linea	25
3.2	Modello di simulazione della linea	31
3.3	Modello di un nodo modbus	31
3.4	Validazione del modello della linea.....	35
3.4.1	Coerenza tra modello matematico e di simulazione della linea.....	36
3.4.2	Calibrazione di un analizzatore di rete vettoriale	38
3.4.3	Misura del coefficiente di attenuazione	41
3.4.4	Misura dell'attenuazione di sbilancio del cavo.....	44
3.5	Validazione del modello dei dispositivi modbus	49
3.6	Validazione del modello complessivo	53
4	Analisi di funzionamento del sistema.....	55
4.1	La forma d'onda dell'informazione	55
4.2	Verifica del caso pessimo	61
4.3	Il segnale e la lunghezza della linea.....	64
4.4	Emulatore hardware.....	66
4.5	Modifiche hardware per l'incremento delle prestazioni	68
5	Le modifiche hardware e la robustezza del sistema.....	73
5.1	Prove di compatibilità elettromagnetica.....	73

5.2 Prova di immunità a transitori/treni elettrici veloci	75
5.3 Prova di immunità ai disturbi condotti, indotti da campi a radiofrequenza	81
6 Il capitolato di prova	85
6.1 Le unità di carico apparenti	85
6.2 Protezione delle apparecchiature ausiliarie, collegamento dello schermo e livelli di prova.....	89
7 Conclusioni	93
Bibliografia	95

INDICE FIGURE

Figura 1.1 - Elementi di una Smart grid.....	12
Figura 1.2 - Scenario della Smart grid	13
Figura 2.1 - Architettura sistema TICONTRON.....	17
Figura 2.2 - Centrale di misura multifunzione	18
Figura 2.3 - Modulo I/O.....	19
Figura 2.4 - Contatore di energia	19
Figura 2.5 - Concentratore di impulsi.....	19
Figura 2.6 - Interfaccia per interruttori.....	20
Figura 2.7 - Architettura comunicazione Master/Slave	21
Figura 2.8 - Composizione di un frame modbus	21
Figura 2.9 - Confronto tensioni singole e differenziale.....	22
Figura 2.10 - Linea modbus	23
Figura 3.1 - Modello elettrico tratto di linea di lunghezza Δz	26
Figura 3.2 - Impedenza di linea e carico.....	30
Figura 3.3 - Simbolo rappresentativo della linea di comunicazione.....	31
Figura 3.4 - Schema elettrico interfaccia modbus del dispositivo slave.....	32
Figura 3.5 - Schema elettrico di simulazione del dispositivo	33
Figura 3.6 - Schema elettrico simulazione modo differenziale.....	34
Figura 3.7 - Schema elettrico di simulazione emissione segnale.....	35
Figura 3.8- Schema elettrico del nodo master.....	35
Figura 3.9 - Schema elettrico di verifica.....	37
Figura 3.10 - Confronto tensione in ingresso/tensione in uscita.....	37
Figura 3.11 - Strumenti di calibrazione dell'analizzatore di rete	39
Figura 3.12 - Sezione del connettore di cortocircuito.....	39
Figura 3.13 - Sezione del connettore di circuito aperto	40
Figura 3.14 - Architettura sistema di calibrazione	40
Figura 3.15 - Adattatore bilanciato per cavo composto da 4 coppie di conduttori	41
Figura 3.16 - Architettura sistema di misura.....	42
Figura 3.17 - Attenuazione misurata in funzione della frequenza.....	43
Figura 3.18 - Setup di misura dell'attenuazione a bassa frequenza	44
Figura 3.19 - Impedenza di ingresso calcolata	46

Figura 3.20 - Attenuazione di sbilancio	47
Figura 3.21 - Attenuazione misurata	48
Figura 3.22 - Impedenza di ingresso calcolata.....	48
Figura 3.23 - Attenuazione di sbilancio	49
Figura 3.24 - Sistema di comunicazione completo.....	50
Figura 3.25 - Setup di misura delle tensioni	51
Figura 3.26 - Andamento nel tempo delle tensioni misurate	51
Figura 3.27 - Modello di simulazione della tensione di modo differenziale	52
Figura 3.28 - Confronto fra gli andamenti della tensione reale e simulata	53
Figura 3.29 - Modello di simulazione completo	54
Figura 3.30 - Confronto fra gli andamenti della tensione reale e simulata	54
Figura 4.1 - Tensioni ideali sui singoli conduttori	56
Figura 4.2 - Tensione differenziale ideale.....	57
Figura 4.3 - Ritardo del conteggio da parte del ricevitore	57
Figura 4.4 - Errore di interpretazione del messaggio	58
Figura 4.5 - Tensione differenziale relativa al byte 127	59
Figura 4.6 - Interpretazione del byte 5	60
Figura 4.7 - Interpretazione del byte 127	60
Figura 4.8 - Analisi in frequenza di un'onda quadra.....	61
Figura 4.9 - Interfaccia utente del software	62
Figura 4.10 - Andamento della tensione reale in confronto alla tensione stimata	62
Figura 4.11 - Grafico dei bit errati nella trasmissione dei singoli byte.....	63
Figura 4.12 - Tensione differenziale al variare della lunghezza del cavo	65
Figura 4.13 - Schema elettrico di simulazione del nodo slave	65
Figura 4.14 - Schema elettrico emulatore di un dispositivo slave.....	66
Figura 4.15 - Confronto tensioni fra dispositivi reali ed emulatore	67
Figura 4.16 - Limiti di funzionamento del sistema in relazione alla velocità di comunicazione.....	68
Figura 4.17 - Tensione differenziale in relazione alle capacità dei dispositivi ...	69
Figura 4.18 - Tensione differenziale nel caso di assenza delle resistenze.....	70
Figura 4.19 - Schema elettrico dispositivi modificati.....	70
Figura 5.1 - Forma d'onda di un impulso stabilita dalla normativa.....	76
Figura 5.2 - Pinza capacitiva di accoppiamento (misure espresse in mm).....	76
Figura 5.3 - Schema elettrico CDN T2	77

Figura 5.4 - Setup di prova per l'immunità ai transitori veloci	78
Figura 5.5 - Setup di misura nel caso di disturbo sull'alimentazione.....	80
Figura 5.6 - Struttura del generatore di prova	82
Figura 5.7 - Esito prova di immunità condotta	83
Figura 5.8 - Andamento nel tempo della tensione	84
Figura 5.9 - Trasformata in frequenza del disturbo misurato.....	84
Figura 6.1 - Setup di misura delle unità di carico.....	86
Figura 6.2 - Schema elettrico di misura delle unità di carico.....	86
Figura 6.3 - Grafico utile a determinare le unità di carico	87
Figura 6.4 - Messa a terra dello schermo nella prova ai transitori elettrici.....	90
Figura 6.5 - Messa a terra dello schermo nella prova di immunità condotta	90

1 Introduzione

Al giorno d'oggi l'energia elettrica (intesa come generazione, distribuzione e fornitura) riveste un ruolo fondamentale e, per farsene un'idea, basta osservare che sicurezza nazionale, salute/benessere, comunicazioni, trasporti, riscaldamento, illuminazione, computer ed elettronica dipendono dall'energia elettrica.

Limitandoci al nostro Paese, esperti e ricercatori hanno messo in luce la necessità di modernizzare l'infrastruttura attuale al fine di incrementare la sicurezza della fornitura elettrica, anche a causa della crescente domanda di energia.

La rete elettrica del futuro dovrà garantire standard sempre maggiori rispetto ad affidabilità, sicurezza, potenza, efficienza e riduzione dell'impatto ambientale [2]. Sempre più consumatori diventeranno produttori (generazione distribuita) e la rete dovrà essere in grado non solo di trasportare l'energia elettrica, ma anche di gestire in modo ottimale i flussi di energia richiesti e prodotti dagli utenti finali. Da quanto detto, risulta evidente l'importanza di avere in futuro una rete di distribuzione che permetta di raggiungere questi obiettivi.

L'ampliarsi della generazione distribuita e la diffusione di nuovi impianti, grandi e piccoli (anche in ambito domestico), hanno portato a un cambiamento radicale nella distribuzione dell'energia.

La rete elettrica non è più solo un canale per trasmettere e distribuire energia dalle grandi centrali ai clienti finali, ma diventa una "Smart grid", ovvero una rete intelligente in grado di accogliere flussi di energia bidirezionali, di fare interagire produttori e consumatori, di determinare in anticipo le richieste di consumo e di adattare con flessibilità la produzione e il consumo di energia elettrica, in grado di inviare il surplus di energia di determinate aree ad altre zone in quel momento in deficit; il tutto in tempo reale e in modo dinamico.

Una Smart grid costituisce una piattaforma di calcolo distribuito di grandi potenzialità. Si ottiene sovrapponendo una rete informatica ad una rete di distribuzione elettrica, capace di comunicare scambiando informazioni sui flussi di energia, in modo tale da consentire di gestire la rete elettrica in

maniera "intelligente" sotto vari aspetti o funzionalità, ovvero in maniera efficiente per la distribuzione di energia elettrica e per un uso più razionale dell'energia, minimizzando, al contempo, eventuali sovraccarichi e variazioni della tensione elettrica intorno al suo valore nominale.

Inoltre, i sensori e le tecnologie di comunicazione di cui è composta la rete, consentono all'utente finale una vasta gamma di servizi attualmente non disponibili.

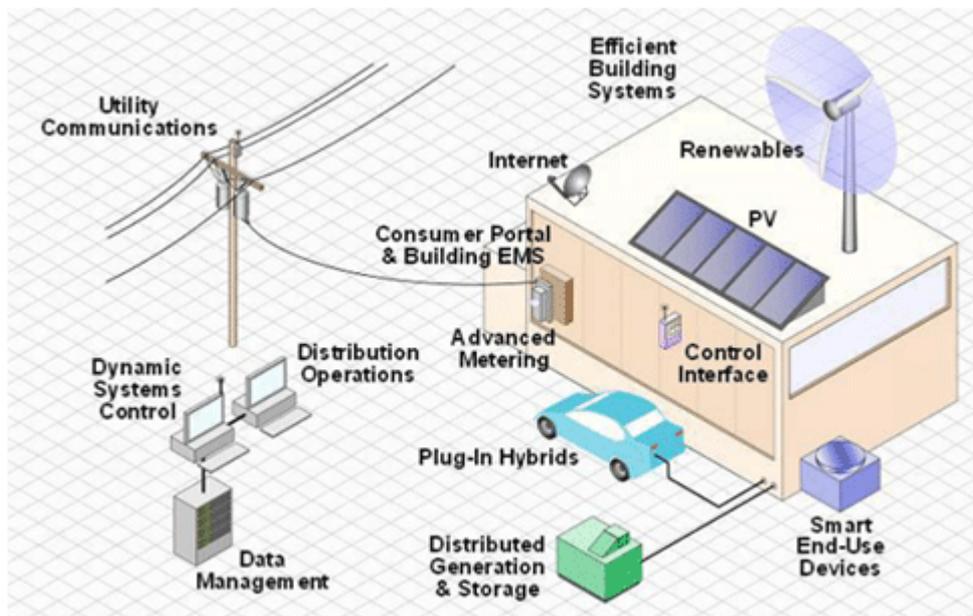


Figura 1.1 - Elementi di una Smart grid

Una rete di questo tipo costituisce quindi l'integrazione delle tecnologie che consentono di ripensare il design e il funzionamento della rete elettrica convenzionale e che rispondono anche alle esigenze di:

- rilevare problemi prima che abbiano impatto sul servizio;
- rispondere nel modo più veloce possibile agli input locali;
- comunicare velocemente;
- avere un avanzato sistema diagnostico centralizzato;
- prevedere un feedback di controllo che riporti rapidamente il sistema ad uno stato di stabilità dopo eventuali interruzioni o disturbi di rete;
- adattarsi velocemente alle condizioni variabili del sistema.

Si deve inoltre sottolineare che rispetto all'attuale rete di distribuzione, in cui il flusso di potenza è unidirezionale (da produttore a consumatore), in una Smart grid, oltre a promuovere la diffusione delle fonti rinnovabili, si rendono i consumatori parti attive nel processo di fornitura dell'energia.

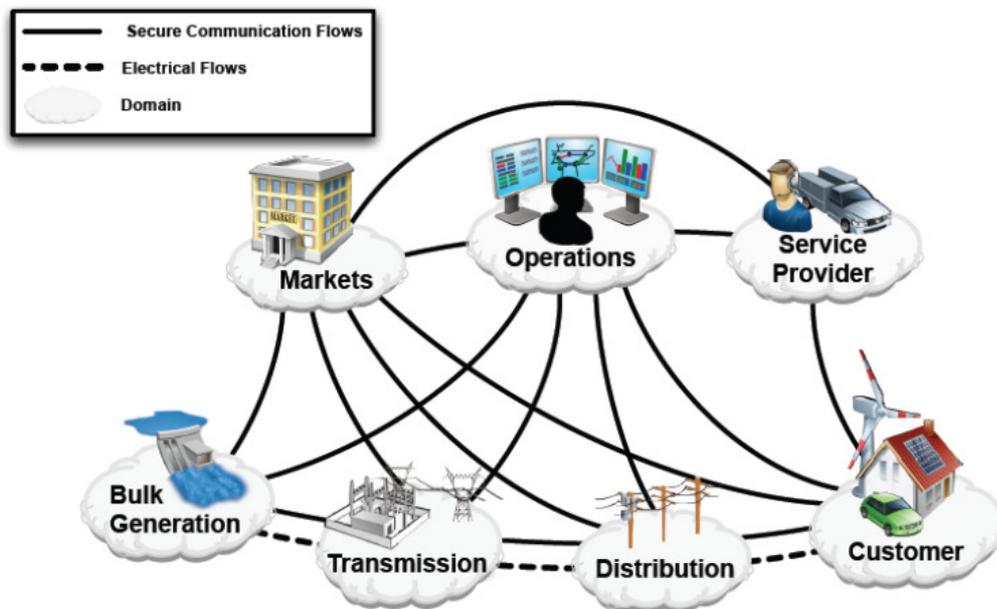


Figura 1.2 - Scenario della Smart grid

All'interno della Smart grid è necessario che ogni attore sia parte attiva e immetta informazioni sulla complessa rete di comunicazione. Grazie a questa rete di comunicazione ogni attore viene messo a conoscenza di tutte le informazioni necessarie ad operare in modo efficiente; i mercati devono gestire la compravendita delle risorse, mentre i fornitori di servizi devono gestire l'offerta sulla base delle informazioni di mercato e di consumo. Risulta perciò necessario che i clienti condividano all'interno della Smart grid ogni informazione utile [1].

Per clienti si intende prosumer (produttori-consumatori) dotati di un sistema di automazione e controllo dell'edificio (BACS, Building Automation and Control System).

BACS include la strumentazione, il controllo e la tecnologia di gestione per tutte le strutture edilizie, gli impianti, le strutture all'aperto e altre apparecchiature dotate di automazione. Questi impianti si basano su un

sistema informatico centralizzato di supervisione, controllo e acquisizione dati (SCADA, supervisory control and data acquisition). Le funzioni di controllo di questi sistemi sono generalmente limitate, infatti la maggior parte delle azioni di controllo automatico vengono eseguite da unità terminali e il sistema SCADA viene utilizzato per la supervisione, per la modifica delle variabili di riferimento dei controlli e per l'attivazione/disattivazione di condizioni di allarme.

I sistemi SCADA danno all'edificio l'intelligenza necessaria per permettere la gestione coordinata, integrata e computerizzata degli impianti tecnologici, quali climatizzazione, impianti di sicurezza, distribuzione di acqua, gas ed energia.

La soluzione proposta da Bticino è l'impiego del sistema TICONROL che permette di rilevare in tempo reale tutti i parametri elettrici dell'impianto: corrente, tensione, potenza, energia attiva e reattiva, ore di funzionamento di interruttori, segnalazione di allarmi di assenza di tensione, di sovraccarico o di sovra temperatura [19].

Con il sistema TICONROL viene assicurata la continuità del servizio, la riduzione dei costi e il miglioramento della gestione della distribuzione dell'energia.

Lo sviluppo di questa tecnologia ha determinato perciò la necessità di dotare ogni dispositivo elettrico di un sistema di comunicazione, utile ad informare il supervisore. La sovrapposizione di una rete di comunicazione alla rete elettrica implica l'apertura di un nuovo fronte sul quale giudicare la qualità del prodotto e l'introduzione di nuove problematiche nel dimensionamento degli impianti.

Questo progetto di tesi nasce dalla necessità dell'azienda di studiare il sistema di comunicazione di cui sono dotati i dispositivi elettrici e determinare la causa della limitazione delle prestazioni.

Per raggiungere questo scopo è necessario procedere con un'accurata analisi del sistema che richiede di creare un modello di simulazione della linea di comunicazione, grazie al quale sarà possibile prevedere il comportamento del sistema in ogni condizione di funzionamento. L'identificazione del modello e dei relativi parametri si fonda sulla base della teoria delle linee di trasmissione e si convalida attraverso le misure sul sistema reale.

Una volta validato il modello si passa alla dettagliata analisi della forma d'onda dell'informazione che transita sulla linea, influenzata dai vari parametri del sistema. L'analisi di funzionamento porta ad individuare i limiti di prestazione e

quindi le possibili modifiche hardware che si possono attuare per risolvere il problema. Una volta modificato l'hardware è necessario verificare che queste variazioni incidano positivamente sulle prestazioni del sistema anche in condizioni critiche di funzionamento, ossia in presenza di disturbi.

Il secondo scopo, ma non meno importante, per il quale viene sviluppato questo progetto, è quello di definire un capitolato di prova per i prodotti dotati di una porta di comunicazione modbus, in modo da poter determinare le prestazioni dei dispositivi e quindi la qualità del prodotto.

Le normative attualmente in vigore non coprono in maniera sufficientemente specifica i metodi di prova in base ai quali vengono definite e certificate le prestazioni di questo genere di sistemi; soltanto attraverso un'approfondita conoscenza del sistema è possibile mettere a punto un capitolato di prova che le definisce in modo univoco.

Seguendo i passi di questa tesi, nel prossimo capitolo, si descrive il protocollo di comunicazione, per passare poi, nel terzo capitolo, alla definizione del modello della linea di comunicazione. La definizione del modello si completa in quattro fasi:

- definizione di un modello matematico;
- messa a punto di un modello di simulazione;
- verifica di concordanza tra i due modelli;
- validazione del modello di simulazione.

Nel quarto capitolo si approfondisce lo studio di funzionamento del sistema, il quale, per essere portato a termine, necessita lo sviluppo di un software di stima dell'andamento delle tensioni lungo la linea di trasmissione e la realizzazione di un emulatore hardware.

Il quinto capitolo vuole focalizzare l'attenzione sulle prove di immunità ai disturbi mettendo in evidenza le qualità di robustezza del sistema.

Si chiude perciò il quadro generale di analisi.

Il passo successivo è la stesura del capitolato di prova. Nel sesto capitolo viene presentato un nuovo metodo che potrebbe essere usato per definire il carico che ogni dispositivo rappresenta per la linea di comunicazione, generando perciò una nuova variabile di riferimento. Sulla base di questa nuova variabile si definiscono le procedure di prova di compatibilità elettromagnetica.

L'ultimo capitolo riassume i risultati ottenuti e propone sviluppi futuri.

2 La tecnologia

TICONTROL è il sistema di misura e supervisione Bticino, grazie al quale è possibile visualizzare e gestire, su qualunque dispositivo dotato di browser, tutti i parametri di un impianto elettrico, in modo semplice ed immediato. Ha un'architettura basata su due livelli, definiti livello di supervisione e livello di campo, collegati tra loro mediante la rete di comunicazione RS-485 con protocollo MODBUS.

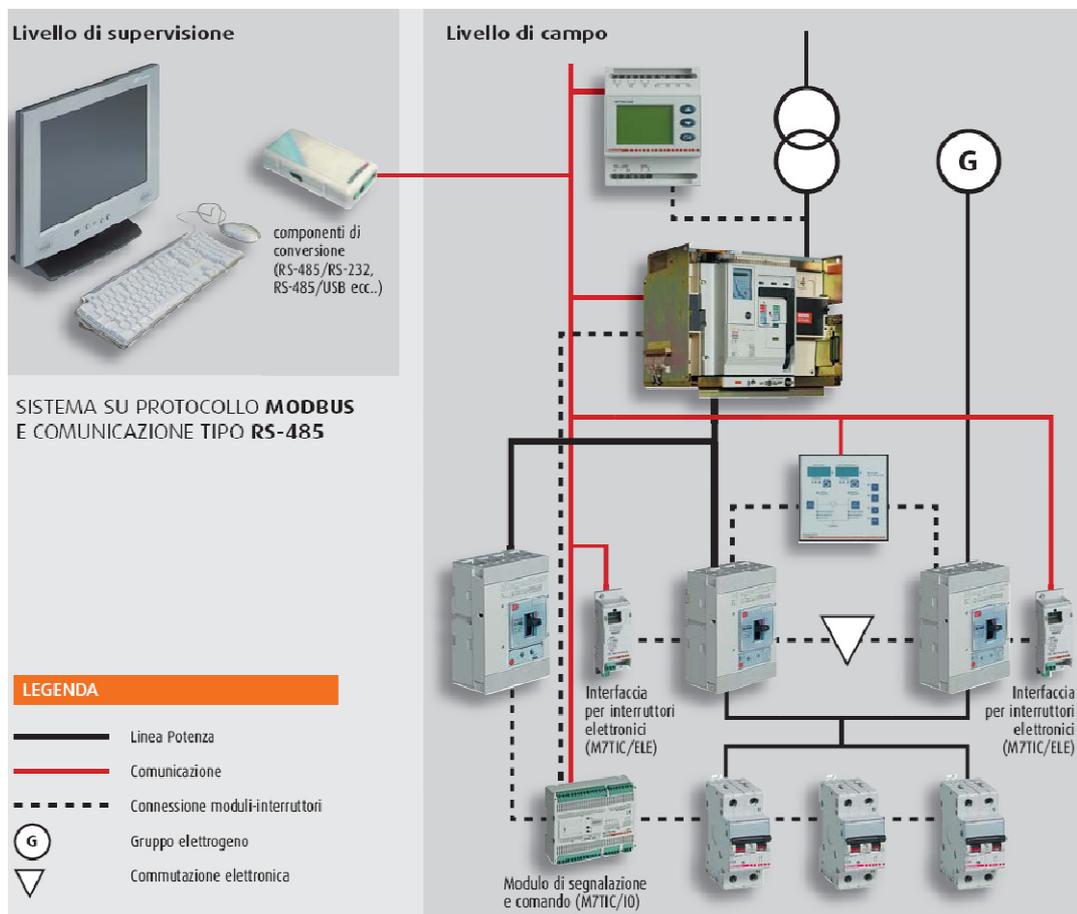


Figura 2.1 - Architettura sistema TICONTROL

Il livello di supervisione rappresenta la centralizzazione dei comandi, che ha portato alla nascita di sistemi di supervisione denominati CIB (Computer

Integrated Building). Questi “edifici intelligenti”, utilizzando determinati software di gestione dedicati e personalizzati, possono supervisionare tutti gli impianti presenti all’interno di una struttura archiviando eventi ed allarmi. Il sistema TICONTRON, sfruttando uno dei protocolli più utilizzati nei sistemi industriali (MODBUS), può essere controllato da questi computer ed integrato con altri sistemi di supervisione. Mediante il supervisore è quindi possibile conoscere in ogni momento le condizioni dell’impianto e dei suoi elementi, intervenendo dove necessario.

Grazie all’utilizzo del protocollo modbus il sistema TICONTRON può essere integrato ed ampliato anche con dispositivi di altri produttori.

Il concetto basilare per un sistema TICONTRON, come per ogni altro sistema SCADA e come per l’intero progetto Smart grid, è dunque la comunicazione. Si vuole perciò andare ad analizzare il sistema di comunicazione al livello base di questa complessa rete, il livello di campo.

2.1 Livello di campo

Il livello di campo è costituito da tutti i dispositivi dell’impianto di supervisione che possono essere di vario genere, se ne presentano di seguito alcune tipologie.

Le centrali di misura multifunzione sono in grado di fornire la misura di correnti, tensioni, potenza attiva, reattiva ed apparente, temperatura interna e fattore di potenza. La misura è la base di tutte le diagnostiche e svolge un ruolo chiave per ottenere la massima efficienza energetica. Soltanto attraverso la misura e la possibilità di memorizzare i dati misurati si possono controllare e di conseguenza ottimizzare i consumi all’interno dell’edificio.



Figura 2.2 - Centrale di misura multifunzione

I *moduli I/O* sono composti da 24 ingressi per l’individuazione del cambiamento di stato di segnali che provengono da contatti presenti sugli interruttori magnetotermici ed elettronici, da 4 ingressi analogici per il

collegamento di sensori (temperatura, pressione ecc...) e da 6 uscite normalmente aperte a relè.

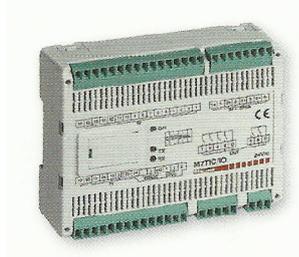


Figura 2.3 - Modulo I/O

I *contatori di energia* misurano l'energia elettrica consumata in circuiti monofase o trifase. Le informazioni vengono visualizzate su display locale, rese disponibili in formato modbus oppure comunicate, tramite un'uscita ad impulsi, ad un concentratore di impulsi.



Figura 2.4 - Contatore di energia

I *concentratori di impulsi* permettono di concentrare e trasmettere su RS485 le misure effettuate da un numero massimo di 7 contatori ad impulso. Il dispositivo concentra e memorizza i segnali o gli impulsi in uscita dai contatori di energia elettrica, gas, olio, acqua, aria compressa o delle centrali di misura.



Figura 2.5 - Concentratore di impulsi

I *dispositivi di interfaccia per interruttori* permettono di comunicare su RS485 lo stato dell'interruttore associato e della relativa protezione differenziale.



Figura 2.6 - Interfaccia per interruttori

Sono inoltre disponibili altri dispositivi di supervisione che avendo la porta di comunicazione RS-485 possono essere interfacciati con il sistema di supervisione TICONTRON permettendo il controllo totale di tutto un impianto di distribuzione.

2.2 Il modbus

Nei sistemi di supervisione industriale, il modbus è un protocollo di comunicazione molto diffuso. Questo protocollo è basato sull'architettura master/slave, nella quale il master richiede agli slave di inviare dei dati oppure di eseguire delle operazioni.

Al bus può essere connesso un solo nodo master mentre il numero dei nodi slave può andare da 1 a 247.

La comunicazione è sempre inizializzata dal master, perciò i nodi slave non possono trasmettere senza aver ricevuto una richiesta da parte del master. Le richieste possono essere di due tipi, si dice "unicast" la richiesta indirizzata ad un solo nodo slave, si dice invece "broadcast" la richiesta indirizzata a tutti gli slave connessi al bus; questo tipo di richiesta non prevede alcuna risposta da parte dei nodi slave [3].

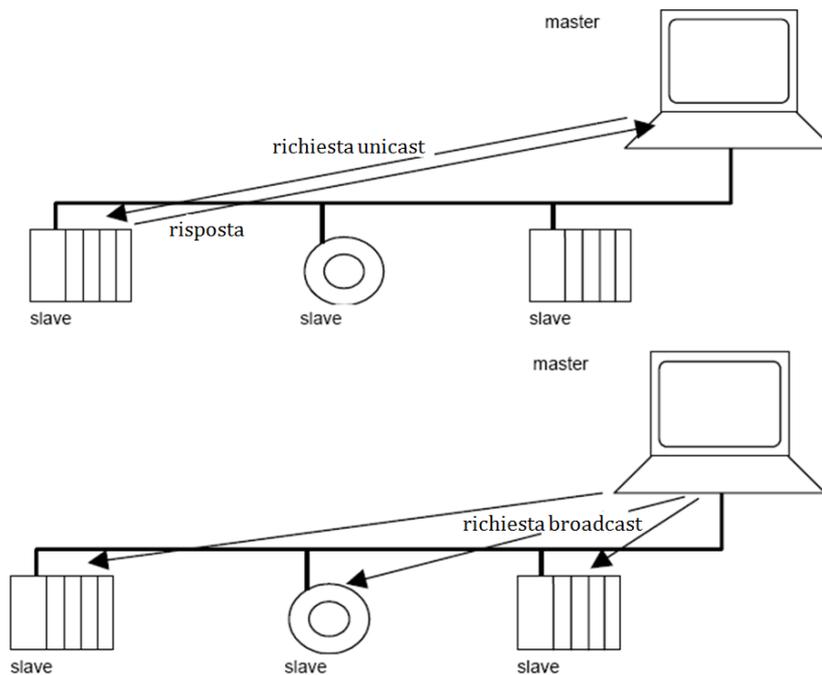


Figura 2.7 - Architettura comunicazione Master/Slave

I messaggi scambiati tra master e slave si chiamano frame o PDU e sono composti da quattro campi (figura 2.8).

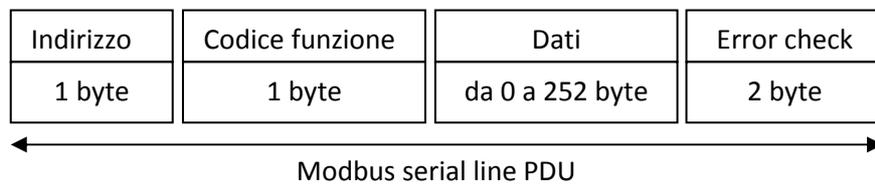


Figura 2.8 - Composizione di un frame modbus

L'indirizzo permette di determinare il dispositivo di destinazione del messaggio. Nel caso dei messaggi broadcast l'indirizzo viene settato a zero.

Il codice della funzione identifica l'operazione da eseguire e può essere seguito da una serie di dati. L'ultima parte del frame è utile per determinare eventuali errori di trasmissione.

Dopo aver inviato il messaggio, il nodo master rimarrà in attesa della risposta per il tempo utile al nodo slave per ricevere il messaggio, elaborare la risposta e inviarla; in caso di mancata risposta il master può ripetere la richiesta.

2.3 Specifiche tecniche

EIA RS-485 è una specifica standardizzata che definisce il sistema di gestione del segnale in forma differenziale, ossia che la differenza tra le tensioni passanti sui due conduttori costituisce il dato in transito.

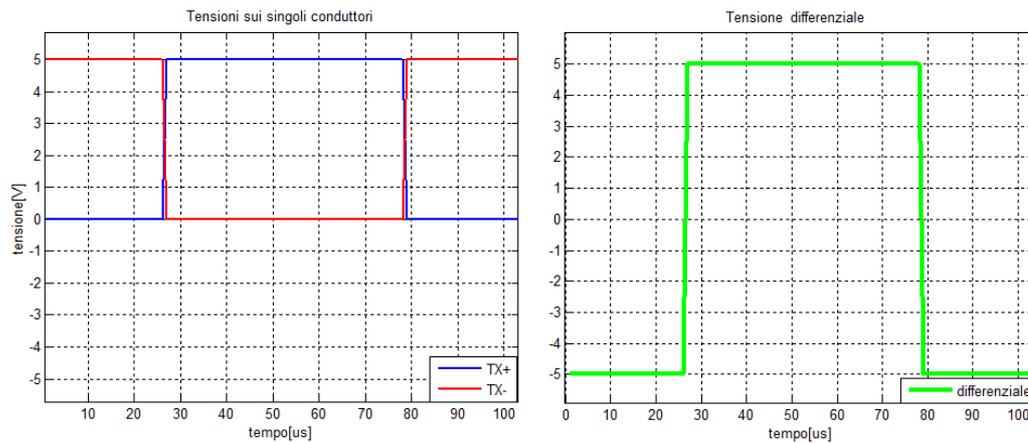


Figura 2.9 - Confronto tensioni singole e differenziale

L'ampiezza dell'onda quadra è variabile. Perché il bit venga riconosciuto è necessario che la tensione differenziale abbia un modulo maggiore di $200mV$; l'RS-485 stabilisce inoltre che la trasmissione deve funzionare anche in presenza di una tensione di modo comune compresa tra $-7V$ e $+12V$ [16] [18]. Il numero massimo di nodi della linea di trasmissione, previsto dallo standard, è equivalente a 32 unità di carico, dove una unità di carico corrisponde ad un dispositivo con impedenza di ingresso pari a $12k\Omega$. Impedenza di ingresso e numero massimo di nodi sono direttamente proporzionali, mentre le unità di carico sono legate all'impedenza secondo una proporzionalità inversa. Ad esempio nel caso in cui si utilizzano dei dispositivi la cui impedenza di ingresso è pari a $6k\Omega$, ossia due unità di carico, la linea supporterebbe al massimo 16 nodi, invece se i dispositivi utilizzati avessero un'impedenza di ingresso pari a $24k\Omega$, ossia mezza unità di carico, si otterrebbe la possibilità di avere una linea di trasmissione che raggiunge i 64 dispositivi.

Nel modbus la velocità di trasmissione viene impostata di default a $19.2Kbps$ ma, opzionalmente, può essere incrementata o decrementata.

Ad entrambi i capi della linea, in particolare per linee di lunghezza elevata, è richiesta una terminazione composta da una resistenza da 120Ω con una capacità in serie da $1nF$.

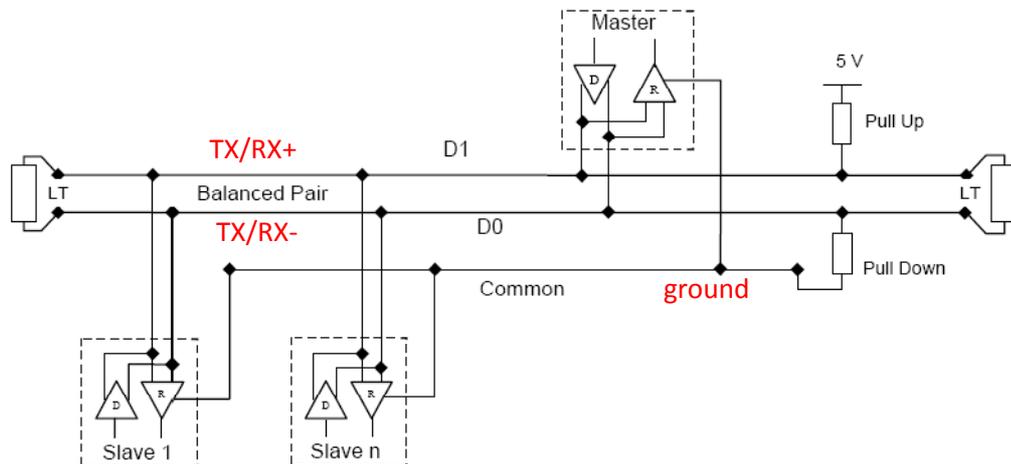


Figura 2.10 - Linea modbus

Dalla figura 2.10 è possibile notare che oltre alle due linee di TX/RX+ e TX/RX- deve essere presente un terzo conduttore che accomuna il ground di tutti i dispositivi connessi al modbus.

3 Modello del sistema

Nei capitoli precedenti si è potuto mettere a fuoco l'ambito di applicazione del sistema di comunicazione che si vuole studiare e l'insieme delle regole che compongono il protocollo modbus. Si vogliono adesso determinare i parametri che incidono sulla forma d'onda dell'informazione che transita sulla linea di comunicazione. E' necessario perciò sviluppare un modello di simulazione, grazie al quale sarà possibile prevedere l'andamento delle tensioni che viaggiano sulla linea e analizzare il comportamento del sistema in ogni particolare condizione di funzionamento.

Per giustificare l'utilizzo del software di simulazione si verifica che il modello della linea sia concorde con la teoria delle linee di trasmissione. Una volta messo a punto il modello si procede con la validazione. L'operazione di validazione, generalmente, si esegue mettendo a confronto gli andamenti delle tensioni stimate con quelle misurate sul sistema reale. Per misurare una forma d'onda che viaggia sulla linea di trasmissione è necessario connettere alla linea un nodo trasmittente e un nodo ricevente, complicando il modello in modo eccessivo per poter determinare i parametri che causano eventuali discordanze. Si decide perciò di suddividere in step la validazione del modello.

3.1 Modello matematico della linea

L'obiettivo che si vuole raggiungere è quello di creare un modello che approssimi in modo soddisfacente il comportamento di una linea di trasmissione dati.

La teoria delle linee di trasmissione specifica che la prima caratteristica da tenere in considerazione è la lunghezza elettrica del circuito. La lunghezza elettrica è il rapporto tra la dimensione del circuito (z) e la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche in gioco (λ). Nel caso in cui il valore della lunghezza elettrica è basso, allora il circuito si dice in regime quasi statico ed è modellizzabile tramite un sistema a parametri concentrati, diversamente, se il circuito non è in regime quasi statico, è necessario utilizzare un modello a parametri distribuiti [4].

Si considera inizialmente un tratto di linea di trasmissione a due conduttori uniforme di lunghezza $\Delta z \ll \lambda$.

Dalla teoria delle linee di trasmissione si ottiene il circuito equivalente del tratto elementare di linea, che è composto da un'induttanza, due resistenze e un condensatore. In figura 3.1 queste grandezze sono descritte in modo tale da mettere in evidenza la dipendenza lineare dalla lunghezza Δz .

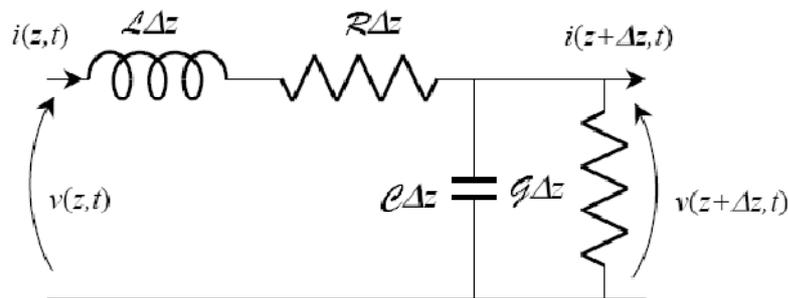


Figura 3.1 - Modello elettrico tratto di linea di lunghezza Δz

L'induttanza è definita come il coefficiente di proporzionalità tra corrente e flusso di induzione, dato che il flusso è generato dal campo magnetico che si crea nel momento in cui fluisce corrente nei conduttori.

La resistenza in serie rappresenta le perdite ohmiche dovute alla limitata conducibilità dei conduttori metallici, invece la conduttanza $G\Delta z$ tiene in conto il fenomeno delle dissipazioni per effetto Joule, dovute al non perfetto isolamento dato dal dielettrico che separa i conduttori.

Attraverso la capacità $C\Delta z$ si esplicita il fatto che i due conduttori affiancati costituiscono un condensatore.

Applicando le leggi di Kirchhoff al circuito si ottiene:

$$\begin{cases} v(z, t) - v(z + \Delta z, t) = R \Delta z i(z, t) + L \Delta z \frac{\partial}{\partial t} i(z, t) \\ i(z, t) - i(z + \Delta z, t) = G \Delta z v(z + \Delta z, t) + C \Delta z \frac{\partial}{\partial t} v(z + \Delta z, t) \end{cases}$$

La linea di trasmissione dati che si vuole esaminare è caratterizzata da una lunghezza che può arrivare fino a 1000 metri, senza ripetitore. I segnali che si vogliono analizzare possono essere trasmessi con velocità che vanno da 1200 *bps* fino alle centinaia di *kbps*, la cui armonica fondamentale ha perciò

lunghezze d'onda più corte del km . Il modello potrebbe inoltre essere utile per eventuali valutazioni riguardanti i disturbi che possono raggiungere frequenze di parecchi megahertz e quindi lunghezze d'onda di qualche metro. Secondo queste specifiche non sono perciò soddisfatte le condizioni di regime quasi statico ed è necessario mettere a punto un modello a parametri distribuiti. In termini pratici il segnale trasmesso si propaga come un'onda lungo il cavo, pertanto avrà un andamento dipendente oltre che dal tempo, anche dalla posizione lungo la linea.

A tale scopo si dividono ambo i membri delle due equazioni per Δz e si considera il limite per $\Delta z \rightarrow 0$ in modo tale che i rapporti incrementali al primo membro diventino delle derivate parziali:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial z} v(z, t) = R i(z, t) + L \frac{\partial}{\partial t} i(z, t) \\ -\frac{\partial}{\partial z} i(z, t) = G v(z, t) + C \frac{\partial}{\partial t} v(z, t) \end{cases}$$

Si prende in considerazione una linea ideale, ossia una linea senza perdite ohmiche nel conduttore e nel dielettrico:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial z} + L \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial i}{\partial z} + C \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

Da questo sistema di equazioni differenziali del primo ordine si può ricavare un'equazione del secondo ordine per la sola tensione $v(z, t)$. Si deriva la prima equazione rispetto a z e la seconda rispetto al tempo:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + L \frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} = 0 \\ \frac{\partial^2 i}{\partial z \partial t} + C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \end{cases}$$

Uguagliando le due derivate seconde miste si ottiene l'equazione della propagazione delle onde monodimensionali:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

La soluzione generale di questa equazione si può scrivere come la somma di due funzioni, una che rappresenta la propagazione di un'onda progressiva e l'altra che rappresenta la propagazione di un'onda regressiva:

$$v(z, t) = v^+ \left(z - \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right) + v^- \left(z + \frac{1}{\sqrt{LC}} t \right)$$

Da questa è possibile intuire che la velocità di propagazione dell'onda è pari a $1/\sqrt{LC}$.

Per avere un'ulteriore conferma del risultato ottenuto si vuole riportare il sistema di equazioni nel dominio della frequenza:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} V(z, \omega) = j \omega L I(z, \omega) \\ -\frac{\partial}{\partial z} I(z, \omega) = j \omega C V(z, \omega) \end{cases}$$

Si nota che le componenti spettrali di tensione e corrente, a frequenze diverse, sono disaccoppiate perché il sistema è lineare tempo invariante. Procedendo in modo analogo all'equazione d'onda si ottiene:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} V(z, \omega) + k^2 V(z, \omega) = 0$$

Dove si è posto $k = \omega \sqrt{LC}$ con dimensioni dell'inverso di una lunghezza. La soluzione generale di questa equazione è data dalla combinazione lineare di due termini linearmente indipendenti:

$$V(z, \omega) = V_0^+(\omega) e^{-jkz} + V_0^-(\omega) e^{+jkz}$$

Si considera il caso più semplice in cui il segnale è costituito da una sola componente armonica e si esegue l'antitrasformata per riportare la funzione nel tempo:

$$v(z, t) = |V_0^+| \cos(\omega_0 t - k_0 z + \arg(V_0^+)) + |V_0^-| \cos(\omega_0 t + k_0 z + \arg(V_0^-))$$

La velocità di propagazione dell'onda (velocità di fase) può essere definita come la velocità che deve possedere un osservatore per vedere costante la fase dell'onda stessa. Se ne può perciò determinare il valore imponendo nullo il differenziale dell'argomento del coseno:

$$d(\omega_0 t - k_0 z + \arg(V_0^+)) = \omega_0 dt - k_0 dz = 0$$

Si trova la velocità di fase:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\omega_0}{k_0} = \frac{\omega_0}{\omega_0 \sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = v_f$$

Le equazioni relative all'andamento delle tensioni lungo la linea, viste fino adesso, sono riferite ad una linea ideale. Per rappresentare l'andamento delle tensioni su una linea reale è necessario tenere in considerazione il coefficiente di attenuazione α :

$$V(x, t) = V^+ e^{\alpha x} e^{j(\omega t + kx)} + V^- e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)}$$

Indicando con V_0 l'ampiezza del segnale nell'origine, si ha rispettivamente, per le componenti di onda regressiva e progressiva:

$$\frac{V(x)}{V_0} = e^{\pm \alpha x}$$

Volendo esprimere l'attenuazione in decibel:

$$A = 20 \log_{10}(e^{\pm \alpha x}) = \pm 20 \alpha x \log_{10}(e) \cong 8.6 \alpha x$$

Dove 8.6α rappresenta l'attenuazione in dB/m (decibel per metro).

L'ultimo parametro utile a determinare l'andamento della tensione lungo la linea è il coefficiente di riflessione, grazie al quale si ottiene il modulo di V^- in funzione di V^+ .

Si considera la linea con impedenza caratteristica Z_∞ chiusa sul carico Z_L :

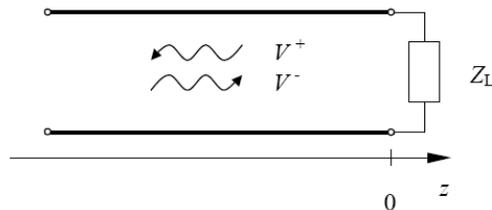


Figura 3.2 - Impedenza di linea e carico

Analizzando tensioni e correnti in $z = 0$ si può scrivere:

$$V_0^+ + V_0^- = \frac{Z_L}{Z_\infty} (V_0^+ - V_0^-)$$

Dove a sinistra dell'uguale vi è il valore della tensione ottenuto per sovrapposizione degli effetti delle due onde, invece $(V_0^+ - V_0^-)$ quantifica la tensione che non viene riflessa.

Da qui l'ampiezza incognita V_0^- si ricava come:

$$V_0^- = \frac{Z_L/Z_\infty - 1}{Z_L/Z_\infty + 1} V_0^+$$

Il coefficiente di proporzionalità che lega la tensione progressiva e quella regressiva si definisce coefficiente di riflessione di tensione. Si può notare che nel caso in cui $Z_L = Z_\infty$ allora non vi sono riflessioni e il carico si dice adattato alla linea. Questo spiega la presenza di una resistenza di terminazione della linea prevista dal protocollo modbus. Il protocollo prevede anche la presenza di una capacità in serie alla resistenza di terminazione, la quale ha la funzione di evitare che la resistenza assorba corrente continua.

3.2 Modello di simulazione della linea

PSpice è un software in grado di simulare con estrema precisione schemi elettrici analogici e analogico-digitali creati direttamente da OrCAD Capture, software della Cadence.

Questi software offrono la possibilità di utilizzare un modello di linea di trasmissione, che rispetta quanto detto in precedenza riguardo gli andamenti di tensione e corrente.

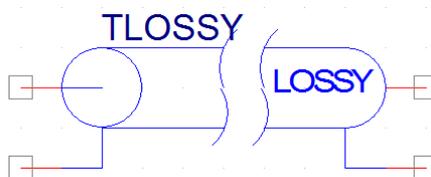


Figura 3.3 - Simbolo rappresentativo della linea di comunicazione

Il modello della linea di trasmissione è caratterizzato dai parametri descritti in tabella.

Modello	Proprietà	Descrizione
linea di trasmissione	LEN	Lunghezza elettrica
	R	Resistenza per unità di lunghezza
TLOSSY	L	Induttanza per unità di lunghezza
	G	Conduttanza per unità di lunghezza
	C	Capacità per unità di lunghezza

3.3 Modello di un nodo modbus

Per la messa a punto del modello di simulazione di un nodo modbus si osserva la parte di schema elettrico di interfaccia dei dispositivi con la linea di comunicazione dati (figura 3.4).

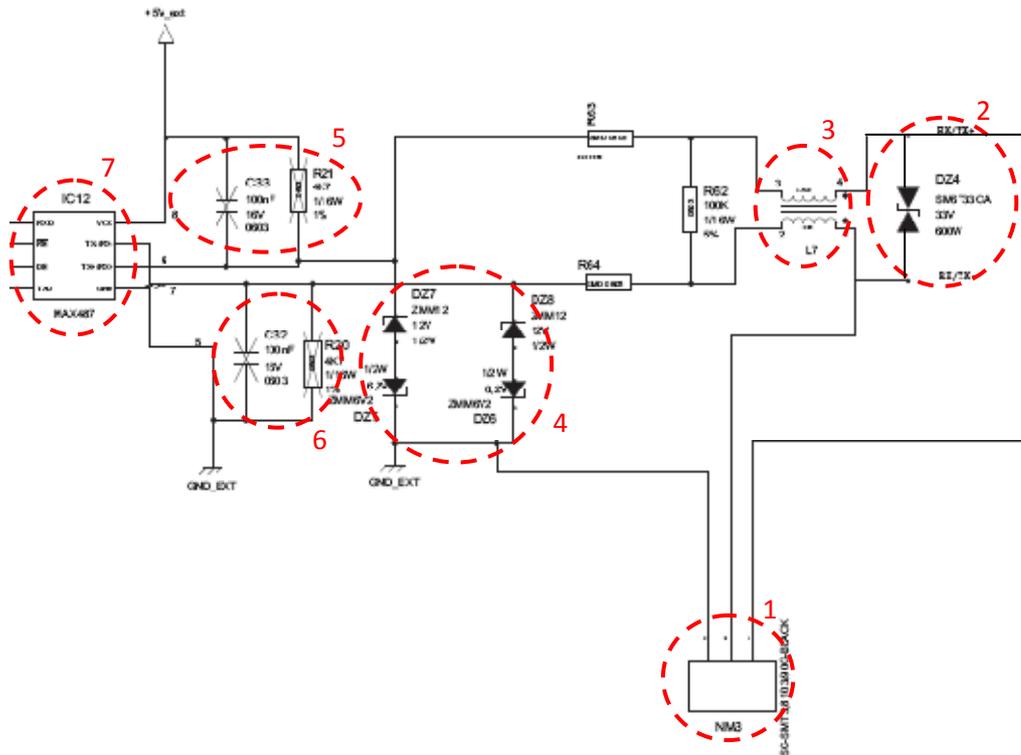


Figura 3.4 - Schema elettrico interfaccia modbus del dispositivo slave

Il componente numero 1 è il connettore composto rispettivamente da ground, *RX/TX-* e *RX/TX+* del modbus. Il transil (numero 2) e i diodi (numero 4) sono elementi di protezione, utili a proteggere l'elettronica. Per quanto riguarda la mutua induttanza (numero 3) serve a filtrare i disturbi di modo comune ed è quindi ininfluenza per i segnali differenziali. La coppia di condensatori e resistenze (numeri 5 e 6) fungono invece da filtro per determinate frequenze delle tensioni differenziali. Il componente numero 7 è il microcontrollore che gestisce la lettura e la scrittura su *RX/TX+* e *RX/TX-*, genericamente è un MAX487 oppure un ST3485E.

E' perciò possibile utilizzare un modello come quello mostrato in figura 3.5.

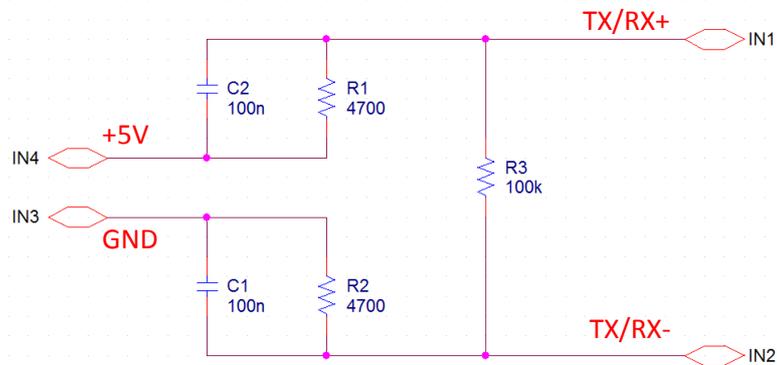


Figura 3.5 - Schema elettrico di simulazione del dispositivo

Dove i valori di resistenze e capacità variano a seconda del dispositivo.

Per agevolare la fase di validazione del modello si definisce un modello semplificato del dispositivo, che dipende unicamente dalla tensione differenziale tra $RX/TX+$ e $RX/TX-$. In questo modo sarà possibile validare il modello procedendo gradualmente, dal componente semplificato fino ad arrivare al sistema completo.

Osservando lo schema elettrico è possibile notare che i due condensatori si caricano e si scaricano contemporaneamente.

Nella seguente tabella si riportano i possibili stati del sistema.

	Stato 1	Stato 2
Tensione Differenziale	Alto	Basso
Tensione TX/RX+	Alto	Basso
Tensione TX/RX-	Basso	Alto
Capacità 1	Scarica	Carica
Capacità 2	Scarica	Carica
Corrente IN1(durante il transitorio)	Entrante	Uscente
Corrente IN2(durante il transitorio)	Uscente	Entrante

È possibile costruire uno schema elettrico equivalente nel quale le due coppie di condensatori e resistenze sono collegate in serie tra $RX/TX+$ e $RX/TX-$ (figura 3.6).

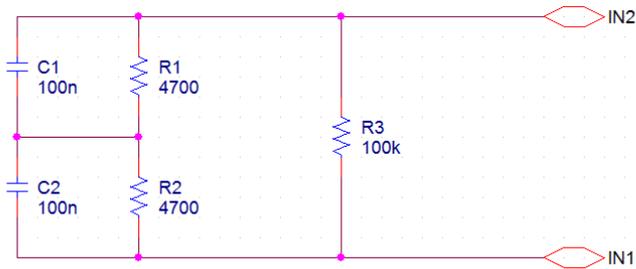


Figura 3.6 - Schema elettrico simulazione modo differenziale

	Stato 1	Stato 2
Tensione Differenziale (IN1-IN2)	Alto	Basso
Capacità 1	Carica	Scarica
Capacità 2	Carica	Scarica
Corrente IN1 (durante il transitorio)	Entrante	Uscente
Corrente IN2 (durante il transitorio)	Uscente	Entrante

Rispetto al caso precedente, gli stati di carica e scarica dei condensatori si invertono ma, dal punto di vista degli ingressi 1 e 2, gli andamenti delle correnti e delle tensioni differenziali sono equivalenti. Perciò, il modello di questo dispositivo rappresenta, per la linea di trasmissione, un carico omologo a quello reale.

Si è dunque ricostruito il modello utile a simulare un nodo della linea pronto a ricevere il segnale, mentre per quanto riguarda il nodo trasmittente è necessario analizzare il microcontrollore. Dai datasheet del MAX487 e del ST3485E si nota che la caratteristica di principale interesse, nella simulazione di una trasmissione, è la limitazione in corrente infatti, i due componenti presentano una limitazione rispettivamente di 140 e 70 mA. Altre caratteristiche interessanti, che torneranno utili nello sviluppo del progetto, sono l'impedenza di ingresso (in un caso di 48k Ω e nell'altro di 24 k Ω) e la soglia di tensione da superare per la lettura del bit (200mV rispetto alla tensione di modo comune, che può spostarsi dai -7V ai +12V).

Il modello del nodo trasmittente può quindi essere rappresentato da un generatore d'onda quadra con una resistenza in serie per la limitazione in corrente (figura 3.7).

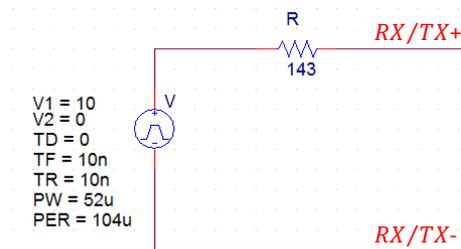


Figura 3.7 - Schema elettrico di simulazione emissione segnale

Analizzando lo schema elettrico del nodo master della comunicazione (figura 3.8) è possibile notare le resistenze di pull-up su $RX/TX+$ e pull-down su $RX/TX-$, indispensabili all'interno del modello di simulazione.

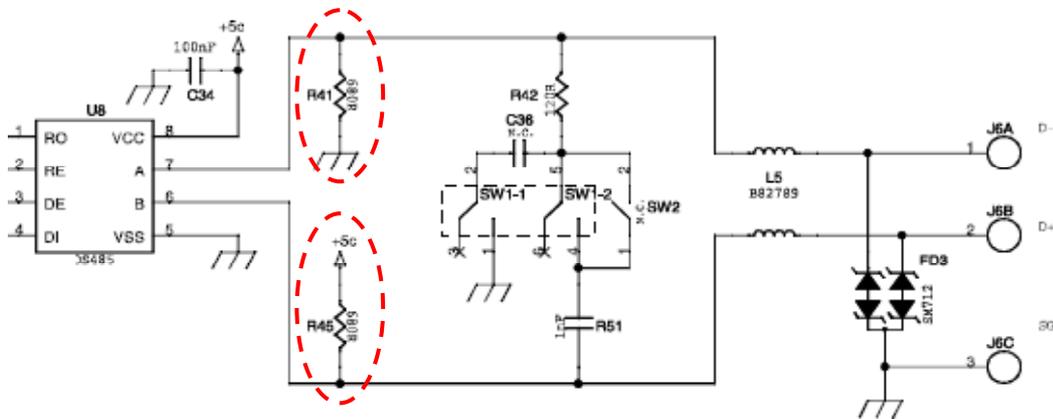


Figura 3.8- Schema elettrico del nodo master

3.4 Validazione del modello della linea

Come specificato in precedenza, è opportuno suddividere la procedura di validazione in diversi passi. Ciò che si vuole ottenere con il modello di simulazione è una buona approssimazione della forma d'onda del segnale che attraversa la linea. Per confrontare la forma d'onda dell'informazione che viaggia sulla linea reale con quella simulata, è necessario che il sistema sia composto da un nodo trasmittente e almeno un nodo ricevente. In un sistema così completo vi sono numerose variabili che incidono sull'andamento delle

tensioni lungo la linea; non è perciò semplice stabilire quale di queste variabili sia la causa delle discordanze tra simulazione e misura reale.

Si decide perciò di procedere alla validazione del modello del cavo, attraverso delle misure eseguite con un analizzatore di rete.

Successivamente si osserva un sistema nel quale la lunghezza del cavo, che collega trasmettitore e ricevitore, è sufficientemente piccola da poter essere trascurata nel modello di simulazione.

Infine è possibile validare il modello complessivo composto da una linea di lunghezza indefinita e da un numero di dispositivi variabile.

3.4.1 Coerenza tra modello matematico e di simulazione della linea

Prima di procedere con la vera e propria validazione, si verifica che il modello di simulazione sia concorde con la teoria delle linee di trasmissione, e quindi con il modello matematico.

Si sceglie di impostare i parametri del modello di simulazione secondo i dati riportati sul datasheet di un determinato cavo; poi si verifica la coerenza dei risultati ottenuti dal modello di simulazione rispetto alle aspettative fondate sulle basi teoriche.

Si prende in considerazione il cavo Belden 9842 perché è uno dei cavi che viene consigliato da Bticino; il modello di simulazione può comunque essere utilizzato per qualsiasi altro cavo attraverso la modifica dei parametri mostrati in tabella.

Caratteristiche nominali	Valore
Impedenza caratteristica	120 Ω
Capacità conduttore-conduttore	12,8 pF/ft
Velocità di propagazione	66%
Attenuazione	0,6 dB/100ft
Resistenza specifica	0,078 Ω/m

Dove la velocità di propagazione è riferita alla velocità della luce.

Avendo a disposizione i parametri forniti dal datasheet è possibile ricavare il valore degli altri parametri richiesti in ingresso dal modello di simulazione attraverso la risoluzione del seguente sistema:

$$\begin{cases} L/R = C/G \\ Z_0 = \sqrt{L/C} \end{cases}$$

Si ottengono perciò tutti i parametri utili a definire il modello di simulazione.

Parametro	Valore
G	$5,47 \cdot 10^{-6} / \Omega$
L	$6.05 \cdot 10^{-7} \text{ H}$

Si vuole analizzare adesso la propagazione dell'onda, in particolare si analizza un'onda sinusoidale alla frequenza di 1MHz in un cavo Belden9842 con lunghezza pari a 100m . Come previsto dalla specifica Modbus, la linea viene terminata con resistenze da 120Ω .

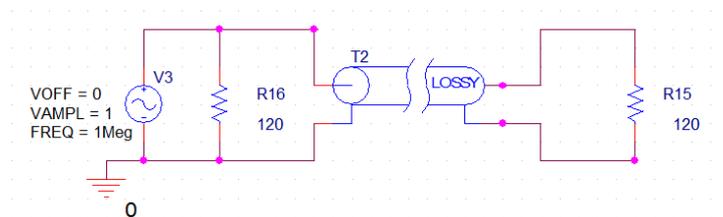


Figura 3.9 - Schema elettrico di verifica

La figura 3.10 rappresenta l'andamento della tensione ai capi di R15 e di R16 in funzione del tempo.

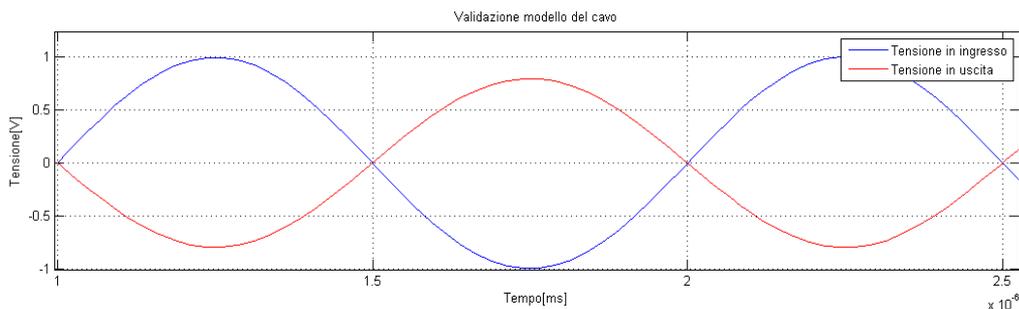


Figura 3.10 - Confronto tensione in ingresso/tensione in uscita

L'attenuazione di $0.6\text{dB}/100\text{ft}$, riportata sul datasheet, corrisponde ad un'attenuazione di $1.97\text{dB}/100\text{m}$. Perciò, dando in ingresso un'onda sinusoidale con modulo 1V , si ottiene in uscita un'onda con modulo esattamente pari a 0.797V .

I valori dell'attenuazione, ottenuti attraverso il modello della linea di trasmissione di Orcad Capture, rispettano perciò le aspettative.

Un secondo parametro che si vuole verificare è la velocità di propagazione dell'onda. Secondo il modello matematico presentato nel paragrafo 3.1 la velocità di propagazione dell'onda deve essere pari a:

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 198.4 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Su una linea lunga 100m , tale velocità, determina un ritardo di propagazione pari a $0.5 \mu\text{s}$, che per un segnale sinusoidale con frequenza 1MHz corrisponde ad uno sfasamento di 180° , coincidente con quanto ottenuto in simulazione ed osservabile nel grafico.

L'attenuazione e il ritardo sono i due effetti principali che subisce il segnale a causa del passaggio attraverso il conduttore. Verificando che questi valori rispettino le aspettative fondate sul modello matematico si è voluto dimostrare che il modello della linea di trasmissione di Orcad Capture è concorde con i risultati previsti dal modello matematico presentato in precedenza.

Si vogliono adesso eseguire delle misurazioni sui cavi attraverso l'utilizzo di un analizzatore di rete, in modo tale da validare il modello matematico.

3.4.2 Calibrazione di un analizzatore di rete vettoriale

Un analizzatore di rete è uno strumento completo e versatile, usato per analizzare le proprietà delle reti elettriche, in particolare il comportamento associato alla riflessione e alla trasmissione di segnali elettrici.

Le misure che si presentano nei prossimi paragrafi non sono misure usuali; è necessario seguire le direttive della normativa CEI EN 50289 [6] per ottenere dei risultati attendibili.

Gli analizzatori di rete vettoriali hanno la particolare proprietà di riuscire a compensare gli errori sistematici di misura con grande precisione grazie alla procedura di calibrazione.

Perché la calibrazione rispetti la norma deve essere eseguita tramite un kit di calibrazione la cui caratterizzazione è verificata periodicamente in un laboratorio di misura adeguato.



Figura 3.11 - Strumenti di calibrazione dell'analizzatore di rete

La calibrazione automatica prevede tre fasi, la prima utilizza un connettore di tipo cortocircuito, la seconda un connettore di tipo circuito aperto e la terza prevede l'applicazione di un carico.

Con il primo connettore si vuole realizzare il caso ideale di cortocircuito (figura 3.12).

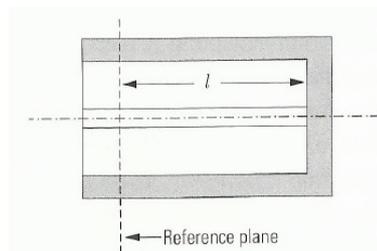


Figura 3.12 - Sezione del connettore di cortocircuito

Il "reference plane" è l'interfaccia fisica tra l'analizzatore di rete e il dispositivo testato. In questo caso è come se l'onda emessa venisse completamente riflessa indietro e l'offset di sfasamento tra onda emessa e onda riflessa dipende unicamente dalla lunghezza l , sulla base della quale lo strumento esegue la calibrazione [5].

Nel caso del connettore di circuito aperto invece il coefficiente di riflessione dipende da capacità parassite che non possono essere trascurate (figura 3.13).

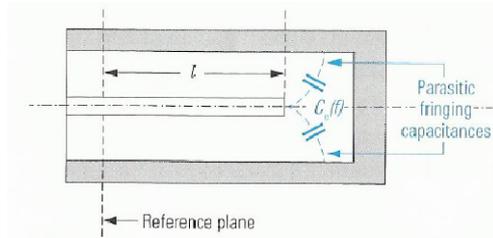


Figura 3.13 - Sezione del connettore di circuito aperto

Questo connettore permette all'analizzatore di rete una calibrazione in frequenza, infatti, il coefficiente di riflessione in questo caso è funzione dalla frequenza.

Come ultimo connettore per la calibrazione automatica, lo strumento richiede il connettore di carico, ossia una precisa impedenza a banda larga che corrisponde all'impedenza del sistema, in modo tale da calibrare in modo preciso il coefficiente di attenuazione.

Per analizzare le proprietà di un conduttore con l'analizzatore di rete è necessario utilizzare dei trasformatori di bilanciamento, utili ad adattare l'impedenza tra una linea bilanciata (collegata allo strumento di misura) e una linea sbilanciata (dispositivo da testare).

La normativa italiana CEI EN 50289 [6], che fornisce i dettagli sui metodi di prova per determinare le caratteristiche dei cavi, stabilisce che deve essere eseguita un'ulteriore calibrazione per annullare gli effetti dei trasformatori di bilanciamento sulla misura. In questo caso il sistema di calibrazione è rappresentato in figura 3.14.

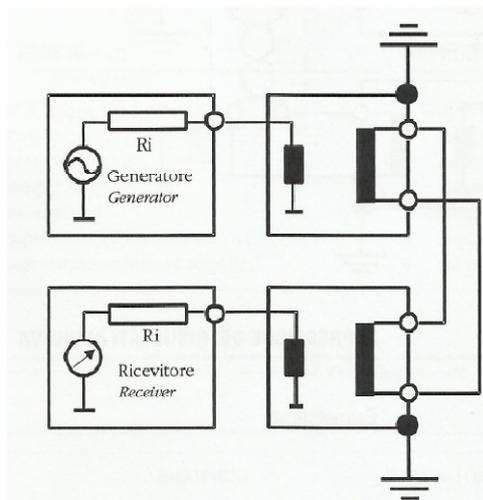


Figura 3.14 - Architettura sistema di calibrazione

Dove il collegamento tra le porte di prova deve essere più corto possibile e bilanciato [6].

Per collegare il campione in prova ai trasformatori di bilanciamento, mantenendo una corretta caratteristica dell'impedenza di modo comune e differenziale delle varie coppie di fili che compongono il cavo, si utilizza una placca metallica piramidale e un adattatore. Ogni coppia di conduttori di cui è composto il cavo viene fatta passare nelle scanalature della piramide. Perché le proprietà della struttura non influenzino la misura è necessario eseguire un'ulteriore calibrazione di cortocircuito e circuito aperto.

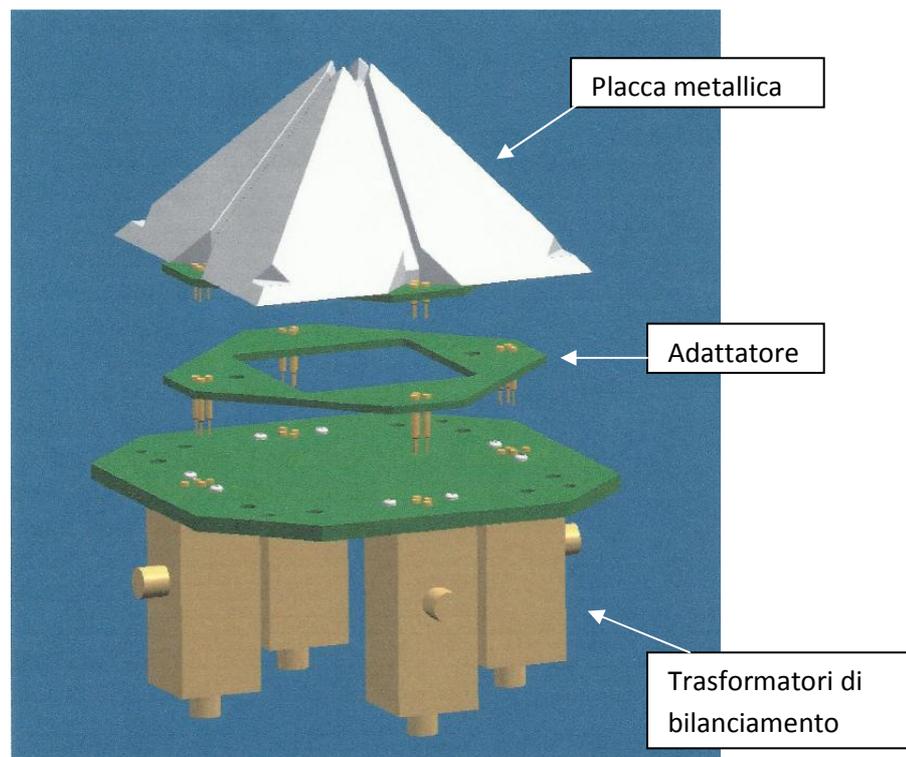


Figura 3.15 - Adattatore bilanciato per cavo composto da 4 coppie di conduttori

3.4.3 Misura del coefficiente di attenuazione

Si procede con la misura dell'attenuazione secondo la norma CEI. Per minimizzare il disadattamento, il collegamento del cavo ai trasformatori di bilanciamento deve essere ottimizzato e la schermatura del cavo deve essere collegata a massa da entrambi i lati. L'attenuazione deve essere misurata in

tutto il campo specificato di frequenza e agli stessi punti di frequenza della procedura di calibrazione; tutte le coppie del cavo in prova devono essere misurate [8].

Il sistema di misura è rappresentato in figura 3.16.

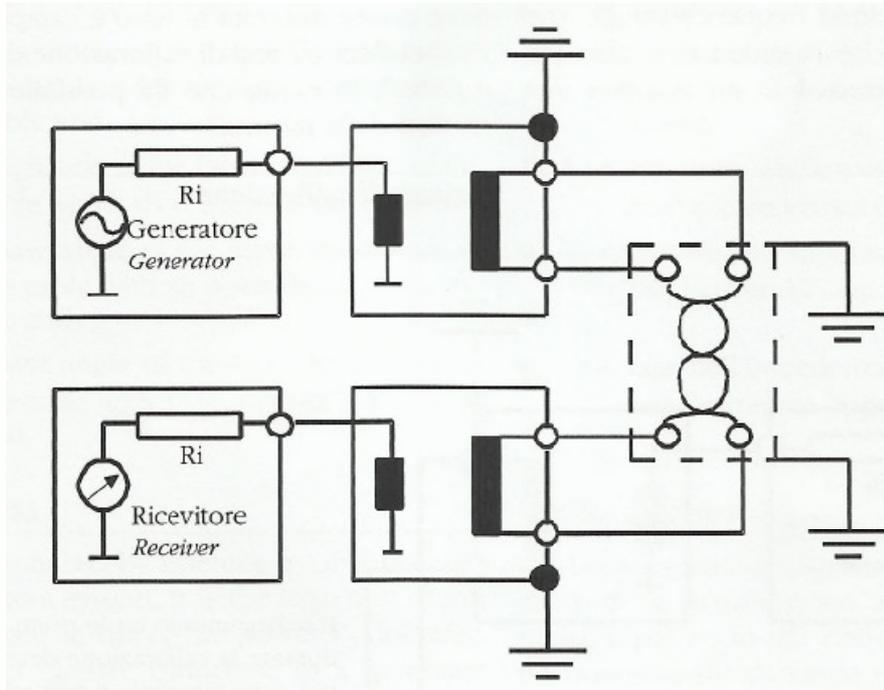


Figura 3.16 - Architettura sistema di misura

Si determina l'attenuazione come:

$$a_L(f) = |a_{meas}(f) - a_{cal}(f)| \cdot 100/L$$

Dove

a_L = attenuazione del cavo in prova dB/100m

a_{cal} = perdita di inserzione misurata con procedura di calibrazione

a_{meas} = perdita di inserzione misurata

L = lunghezza del cavo in metri

Il risultato ottenuto dalla misura su un cavo Belden9842 lungo 166m è riportato nel grafico in figura 3.17.

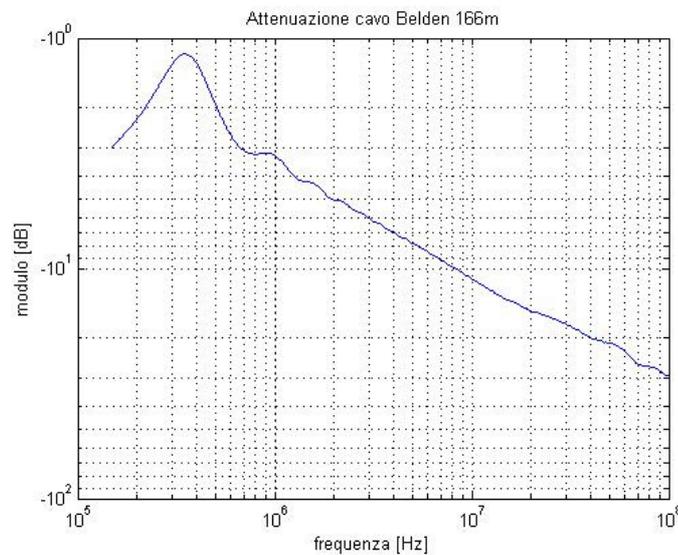


Figura 3.17 - Attenuazione misurata in funzione della frequenza

Dal grafico risulta evidente il fatto che l'attenuazione dell'onda varia in funzione della frequenza. Questo particolare non è stato tenuto in considerazione nel modello presentato in precedenza. La dipendenza dell'attenuazione dalla frequenza è causata dal fenomeno definito "effetto pelle", infatti, la corrente elettrica, che percorre un conduttore, ha la tendenza a distribuirsi in modo non uniforme, con densità maggiore sulla superficie esterna del cavo e densità minore all'interno del materiale. Questo comporta un aumento della resistenza elettrica del conduttore, soprattutto alle alte frequenze. Le frequenze, che interessano le prime armoniche del segnale che si vuole trasmettere e simulare, sono molto più basse di quelle riportate nel grafico; perciò si preferisce eseguire la misura dell'attenuazione tramite una strumentazione differente che permette di scendere in frequenza.

Tramite l'utilizzo di un generatore d'onda e un multimetro di precisione è possibile far correre sul cavo delle onde di tensione sinusoidali con ampiezza e frequenza prestabilita, misurando ai capi opposti del conduttore l'ampiezza della stessa onda. Il generatore d'onda utilizzato ha un'impedenza di uscita pari a 50Ω ; dato che il multimetro è ad alta impedenza è necessario utilizzare un connettore con adattamento di impedenza.



Figura 3.18 - Setup di misura dell'attenuazione a bassa frequenza

Attraverso il semplice rapporto fra la tensione misurata e quella generata si ricava il valore dell'attenuazione; si esegue la misura per frequenze diverse in un intervallo che copre alcune decine di kHz. Il risultato che si ottiene è un valore di attenuazione costante che corrisponde alle aspettative fondate sui dati riportati sul datasheet, per esempio per il cavo Belden vale $0,0197 \text{ dB/m}$. L'attenuazione misurata attraverso l'analizzatore di rete ritornerà comunque utile nella misura di sbilancio del cavo e per eventuali considerazioni sugli effetti dei disturbi ad alta frequenza.

Oltre l'attenuazione, come detto in precedenza, un altro parametro da considerare è il ritardo dovuto alla propagazione dell'onda. L'analizzatore di rete calcola la lunghezza del cavo proprio sulla base di questo parametro, perciò, una volta impostata la velocità di propagazione dell'onda rispetto alla velocità della luce, in questo caso 66%, lo strumento restituisce la lunghezza del cavo.

Dato che la lunghezza restituita dallo strumento corrisponde con la lunghezza reale del cavo, allora si può concludere che la velocità di propagazione riportata sul datasheet corrisponde con quella reale, quindi il modello di simulazione del cavo, basato sui dati riportati sul datasheet, è realistico.

3.4.4 Misura dell'attenuazione di sbilancio del cavo

L'attenuazione di sbilancio è il rapporto logaritmico tra la potenza di modo differenziale entrante in una coppia di conduttori e la potenza di modo comune che ne deriva. Questo indice è importante su una linea di trasmissione dati perché, nel momento in cui un disturbo di modo comune si trasforma in disturbo differenziale, può causare delle difficoltà nel riconoscimento dei bit da parte del nodo che sta leggendo il segnale differenziale.

Le variabili legate all'attenuazione di sbilancio del cavo sono due: la perdita di conversione longitudinale (LCL) e la perdita di trasferimento di conversione longitudinale (LCTL).

La perdita di conversione longitudinale è definita come il rapporto logaritmico tra il segnale di modo comune inviato ad un'estremità e il segnale differenziale risultante alla stessa estremità della coppia di conduttori.

Invece, la perdita di trasferimento di conversione longitudinale è definita come il rapporto logaritmico tra il segnale di modo comune inviato all'estremità vicina al generatore e il segnale differenziale risultante all'estremità lontana di una coppia di conduttori.

Anche in questo caso si seguono le norme CEI per eseguire la misura.

Nel caso in cui il cavo è schermato, lo schermo del campione in prova viene terminato a massa a entrambe le estremità insieme alle coppie che non vengono misurate. Se il cavo non è schermato allora deve essere avvolto su una bobina metallica collegata a terra [9].

L'attenuazione di sbilancio è calcolata all'estremità vicina mediante la seguente formula:

$$a_{u,vicino} = a_{misura}(f) - 10\log_{10} \left| \frac{Z_{sec}}{Z_{primario}} \right| + 10\log_{10} \left| \frac{Z_{sbilanciato}}{Z_0} \right|$$

Dove:

$a_{misura}(f)$ = rapporto di tensione misurato con la procedura di misura.

Z_{sec} = impedenza al lato secondario del trasformatore di bilanciamento.

$Z_{primario}$ = impedenza al lato primario del trasformatore di bilanciamento.

$Z_{sbilanciato}$ = impedenza di ingresso del circuito sbilanciato.

Z_0 = impedenza di ingresso al ricevitore.

Per quanto riguarda quella calcolata all'estremità lontana analogamente:

$$a_{u,lontano} = a_{misura}(f) - 10\log_{10} \left| \frac{Z_{sec}}{Z_{primario}} \right| + 10\log_{10} \left| \frac{Z_{sbilanciato}}{Z_0} \right|$$

Prima di poter ottenere l'attenuazione di sbilancio è perciò utile determinare l'impedenza di ingresso del campione in prova. Questa misura, secondo quanto scritto nella norma CEI, deve essere ricavata attraverso due prove: la prima

prevede di mettere in cortocircuito la coppia di conduttori all'estremità lontana e lasciare lo schermo in circuito aperto; la seconda prova prevede di mettere in corto circuito la coppia di conduttori con lo schermo all'estremità lontana [10]. Una volta eseguite queste due prove si ottiene l'impedenza di ingresso come:

$$Z_{in} = \sqrt{Z_{aperto} \cdot Z_{corto}}$$

L'impedenza misurata su un cavo Belden9842 risulta perciò avere l'andamento rappresentato in figura 3.19.

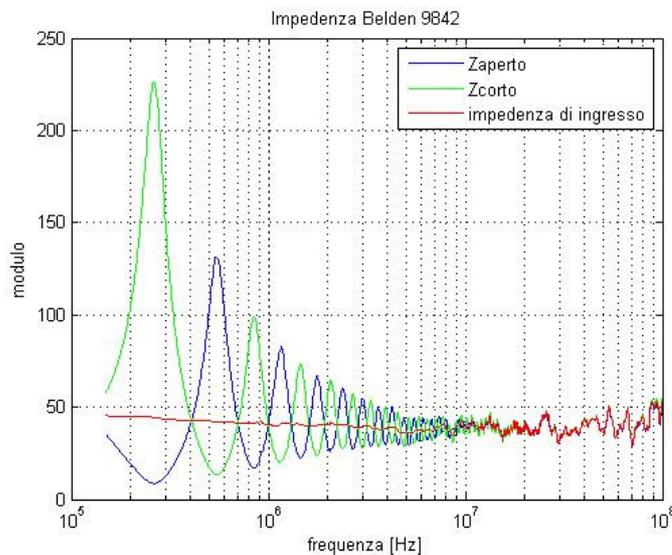


Figura 3.19 - Impedenza di ingresso calcolata

Si possono adesso ottenere la perdita di conversione longitudinale e la perdita di trasferimento di conversione longitudinale, rispettivamente attraverso le seguenti relazioni:

$$LCL = a_{u,vicino}(f)$$

$$LTCL = a_{u,lontano}(f) + a_{cavo}(f)$$

Rappresentate nei grafici in figura 3.20.

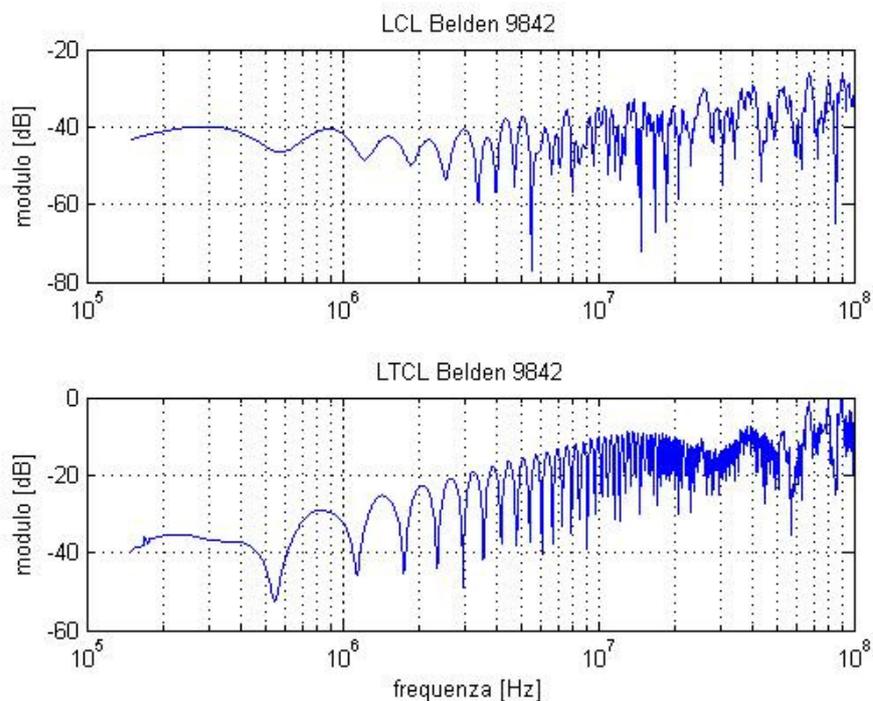


Figura 3.20 - Attenuazione di sbilancio

Si può notare che il disturbo di modo comune ad altissima frequenza, immesso da un estremità, quando raggiunge l'estremità opposta del cavo si trasforma quasi completamente in disturbo differenziale, il quale però è attenuato dalla lunghezza del cavo stesso.

Tutte le misurazioni eseguite sul Belden 9842 sono state eseguite anche sul cavo ethernet categoria 6; si riportano in tabella i risultati.

Caratteristiche nominali	Valore
Impedenza caratteristica	100 Ω
Capacità conduttore-conduttore	15,2 pF/ft
Velocità di propagazione	67%
Resistenza per unità di lunghezza	0,0932Ω/m

Parametro	Valore
α	$-9,32 \cdot 10^{-4} / m$
Attenuazione	$-8,1 \cdot 10^{-3} \text{ dB} / m$
G	$9,32 \cdot 10^{-6} / \Omega$
L	$4,99 \cdot 10^{-7} \text{ H}$

L'attenuazione e l'impedenza del cavo, ricavate su un campione lungo 87 metri, è rappresentata rispettivamente in figura 3.21 e 3.22.

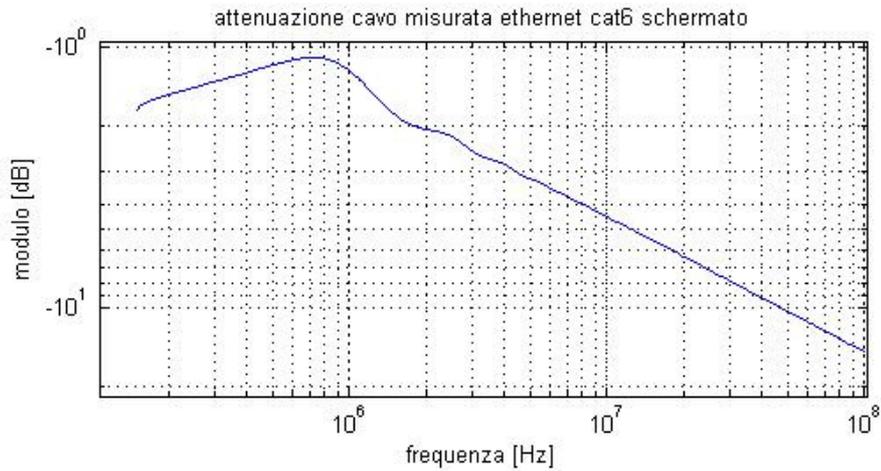


Figura 3.21 - Attenuazione misurata

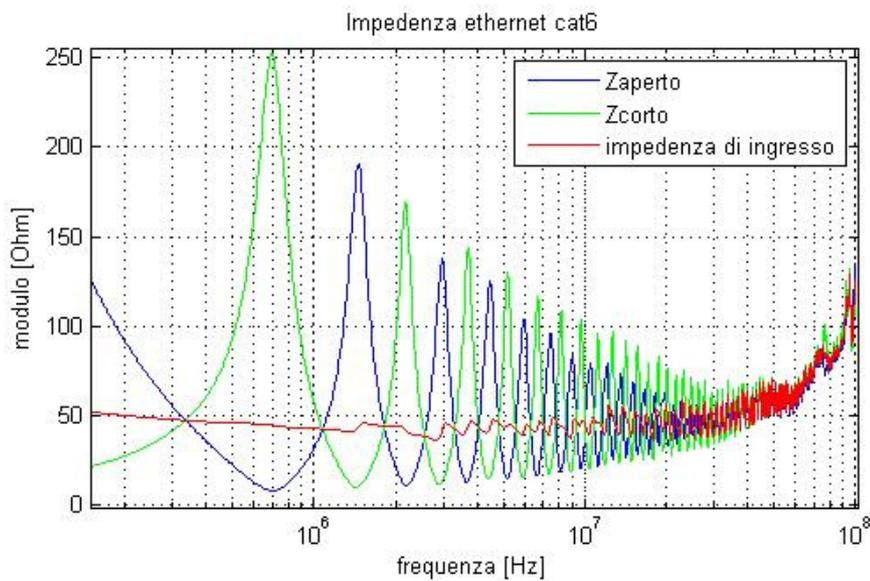


Figura 3.22 - Impedenza di ingresso calcolata

Dalle misure di attenuazione e impedenza si ricavano poi la perdita di conversione longitudinale e la perdita di trasferimento di conversione longitudinale (figura 3.23).

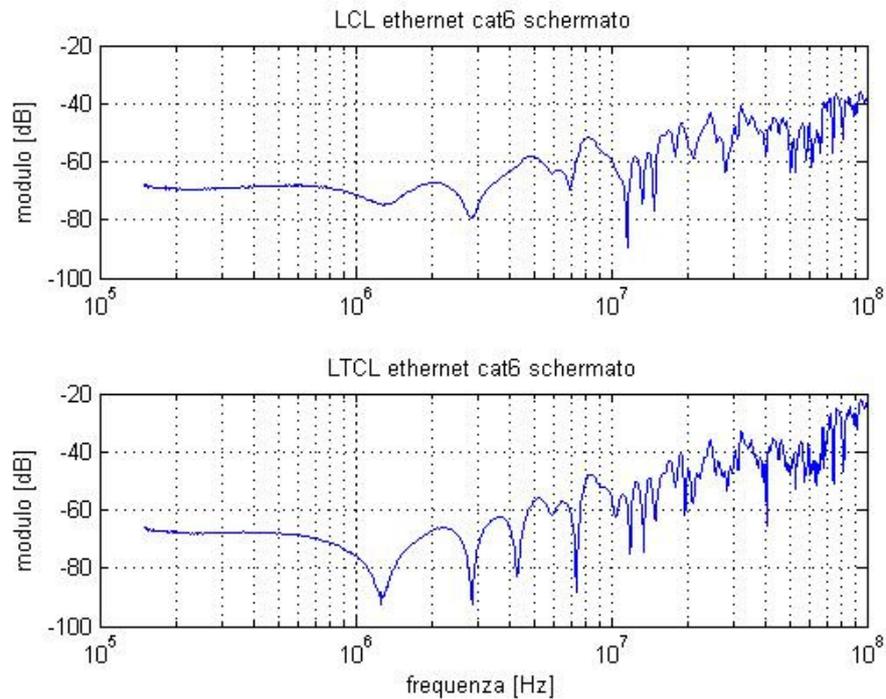


Figura 3.23 - Attenuazione di sbilancio

Si sono volute analizzare queste due tipologie di cavo perché sono quelli consigliati dall'azienda per questo tipo di sistemi. Dall'analisi dei grafici si evince che i cavi non dovrebbero causare problemi al sistema, in quanto le perdite di conversione hanno un modulo sufficientemente basso per garantire che il cavo non sia la causa di un'eventuale distorsione del segnale dovuta ai disturbi di modo comune.

Sul campo ci si aspetta delle prestazioni migliori da parte del cavo Belden grazie alla sua doppia schermatura per la protezione del segnale dai disturbi.

3.5 Validazione del modello dei dispositivi modbus

La validazione del modello di un dispositivo rappresenta il secondo passo del processo di validazione. Per questa operazione si sceglie di mettere in comunicazione un dispositivo emittente e uno o più dispositivi riceventi; si utilizza un cavo di comunicazione sufficientemente corto da poter essere

trascurato nella simulazione, in modo tale che non possa influenzare significativamente la forma d'onda del segnale.

Si analizza un sistema costituito da un gateway, che rappresenta il nodo master della comunicazione, e diversi dispositivi M7TIC (moduli I/O e moduli con uscite programmabili).

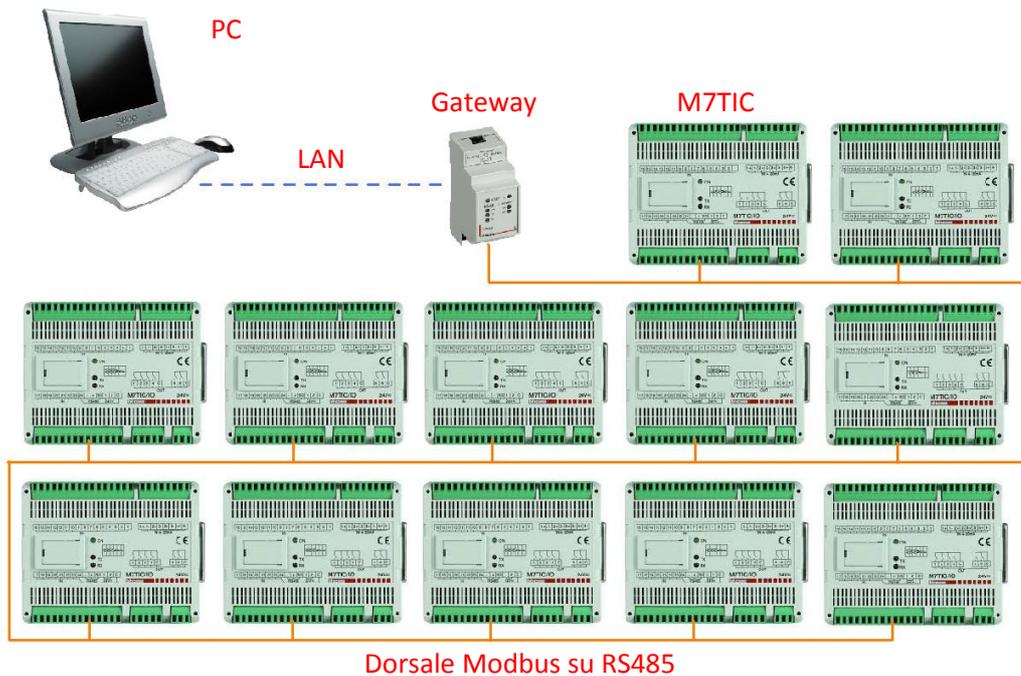


Figura 3.24 - Sistema di comunicazione completo

Il numero di dispositivi connessi alla linea di trasmissione è una variabile del modello di simulazione. Per poter validare correttamente il modello, è necessario che il sistema reale sia flessibile ed in particolare si richiede che ogni dispositivo si possa agevolmente includere o escludere dalla comunicazione modbus. Perché questo sia possibile si è realizzata una scheda di comando composta da una basetta millefori, da alcuni DIP switch e da connettori a morsetto.

Ogni dispositivo può essere incluso o escluso dalla comunicazione modificando lo stato di 3 interruttori: uno connesso a $RX/TX+$, uno a $RX/TX-$ e uno a terra. Per una prima valutazione si leggono i segnali assoluti che viaggiano sulle due linee utilizzando un oscilloscopio e due sonde di tensione riferite a terra. Successivamente si utilizza una sonda differenziale tra $RX/TX+$ e $RX/TX-$, in questo modo è possibile valutare la forma d'onda che realmente viene

interpretata dai dispositivi modbus. Nella figura 3.25 è possibile osservare il setup di misura nel caso di un solo dispositivo connesso.

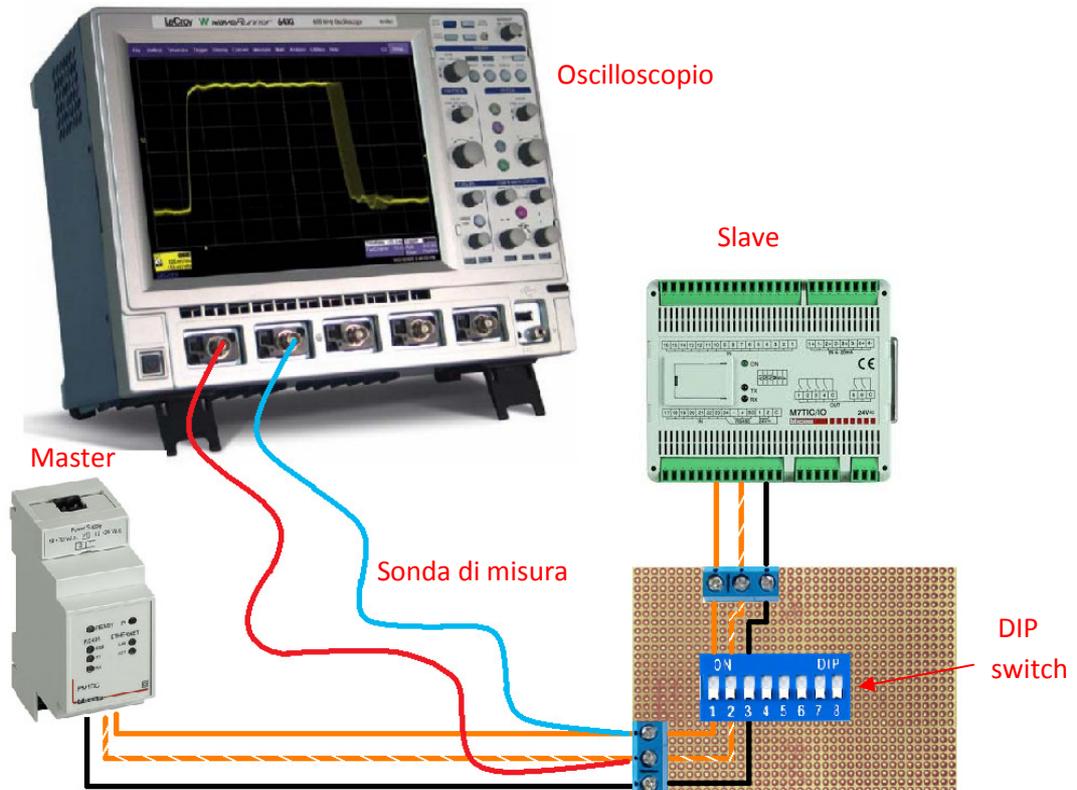


Figura 3.25 - Setup di misura delle tensioni

I grafici riportano l'andamento del segnale misurato sui singoli canali con delle sonde riferite a terra (figura 3.2).

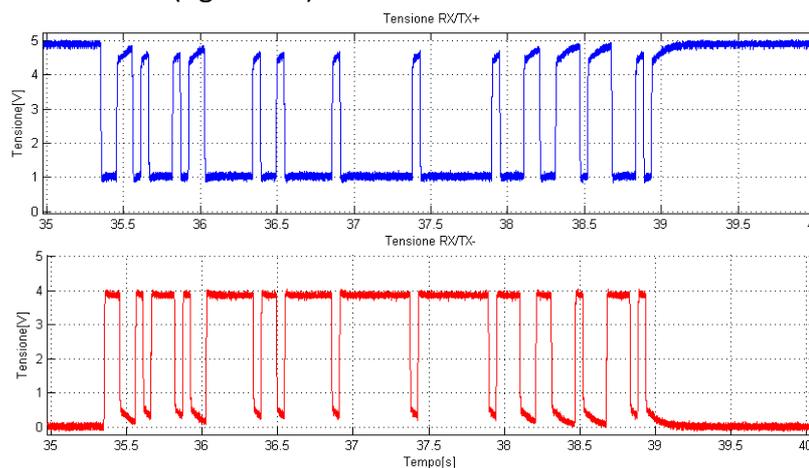


Figura 3.26 - Andamento nel tempo delle tensioni misurate

A differenza di quanto previsto, il segnale che viaggia sul conduttore RX/TX+ va da 1 a 5 V, invece il segnale che viaggia sul conduttore RX/TX- va da 0 a 4 V. Ciò comporta che il segnale differenziale avrà un valore alto pari a 5 V e un valore basso pari a -3 V. Questo fenomeno può essere dovuto al fatto che il comportamento di alcuni componenti elettronici, utili a commutare il segnale da alto a basso, si allontana dalla caratteristica ideale di funzionamento.

Il modello di simulazione del segnale differenziale è perciò composto da un generatore di onda quadra con ampiezza pari a 8 V, dai dispositivi modbus presentati nel paragrafo 3.3, dalle terminazioni della linea e dalle resistenze di pull-up e pull-down, che in un modello differenziale possono essere viste come un'unica resistenza.

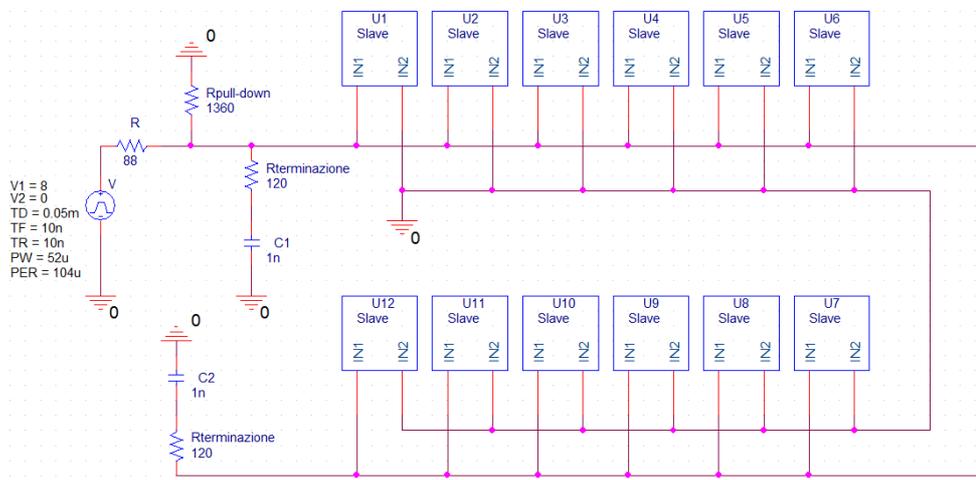


Figura 3.27 - Modello di simulazione della tensione di modo differenziale

Si vuole concentrare particolare interesse nell'andamento della tensione durante il transitorio da valore alto a valore basso. Perciò si decide di interrogare il dispositivo numero $128_{(dec)} = 10000000_{(bin)}$, in modo tale che il bit di start è seguito da un numero di zeri sufficiente a portare a termine il transitorio di assestamento della tensione. Il risultato della simulazione viene poi sovrapposto alla curva misurata sperimentalmente sul sistema reale adattando i valori assoluti delle tensioni (in figura 3.28 è riportato per esempio il caso in cui ci sono collegati alla linea 10 dispositivi).

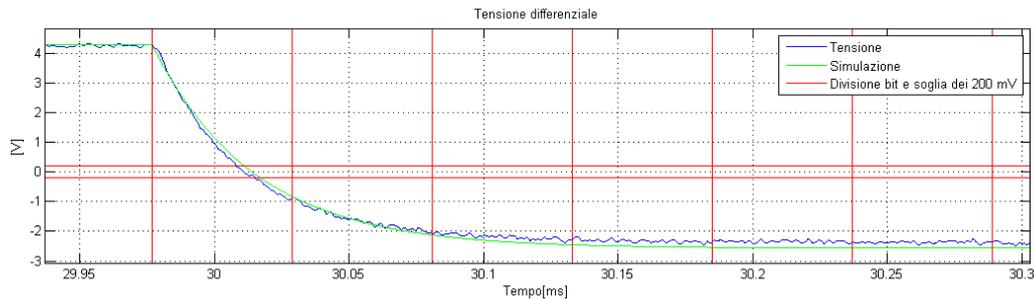


Figura 3.28 - Confronto fra gli andamenti della tensione reale e simulata

Dopo aver eseguito più prove è possibile concludere che, al variare del numero di dispositivi collegati alla linea di trasmissione, il modello di simulazione restituisce una buona approssimazione dell'andamento delle tensioni.

3.6 Validazione del modello complessivo

L'ultimo passo della validazione prevede di mettere insieme tutte le parti che costituiscono il sistema.

In figura 3.29 è possibile osservare:

- i due generatori di tensione, uno per l'onda che viaggia su RX/TX+ e uno per quella su RX/TX-;
- le resistenze di pull-up e di pull-down;
- la coppia di resistenze e condensatori di terminazione della linea;
- i due modelli di linea che agiscono sui segnali che viaggiano sui singoli canali;
- i dispositivi collegati alla linea di trasmissione e alla loro alimentazione.

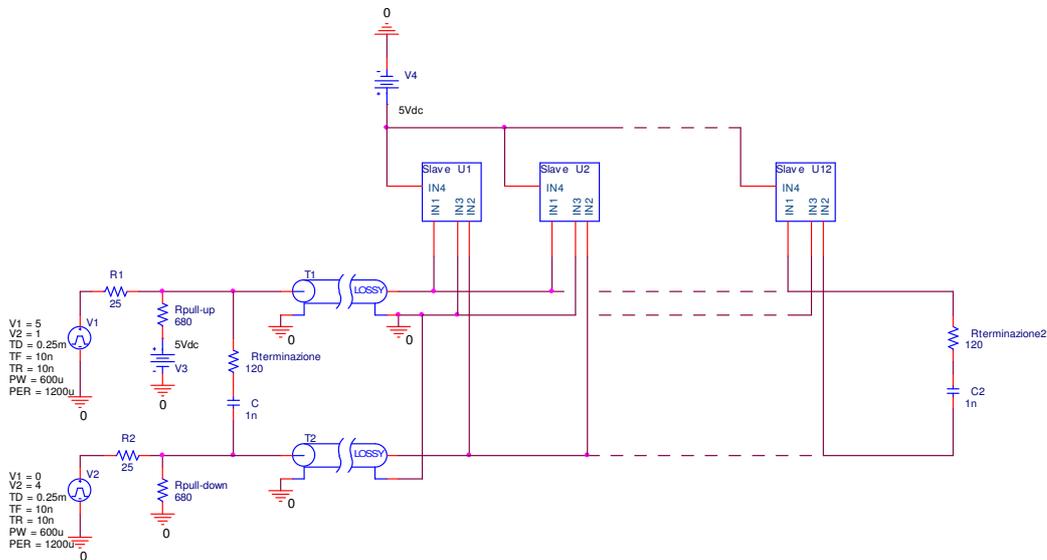


Figura 3.29 - Modello di simulazione completo

Anche in questo caso si interroga il dispositivo numero 128 e si sovrappone la linea di simulazione alla misura sul sistema reale. Si valuta la stima ottenuta con il simulatore sulla base di diverse prove eseguite con lunghezze dei cavi differenti e il numero di dispositivi variabile. Il seguente grafico (figura 3.30) rappresenta il confronto fra la tensione differenziale ottenuta in simulazione e quella misurata sul sistema reale, composto da 225 metri di cavo e 4 dispositivi modbus.

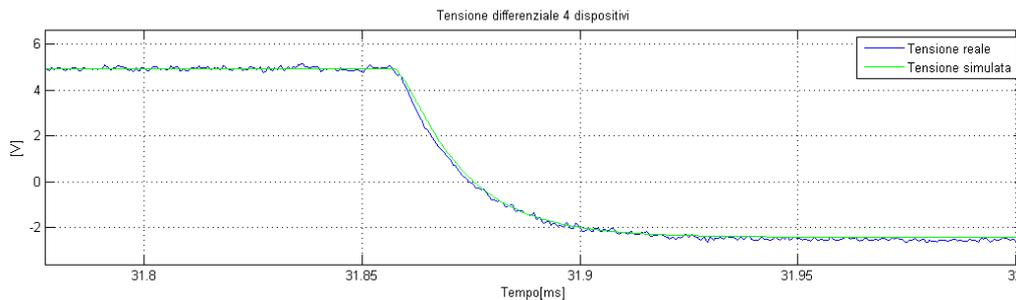


Figura 3.30 - Confronto fra gli andamenti della tensione reale e simulata

Si conclude perciò con esito positivo la validazione del modello.

4 Analisi di funzionamento del sistema

Il modello di simulazione, costruito seguendo i passi descritti fino a questo punto, è uno strumento affidabile che permette di valutare la variazione della forma d'onda, dell'informazione che transita sulla linea, in funzione dei vari parametri che caratterizzano il sistema. Grazie a questo strumento si è resa efficiente l'analisi di funzionamento del sistema, che ha portato ad individuare la causa della limitazione delle prestazioni e le possibili soluzioni al problema.

In questo capitolo viene presentato il metodo di interpretazione dei byte da parte del ricevitore e i problemi causati dalla deformazione dell'onda di tensione. Si passa poi alla ricerca delle caratteristiche che influenzano la forma d'onda del segnale e quindi il funzionamento del sistema, raggiungendo l'inaspettata conclusione che il valore dei byte che transitano sulla linea è una variabile che non può essere trascurata.

Per approfondire l'analisi si è reso necessario lo sviluppo di un software di stima delle tensioni e un emulatore hardware, che potranno anche essere utili in azienda per sviluppi futuri e per agevolare la praticità delle prove di compatibilità elettromagnetica.

Come ultimo vengono proposte delle possibili modifiche hardware, utili ad incrementare le prestazioni del sistema di comunicazione.

4.1 La forma d'onda dell'informazione

L'interfaccia RS-485 utilizza un protocollo seriale asincrono. Il termine seriale specifica che i bit che costituiscono l'informazione sono trasmessi sequenzialmente, ossia uno alla volta. Questo tipo di trasmissione è in genere contrapposta alla trasmissione parallela, nella quale i dati viaggiano contemporaneamente su più conduttori. Tuttavia, la trasmissione di tipo seriale è molto diffusa in ambito industriale perché è più tollerante rispetto alle interferenze e agli errori di trasmissione, richiede un minor numero di fili, con

conseguente riduzione dei costi, e non presenta le difficoltà di gestione del disallineamento temporale dei segnali che viaggiano sui diversi conduttori.

Il termine asincrono specifica invece che i dati sono trasmessi senza l'aggiunta di un segnale di clock, cioè senza alcun segnale comune tra trasmettitore e ricevitore destinato a sincronizzare il flusso di informazioni; ovviamente sia il trasmettitore che il ricevitore devono comunque essere dotati di un proprio clock locale per poter interpretare correttamente i dati.

Il metodo più semplice per descrivere un segnale RS485 è partire con un esempio. Si considera il caso della trasmissione di un byte così composto:

00010110

In una trasmissione seriale il bit LSB (Least Significant Bit) è il primo ad essere trasmesso mentre il MSB (Most Significant Bit) viene trasmesso per ultimo. Il byte è preceduto dal bit di start e seguito dal bit di stop. Nella seguente immagine sono rappresentati i segnali che transitano sui conduttori RX/TX+ e RX/TX-.



Figura 4.1 - Tensioni ideali sui singoli conduttori

Le linee di trasmissione si trovano inizialmente in uno stato di riposo (assenza di dati in transito). La prima transizione indica l'inizio della comunicazione e perciò, nel caso di una velocità di comunicazione pari a 19.2 Kbps, il

riconoscimento di un bit ogni $52 \mu s$. Trasmettitore e ricevitore si devono accordare a priori sulla velocità di trasmissione: questa operazione si esegue configurando in modo opportuno gli apparecchi.

Eseguendo la lettura differenziale sulle due linee si ricava un segnale la cui variazione di ampiezza è doppia rispetto ai singoli segnali (figura 4.2).

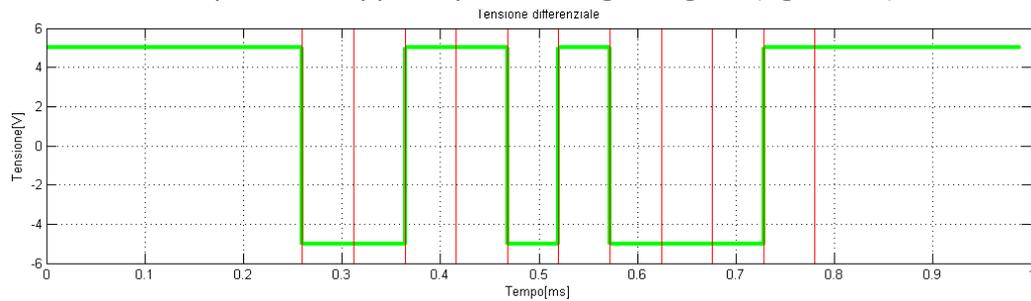


Figura 4.2 - Tensione differenziale ideale

Nei precedenti grafici si è rappresentato in verde l'andamento ideale del segnale; nella realtà la forma d'onda è molto arrotondata e presenta dei valori di regime differenti. Il bit di start è l'unico elemento di sincronizzazione tra emettitore e ricevitore perciò la deformazione del fronte di questo bit causa un ritardo di sincronizzazione del ricevitore; quest'ultimo riconosce il bit soltanto dopo che la tensione differenziale ha attraversato la soglia dei $-200 mV$. È possibile osservare questo fenomeno nei seguenti grafici.

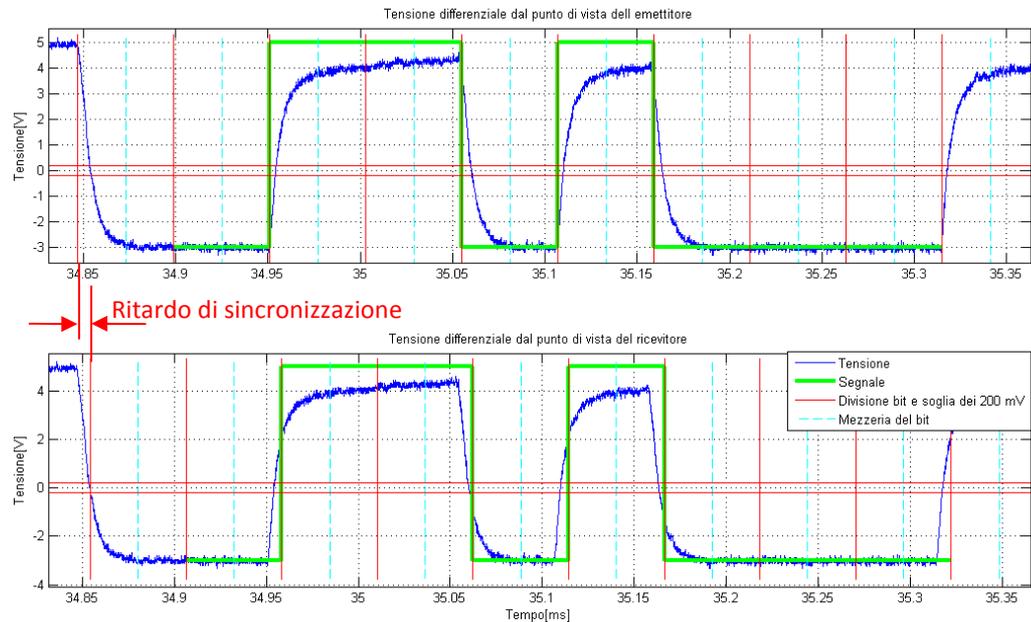


Figura 4.3 - Ritardo del conteggio da parte del ricevitore

Nei due grafici è rappresentata in blu la forma d'onda della tensione differenziale generata dall'emettitore, un'onda quadra deformata a causa del carico presente sulla linea. Le linee rosse verticali indicano la suddivisione dei bit interpretata rispettivamente da emettitore e ricevitore. Si nota che il ricevitore inizia il conteggio dei bit solo dopo aver rilevato un valore di tensione differenziale inferiore ai -200 mV .

In questo caso il ritardo di sincronizzazione del ricevitore non causa errori di lettura del segnale. Come linea guida occorre considerare che il campionamento in ricezione è effettuato di norma al centro di ciascun bit, l'errore massimo ammesso è quindi pari alla durata di mezzo bit. Nel caso in cui il ritardo di sincronizzazione è superiore, il ricevitore ottiene una lettura falsata del byte.

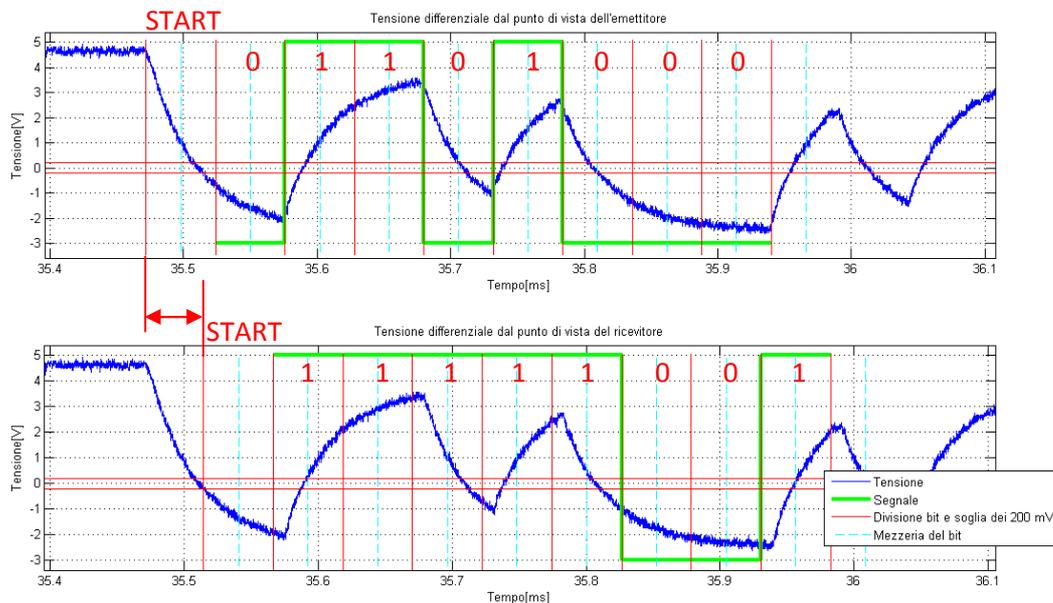


Figura 4.4 - Errore di interpretazione del messaggio

Collegando al bus 11 dispositivi si rileva un errore di comunicazione, in particolare il byte con valore $16_{(hex)}$ viene interpretato dal ricevitore come $9F_{(hex)}$. Analizzando il segnale è possibile identificare i bit interpretati in modo scorretto. Il grafico (figura 4.4) mostra che il byte trasmesso come $00010110_{(bin)} = 16_{(hex)}$ viene interpretato dal ricevitore come $10011111_{(bin)} = 9F_{(hex)}$ a causa dell'eccessivo ritardo di sincronizzazione.

In questo caso i bit che vengono interpretati male sono il primo, il quarto e l'ottavo, bit che invece di avere valore basso vengono interpretati come alti. Non è una casualità il fatto che i bit errati hanno tutti valore basso, infatti, la soglia dei $\pm 200\text{ mV}$ è decentrata rispetto al salto della tensione differenziale; questo causa una diversificazione dei tempi necessari per la transizione da valore alto a valore basso rispetto alla transizione inversa, perciò i bit con valore basso portano la tensione differenziale al di sotto della soglia dei -200 mV per un intervallo di tempo più breve.

Si giunge così alla deduzione che la difficoltà di interpretazione del bit, da parte del ricevitore, aumenta nel momento in cui l'intervallo di tempo tra gli attraversamenti della soglia si riduce. Questo intervallo di tempo è minimo nel momento in cui si presenta un bit di valore zero preceduto da diversi bit di valore uno e seguito da un bit di valore uno. I primi bit permettono che la tensione differenziale si alzi, allontanandosi dalla soglia e allungando i tempi di transizione; il successivo bit permette che la tensione salga nuovamente al di sopra della soglia nel più breve tempo possibile.

Questa situazione si realizza nel caso della trasmissione di un byte come quello rappresentato in figura 4.5.

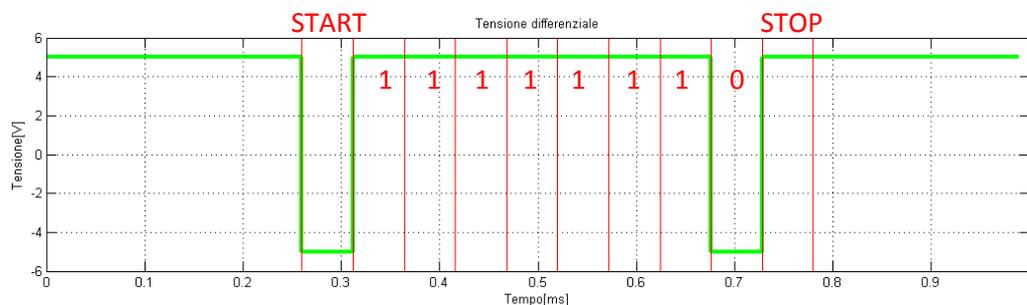


Figura 4.5 - Tensione differenziale relativa al byte 127

Impostando l'indirizzo del dispositivo ricevitore pari a $01111111_{(bin)} = 7F_{(hex)} = 127_{(dec)}$ si dimostra che il funzionamento della trasmissione dipende anche dal valore dei singoli byte trasmessi. Nel caso in cui si collegano alla linea di trasmissione dieci dispositivi, si ottiene che l'interrogazione del dispositivo numero 5 va a buon fine, invece, l'interrogazione del dispositivo identificato con il numero 127 non viene interpretata correttamente.

Si analizzano di seguito le forme d'onda in gioco, in particolare il caso in cui si interroga il dispositivo numero $00000101_{(bin)} = 5_{(dec)}$.

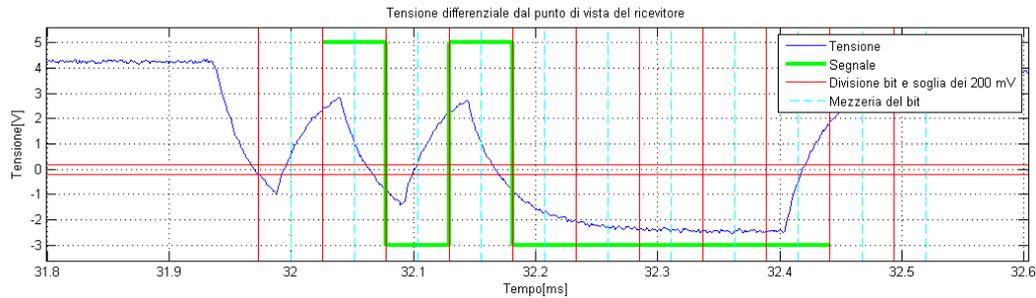


Figura 4.6 - Interpretazione del byte 5

E il caso in cui si interroga il dispositivo numero $01111111_{(bin)} = 127_{(dec)}$.

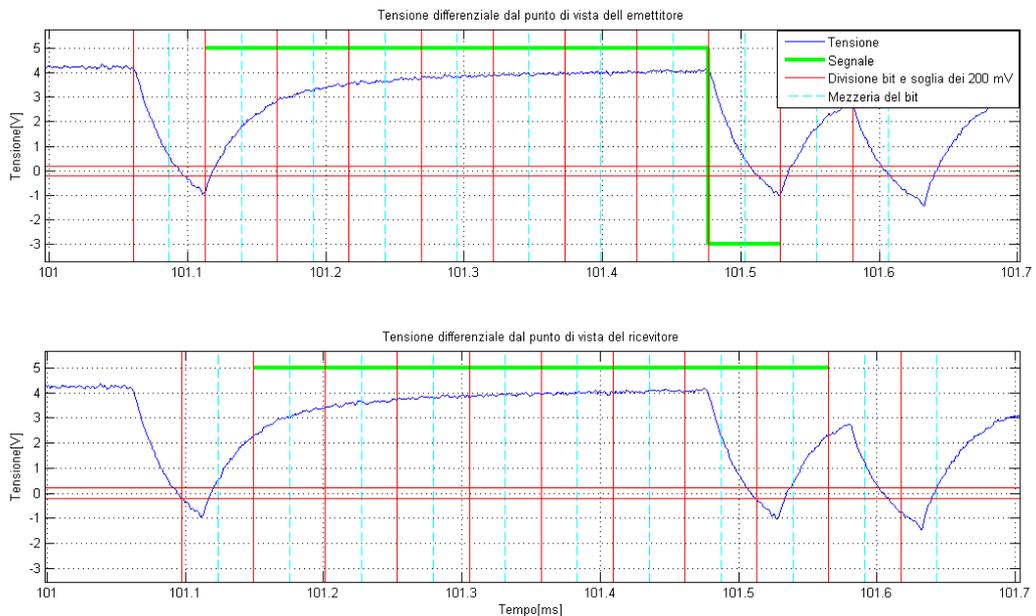


Figura 4.7 - Interpretazione del byte 127

Si dimostra perciò che non è possibile giudicare il funzionamento della linea di trasmissione sulla base di un test nel quale vengono trasmessi byte casuali, ma è necessario basare il test su una richiesta con indirizzo pari a 127. Questo indirizzo identifica il caso pessimo; è sufficiente dimostrare il successo della trasmissione di una richiesta con indirizzo pari a 127 per avere la certezza che, mantenendo invariate tutte le condizioni in cui si trova il sistema, qualsiasi altra trasmissione vada a buon fine.

4.2 Verifica del caso pessimo

Si è determinato che il byte con valore pari a 127 rappresenta il caso pessimo. Si vuole adesso verificare questa affermazione e individuare eventuali altri byte che mettono in difficoltà la comunicazione in modo rilevante.

Utilizzando Matlab si realizza un software che determina l'andamento delle tensioni di un intero byte. Per lo sviluppo del software si fa riferimento ad un modello a parametri concentrati del sistema, perciò questo software si considera affidabile per segnali con velocità di trasmissione massima pari a $38,4Kbps$. Nel caso in cui la velocità di comunicazione è superiore entrano in gioco delle frequenze più elevate, con lunghezze d'onda più corte che necessitano l'utilizzo del modello a parametri distribuiti descritto nel terzo capitolo.

Analizzando la trasformata in frequenza di un'onda quadra, con periodo di $19,2kHz$, che può essere rappresentativa di una trasmissione a $38,4Kbps$, si osserva che le prime sei armoniche dispari soddisfano il requisito di lunghezza d'onda maggiore o comunque comparabile alla lunghezza della linea.

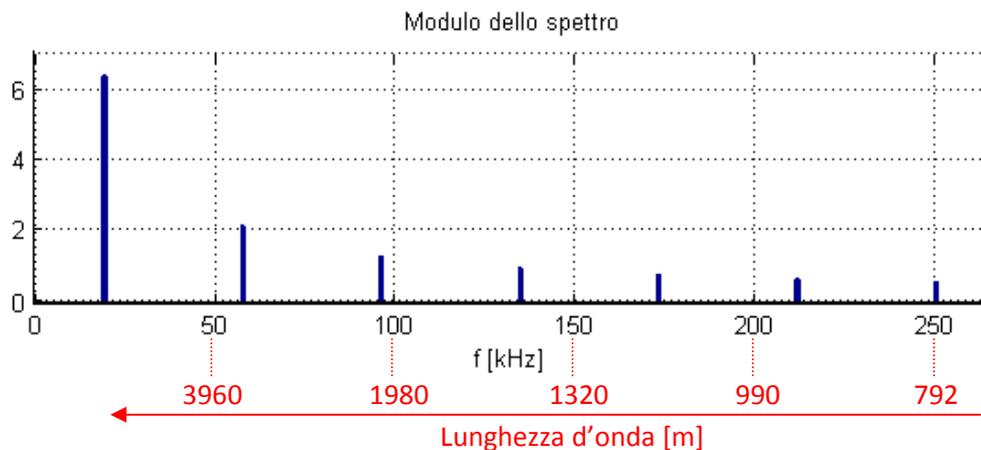


Figura 4.8 - Analisi in frequenza di un'onda quadra

Segnali con velocità di trasmissione maggiore di $38,4Kbps$ presentano un contributo delle armoniche a frequenza più alta che non può essere trascurato e quindi non permette l'utilizzo di un modello a parametri concentrati.

Per la dimostrazione, alla quale si vuole andare in contro, è sufficiente ottenere una buona stima della tensione a basse velocità di comunicazione, perciò si rivela valido l'utilizzo del software.

All'avvio del software si apre una finestra che richiede all'utente il numero di dispositivi connessi alla linea, la lunghezza del cavo, la velocità di comunicazione e l'ampiezza dell'incertezza di stima che si può accettare.

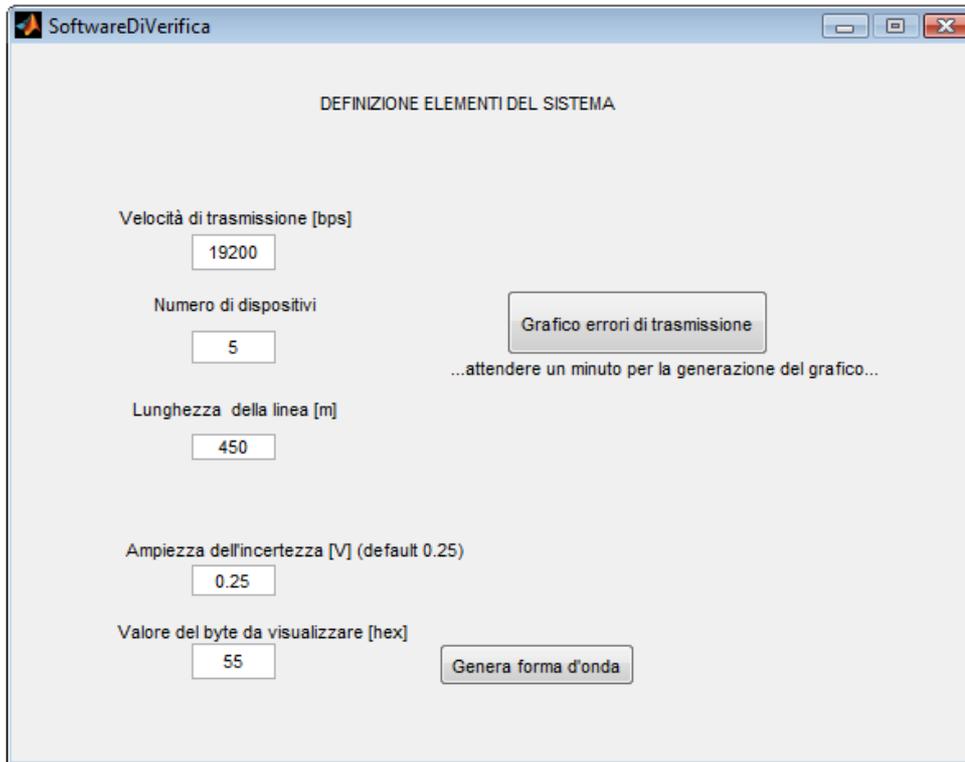


Figura 4.9 - Interfaccia utente del software

Attraverso la funzione di generazione della forma d'onda viene rappresentato l'andamento della tensione differenziale relativa al byte di valore impostato dall'utente. L'andamento di questa tensione differenziale è stimato con buona approssimazione nel caso in cui l'ampiezza dell'incertezza viene impostata a 0,25V.

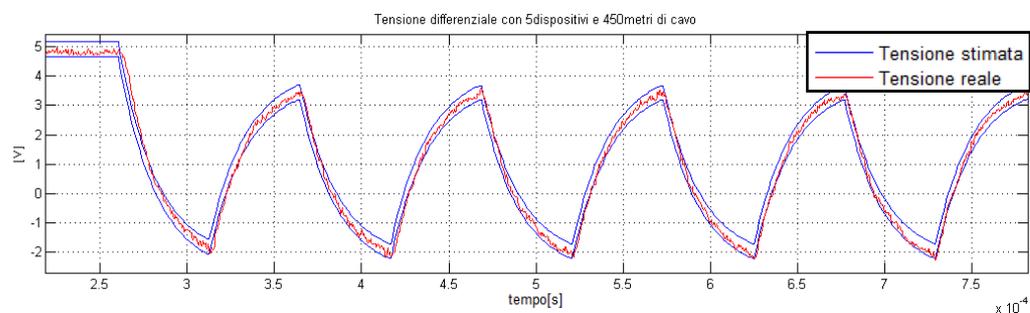


Figura 4.10 - Andamento della tensione reale in confronto alla tensione stimata

Una seconda funzione utile del software è quella di simulare l'inoltro di tutti i byte possibili, quindi con valore che in base decimale va da 0 a 255, e valutare per ogni byte quanti sarebbero i bit che vengono letti dal ricevitore in modo errato. Per ogni errore di lettura si riporta in un secondo grafico l'ampiezza del salto di tensione che lo ha causato, ossia la differenza tra la tensione stimata e la soglia dei $200mV$.

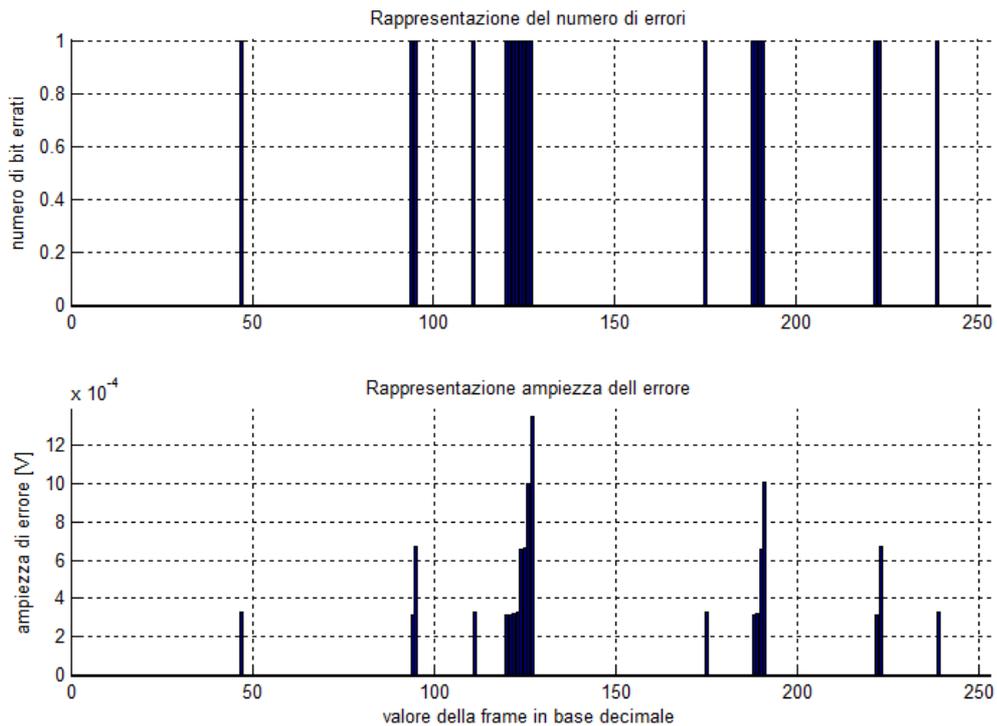


Figura 4.11 - Grafico dei bit errati nella trasmissione dei singoli byte

Esaminando una situazione prossima al limite di funzionamento del sistema si può comprendere quali sono i primi byte che vengono letti in modo non corretto. Dal grafico si nota inoltre che il byte con valore 127 ha un margine di errore più alto rispetto agli altri byte; questo dimostra che un frame che contiene un byte con valore decimale pari a 127 è il frame che mette in difficoltà il ricevitore più degli altri, perciò può essere preso in considerazione durante il testing per giudicare il funzionamento del sistema.

4.3 Il segnale e la lunghezza della linea

E' necessario analizzare come la lunghezza del cavo influenza il funzionamento del sistema. Nel paragrafo 3.4 si è parlato dei due effetti principali ai quali è sottoposto il segnale che attraversa il cavo: ritardo e attenuazione.

Il ritardo non gioca un ruolo importante nel determinare il funzionamento del sistema; il fatto che il messaggio viene identificato o meno dal ricevitore non dipende dal momento in cui è arrivato. E' certamente importante configurare correttamente i dispositivi prima di metterli in comunicazione, in modo tale che il "response timeout", ossia il tempo che i nodi slave hanno a disposizione per rispondere alle richieste del nodo master, sia superiore alla somma dei tempi necessari a ricevere il messaggio, elaborare una risposta e inviarla. Sulla base di questi tempi sono stati dimensionati i "response timeout" riportati in tabella.

Velocità di comunicazione	Response timeout
2400 <i>bps</i>	1 s
4800 <i>bps</i>	0,5 s
9600 <i>bps</i>	0,3 s
19200 <i>bps</i>	0,2 s
38400 <i>bps</i>	0,15 s
57600 <i>bps</i>	0,1 s

Per quanto riguarda l'attenuazione, essa incide sulla comunicazione in modo più evidente, infatti l'attenuazione dell'onda quadra che viaggia sulla linea, determina una riduzione del salto di tensione con la conseguenza dell'aumento dei tempi di attraversamento della soglia dei 200mV. Nel grafico si rappresenta la variazione di transitorio del segnale differenziale in base alla lunghezza del cavo (figura 4.12).

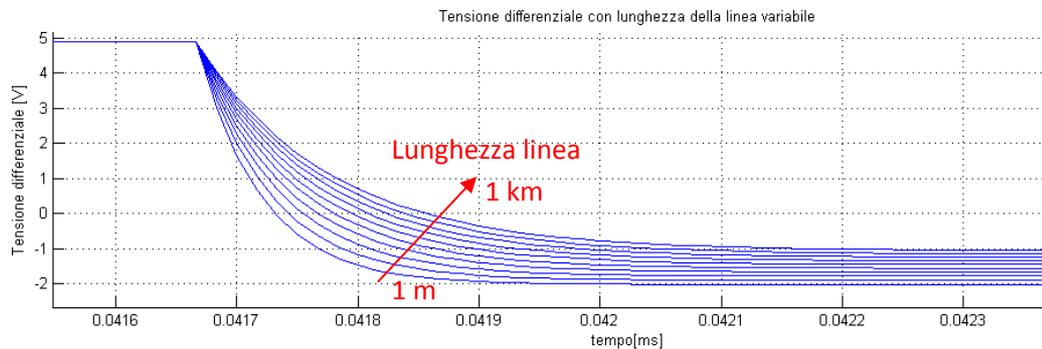


Figura 4.12 - Tensione differenziale al variare della lunghezza del cavo

Si può notare che l'attenuazione incide solo sul valore di tensione basso. Questo è dovuto al fatto che nella fase in cui viene emesso un segnale alto si ha una tensione pari a 5V su RX/TX+ e di 0V su RX/TX-, queste tensioni sono stabili a causa della presenza delle resistenze all'interno dei dispositivi che svolgono una funzione di pull-up e pull-down (figura 4.13).

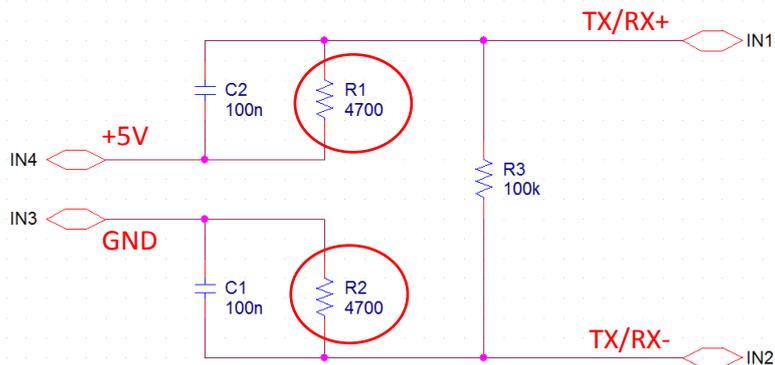


Figura 4.13 - Schema elettrico di simulazione del nodo slave

Diversamente, quando si trasmette un segnale con valore basso, il cavo gioca un duplice ruolo nella deformazione del segnale: l'attenuazione causa l'innalzamento del valore di regime della tensione, mentre l'aumento della resistenza del cavo, dovuto alla sua lunghezza, incide sulla costante di tempo che caratterizza il transitorio.

4.4 Emulatore hardware

Per analizzare il funzionamento del sistema, nel caso in cui viene collegato alla linea un numero di dispositivi più elevato rispetto a quelli che si hanno a disposizione, è necessario costruire un emulatore hardware. Lo scopo dell'emulatore è quello di simulare la circuiteria elettronica presente all'interno di un dispositivo, in modo da rappresentare per la linea un carico equivalente a quello di un nodo slave.

Si realizza lo schema elettrico utilizzato nel modello di simulazione su una basetta millefori, attraverso delle resistenze, dei condensatori e degli interruttori dip-switch. Si ottiene un emulatore hardware di un numero di dispositivi variabile, da 1 a 32, in base allo stato degli interruttori.

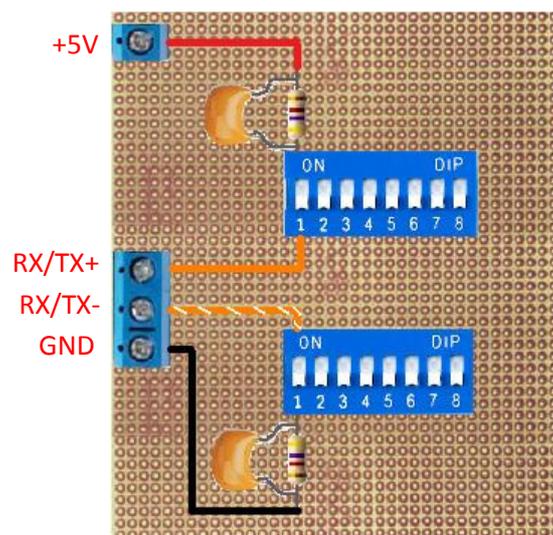


Figura 4.14 - Schema elettrico emulatore di un dispositivo slave

Una volta saldati tutti i componenti sulla basetta si passa al confronto fra le forme d'onda del segnale misurate nel caso di un carico reale, e quelle misurate nel caso di un carico emulato. Per esempio si riporta il caso di 9 dispositivi connessi (figura 4.15).

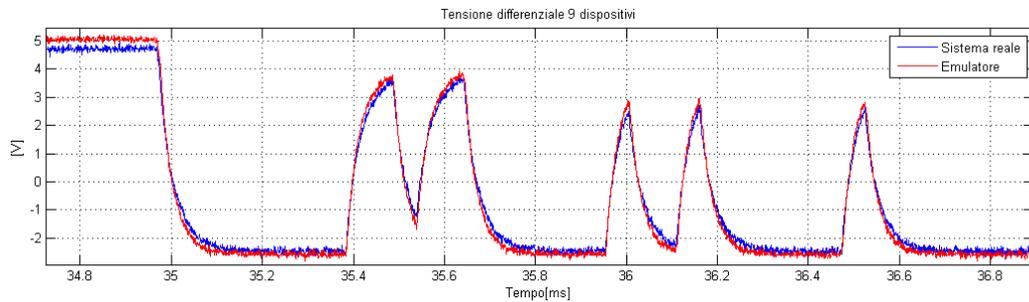


Figura 4.15 - Confronto tensioni fra dispositivi reali ed emulatore

Si può concludere che utilizzando l'emulatore hardware si ottiene un sistema che rappresenta una buona approssimazione del sistema reale.

L'aumento del numero di dispositivi connessi alla linea causa l'incremento delle costanti di tempo in gioco e il possibile malfunzionamento del sistema. Una delle soluzioni per questo problema può essere la riduzione della velocità di comunicazione: l'aumento della durata dei singoli bit permette infatti alla tensione il completamento del transitorio.

Nel seguente grafico sono riportati i limiti del numero di dispositivi che possono essere connessi alla linea in base alla sua lunghezza e alla velocità di comunicazione.

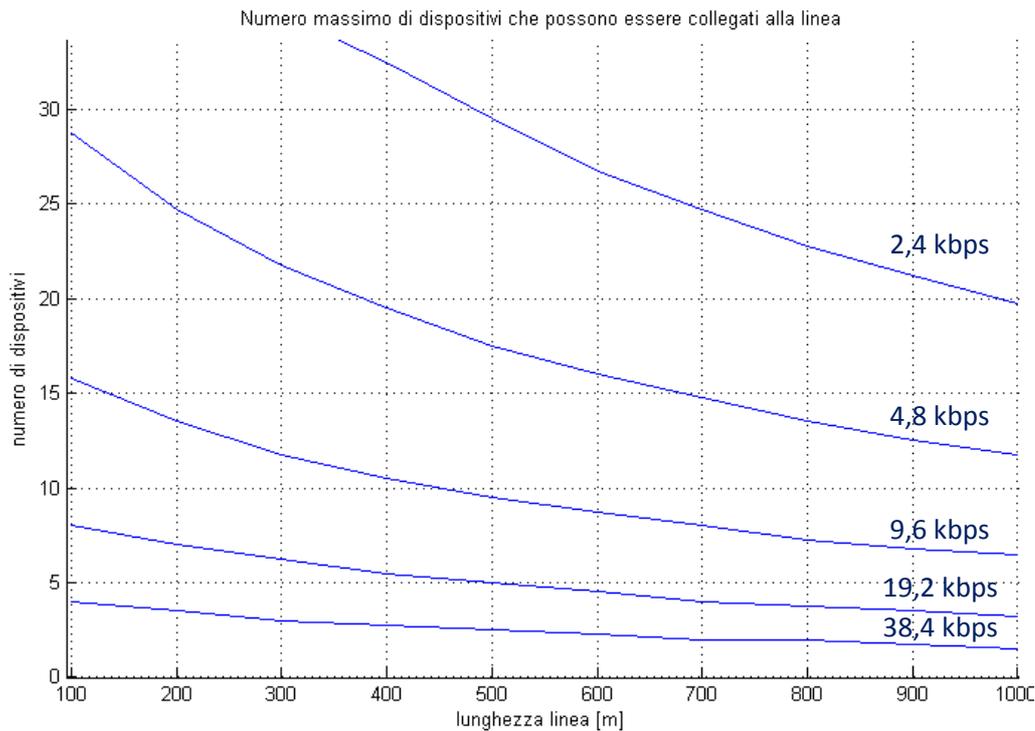


Figura 4.16 - Limiti di funzionamento del sistema in relazione alla velocità di comunicazione

4.5 Modifiche hardware per l'incremento delle prestazioni

L'approfondita analisi di funzionamento del sistema porta a concludere che la limitazione delle prestazioni è dovuta principalmente alla deformazione del fronte d'onda del segnale. Questa deformazione, che trasforma l'onda quadra in una successione di esponenziali, determina un ritardo di attraversamento della soglia di riconoscimento del bit tale da causare errori. Analizzando l'hardware di cui è composto il sistema si può dedurre che la causa di questo problema sono le capacità presenti nei dispositivi sul lato dell'interfaccia modbus.

Attraverso il modello di simulazione e il software di stima della tensione differenziale si può analizzare come cambierebbe la forma del segnale nel caso in cui venisse ridotta la dimensione delle capacità (figura 4.17).

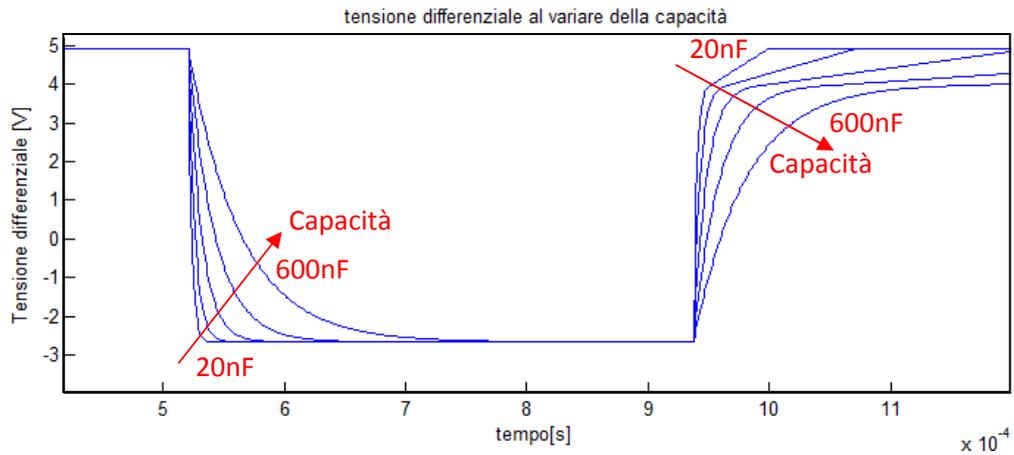


Figura 4.17 - Tensione differenziale in relazione alle capacità dei dispositivi

E' perciò chiaro che la presenza delle capacità determina un deterioramento del segnale; d'altra parte si presuppone che il progettista abbia dimensionato i condensatori sulla base della valutazione dei possibili disturbi presenti sulla linea, infatti, nel caso di rumore sovrapposto al segnale, la presenza delle capacità ne aiuterebbe il filtraggio.

Nei paragrafi precedenti si è inoltre parlato del contributo fornito dalle resistenze interne al dispositivo (figura 4.13), grazie alle quali si ottiene la stabilizzazione della tensione differenziale nella fase di riposo della linea e nella fase di trasmissione dei bit con valore alto. Questa stabilizzazione della tensione non ha degli effetti positivi sulla trasmissione. Infatti, l'assenza delle resistenze porterebbe il segnale in una situazione di equilibrio rispetto alle soglie di $\pm 200mV$; a parità di costanti di tempo si ottiene la riduzione dell'intervallo di tempo necessario al riconoscimento del passaggio di bit da alto a basso. Nel seguente grafico si mette a confronto l'andamento delle tensioni stimate nel caso in cui sono presenti le resistenze e nel caso in cui sono assenti (figura 4.18).

Le prestazioni dei dispositivi così modificati migliorano drasticamente e portano la soglia di funzionamento del sistema a raggiungere i 32 dispositivi anche a velocità di comunicazione più elevate.

5 Le modifiche hardware e la robustezza del sistema

Lo studio del sistema ha portato alla determinazione delle modifiche hardware che possono essere applicate per ottenere delle prestazioni migliori. Apportando queste modifiche si riesce a superare notevolmente il numero di dispositivi che possono essere collegati alla linea di comunicazione senza comprometterne il funzionamento.

Il fatto che in condizioni normali di funzionamento le prestazioni del sistema modificato siano migliorate non implica l'incremento di robustezza del sistema. Per testare la robustezza del sistema si valuta il funzionamento della comunicazione in presenza di disturbi. Si decide perciò di eseguire le prove di compatibilità elettromagnetica sui dispositivi originali e sui dispositivi modificati.

Perché le prove risultino ripetibili e portino ad una valutazione univoca delle prestazioni del sistema, in termini di immunità ai disturbi, devono essere eseguite secondo la normativa CEI.

5.1 Prove di compatibilità elettromagnetica

Il termine compatibilità elettromagnetica (EMC) si riferisce alla disciplina che studia la generazione, la trasmissione e la ricezione non intenzionali di energia elettromagnetica. La compatibilità elettromagnetica prende perciò in considerazione diverse problematiche. Le problematiche di emissione si riferiscono alla riduzione della generazione non intenzionale di energia elettromagnetica ed alle contromisure atte ad evitare la sua trasmissione; le problematiche di immunità si riferiscono invece al corretto funzionamento degli apparati elettrici ed elettronici in presenza di disturbi elettromagnetici provenienti dall'esterno. Quando nell'ambito della compatibilità elettromagnetica si prendono in considerazione disturbi che si propagano in strutture guidanti, quali conduttori metallici, ci si riferisce a problematiche di

immunità o di emissione condotte; quando invece i disturbi si propagano in aria, ci si riferisce a problematiche di immunità ed emissione irradiata.

L'ente che si occupa delle normative di compatibilità elettromagnetica è il Comitato Elettrotecnico Italiano (in acronimo CEI), un'associazione riconosciuta dall'Unione europea, che viene citata nella legge numero 186 del 1 marzo 1968 e in diversi altri decreti più recenti.

La legge numero 186 del 1 marzo 1968 specifica che “tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati e costruiti a regola d'arte. I materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici realizzati secondo le norme del comitato elettrotecnico italiano si considerano costruiti a regola d'arte.”

Per le prove di compatibilità elettromagnetica viene perciò presa in considerazione la norma CEI EN 50491 [11][12][13] che stabilisce i requisiti generali per sistemi elettronici per la casa e l'edificio (HBES, home and building electronic system) e sistemi di automazione e controllo di edifici (BACS, building automation and control system) utilizzati negli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera.

La norma descrive le condizioni nelle quali devono essere eseguite le prove, allo scopo di minimizzare gli effetti dei parametri ambientali sui risultati della prova.

Tutte le prove devono essere effettuate con la configurazione minima di prova; questa è realizzabile con un insieme di dispositivi capaci di espletare le funzioni fondamentali dell'apparecchiatura sottoposta al test (EUT, equipment under test).

I risultati della prova vengono espressi in funzione dei criteri di prestazione, criteri che vengono definiti nel capitolato di prova interno dell'azienda e che devono comunque rispettare quelli stabiliti dalla norma.

I criteri generali di prestazione stabiliscono che durante tutte le prove il dispositivo non deve bloccare il mezzo di trasmissione o inviare telegrammi non previsti [12][13]. E' ammesso che i telegrammi previsti siano corrotti a causa dei fenomeni elettromagnetici.

I criteri di prestazione stabiliti dalla norma sono i seguenti:

- Criterio di prestazione A: In aggiunta ai criteri di prestazione generali indicati, durante e dopo la prova il dispositivo deve continuare a funzionare nel modo previsto, indicato nella propria documentazione di

prodotto. Non è ammesso alcun cambiamento imprevisto dello stato del dispositivo, dei dati memorizzati direttamente connessi con la funzione prevista, un funzionamento inaspettato oppure la perdita di funzionalità.

- Criterio di prestazione B: In aggiunta ai criteri di prestazione generali indicati, dopo la prova il dispositivo deve continuare a funzionare nel modo previsto. Durante la prova è ammesso un degrado delle prestazioni.
- Criterio di prestazione C: In aggiunta ai criteri di prestazione generali indicati, durante la prova sono ammessi malfunzionamenti, come cambiamenti di stato o dei dati o la perdita di comunicazione, a condizione che dopo la prova la funzione si auto-ripristini, oppure che il dispositivo si riavvii con stati e con dati predefiniti. Dopo la prova non è ammesso l'intervento manuale per riavviare il dispositivo.

5.2 Prova di immunità a transitori/treni elettrici veloci

La prova di immunità ai transitori veloci ripetitivi è una prova nella quale vengono accoppiati treni di impulsi alle porte di alimentazione, di segnale, di controllo e di terra delle apparecchiature elettriche ed elettroniche. Sono significativi per la prova l'elevata ampiezza, il breve tempo di salita, l'elevata frequenza di ripetizione e la bassa energia dei transitori. La prova è intesa a dimostrare l'immunità delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, sottoposte ai disturbi del tipo di quelli che derivano dai transitori di commutazione (distacco di carichi induttivi, rimbalzo dei contatti dei relé, ecc.). Il generatore utilizzato per la prova deve permettere la regolazione dell'ampiezza degli impulsi che va da $-4kV$ a $+4kV$ e deve essere in grado di generare treni di 75 impulsi con frequenza di $5kHz$ o $100kHz$, periodicamente ogni $300ms$. La forma d'onda dell'impulso deve essere tale da avere un tempo di salita pari a $5ns \pm 30\%$ e una durata di $50ns \pm 30\%$ [14].

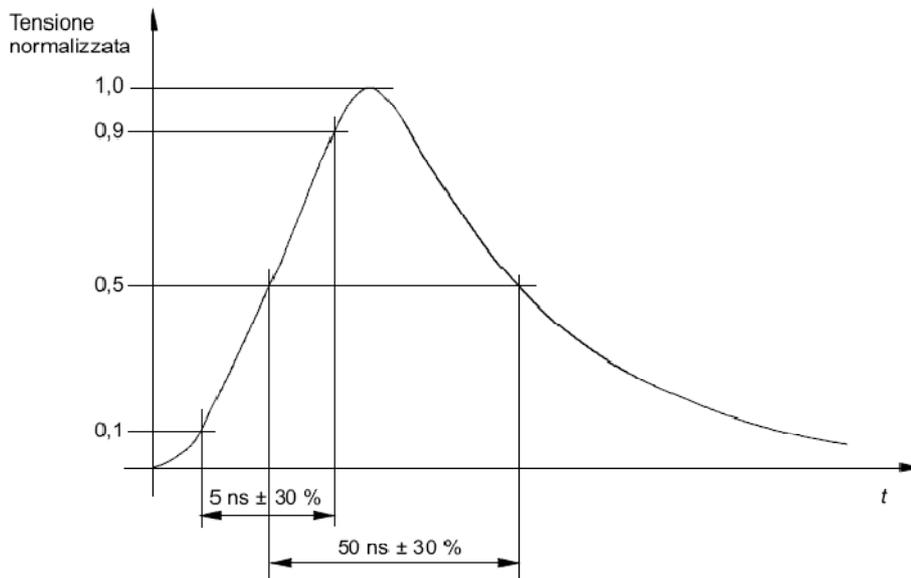


Figura 5.1 - Forma d'onda di un impulso stabilita dalla normativa

La prova viene eseguita iniettando il disturbo su ognuna delle porte di ingresso del dispositivo. Per quanto riguarda la porta di comunicazione modbus si inietta il disturbo tramite una pinza di accoppiamento capacitiva con dimensioni prestabilite dalla norma (figura 5.2).

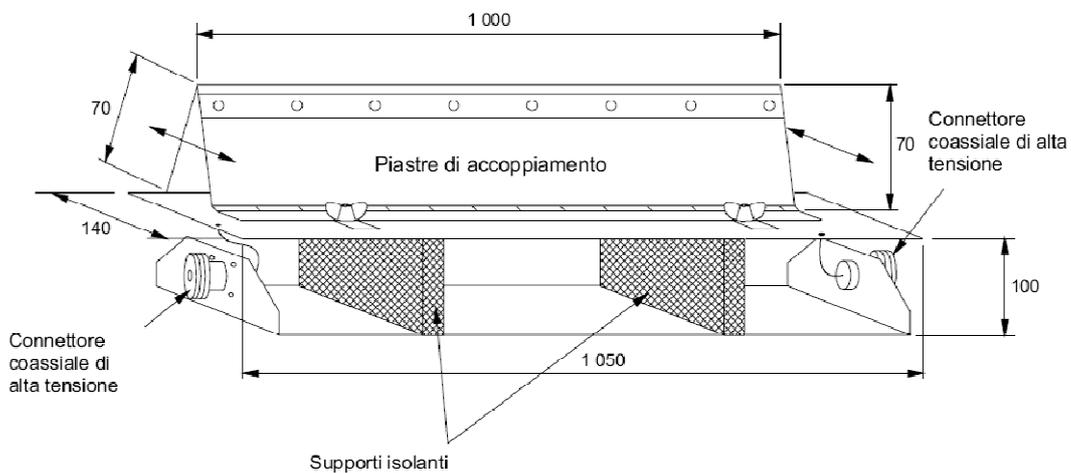


Figura 5.2 - Pinza capacitiva di accoppiamento (misure espresse in mm)

E' inoltre necessario disaccoppiare tutti i dispositivi ausiliari alla prova in modo tale che non vengano disturbati e danneggiati dagli impulsi di tensione. Uno dei dispositivi ausiliari (AE, auxiliary equipment) che è indispensabile proteggere è

il gateway, a questo scopo viene utilizzata la rete di disaccoppiamento CDN - T4.

Questo strumento è composto da una rete di accoppiamento collegata ad una porta di ingresso, che in questa prova viene lasciata in circuito aperto, e una rete di disaccoppiamento composta da alcuni condensatori diretti verso terra, in modo da scaricare le frequenze più alte della tensione. Le mutue induttanze in serie ai condensatori (figura 5.3) sono disposte in modo tale che vengano scaricate verso terra solamente le tensioni di modo comune e non quelle differenziali. Le due induttanze centrali filtrano i disturbi di modo comune.

In figura viene rappresentato un esempio di rete di accoppiamento/disaccoppiamento, in particolare CDN-T2; nelle prove viene utilizzata una CND-T4 perché il cavo di comunicazione è composto da 2 coppie di conduttori.

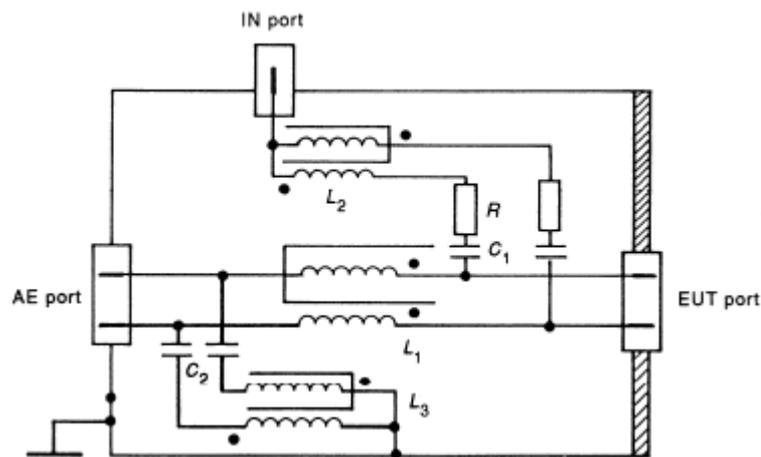


Figura 5.3 - Schema elettrico CDN T2

Il setup di prova, per l'iniezione del disturbo sul cavo di comunicazione, prevede che le apparecchiature da testare siano poste su di un piano di riferimento di terra e devono essere isolate da esso tramite un supporto di spessore $0.1m$. Il piano di riferimento deve essere un foglio metallico di rame o alluminio con spessore minimo di $0.25mm$ e area minima di $1m \times 1m$ [11].

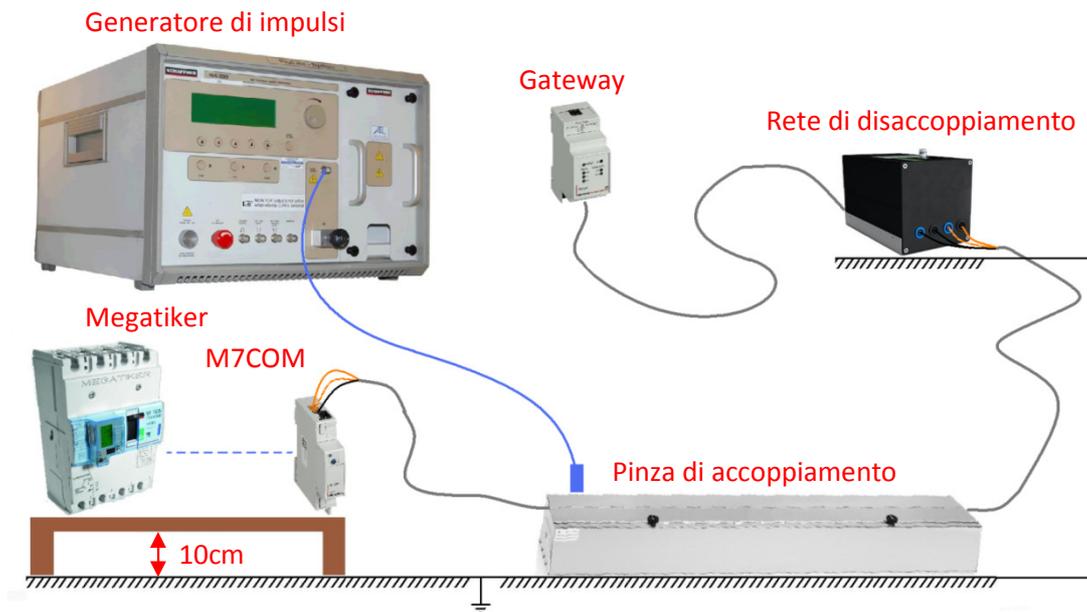


Figura 5.4 - Setup di prova per l'immunità ai transitori veloci

Nell'immagine viene rappresentato il setup di prova per il test del dispositivo M7COM, il quale funziona solo se connesso all'interruttore con protezione differenziale integrata, denominato Megatiker. E' possibile conoscere lo stato dell'interruttore e della protezione interrogando il dispositivo M7COM tramite l'utilizzo di un dispositivo gateway, protetto dagli impulsi di tensione attraverso una rete di disaccoppiamento.

L'M7COM e il Megatiker sono due dispositivi connessi da un cavo di comunicazione corto. Su questo canale non vengono eseguite prove di iniezione dei disturbi perché la norma non prevede prove di immunità su conduttori di comunicazione con lunghezza inferiore ai tre metri.

L'M7COM possiede una seconda uscita a relè che cambia stato nel momento in cui viene rilevata l'attivazione della protezione sul Megatiker, a questa uscita viene collegata una lampadina in modo tale da poter rilevare visivamente un'eventuale variazione non intenzionale dello stato del relè.

Durante l'iniezione del disturbo si mantiene attiva la comunicazione e si rileva il numero di errori. Ogni prova dura cinque minuti e viene eseguita sui dispositivi originali e sui dispositivi modificati.

Frequenza	Tensione	M7COM	
		Con capacità	Modificato
5kHz	2000V	13%	15%
	1000V	14%	12%
	500V	7%	7%
	-500V	8%	8%
	-1000V	14%	11%
	-2000V	13%	15%
100kHz	2000V	4%	5%
	1000V	7%	6%
	500V	4%	4%
	-500V	4%	3%
	-1000V	7%	6%
	-2000V	6%	6%

Iniettando i disturbi sulla linea di comunicazione si genera una percentuale non indifferente di errori. Tali errori tuttavia non bloccano il mezzo di comunicazione e non causano l'invio di telegrammi non previsti, rispettano perciò i requisiti generali della norma. Gli errori che si rilevano sono dovuti alla mancata risposta del dispositivo alla richiesta inoltrata dal nodo master, il quale rileva e archivia l'errore senza ripetere la richiesta.

Eseguendo ripetutamente le prove è possibile registrare una variazione delle percentuali di errore di circa $\pm 2\%$, presumibilmente dovuta alla statistica della probabilità che il treno di impulsi generato ogni $300ms$ intercetti parte del frame inoltrato.

Il fatto che il nodo master della comunicazione (ossia il dispositivo gateway prodotto da Bticino), una volta rilevata l'assenza di risposta da parte di un nodo slave, archivia l'errore senza ripetere la richiesta causa la perdita del dato; perciò le prestazioni del dispositivo non possono rientrare nel criterio di prestazione A.

La norma relativa all'immunità ai transitori veloci prevede un'ulteriore prova, nella quale il disturbo viene iniettato direttamente sul cavo di alimentazione. In questo caso si modifica perciò il setup di misura e non viene più utilizzata la pinza di accoppiamento. Il dispositivo utilizza l'alimentazione $24V$ fornita direttamente dal generatore di impulsi, all'interno del quale vi è il disaccoppiamento necessario ad evitare che il disturbo si propaghi nella rete elettrica.

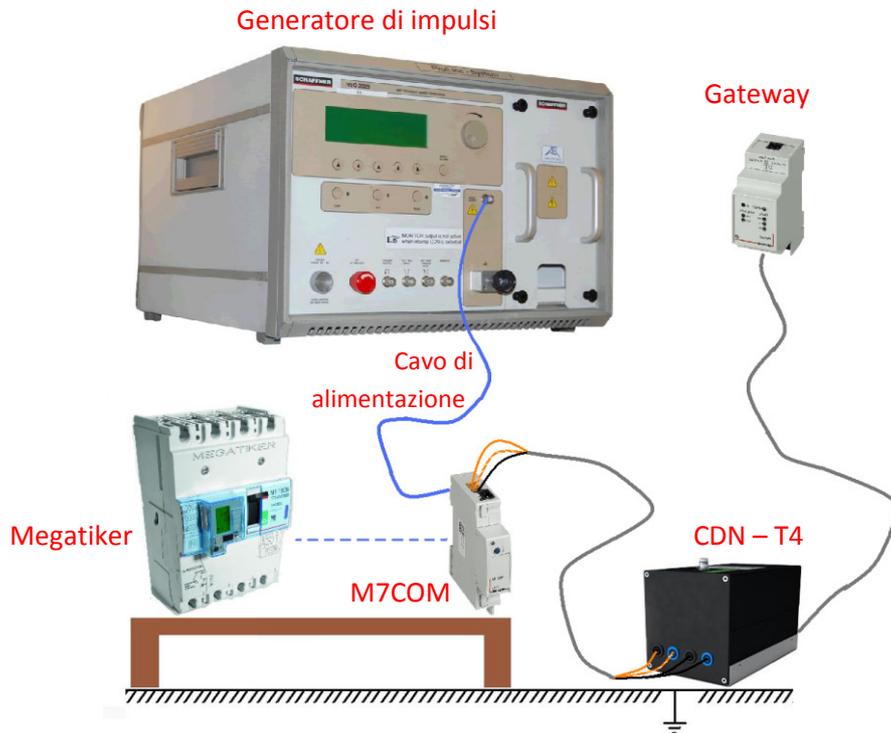


Figura 5.5 - Setup di misura nel caso di disturbo sull'alimentazione

Anche in questo caso si esegue la prova più volte, iniettando disturbi di diversa entità e con frequenze diverse; si riportano in tabella le percentuali di errori rilevati durante la comunicazione.

Frequenza	Tensione	M7COM	
		Con capacità	Modificato
5kHz	1500V	7%	10%
	1000V	8%	9%
	500V	1%	1%
	-500V	1%	1%
	-1000V	6%	6%
	-1500V	8%	7%
100kHz	1500V	4%	5%
	1000V	4%	5%
	500V	1%	2%
	-500V	1%	2%
	-1000V	5%	5%
	-1500V	3%	4%

E' possibile concludere che dalle prove di immunità ai transitori elettrici veloci non emergono differenze di comportamento fra i dispositivi originali e i dispositivi modificati. È perciò evidente che la coppia di condensatori che è stata rimossa non gioca un ruolo fondamentale nel filtraggio di disturbi con contributi in frequenza così elevati, come possono esserlo gli impulsi utilizzati in questa prova.

Dalle tabelle è possibile dedurre che nei casi peggiori si verificano il 10 - 15% di errori; ogni errore determina la perdita del dato richiesto dal master perché il gateway, nodo master della comunicazione, archivia l'errore e non ripete la richiesta.

Nel caso in cui venisse ripetuta la richiesta che ha generato l'errore le probabilità di perdere il dato si ridurrebbero, ottenendo perciò dei livelli di prestazione migliori nella valutazione dell'esito della prova.

Per esempio se venisse modificato il firmware del gateway, impostando una ripetizione della richiesta dopo l'errore, la probabilità di perdere il dato passerebbe dal 15% al 2,3%; se invece venissero impostate due ripetizioni della richiesta dopo l'errore, si otterrebbe una probabilità dello 0,3%, che presumibilmente porterebbe all'ottenimento del livello di prestazione A come esito di tutte le prove.

5.3 Prova di immunità ai disturbi condotti, indotti da campi a radiofrequenza

Questa prova si riferisce alle norme di immunità condotta, delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, ai disturbi elettromagnetici provenienti da trasmettitori intenzionali a radiofrequenza, nell'intervallo di frequenza tra 150 *kHz* e 80 *MHz*. Questo genere di disturbo si accoppia con le apparecchiature tramite i cavi di collegamento, i quali si comportano come reti di antenne riceventi passive, poiché possono essere lunghe parecchie lunghezze d'onda. Sono infatti escluse dalla prova le apparecchiature prive di almeno un cavo di collegamento (es. cavo di alimentazione, linea di trasmissione di segnali o collegamento di messa a terra).

Il generatore di prova include tutte le apparecchiature e i componenti necessari a fornire alla porta di ingresso dei dispositivi di accoppiamento il segnale di

disturbo. In questo caso si utilizza un generatore di segnale e un amplificatore controllati da un calcolatore elettronico di comando [15].

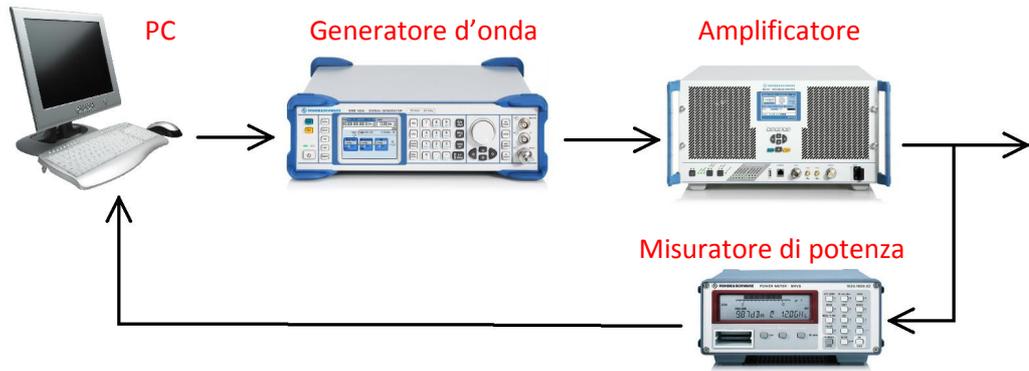


Figura 5.6 - Struttura del generatore di prova

Il disturbo generato per l'esecuzione di questa prova, secondo la normativa CEI EN 61000 [15], è uno sweep in frequenza scandito da 150kHz a 80MHz . L'onda del disturbo ha un'ampiezza di 10V modulata all'80% da una sinusoide con frequenza 1kHz . Il passo di scansione delle frequenze è dell'1% in scala logaritmica e la permanenza su ogni frequenza viene impostata a 5 secondi; l'intera prova dura circa due ore.

Anche in questa prova è necessario eseguire l'iniezione del disturbo sia sulla porta di alimentazione sia sulla porta di comunicazione. Per quanto riguarda l'iniezione del disturbo sull'alimentazione si utilizza una rete di accoppiamento CDN, che è preferibile per motivi di riproducibilità della prova e di protezione delle apparecchiature ausiliarie. Per quanto riguarda l'iniezione del disturbo sulla linea di comunicazione i metodi sono differenti in base alla tipologia di cavo utilizzato; nel caso in cui si utilizza un cavo non schermato è necessario iniettare i disturbi attraverso una pinza elettromagnetica, altrimenti si utilizza l'iniezione diretta sullo schermo.

La pinza elettromagnetica ha un duplice effetto di accoppiamento: l'accoppiamento capacitivo è dato dalla stretta vicinanza tra il cavo del dispositivo da testare e un foglio di rame sul quale viene iniettato il disturbo; l'accoppiamento magnetico è dovuto alla presenza di un tubo di ferrite sul quale viene indotto il disturbo.

I risultati di questa prova mettono in evidenza l'utilità dei condensatori presenti sull'interfaccia modbus dei dispositivi. I seguenti grafici mostrano la percentuale di errori rilevati ad ogni frequenza: il primo è relativo al dispositivo con le capacità mentre il secondo è relativo al dispositivo modificato.

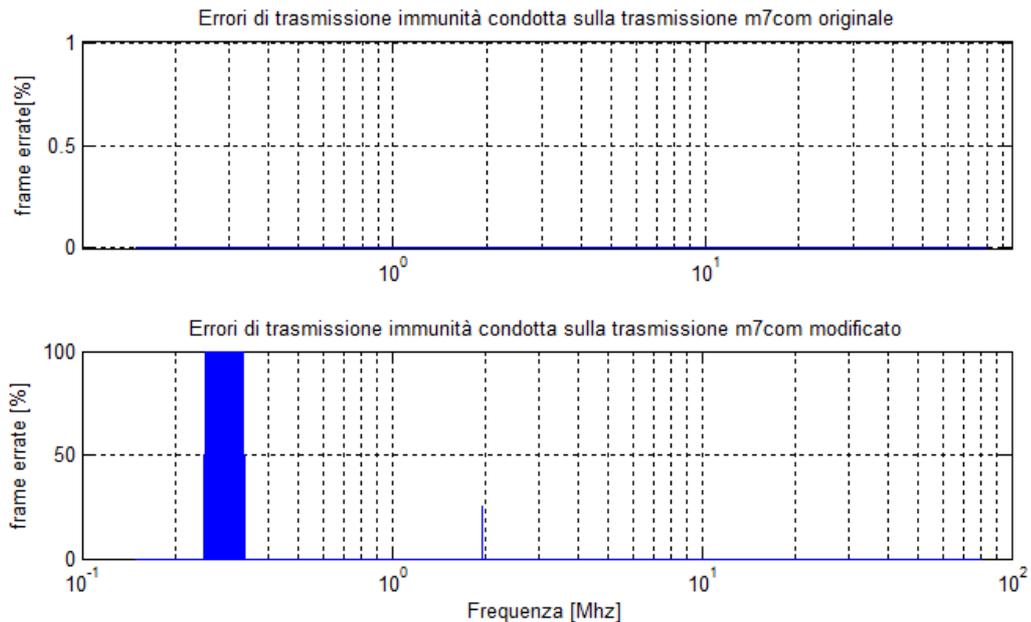


Figura 5.7 - Esito prova di immunità condotta

E' possibile notare una limitata banda di frequenze nelle quali la presenza dei condensatori è determinante rispetto all'immunità ai disturbi.

Si può perciò dedurre che la rimozione delle capacità è un'operazione che incide negativamente sulle proprietà di immunità ai disturbi. Nel caso in cui è necessario ottenere delle prestazioni migliori è possibile ponderare un ridimensionamento delle capacità in modo tale da ottenere il corretto bilanciamento tra le prestazioni in assenza e in presenza di disturbi.

Questa caratteristica non è emersa dalla prova di immunità ai treni di impulsi perché le frequenze eccitate sono differenti. Nel caso in cui l'impulso fosse ideale, la banda di frequenze eccitate sarebbe illimitata, ma come si è visto nel capitolo precedente, l'impulso ha una forma d'onda ben definita. Inoltre, prima di raggiungere i cavi di comunicazione, l'impulso attraversa una serie di cavi e dispositivi che ne permettono l'iniezione e ne modificano la forma; utilizzando l'oscilloscopio si rileva una forma d'onda del disturbo che raggiunge il dispositivo (figura 5.8).

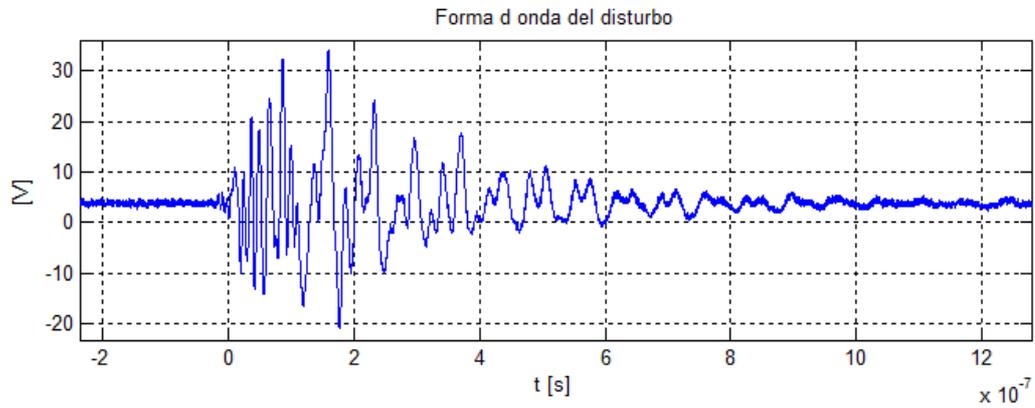


Figura 5.8 - Andamento nel tempo della tensione

Analizzando il disturbo in frequenza si nota che le armoniche con contributo energetico rilevante sono distribuite su una banda dell'ordine delle decine di megahertz.

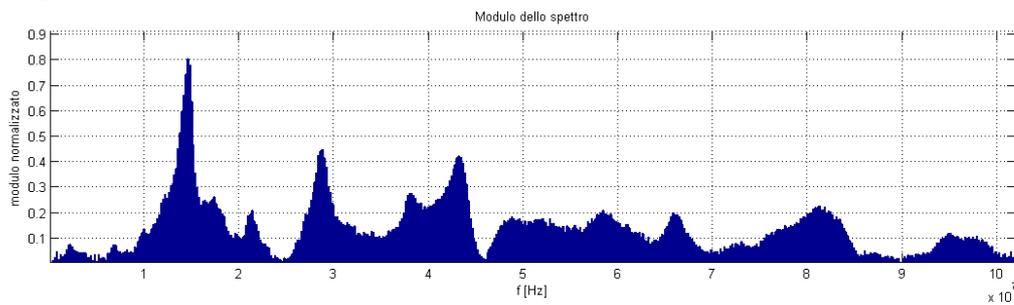


Figura 5.9 - Trasformata in frequenza del disturbo misurato

Le frequenze nell'ordine delle centinaia di kilohertz hanno perciò un contributo energetico molto basso che non permette di mettere in evidenza i risultati ottenuti nella prova di immunità condotta.

6 Il capitolato di prova

Al giorno d'oggi non c'è nessun documento interno all'azienda che definisce in modo chiaro e dettagliato i metodi corretti da utilizzare per testare la comunicazione dei dispositivi modbus e determinarne le prestazioni. Il capitolato di prova è perciò un riferimento importante per i tecnici della sala prove e per chiunque abbia bisogno di mettere alla prova le dichiarazioni che l'azienda fornisce, in termini di prestazioni dei prodotti messi sul mercato.

L'importanza di un capitolato di prova è ulteriormente validata su questo genere di sistemi a causa del fatto che non ci sono normative sufficientemente specifiche. È comunque necessario rispettare le regole dettate dalla normativa generale riguardanti i sistemi elettronici per la casa e l'edificio e i sistemi di automazione e controllo di edifici.

In questo capitolo vengono illustrati i dettagli riguardanti le prove presentate nella sezione precedente, completando le informazioni utili alla stesura del capitolato.

6.1 Le unità di carico apparenti

La prima prova presentata nel capitolato è quella funzionale di sistema. Il fine di questa prova è determinare il numero massimo di dispositivi che si possono collegare contemporaneamente alla linea modbus.

Il protocollo RS485 definisce il numero massimo di dispositivi collegabili alla linea di trasmissione in termini di unità di carico (*UdC*) e pari a 32. Ad ogni dispositivo viene perciò associato un peso in funzione delle unità di carico che rappresenta per la linea. Sommando il peso di tutti i dispositivi connessi alla linea di trasmissione si ottiene il carico totale che deve essere inferiore a *32 UdC*.

Lo standard RS485 esplicita il metodo di determinazione delle unità di carico; si decide di applicarlo sui dispositivi con le resistenze interne e sui dispositivi modificati. La procedura prevede di applicare una tensione continua sul connettore TX/RX+ e valutare l'assorbimento di corrente in funzione della tensione nell'intervallo compreso tra i $-7V$ e i $+12V$. La stessa procedura deve

essere ripetuta per il morsetto TX/RX- [17]. Non avendo a disposizione in laboratorio un generatore stabilizzato in grado di fornire tensioni negative si utilizza un particolare setup di misura che permette di ottenere lo stesso risultato (figura 6.1).

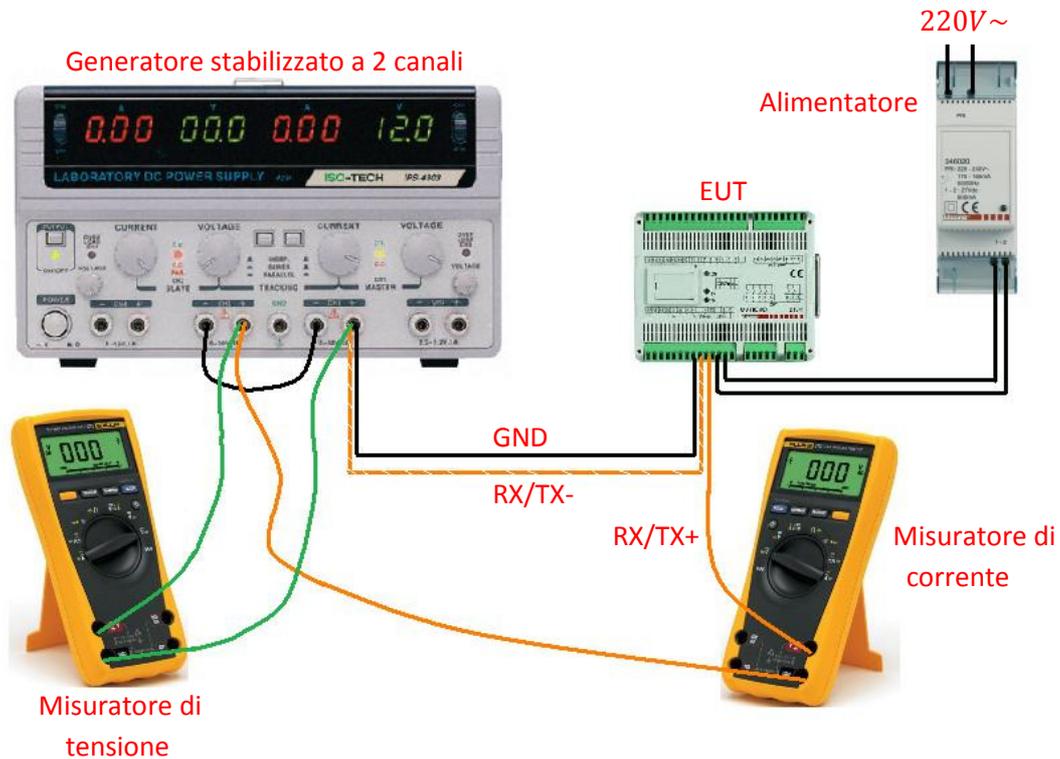


Figura 6.1 - Setup di misura delle unità di carico

Lo schema elettrico corrispondente è il seguente:

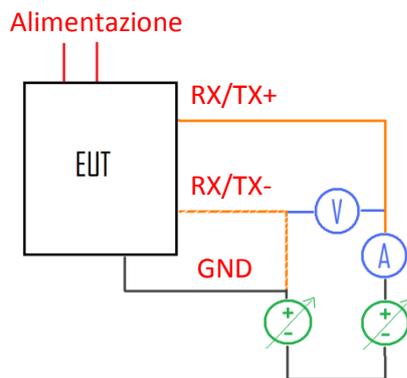


Figura 6.2 - Schema elettrico di misura delle unità di carico

Con questo setup di misura si applica una differenza di potenziale su RX/TX+ rispetto ad RX/TX- che è collegato al ground e si valuta l'assorbimento di corrente. Il misuratore di tensione viene utilizzato per avere una conferma della differenza di potenziale ricavabile anche dai valori di tensione generata. I due generatori vengono utilizzati in modo alternato, uno per generare tensioni positive e l'altro per generare quelle negative rispetto al contatto di ground. Il seguente grafico riporta le caratteristiche tensione-corrente relative alla misura eseguita sui dispositivi con le resistenze e sui dispositivi modificati.

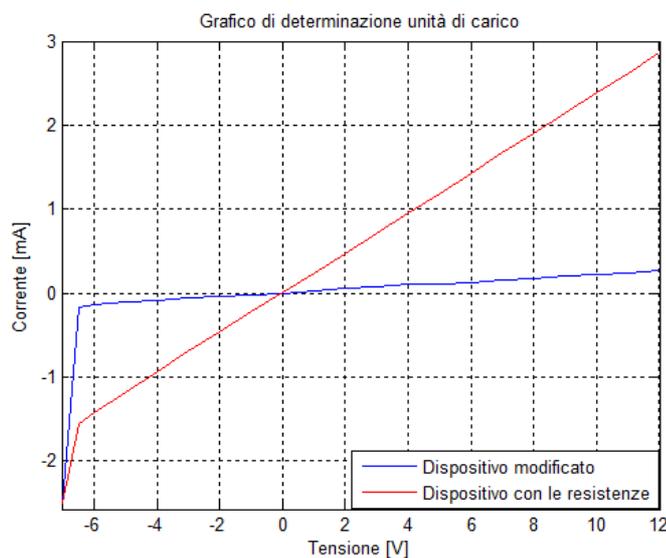


Figura 6.3 - Grafico utile a determinare le unità di carico

Dal grafico è possibile notare una irregolarità in corrispondenza della massima tensione negativa. Si presuppone che questa sia dovuta alla chiusura dei diodi di protezione. Quella parte di curva non viene presa in considerazione perché non rappresenta le normali condizioni di funzionamento del dispositivo. Secondo quanto definito dalla specifica RS485, si determinano le unità di carico in base ai valori di corrente assorbita ai limiti di questo dominio di tensione. Una unità di carico corrisponde all'assorbimento di un mA di corrente, perciò si deduce dal grafico che i dispositivi con le resistenze rappresentano un carico di $3 UdC$, mentre i dispositivi modificati arrivano ad assorbire al massimo $0.25mA$, cioè $\frac{1}{4} UdC$.

Si può dimostrare che le unità di carico così definite non sono efficaci per la determinazione dei limiti di funzionamento del sistema. Basti pensare che

questa caratteristica è una costante legata al dispositivo, quando invece nel quarto capitolo si voluto mettere in evidenza la variabilità del numero limite di dispositivi, in funzione dalla velocità di comunicazione (figura 4.16).

Considerando la velocità di comunicazione di default del modbus ($19,2\text{kbps}$), si è sperimentato che il numero limite di dispositivi che possono essere collegati alla dorsale modbus, senza comprometterne il funzionamento, è otto, il cui carico equivalente è 24UdC . Nel caso in cui venisse dimensionato un impianto sulla base delle specifiche dettate dall'RS485, allora si potrebbero collegare alla linea dieci dispositivi da 3UdC , portando il sistema in condizioni di non funzionamento.

Per evitare che questo accada è necessario definire un capitolato di prova che introduce un nuovo metodo di determinazione del peso di ogni dispositivo connesso alla linea. Si decide perciò di definire una nuova variabile, il carico apparente. Il carico apparente è funzione della velocità di comunicazione ed è definito come il rapporto tra il carico massimo supportato dalla linea, 32UdC , e il numero massimo di dispositivi che permette il funzionamento della comunicazione. Per esempio nel caso dei dispositivi analizzati nel quarto capitolo, ad una velocità di $19,2\text{kbps}$, il limite di funzionamento del sistema è di 8 dispositivi, quindi l'unità di carico apparente di ogni dispositivo è 4UdCa . L'unità di carico definita dalle specifiche RS485 tiene in considerazione solamente il contributo della resistenza di ingresso dei dispositivi. Con questo progetto si è reso evidente che le resistenze non sono gli unici parametri che influiscono sull'incremento del carico sulla linea. Grazie alle unità di carico apparenti si riesce a tenere in considerazione ogni parametro influente.

Nel caso in cui si conosce lo schema elettrico interno dei dispositivi in prova, è possibile determinare le unità di carico apparenti attraverso il modello di simulazione presentato nel terzo capitolo, oppure sperimentalmente, attraverso l'utilizzo dell'emulatore hardware. Invece, nel caso in cui non si conosce lo schema elettrico interno al dispositivo è necessario determinare il numero massimo di dispositivi collegabili alla linea attraverso l'aggiunta graduale del carico fino al limite di funzionamento.

Ad ogni dispositivo viene associato un valore di carico apparente per ogni velocità di comunicazione di cui è dotato.

La configurazione di sistema, che presenta un carico sulla linea pari a 32 unità di carico apparenti, è la configurazione con le condizioni di funzionalità più

critiche; è perciò la configurazione che deve essere utilizzata nelle prove di compatibilità elettromagnetica.

6.2 Protezione delle apparecchiature ausiliarie, collegamento dello schermo e livelli di prova

Le due prove di compatibilità elettromagnetica che sono state trattate in questa tesi sono i transitori rapidi e la tensione condotta in radiofrequenza. Ciò che è fondamentale sottolineare nel capitolato, rispetto a queste due prove, è la necessità di disaccoppiare il disturbo dal lato degli apparecchi ausiliari alla prova, come per esempio lo è il nodo master della comunicazione. Per il disaccoppiamento è necessario utilizzare dei filtri, oppure delle CDN adeguate come quella presentata nel capitolo cinque. In assenza di disaccoppiamento non è possibile distinguere gli errori di comunicazione dovuti al malfunzionamento del dispositivo in prova, dagli errori causati dai dispositivi ausiliari.

Un altro dettaglio al quale è necessario prestare attenzione nell'allestimento delle prove è il collegamento dello schermo del cavo di comunicazione.

Nelle norme generiche viene specificato che le prove devono essere eseguite sul sistema configurato secondo le sue normali condizioni di funzionamento; normalmente lo schermo del cavo di comunicazione viene collegato a terra in un solo punto. Nell'esecuzione delle prove il cavo di comunicazione è diviso in due parti dalla rete di disaccoppiamento; è necessario ponderare l'esatto punto di messa a terra dello schermo perché questo dettaglio cambia radicalmente i risultati della prova.

Nella prova ai transitori elettrici veloci si ritiene opportuno collegare lo schermo a terra dal lato in cui è presente la pinza di accoppiamento, perché rappresenta le reali condizioni di funzionamento del sistema. Se lo schermo all'interno della pinza di accoppiamento venisse lasciato flottante non sarebbe in grado di proteggere il segnale dai disturbi, come invece si verifica sul campo. Più in particolare il punto di collegamento a terra viene scelto all'altezza della rete di disaccoppiamento perché questa configurazione rappresenta le condizioni più critiche. Infatti se venisse collegato lo schermo a terra in prossimità del dispositivo da testare (EUT) si otterrebbe un eccessivo

abbattimento del disturbo falsando i risultati della prova. Si sceglie inoltre di collegare lo schermo a terra anche dal lato opposto alla rete di disaccoppiamento (CDN), a causa del fatto che questo collegamento determina un disaccoppiamento migliore per la protezione dal disturbo degli apparecchi ausiliari (AE) alla prova.

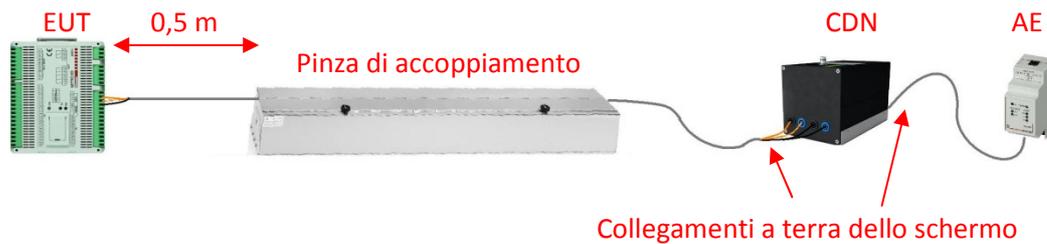


Figura 6.4 - Messa a terra dello schermo nella prova ai transitori elettrici

Nella prova di immunità condotta in radiofrequenza, la norma specifica che, nel caso di cavi schermati, il disturbo viene iniettato direttamente sullo schermo, in modo tale da ottenere un'iniezione per accoppiamento capacitivo. E' perciò chiaro che la parte di schermo sul quale viene iniettato il disturbo deve rimanere flottante, altrimenti si chiuderebbe un cortocircuito di scarica del disturbo stesso. Anche in questo caso lo schermo viene invece collegato a terra dal lato delle apparecchiature ausiliarie, in modo da ottenere un disaccoppiamento migliore.

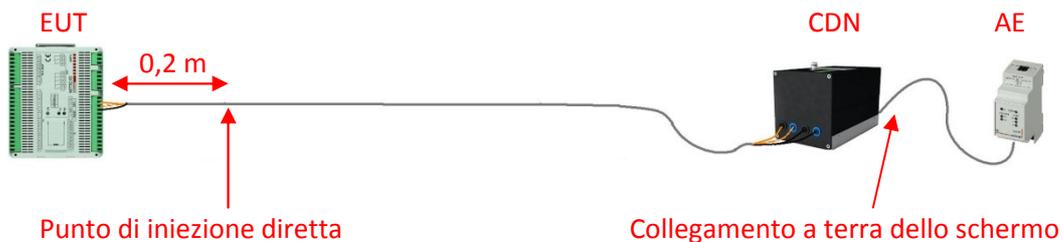


Figura 6.5 - Messa a terra dello schermo nella prova di immunità condotta

Una volta definito il setup di prova è necessario stabilire i livelli di prova, ossia l'entità del disturbo. Per quanto riguarda i transitori elettrici, la norma stabilisce che un sistema destinato ad essere installato in un ambiente industriale tipico, in cui vi è una scarsa separazione tra cavi di controllo, di segnale, di alimentazione e di comunicazione, deve essere testato con il terzo livello di prova.

Livello	Valore di picco della tensione di prova	
	Porta di alimentazione	Porta di segnale
1	0,5 kV	0,25 kV
2	1 kV	0,5 kV
3	2 kV	1 kV
4	4 kV	2 kV

Secondo la norma relativa alle prove di immunità condotta, i livelli di prova vengono suddivisi in tre classi. Si sceglie di attribuire a questo tipo di sistemi la terza classe in quanto gli ambienti industriali sono soggetti a forti radiazioni elettromagnetiche e possono spesso essere presenti ricetrasmittitori a radiofrequenza con potenza elevata.

Livello	Livello di tensione
1	1 V
2	3 V
3	10 V

La definizione dei livelli di prova, la valutazione dei risultati e le procedure descritte in questo capitolo, insieme alla descrizione delle apparecchiature utili alla prova, ossia i generatori e i dispositivi di accoppiamento e disaccoppiamento, descritti nel capitolo precedente, completano il quadro generale delle informazioni utili alla stesura del capitolato.

7 Conclusioni

Nel primo capitolo sono stati presentati i principali obiettivi di questo progetto: determinare le cause della limitazione di prestazioni del sistema e stilare il capitolato di prova industriale.

La definizione di un modello di simulazione, in grado di approssimare in modo soddisfacente il comportamento del sistema reale, ha fornito uno strumento utile alla ricerca di tutti i fattori che influenzano il funzionamento del sistema, permettendo di raggiungere il primo obiettivo attraverso l'analisi presentata nel quarto capitolo.

La messa a fuoco degli elementi utili alla definizione di un capitolato di prova è un risultato fondamentale che porta al chiarimento dei limiti di prestazione di ogni dispositivo e quindi all'adeguato dimensionamento dell'intero sistema. A tale scopo si è rivelato essenziale rendere noto che il valore dei singoli byte trasmessi può influenzare l'esito della prova di funzionalità del sistema. Scegliere in modo opportuno il frame da trasmettere in fase di testing e dichiararlo nel capitolato attribuisce rispettivamente efficacia e ripetibilità alla prova.

Aver determinato che le unità di carico, definite dal protocollo RS485, non sono un parametro attendibile per stabilire il peso dei dispositivi sulla linea, permette di non commettere più errori di dimensionamento del sistema di comunicazione complessivo.

Inoltre, i risultati ottenuti da questo progetto consentono all'azienda di individuare le cause di malfunzionamenti di alcuni impianti già venduti e fornisce gli elementi necessari alla valutazione di possibili soluzioni al problema. Per esempio, nel quarto capitolo si è reso evidente come la riduzione della velocità di comunicazione permette di incrementare le prestazioni in termini di numero di dispositivi collegati alla linea. Un ulteriore accorgimento che si consiglia di tenere in considerazione, per risolvere eventuali problemi di funzionamento su linee lunghe che collegano dispositivi di più quadri elettrici, è quello di suddividere la linea modbus in più linee, introducendo perciò nel sistema più nodi gateway che comunicano con lo stesso computer di supervisione. Questa operazione permetterebbe di ridurre

non solo il numero di dispositivi collegati su di una linea, ma anche la lunghezza della stessa, incrementando notevolmente le prestazioni del sistema.

Attraverso le analisi eseguite si è inoltre giunti alla conclusione che l'incremento delle prestazioni può essere raggiunto anche tramite alcune modifiche hardware da apportare ai dispositivi, utilizzando il simulatore per dimensionare ragionevolmente i componenti elettrici. Una seconda modifica che si potrebbe effettuare per migliorare l'immunità ai disturbi del sistema, è l'introduzione del "retry" nel firmware del gateway. Questa funzione permetterebbe al gateway di inoltrare nuovamente le richieste nel momento in cui viene rilevato un errore nella comunicazione o una mancata risposta, sfruttando perciò la completa efficacia della comunicazione master-slave. L'inserimento di questa funzione potrebbe però allungare i tempi di attesa di eventuali richieste successive. Il problema può essere risolto ridimensionando il tempo dopo il quale il master giudica assente la risposta alla richiesta inoltrata, abbondantemente sovradimensionato dall'azienda. Il corretto dimensionamento del "response timeout" è stato proposto nel capitolo 4.3 considerando il tempo di ricezione del messaggio, il tempo di elaborazione della risposta da parte del nodo slave più lento e il tempo di inoltro della risposta.

Gli strumenti forniti da questo progetto potranno anche essere utili ai tecnici in azienda per risolvere eventuali problematiche che interessano specifici impianti in particolari condizioni di funzionamento.

Bibliografia

- [1] NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0 (NIST Special Publication 1108R2)
- [2] M.Brenna, R.Faranda, F.Foiadelli , E.Tironi, C.Tornelli - “Gestione del carico veicolo elettrico con possibilità di fornitura di energia alla rete di distribuzione. Necessità di armonizzazione degli standard di comunicazione per veicoli elettrici”-
- [3] MODBUS over Serial Line – Specification and Implementation Guide (V1.02 – December 2006)
- [4] Renato Orta - “Teoria della Linee di Trasmissione” -
- [5] Michael Hiebel - “Fundamentals vector network analysis” -
- [6] CEI EN 50289-1 (2004-07) Cavi per sistemi di comunicazione - Specifiche per metodi di prova. Parte 1-1: Metodi per le prove elettriche - Prescrizioni generali.
- [7] CEI EN 50289-1-7 (2001-11) Cavi per sistemi di comunicazione - Specifiche per metodi di prova. Parte 1-7: Metodi per le prove elettriche - Velocità di propagazione
- [8] CEI EN 50289-1-8 (2001-11) Cavi per sistemi di comunicazione - Specifiche per metodi di prova. Parte 1-8: Metodi per le prove elettriche - Attenuazione
- [9] CEI EN 50289-1-9 (2002-06) Cavi per sistemi di comunicazione - Specifiche per metodi di prova. Parte 1-9: Metodi per le prove elettriche - Attenuazione di sbilancio (Perdita di conversione longitudinale, perdita di trasferimento di conversione longitudinale)
- [10] CEI EN 50289-1-11 (2002-06) Cavi per sistemi di comunicazione - Specifiche per metodi di prova. Parte 1-11: Metodi per le prove elettriche - Impedenza caratteristica, impedenza di ingresso, perdita di ritorno

- [11] CEI EN 50491-5-1 (2011-01) Requisiti generali per i sistemi elettronici per la casa e l'edificio (HBES) e sistemi di automazione e controllo di edifici (BACS). Parte 5-1: Prescrizioni, condizioni e allestimenti di prova per la compatibilità elettromagnetica (EMC)
- [12] CEI EN 50491-5-2 (2011-01) Requisiti generali per i sistemi elettronici per la casa e l'edificio (HBES) e sistemi di automazione e controllo di edifici (BACS). Parte 5-2: Prescrizioni di compatibilità elettromagnetica (EMC) per dispositivi HBES/BACS utilizzati negli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera
- [13] CEI EN 50491-5-3 (2011-01) Requisiti generali per i sistemi elettronici per la casa e l'edificio (HBES) e sistemi di automazione e controllo di edifici (BACS). Parte 5-3: Prescrizioni di compatibilità elettromagnetica (EMC) per dispositivi HBES/BACS utilizzati negli ambienti industriali
- [14] CEI EN 61000-4-4 (2006-01) Compatibilità elettromagnetica (EMC). Parte 4-4: Tecniche di prova e di misura - Prova di immunità a transitori/raffiche di impulsi elettrici veloci
- [15] CEI EN 61000-4-6 (2009-03) Compatibilità elettromagnetica (EMC). Parte 4-6: Tecniche di prova e di misura - Immunità ai disturbi condotti, indotti da campi a radiofrequenza
- [16] The RS-485 Design Guide (Application Report SLLA272B - May 2008 Texas Instruments)
- [17] RS-485 Unit Load and Maximum Number of Bus Connections (Application Report SLLA166 - May 2004 Texas Instruments)
- [18] RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations (Application Report SLLA070D - May 2010 Texas Instruments)
- [19] Bticino - "Distribuzione TICONTRON, guida tecnica" (Edizione 01/2008)