



**Università degli Studi di Padova**  
Facoltà di Ingegneria  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica

Tesi di laurea

# Studio e caratterizzazione di smart meter per smart microgrid

**Relatore:** Prof. Matteo Bertocco  
**Correlatore:** Ph.D. Marco Stellini

**Laureando:** Daniele Caliolo

15/10/2013



Impossible is nothing.  
Only miracles take time.  
*Anonimo*



# Sommario

L'attuale situazione energetica, con l'aumento dei consumi e la necessità di rivolgersi a fonti alternative, sta facendo nascere progressivamente un sistema di distribuzione delocalizzato dove il consumatore diventa anche produttore, impiegando risorse quali il solare, eolico o altre rinnovabili. Questa nuova figura del produttore/consumatore, o *prosumer*, si scontra con la struttura della rete di distribuzione dell'energia, basata su pochi impianti di produzione che dispacciano a grande distanza l'energia, attraversando centrali di trasformazione e distribuzione dove viene monitorata la rete, mettendo in atto opportuni accorgimenti al fine di garantire la cosiddetta *power quality*. È intuibile quindi che il futuro sarà una rete bidirezionale, dove l'utente andrà a prelevare o immettere energia in base alle proprie esigenze e in osservanza dei parametri stabiliti dalle autorità preposte. Si necessita perciò di un sistema di monitoraggio delocalizzato, detto *smart meter*, in grado di valutare e regolare il flusso energetico, sulla base di opportune misure comunicate al centro di supervisione, realizzando infine una di rete intelligente detta *smart grid*.

In questa tesi verranno analizzate le normative in materia al fine di determinare quali sono i parametri e le funzionalità che uno smart meter deve garantire, oltre a valutare l'ambiente operativo in cui andrà inserito il dispositivo. Sulla scorta di questi dati, è stato progettato un sistema di benchmarking in grado di simulare le condizioni operative, per poter analizzare le prestazioni di algoritmi e prototipi. Tale sistema verrà dettagliatamente descritto, fornendo inoltre un manuale operativo e le linee guida per implementare ulteriori analisi.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Le motivazioni dello sviluppo Smart Grid . . . . .	1
1.2 Il sistema di distribuzione energetico italiano . . . . .	2
1.3 Smart Grid e Smart MicroGrid . . . . .	5
1.4 Phasor Measurement Unit . . . . .	7
<b>2 Analisi normativa</b>	<b>9</b>
Introduzione . . . . .	9
2.1 Standard IEEE c37.118 - 2011 . . . . .	9
2.1.1 Verifica in condizioni stazionarie . . . . .	12
2.1.2 Verifica della larghezza di banda . . . . .	12
2.1.3 Sollecitazione a rampa della frequenza di rete . . . . .	13
2.1.4 Risposta al gradino di ampiezza e fase . . . . .	16
2.1.5 Verifica della latenza di report . . . . .	18
2.2 CEI EN 61000 . . . . .	19
2.2.1 CEI EN 61000-2 . . . . .	19
2.2.2 CEI EN 61000-4-4 . . . . .	20
2.2.3 CEI EN 61000-4-11 . . . . .	20
2.2.4 CEI EN 61000-4-13 . . . . .	20
2.2.5 CEI EN 61000-4-14 . . . . .	22
2.2.6 CEI EN 61000-4-30 . . . . .	23
2.3 Standard IEEE 1459 - 2010 . . . . .	26
2.4 Standard IEEE 1159 - 2009 . . . . .	27
2.5 Ulteriori normative e standard . . . . .	30
<b>3 Sistema di test</b>	<b>31</b>
Introduzione . . . . .	31
3.1 Realizzazione hardware . . . . .	32
3.1.1 Strumentazione utilizzata . . . . .	32

3.1.2	Schema di collegamento . . . . .	38
3.2	Realizzazione software . . . . .	42
3.2.1	Ambiente NI LabView . . . . .	42
3.2.2	Analisi funzionale . . . . .	42
3.2.3	Architettura software . . . . .	43
3.2.4	Linee guida per la modifica del testbench . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Manuale utente</b>	<b>53</b>
	Introduzione . . . . .	53
4.1	Esecuzione dei test . . . . .	53
4.1.1	Verifica del sistema di test e selezione della prova . . . . .	53
4.1.2	Inserimento dei parametri del test . . . . .	54
4.1.3	Configurazione dell'acquisizione . . . . .	62
4.1.4	Raccolta dei dati e controllo del test . . . . .	63
4.1.5	Codici di errore . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Risultati e conclusioni</b>	<b>67</b>
	Introduzione . . . . .	67
5.1	Analisi di un caso di studio . . . . .	67
5.1.1	Analisi e verifica dei segnali di test . . . . .	67
5.1.2	Caratterizzazione dell'algoritmo di stima . . . . .	70
5.2	Conclusioni e futuri sviluppi . . . . .	71
<b>A</b>	<b>Immagini analisi e verifica segnali di prova</b>	<b>73</b>
A.1	Verifica dei generatori e segnale di test per verifica in condizioni stazionarie	74
A.2	Verifica della larghezza di banda . . . . .	78
A.3	Sollecitazione a rampa della frequenza di rete . . . . .	84
A.4	Risposta al gradino di ampiezza e di fase . . . . .	90
A.5	Immunità ai buchi di tensione . . . . .	95
A.6	Immunità alle armoniche di tensione . . . . .	98
A.7	Immunità alle fluttuazioni di tensione . . . . .	104
<b>B</b>	<b>Risultati elaborazione tramite algoritmo Ip-DFT</b>	<b>107</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>118</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

*in collaborazione con il dott. Fabio Scattolin, [1]*

Nella prima parte di questo capitolo iniziale, si riassumono le motivazioni dello sviluppo delle smart grid inserite nel contesto della rete di distribuzione nazionale e i principi guida di questo sviluppo dettati dal mondo politico internazionale, che risiedono in esigenze ambientali e socio-economiche. Nella parte conclusiva del capitolo si darà una definizione di smart grid e smart microgrid, introducendone, in termini generali, i principali benefici e svantaggi. Infine verrà introdotto il termine PMU, l'unità fondamentale oggetto della presente tesi, la cui descrizione in questo capitolo vuol essere solo una breve introduzione a quanto invece verrà presentato nel capitolo successivo attraverso una definizione più rigorosa con l'utilizzo di norme e standard internazionali.

### 1.1 Le motivazioni dello sviluppo Smart Grid

Nel corso della storia, l'umanità ha sempre cercato di migliorare il proprio stile di vita, appoggiandosi a grandi scoperte scientifiche e tecnologiche per poter soddisfare ciascun bisogno primario o secondario dell'individuo. Questa continua ricerca ha spesso portato ad invenzioni dal valore inestimabile, tuttavia la sete di conoscenza dell'uomo ha dovuto scontrarsi con i limiti umani nel saper gestire tanta competenza. Il primo elemento che ha dovuto confrontarsi con tali principi è l'ambiente: emissione di  $CO_2$ , emissione di gas nocivi, surriscaldamento globale e cambiamenti climatici, sono solo alcuni degli effetti ben noti dello sviluppo umano. In base a questa situazione l'Unione Europea ha deciso di reagire per permettere un futuro sostenibile alle generazioni che verranno [2], [3]. L'Europa ha identificato il settore energetico come chiave di uno sviluppo che rispetti l'ambiente

che ci circonda, così attraverso la direttiva 2009/28/CE ha identificato le linee guide per questo cambiamento riassumendole in tre punti:

- riduzione del 20% del consumo delle fonti primarie rispetto alle attuali previsioni, attraverso l'aumento dell'efficienza del sistema di distribuzione;
- riduzione del 20% dell'emissioni di gas serra, tale obiettivo rende ancor più ambizioso il progetto indicato nel trattato di Kyoto stilato nel 1997 ed entrato in vigore nel 2005;
- aumento del 20% dell'utilizzo di fonti rinnovabili in più settori energetici.

La direttiva europea appena riassunta, chiamata spesso obiettivo 20/20/20, è la risposta di governi e nazioni alla situazione sempre più preoccupante che coinvolge il nostro pianeta. L'unione di obiettivi energetico-tecnologici con tematiche ambientali si basa dunque su tre fondamentali pilastri:

- **la sostenibilità ambientale**, con la riduzione dell'emissione dei gas serra e dell'uso di risorse energetiche disponibili in quantità limitata;
- **la sicurezza degli approvvigionamenti energetici**, per garantire la quale occorre diversificare le fonti energetiche e migliorare le infrastrutture per l'approvvigionamento ed il trasporto dell'energia;
- **crescita della competitività nel settore energetico**, un sistema più efficiente in grado di aumentare le soluzioni di distribuzione dell'energia sul mercato e di ridurre i costi pagati dai consumatori.

## 1.2 Il sistema di distribuzione energetico italiano

Per poter comprendere in che modo l'obiettivo 20/20/20 può essere raggiunto, è necessario identificare nel sistema di distribuzione energetico italiano i punti chiave dove lo sviluppo tecnologico e delle infrastrutture può intervenire per un effettivo miglioramento dell'efficienza. Nell'immagine 1.1 è riportata schematicamente la struttura della rete di distribuzione elettrica nazionale. Attualmente il sistema di distribuzione italiano prevede la presenza di alcune grandi centrali elettriche, oppure collegamenti

per l'approvvigionamento energetico provenienti dall'estero, fonti da cui l'energia elettrica si dirama. Il trasporto di tale energia si effettua attraverso linee ad alta ed altissima tensione, rispettivamente compresa tra 30 kV e 150 kV ed oltre i 220 kV : naturalmente la scelta di utilizzare linee ad elevato potenziale è dettata dalla necessità di limitare la corrente su di esse e dunque ridurre drasticamente le perdite di energia per effetto Joule. Le linee ad alta ed altissima tensione, prima di raggiungere i centri urbani, vengono convertite in linee a media tensione tra 1 kV e 30 kV, attraverso opportune cabine di trasformazione. Da tali punti si diramano 8-10 linee a media tensione che, prima di raggiungere il singolo utente, vengono rese a bassa tensione, cioè 400 V per sistemi trifase e 230 V per sistemi monofase.

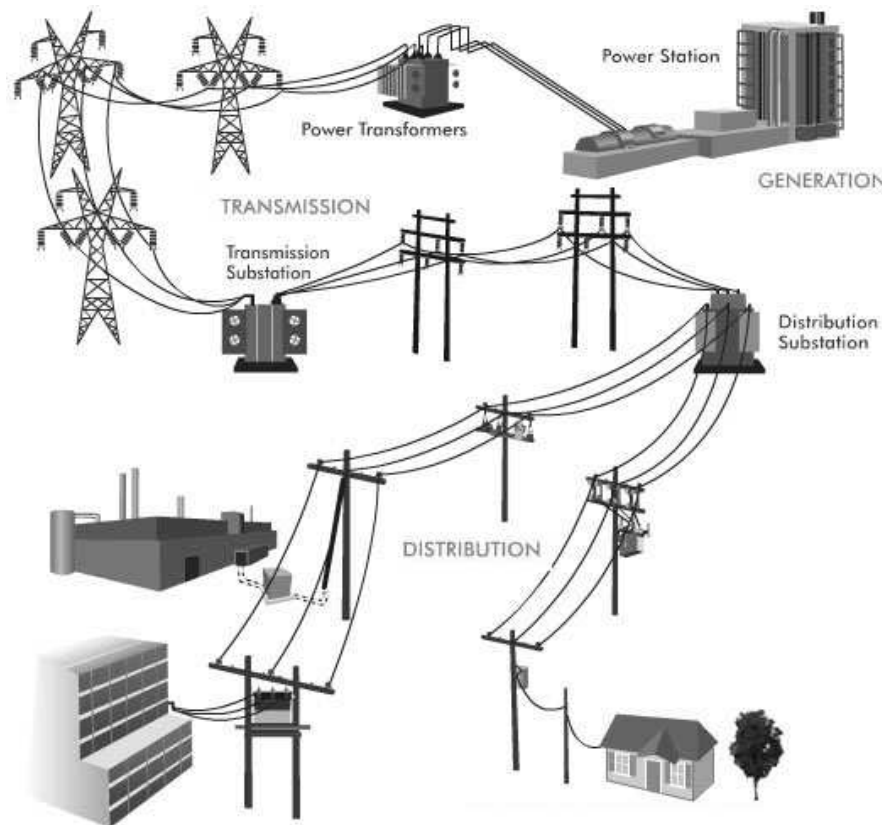


Figura 1.1: Struttura della rete di distribuzione energetica nazionale. (Immagine tratta da [4])

Questo processo ramificato di distribuzione presenta però dei limiti che devono essere presi in considerazione:

- possibilità di sfasamento della rete, conseguente all'introduzione di componenti reattive e di variazioni rapide e consistenti dei carichi nei vari nodi della rete. Lo sfasamento della rete ne riduce l'efficienza e le prestazioni;
- rischi di surriscaldamento delle linee di distribuzione, con conseguente dissipazione di potenza;
- progettazione unidirezionale delle linee di distribuzione.

L'ultimo punto indicato è particolarmente d'interesse per le smart grid. L'attuale sistema di distribuzione energetico, prevede infatti che sia l'ente energetico di riferimento a fornire tutta l'energia necessaria. Ciascun nodo della rete quindi è teoricamente un nodo entrante, cioè che assorbe energia senza immetterne. Lo sviluppo di fonti di energia rinnovabili installabili direttamente sull'abitazione o nel quartiere del consumatore, ed in grado di immettere energia nel livello di bassa e media tensione, hanno totalmente sconvolto la visione iniziale del sistema [5]. Ciascun nodo infatti ora può sia assorbire che immettere energia nella rete e tale dinamica non può sempre essere regolata con precisione. Per esempio, basti pensare al funzionamento di un pannello solare, il quale a seconda delle condizioni meteorologiche è in grado di fornire energia alla rete oppure non dare alcun contributo. Da questo radicale cambiamento è nata la necessità di avere maggior controllo sulla rete, non solo ad alta ed altissima tensione, ma anche a media e bassa tensione. Il gestore della distribuzione energetica dev'essere infatti in grado di identificare un qualsiasi fenomeno che avviene in un punto della rete, per poter intervenire per il ripristino del corretto funzionamento. Supponiamo ad esempio che vi sia un guasto su di un tratto della linea, il gestore deve essere in grado di riconoscere tale fenomeno e coordinare le fonti di energia distribuite per il ripristino delle condizioni operative standard. Si intuisce dunque che le tre principali operazioni in un ambiente di fonti di energia distribuita sono:

- riconoscimento del guasto, identificando la tipologia di problematica nel minor tempo possibile e con la miglior accuratezza possibile;
- capacità di risoluzione del problema, vi dev'essere un sistema di controllo che abbia la possibilità di intervenire sui singoli nodi della rete per assicurare il corretto funzionamento della stessa. Ad esempio, comandando l'accensione o lo stacco di inverter allacciati alla rete oppure intervenendo direttamente sulla centrale elettrica;

- comunicazione tra i nodi, è necessario un sistema di sincronizzazione in grado di aumentare l'efficienza in termini di tempo d'intervento assicurando la stabilità della rete.

La risposta a questa domanda di gestione della rete è chiamata smart grid.

### 1.3 Smart Grid e Smart MicroGrid

La *smart grid* è una rete intelligente di fonti di energia elettrica distribuite, dotata di un sistema di sincronizzazione e di misurazione in grado di stabilire la direzionalità del flusso di potenza di ciascun nodo e in ciascuna linea di distribuzione della rete. Gli algoritmi utilizzati nella smart grid sono in grado di ottimizzare consumi, stabilità, emissioni e costi della rete. Le smart grid hanno dunque il compito di migliorare la sicurezza, l'affidabilità e l'efficienza di sistemi a generazione distribuita, in cui una parte sempre più importante è rappresentata da fonti rinnovabili solari ed eoliche, come riportato in figura 1.2.

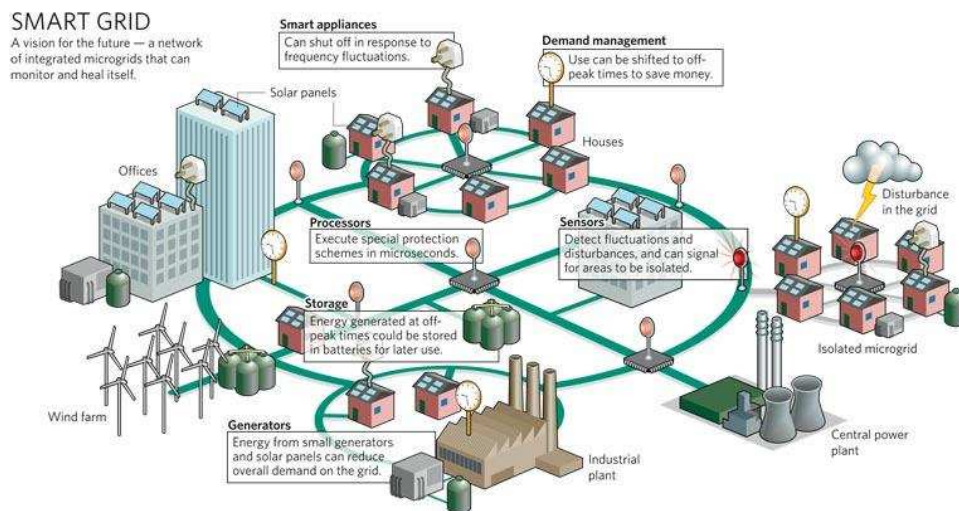


Figura 1.2: Struttura di una rete smart grid. (Immagine tratta da [6])

Lo sviluppo delle smart grid può portare molteplici benefici all'attuale rete di distribuzione energetica. Da un punto di vista ambientale, l'incremento di fonti di energia rinnovabili comporta la riduzione di emissioni di gas nocivi. I servizi ai clienti avrebbero una migliore efficienza e stabilità,

infatti le sorgenti di energia sarebbero più vicine ai carichi e ciò diminuirebbe la possibilità di disturbi lungo le linee di distribuzione. Inoltre le fonti di energia distribuite diversificate tra loro permetterebbero un miglioramento della *power quality*, tramite un sostegno locale alla tensione di linea attraverso l'iniezione di potenza attiva e/o reattiva. L'utilizzo di smart grid permetterebbe di aumentare la *host capacity* della rete, senza però rendere critico il tema dello sbilanciamento della stessa. Da un punto di vista intuitivo, si potrebbe pensare che un aumento delle utenze nella rete possa comportare un aumento della probabilità che essa sia sbilanciata a causa di immissioni e prelievi di energia, che comportano una variazione alle condizioni nominali di tensione e frequenza del sistema. In realtà, grazie alla capacità comunicativa della rete smart grid, i nodi, essendo bidirezionali, possono essere loro stessi utilizzati come strumenti di bilanciamento della rete, a patto che vi sia un'entità gerarchicamente superiore in grado di coordinare il flusso di potenza attiva e/o reattiva di ciascun nodo. Le reti smart grid possono però comportare alcune problematiche inerenti ai metodi di controllo dei flussi bidirezionali di potenza, che richiedono uno sviluppo dei sistemi di protezione diverso da quanto finora realizzato. Le fonti di energia rinnovabili, per quanto rappresentino la speranza di un futuro più eco-sostenibile, hanno attualmente una scarsa regolarità nella produzione di energia e questo porta a dei comportamenti di sorgenti e carichi imprevedibili nella rete.

L'ambiente *smart microgrid* rappresenta il mattone fondamentale con cui costituire la rete smart grid completa, figura 1.3. Si definisce smart microgrid, un territorio residenziale di modeste dimensioni dove sono presenti sorgenti distribuite di energia come pannelli fotovoltaici, micro turbine eoliche, sistemi di accumulo e celle a combustione. La rete quindi è a bassa tensione. Nelle smart microgrids si ha una gestione energetica distribuita che permette all'utente di essere sia *consumer* che *producer* e conseguentemente acquistare potere contrattuale verso le grandi aziende di distribuzione energetica. La progettazione di questa tipologia di rete rende il sistema flessibile alle esigenze dei consumatori e permette di aumentare la qualità dell'energia anche in territori remoti.

Attualmente la ricerca scientifica, spinta dalle politiche internazionali e da ingenti investimenti economici, si sta concentrando sulla dimensione residenziale delle smart microgrids, per avere un solido punto di partenza per costruire le reti del futuro.



Figura 1.3: Struttura di una rete smart microgrid. (Immagine tratta da [6])

## 1.4 Phasor Measurement Unit

Il dispositivo fondamentale per la gestione del flusso bidirezionale di potenza è il *Phasor Measurement Unit* (PMU), figura 1.4. Le caratteristiche proprie di questo dispositivo verranno analizzate nel successivo capitolo, nel quale verranno inserite nel contesto normativo del settore. Il termine PMU è introdotto dallo standard IEEE c37.118.1 [7], in cui si definisce il termine sincrofasore e si descrivono nel dettaglio le prestazioni che il PMU deve garantire. In termini generici, esso dev'essere in grado, con una determinata accuratezza ed entro un certo periodo di tempo, di riconoscere eventi riguardanti il flusso di energia nei nodi della rete. Questo dispositivo quindi dev'essere in grado di acquisire il segnale della linea d'alimentazione di ciascun nodo in modo sincronizzato al sistema di supervisione e successivamente elaborare i dati ottenuti per fornire delle stime sull'effettivo andamento del segnale. Da queste è possibile riconoscere eventi di disturbo presenti nella rete, anomalie riguardanti frequenza e tensione sulla linea ed eventuali comportamenti inaspettati da parte dei nodi della rete. Queste informazioni devono poi essere processate da un'unità superiore, in grado di controllare i diversi nodi della rete per ripristinare il corretto funzionamento della distribuzione dell'energia. Attualmente i PMU sono unità inserite nella rete a media tensione, che garantiscono un intervento di diagnosi nell'arco di un minuto. Le recenti ricerche hanno come scopo l'abbassamento del tempo d'intervento, tramite il coordinamento di più dispositivi inseriti nella rete a bassa tensione.

L'implementazione di smart meter in ambiente smart microgrid comporta necessariamente il confronto delle prestazioni del PMU non solo con

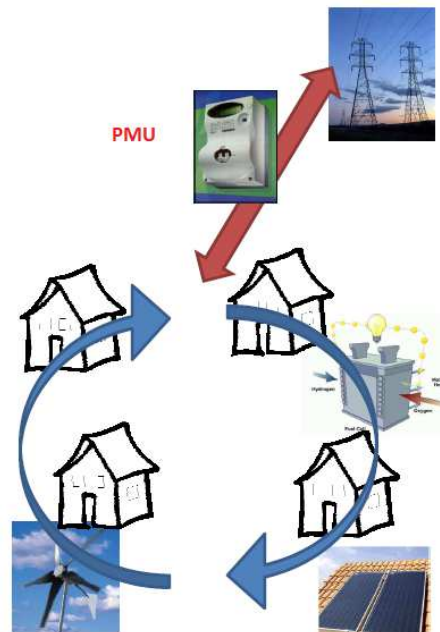


Figura 1.4: Gestione bidirezionale di un flusso da parte di un PMU. (Immagine tratta da [6])

lo standard IEEE c37.118 [7], ma anche con la serie di norme CEI EN 61000, che classificano le tipologie di disturbi possibili in una rete a bassa tensione. Nel capitolo successivo verranno analizzate nel dettaglio queste normative per poter ottenere dei segnali di test a norma su cui applicare gli algoritmi di stima presenti nel PMU. Si passerà quindi a definire il sistema di test, analizzandone la struttura fisica e il software di gestione.



# Capitolo 2

## Analisi normativa

*in collaborazione con il dott. Fabio Scattolin, [1]*

### Introduzione

La definizione delle specifiche di un dispositivo è una operazione fondamentale ed estremamente delicata dato che una non corretta analisi delle richieste può portare allo sviluppo di prodotti non adeguati o, peggio, non conformi [8]. Nel caso in esame non vi sono norme ad hoc che possano venire in aiuto, in quanto non sono state ancora emanate direttive per smart meter da inserire in reti monofase a bassa tensione. Pertanto, sono stati esaminati documenti che si riferiscono a sistemi in media o alta tensione, come lo standard IEEE c37.118, e sulla base di questi si è provveduto a confrontare i dati raccolti con alcune norme che regolamentano i sistemi in bassa tensione, come le CEI EN 61000, andando così a determinare un insieme realistico di specifiche per il dispositivo e il relativo test set da realizzare con il sistema di benchmarking.

### 2.1 Standard IEEE c37.118 - 2011

Lo standard IEEE c37.118 - 2011 [7], [9] si riferisce ad un sistema di misura localizzato in centrali di distribuzione. Si definiscono innanzitutto alcune grandezze cui poi si farà riferimento per la determinazione delle specifiche:

- Frequenza di report  $F_s$ : numero di report al secondo, ed in questo equispaziati, che il dispositivo invia all'unità di supervisione. Si assume  $T = 1/F_s$  con  $nT$  l' $n$ -esimo istante di report.

- Sincrofasore: rappresentazione fasoriale della grandezza elettrica misurata, nella forma di modulo e fase o di parte reale ed immaginaria, riferita a un coseno campione il cui valore massimo coincide con lo scatto del secondo UTC, con aggiunta l'informazione temporale dell'istante in cui viene effettuata la misura, come visibile in figura 2.1;

Dato un segnale sinusoidale con frequenza  $f_0$  e fase iniziale  $\varphi_0$

$$x(t) = X_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

vi si associa la notazione fasoriale, relativa agli istanti di report,

$$\begin{aligned} \bar{X}(nT) &= \frac{X(nT)}{\sqrt{2}} e^{j\varphi(nT)} \\ &= X_r + jX_i \\ &= X(nT); \angle\varphi(nT) \end{aligned} \quad (2.2)$$

nelle forme esponenziale, parte reali ed immaginaria, e modulo e fase.

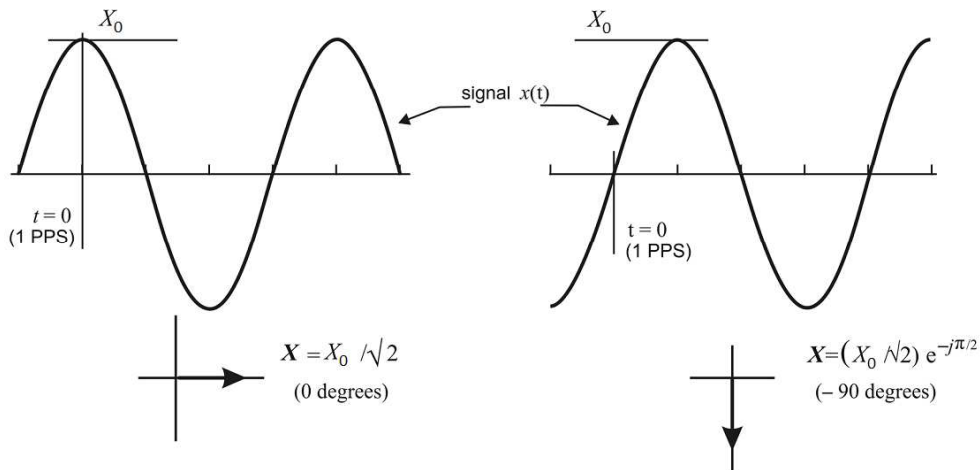


Figura 2.1: Convenzioni per la rappresentazione del sincrofasore. (Immagine tratta da IEEE std. c37.118.1-2011 [7].)

- Tasso di variazione della frequenza o ROCOF: definito come

$$\begin{aligned} ROCOF(nT) &= \frac{d}{dt} \Delta f(nT) \\ &= \frac{d}{dt} (f(nT) - f_0) \end{aligned} \quad (2.3)$$

- Errore vettoriale totale o TVE: definito come

$$\begin{aligned} TVE(nT) &= \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(nT) - X_r(nT))^2 + (\hat{X}_i(nT) - X_i(nT))^2}{X_r^2(nT) + X_i^2(nT)}} \\ &= \frac{\|\bar{X}(nT) - \hat{X}(nT)\|}{\|\bar{X}(nT)\|} \end{aligned} \quad (2.4)$$

dove  $\hat{X}(nT)$  indica il valore stimato del fasore  $\bar{X}(nT)$  e i pedici  $r$  ed  $i$  indicano rispettivamente parte reale ed immaginaria del fasore. Il TVE risulta essere la norma del vettore errore individuato tra il fasore stimato e il fasore reale normalizzata rispetto il fasore  $\bar{X}(nT)$ ;

- Errore sulla frequenza o FE: definito come

$$\begin{aligned} FE(nT) &= \left| f(nT) - \hat{f}(nT) \right| \\ &= \left| \Delta f(nT) - \hat{\Delta} f(nT) \right| \end{aligned} \quad (2.5)$$

- Errore sul ROCOF o RFE: definito come

$$RFE(nT) = \left| \frac{d}{dt} \Delta f(nT) - \frac{d}{dt} \hat{\Delta} f(nT) \right| \quad (2.6)$$

Vengono inoltre definite due classi di strumento:

- tipo P: dispositivi di protezione, caratterizzati da bassi tempi di risposta, bassa latenza e precisione limitata;
- tipo M: dispositivi a scopo di misura, hanno tempi di risposta maggiori rispetto la classe P, ma garantiscono misurazioni più accurate.

E' possibile implementare qualsiasi frequenza di report, ma devono essere previsti almeno i valori di 10, 25 e 50 frame/s per sistemi a 50 Hz.

Lo standard prescrive alcuni test per verificare la conformità del dispositivo, differenziando in base alla classe e definendo il segnale e le condizioni di prova. Vengono inoltre fornite le equazioni delle risposte attese per le verifiche in condizioni dinamiche.

Prevedendo l'impiego del dispositivo nel monitoraggio della rete elettrica nei punti di immissione e prelievo di energia, si ritiene consono dimensionare il sistema secondo le specifiche per la classe M. La protezione dei circuiti a valle dello smart meter è demandata ad appositi dispositivi.

### 2.1.1 Verifica in condizioni stazionarie

Il segnale di prova deve essere una sinusoide pura i cui parametri sono mantenuti costanti per l'intera durata della misura.

I parametri dei segnali di prova per la verifica della misura del sincrofascio sono determinati tramite la tabella 2.1, mantenendo tutti i parametri al valore di riferimento e scegliendone uno tra questi da variare entro il range specifico per la classe di strumento. Il test ha esito positivo se viene verificata la condizione indicata. Per la sola verifica sulla frequenza del segnale, viene prescritta la ripetizione della prova con temperatura ambiente di 0, 23 e 50 °C.

I parametri dei segnali di prova per la verifica della misura della frequenza e del ROCOF sono determinati tramite le tabelle 2.2 e 2.3 mantenendo tutti i parametri al valore di riferimento e selezionandone uno tra questi da variare entro il range specifico per la classe di strumento. Il test ha esito positivo se viene verificata la condizione indicata.

### 2.1.2 Verifica della larghezza di banda

L'analisi viene effettuata applicando un segnale sinusoidale modulato in ampiezza e fase secondo i parametri forniti dalla norma e definito tramite l'equazione

$$x(t) = X_0 (1 + k_x \cos(\omega t)) \cos[\omega_0 t + k_a \cos(\omega t - \pi)] \quad (2.7)$$

dove  $x_m$  rappresenta l'ampiezza del segnale,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  la pulsazione nominale,  $\omega = 2\pi f$  la pulsazione del segnale modulante e  $k_x$  e  $k_a$  rispettivamente gli indici di modulazione in ampiezza e fase.

Le misure effettuate dal dispositivo devono rispettare i limiti imposti nelle tabelle 2.4 e 2.5 e sono modellate dalle equazioni

$$\begin{aligned} x(nT) &= \left\{ X_0/\sqrt{2} [1 + k_x \cos(\omega nT)] \right\}; \angle \{ k_a \cos(\omega nT - \pi) \} \\ f(nT) &= \omega_0/2\pi - k_a(\omega/2\pi) \sin(\omega nT - \pi) \\ ROCOF(nT) &= \frac{d}{dt} \Delta f(nT) = -k_a(\omega^2/2\pi \cos(\omega nT - \pi)) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Classe P			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max TVE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz	1%
Ampiezza segnale - V	$V_{nominale}$ $V_n$	$[80; 120]\%V_n$	1%
Ampiezza segnale - I	$I_{max}$	$[10; 200] \%I_{max}$	1%
Fase del segnale	Costante o lentovariante	$\pm\pi$ rad	1%
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD)	1% ogni armonica fino la $50^\circ$	1%
Classe M			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max TVE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz, $F_s < 10$ $f_0 \pm F_s/5$ Hz, $10 \leq F_s < 25$ $f_0 \pm 5$ Hz, $F_s \geq 25$	1%
Ampiezza segnale - V	$V_{nominale}$ $V_n$	$[10; 120]\%V_n$	1%
Ampiezza segnale - I	$I_{max}$	$[10; 200]\%I_{max}$	1%
Fase del segnale	Costante o lentovariante	$\pm\pi$ rad	1%
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD)	10% ogni armonica fino la $50^\circ$	1%

Tabella 2.1: Parametri per la verifica in condizioni stazionarie della misura del sincrofasore.

### 2.1.3 Sollecitazione a rampa della frequenza di rete

L'analisi viene effettuata applicando un segnale sinusoidale modulato in frequenza secondo i parametri forniti dalla norma e definito tramite l'equazione

$$x(t) = X_0 \cos(\omega_0 t + \pi R_f t^2) \quad (2.9)$$

dove  $X_0$  rappresenta l'ampiezza del segnale,  $\omega_0 = 2\pi f$  la pulsazione nominale e  $R_f$  il ROCOF imposto.

Classe P			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max FE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz	5 mHz
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD)	1% ogni armonica fino la $50^\circ$	5 mHz
Classe M			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max FE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz, $F_s < 10$ $f_0 \pm F_s/5$ Hz, $10 \leq F_s < 25$ $f_0 \pm 5$ Hz, $F_s \geq 25$	5 mHz
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD) $F_s > 20$ $F_s \leq 20$	10% ogni armonica fino la $50^\circ$	25 mHz 5 mHz

Tabella 2.2: Parametri per la verifica in condizioni stazionarie della misura della frequenza.

Classe P			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max RFE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz	0.01 Hz/s
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD)	1% ogni armonica fino la $50^\circ$	0.01 Hz/s
Classe M			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max RFE
Frequenza del segnale	$f_{nominale}$ $f_0$	$f_0 \pm 2$ Hz, $F_s < 10$ $f_0 \pm F_s/5$ Hz, $10 \leq F_s < 25$ $f_0 \pm 5$ Hz, $F_s \geq 25$	0.01 Hz/s
Distorsione armonica	$< 0.2\%$ (THD) $F_s > 20$ $F_s \leq 20$	10% ogni armonica fino la $50^\circ$	6 Hz/s 2 Hz/s

Tabella 2.3: Parametri per la verifica in condizioni stazionarie della misura del ROCOF.

Classe P			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max TVE
$k_x = 0.1$ $k_a = 0.1 \text{ rad}$	$100\% x_n$ $f_0$	$f = [0.1, f_{max}]$ $f_{max} = \min \{F_s/10; 2\} \text{ Hz}$	3%
$k_x = 0$ $k_a = 0.1 \text{ rad}$	$100\% x_n$ $f_0$	$f = [0.1, f_{max}]$ $f_{max} = \min \{F_s/10; 2\} \text{ Hz}$	3%
Classe M			
Parametro	Condizione di riferimento	Range	Max TVE
$k_x = 0.1$ $k_a = 0.1 \text{ rad}$	$100\% x_n$ $f_0$	$f = [0.1, f_{max}]$ $f_{max} = \min \{F_s/5; 5\} \text{ Hz}$	3%
$k_x = 0$ $k_a = 0.1 \text{ rad}$	$100\% x_n$ $f_0$	$f = [0.1, f_{max}]$ $f_{max} = \min \{F_s/5; 5\} \text{ Hz}$	3%

Tabella 2.4: Parametri per la verifica della larghezza di banda: limiti sul TVE.

Classe P		
$F_s$	Max FE	Max RFE
$> 20$	60 mHz	3 Hz/s
$\leq 20$	10 mHz	0.2 Hz/s
Classe M		
$F_s$	Max FE	Max RFE
$> 20$	300 mHz	30 Hz/s
$\leq 20$	60 mHz	2 Hz/s

Tabella 2.5: Parametri per la verifica della larghezza di banda: limiti su FE e RFE per ogni scelta del segnale di prova.

Le misure effettuate dal dispositivo devono rispettare i limiti imposti nelle tabelle 2.6 e 2.7 e sono modellate dalle equazioni

$$\begin{aligned}
 x(nT) &= \left\{ X_0/\sqrt{2} \right\}; \angle \left\{ \pi R_f(nT)^2 \right\} \\
 f(nT) &= \omega_0/2\pi + R_f nT \\
 \text{ROCOF}(nT) &= R_f
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Condizione di riferimento	$R_f$	Classe	Range rampa	Max TVE
100% $x_n$ $f_0$ in un punto della rampa	$\pm 1$ Hz/s	P M	$\pm 2$ Hz $\pm \min \{F_s/5; 5\}$ Hz	1%

Tabella 2.6: Parametri per la sollecitazione a rampa della frequenza di sistema: limiti sul TVE.

Classe P			
Condizione di riferimento	Tempo di transizione	Max FE	Max RFE
100% $x_n$ fase nulla	$2/F_s$ a inizio e fine rampa	10 mHz	0.1 Hz/s
Classe M			
Condizione di riferimento	Tempo di transizione	Max FE	Max RFE
100% $x_n$ fase nulla	$2/F_s$ a inizio e fine rampa	5 mHz	0.1 Hz/s

Tabella 2.7: Parametri per la sollecitazione a rampa della frequenza di sistema: limiti su FE e RFE.

### 2.1.4 Risposta al gradino di ampiezza e fase

L'analisi viene effettuata applicando un segnale sinusoidale modulato in ampiezza o fase secondo i parametri forniti dalla norma e definito tramite l'equazione

$$x(t) = X_0 (1 + k_x f_1(t)) \cos[\omega_0 t + k_a f_1(t)] \quad (2.11)$$

dove  $X_0$  rappresenta l'ampiezza del segnale,  $\omega_0 = 2\pi f$  la pulsazione nominale,  $\omega = 2\pi f$  la pulsazione del segnale modulante,  $k_x$  e  $k_a$  rispettivamente gli indici di modulazione in ampiezza e fase e  $f_1(t)$  è definita come

$$f_1(t) = \begin{cases} 1, & \text{per } t \geq 0 \\ 0, & \text{per } t < 0 \end{cases}$$

Le misure effettuate dal dispositivo devono rispettare i limiti imposti nelle tabelle 2.8. In particolare, facendo riferimento alla figura 2.2, si definiscono:



- il tempo di risposta come intervallo temporale in cui l'accuratezza della misura si trova al di fuori dei valori accettabili;
- il ritardo di misura come tempo trascorso dall'applicazione dell'impulso affinché si ottenga una misura che superi il 50% del valore finale della transizione;
- over/undershoot come sovra e sottostima del valore finale della transizione.

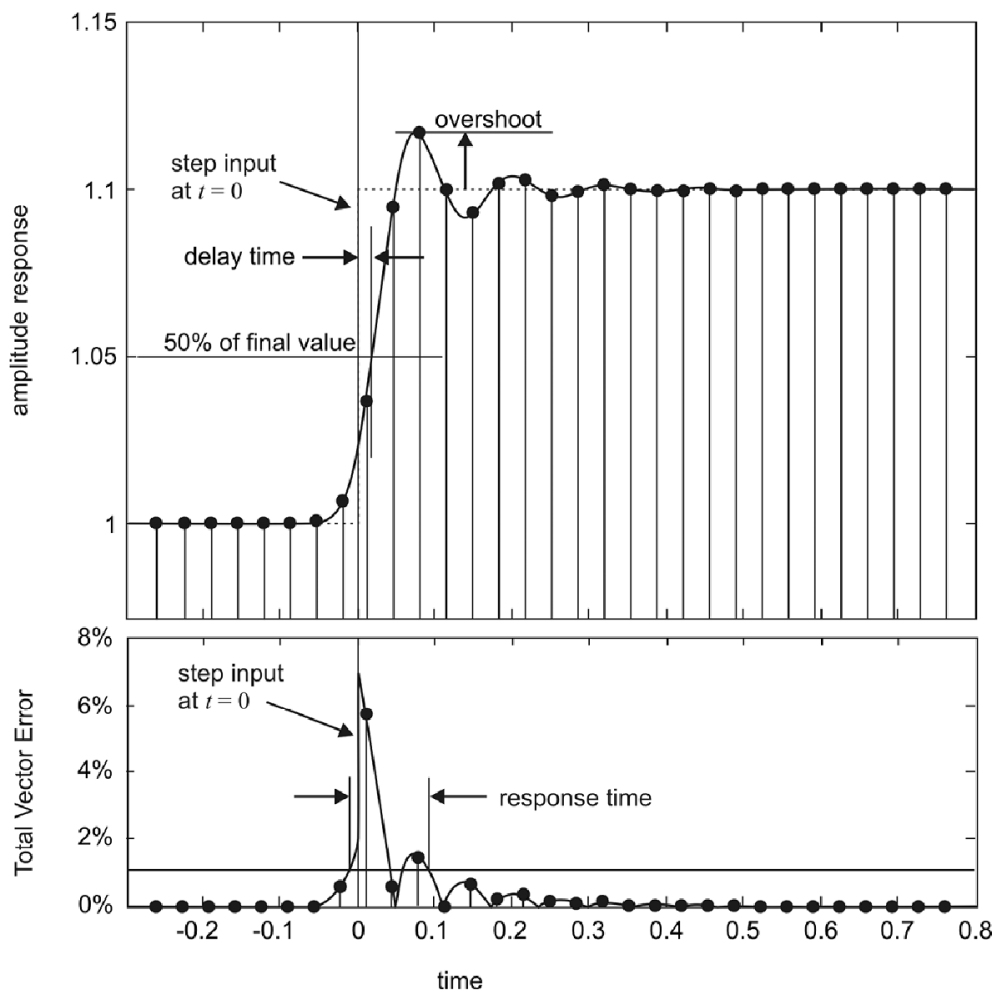


Figura 2.2: Risposta al gradino di ampiezza e andamento del TVE. I punti indicano le misure effettuate. (Immagine tratta da IEEE std. c37.118.1-2011 [7].)

Classe P				
Parametro	Condizione di riferimento	Tempo di risposta, s	Ritardo di misura, s	Max over/undershoot
$k_x = 0.1$ $k_a = 0$ rad	Tutti i valori nominali a inizio o fine step	$1.7/f_0$	$1/(4/F_s)$	5% $x_{step}$
$k_x = 0$ $k_a = 0.1$ rad	Tutti i valori nominali a inizio o fine step	$1.7/f_0$	$1/(4/F_s)$	5% $x_{step}$
Classe M				
Parametro	Condizione di riferimento	Tempo di risposta, s	Ritardo di misura, s	Max over/undershoot
$k_x = 0.1$ $k_a = 0$ rad	Tutti i valori nominali a inizio o fine step	V. Tab. 2.9	$1/(4/F_s)$	10% $x_{step}$
$k_x = 0$ $k_a = 0.1$ rad	Tutti i valori nominali a inizio o fine step	V. Tab. 2.9	$1/(4/F_s)$	10% $x_{step}$

Tabella 2.8: Parametri e limiti per la risposta al gradino.  $x_{step}$  rappresenta la variazione di  $x$

Classe M									
$F_s$	10	12	15	20	25	30	50	60	100
<b>TVE</b>	0.595	0.493	0.394	0.282	0.231	0.182	0.199	0.079	0.050
<b>FE</b>	0.869	0.737	0.629	0.478	0.328	0.305	0.130	0.120	0.059
<b>RFE</b>	1.038	0.863	0.691	0.520	0.369	0.314	0.134	0.129	0.061

Tabella 2.9: Limiti sui tempi di risposta per dispositivi in classe M. Valori in secondi.

### 2.1.5 Verifica della latenza di report

Facendo riferimento allo standard IEEE c37.118.2 - 2011 [9] è possibile determinare la costruzione del frame di dati e le modalità di comunicazione. Al fine di verificare la corretta comunicazione tra PMU e sistema di supervisione, viene richiesto di inviare almeno 1000 report, o frame, tenendo in considerazione tutti i tempi necessari affinché i dati giungano all'unità di supervisione, ripetendo la prova per tutti i framerate implementati. I valori limite sono riportati in tabella 2.10.

A titolo di esempio si calcola che, con un framerate di 50 frame/s e inviando le misure in formato floating point, il canale di comunicazione deve garantire una banda di almeno 15.2 kbps al netto di eventuali byte necessari al protocollo di comunicazione.

Classe	Massima latenza, s
P	$2/F_s$
M	$5/F_s$

Tabella 2.10: Limiti per la latenza di report.

## 2.2 CEI EN 61000

La famiglia di norme CEI EN 61000 regola le caratteristiche dei dispositivi elettrici ed elettronici in materia di compatibilità elettromagnetica. In particolare, vengono valutati gli aspetti di immunità ed emissione di disturbi, a loro volta distinti in disturbi condotti ed irradiati. Ai fini della definizione delle specifiche per lo smart meter, verranno analizzate le normative in materia di immunità ai disturbi condotti, poiché influenzano le grandezze oggetto di misura da parte del dispositivo.

### 2.2.1 CEI EN 61000-2

La sezione 2 fornisce alcune definizioni di base e, in particolare, classifica i possibili ambienti in cui si troverà ad operare il dispositivo [10],[11]:

- Classe 1: Ambiente protetto, caratterizzato da valori di disturbo inferiori alla rete a bassa tensione pubblica. Tipico di alimentazioni separate ed esercite tramite gruppi di continuità o stabilizzatori di tensione;
- Classe 2: Ambiente civile ed industriale. Caratteristico delle reti pubbliche.
- Classe 3: Ambiente industriale disturbato. Tipicamente si ha presenza di motori di grande potenza, alimentazioni con convertitori, forni di saldatura o variazioni rapide dei carichi.

Dalla natura dello strumento, si ritiene cautelativo considerare l'utilizzo in ambienti di classe 3 ottenendo un dispositivo impiegabile anche in ambienti civili o industriali che presentano livelli di disturbo inferiori. Inoltre,

il dispositivo dovrebbe essere completamente immune, garantendo quindi il funzionamento in ogni condizione, o parzialmente immune tollerando un malfunzionamento temporaneo con ripristino automatico.

### 2.2.2 CEI EN 61000-4-4

La parte 4-4 [12] definisce i livelli di immunità ai transitori veloci (burst e surge) sulla linea di alimentazione, le modalità di prova e la forma del segnale in funzione della classe ambientale scelta per il dispositivo. Viene inoltre definita una quarta classe ambientale, da intendersi come ambiente industriale fortemente disturbato.

Dalla definizione del segnale di prova, si ricava che il contenuto armonico ha valori superiori ai 5 kHz e con valori di tensione applicati superiori ad 1 kV. Lo standard IEEE c37.118 richiede di valutare le prestazioni fino alla 50° armonica della fondamentale, che risulta essere pari a 2500 Hz o 3000 Hz rispettivamente nei casi di sistemi a 50 Hz o 60 Hz. Pertanto, le prove prescritte nella norma in oggetto non sono necessarie ai fini della valutazione della bontà dello strumento, ma sono da applicarsi solo per la conformità e marcatura CE; il dispositivo dovrà quindi presentare un opportuno stadio di protezione a monte della sezione di acquisizione e di alimentazione.

### 2.2.3 CEI EN 61000-4-11

La parte 4-11 [13] definisce i livelli di immunità ai buchi di tensione, le modalità di prova e la forma del segnale in funzione della classe ambientale scelta per il dispositivo. Il buco di tensione è una improvvisa diminuzione della tensione di alimentazione, con durata e ampiezza variabile, seguita dal ripristino delle condizioni nominali. L'IEEE std. 1159-2009 [14] classifica ulteriormente gli eventi come da tabella 2.11.

La norma richiede di applicare i segnali specificati in tabella 2.12, con riferimento al segnale riportato in figura 2.3, solo per dispositivi il cui uso è previsto in ambienti di classe 2 o 3. Viene specificato di effettuare la prova ripetendo il singolo buco di tensione 3 volte, a distanza di 10 secondi, per ogni scelta dei parametri. Inoltre, è necessario applicare il test almeno per gli angoli di fase multipli di 45°.

### 2.2.4 CEI EN 61000-4-13

La parte 4-13 [15] definisce i livelli di immunità alle armoniche ed interarmoniche di tensione, le modalità di prova e la forma dei segnali in funzione

Fenomeno	Durata	Tensione residua $\%V_n$
Buco istantaneo	0.5-30 cicli	10-90
Buco momentaneo	30 cicli - 3 s	10-90
Buco temporaneo	3-60 s	10-90
Interruzione momentanea	0.5 cicli - 3 s	<10
Interruzione temporanea	3-60 s	<10
Interruzione lunga	>60 s	0

Tabella 2.11: Classificazione delle variazioni del valore RMS della tensione di alimentazione secondo IEEE std. 1159.

Fenomeno	Classe 2		Classe 3	
	Durata, cicli	Tensione residua, $\%V_n$	Durata, cicli	Tensione residua, $\%V_n$
Buco	0.5	0	0.5	0
	1	0	1	0
	10	40	10	40
	25	70	25	70
	250	80	250	80
Interruzione	250	0	250	0

Tabella 2.12: Parametri del buco di tensione per la prova di immunità.

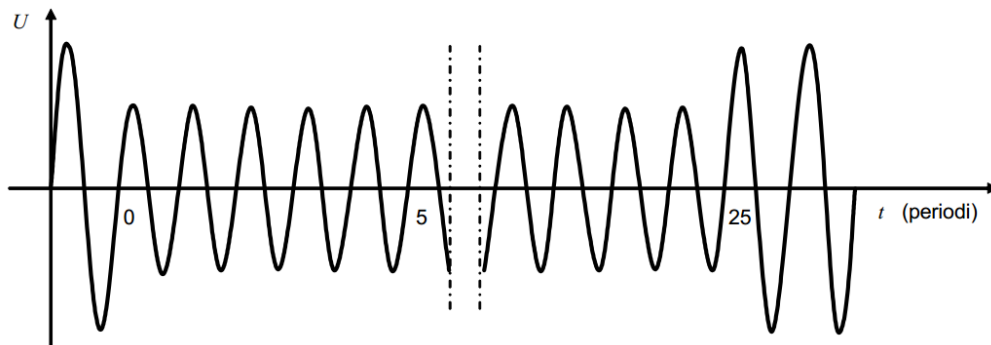


Figura 2.3: Segnale di prova per verifica di immunità ai buchi di tensione: tensione residua  $70\%V_n$  per 25 cicli. (Immagine tratta da CEI EN 61000-4-11 [13].)

della classe ambientale scelta per il dispositivo. Viene richiesto di effettuare le seguenti prove:

- Curva di Meister, che valuta l'immunità ai segnali di controllo inviati

lungo la linea di alimentazione;

- Curva piatta, una sinusoide alla quale vengono troncati i ventri come visibile in figura 2.4 nei tratti indicati come parte 2;
- Sovraoscillazione, ossia l'applicazione di una somma di sinusoidi sovrapposte come visibile in figura 2.5;
- Combinazione di armoniche;
- Spazzolamento in frequenza;

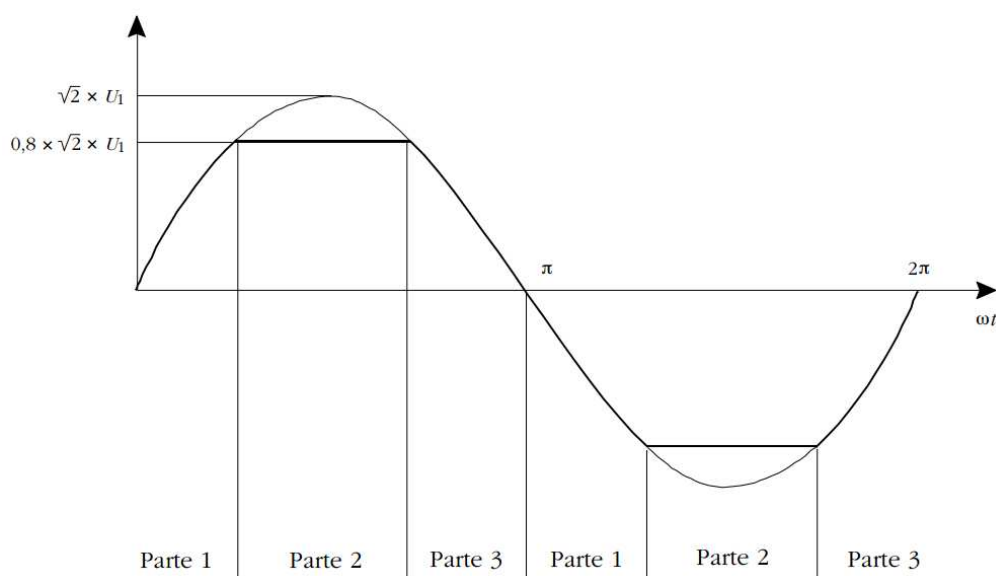


Figura 2.4: Esempio di curva piatta per la prova di immunità ad armoniche ed interarmoniche. (Immagine tratta da CEI EN 61000-4-13 [15].)

In prima analisi viene solo considerata la prova di immunità con combinazione di armoniche, applicandole secondo i valori in tabella 2.13. Non vi sono linee guida in merito alla scelta della combinazione, che è quindi da determinarsi in funzione dell'architettura hardware e software del dispositivo in esame.

### 2.2.5 CEI EN 61000-4-14

La parte 4-14 [16] definisce i livelli di immunità alle fluttuazioni di tensione, le modalità di prova e la forma dei segnali in funzione della classe ambientale scelta per il dispositivo.

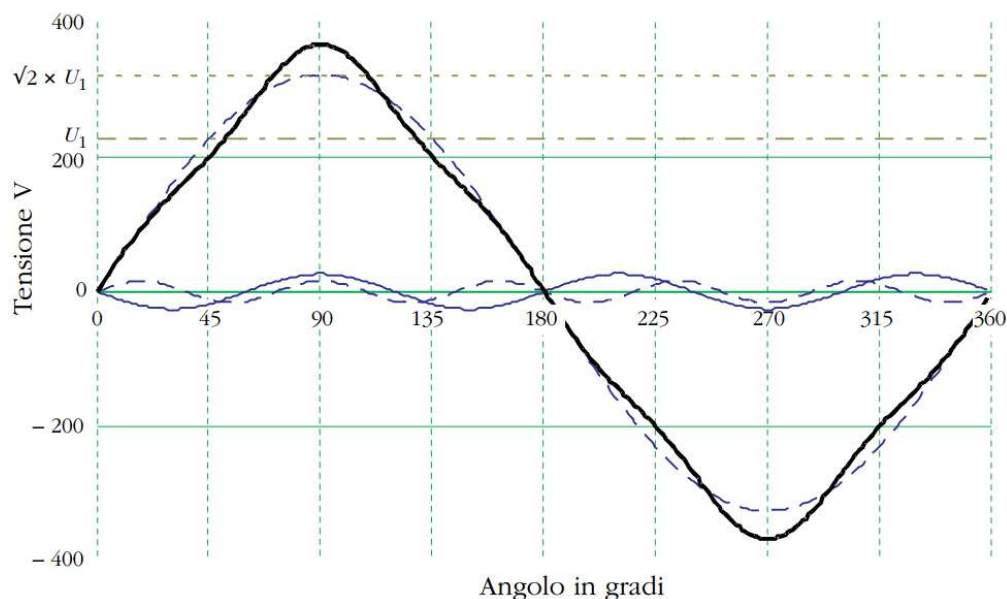


Figura 2.5: Esempio di segnale con sovraoscillazione per la prova di immunità ad armoniche ed interarmoniche. In nero la curva risultante (Immagine tratta da CEI EN 61000-4-13 [15].)

I parametri del segnale di prova sono riportati in tabella 2.14. Questo avrà l'andamento riportato nelle figure 2.6 e 2.7; si noti che il segnale è composto da una sequenza di 5 variazioni del valore RMS in 5 periodi consecutivi, applicando in ciascuno di essi una variazione lineare pari ad un quinto del valore finale, partendo dall'istante con fase di  $270^\circ$  e terminando all'istante con fase nulla.

La norma richiede di applicare i segnali specificati solo per dispositivi il cui uso è previsto in ambienti di classe 2 o 3.

### 2.2.6 CEI EN 61000-4-30

La parte 4-30 [17] definisce i parametri di power quality necessari alla valutazione di una rete di alimentazione. Per ciascuno di questi, vengono indicati i metodi di misura e le prescrizioni riguardo la strumentazione, oltre ai criteri di aggregazione e presentazione dei dati raccolti.

La norma definisce tre classi di misura:

- Classe A: Misure ad elevata precisione, tipicamente utilizzate per la verifica di conformità alle norme o per la risoluzione di controversie;

Indice armonica $h$	Ampiezza, $\%V_n$		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
1	100	100	100
2	3	3	5
3	4.5	8	9
4	1.5	1.5	2
5	4.5	9	12
6	0	0	1.5
7	4.5	7.5	10
8	0	0	1.5
9	2	2.5	4
10	0	0	1.5
11	4.5	5	7
13	4	4.5	7
15	0	0	3
17	3	3	6
19	2	2	6
21	0	0	2
23	2	2	6
25	2	2	6
27	0	0	2
29	1.5	1.5	5
31	1.5	1.5	3
33	0	0	2
35	1.5	1.5	3
37	1.5	1.5	3
39	0	0	2
pari, $10 < h \leq 40$	0	0	1.5

Tabella 2.13: Parametri per la prova di immunità alla combinazione di armoniche.

- Classe S: Misure per rilevazioni statistiche, eventualmente su un numero ristretto di parametri, o a scopo di indagine;
- Classe B: Definita per evitare l'obsolescenza di strumenti esistenti, da ritenersi non impiegabile per nuova strumentazione.

Facendo riferimento a quanto richiesto dalla normativa e sulla scorta di quanto analizzato nelle precedenti, si ritiene coerente scegliere la classe di



Tensione iniziale $V_0$ , $\%V_n$	Ampiezza variazione $\Delta V$ , $\%V_n$	
	Classe 2	Classe 3
100	$\pm 8$	$\pm 12$
90	+8	+12
110	-8	-12

Tabella 2.14: Parametri della fluttuazione di tensione per la prova di immunità.

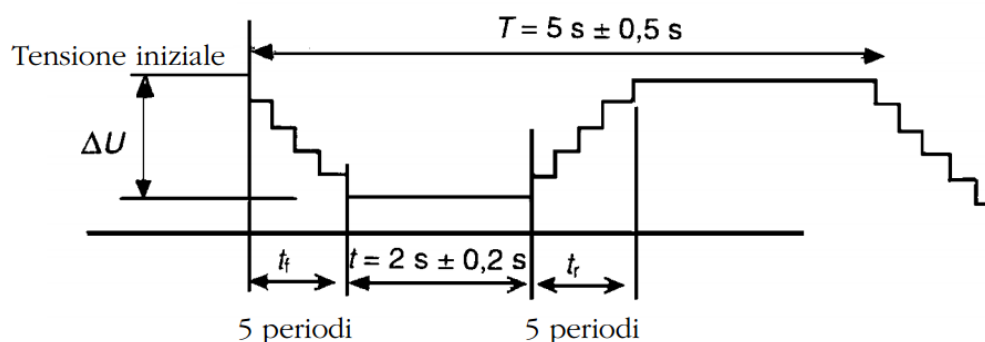


Figura 2.6: Andamento completo della fluttuazione di tensione, valori RMS. (Immagine tratta da CEI EN 61000-4-14 [16].)

misura A. Inoltre, le specifiche per tale classe risultano essere più rilassate rispetto quanto già determinato per l'immunità in ambiente di classe 3. Pertanto, realizzando un dispositivo in grado di registrare correttamente gli eventi di detta classe di immunità, si risulta conformi alla norma in esame. Relativamente alle modalità di aggregazione e presentazione dei dati, le richieste dello standard IEEE c37.118.1 sono tali da garantire la copertura della normativa.

Si rileva infine che la norma in oggetto non definisce un set completo di prove per verificare la conformità del sistema di misura, rimandando a future edizioni delle norme di prodotto.

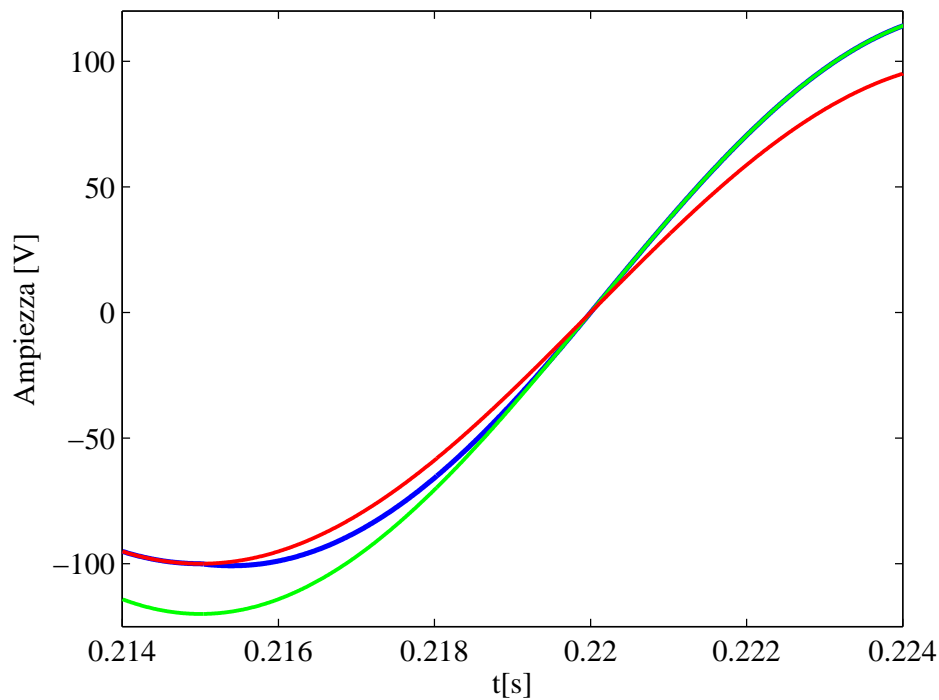


Figura 2.7: Andamento della singola parte della fluttuazione di tensione. In rosso la sinusoide di partenza, in blu la transizione e in verde la sinusoide dopo la variazione. Andamento con valori esemplificativi.

## 2.3 Standard IEEE 1459 - 2010

Lo standard IEEE 1459 [18] fornisce le definizioni ed i metodi di calcolo delle grandezze elettriche fondamentali per valutare i flussi di energia. Tali specifiche sono da tenere in considerazione nella definizione degli algoritmi di calcolo impiegati dal PMU, che dovrà utilizzare le metodologie indicate o delle equivalenti.

Non volendo appesantire la trattazione, si riportano brevemente solo alcune delle grandezze definite, rimandando allo standard per le definizioni complete e le formule.

- Regime monofase sinusoidale:
  - Potenza istantanea;
  - Potenza attiva;
  - Potenza reattiva;

- Potenza apparente;
- Potenza complessa;
- Fattore di potenza;
- Regime monofase non sinusoidale:
  - Distorsione armonica totale;
  - Potenza istantanea;
  - Potenza attiva totale, fondamentale e non fondamentale;
  - Potenza reattiva;
  - Potenza apparente totale, fondamentale e non fondamentale;
  - Fattore di potenza;
  - Fattore di potenza fondamentale;

## 2.4 Standard IEEE 1159 - 2009

Lo standard IEEE 1159 [14] definisce gli eventi di power quality che possono verificarsi in una rete elettrica di distribuzione, classificandoli in base agli effetti e alla durata temporale. Vengono inoltre indicati alcuni parametri utili per valutare la qualità dell'energia, a partire dall'acquisizione dei valori di tensione e corrente.

Viene indicato di acquisire i segnali a bassa frequenza con almeno 128 campioni per ciclo, mentre i valori RMS possono essere ricavati con finestra fissa o a scorrimento. Al fine di individuare e registrare i fenomeni transitori ad alta frequenza, viene suggerito l'uso di acquisitori veloci con frequenza di campionamento nell'ordine della decina di MHz piuttosto di impiegare rivelatori di picco resettabili a finestra stretta.

La descrizione dei fenomeni ricalca quanto specificato dalla famiglia di normative CEI EN 61000. Al fine di simulare eventi realistici, si riporta nelle tabelle 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 e 2.20 la classificazione di questi secondo lo standard.

Categoria	Contenuto spettrale	Durata	Ampiezza fenomeno $\%V_n$
Impulsivi nanosecondi microsecondi millisecondi		< 50 ns [50 ns;1 ms] > 1 ms	
Oscillatori			
Bassa frequenza	< 5 kHz	[0.3;50] ms	[0;40]
Media frequenza	[5;500] kHz	20 $\mu$ s	[0;80]
Alta frequenza	[0.5;5] MHz	5 $\mu$ s	[0;40]

Tabella 2.15: Classificazione dei transienti impulsivi e oscillatori.

Categoria	Durata	Ampiezza variazione, $\%V_n$
Istantanei		
Buco	[0.5;30] cicli	[10;90]
Innalzamento	[0.5;30] cicli	[10;80]
Momentanei		
Interruzione	[0.5 cicli;3 s]	>90
Buco	[30 cicli;3 s]	[10;90]
Innalzamento	[30 cicli;3 s]	[10;40]
Temporanei		
Interruzione	[3;60] s	>90
Buco	[3;60] s	[10;90]
Innalzamento	[3;60] s	[10;20]

Tabella 2.16: Classificazione delle variazioni brevi del valore RMS.

Categoria	Durata	Ampiezza variazione, $\%V_n$
Temporanei		
Interruzione	>60 s	100
Sottotensione	>60 s	[10;20]
Sovratensione	>60 s	[10;20]
Sovracorrente	>60 s	

Tabella 2.17: Classificazione delle variazioni sostenute del valore RMS.

<b>Categoria</b>	<b>Contenuto spettrale</b>	<b>Durata</b>	<b>Ampiezza fenomeno, %<math>V_n</math></b>
C. continua		Stazionario	<0.1
C. armoniche	[0;9] kHz	Stazionario	[0;20]
C. interarmoniche	[0;9] kHz	Stazionario	[0;2]
Rumore	Banda larga	Stazionario	[0;1]

Tabella 2.18: Classificazione delle distorsioni della forma d'onda distinta per componenti.

<b>Categoria</b>	<b>Contenuto spettrale</b>	<b>Durata</b>	<b>Ampiezza variazione, %<math>V_n</math></b>
Fluttuazioni	<25 Hz	intermittente	[0.1;7]

Tabella 2.19: Classificazione delle fluttuazioni di tensione.

<b>Categoria</b>	<b>Durata</b>	<b>Ampiezza variazione, Hz</b>
Variazione $f$ rete	<10 s	$\pm 0.1$ Hz

Tabella 2.20: Classificazione delle variazioni della frequenza di rete.

## 2.5 Ulteriori normative e standard

Sono state consultate anche le seguenti normative in materia di misuratori di energia e caratteristiche della tensione di rete:

- CEI 0-21. Regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica. [19];
- CEI EN 50160. Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica [20];
- CEI EN CEI EN 60044-7. Trasformatori di misura - Parte 7: Trasformatori di tensione elettronici [21];
- CEI EN 60044-8. Trasformatori di misura - Parte 8: Trasformatori di corrente elettronici [22];
- CEI EN CEI EN 62052-11. Apparat per la misura dell'energia elettrica (a.c.) - Prescrizioni generali, prove e condizioni di prova - Parte 11: Apparato di misura [23];
- CEI EN 62052-21. Apparat per la misura dell'energia elettrica (a.c.) - Prescrizioni generali, prove e condizioni di prova - Parte 21: Apparat per il controllo delle tariffe e del carico [24];
- CEI EN 62053-21. Apparat per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 21: Contatori statici di energia attiva (classe 1 e 2) [25];
- CEI EN 62053-22. Apparat per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 22: Contatori statici di energia attiva (classe 0,2S e 0,5S) [26];
- CEI EN 62053-23. Apparat per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 23: Contatori statici di energia reattiva (classe 2 e 3) [27].

L'analisi ha rilevato specifiche meno stringenti rispetto quanto richiesto dalle norme già visionate o non attinenti allo stato attuale della progettazione del PMU ma di cui tenere conto, ad esempio, durante la definizione della circuiteria di acquisizione ed elaborazione o in fase di dimensionamento dell'interfaccia di misura lato rete.

# Capitolo 3

## Sistema di test

### Introduzione

Una volta definite le specifiche del PMU, è necessario avere a disposizione un sistema in grado di emulare le condizioni operative, per poter verificare la corrispondenza a quanto prescritto e ricavare informazioni sulle performance, eventualmente analizzando le singole parti del misuratore.

L'idea è di sottoporre al PMU un segnale di test ed acquisire opportunamente sia il segnale generato, sia le misure effettuate dal dispositivo. Una successiva elaborazione dei campioni in ambiente di calcolo, che può sfruttare ulteriori informazioni quali la conoscenza a priori delle caratteristiche del segnale di test e segnali di sincronia, e che quindi può impiegare algoritmi con maggiore complessità e miglior precisione, restituirà un insieme di misure che infine saranno confrontate con quanto restituito dal PMU per verificare la corrispondenza alle specifiche. Il tutto deve garantire la ripetibilità e la tracciabilità della prova.

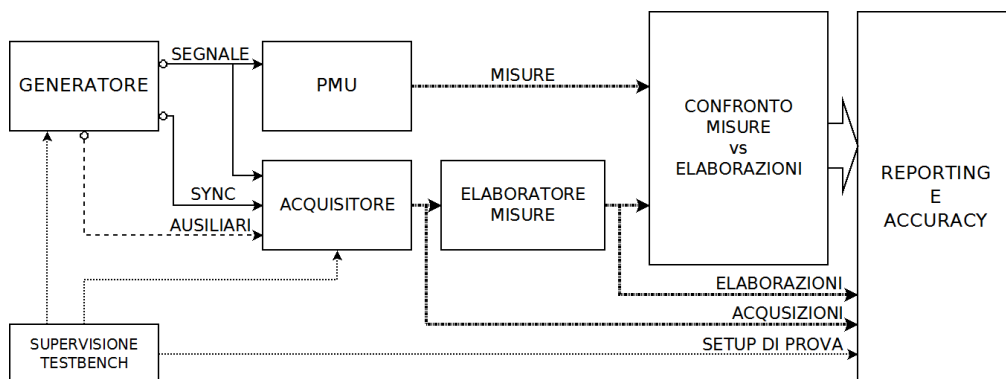


Figura 3.1: Schema di principio del sistema di test.

In questo capitolo viene presentato il banco di prova, suddividendo la trattazione in parte hardware, dove saranno illustrati gli strumenti impiegati e i collegamenti tra questi, e parte software relativa all'applicazione di controllo, relazionandone l'architettura e le funzionalità.

## 3.1 Realizzazione hardware

### 3.1.1 Strumentazione utilizzata

La generazione dei segnali di prova avviene impiegando, ove possibile, una coppia di generatori di funzione in configurazione modulatore-modulante, che garantisce un maggior controllo su quanto erogato al PMU, ripiegando su segnali definiti arbitrariamente o su generatori specifici negli altri casi. La verifica dei segnali è eseguita tramite indagine con oscilloscopio e analizzatore di spettro, mentre il campionamento è effettuato da una scheda DAQ. Si riportano di seguito le caratteristiche principali degli strumenti utilizzati.

#### Generatore Agilent 33220A

L'Agilent 33220A visibile nella figura 3.2 è un generatore di funzioni fino a 20 MHz con capacità di generare funzioni arbitrarie [28]. Ne vengono impiegati due realizzando la maggior parte dei segnali di test, prediligendo la configurazione modulatore-modulante, ossia un primo strumento genera il segnale portante a 50 Hz e lo modula opportunamente con il segnale modulante fornito dal secondo, rispetto la generazione di segnali arbitrari dove questi sono definiti per punti, inseriti nella memoria di generazione dello strumento e inviati opportunamente al convertitore digitale/analogico di uscita. Le principali caratteristiche di interesse per il banco di prova sono:

- Modulatore AM con profondità di modulazione tra lo 0 e il 120%;
- Modulatore FM con deviazione da DC fino 10 MHz;
- Modulatore PM con deviazione da 0° a 360°;
- Possibilità di impiegare un segnale modulante esterno fino a 20 kHz;
- Generazione di treni d'onde selezionabili;
- Sintesi di segnali a 14 bit e fino a 50 MSample/s;



- Composizione di forme d'onda con massimo 64000 punti;
- Possibilità di costruzione remota dei segnali arbitrari;
- Disponibilità di un segnale digitale di sincronia;
- Possibilità di generazione su richiesta tramite trigger;
- Interfacce di comunicazione GPIB, USB, LAN e supporto dei comandi SCPI;
- Possibilità di ottenere la completa configurazione dello strumento;
- Distorsione armonica totale 0.04%;
- Risoluzione in frequenza 1  $\mu$ Hz;

### Generatore HP 8904A

L'HP 8904A visibile nella figura 3.3 è un generatore di funzioni fino a 600 kHz con capacità di combinare variamente tra loro fino a 4 distinti segnali generati internamente [29]. Viene impiegato per la generazione dei segnali per la verifica della larghezza di banda prevista dallo standard IEEE c37.118.1. Le principali caratteristiche di interesse per il banco di prova sono:

- Modulatore AM con profondità di modulazione tra lo 0 e il 100%;
- Modulatore FM con deviazione da DC fino 600 kHz;
- Modulatore PM con deviazione da 0° a 180°;
- Possibilità di modulare contemporaneamente con un massimo di 3 modulazioni distinte la stessa portante;
- Disponibilità di segnali digitali di sincronia per tutti i generatori interni;
- Interfaccia di comunicazione HP-IB e supporto dei comandi SCPI;
- Distorsione armonica totale 0.07%;
- Risoluzione in frequenza 100 mHz;



Figura 3.2: Pannelli frontale e posteriore del generatore Agilent 33220A.



Figura 3.3: Pannello frontale del generatore HP 8904A .

### Oscilloscopio Agilent MSO6012A

L'Agilent MSO6012A visibile nella figura 3.4 è un oscilloscopio a segnali misti in grado di visualizzare 2 tracce analogiche e fino a 16 tracce digitali [30]. Viene impiegato per verificare la corretta generazione dei segnali di test e la precisione dei segnali di sincronia. Ne è previsto l'impiego anche in supporto alla redazione di rapporti di prova, ad esempio acquisendo immagini dei segnali impiegati, e per il controllo in tempo reale da parte dell'utente del test in corso.

Lo strumento è stato anche utilizzato per ricavare la FFT dei segnali generati ed effettuare quindi una prima verifica sul contenuto spettrale di questi, riservandosi di eseguire indagini più accurate e notoriamente più lunghe con un analizzatore di spettro.

Le principali caratteristiche di interesse per il banco di prova sono:

- 2 canali analogici;
- 16 canali digitali suddivisi in due gruppi;
- Trigger impostabile su tutti i canali oltre alla sorgente esterna dedicata;
- Banda a -3 dB 100 MHz;

- Campionamento fino a 2 GSample/s;
- Risoluzione verticale a 8 bit per i canali analogici;
- Risoluzione orizzontale 2.5 ps;
- Impedenza di ingresso 1 M $\Omega$ ;
- Interfacce di comunicazione GPIB, Lan, USB;
- Slot USB per memorie esterne;
- Funzioni matematiche tra cui FFT.

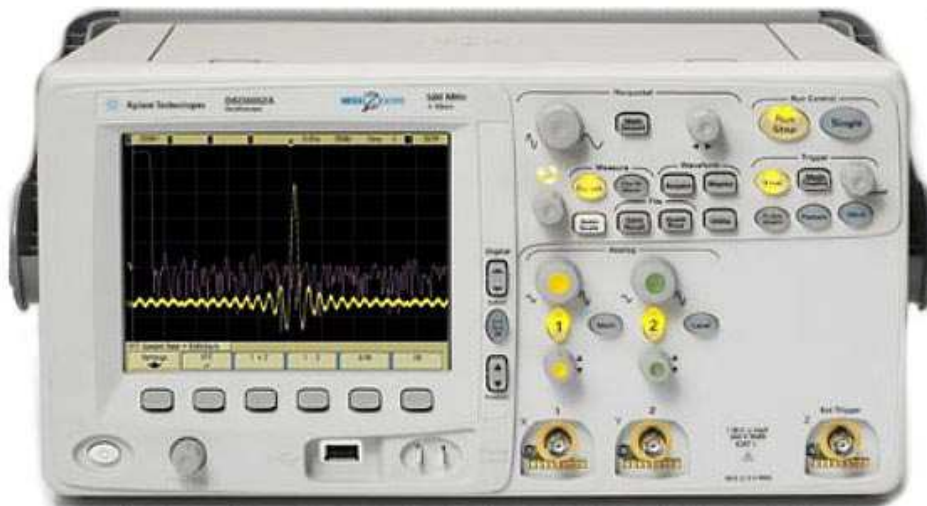


Figura 3.4: Vista frontale dell'oscilloscopio Agilent MSO 6012A.

### **Analizzatore di spettro Tektronix RSA3408B**

Il Tektronix RSA3408B visibile nella figura 3.5 è un analizzatore di spettro in tempo reale [31]. Lo strumento è stato impiegato per l'analisi spettrale approfondita dei segnali di test, principalmente come analizzatore realtime e come demodulatore; non ne è previsto l'impiego nel setup di prova.

Le principali caratteristiche di interesse per il banco di prova sono:

- Analisi spettrale da DC a 8 GHz;
- Span da 100 Hz a 3 GHz;

- Risoluzione da 1 Hz a 10 MHz;
- Analisi di segnali intermittenti tramite spettrogramma;
- Analisi di modulazioni analogiche e digitali;

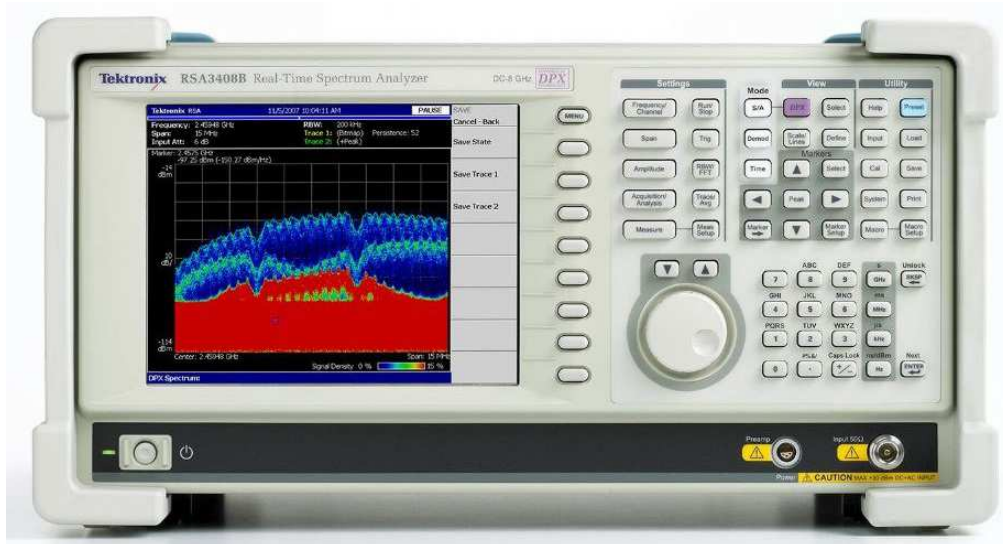


Figura 3.5: Pannello frontale dell'analizzatore Tektronix RSA3408B.

### Scheda NI DAQmx 6211

La scheda National Instruments DAQmx 6211 è un front-end in grado di acquisire segnali analogici e digitali, trasferendo poi i campioni via bus USB [32]. L'acquisitore è stato impiegato per campionare i segnali di prova e le relative sincronie.

Le principali caratteristiche di interesse per il banco di prova sono:

- 16 input analogici, configurabili per 8 canali differenziali;
- 4 input digitali;
- 2 output analogici a 16 bit;
- 4 output digitali;
- 2 contatori a 32 bit;
- Campionamento fino a 250 kSample/s;

- Buffer interno configurabile;
- Input range fino a  $\pm 10$  V;
- Alimentazione tramite bus USB.

### 3.1.2 Schema di collegamento

#### Generatori

Il collegamento dei generatori Agilent 33220A in configurazione modulatore-modulante, con riferimento allo schema in figura 3.6, avviene collegando all'ingresso *Modulation in* del modulatore il segnale modulante proveniente dall'*Output* del secondo generatore e il segnale *Sync* del modulatore all'ingresso *Trigger in* del generatore modulante. Così facendo, si ha la sincronizzazione della fase del segnale modulante con il segnale portante. La configurazione del modulatore prevede l'impostazione del segnale portante e la selezione del tipo di modulazione, abilitando infine il segnale di sincronia. Quest'ultimo è anche utilizzabile come abilitazione per il secondo generatore. Il segnale di prova generato è reso disponibile al morsetto *Output* del modulatore.

Il generatore HP 8904A è completamente indipendente e non richiede pertanto collegamenti con altri strumenti. Il canale A viene impiegato come portante; canali B e C sono usati come modulanti principale e secondaria; resta a disposizione il canale D. Il segnale di uscita è prelevabile dal connettore *Output 1 high*, mentre i segnali di sincronia sono disponibili sul connettore DA-15 *Digital Port* di cui si riporta la piedinatura in tabella 3.1.

L'impostazione dei generatori verrà discussa nella sezione 3.2.3.

Pin	Funzione	Pin	Funzione
1	Zero crossing A	9	Circuit GND (Digitale)
2	Polarity A	10	Hop Reg. Addr. 3
3	Zero crossing B	11	Hop Reg. Addr. 2
4	Polarity B	12	Hop Reg. Addr. 1
5	Zero crossing C	13	Hop Reg. Addr. 0
6	Polarity C	14	Trigger In
7	Zero crossing D	15	Trigger Out
8	Polarity D	Case	GND (Analogica)

Tabella 3.1: Piedinatura del connettore DA-15 *Digital port* del generatore HP8904A.

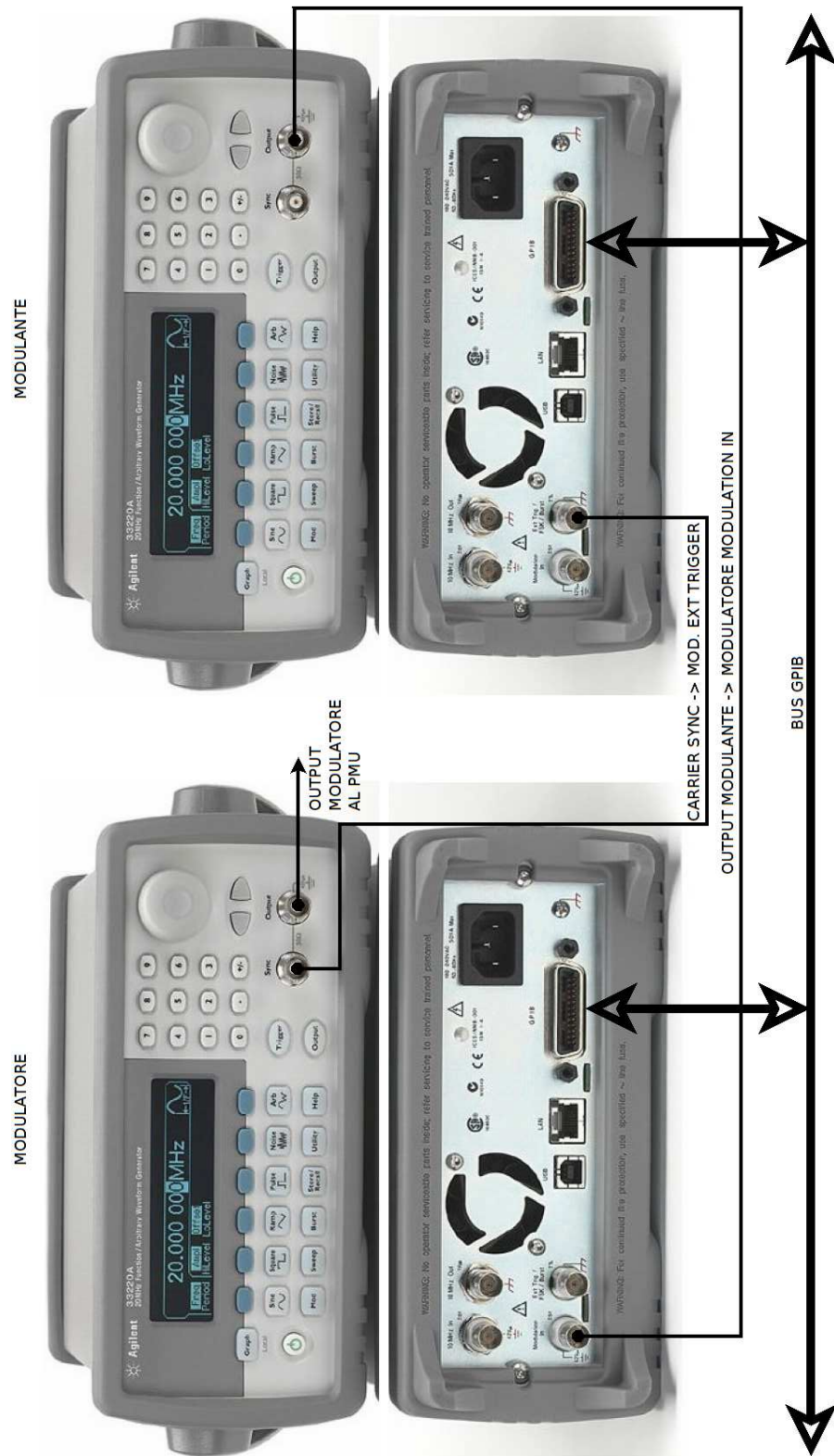


Figura 3.6: Collegamento in modalità modulatore-modulante dei generatori Agilent 33220A.

## Acquisizione

La scheda NI DAQmx 6211 viene utilizzata in modalità di acquisizione differenziale, nonostante il collegamento a terra dei generatori, per migliorare la qualità del campionamento. Sono acquisiti segnali analogici e digitali, collegando questi ultimi anche ai contatori interni per monitorare il numero di ripetizioni della prova.

Facendo riferimento alla figura 3.7, vengono collegati agli ingressi analogici i seguenti segnali:

- Output modulatore Agilent 33220A;
- Sync modulatore Agilent 33220A;
- Output modulante Agilent 33220A;
- Sync modulante Agilent 33220A;
- Output generatore HP 8904A;
- Zero-crossing generatore HP 8904A, canale B;
- Polarity generatore HP 8904A, canale B;

Vengono inoltre collegati agli ingressi digitali i seguenti segnali:

- Sync modulatore Agilent 33220A;
- Sync modulante Agilent 33220A;
- Polarity generatore HP 8904A, canale B;

Restano disponibili 1 ingresso digitale, 4 uscite digitali, 1 ingresso analogico, 2 uscite analogiche.

## Bus di controllo

La scelta del sistema di comunicazione tra strumenti e applicazione di controllo è ricaduta sul bus GPIB, standard IEEE 488. Tale bus presenta diffusione tra la strumentazione, robustezza, facilità di impiego, elevata compatibilità e non da ultimo costo contenuto. Inoltre, volendo utilizzare una interfaccia comune a tutti gli strumenti utilizzati, la scelta è stata pressoché obbligata.

Il collegamento avviene in *daisy chain* impiegando possibilmente cavi schermati. Sono permessi fino ad un massimo di 15 nodi e la velocità di



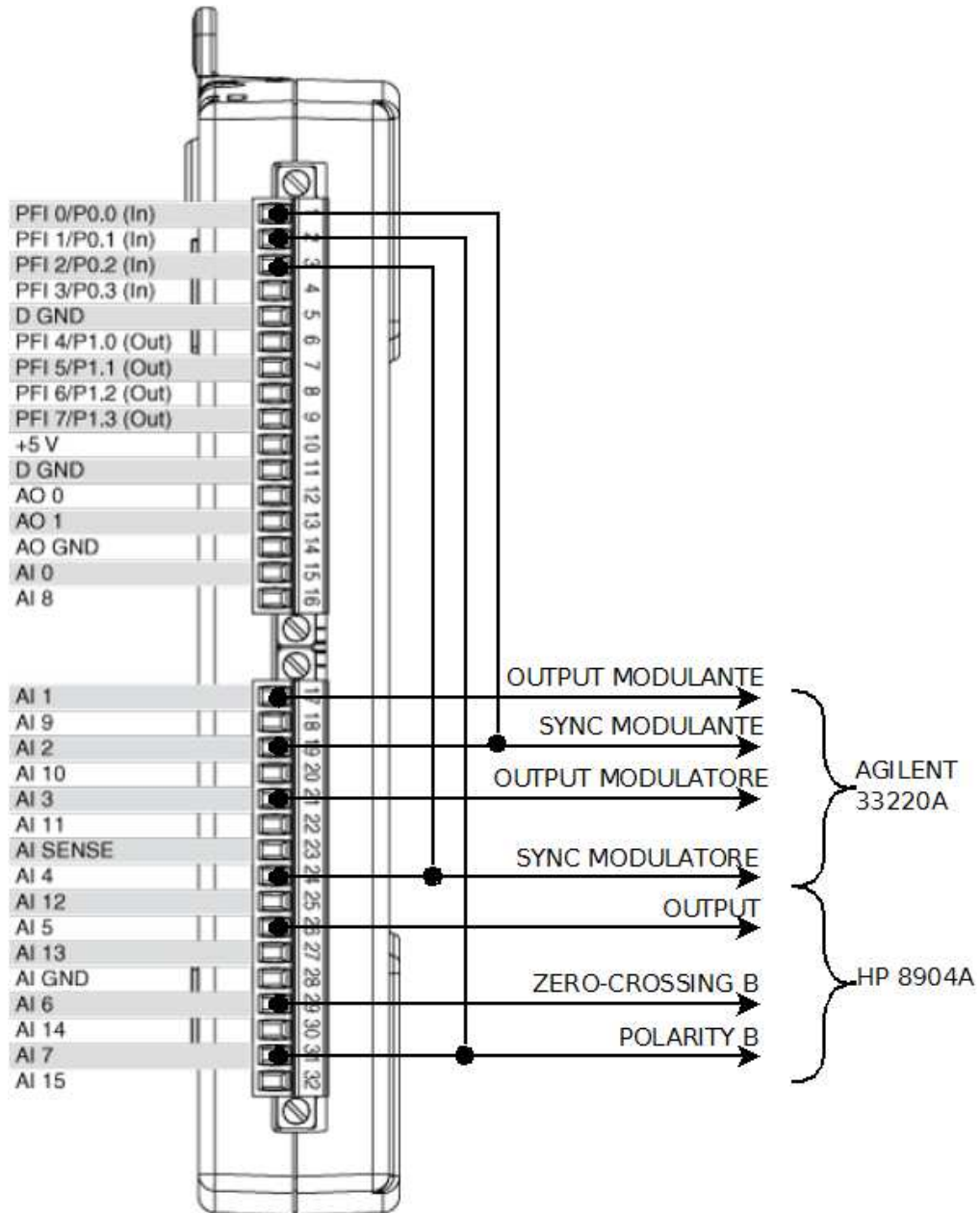


Figura 3.7: Collegamenti alla morsettiera della scheda NI DAQmx 6211.

comunicazione è pari a 8 Mbyte/s, largamente sufficiente per gli scopi di supervisione e controllo ma non abbastanza performante per utilizzi quali l'acquisizione di segnali.

Come verrà illustrato nella sezione 3.2.3, la scelta effettuata non è vincolante per futuri sviluppi del testbench.

## 3.2 Realizzazione software

### 3.2.1 Ambiente NI LabView

LabVIEW è l'ambiente di sviluppo per il linguaggio di programmazione grafico G di National Instruments. Nato nel 1986, esprime il suo massimo potenziale nell'acquisizione e analisi di dati, gestione di strumentazione, controllo di processi e, in generale, nell'ambito dell'automazione industriale. I programmi sviluppati in LabVIEW sono denominati *Virtual Instruments* o, in breve, VI: ciascuno di questi è costituito da un pannello frontale contenente variabili di ingresso e uscita, detti rispettivamente controlli e indicatori, un diagramma e un connettore. I sottoprogrammi sono visualizzati nel diagramma chiamante come un'icona, al cui connettore vengono collegati i fili che trasportano i dati. Il diagramma risultante è una sorta di schema a blocchi redatto mettendo in evidenza il flusso dei dati, che semplifica di molto la stesura, la gestione e il riutilizzo del codice.

Peculiarità dell'ambiente LabVIEW è la creazione dell'interfaccia utente, sotto forma di pannello frontale, contestualmente alla scrittura del programma. Inoltre vi è una nutrita libreria di funzioni, tra cui spiccano i driver per la gestione della strumentazione. È inoltre possibile ottenere un file eseguibile che richiede la sola presenza dell'ambiente runtime di LabVIEW.

Per i motivi esposti, LabVIEW è risultata la scelta migliore tra gli ambienti di sviluppo.

### 3.2.2 Analisi funzionale

Il software di gestione dovrà rispettare alcuni requisiti di funzionalità nei confronti dell'utente e verso lo sviluppatore che dovesse implementare nuove analisi.

Relativamente all'utente si individuano i seguenti requisiti:

- Interfaccia semplice e intuitiva: l'utente deve essere facilitato nell'utilizzo del programma, dopo aver consultato una breve guida all'uso;

- Ripetizione dei test: le analisi devono poter essere condotte ripetutamente in modo automatico;
- Ripetizione del test variando, con step a scelta, un parametro del test stesso: deve essere possibile l'esplorazione delle performance del PMU in funzione dei parametri di influenza;
- Redazione di report con la configurazione completa del testbench: la ripetibilità delle prove e la tracciabilità di queste è un punto fondamentale per la qualificazione di un dispositivo;
- Valori acquisiti in formato CSV: tale formato è standard e utilizzabile facilmente da qualsiasi ambiente di calcolo per una successiva rielaborazione;
- Visualizzazione dell'avanzamento del test: l'utente deve essere informato in merito allo stato dell'analisi, in modo da poter stimare i tempi di esecuzione e verificare contestualmente se vi sono condizioni anomale.

Riguardo lo sviluppatore si individuano i seguenti requisiti:

- Riutilizzabilità del codice;
- Struttura gerarchica dei sub-VI;
- Facilità di modifica e adattamento a strumentazione differente;
- VI comuni a più configurazioni devono essere contenuti in librerie;
- Controlli del pannello frontale specificati tramite tipi definiti.

### 3.2.3 Architettura software

Il software di gestione del test è strutturato ad albero e i sub-VI sono categorizzati nel seguente modo:

- Modulanti e Portanti: eseguono la configurazione dei generatori Agilent 33220A;
- StandAlone: eseguono la configurazione del generatore HP 8904A;
- OneShot: configurano tutti i generatori del test e redigono il report contenente la configurazione;

- **Acquisizione:** permettono di configurare l'acquisizione, inoltre si occupano di salvare su file i campioni e visualizzano l'andamento del test. Redigono il report sulla configurazione della scheda di acquisizione;
- **Sweep:** eseguono il test, con o senza variazione sui parametri, e lanciano l'acquisizione dei segnali;
- **Utility generiche:** Libreria di funzioni impiegate da sub-VI appartenenti a più categorie o richiamate dal main.

L'esecuzione di una analisi, con riferimento alla figura 3.8, quindi, parte dal main con la verifica degli strumenti e la raccolta dei parametri; viene richiamato il sub-VI appropriato dalla categoria sweep ed entro questo si esegue la configurazione dei generatori, passando poi a configurare l'acquisizione e infine campionando il segnale. La chiamata dei VI avviene da un livello al livello immediatamente più interno.

Tanto più le categorie sono interne, tanto più queste sono vicine alla strumentazione. Risulta chiaro che le classi *Modulanti*, *Portanti* e *StandAlone* sono specifiche per la strumentazione impiegata e devono pertanto essere modificate o sostituite nel caso si impieghino generatori differenti; la gestione dell'acquisizione, impiegando hardware National Instruments, non richiede modifiche.

Per tutte le categorie elencate possono essere presenti sub-VI specifici.

La comunicazione con gli strumenti avviene su bus GPIB secondo il protocollo VISA, cosicché la scelta di un bus diverso non comporta la modifica di tutti i VI.

Tutti i controlli impiegati nel progetto, avendo limiti sui valori accettabili e sulla risoluzione di questi, sono definiti appositamente e raccolti nella libreria "Tipi definiti".

Nelle sezioni seguenti verrà illustrata la struttura dei VI principali.

## Gestione acquisizione

Il VI principale è denominato *Acquire and log* e richiede tramite pannello frontale la configurazione dell'acquisizione. Si avvale del VI *Acq task config* per la creazione del task di acquisizione e richiama il VI *start log visualize* che si occupa di far partire il campionamento, rendere i dati a video, visualizzare l'avanzamento del test in corso e salvare su file TDMS e/o CSV i campioni.

Sono impiegati inoltre alcuni VI di appoggio per resettare la scheda di acquisizione e redigere il report contenente la configurazione della scheda.

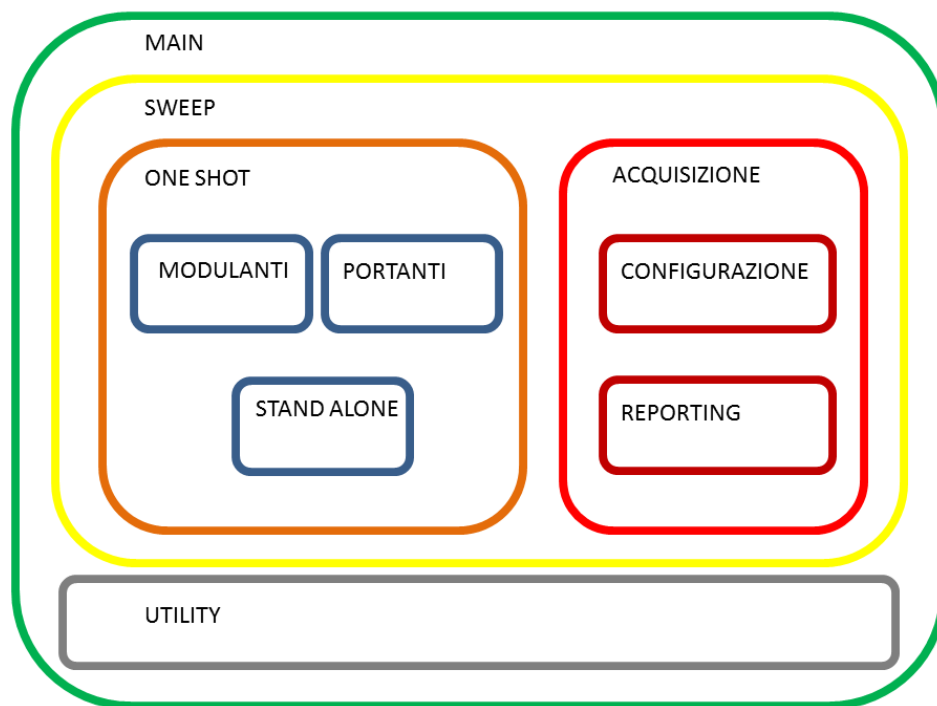


Figura 3.8: Organigramma delle classi di VI realizzate. La chiamata avviene sempre e solo da un livello a quello immediatamente più interno, con l'eccezione della classe utility.

I file di report hanno estensione txt e vengono nominati secondo il formato  $\langle \text{denominazione test} \rangle \text{DAQconfig Run } \langle X \rangle \text{ of } \langle Y \rangle \langle \text{Time Code} \rangle .\text{txt}$ , permettendo quindi di risalire facilmente al test cui si fa riferimento, a quale passo dell'eventuale sweep e ovviamente la data di esecuzione.

I campioni ottenuti sono inseriti in file TDMS (Technical Data Management Streaming), un formato proprietario di National Instruments che permette una migliore gestione della scrittura e una minore occupazione su disco. Vi è la possibilità di convertire automaticamente detto file in formato CSV, facendo corrispondere le colonne a quanto specificato nella configurazione, mantenendo comunque il file di partenza. Entrambi questi file sono nominati nel formato  $\langle \text{denominazione test} \rangle \text{ Run } \langle X \rangle \text{ of } \langle Y \rangle \langle \text{Time Code} \rangle .\text{tdms/csv}$ . Si è ritenuto utile forzare la scrittura su disco dei campioni acquisiti, invece di demandarne al sistema operativo la gestione, per tutelarsi nei confronti di interruzioni impreviste della misura.

La ripetizione del test viene controllata tramite i contatori integrati sulla scheda DAQmx 6211, collegandoli al segnale di sincronia appropriato e iniziando il conteggio al primo evento di sincronia, assicurandosi in questo modo di eseguire interamente il test. Il segnale precedente all'inizio del primo evento viene comunque salvato e può essere facilmente gestito in fase di post-elaborazione. Lo sweep dei parametri non necessita di ridefinire i controlli dell'acquisizione ad ogni passo, che vengono quindi riutilizzati. Si richiede solo di impostare opportunamente i controlli *First run* e *Last run* secondo la tabella 3.2.

First run	Last run	Casistica Passo x di y
False	False	$1 < x < y$ , passo intermedio
False	True	$x = y$ , ultimo passo
True	False	$x = 1$ , primo passo
True	True	$x = y = 1$ , singola esecuzione

Tabella 3.2: Impostazione dei controlli *First run* e *Last run*.

### IEEE c37.118.1 - Risposta al gradino di ampiezza e fase

La configurazione dei generatori avviene tramite i VI *TestStepAM* e *TestStep-PM* utilizzando i sub-VI della categoria portanti *AM carrier setup* e *PM carrier setup* rispettivamente, ed il sub-VI *Step modulation setup* della classe modulanti.

Vi è la possibilità di bloccare la generazione della modulante agendo sul controllo *Sync free run*, abilitandola successivamente con il sub-VI *Sync out enable*.

Il modulatore è impostato per utilizzare una portante sinusoidale, segnale modulante esterno e modulazione AM. Il segnale modulante viene generato come burst di gradini, permettendo di scegliere il numero di questi, consentendo di applicare a diversi angoli di fase il gradino e verificare quindi una eventuale influenza di questa sulla risposta del dispositivo. La durata dei singoli impulsi è fissata a 1 secondo per garantire al PMU tempo sufficiente per rispondere alla variazione e la generazione è abilitata tramite trigger.

In entrambi i casi viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato c37 StepAM(StepPM) INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

I VI descritti sono a loro volta inseriti insieme con il VI *Acquire and log* nei VI *SweepTestStepAM* e *SweepTestStepPM*; questi costruiscono l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### IEEE c37.118.1 - Condizioni stazionarie

La configurazione del generatore avviene tramite il VI *TestSteadystate* utilizzando il sub-VI della categoria portanti *AM carrier setup*, visto nella sezione 3.2.3, imponendo una profondità di modulazione nulla e bloccando il segnale di sincronia.

Anche in questo caso viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato c37 Steadystate INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

Il VI descritto è a sua volta inserito con il VI *Acquire and log* nel VI *Steadystate*; questo costruisce l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### IEEE c37.118.1 - Verifica della larghezza di banda

La configurazione del generatore avviene tramite il VI *TestBW AM PM* utilizzando il sub-VI della categoria stand alone *BW AM PM setup*.

Il segnale AM può essere disattivato tramite il controllo *AM Toggle*, permettendo quindi di scegliere tra le prove con le modulazioni AM e PM o solo PM.

Il canale A funge da portante, mentre i canali B e C generano i segnali modulanti per le modulazioni rispettivamente PM e AM.

In entrambi i casi viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato c37 BWPM(AM) INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

Il VI descritto è a sua volta inserito con il VI *Acquire and log* nel VI *SweepTestBW AM PM*; questo costruisce l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### **IEEE c37.118.1 - Sollecitazione a rampa della frequenza di rete**

La configurazione dei generatori avviene tramite i VI *TestFMRamp* e *TestArbRamp* utilizzando il sub-VI della categoria portanti *FM carrier setup*, ed i sub-VI *Ramp modulation setup* e *ARB Ramp modulation setup* della classe modulanti. Il segnale modulante gestito dal sub-VI *ARB Ramp modulation setup*, in particolare, è un segnale arbitrario definito per punti. La configurazione del segnale avviene tramite il sub-VI *ARB ramp download* che invia il vettore di definizione avvalendosi del sub-VI *ARB ramp points* per il calcolo dei punti e di alcuni driver di gestione dello strumento. Con riferimento a questi ultimi, si è rilevato che la versione fornita da National Instruments non risulta funzionante ed è stata pertanto riscritta correggendone gli errori.

Vi è la possibilità di bloccare la generazione della modulante agendo sul controllo *Sync free run*, abilitandola successivamente con il sub-VI *Sync out enable*.

Il modulatore è impostato per utilizzare una portante sinusoidale, segnale modulante esterno e modulazione FM. Il segnale modulante viene generato come burst per avvalersi della generazione tramite trigger.

In entrambi i casi viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato c37 FMRamp(ARBRamp) INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

I VI descritti sono a loro volta inseriti con il VI *Acquire and log* nei VI *SweepTestFMRamp* e *SweepTestARBRamp*; questi costruiscono l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.



### CEI EN 61000 - Immunità ai buchi di tensione

La configurazione del generatore avviene tramite il VI *TestAmplitudeDips* utilizzando il sub-VI della categoria portanti *Dips setup 61k*. Data la natura del segnale di prova, si è preferito definirlo per punti e trattarlo come segnale arbitrario. La configurazione avviene tramite il sub-VI *Dips ARB download* che invia il vettore di definizione avvalendosi del sub-VI *Dips ARB points* per il calcolo dei punti e di alcuni driver di gestione dello strumento.

L'erogazione del segnale è in carico al modulatore, in modo da non dover modificare il cablaggio del banco di prova.

Viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato 61k Dips INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

Il VI descritto è a sua volta inserito con il VI *Acquire and log* nel VI *SweepTestDips*; questo costruisce l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### CEI EN 61000 - Immunità alle fluttuazioni di tensione

La configurazione del generatore avviene tramite il VI *TestAmplitudeFluctuation* utilizzando il sub-VI della categoria portanti *Fluctuation setup 61k*. Data la natura del segnale di prova, si è preferito definirlo per punti e trattarlo come segnale arbitrario. La configurazione avviene tramite il sub-VI *Fluct ARB download* che invia il vettore di definizione avvalendosi dei sub-VI *Fluct ARB points* e *Fluct ramp points* per il calcolo dei punti e di alcuni driver di gestione dello strumento.

L'erogazione del segnale è in carico al modulatore, in modo da non dover modificare il cablaggio del banco di prova.

Viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato 61k Fluctuation INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt

Il VI descritto è a sua volta inserito con il VI *Acquire and log* nel VI *SweepTestFluctuation*; questo costruisce l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### CEI EN 61000 - Immunità ad armoniche ed interarmoniche

La configurazione del generatore avviene tramite il VI *TestHarmonics* utilizzando il sub-VI della categoria portanti *Harmonics setup 61k*. Data la

natura del segnale di prova, si è preferito definirlo per punti e trattarlo come segnale arbitrario. La configurazione avviene tramite il sub-VI *Harmonics ARB download* che invia il vettore di definizione avvalendosi dei sub-VI *Harmonics ARB points* per il calcolo dei punti e di alcuni driver di gestione dello strumento.

L'erogazione del segnale è in carico al modulatore, in modo da non dover modificare il cablaggio del banco di prova.

Viene generato un report con la configurazione completa della strumentazione. Esso è di tipo testuale ed è nominato nel formato 61k Harmonics INSTRconfig Run <X> of <Y> <Time Code>.txt Viene anche inserita la maschera delle armoniche utilizzata per il test, in formato CSV per facilitarne il riutilizzo in ambiente di calcolo.

Il VI descritto è a sua volta inserito con il VI *Acquire and log* nel VI *SweepTestFluctuation*; questo costruisce l'eventuale set di prove se viene specificato un parametro da esplorare, eseguendo poi ciascuna analisi e gestendo automaticamente l'acquisizione senza interrogare l'utente.

### 3.2.4 Linee guida per la modifica del testbench

#### Strumentazione

Si supponga di voler sostituire i generatori con altra strumentazione: in questo caso, è necessario rivedere i VI incaricati della configurazione. Premesso che un qualsiasi strumento che implementi i codici SCPI dovrebbe funzionare senza alcuna modifica, salvo quanto realizzato per le forme d'onda arbitrarie, potrebbe comunque essere necessario verificarne il corretto funzionamento. Ne risulta quindi che i VI da analizzare sono quelli delle categorie portanti, modulanti, standalone e, ovviamente, i sub-VI relativi. Limitatamente ai segnali arbitrari, sono tipicamente utilizzati uno o più sub-VI per la costruzione dei punti, un sub-VI per configurare l'invio di questi e dei driver appositi per l'invio vero e proprio: è chiaro che in prima analisi solo i secondi dovrebbero essere modificati richiamando i driver appropriati. Si consiglia di impiegare i driver forniti da National Instruments solo previa verifica approfondita del codice, essendo questi realizzati per una vasta gamma di strumenti e testati solo limitatamente. Si consiglia inoltre di effettuare preventivamente una configurazione manuale del nuovo strumento, inviando da remoto i comandi necessari e visualizzandone tramite oscilloscopio e/o analizzatore di spettro il segnale per confrontarlo con il segnale proveniente dai generatori attualmente impiegati. In questo modo è possibile fare una stima delle eventuali migliorie introdotte, veri-

ficando contestualmente la corretta sequenza di comandi che poi saranno inviati tramite i VI.

La comunicazione tra strumenti e PC di supervisione è basata su bus GPIB con l'uso del protocollo VISA. Qualora la nuova strumentazione non mettesse a disposizione una interfaccia GPIB, o si ritenga utile impiegare una differente, sarà sufficiente adattare il VI di inizializzazione che si occupa anche di restituire una *reference* all'indirizzo VISA.

Infine, data la struttura gerarchica realizzata, la modifica dovrà partire dal livello più basso dei VI di configurazione risalendo man mano fino al VI *main*, adattando di volta in volta il codice ed eventuali controlli. In merito a questi ultimi, si ricorda di impiegare la categoria *Tipi definiti* in modo da poter definire agevolmente e per tutto il codice limiti, incrementi e diciture del controllo in questione.

### Analisi

La modifica delle analisi fin qui implementate, essendo queste secondo le norme, non dovrebbe essere un caso frequente. Nonostante ciò, è sempre possibile l'intenzione di voler estendere il range di variazione o di rendere più aggressiva la prova.

La modifica dei controlli risulta essere rapida grazie all'aver impiegato i tipi definiti, pertanto sarà sufficiente trovare il controllo di interesse e adattarlo a quanto necessario, verificando quindi la correttezza di funzionamento con i nuovi valori dei limiti e di incremento. La modifica dei segnali generati è, di contro, più complessa. Nel caso di un segnale realizzato in modalità modulatore-modulante bisogna verificare i limiti imposti dalle specifiche dei generatori e si ricade sulla modifica dei controlli. Per i segnali definiti per punti, anche qui si hanno i limiti degli strumenti, ma è possibile intervenire sulla definizione tramite i sub-VI *Nome-test Points* contenuti nelle sottocategorie *utilities* relative.

### Implementazione di nuovi test

La realizzazione di un nuovo segnale parte dalla creazione dei sub-VI per configurare i generatori, per poi costruire i sub-VI che effettuano la configurazione, eseguono il test, unendovi l'acquisizione e, infine, l'inserimento del tutto nel VI *main*.

Il metodo più veloce per l'inserimento di un nuovo test è creare una copia di un test esistente che abbia una struttura simile a quello da implementare. Si procede quindi andando a modificare i VI per la configurazione dei generatori, risalendo man mano fino al VI della classe *Sweep*. Eventuali

nuovi controlli andranno realizzati come tipi definiti e inseriti nella apposita libreria; al passaggio dalla classe *One shot* alla classe *Sweep* tutti i controlli della prima da fornire all'utente devono essere inseriti in un unico cluster, che realizzerà il riquadro *Config* del pannello frontale principale. È richiesto inserire nel controllo *Test select*, contenuto nella libreria *Tipi definiti*, il nuovo test andando poi a variare le costanti nei VI in corrispondenza della generazione dei report e della configurazione dell'acquisizione. Il VI della classe *Sweep* deve realizzare tutti i set di parametri richiesti. Ciò avviene modificando il cluster *Sweep select* e adattando di conseguenza la *case structure* collegata a questo.

Ultimo passaggio è l'inserimento all'interno del VI *main*, anche qui si segua la falsariga del test inizialmente copiato. Il funzionamento di questo VI si basa su una *event structure* che modifica il pannello frontale e esegue poi il test. Avendo già inserito nel controllo *Test select*, si andrà a aggiungere una nuova tab al *TabControl*, che sarà poi la schermata di configurazione del test, e un caso alla *case structure* dell'evento *GoToTest-Config:Value Change*, in cui si gestisce l'abilitazione e disabilitazione dei controlli e il cambio della tab. Nella nuova tab creata andranno inseriti i cluster relativi alla configurazione del test, alla selezione dello sweep e alla configurazione di quest'ultimo. Vi troverà posto inoltre il pulsante *OK* necessario ad avviare la prova. All'interno della stessa *event structure* di cui sopra, si inserirà anche un caso del tipo *Nome-test OK:Value change*, in cui i cluster creati poco prima vengono passati al VI della classe *Sweep* e si gestisce l'abilitazione e disabilitazione di questi. Ultima casistica da inserire nella struttura ad eventi è il cambio del nuovo controllo *Sweep select*, il cui compito è abilitare e disabilitare il cluster *Sweep config* associato.

# Capitolo 4

## Manuale utente

### Introduzione

Il capitolo presente ha come scopo l'essere una breve guida per l'utente del sistema di test. Verranno quindi forniti degli esempi dei test realizzabili, dettagliando i controlli disponibili, partendo dal presupposto che sia utilizzata la strumentazione descritta nella sezione 3.1.1 e che questa sia collegata come indicato nella sezione 3.1.2.

### 4.1 Esecuzione dei test

L'esecuzione di un test prevede essenzialmente 4 fasi:

- Verifica del sistema di test e selezione della prova;
- Inserimento dei parametri del test;
- Configurazione dell'acquisizione;
- Raccolta dei dati e controllo del test.

Questi verranno di seguito illustrati nel dettaglio, fornendo una guida all'esecuzione e le specifiche dei singoli controlli a disposizione dell'utente.

#### 4.1.1 Verifica del sistema di test e selezione della prova

Controllato il corretto cablaggio della strumentazione e dopo aver acceso quest'ultima, si avvii il programma di gestione eseguendo il file *Testbench.exe*. Comparirà a video la schermata visibile in figura 4.1; la chiusura del programma avviene premendo il tasto *EXIT*.

Si inserisca nei campi *Address* l'indirizzo sul bus GPIB assegnato a ciascuno strumento e si prema il tasto *Test GPIB*. L'accensione delle spie verdi indica la presenza dello strumento: verificare la correttezza tramite i rispettivi campi *Status and ID* dove è riportata l'identificazione dei generatori. Da questo momento non è più possibile modificare gli indirizzi inseriti e, qualora sia necessario apportare variazioni, è possibile premere il tasto *Reset* che ripristina il programma ai valori di default. L'accensione della spia rossa *GPIB Error* indica una errata configurazione o un errore sul bus GPIB: verificare i collegamenti, l'accensione degli strumenti e l'assegnazione degli indirizzi; potrebbe risultare utile aumentare il valore di timeout del bus tramite il controllo *GPIB Timeout*.

La sezione relativa all'oscilloscopio non è stata ancora implementata, pertanto i relativi controlli non sono utilizzabili.

Si passi alla selezione del test desiderato tramite il menu a tendina *Test selection*, premendo quindi il pulsante *OK* per passare alla configurazione del segnale.

#### 4.1.2 Inserimento dei parametri del test

Tutti i test fin qui implementati seguono lo stesso metodo di raccolta dei parametri. Come visibile in figura 4.2, nel riquadro *Test Config* devono essere inseriti i parametri del segnale da generare, selezionando eventualmente quale tra questi esplorare tramite i radio button del riquadro *Sweep select*. Nel caso si sia scelto di effettuare uno sweep, il parametro corrispondente nel riquadro *Test config* viene ignorato e viene richiesto di specificare il range di variazione nel riquadro, ora abilitato, *Sweep config*. Si avvii la configurazione premendo il tasto *OK*, procedendo quindi con la configurazione dell'acquisizione.

Si faccia riferimento alle tabelle da 4.1 a 4.8 per le specifiche e il significato dei singoli controlli. I controlli del riquadro *Sweep config* hanno i vincoli dettati dal controllo relativo al parametro che si vuol far variare.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante

Tabella 4.1: Specifiche dei controlli per la verifica in condizioni stazionarie.

A titolo di esempio si riporta l'esecuzione del test di immunità alle armoniche e interarmoniche, con riferimento alla sezione 2.2.4, e la sol-

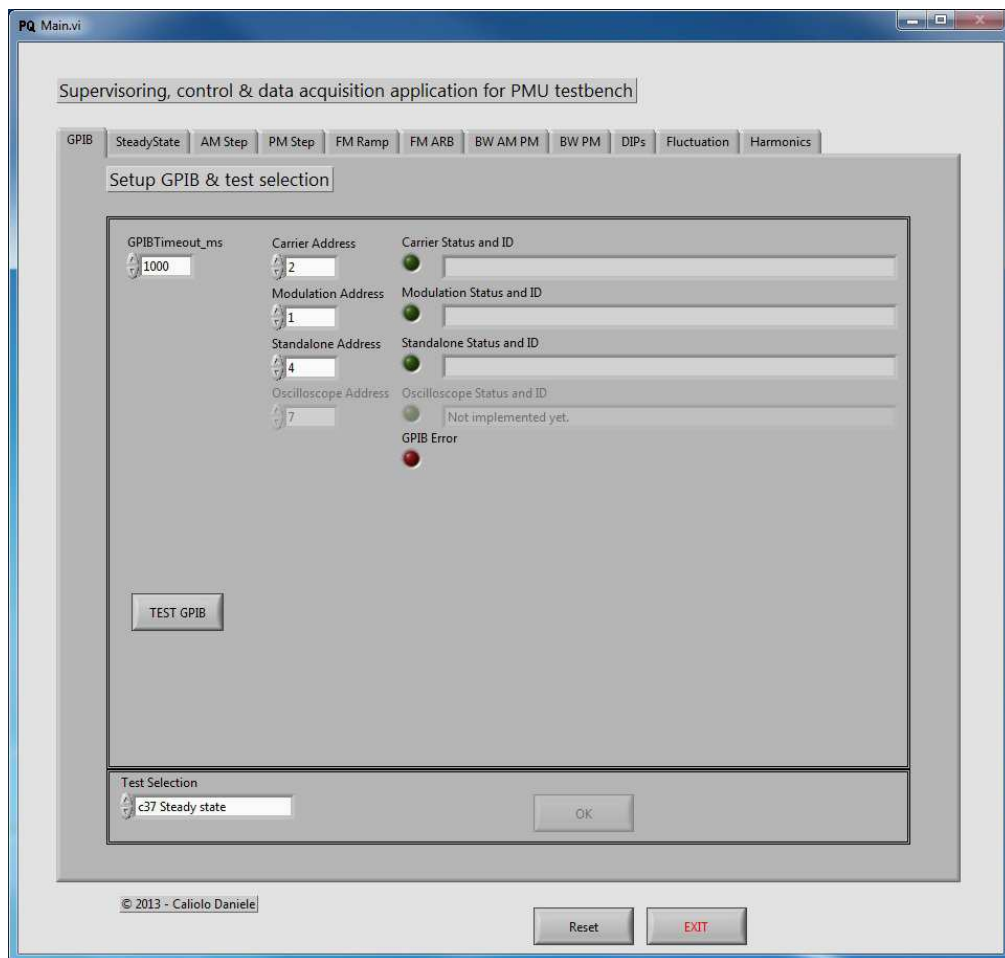


Figura 4.1: Pannello frontale principale.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
PM freq	0.1	20	0.1	Hz	Frequenza mod. PM
PM deviation	0	360	0.1	deg	Deviazione mod. PM
PM phi0	0	360	0.1	deg	Fase mod. PM
AM freq	0.1	20	0.1	Hz	Frequenza mod. AM
AM depth	0	100	1	%	Profondità mod. AM

Tabella 4.2: Specifiche dei controlli per la verifica della larghezza di banda.

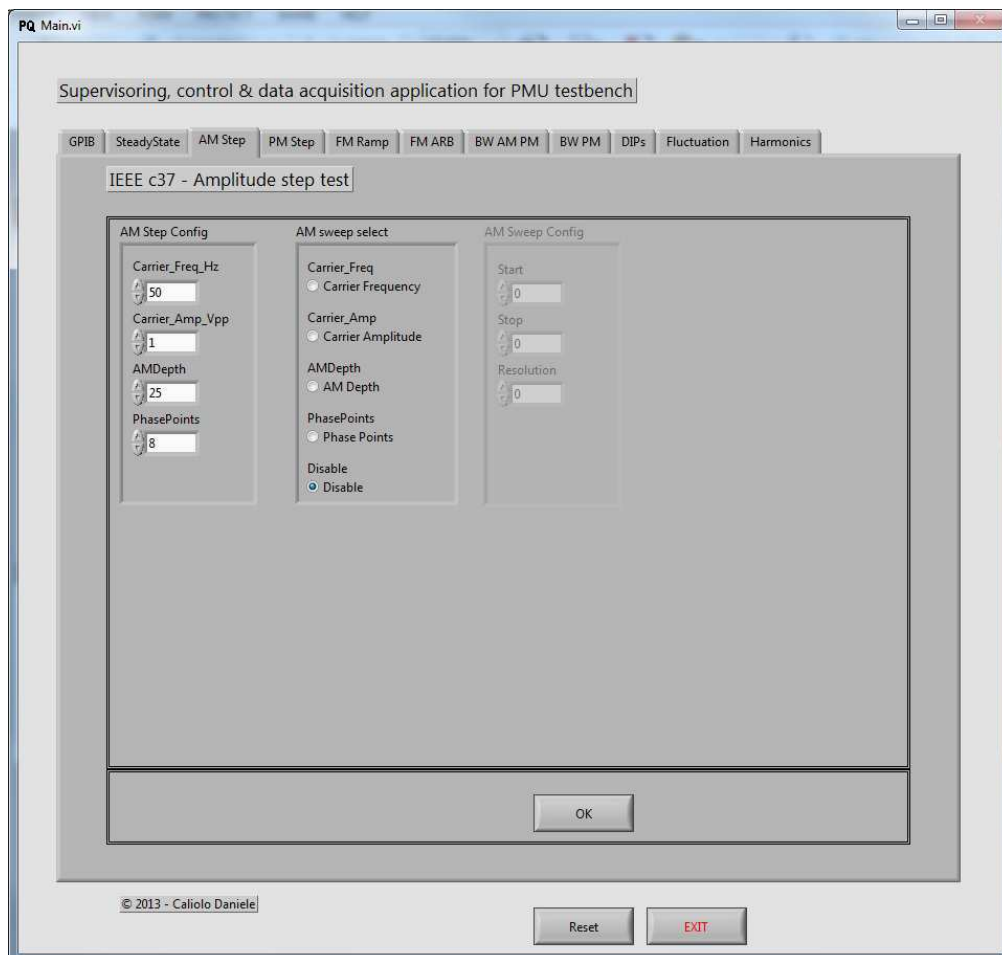


Figura 4.2: Pannello di configurazione per la risposta al gradino di ampiezza.



Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
Freq dev	0	50	0.1	Hz	Deviazione mod. FM
Ramp time	0.01	30	0.01	s	Durata rampa di salita/discesa
Fs	1	$+\infty$	1	#/s	Report per secondo
Time resolution	$10^{-6}$	10	$10^{-6}$	s	Step temporale del segnale arbitrario

Tabella 4.3: Specifiche dei controlli per la sollecitazione a rampa della frequenza di sistema.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
Phase points	1	360	1	#	Ampiezza portante
PM deviation	0	360	0.1	deg	Deviazione mod. PM
AM depth	0	100	1	%	Profondità mod. AM

Tabella 4.4: Specifiche dei controlli per la risposta al gradino di ampiezza e fase.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
Time resolution	$10^{-6}$	10	$10^{-6}$	s	Step temporale del segnale arbitrario
Fluctuation	-100	100	0.5	%	Entità fluttuazione
Fluct step	1	100	1	#	Numero di cicli per effettuare variazione
Phase	0	360	0.1	deg	Fase inizio evento
Tfluct	1	20	0.5	s	Durata fluttuazione
Tnom	1	30	0.5	s	Tempo tra eventi consecutivi

Tabella 4.5: Specifiche dei controlli per la prova di immunità alle fluttuazioni di tensione.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
Time resolution	$10^{-6}$	10	$10^{-6}$	s	Step temporale del segnale arbitrario
Time high	0.001	$+\infty$	0.01	s	Durata ampiezza nominale
Cycles low	0.5	$+\infty$	0.5	# cicli rete	Durata buco
Residual V	0	100	0.5	%	Tensione residua
Phase	0	360	0.1	deg	Fase inizio evento

Tabella 4.6: Specifiche dei controlli per la prova di immunità ai buchi di tensione.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Carrier freq	30	70	0.1	Hz	Frequenza portante
Carrier amp	0	10	0.001	V	Ampiezza portante
Max points	1	65535	1	#	Num massimo di punti per generazione

Tabella 4.7: Specifiche dei controlli per la prova di immunità alle armoniche.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Decade sel	1	5	1	#	Selezione decade
Amplitude	0	1	$10^{-4}$		Ampiezza normalizzata dell'armonica
Phase	0	360	0.1	deg	Fase dell'armonica

Tabella 4.8: Specifiche dei controlli per la generazione delle armoniche.

lecitazione a rampa della frequenza di sistema, come visto nella sezione 2.1.3.

### Immunità alle armoniche

Si inseriscano nel primo riquadro i valori di frequenza di rete, ampiezza picco-picco del segnale e, essendo il segnale definito per punti, il numero massimo di questi ultimi gestibile dallo strumento, che per i generatori in uso è 65536. Si scelga se effettuare lo spazzolamento di un parametro, specificando poi nell'ultimo riquadro il range di variazione.

Spegnendo il controllo *Automatic* del primo riquadro, verranno successivamente richiesti i valori delle armoniche da generare tramite il pannello visibile in figura 4.4, dove è anche resa un'anteprima del segnale generato sia nel tempo che in frequenza. Variando il controllo *Decade sel* si seleziona la decade su cui si intende agire, specificando poi i valori desiderati di ampiezza e fase tramite i controlli *Amplitude* e *Phase* in corrispondenza del valore di frequenza riportato nel riquadro *Frequency*. Al termine confermare tramite il tasto *OK*.

Attivando il controllo *Automatic* sarà invece chiesto all'utente di fornire una maschera in formato CSV, contenente i parametri delle armoniche nella forma  $f_n, A_n, \angle A_n, \text{Enable}$  dove  $f_n$  corrisponde alla frequenza dell'armonica n-esima in Hertz,  $A_n$  è l'ampiezza dell'armonica n-esima normalizzata all'ampiezza della fondamentale  $A_0$ ,  $\angle A_n$  è la fase dell'armonica n-esima in gradi sessagesimali ed infine *Enable* è un valore booleano posto a TRUE o FALSE che, appunto, abilita l'armonica in oggetto qualora si voglia eliminare una frequenza senza modificare i valori inseriti. Unici vincoli sul file sono che la prima riga deve contenere l'armonica fondamentale, con ampiezza unitaria e ovviamente abilitata, e che l'ordine dell'ultima armonica richiesta sia inferiore a 50. Un esempio di maschera è

```
50.000000E+0,1.000000E+0,0.000000E+0,TRUE
150.000000E+0,0.900000E+0,90.00000E+0,TRUE
250.000000E+0,0.800000E+0,0.000000E+0,FALSE
350.000000E+0,0.700000E+0,45.00000E+0,TRUE
```

dove la fondamentale è posta a 50 Hz, la seconda e la sesta armonica sono abilitate ciascuna con ampiezza e fase propria, mentre la quarta armonica è valorizzata ma non viene generata. Come si può notare, è consentito l'uso della notazione esponenziale.

Relativamente alla selezione dello sweep, se si fosse scelto di spazzolare le armoniche verrebbe richiesto di fornire una cartella contenente le

maschere da applicare. Anche in questo caso, devono rispettare il formato illustrato poc'anzi.

Si ricorda che maggiore è il contenuto armonico del segnale, maggiore è il comportamento impulsivo nel tempo: si consiglia di applicare algoritmi per la scelta della fase delle singole armoniche, in modo da non richiedere la generazione di segnali molto brevi che potrebbero non essere correttamente sintetizzati dal generatore.

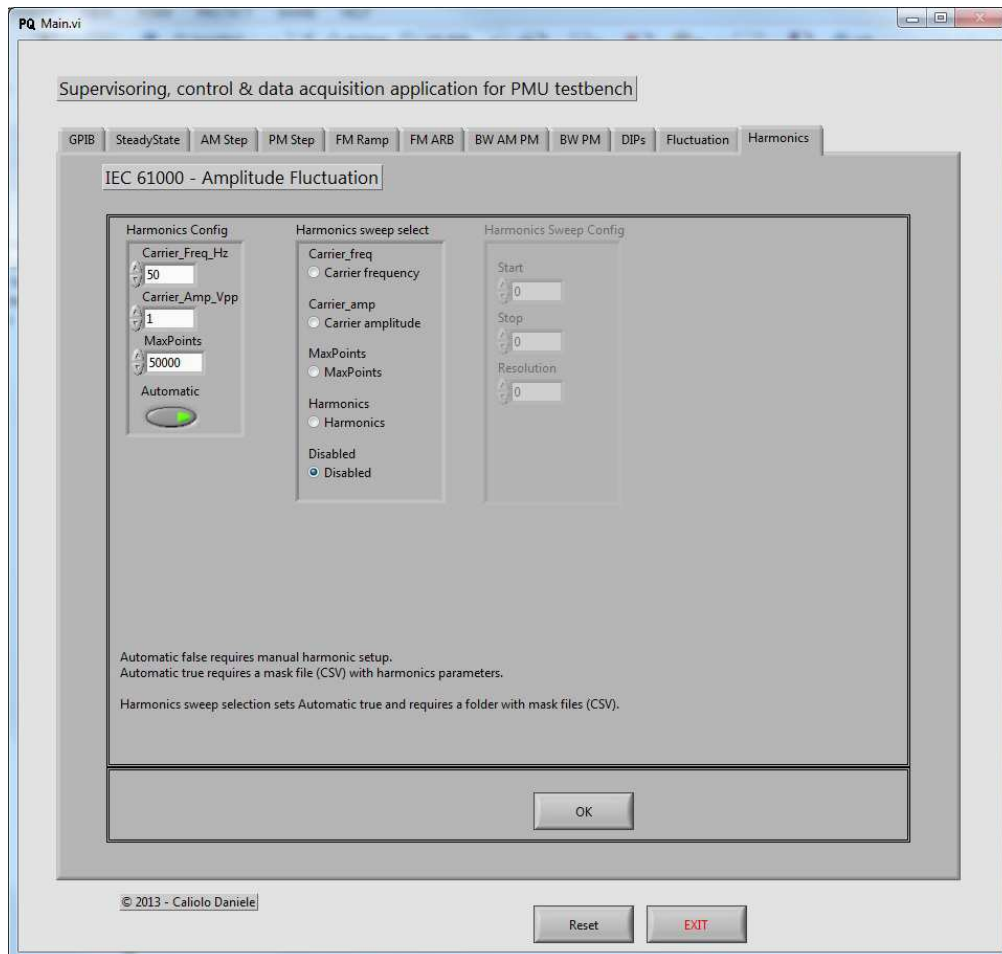


Figura 4.3: Pannello di configurazione per il test di immunità alle armoniche.

### Sollecitazione a rampa della frequenza di sistema

Si inseriscano nel primo riquadro i valori specificati dalla norma per la rampa di frequenza. In questo caso, viene richiesto anche il parametro  $T_i$ -

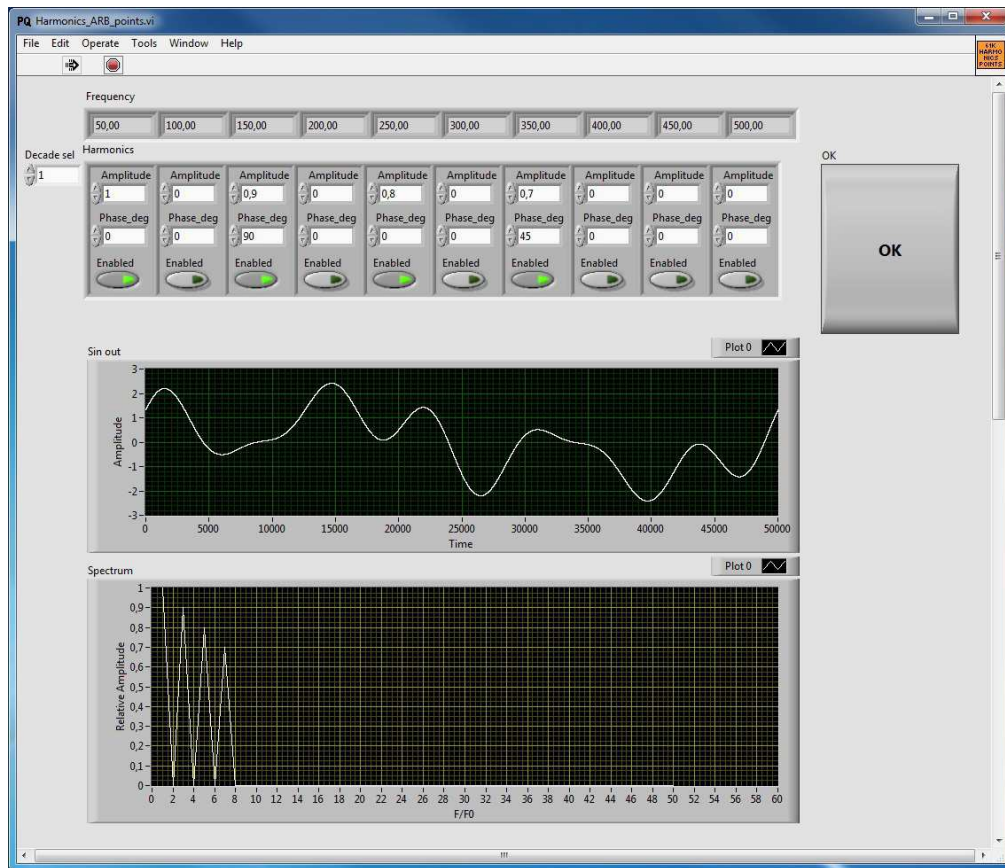


Figura 4.4: Pannello per la specifica delle armoniche da generare.

me *Resolution* che corrisponde alla risoluzione temporale con cui generare il segnale, essendo questo definito per punti. Si cerchi sempre di utilizzare la massima risoluzione possibile, in funzione del numero di punti gestibili dallo strumento: gli Agilent 33220A sono dotati di memoria di generazione da 65536 punti, impiegando la formula 4.1.2 è possibile determinare il valore del controllo. Si scelga se effettuare lo spazzolamento di un parametro, specificando poi nell'ultimo riquadro il range di variazione.

$$TimeResolution = \frac{DurataSegnale[s]}{Profonditdimemoria[Sa]} \quad (4.1)$$

In figura 4.5 è visibile la configurazione del test. Si noti che è stato selezionato di ripetere il test variando la frequenza fondamentale tra 49 e 51 Hz a passi di 1 Hz.

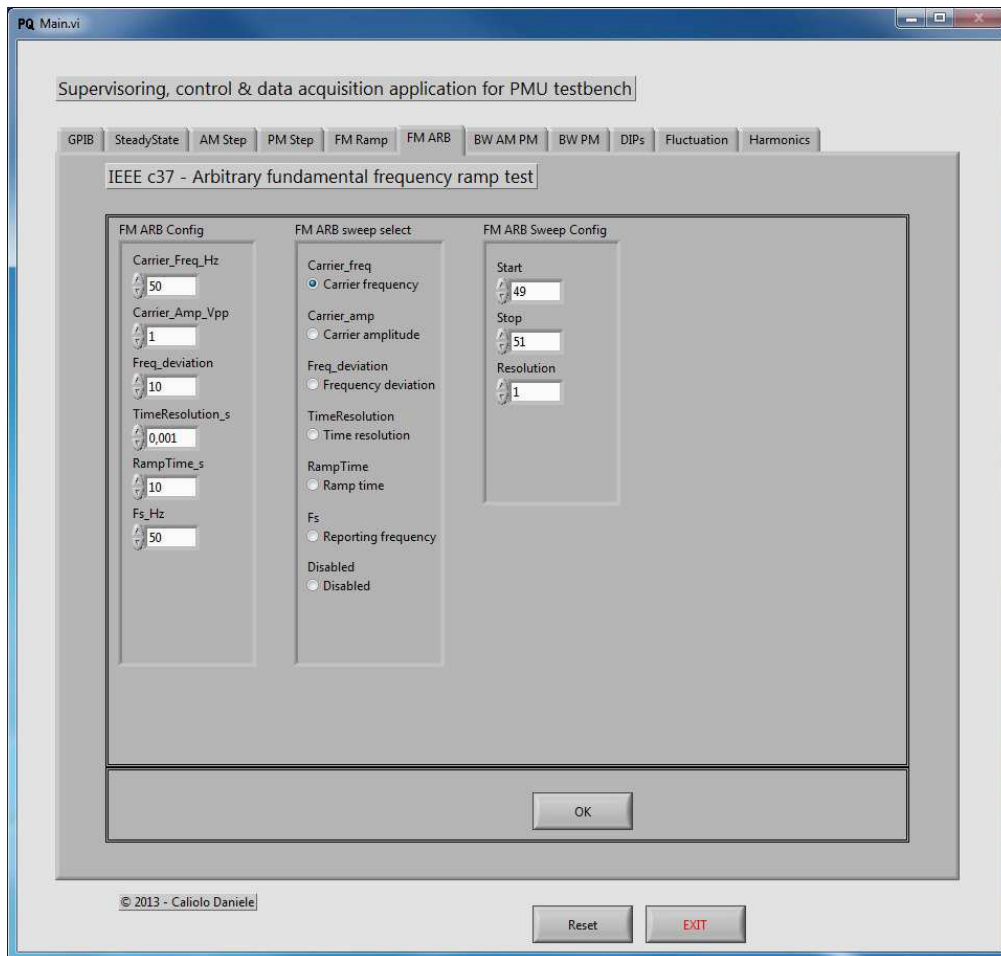


Figura 4.5: Pannello di configurazione per la sollecitazione a rampa della frequenza di sistema.

### 4.1.3 Configurazione dell'acquisizione

Terminata la configurazione dei generatori, comparirà a video la schermata visibile in figura 4.6.

La sezione *Mode config* permette di definire la modalità di acquisizione dei dati. Sono forniti tutti i parametri disponibili, in modo da adattarsi a future necessità. Per il sistema di test, è necessaria l'impostazione come da figura 4.6, mentre sono definibili dall'utente i valori dei controlli *sample rate*, *Event cycles* e *Description*. Il controllo *CSV* può essere attivato per richiedere la conversione automatica del file TDMS in formato CSV, mentre il campo *Description* permette di aggiungere del testo a piacere al nome dei file di report. Il controllo *sample rate* determina la frequenza

di campionamento del singolo canale e deve essere inferiore alla massima frequenza della scheda di acquisizione, diviso per il numero di canali analogici acquisiti. Il controllo *Event cycles* permette di specificare quante ripetizioni del singolo setup effettuare. Si faccia riferimento alla tabella 4.9 per le specifiche sui controlli.

La sezione *DAQmx setup* permette la configurazione dei canali da acquisire e del contatore degli eventi. I canali analogici disponibili sono 4 ed è possibile abilitarli singolarmente, ad eccezione del primo che è sempre attivo, e configurarli distintamente. Si abilitino quindi i canali necessari agendo sui controlli *Active* e si inseriscano i nomi per i canali. Si scelga quali canali analogici acquisire tramite la tendina *Channel Input* e il tipo dei canali tramite il controllo *Channel type*. Si impostino infine unità di misura, valore massimo e valore minimo dei segnali tramite i controlli *Channel unit*, *Max* e *Min*.

Il contatore è sempre abilitato data la sua necessità per verificare l'avanzamento della prova, come visto nella sezione 3.1.2. Si inserisca un nome nel campo *Count name* e si selezionino la porta e il terminale appropriato tramite i controlli *Counter Port* e *Counter terminal*. Si imposti il conteggio sul fronte di salita o discesa tramite il controllo *Count edge*. Si lasciano a disposizione i controlli per impostare il valore di inizio e direzione di conteggio, che per il sistema di test sono da porre come da figura 4.6. Si faccia riferimento alla tabella 4.9 e alla documentazione della scheda di acquisizione [32] per le specifiche sui controlli.

Una volta terminato l'inserimento dei parametri si preme il tasto *OK* per avviare l'acquisizione.

Controllo	Range			U.M.	Descrizione
	Min	Max	Step		
Sample rate	1000	$10^6$	10	Sa/s	Frequenza di campionamento
Event cycles	1	$+\infty$	1		Numero di eventi da acquisire

Tabella 4.9: Specifiche dei controlli per l'acquisizione.

#### 4.1.4 Raccolta dei dati e controllo del test

Avviata l'acquisizione comparirà a video il pannello visibile in figura 4.7. L'indicatore *Description* riporta l'eventuale descrizione impostata precedentemente e quale passo dello sweep si sta compiendo. Lo stato di avan-

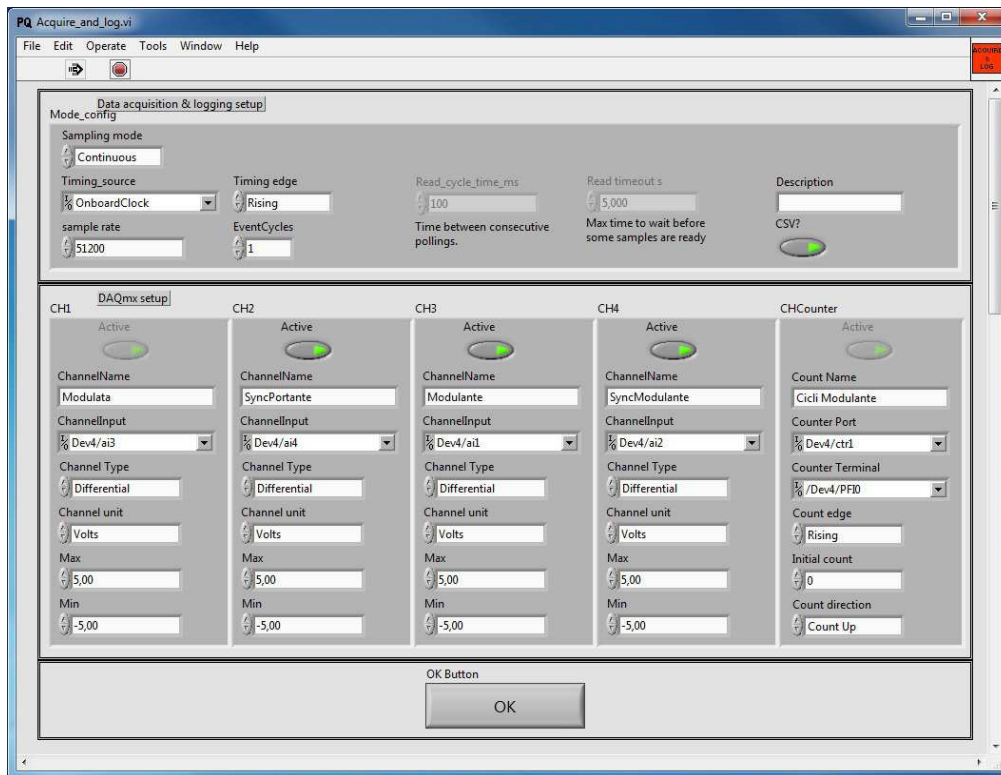


Figura 4.6: Pannello di configurazione per l'acquisizione.

zamento del test in corso è visibile tramite gli indicatori *Events completed* e la barra di avanzamento sottostante. Al centro del pannello vengono visualizzati i segnali acquisiti: è possibile commutare tra la rappresentazione a tracce distinte o sovrapposte agendo sul controllo *Stacked*. È anche possibile disattivare la visualizzazione, alleggerendo l'esecuzione del programma, tramite il controllo *Graph Enable*. Il VI in oggetto si basa su una struttura produttore-consumatore e impiega pertanto una coda per il passaggio dei dati. Lo stato di tale buffer è visualizzato tramite l'indicatore *Queue level* che, normalmente, si trova nella zona verde. Qualora così non fosse si consiglia di liberare risorse sul PC per consentire una più fluida esecuzione. I led *Acquire halt* e *Writing* riportano rispettivamente la chiusura in corso dell'acquisizione e la scrittura su disco dei dati. Infine, è possibile interrompere in qualsiasi momento l'acquisizione agendo sul pulsante rosso *STOP*. I dati fino a quel momento acquisiti saranno comunque salvati.

Terminata la fase di acquisizione, il programma torna automaticamente alla schermata di selezione del test. Tutti i file generati sono posti all'inter-



no della cartella “FileAcquisizioni”, a sua volta posta nella stessa cartella del programma di supervisione.

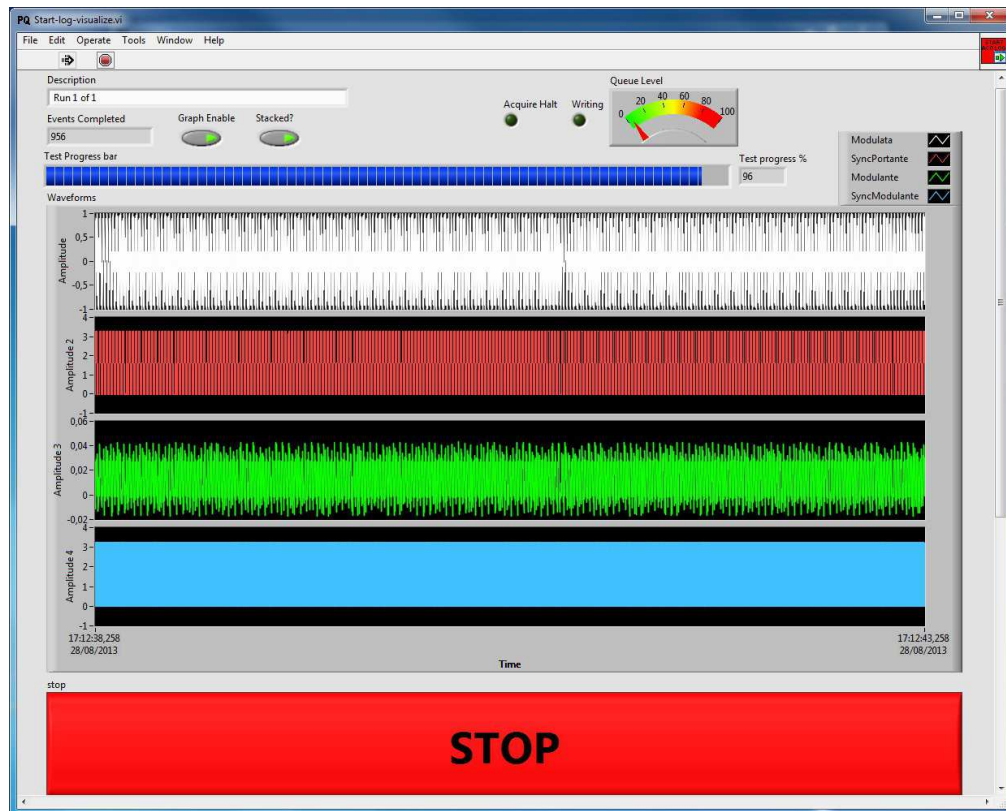


Figura 4.7: Pannello di visualizzazione dell’acquisizione.

#### 4.1.5 Codici di errore

Si riportano brevemente i codici di errore specifici per l’applicazione con alcune possibile cause e soluzioni.

- **5000: Signal duration divided by time resolution is not an integer value.** Usando la risoluzione temporale impostata non si può rappresentare con un numero intero di punti il segnale. Modificare il valore di risoluzione.
- **5001: Too much signal points. Decrease time resolution.** Usando la risoluzione temporale impostata si eccede il numero massimo di punti gestibile dal generatore. Diminuire la risoluzione o abbreviare il segnale.

- **5002: Step period must be longer than twice the carrier period.** Il periodo dello step di ampiezza o fase deve essere tale da permettere almeno un ciclo per il valore nominale e un ciclo per la variazione. Aumentare il periodo dello step.
- **5003: Unexpected end of cycle.** Condizione non prevista. Contattare lo sviluppatore.
- **5004: Path generation error.** Il campo *Description* contiene caratteri non ammessi per i nomi dei file. In caso contrario contattare lo sviluppatore.
- **5005: Acquisition aborted by user or error.** Esecuzione interrotta prematuramente dall'utente. Errore relativo alla scheda di acquisizione; verificarne la connessione o provare a scollegarla e ricollegarla al PC. Per altre casistiche contattare lo sviluppatore.
- **5006: Execution of an unexpected case.** Condizione non prevista. Contattare lo sviluppatore.
- **5007: Sweep parameters not in control range or wrong resolution.** Il valore di inizio, di fine o l'incremento specificati per il valore da esplorare non corrispondono alle specifiche del controllo, oppure il range non è rappresentabile con un numero intero di passaggi dalla risoluzione richiesta. Verificare le specifiche del controllo e/o modificare i parametri.
- **5008: Sampling frequency greater than device maximum.** La frequenza di campionamento impostata eccede la massima consentita dal dispositivo di acquisizione. Disattivare l'acquisizione dei segnali non necessari e/o diminuire la frequenza di campionamento.
- **5009: Mask file error.** Il file contenente il profilo spettrale da generare non è conforme alle specifiche. Verificare il file.

# Capitolo 5

## Risultati e conclusioni

### Introduzione

In questo capitolo verrà illustrato un esempio di impiego del banco di prova, verificando la corretta generazione dei segnali tramite oscilloscopio e analizzatore di spettro, e l'impiego per la generazione di segnali reali successivamente elaborati in ambiente MatLab per testare la funzionalità di un algoritmo di stima. Sulla base di questo, verrà riportata una breve valutazione del lavoro svolto.

### 5.1 Analisi di un caso di studio

#### 5.1.1 Analisi e verifica dei segnali di test

I segnali generati, essendo impiegati per la validazione di algoritmi e dispositivi, devono essere accuratamente verificati in modo da poter valutare eventuali effetti indesiderati, causati dai limiti della strumentazione impiegata, da errate configurazioni o da condizioni ambientali. Sono quindi sintenticamente descritti e criticamente discussi i segnali generati, riportando misure eseguite e accorgimenti suggeriti da adottare.

Dove non diversamente specificato, le analisi temporali sono condotte su segnale portante a 50 Hz con ampiezza di 1 V<sub>picco-picco</sub>. Le modulanti impiegano i valori prescritti dalle norme e sono generate con ampiezze di 5 V<sub>picco-picco</sub>; in caso di più scelte dei parametri viene specificata la configurazione scelta. L'oscilloscopio è impostato per accoppiamento DC con impedenza di 1 M $\Omega$ . Per le analisi in frequenza è stato inserito un attenuatore da 20 dB con banda da 0 a 12 GHz che presenta impedenza verso il generatore di 50  $\Omega$ . Si misurano gli spettri da 0 a 5 kHz e da 25 a

500 Hz. Limitatamente all'analisi della modulazione, a causa di limitazioni dell'analizzatore di spettro, si è aumentata la frequenza portante a 2.5 kHz mantenendo inalterato il segnale modulante. La valutazione del livello di rumore ambientale è stata condotta sostituendo al generatore un resistore da 50  $\Omega$ .

### **Verifica dei generatori e segnale di test per verifica in condizioni stazionarie**

Rispetto ai valori attesi del segnale di test e relativamente alle specifiche della strumentazione, si osservano alcuni aspetti riportati di seguito.

- Generatore Agilent 33220A
  - Analisi all'oscilloscopio, figura A.1: si rileva uno scostamento della frequenza media di 1 mHz rispetto il valore impostato, con picchi di 0.6 Hz e deviazione standard di 102.9 mHz.
  - Analisi con analizzatore di spettro, figura A.2: livelli di rumore inferiori a -80 dBm, comparabili con i livelli di rumore ambientale.
- Generatore HP 8904A
  - Analisi all'oscilloscopio, generatore HP 8904A, figura A.3: valore di offset dovuto a componente continua nell'ordine dei 200 mV. Si rileva uno scostamento della frequenza media nullo rispetto il valore impostato, con picchi di 0.5 Hz e deviazione standard di 63.6 mHz.
  - Analisi con analizzatore di spettro, generatore HP 8904A, figura A.4: livelli di rumore inferiori a -80 dBm, comparabili con i livelli di rumore ambientale.

Il generatore HP 8904A risulta avere maggiore precisione in frequenza rispetto l'Agilent 33220A. Per entrambi i generatori, dallo spettrogramma, si rileva una componente costante a 450 Hz, presumibilmente dovuta a interferenza ambientale, con ampiezza di circa -90 dBm.

### **Verifica della larghezza di banda**

L'analisi tramite oscilloscopio e analizzatore di spettro presenta risultati coerenti con quanto atteso.

### Sollecitazione a rampa della frequenza di rete

- Segnale senza tempi di attesa a inizio e fine rampa
  - Analisi all'oscilloscopio, segnale senza tempi di attesa a inizio e fine rampa, figura A.11: periodo di attesa ad inizio rampa del generatore modulante pari a circa 20 ms, probabilmente dovuto a ritardi nella sincronia o tolleranza sulle basi dei tempi. Potrebbe essere possibile ovviare condividendo tra gli strumenti una base dei tempi a 10 MHz ed alta precisione; non è stato verificato a causa della non disponibilità di strumenti con tale opzione installata. Un'altra soluzione è certamente la generazione completa come segnale arbitrario, perdendo però informazioni sul segnale modulante.
  - Analisi con analizzatore di spettro, segnale senza tempi di attesa a inizio e fine rampa, figure A.13 e A.12: nessuna anomalia riscontrata, salvo quanto riportato nell'analisi temporale che risulta anche nella demodulazione.

- Segnale con tempi di attesa a inizio e fine rampa

L'analisi tramite oscilloscopio e analizzatore di spettro presenta risultati coerenti con quanto atteso.

### Risposta al gradino di ampiezza e di fase

- Gradino in ampiezza
  - L'analisi all'oscilloscopio, figura A.17, presenta risultati coerenti con quanto atteso.
  - Analisi con analizzatore di spettro, figure A.18 e A.19: in corrispondenza alla commutazione si rilevano componenti spettrali a larga banda eccedenti la 100° armonica.
- Gradino in fase
  - L'analisi all'oscilloscopio presenta risultati coerenti con quanto atteso.
  - Analisi con analizzatore di spettro, figure A.20 e A.21: in corrispondenza alla commutazione si rilevano componenti spettrali a larga banda eccedenti la 100° armonica.

### Immunità ai buchi di tensione

Configurazione del test con tensione residua pari al 40% del valore nominale, durata di 10 cicli, inizio su fase nulla. Risoluzione temporale 0.1 e 1 ms.

- L'analisi all'oscilloscopio, figura A.22, presenta risultati coerenti con quanto atteso.
- Analisi con analizzatore di spettro, figure A.23 e A.24: si notano componenti spettrali, dovute alla generazione per punti del segnale, nell'ordine dei -20 dBm con risoluzione 1 ms e -50 dBm con risoluzione 0.1 ms; utilizzare sempre la massima risoluzione possibile per minimizzarne ampiezza e presenza in banda di dette componenti.

### Immunità alle armoniche di tensione

Configurazione del test con maschere per classi 1, 2 e 3. Fase nulla per tutte le armoniche.

L'analisi spettrale viene condotta da 0 a 5 kHz e da 0 a 2 kHz.

L'analisi tramite oscilloscopio e analizzatore di spettro presenta risultati coerenti con quanto atteso.

### Immunità alle fluttuazioni di tensione

Configurazione del test per fluttuazione del 20%, a partire dalla tensione nominale, in 5 passi con inizio a 270°. Tempo a valore nominale 0.5 s; durata fluttuazione 1 s. Risoluzione temporale di 0.04 ms.

- L'analisi all'oscilloscopio, figure A.31 e A.32, presenta risultati coerenti con quanto atteso.
- Analisi con analizzatore di spettro, figura A.33: presenza di componenti spettrali imputabili alla generazione per punti del segnale.

## 5.1.2 Caratterizzazione dell'algoritmo di stima

I segnali generati sono stati acquisiti e impiegati in ambiente di calcolo MATLAB per caratterizzare il comportamento dell'algoritmo di stima basato su interpolazione spettrale Ip-DFT trattato in [1].

Si riportano nelle immagini da B.2 a B.9 i risultati dell'elaborazione.

Con riferimento alla figura B.1, si può notare un aumento della fase stimata correlato alla precisione in frequenza del generatore. Per ovviare

al problema è stato inserito un fattore correttivo in fase di elaborazione, ottenendo una fase costante il cui valore è pari a  $\pi/2$ . Tale scostamento è dovuto all'aver generato segnali sinusoidali, mentre la norma prevede segnali cosinusoidali.

Dalle analisi risulta infine che l'algoritmo supera i test previsti dallo standard IEEE c37.118, con eccezione della sollecitazione a rampa della frequenza di rete.

## 5.2 Conclusioni e futuri sviluppi

Il sistema di test sviluppato risulta essere funzionante e rispetta pienamente le specifiche emerse dall'analisi funzionale e dall'analisi normativa.

Le analisi fin qui implementate possono essere integrate seguendo ulteriori norme e standard durante la fase di sviluppo del PMU. Inoltre, si potrebbe prevedere la possibilità di effettuare gli sweep su più parametri contemporaneamente, facilitando la caratterizzazione del dispositivo.

Future versioni del software dovranno includere la possibilità di eseguire automaticamente l'algoritmo di stima utilizzato per il PMU, confrontandone i risultati con le stime calcolate dal dispositivo e generando infine un rapporto di prova. A tal proposito, si ricorda che l'ambiente LabVIEW prevede la possibilità di eseguire applicativi esterni o script MatLAB.

Si nota che i segnali definiti per punti risentono pesantemente del numero limitato di punti utilizzabile. Viste le durate dei segnali nell'ordine della decina di secondi, sarebbe opportuno impiegare generatori con una maggiore memoria di generazione: volendo il contenuto spettrale dovuto alla generazione fuori della banda di interesse tra 0 e 5 kHz, che richiede quindi una frequenza dei campioni pari ad almeno 10 kSa/s, con segnali della durata di 10 s è necessaria una memoria minima di 100 kSa. Inoltre, è da valutare un aumento del numero di bit per ridurre l'errore di quantizzazione, minimizzando l'ampiezza di dette armoniche che con 14 bit risulta essere circa -50 dBm a fronte di un'ampiezza della fondamentale pari a 4 dBm. Si ritiene utile impiegare generatori con filtraggio in uscita e l'inserimento di un filtro passa basso con lo scopo di attenuare il contenuto spettrale fuori banda che, anche se non campionato correttamente, potrebbe influenzare le stime effettuate dal PMU. Infine, l'impiego per la generazione dei segnali in bassa tensione richiede il cambio della strumentazione o l'inserimento di un amplificatore con buone caratteristiche di linearità nella banda tra 0 e 10 kHz.

Dal collaudo emerge anche la necessità di una maggiore precisione sulla base dei tempi, come visto utilizzando il sistema di test per verificare

l'algoritmo di stima 5.1.2. Tra la strumentazione è standard l'impiego di un segnale a 10 MHz, in cui uno strumento distribuisce a tutti gli altri la base dei tempi: purtroppo i generatori a disposizione non presentavano tale opzione, che resta quindi da verificare impiegando, ovviamente, una base dei tempi di adeguata precisione.



# Appendice A

Immagini analisi e verifica  
segnali di prova

## A.1 Verifica dei generatori e segnale di test per verifica in condizioni stazionarie

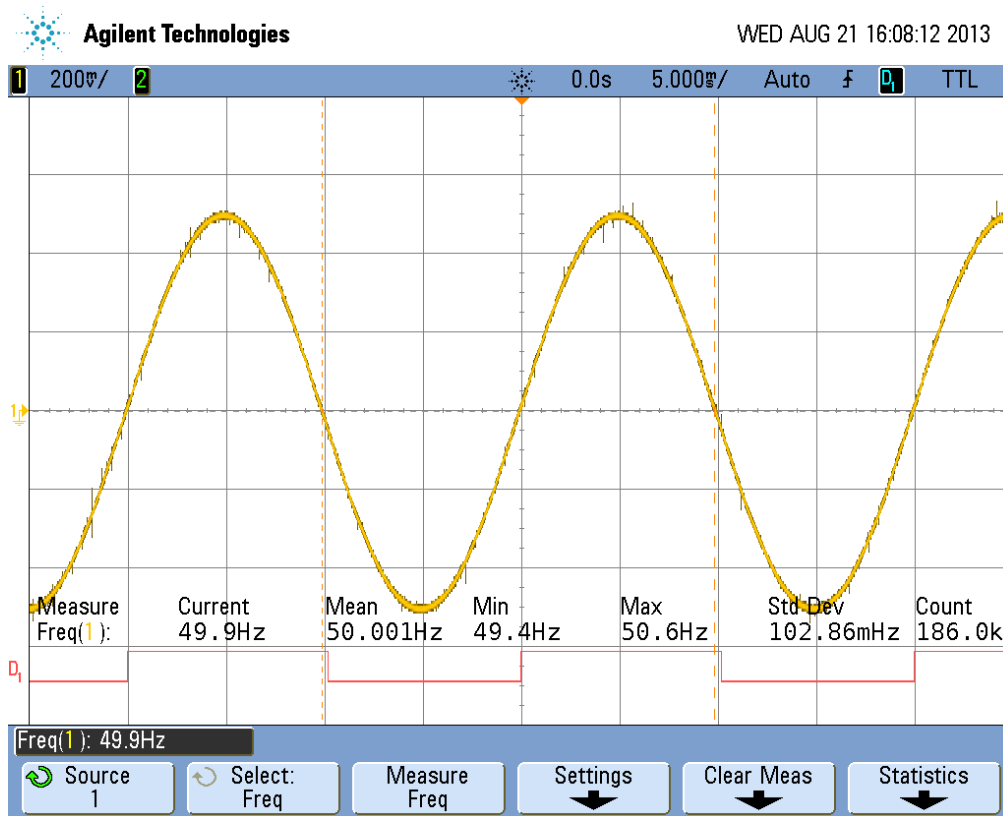


Figura A.1: Analisi precisione in frequenza per il generatore modulante modello Agilent 33220A. Viene generata una sinusoide con frequenza di 50 Hz e, dopo circa un'ora, si rileva una frequenza media pari a 50.001 Hz con deviazione standard di 102.86 mHz e massimi di variazione di  $\pm 0.6$  Hz. Il segnale D1 rappresenta il segnale di sincronia del generatore, impiegato come trigger. La larghezza della traccia ha un massimo di 4 mV, dovuta al campionamento effettuato dall'oscilloscopio, tende ad annullarsi acquisendo il segnale ad alta precisione. Le variazioni di frequenza risultano compatibili con quanto riscontrabile in una rete di alimentazione.

## A.1 Verifica dei generatori e segnale di test per verifica in condizioni stazionarie

75

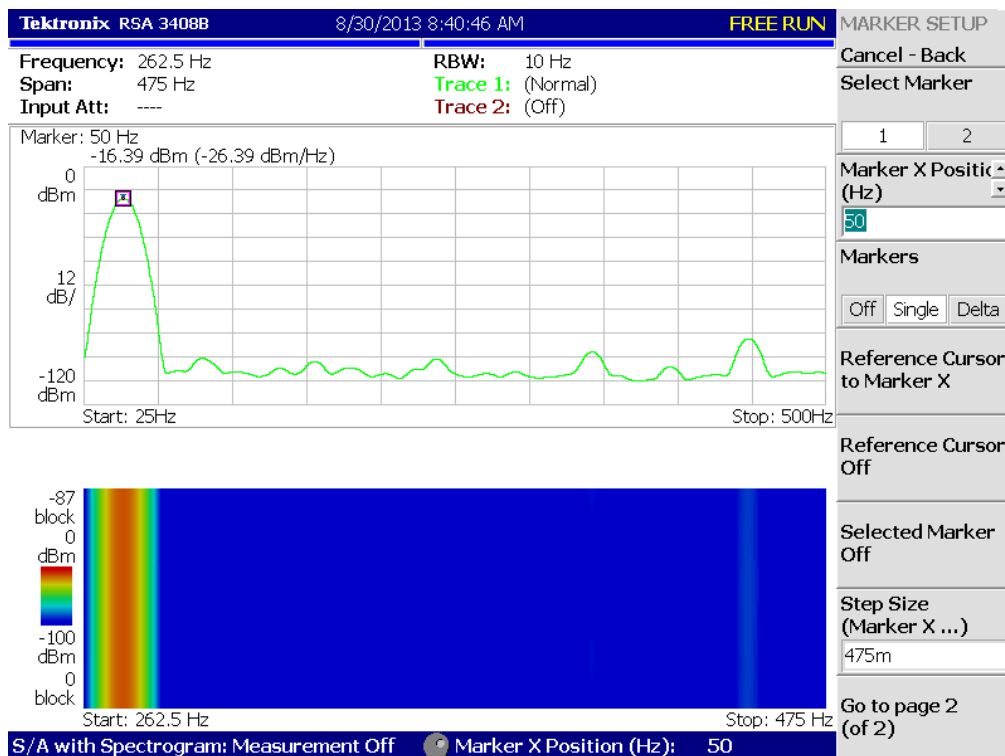
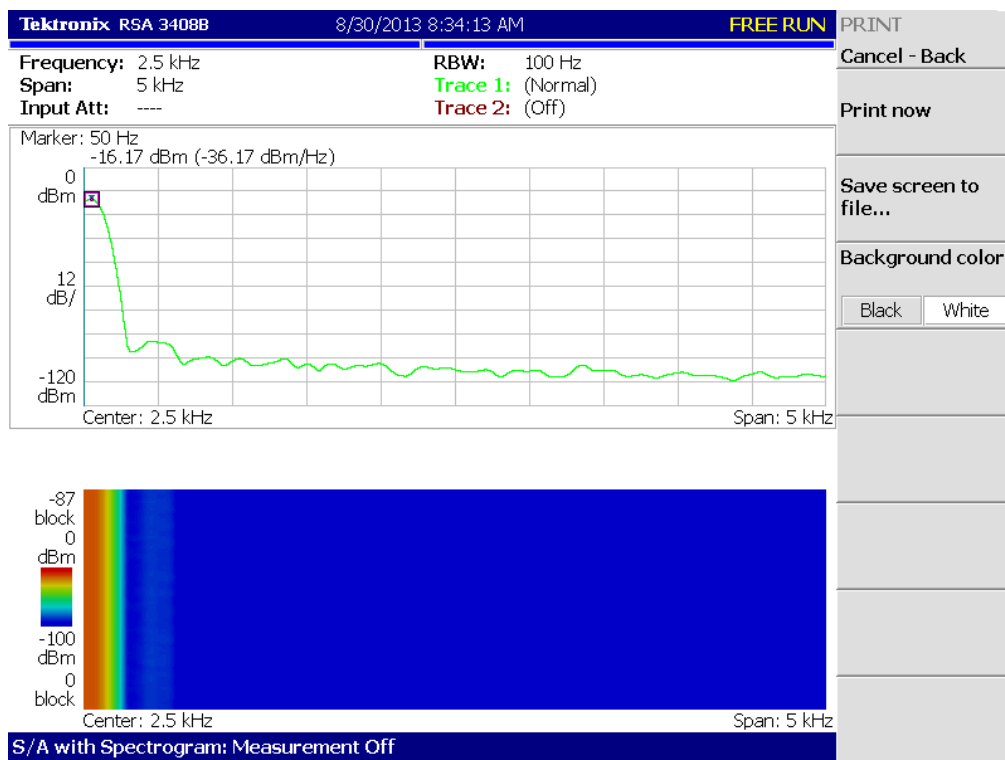


Figura A.2: Analisi spettrale sul segnale sinusoidale puro fornito dal generatore modulante modello Agilent 33220A. Viene generata una sinusoide con frequenza di 50 Hz e ampiezza 1 Vpp, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB si rilevano livelli di rumore inferiori a -80 dBm.

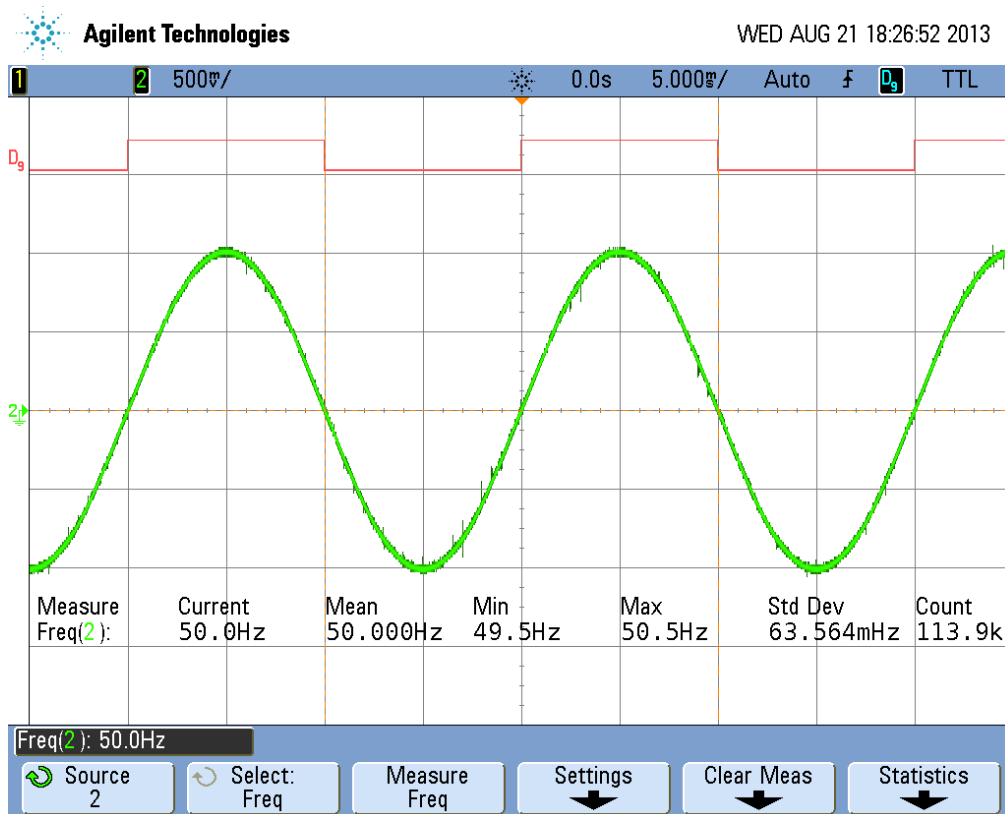


Figura A.3: Analisi precisione in frequenza per il generatore HP 8904A. Viene generata una sinusoide con frequenza di 50 Hz e, dopo circa un'ora, si rileva una frequenza media pari a 50.000 Hz con deviazione standard di 63.564 mHz e massimi di variazione di  $\pm 0.5$  Hz. Il segnale D9 rappresenta il segnale di sincronia del generatore, impiegato come trigger. La larghezza della traccia ha un massimo di 4 mV, dovuta al campionamento effettuato dall'oscilloscopio, tende ad annullarsi acquisendo il segnale ad alta precisione. Le variazioni di frequenza risultano compatibili con quanto riscontrabile in una rete di alimentazione.

## A.1 Verifica dei generatori e segnale di test per verifica in condizioni stazionarie

77

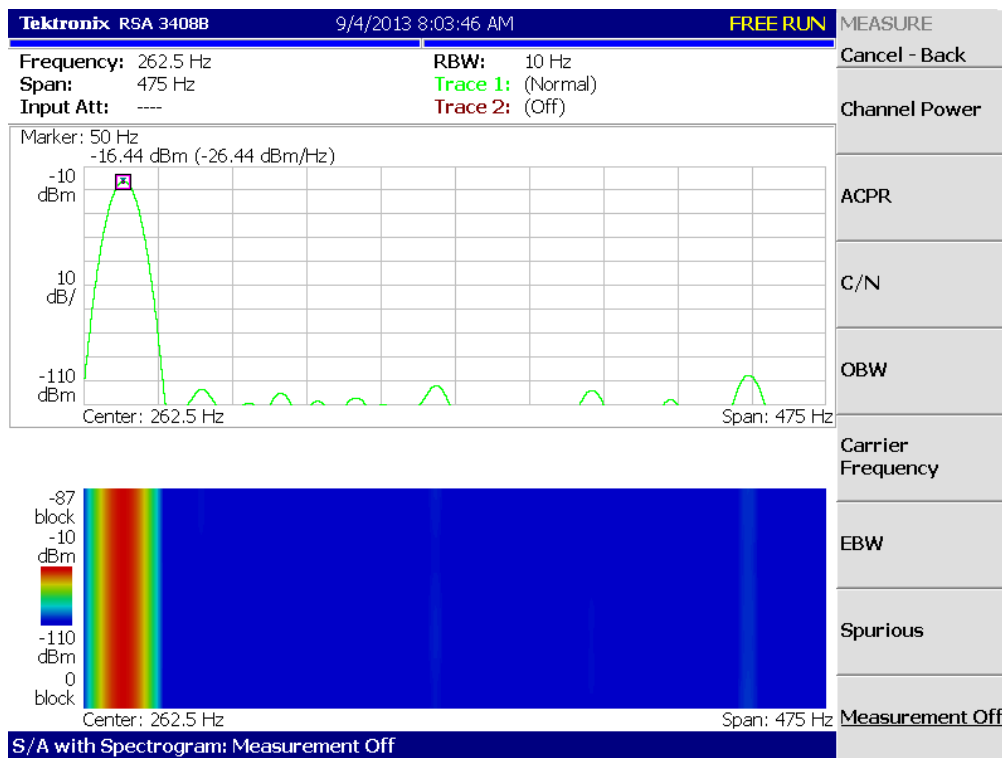
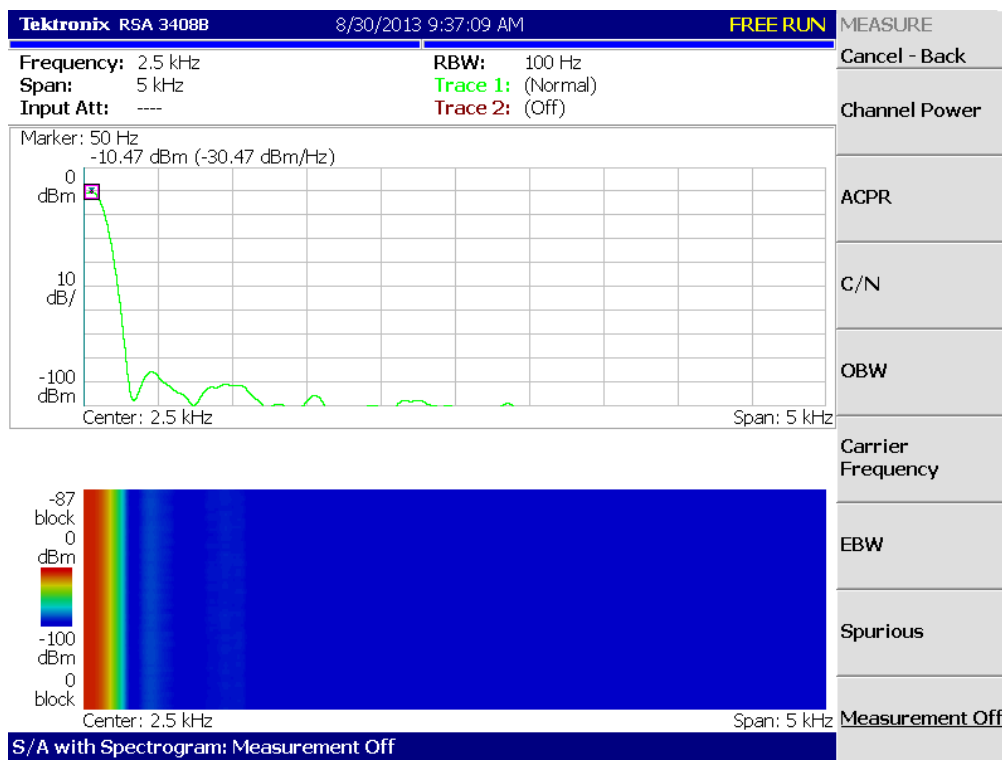


Figura A.4: Analisi spettrale sul segnale sinusoidale puro fornito dal generatore HP 8904A. Viene generata una sinusoide con frequenza di 50 Hz e ampiezza 1 Vpp, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB si rilevano livelli di rumore inferiori a -80 dBm.

## A.2 Verifica della larghezza di banda

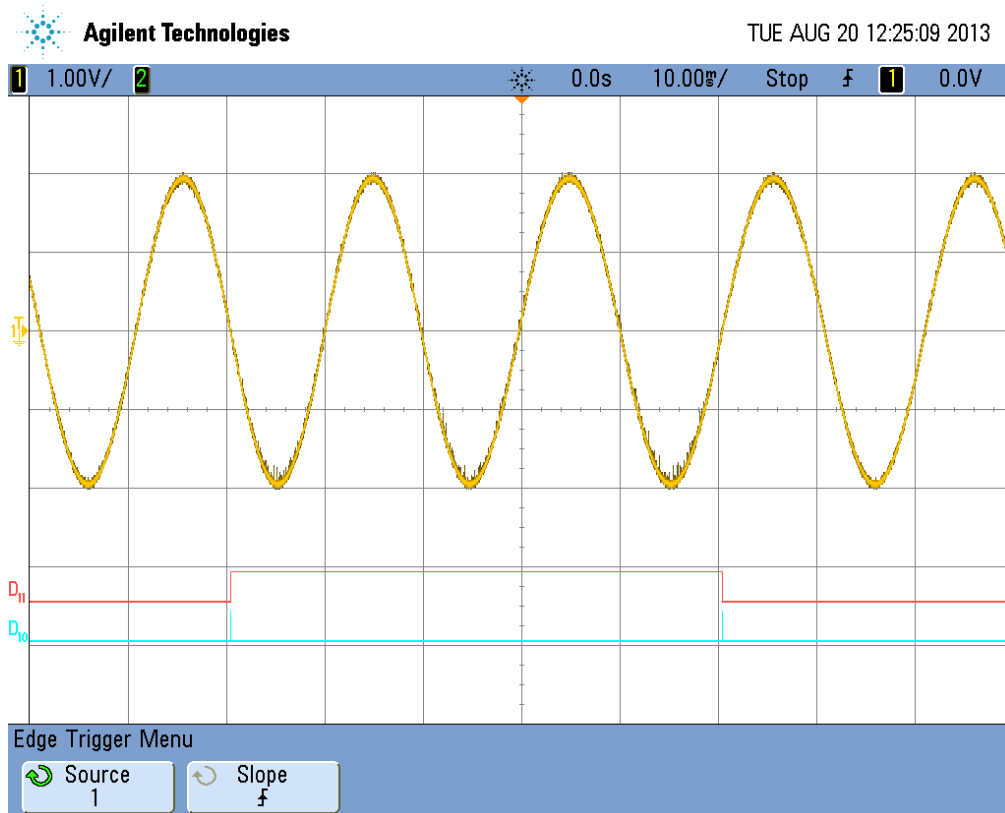


Figura A.5: Segnale per la verifica della larghezza di banda con sola modulazione PM. Segnale modulante a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad. In basso sono visualizzati i segnali di sincronia del segnale modulante, da cui è possibile ricavarne istante di inizio, polarità e durata. In particolare, il segnale D11 riporta la polarità del segnale modulante, mentre D10 ne rappresenta il passaggio per lo zero.

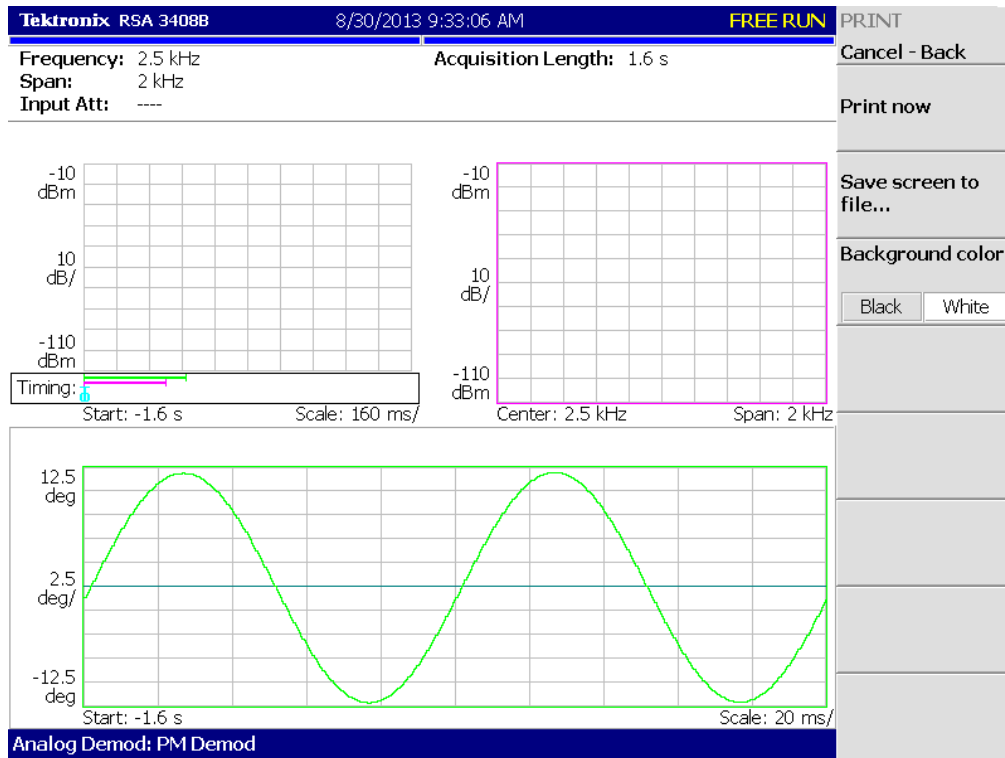


Figura A.6: Demodulazione PM del segnale per la verifica della larghezza di banda con sola modulazione PM. Segnale modulante a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad. Si nota come il segnale demodulato sia compatibile con i parametri di modulazione.

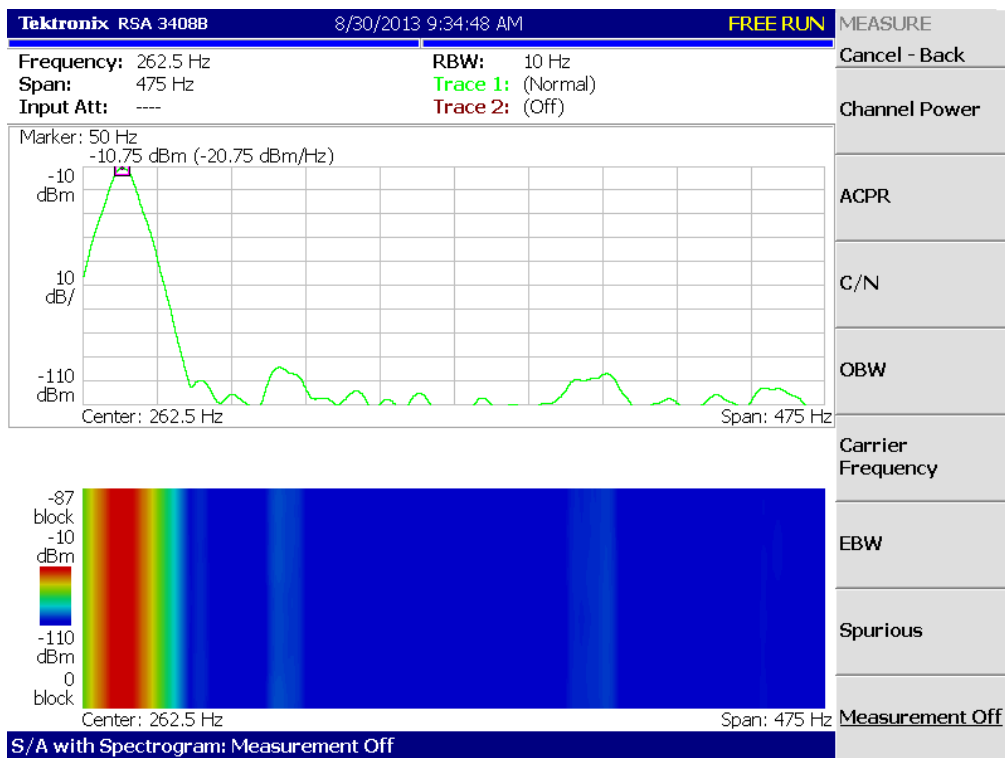
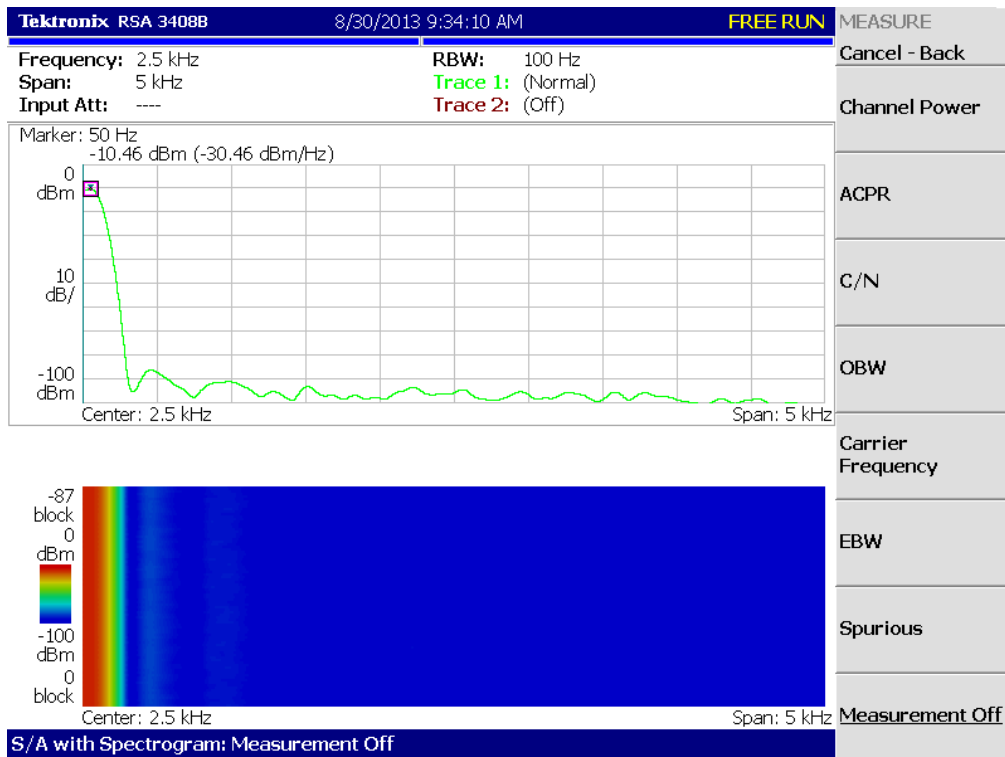


Figura A.7: Analisi spettrale sul segnale per la verifica della larghezza di banda con sola modulazione PM. Segnale modulante a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad. Si rileva un aumento del contenuto spettrale dovuto alla modulazione del segnale portante e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm.



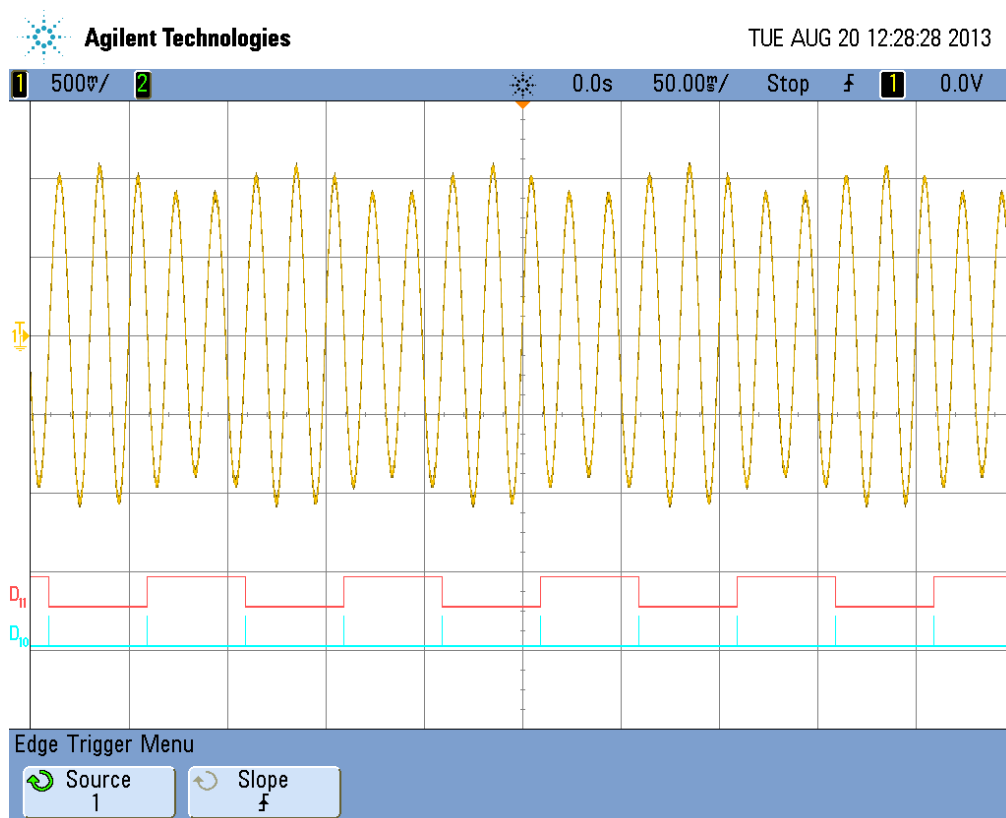


Figura A.8: Segnale per la verifica della larghezza di banda con modulazioni AM e PM. Segnali modulanti a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad, profondità di modulazione AM 10%. In basso sono visualizzati i segnali di sincronia del segnale modulante, da cui è possibile ricavarne istante di inizio, polarità e durata. In particolare, il segnale D11 riporta la polarità del segnale modulante, mentre D10 ne rappresenta il passaggio per lo zero.

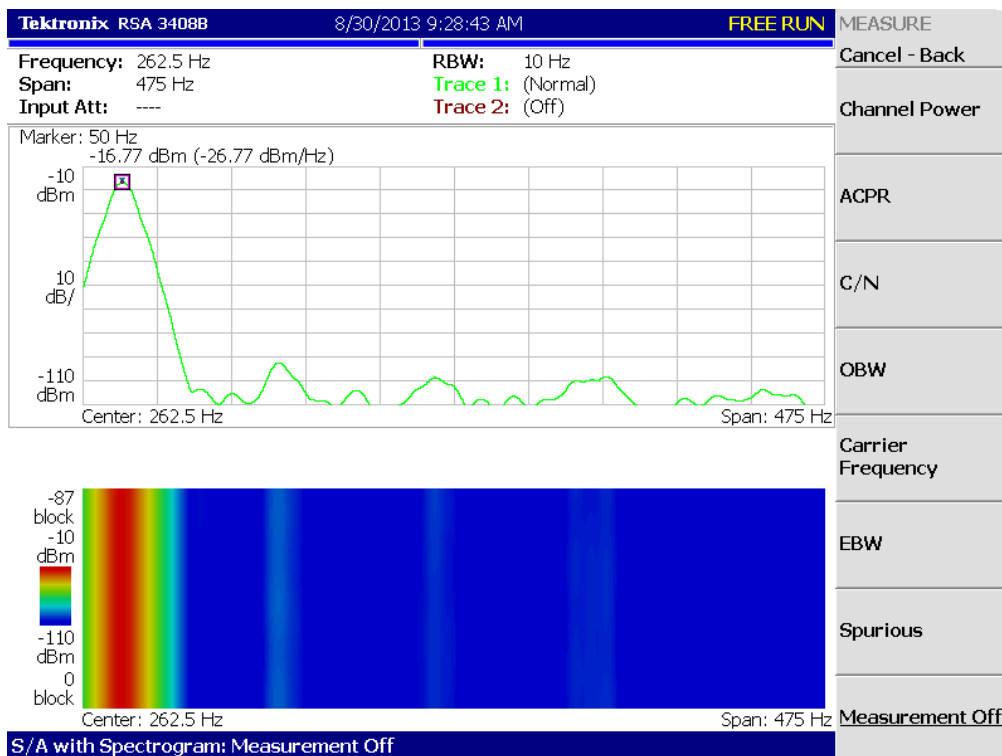
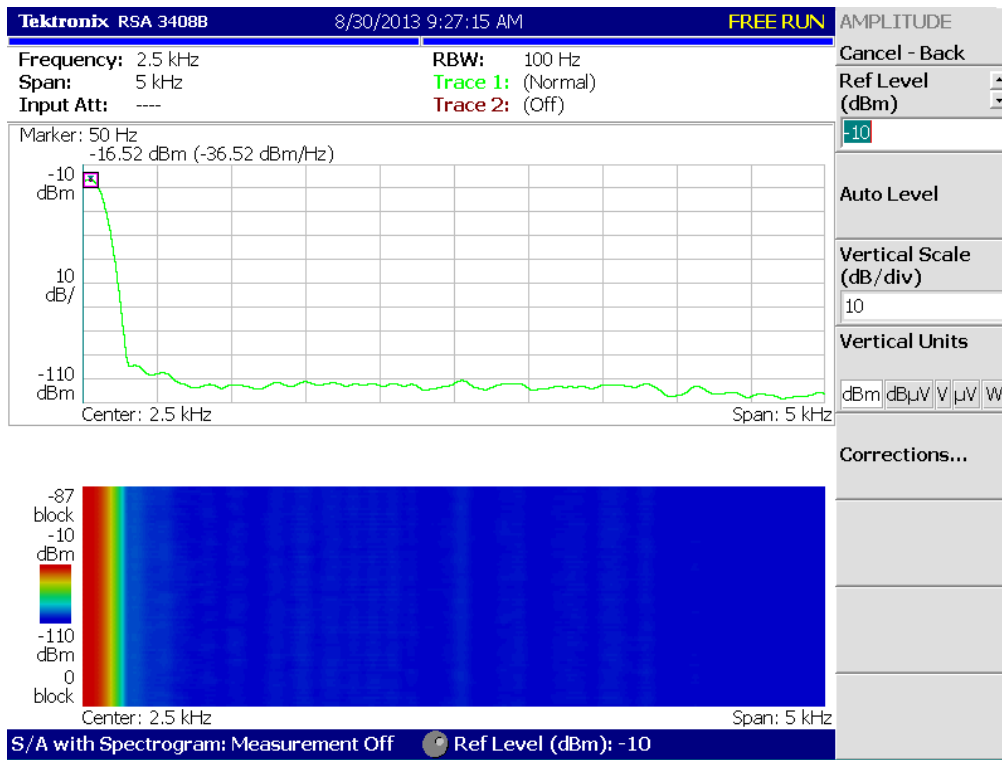


Figura A.9: Analisi spettrale sul segnale per la verifica della larghezza di banda con modulazioni AM e PM. Segnali modulanti a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad, profondità di modulazione AM 10%. Si rileva un aumento del contenuto spettrale dovuto alla modulazione del segnale portante e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm.

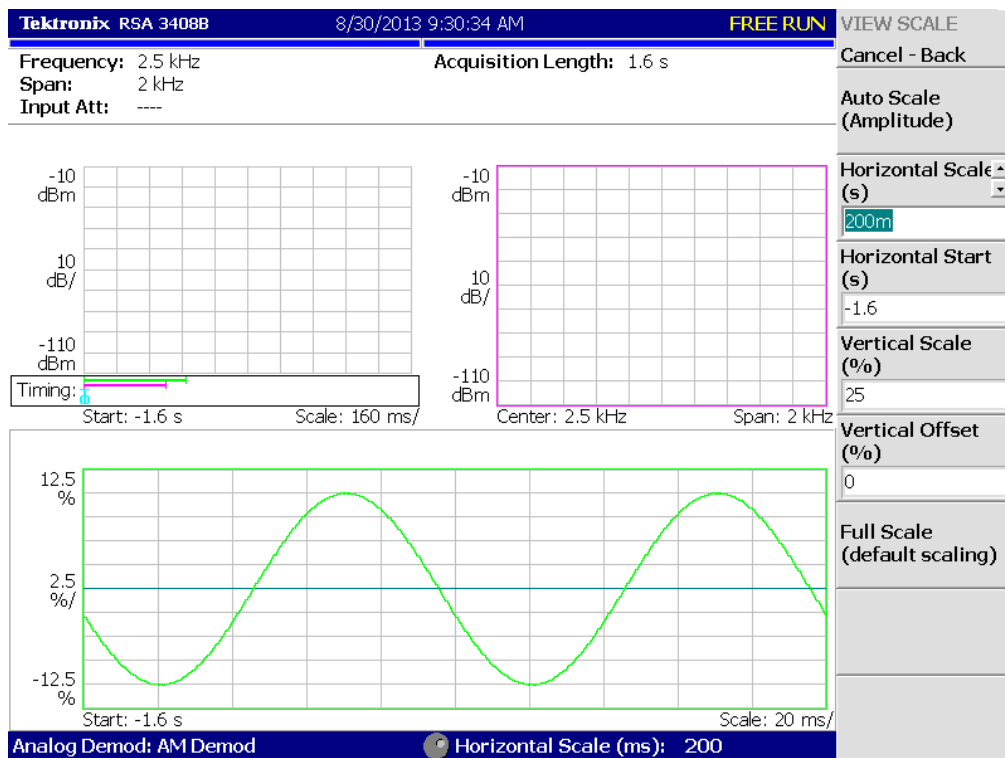
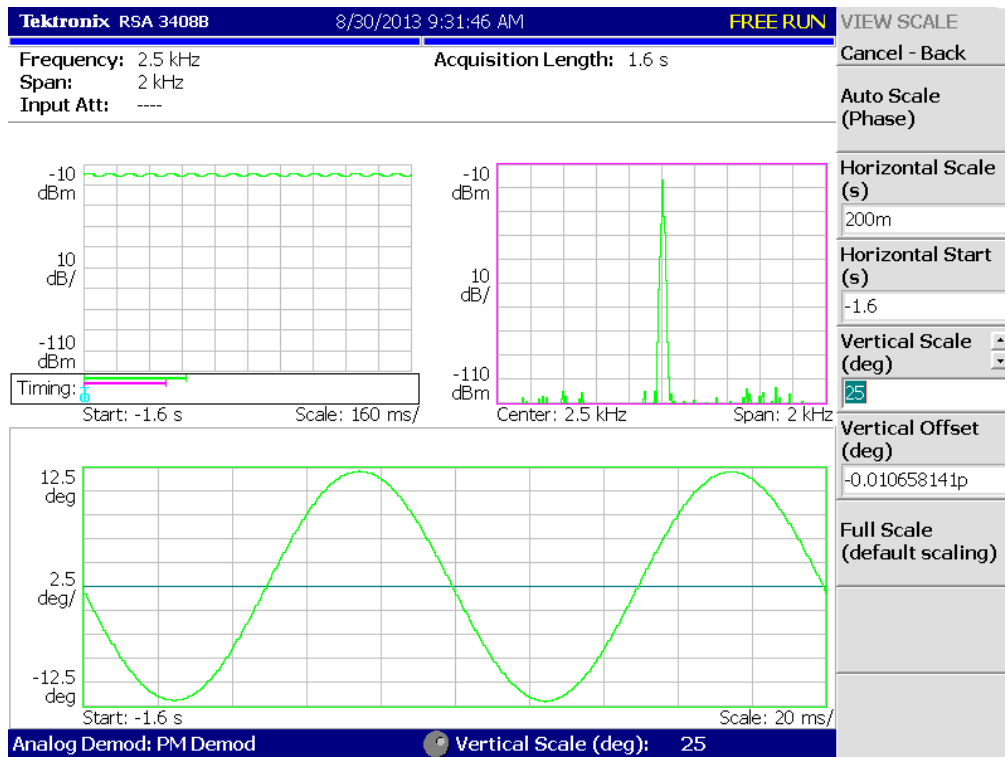


Figura A.10: Demodulazioni PM ed AM del segnale per la verifica della larghezza di banda con modulazione AM e PM. Segnali modulanti a 10 Hz, deviazione di fase 0.2 rad, profondità di modulazione AM 10%. Si nota come i segnali demodulati siano compatibili con i parametri di modulazione.

### A.3 Sollecitazione a rampa della frequenza di rete

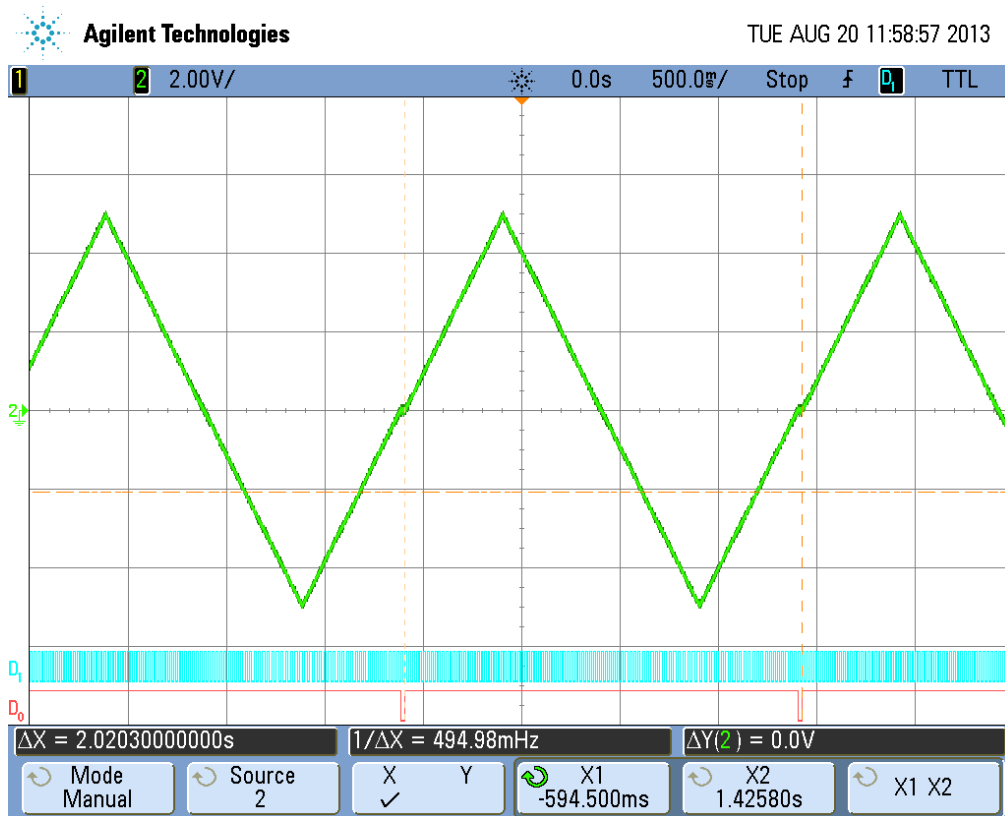


Figura A.11: Modulante del segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete, senza tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. In basso sono riportati i segnali di sincronia del segnale modulante (D0), da cui è possibile ricavarne istante di inizio e durata, e del segnale modulato (D1) da cui è visibile la variazione di frequenza indotta dalla modulazione. Si rileva una discontinuità nella generazione del segnale a metà della rampa di salita, imputabile alla tolleranza di generazione degli strumenti che non permette una perfetta sincronizzazione.

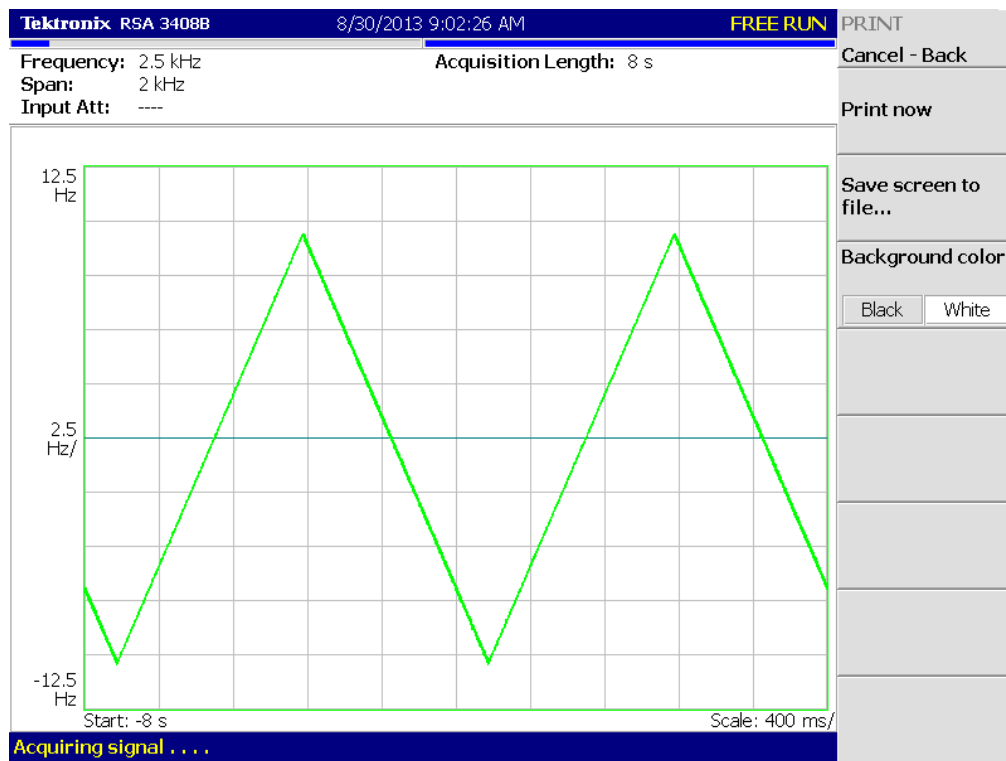


Figura A.12: Demodulazione FM del segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete, senza tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. Si nota come il segnale demodulato sia compatibile con i parametri di modulazione.

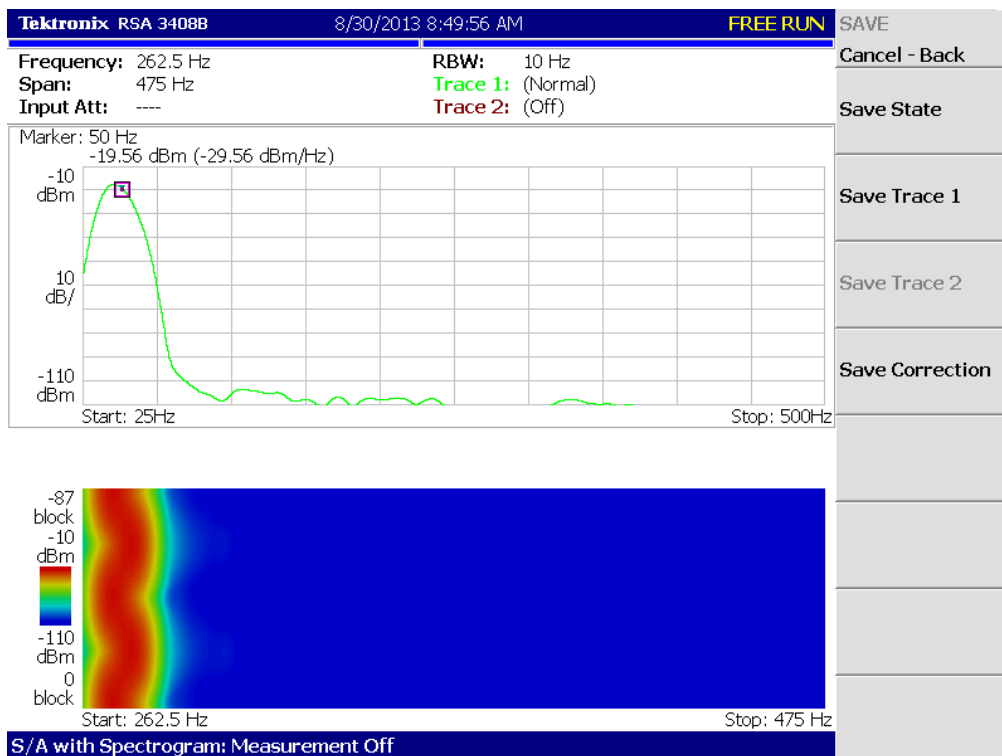
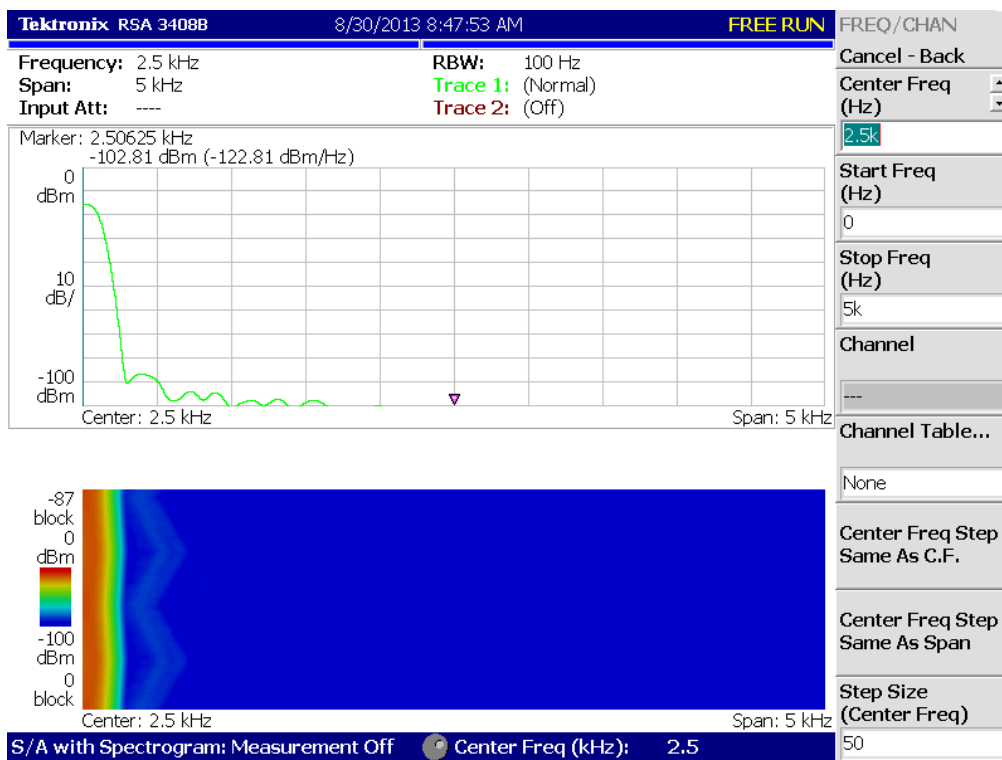


Figura A.13: Analisi spettrale sul segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete, senza tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm.

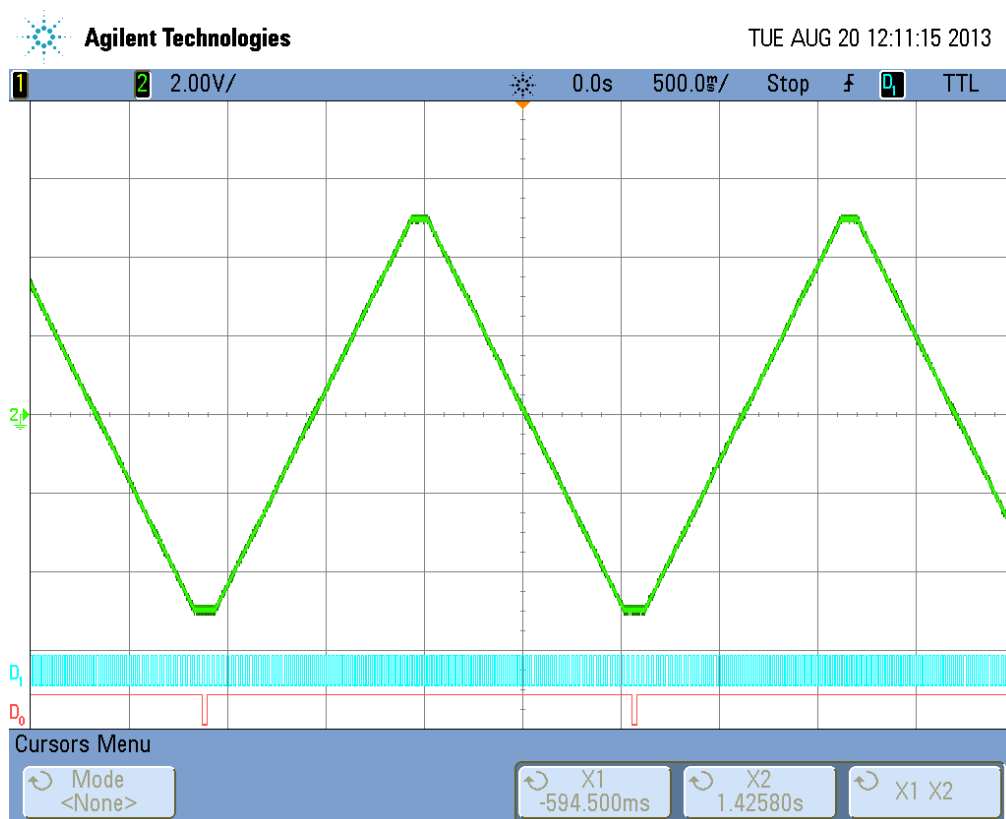


Figura A.14: Modulante del segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete con tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. In basso sono riportati i segnali di sincronia del segnale modulante (D0), da cui è possibile ricavarne istante di inizio e durata, e del segnale modulato (D1) da cui è visibile la variazione di frequenza indotta dalla modulazione.

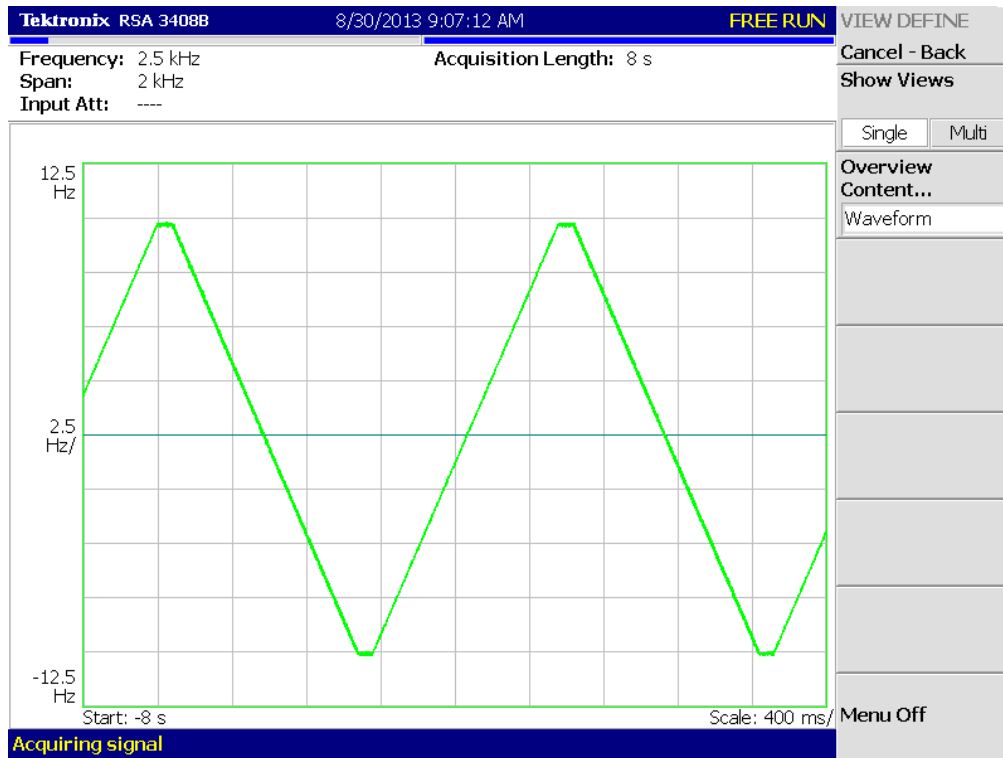


Figura A.15: Demodulazione FM del segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete con tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. Si nota come il segnale demodulato sia compatibile con i parametri di modulazione.



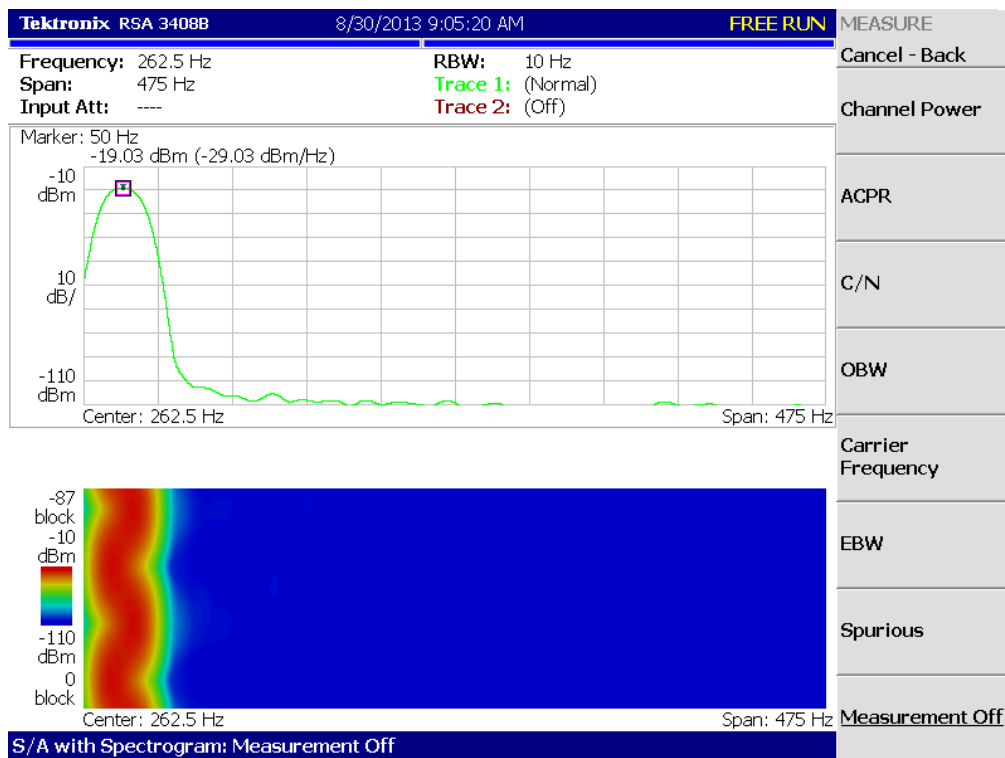


Figura A.16: Analisi spettrale sul segnale per la sollecitazione a rampa della frequenza di rete con tempi di attesa a inizio e fine rampa. Durata della rampa 1 s, variazione di frequenza 10 Hz. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm.

## A.4 Risposta al gradino di ampiezza e di fase

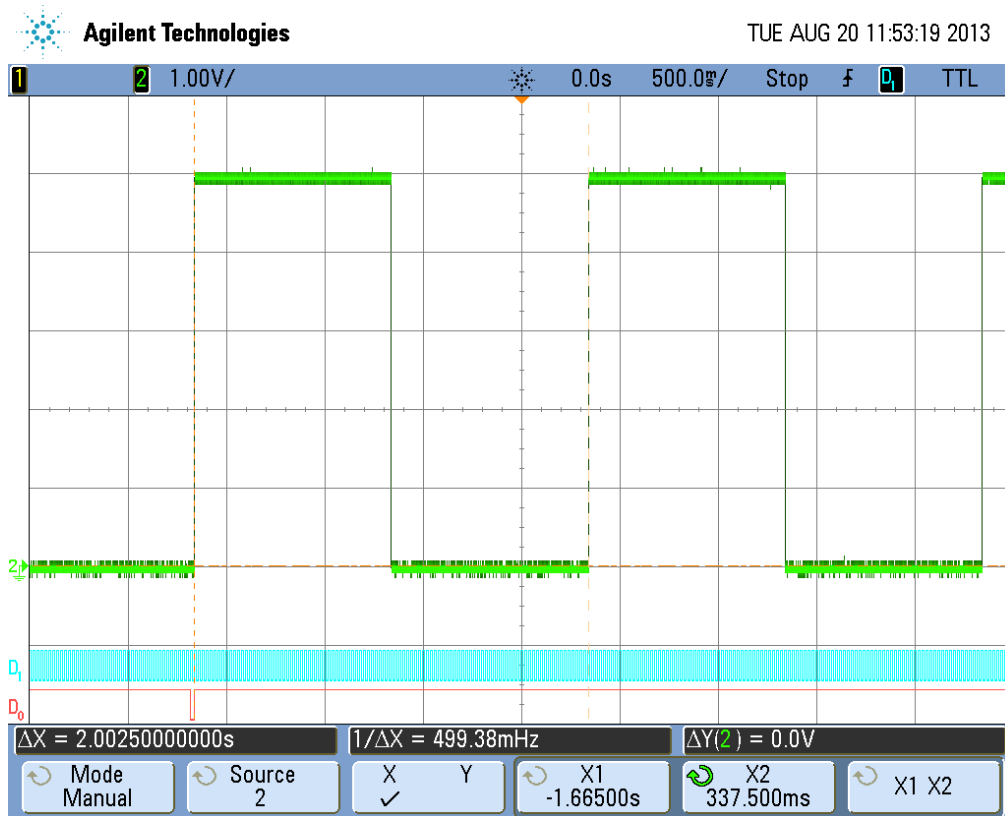


Figura A.17: Segnale modulante per la risposta al gradino in ampiezza e fase, verifica della sincronia e durata del singolo impulso. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase. In basso è riportato il segnale di sincronia del segnale modulante (D0), da cui è possibile ricavarne istante di inizio e durata. Si rileva come la durata complessiva del singolo gradino sia maggiorata di 2.5 ms, il che comporta l'applicazione del successivo impulso dopo  $45^\circ$  come da richiesta.

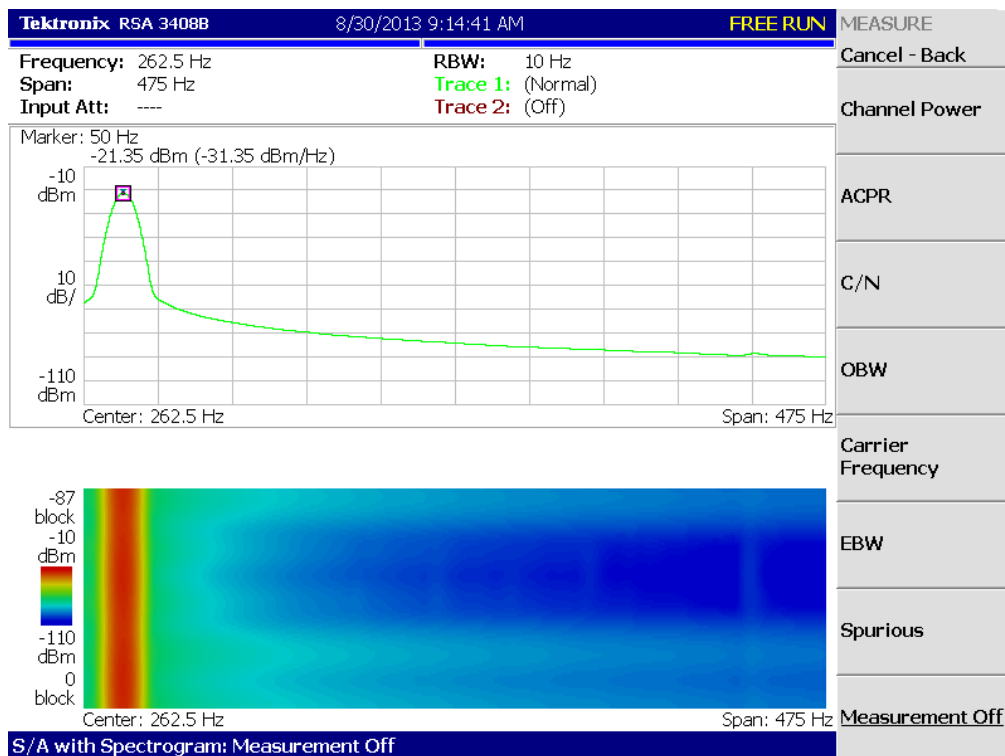
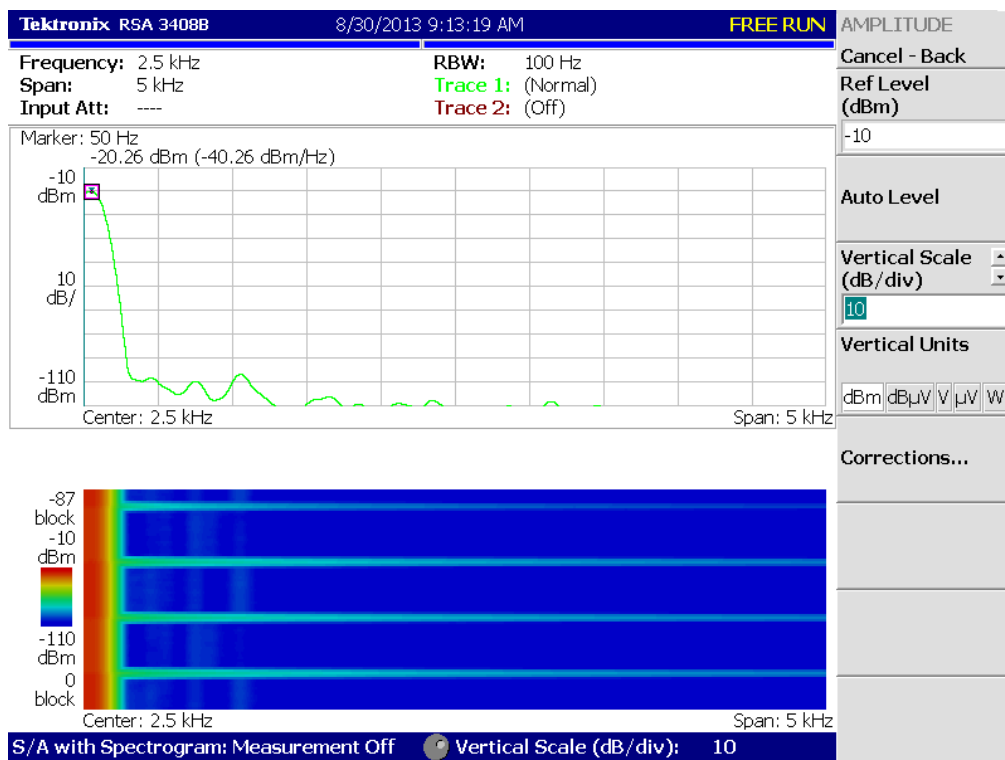


Figura A.18: Analisi spettrale sul segnale per la risposta al gradino in ampiezza. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase, profondità di modulazione 20%. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm. Si rileva la presenza di componenti spettrali a larga banda, eccedenti i 5 kHz e inferiori a -50 dBm, in concomitanza all'applicazione del gradino.

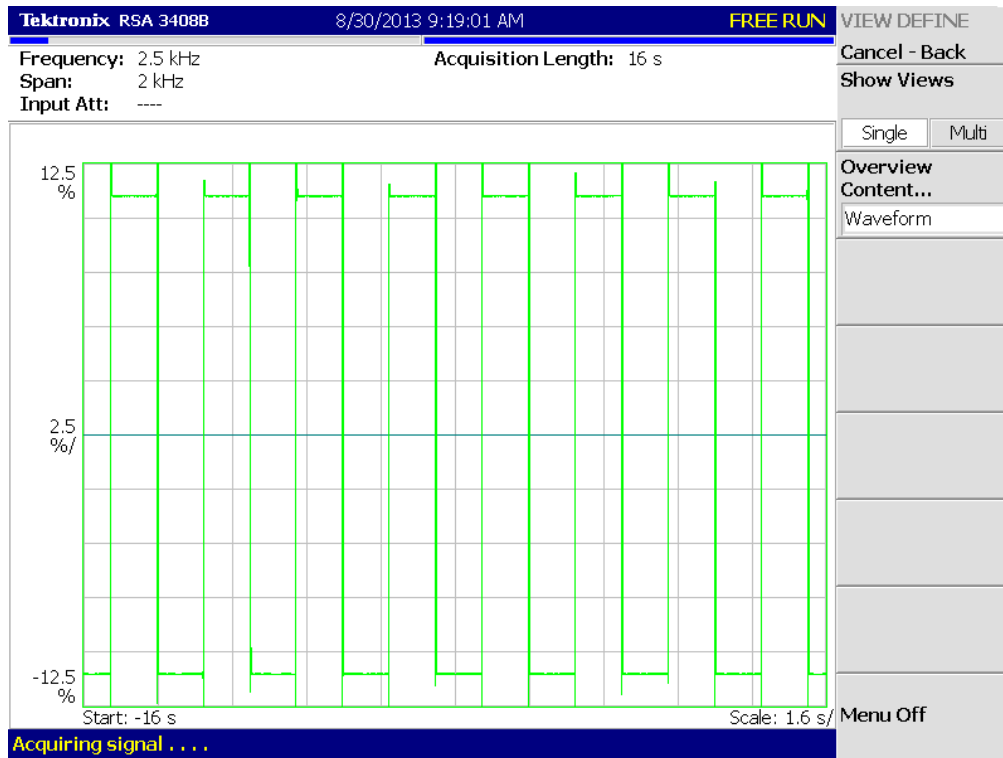


Figura A.19: Demodulazione AM del segnale per la risposta al gradino in ampiezza. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase, profondità di modulazione 20%. Si nota come il segnale demodulato sia compatibile con i parametri di modulazione.

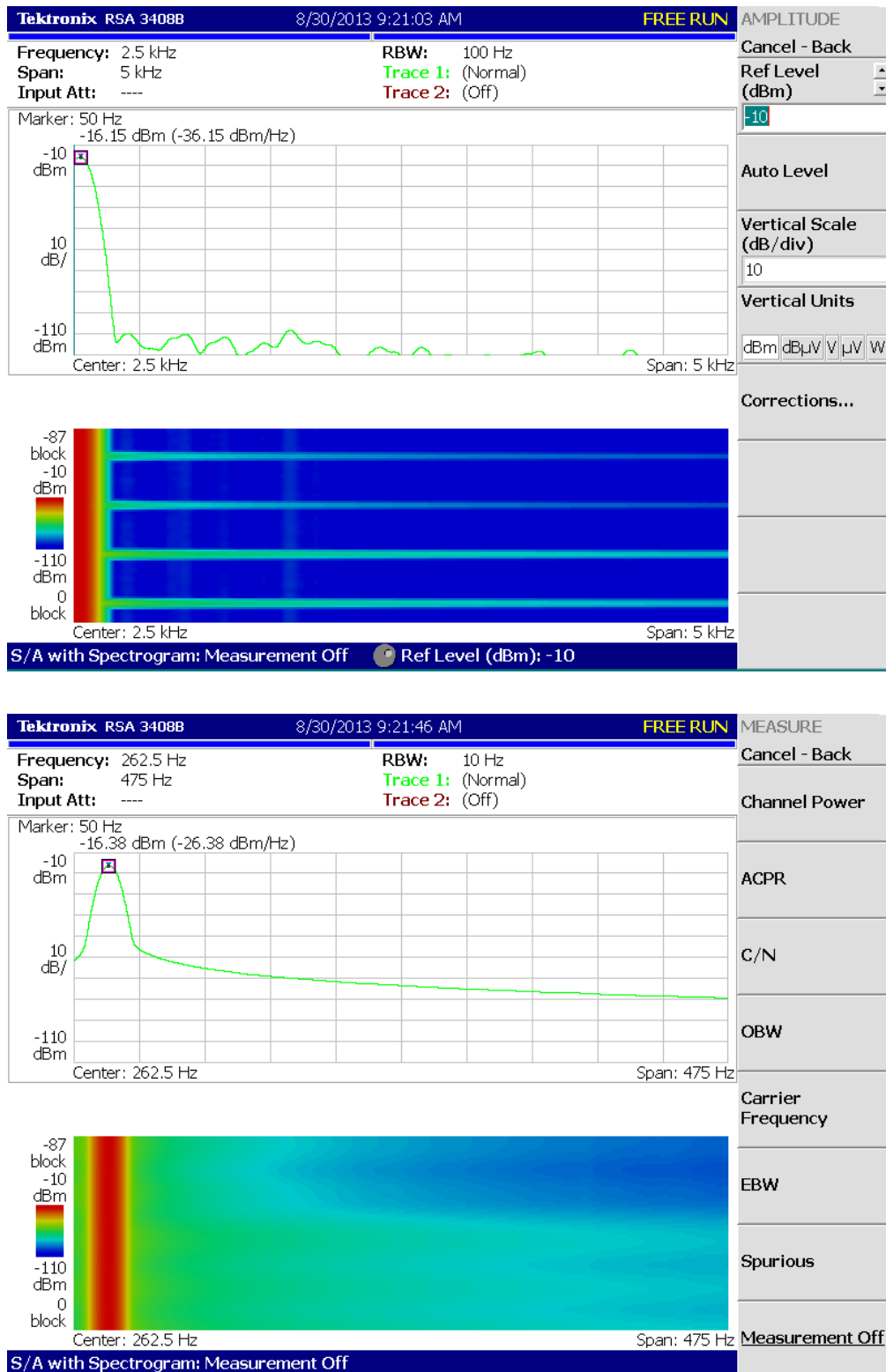


Figura A.20: Analisi spettrale sul segnale per la risposta al gradino in fase. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase, deviazione di fase  $20^\circ$ . Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli di rumore risultano inferiori a -80 dBm. Si rileva la presenza di componenti spettrali a larga banda, eccedenti i 5 kHz e inferiori a -40 dBm, in concomitanza all'applicazione del gradino.

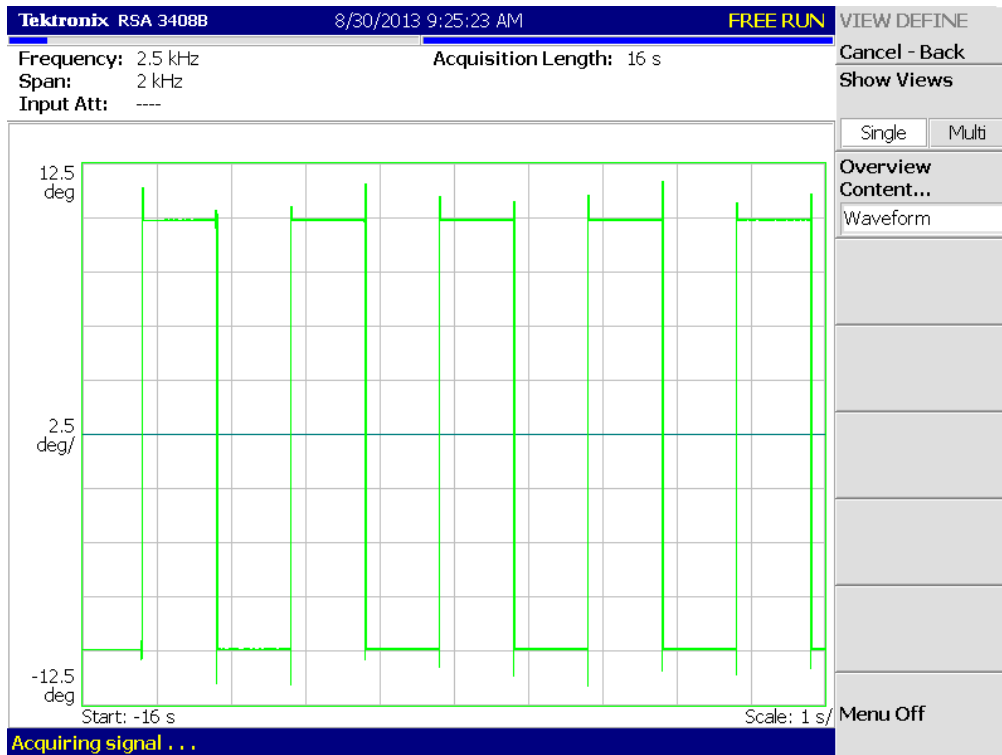


Figura A.21: Demodulazione PM del segnale per la risposta al gradino in fase. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase, deviazione di fase  $20^\circ$ . Si nota come il segnale demodulato sia compatibile con i parametri di modulazione.

## A.5 Immunità ai buchi di tensione

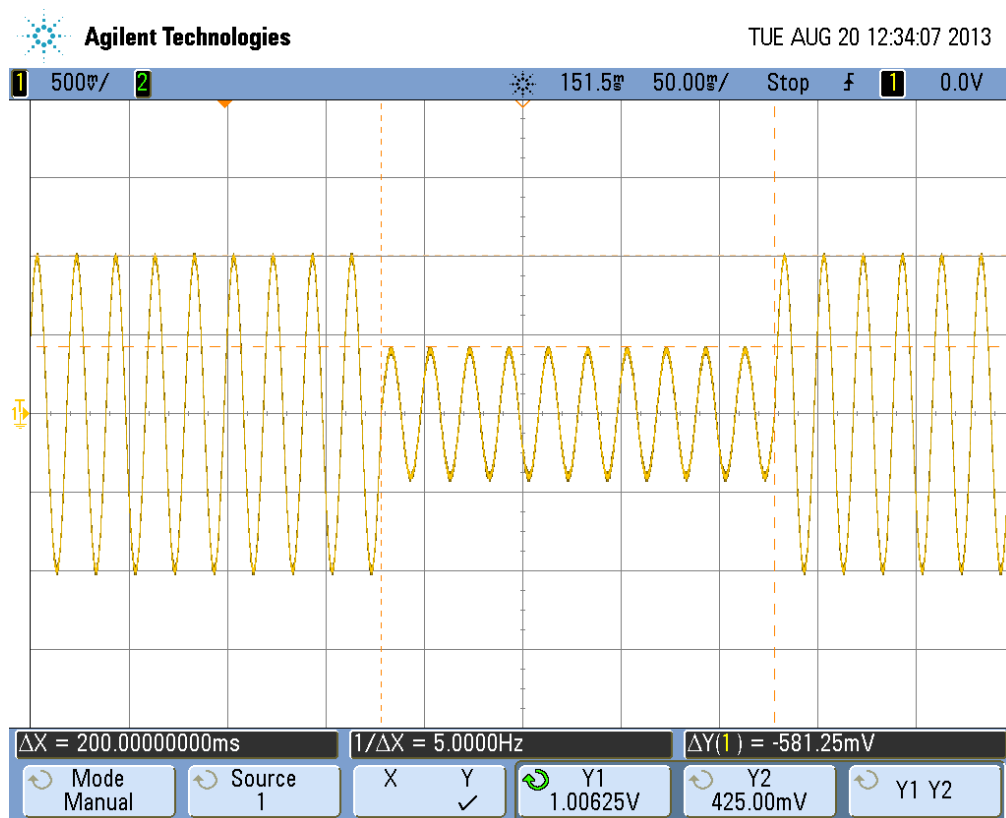


Figura A.22: Segnale per la prova di immunità al buco di tensione. Si nota come il segnale sia compatibile con i parametri di modulazione. Il segnale risulta correttamente generato secondo quanto richiesto.

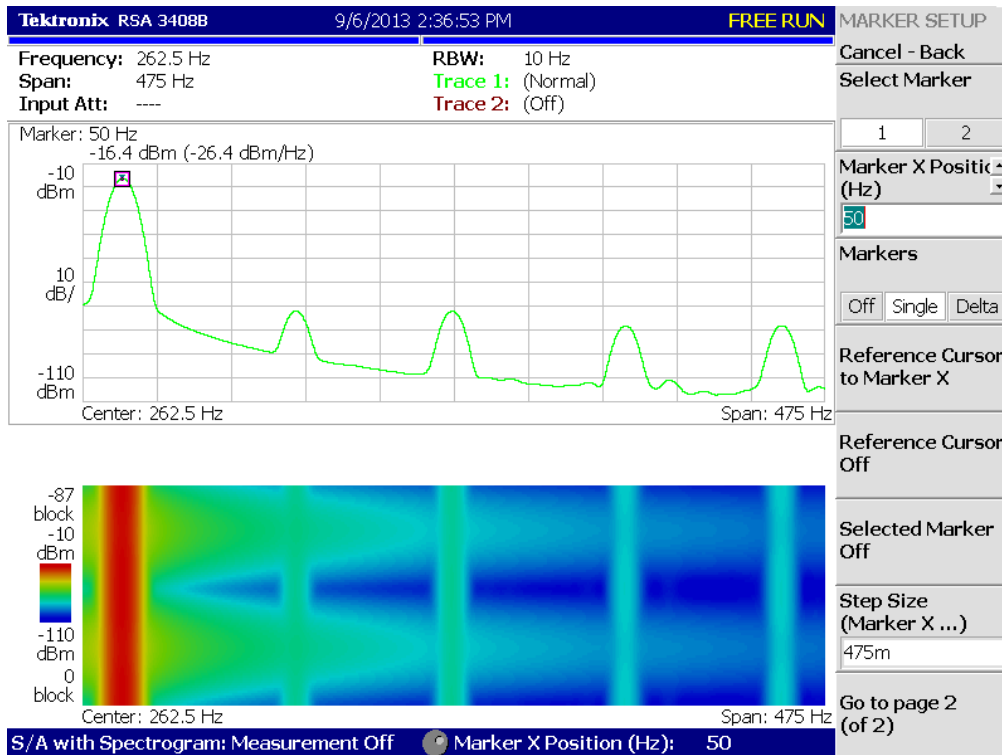
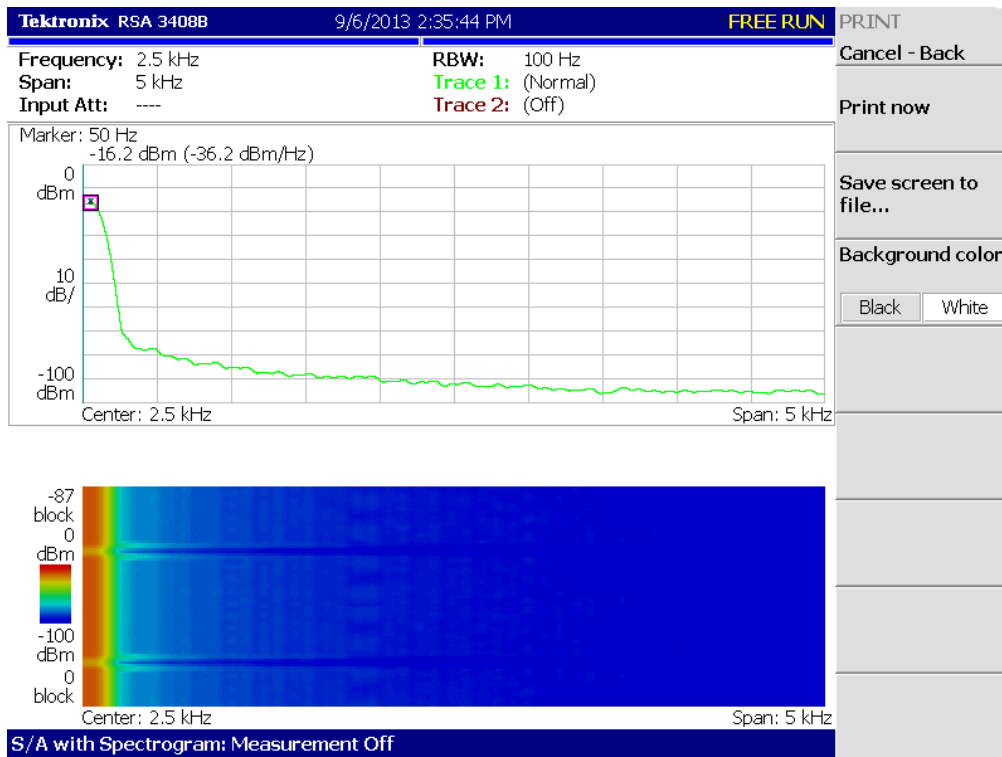


Figura A.23: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità al buco di tensione. Tensione residua 40%, durata 10 cicli, risoluzione temporale 0.1 ms. Si rileva la presenza di componenti spettrali dovute alla generazione per punti a frequenze multiple di 130 Hz fino a 1 kHz e con ampiezze, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, inferiori a -50 dBm.



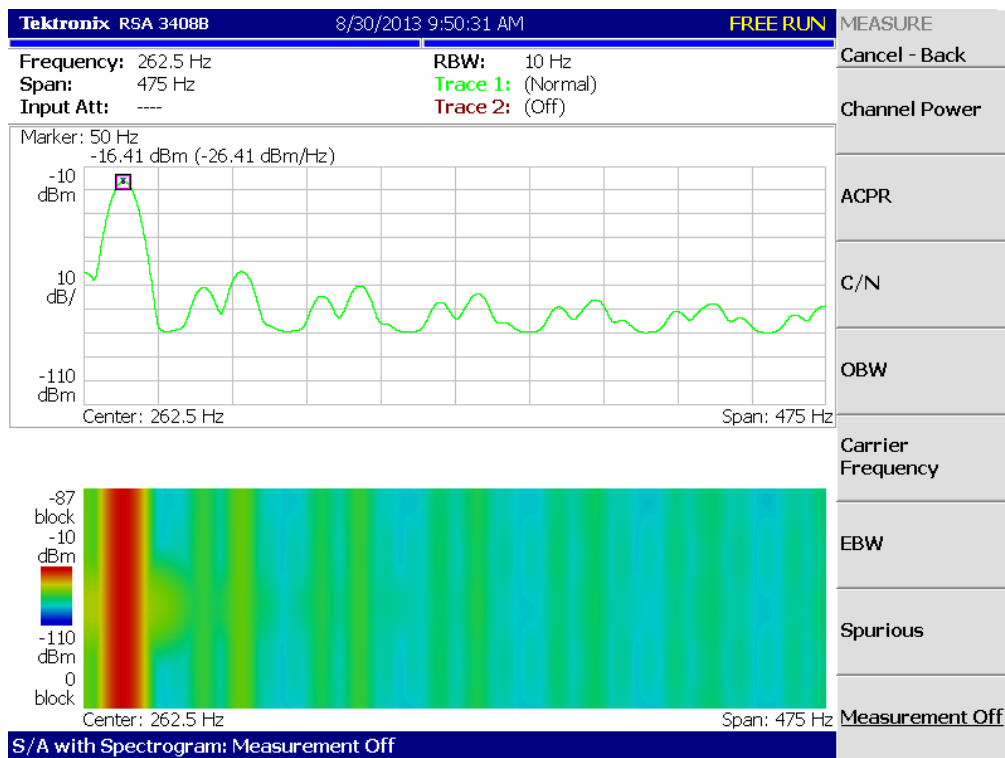
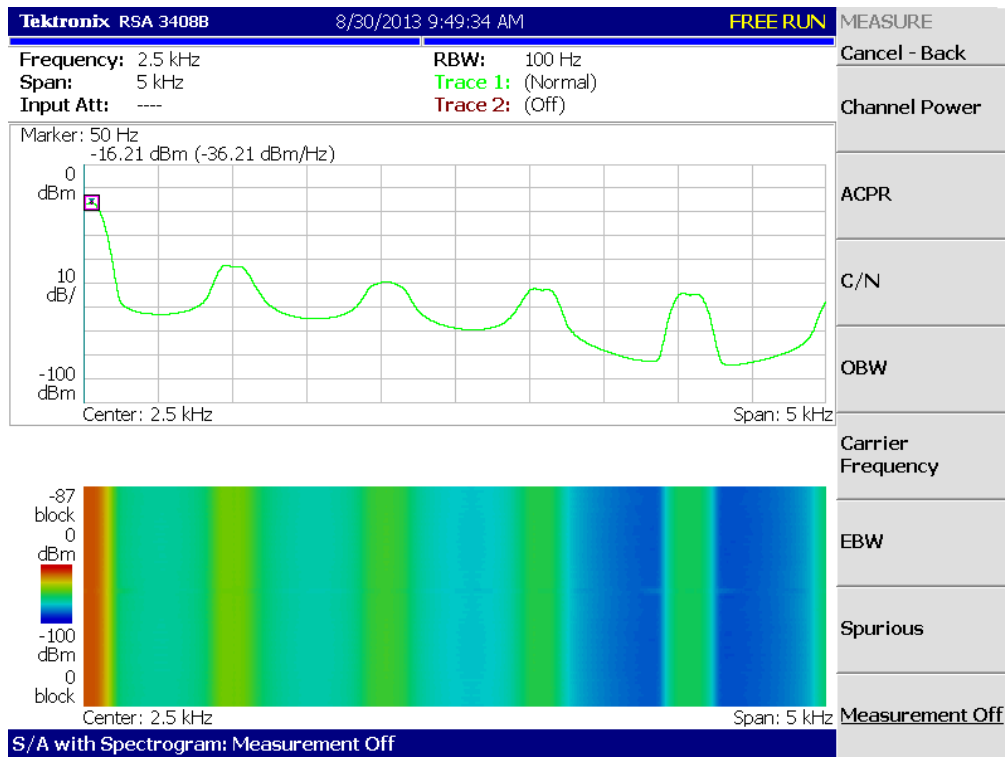


Figura A.24: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità al buco di tensione. Tensione residua 40%, durata 10 cicli, risoluzione temporale 1 ms. Si rileva la presenza di componenti spettrali dovute alla generazione per punti a frequenze multiple di 1 kHz in tutta la banda di interesse e con ampiezze, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, inferiori a -20 dBm.

## A.6 Immunità alle armoniche di tensione

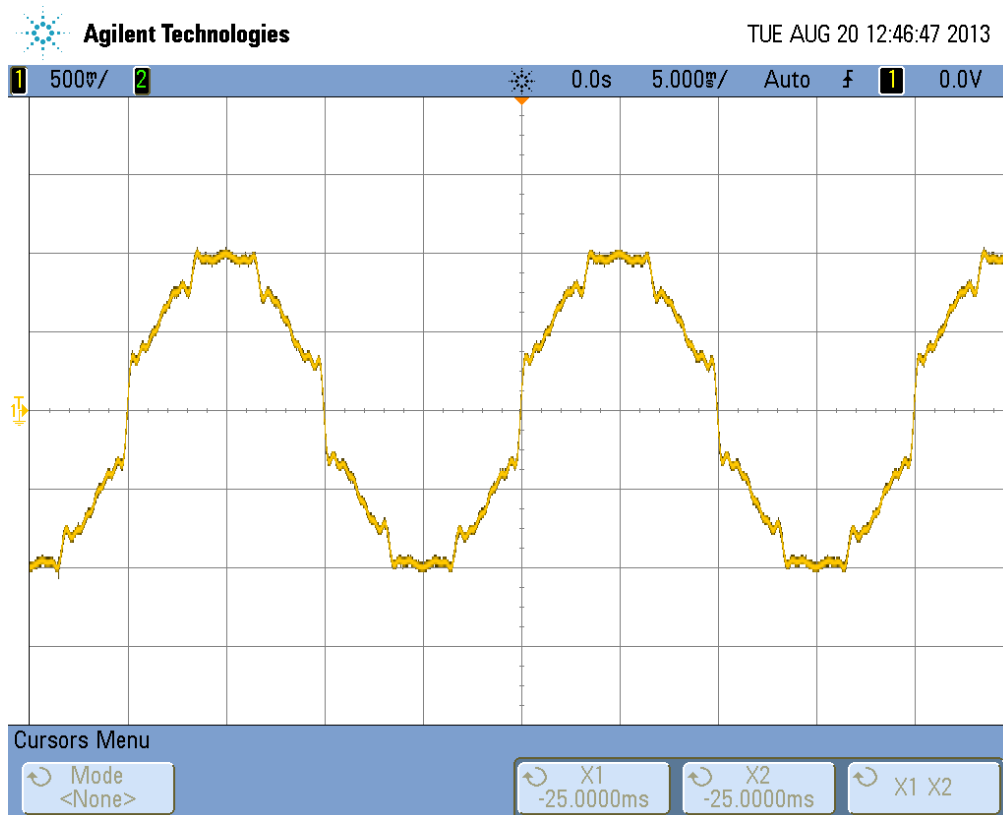


Figura A.25: Segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 1 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Si noti come, nonostante la classe bassa, il segnale sia pesantemente distorto ma ancora riconoscibile come senoide.

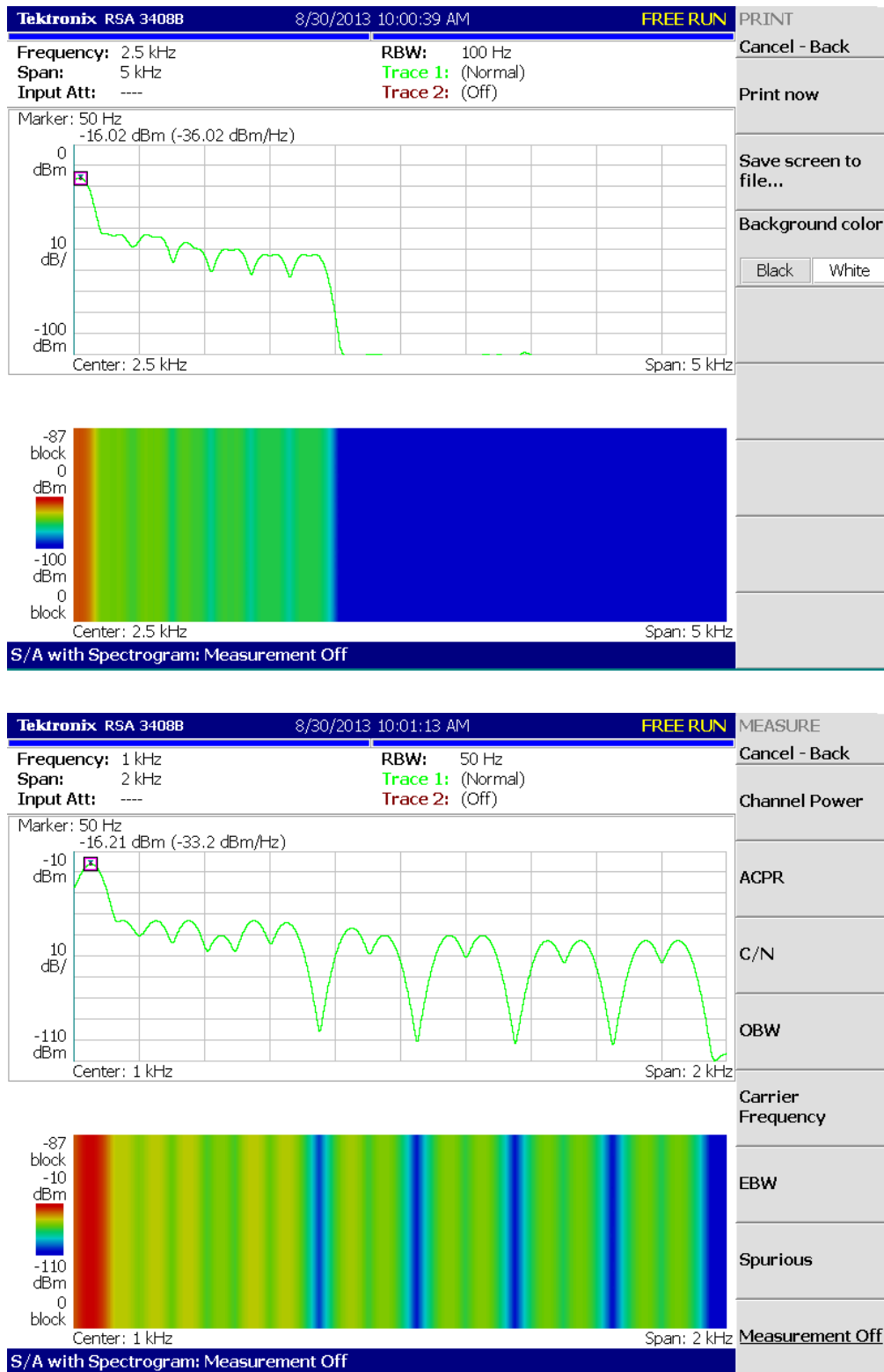


Figura A.26: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 1 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli armonici risultano compatibili con quanto prescritto dalla norma.

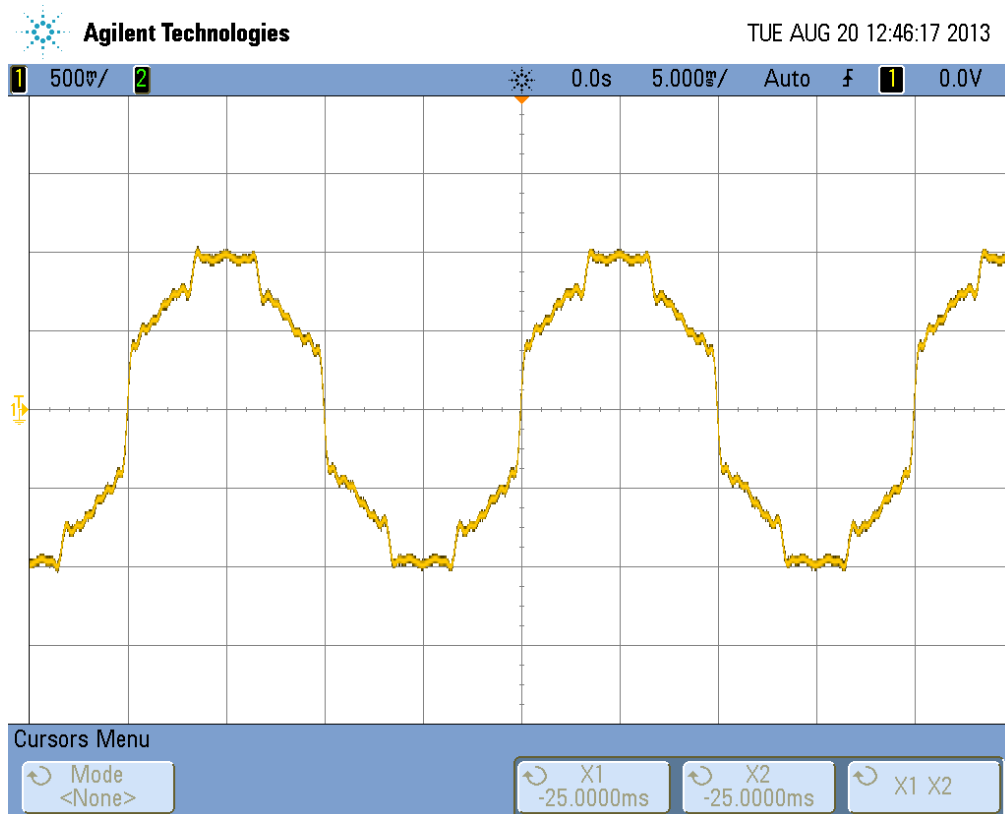


Figura A.27: Segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 2 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Si noti come il segnale sia pesantemente distorto ma ancora riconoscibile come sinusoidale.

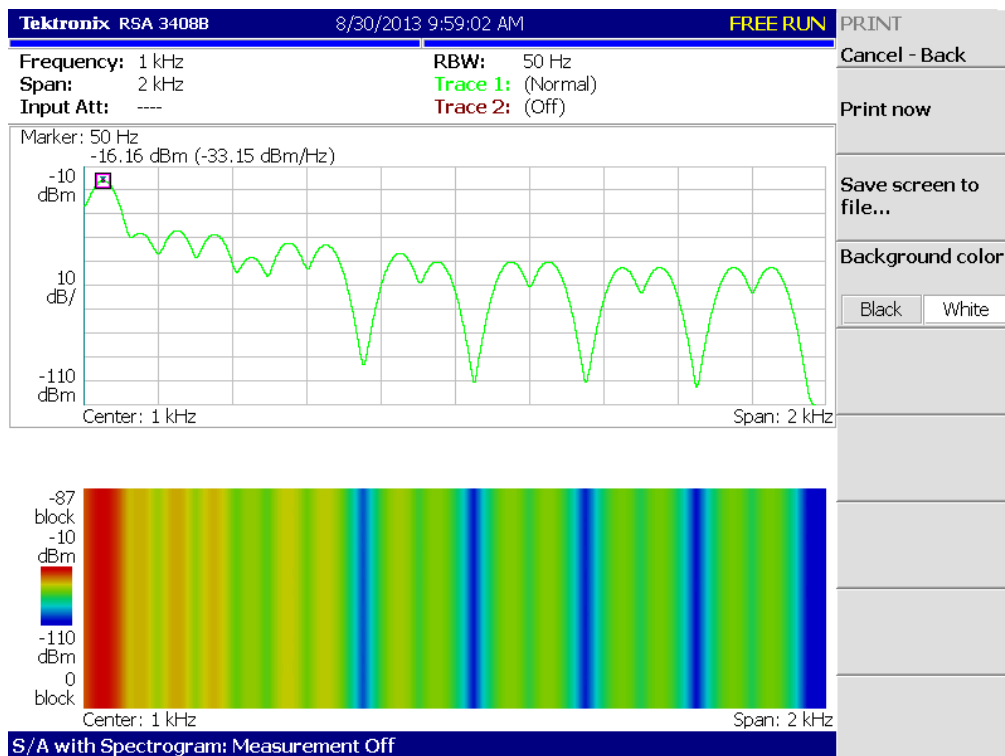
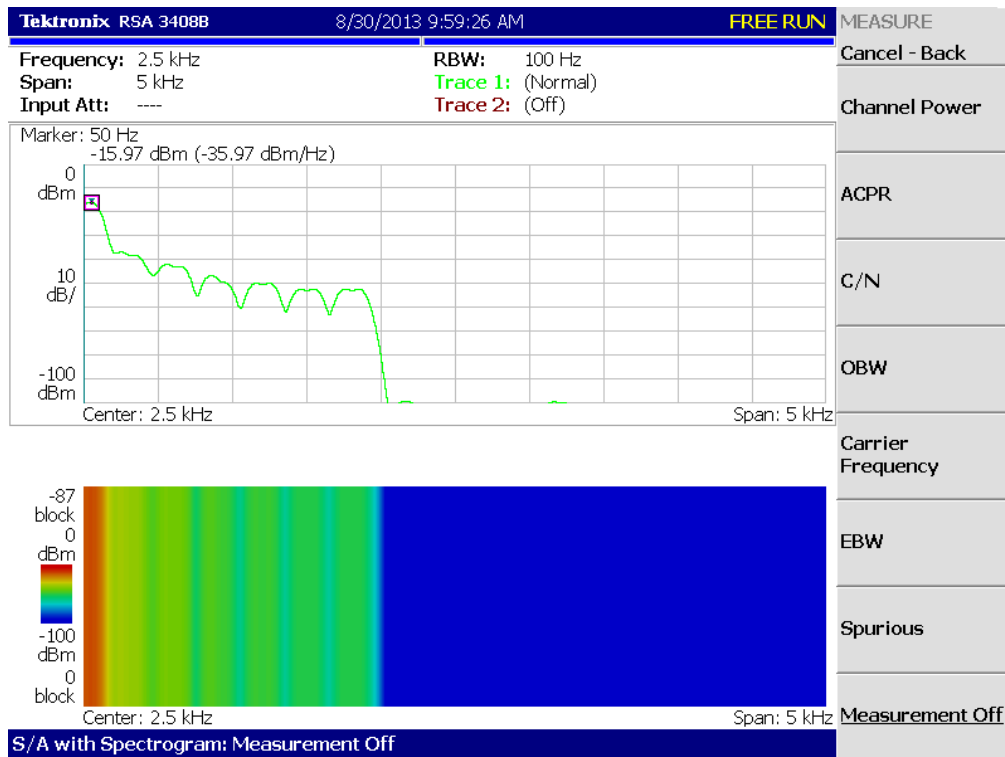


Figura A.28: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 2 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli armonici risultano compatibili con quanto prescritto dalla norma.

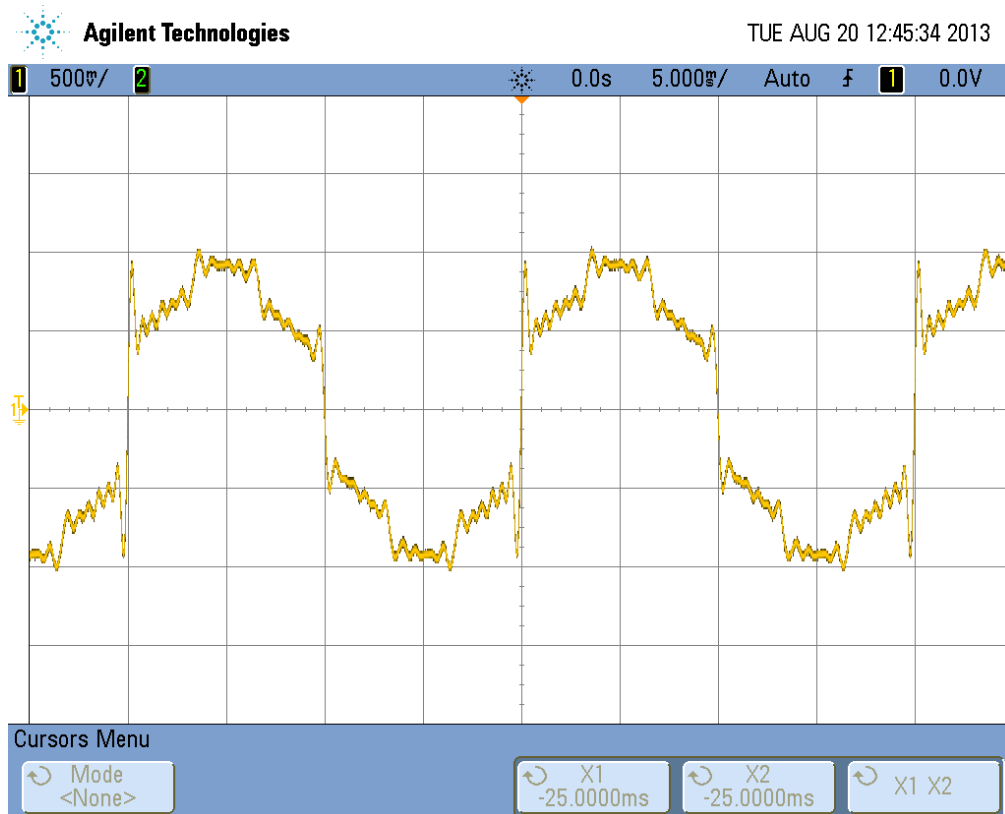


Figura A.29: Segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 3 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Si noti come il segnale sia pesantemente distorto e tenda a un'onda quadra con la presenza di picchi in corrispondenza alle commutazioni.

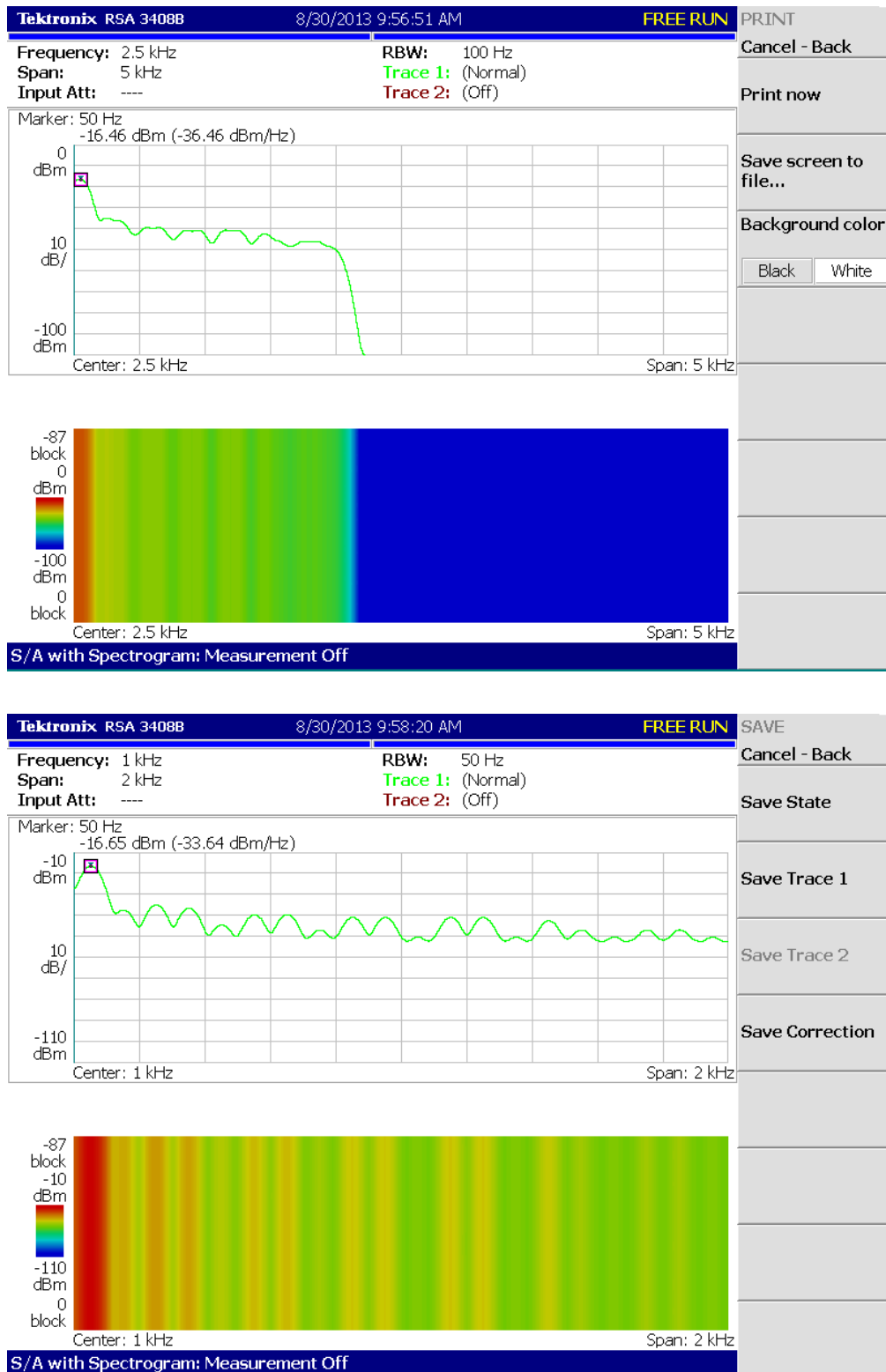


Figura A.30: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità alle armoniche di tensione in classe 3 a 50 Hz, generato impiegando 65536 punti per periodo. Non vi è contenuto spettrale spurio e, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, i livelli armonici risultano compatibili con quanto prescritto dalla norma.

## A.7 Immunità alle fluttuazioni di tensione

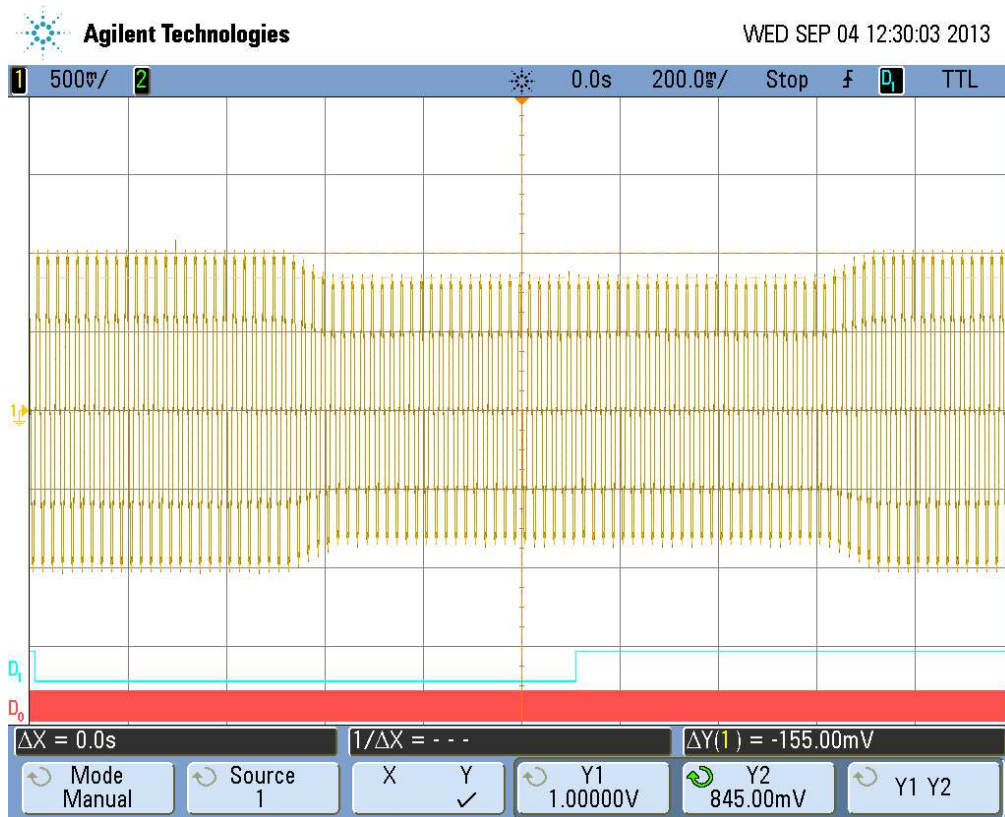


Figura A.31: Segnale per la prova di immunità alle fluttuazioni di tensione. Fluttuazione del 20% in 5 passi con inizio a 270°. Il segnale risulta conforme a quanto specificato, con una variazione complessiva di -155 mV.



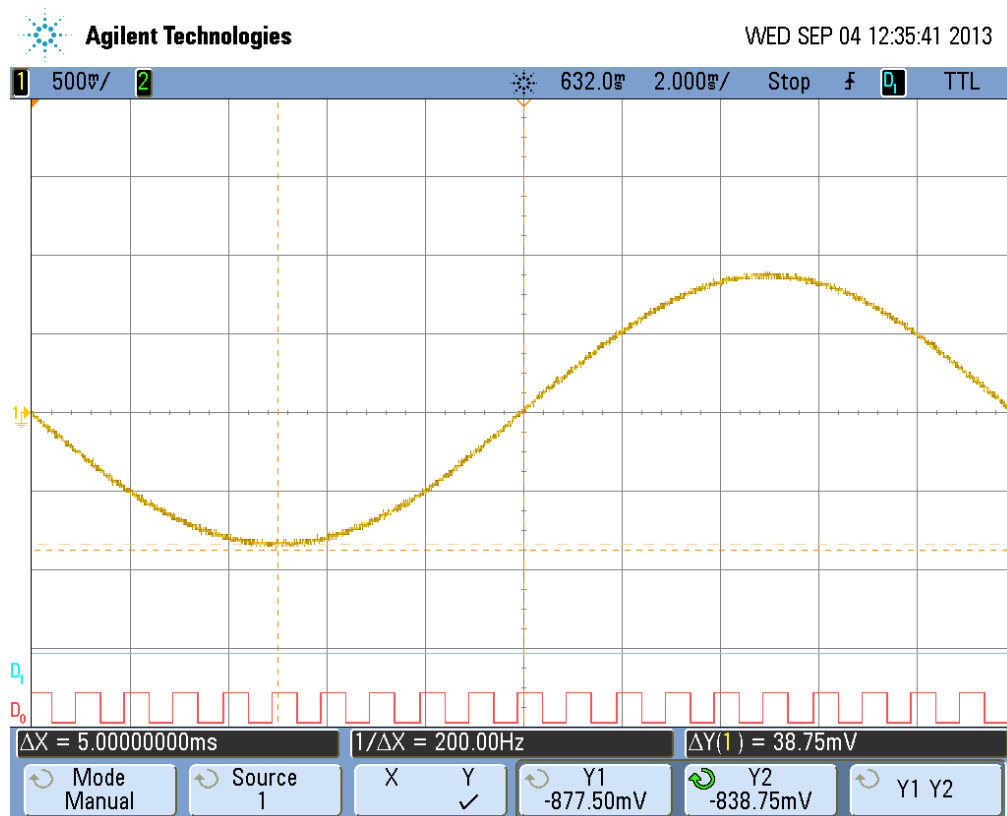
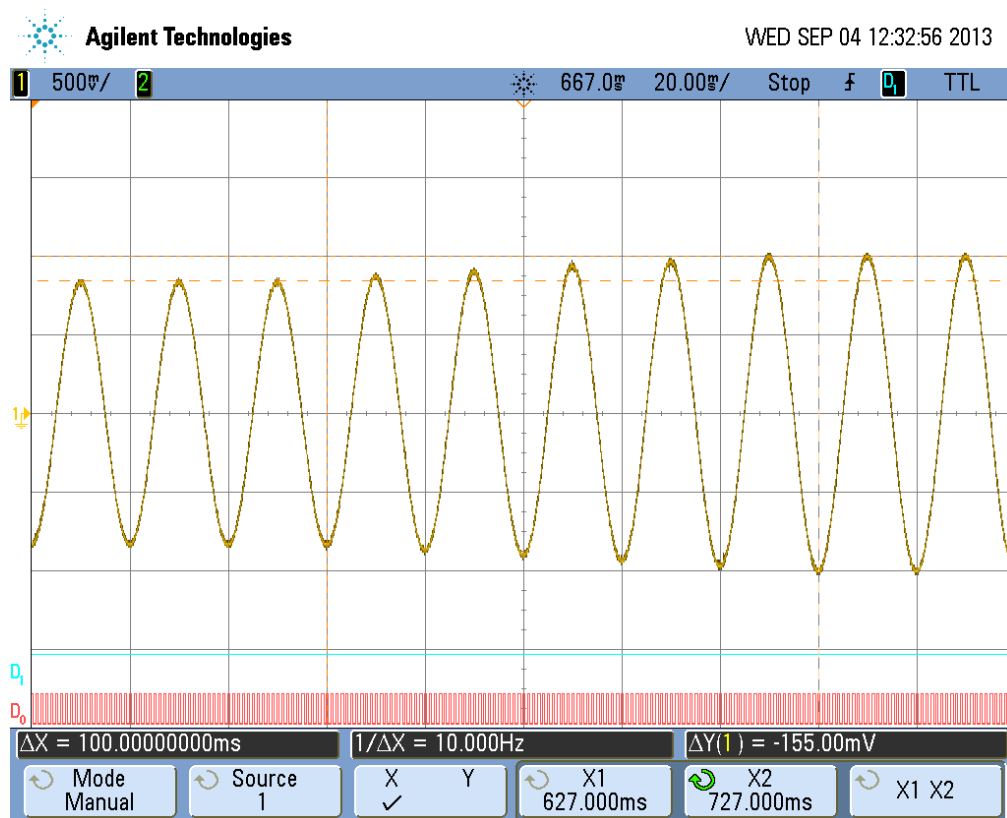


Figura A.32: Dettaglio della variazione completa e del singolo step di tensione per la prova di immunità alle fluttuazioni di tensione. Fluttuazione del 20% in 5 passi con inizio a 270°. Nella figura in alto si riporta il dettaglio della transizione, da cui si verifica la variazione in 5 periodi. Nella figura in basso si riporta il dettaglio del singolo step di variazione.

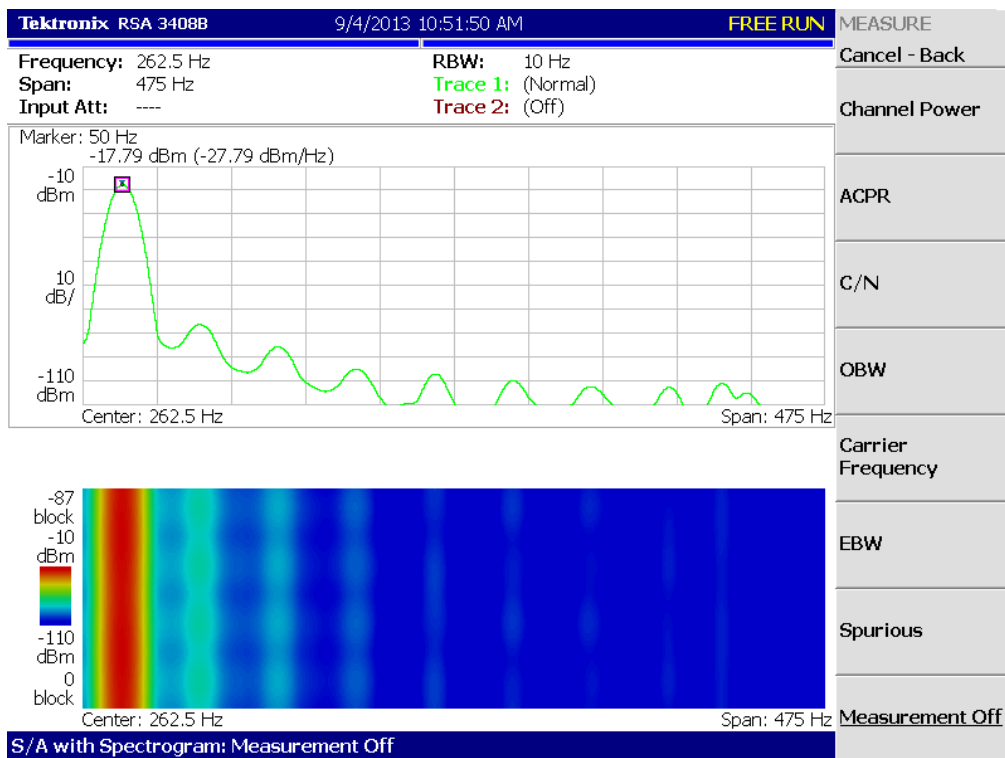
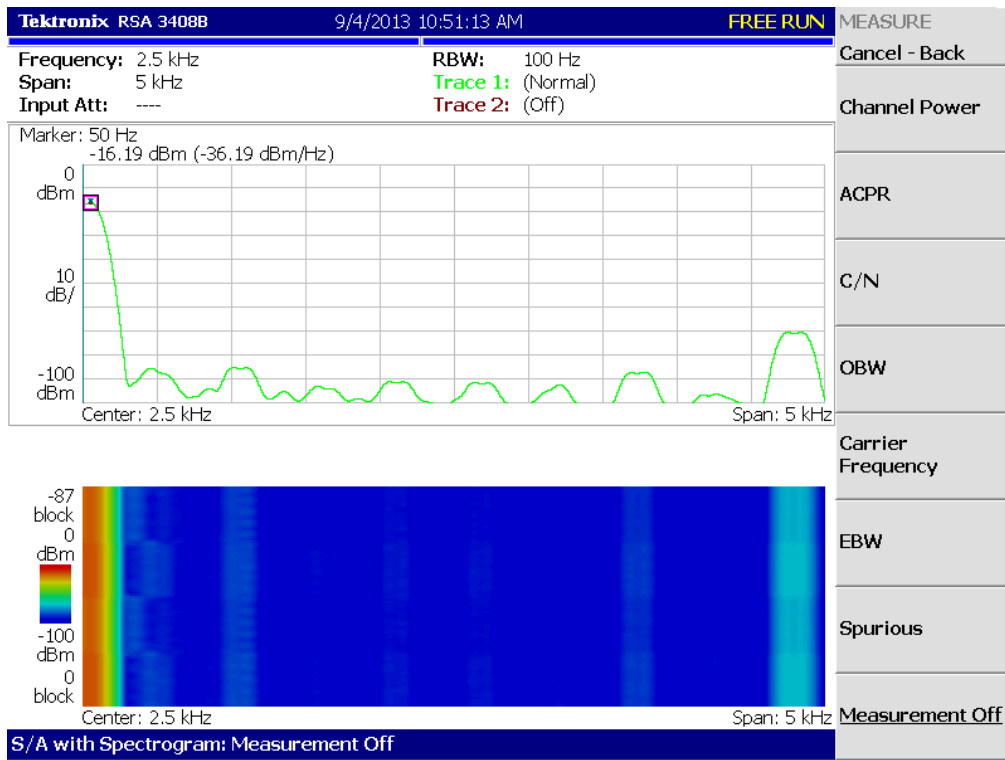


Figura A.33: Analisi spettrale sul segnale per la prova di immunità alle fluttuazioni di tensione. Fluttuazione del 20% in 5 passi con inizio a 270°. Si rilevano componenti spettrali spurie a 4750 Hz imputabili alla generazione per punti del segnale che, tenendo conto dell'inserimento di un attenuatore con valore 20 dB, hanno ampiezza pari a -50 dBm con rumore inferiore a -50 dBm.

## Appendice B

Risultati elaborazione tramite  
algoritmo Ip-DFT

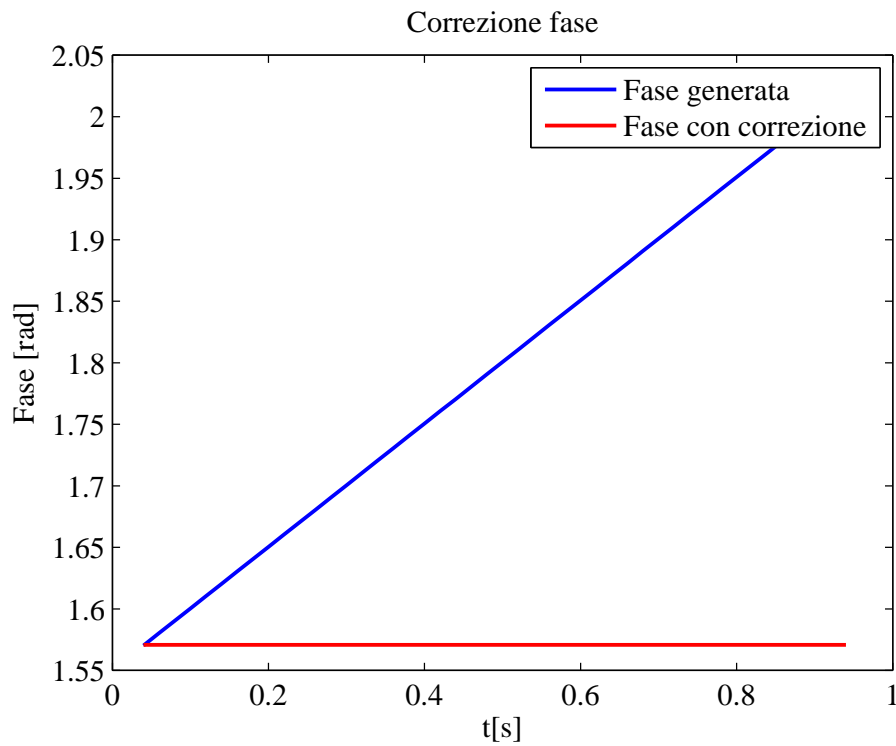


Figura B.1: Confronto tra fase stimata prima (blu) e dopo (rosso) la correzione dell'errore di generazione, originato dalla tolleranza sulla base dei tempi del generatore, che si traduce in una variazione lineare della fase con pendenza 0.5 rad/s. Il valore corretto, pari a  $\pi/2$ , corrisponde allo sfasamento esistente tra il segnale generato sinusoidale e elaborato con modello cosinusoidale.

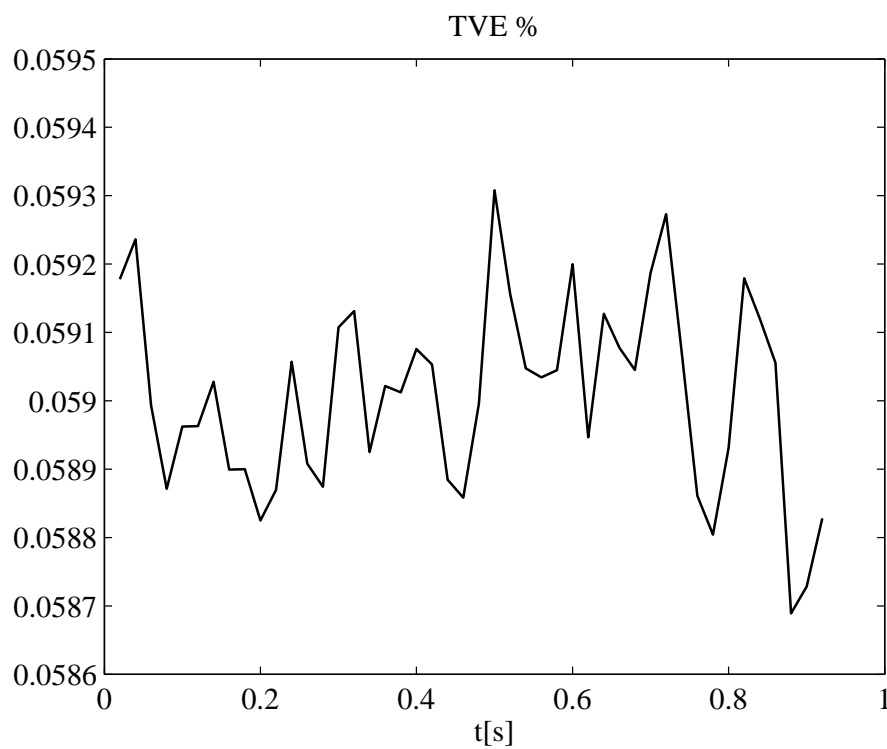


Figura B.2: Calcolo del TVE, prova in condizioni stazionarie. Sinusoide pura a 50 Hz, 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestatura a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale inferiore allo 0.06%, rispettando pertanto quanto richiesto dalla norma. La variabilità è causata dal rumore ambientale. (Immagine tratta da [1].)

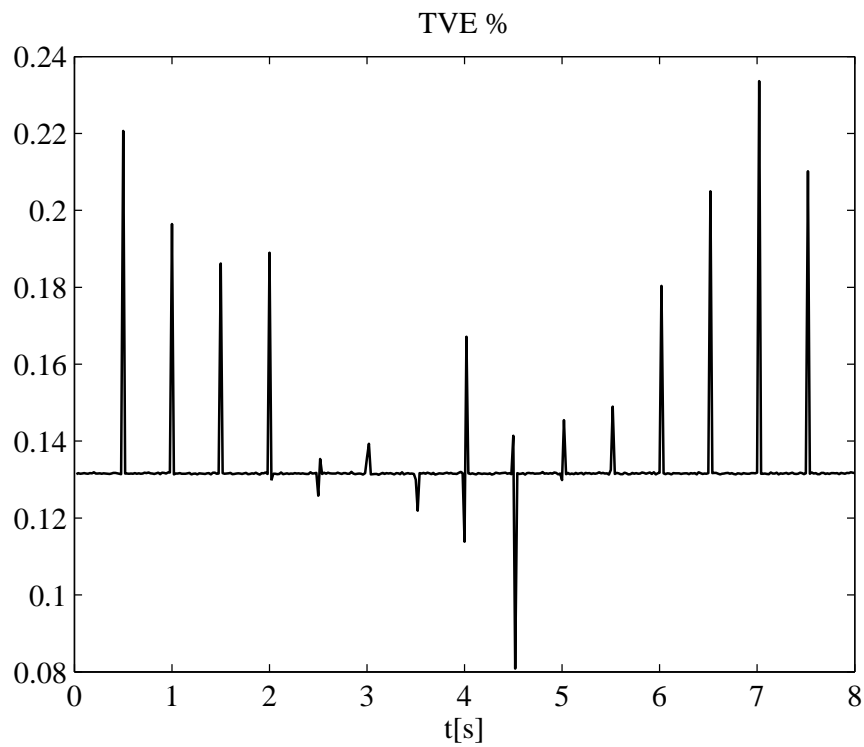


Figura B.3: Calcolo del TVE, risposta al gradino di ampiezza. Impulsi da 1 s, 8 punti per fase, profondità di modulazione AM 10%, 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestatura a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale stabile allo 0.135% con picchi fino allo 0.24% in corrispondenza alle commutazioni del segnale a gradino, imputabili quindi alla non stazionarietà del segnale. Il tempo di risposta non è stato verificato, essendo la variazione sempre entro il limite massimo dell'1%.(Immagine tratta da [1].)

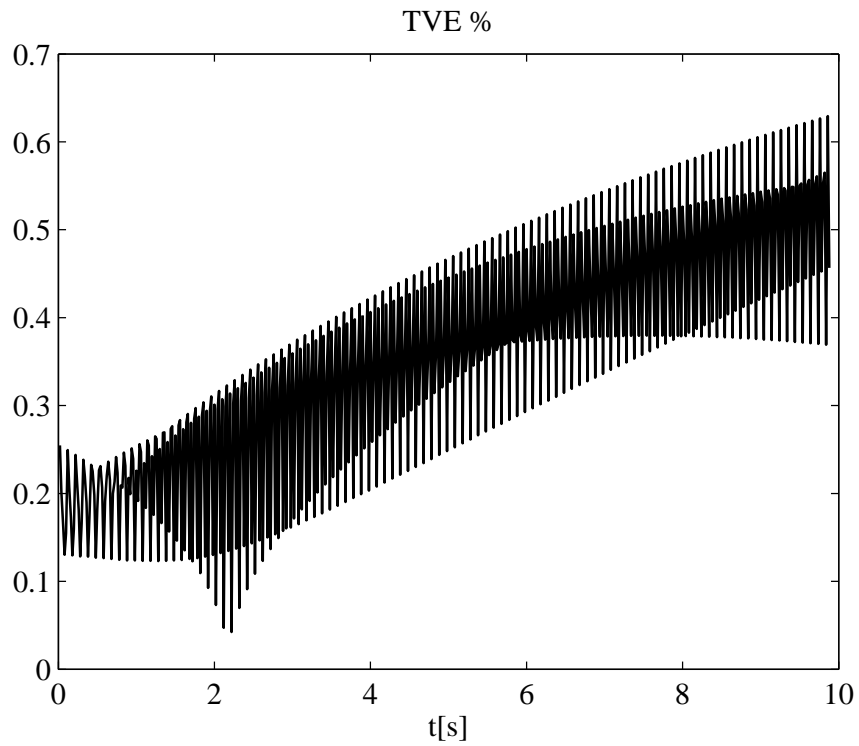


Figura B.4: Calcolo del TVE, prova larghezza di banda con modulazione AM e PM a 10 Hz, profondità di modulazione AM 10%, deviazione di fase 0.1 rad, 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestrazione a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale oscillante con valori inferiori allo 0.8%. (Immagine tratta da [1].)

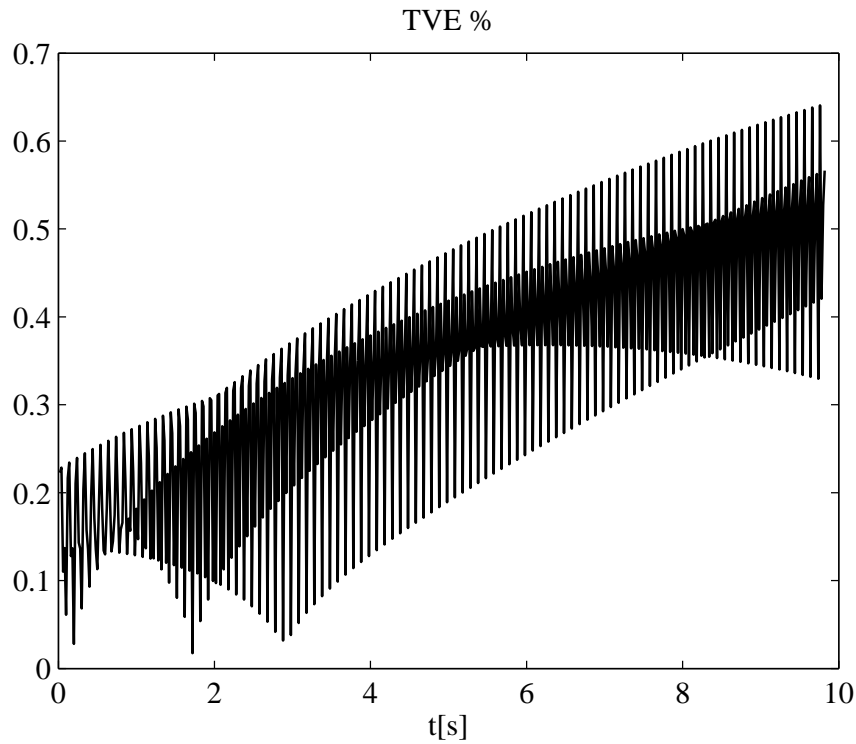


Figura B.5: Calcolo del TVE, prova larghezza di banda con modulazione PM a 10 Hz, deviazione di fase 0.1 rad, 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestatura a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale oscillante con valori inferiori allo 0.8%. (Immagine tratta da [1].)



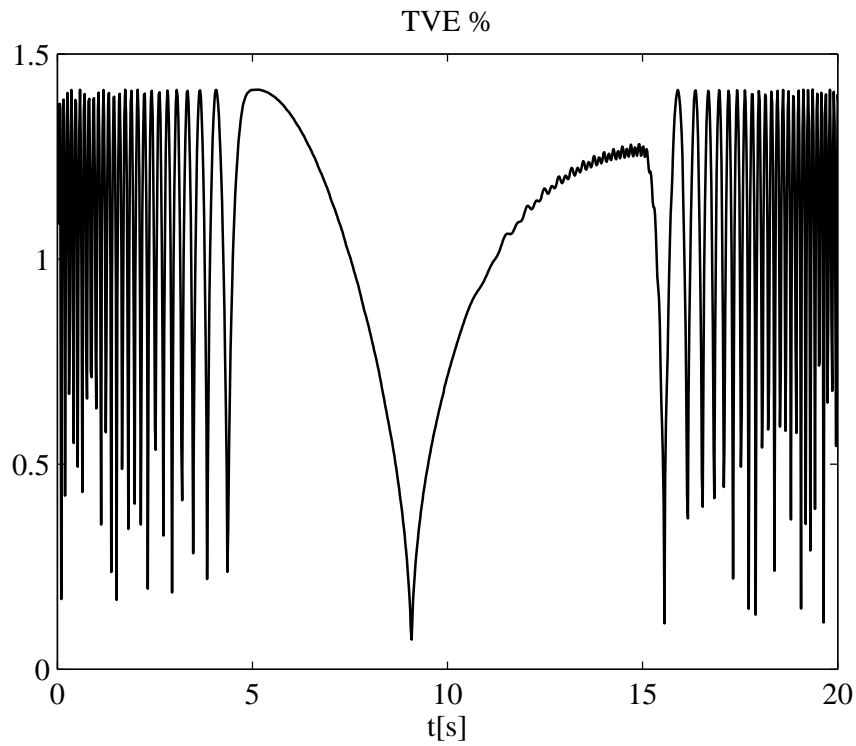


Figura B.6: Calcolo del TVE, sollecitazione a rampa della frequenza di sistema senza tempi di attesa a inizio e fine rampa, variazione di frequenza 10 Hz/s, 25 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 2 punti, finestatura a 3 termini MSLD 40 ms. L'algoritmo non risulta a specifica, presentando un TVE superiore all'1%. Tale comportamento è imputabile all'errore sulla stima della fase.(Immagine tratta da [1].)

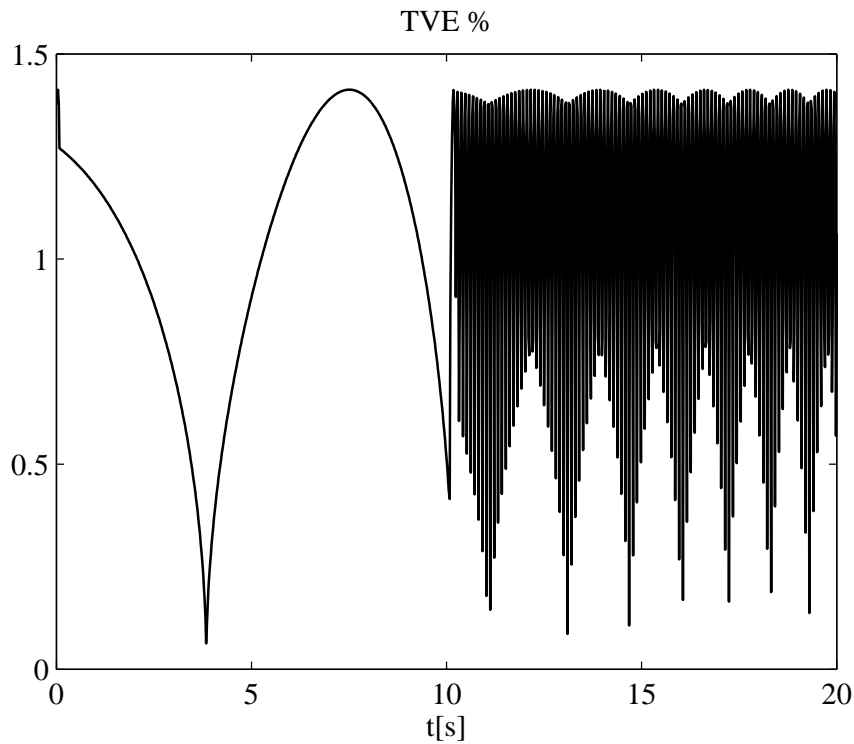


Figura B.7: Calcolo del TVE, sollecitazione a rampa della frequenza di sistema con tempi di attesa a inizio e fine rampa, variazione di frequenza 10 Hz/s, 25 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 2 punti, finestatura a 3 termini MSLD 40 ms. L'algoritmo non risulta a specifica, presentando un TVE superiore all'1%. Tale comportamento è imputabile all'errore sulla stima della fase.(Immagine tratta da [1].)

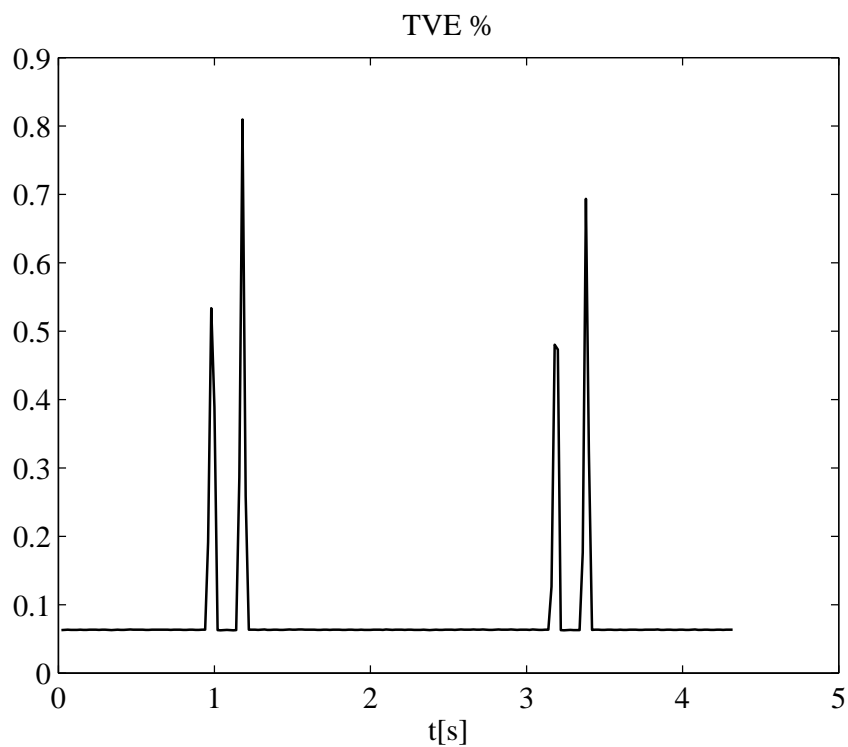


Figura B.8: Calcolo del TVE, buco di tensione con durata 10 cicli e ampiezza  $40\%V_n$ . 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestatura a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale stabile allo 0.07% con picchi fino allo 0.85% in corrispondenza dei buchi di tensione, imputabili quindi alla non stazionarietà del segnale. Il tempo di risposta non è stato verificato, essendo la variazione sempre entro il limite massimo dell'1%.(Immagine tratta da [1].)

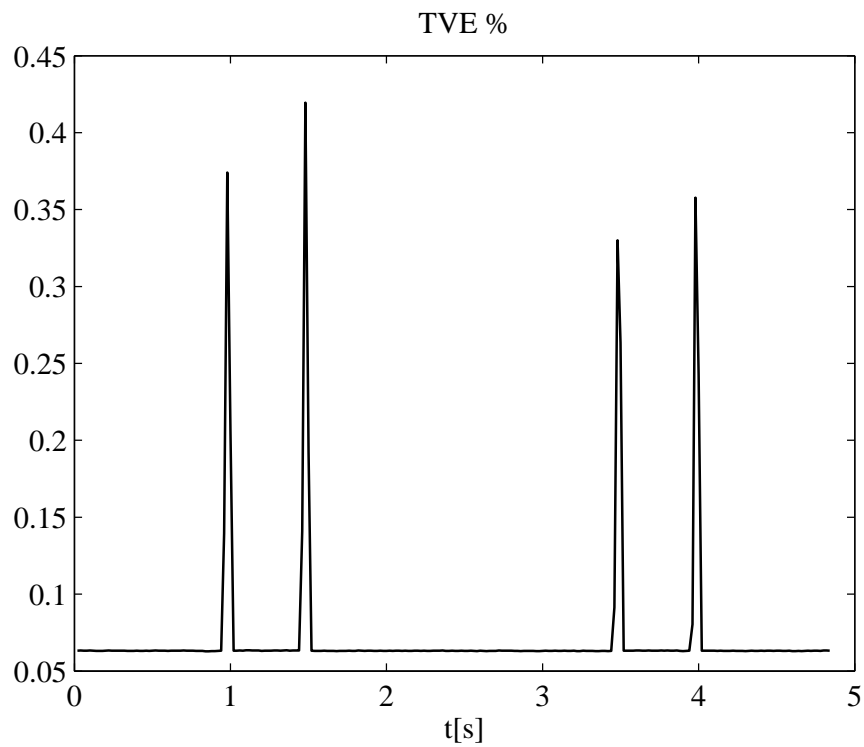


Figura B.9: Calcolo del TVE, buco di tensione con durata 25 cicli e ampiezza  $70\%V_n$ . 50 report/s, overlap delle finestre 75%, interpolazione a 3 punti, finestatura a 3 termini MSLD 80 ms. L'algoritmo presenta un TVE percentuale stabile allo 0.06% con picchi fino allo 0.43% in corrispondenza dei buchi di tensione, imputabili quindi alla non stazionarietà del segnale. Il tempo di risposta non è stato verificato, essendo la variazione sempre entro il limite massimo dell'1%.(Immagine tratta da [1].)

# Ringraziamenti

La conclusione del percorso di studi è un traguardo notevole, che richiede impegno e dedizione nonostante le difficoltà che si incontrano inevitabilmente. Se sono giunto a questo obiettivo lo devo soprattutto alla mia famiglia che mi ha sempre appoggiato e ai miei amici che mi prendono per quel che sono. Intendo dedicare questo lavoro alla memoria di nonna Bruna, sempre disponibile e fonte impareggiabile di saggezza. Non da ultimi, sono da ringraziare i ragazzi del laboratorio di compatibilità elettromagnetica per non avermi defenestrato durante le mie famose litigate con gli strumenti e per le frequenti fughe alle macchinette. Un ringraziamento particolare va al prof. Bertocco e all'ing. Stellini per essersi assunti l'onere di seguirmi nel percorso di tesi.

*Daniele Caliolo*



# Bibliografia

- [1] F. Scattolin, M. Bertocco, “Metodi di stima robusti per sincrofasori in ambiente smart microgrids,” *Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Università degli Studi di Padova*, 2013.
- [2] M. Borgarello, M. Gallanti, M. Governatori, and S. Mottarelli, “Uno scenario energetico nazionale al 2020 per conseguire gli obiettivi europei,” *L’Energia Elettrica -AEIT*, 2012.
- [3] A. Sutor, “Smart energy systems - a european perspective,” *ERCIM NEWS*, 2013.
- [4] M. Penzo, M. Bertocco, “Studio e progetto di metodi di misura robusti per sincrofasori in bassa tensione,” *Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Università degli Studi di Padova*, 2012.
- [5] E. Falsone and M. Guglielmetti, “La generazione diffusa introduce nuove regole nel gioco delle reti,” *L’Energia Elettrica -AEIT*, 2012.
- [6] P. Tenti, “Materiale corso smart grid,” *DEI, Università degli studi di Padova*, A.A. 2012.
- [7] IEEE Std. c37.118.1, *IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems*. IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [8] M. Bertocco, P. Callegaro, D. De Antoni Migliorati, *Strumenti per la Qualità Totale*. Lulu press, 2° ed., Gennaio 2013.
- [9] IEEE Std. c37.118.2, *IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems*. IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [10] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-2-2. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 2-2: Ambiente - Livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza e la trasmissione dei segnali sulle reti pubbliche di alimentazione a bassa tensione*. CEI - Milano, 2° ed., 2003.

- [11] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-2-4. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 2-4: Ambiente - Livelli di compatibilità per i disturbi condotti in bassa frequenza negli impianti industriali*. CEI - Milano, 2° ed., 2003.
- [12] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-4-4. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 4-4: Tecniche di prova e di misura - Prova di immunità a transitori/treni elettrici veloci*. CEI - Milano, 2° ed., 2006.
- [13] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-4-11. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 4-11: Tecniche di prova e di misura - Prove di immunità a buchi di tensione, brevi interruzioni e variazioni di tensione*. CEI - Milano, 2° ed., 2006.
- [14] IEEE Std. 1159, *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*. IEEE Power & Energy Society, 2009.
- [15] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-4-13. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 4-13: Tecniche di prova e di misura - Prove di immunità a bassa frequenza alle armoniche e alle interarmoniche, inclusi i segnali trasmessi sulle reti, sulle porte di alimentazione a corrente alternata*. CEI - Milano, 1° ed., 2003.
- [16] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-4-14. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 4-14: Tecniche di prova e di misura - Prova d'immunità a fluttuazioni di tensione*. CEI - Milano, 1° ed., 2000.
- [17] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 61000-4-30. Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 4-30: Tecniche di prova e misura - Metodi di misura della qualità dell'alimentazione elettrica*. CEI - Milano, 1° ed., 2000.
- [18] IEEE Std. 1459, *IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions*. IEEE Power & Energy Society, 2010.
- [19] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI 0-21. Regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica*. CEI - Milano, 2° ed., 2012.



- [20] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 50160. Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica*. CEI - Milano, 2° ed., 2011.
- [21] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 60044-7. Trasformatori di misura - Parte 7: Trasformatori di tensione elettronici*. CEI - Milano, 1° ed., 2001.
- [22] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 60044-8. Trasformatori di misura - Parte 8: Trasformatori di corrente elettronici*. CEI - Milano, 1° ed., 2004.
- [23] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 62052-11. Apparati per la misura dell'energia elettrica (a.c.) - Prescrizioni generali, prove e condizioni di prova - Parte 11: Apparato di misura*. CEI - Milano, 1° ed., 2003.
- [24] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 62052-21. Apparati per la misura dell'energia elettrica (a.c.) - Prescrizioni generali, prove e condizioni di prova - Parte 21: Apparati per il controllo delle tariffe e del carico*. CEI - Milano, 1° ed., 2005.
- [25] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 62053-21. Apparati per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 21: Contatori statici di energia attiva (classe 1 e 2)*. CEI - Milano, 1° ed., 2003.
- [26] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 62053-22. Apparati per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 22: Contatori statici di energia attiva (classe 0,2S e 0,5S)*. CEI - Milano, 1° ed., 2003.
- [27] Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI EN 62053-23. Apparati per la misura dell'energia elettrica (c.a.) - Prescrizioni particolari - Parte 23: Contatori statici di energia reattiva (classe 2 e 3)*. CEI - Milano, 1° ed., 2003.
- [28] Agilent Technologies, *Agilent 33220A - 20 MHz waveform generator - User's guide*. 4° ed., 2007.
- [29] Hewlett-Packard, *HP 8904A Multifunction synthesizer - Operation and calibration manual*. 3° ed., 1992.

- [30] Agilent Technologies, *Agilent 6000 series oscilloscope - User's guide*. 4° ed., 2006.
- [31] Tektronix, *RSA3408B - 8 GHz real-time spectrum analyzer user manual*. 2° ed.
- [32] National Instruments, *DAQ M-Series - NI-USB621X User manual*. 2009.
- [33] E. D. Santis, "Smart grid: verso le reti energetiche di nuova generazione," <http://www.sublimina.it>, 2011.