



Ricerca di Sistema elettrico

## Misura degli assorbimenti elettrici e dell'efficienza energetica di macchine saldatrici TIG, Plasma e Laser: validazione, calibrazione e upgrade del sistema di monitoraggio

R. Montanari, A. Varone, S. Bifaretti, V. Bonaiuto, S. Pipolo

MISURA DEGLI ASSORBIMENTI ELETTRICI E DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DI MACCHINE SALDATRICI TIG, PLASMA E LASER: VALIDAZIONE, CALIBRAZIONE E UPGRADE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO

R. Montanari, A. Varone, S. Bifaretti, V. Bonaiuto, S. Pipolo  
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

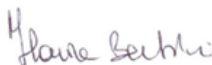
Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: D3 "Processi e macchinari industriali" Obiettivo: D. Impiego tecnologie elettriche nei processi industriali

Obiettivo: Efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA



"Misura degli assorbimenti elettrici e dell'efficienza energetica di macchine saldatrici TIG, Plasma e Laser: validazione, calibrazione e upgrade del sistema di monitoraggio"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. F. Cognini

Responsabile scientifico Università degli Studi di Roma "Tor Vergata": Prof. Vincenzo Bonaiuto

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 UPGRADE DEL SISTEMA DI MISURA.....	5
2.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI MISURA.....	5
2.1.1 SONDE DI TENSIONE.....	8
2.1.2 SONDE DI CORRENTE.....	8
2.1.3 SOFTWARE DI SUPERVISIONE E CONTROLLO.....	9
2.2 AGGIORNAMENTI DEL SISTEMA.....	13
2.2.1 AGGIORNAMENTO HARDWARE.....	13
2.2.2 AGGIORNAMENTO SOFTWARE.....	14
2.3 INDICAZIONI PER IL PROGETTO MECCANICO ED ELETTRICO DEL SISTEMA TRASPORTABILE.....	14
3 MISURE.....	15
3.1 MISURE SU SALDATRICE TIG NERTAMATIC 450.....	16
3.1.1 ANALISI ARMONICA DELLE CORRENTI DI INGRESSO E MISURA DEL THD.....	22
3.2 MISURE SU SALDATRICE LASER YLS 2000 CT.....	25
3.2.1 ANALISI ARMONICA DELLE CORRENTI DI INGRESSO E MISURA DEL THD.....	27
4 ANALISI METALLURGICA DEI GIUNTI DI SALDATURA REALIZZATI.....	30
4.1.1 SALDATURA LASER DELLA SUPERLEGA IN792.....	30
4.1.2 SALDATURA TIG SU ACCIAIO AL CARBONIO.....	32
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	34
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	34
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	36

## Sommario

Sulla base dei risultati ottenuti nel corso della prima annualità del progetto, gli obiettivi delle attività svolte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" durante il secondo anno di attività sono stati:

- 1: "Upgrade dell'hardware del sistema di misura e integrazione della connettività wireless."
- 2: "Upgrade del software di controllo del sistema di misura per automatizzare la sua configurazione in funzione delle diverse tipologie di macchine saldatrici (TIG, Electron Beam, Plasma e Laser)."
- 3: "Upgrade del software di analisi dei dati acquisiti per permettere lo studio del comportamento armonico dell'onda sinusoidale di corrente che può essere generata dalla macchina verso la rete elettrica di alimentazione."
- 4: "Analisi di efficienza dell'accoppiamento energia –materia."
- 5: "Disegno e ingegnerizzazione di un sistema di misura trasportabile dedicato al monitoraggio dei consumi elettrici nelle macchine saldatrici."

L'attività svolta è stata articolata in fasi successive:

Fase 1: Validazione del sistema di misura messo a punto, in forma prototipale, nel corso della prima annualità e sua caratterizzazione, presso i laboratori di ENEA CR Casaccia, su macchine saldatrici di tipo TIG e Laser;

Fase 2: Definizione dei componenti necessari per l'upgrade hardware del sistema e supporto ad ENEA per la definizione del capitolato tecnico utile alla realizzazione di un sistema trasportabile per la valutazione energetica di macchine saldatrici industriali.

Fase 3 Upgrade dell'hardware della stazione di misura sperimentale, sua calibrazione e testing della connettività wireless.

Fase 4: Esecuzione di alcuni test di saldatura significativi, utilizzando diversi materiali, strutturati come descritto di seguito:

- setup del sistema di misura e calibrazione delle sonde eseguita tramite software LabVIEW;
- monitoraggio dell'energia consumata in condizioni reali di funzionamento degli impianti di saldatura;
- analisi metallurgica delle sezioni trasversali dei giunti e loro valutazione, ove possibile, con il test di indentazione strumentata mediante tecnica proprietaria FIMEC [1].

## 1 Introduzione

L'obiettivo dell'attività di ricerca è la realizzazione di un sistema di misura portatile ad elevate prestazioni dedicato alla valutazione dei consumi elettrici nel corso dei processi di saldatura industriali. Le attività previste in questa seconda annualità del progetto sono relative alla validazione, caratterizzazione e calibrazione del prototipo del sistema di misura progettato nel primo anno di attività. Per il particolare utilizzo previsto quale strumento per la misura delle prestazioni energetiche di macchine per saldatrici in ambiente industriale, è necessario realizzare un sistema che presenti sia una classe elevata, in termini di precisione e accuratezza della misura dei parametri elettrici della macchina sotto indagine, sia un sufficiente grado di versatilità necessario per rendere possibile la misura su impianti che presentano caratteristiche molto diverse fra loro. Inoltre, il sistema di misura deve essere in grado di effettuare la misura sia per quello che riguarda i sistemi principali della macchina che per i suoi dispositivi accessori (es. il "chiller" nel caso di una macchina s saldatura Laser, ecc.). A tale scopo, come indicato nel report relativo alle attività svolte nel corso della prima annualità del progetto, la scelta è caduta su un sistema di acquisizione digitale della National Instruments. Una prima versione prototipale di tale sistema è stata progettata e realizzata ed è stato effettuato un upgrade rispetto alla configurazione utilizzata nel primo anno. Inoltre, allo scopo di valutarne le prestazioni, sono state effettuati alcuni test di misura su saldatrici industriali di tipo TIG e Laser messe a disposizione dal Centro Ricerche ENEA di Casaccia (RM). Successivamente, campioni ottenuti nel corso del processo di saldatura, è stata effettuata un'analisi metallurgica mirata alla misura del volume di materiale fuso al fine di ottenere, nota la quantità di energia utilizzata per il processo, una stima del valore di efficienza dell'intero processo.

## 2 Upgrade del sistema di misura

### 2.1 Descrizione del sistema di misura

Il sistema progettato è basato su un COMPACT DAQ della National Instruments costituito da uno chassis (modello 9188) in grado di ospitare fino otto schede di acquisizione di diverse caratteristiche. Esso fornisce, inoltre, la possibilità di connessione Ethernet e/o wireless (IEEE 802.11g) verso un PC remoto. Le schede di acquisizione sono state individuate in base al numero dei canali di acquisizione necessari e alle caratteristiche delle sonde di misura, sia di tensione che di corrente, utilizzate. Uno schema a blocchi funzionale del sistema di misura realizzato è mostrato in Fig. 1.

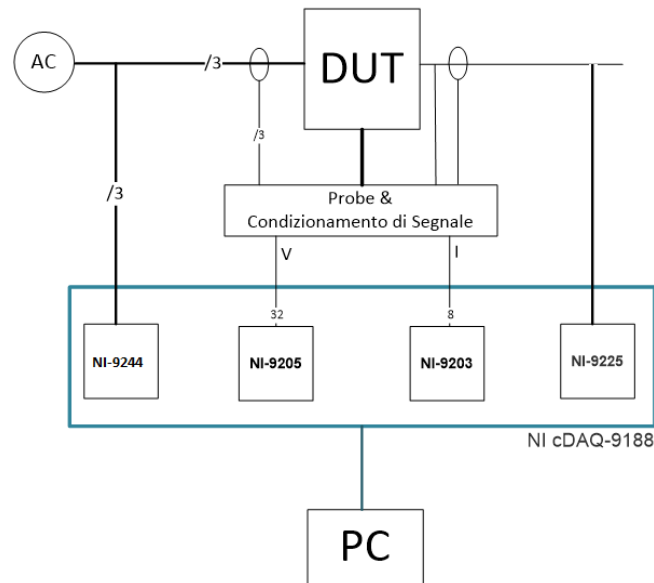


Fig. 1 - Schema logico del sistema di misura

Si è scelto di equipaggiare il sistema con quattro moduli con ingressi analogici della National Instruments, mostrati nella Fig.2 e le cui principali caratteristiche sono descritte nella Tabella 1, e da alcune sonde di tensione e di corrente, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 2. Una più dettagliata descrizione di tutti i componenti del sistema è riportata nei seguenti sotto paragrafi.

I moduli di acquisizione sono stati scelti in modo da assicurare un sample rate sufficientemente elevato, un'accuratezza della misura e una risoluzione tale in grado di soddisfare il requisito di garantire una buona definizione dei segnali da acquisire e un numero sufficiente di canali di acquisizione, tenendo conto anche di possibili successive espansioni. I modelli dei sensori di corrente, tutti del tipo ad effetto Hall, sono stati scelti sulla base del valore di corrente nominale da misurare e di quella massima misurabile. Si è optato per tale topologia di sensori anche per le misure di correnti in AC poiché garantiscono maggiore accuratezza e migliore banda passante rispetto ai tradizionali trasformatori di corrente.

Modello	Range	Sample Rate	Risoluzione	n. Canali
NI 9225 3-Ch Analog Input	300 Vrms	50 kS/s	24-Bit	3
NI 9205 Voltage Analog Input	±10 V	250 kS/s	16-Bit	32
NI 9203 Current Analog Input	±20 mA	200 kS/s	16-Bit	8
NI 9242 3-Ch Analog Input	250 Vrms L-N 400 Vrms L-L	50 kS/s	24-Bit	3

Tabella 1



**Fig. 2 – Moduli di acquisizione utilizzati nel sistema di misura.**

Ingresso	Collocazione	Modello	Range	Accuratezza	Uscita	Ø cavo (mm)
Corrente	Ingresso AC trifase	LEM HAS-50 panel mount	nom: $\pm 50A$ max $\pm 150A$	$<1\% @ I_{PN} = 0.5A$	Tensione $\pm 4V$ Closed-loop	20.4 x 10.4
Corrente	Pompe a vuoto o diffusione Fascio elettronico	LEM HTR 50-SB split core	nom: $\pm 50A$ max $\pm 100A$	$<2\% @ I_{PN} = 1A$	Tensione $\pm 4V$ Open-loop	21
Corrente	Uscita DC TIG	LEM LF 306-S panel mount	nom: $\pm 300A$ max $\pm 500A$	$0.4\% @ I_{PN} = 1.2A$	Corrente nom 150 mA max 250mA	24.5
Tensione	Ingresso AC monofase	LEM LV 20-P	Max 500V	$\pm 1.0\% @ V_{PN} = 250V$	Corrente	NA

**Tabella 2**

Il sistema è controllato mediante Personal Computer attraverso un software in linguaggio LabVIEW, appositamente sviluppato. Il software, che verrà descritto dettagliatamente in un seguente paragrafo, permette:

- la configurazione dell'hardware del sistema di misura in funzione della saldatrice oggetto della misura;
- l'elaborazione delle grandezze misurate e loro visualizzazione in forma testuale e grafica;
- la memorizzazione dei dati misurati e possibilità di una loro esportazione in formati compatibili con i più comuni sistemi di calcolo (es. Excel, Matlab, ecc.).
- l'analisi dei dati relativi a misure precedentemente effettuate.



### 2.1.1 Sonde di tensione

Per la misura delle tensioni (trifase, monofase) sono state scelte le sonde ad effetto Hall LEM LV 20-P il cui schema di funzionamento è riportato nella Fig. 3. Si tratta di un trasduttore di tensione (Closed loop compensated) che fornisce in uscita un valore di corrente proporzionale alla tensione di ingresso. Per effettuare la misura di tensione è quindi necessario che una corrente proporzionale alla tensione misurata attraversi un resistore di misura  $R_1$  (tolleranza < 1%) collegato esternamente e montato in serie al circuito primario del trasduttore.

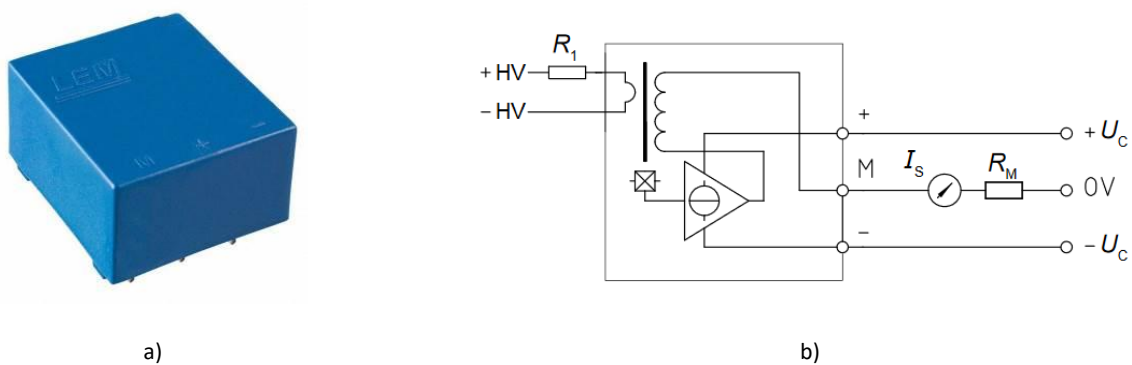


Fig. 3 Sonda di tensione LEM LV 20-P e relativo schema di funzionamento

### 2.1.2 Sonde di corrente

Per la misura delle correnti sono state utilizzate le seguenti sonde ad effetto Hall:

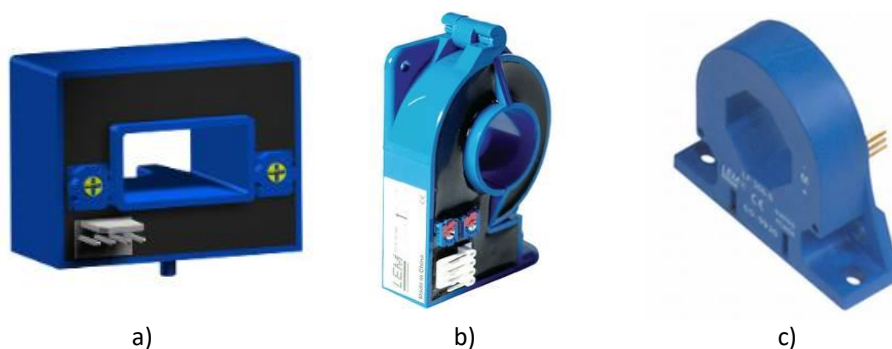


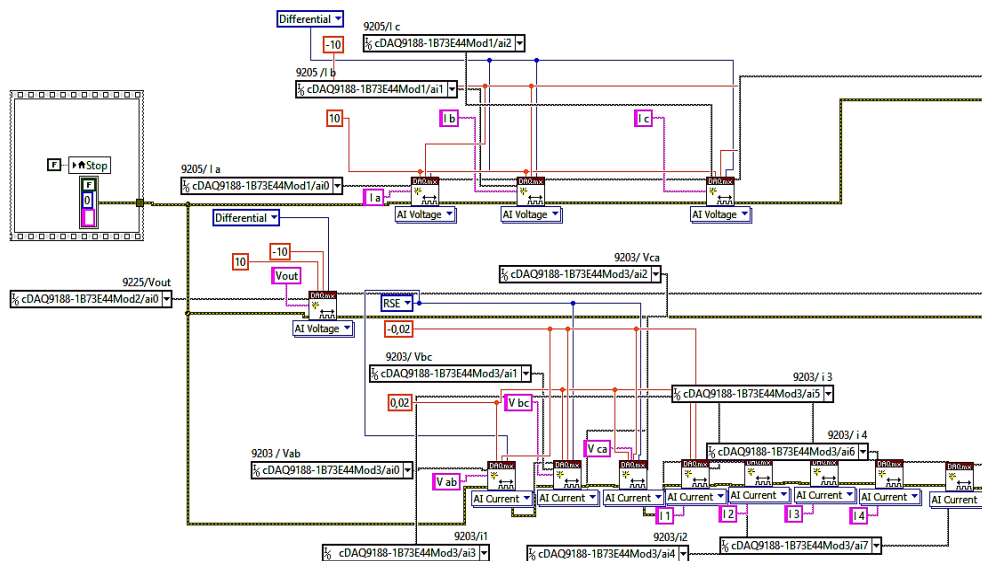
Fig. 4 Sonde di corrente LEM HAS 50-600 S, LEM HAS 50-500-SB e LEM LF306-S

Entrambe le sonde HAS 50 600-S e HTR 50 500-SB presentano il medesimo schema di funzionamento, ma la seconda è di tipo "split core" per una sua più facile installazione laddove non sia possibile scollegare il cavo di alimentazione dalla macchina.



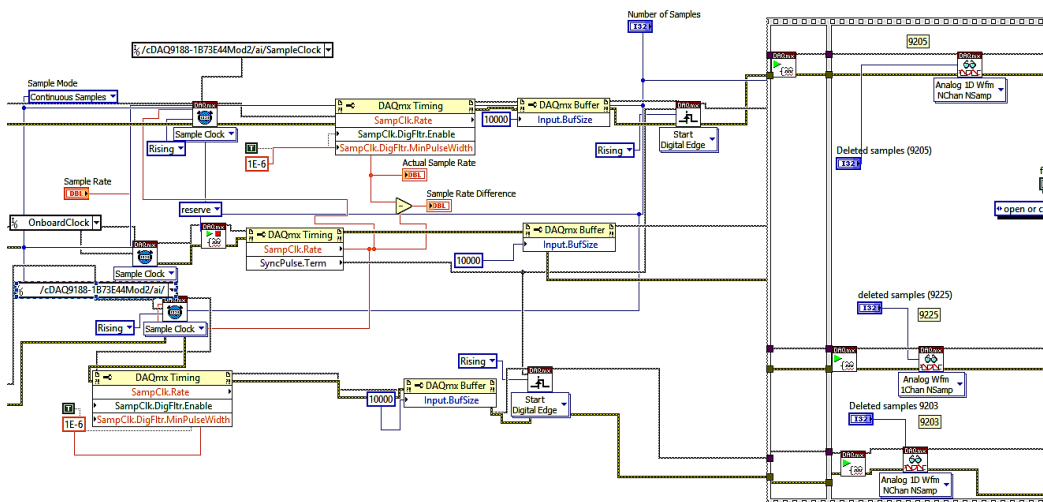
### 2.1.3 Software di supervisione e controllo

Il software di supervisione e controllo, implementato in LabVIEW, provvede all'inizializzazione delle schede di acquisizione e alla selezione dei canali di misura. Tali canali sono configurati diversamente in dipendenza dalla tipologia degli ingressi da misurare, caratteristici di ciascuna macchina saldatrice. Ad esempio, poiché la corrente di ingresso della saldatrice può variare, in funzione della taglia della macchina, da 32A a 125A, è opportuno, per una migliore risoluzione della misura stessa, operare con sonde di diverse caratteristiche collegate a differenti ingressi del sistema di acquisizione. Nella Fig. 5 è mostrato il codice relativo a tale procedura di inizializzazione.



**Fig.5 Codice LabVIEW della procedura di Inizializzazione schede e selezione canali di misura**

Nella Fig. 6 è mostrato il codice LabVIEW della procedura di lettura e sincronizzazione delle misure realizzate su schede di acquisizione diverse, mentre, nella Fig. 7, è mostrato il codice della procedura di conversione, visualizzazione dei risultati e loro memorizzazione su file.



**Fig.6 Codice LabVIEW della procedura di lettura e sincronizzazione schede**

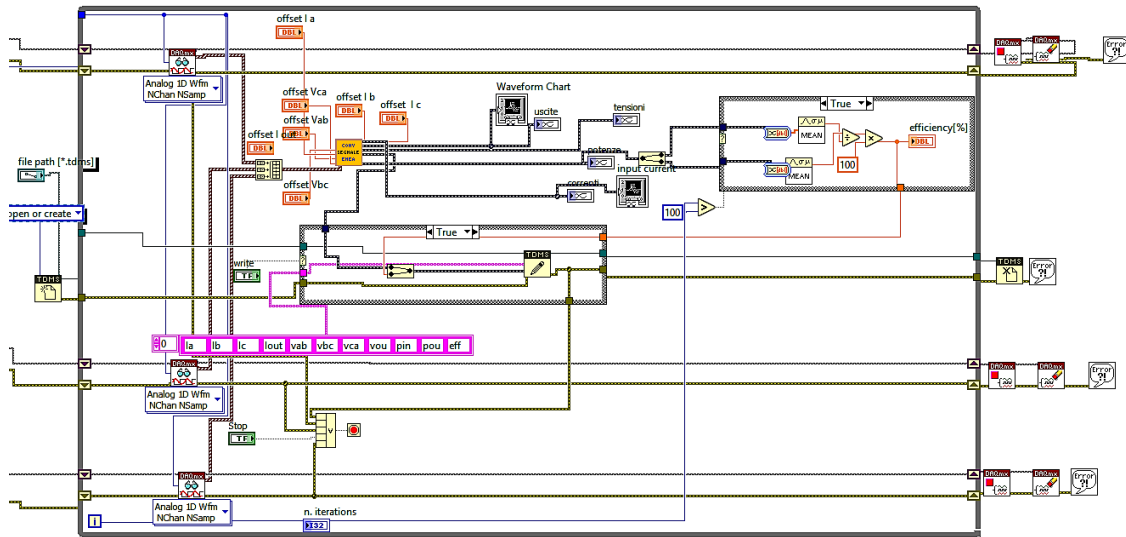


Fig.7 Codice LabVIEW della procedura di conversione, visualizzazione e salvataggio dati

L'interfaccia utente è suddivisa in quattro diversi sezioni. In Fig. 8 è mostrata la sezione che permette una facile configurazione del sistema di misura permettendo di selezionare la tipologia di saldatrice sotto analisi. Tale procedura permette, in modo automatico, di selezionare i canali di acquisizione, i rispettivi valori di offset e la frequenza di campionamento per ciascun modulo. I grafici di corrente e tensione in ingresso, e dei parametri in uscita (es. uscita del calorimetro o della corrente in uscita), tutte a bassa risoluzione, permettono la verifica del corretto collegamento del sistema di misura.

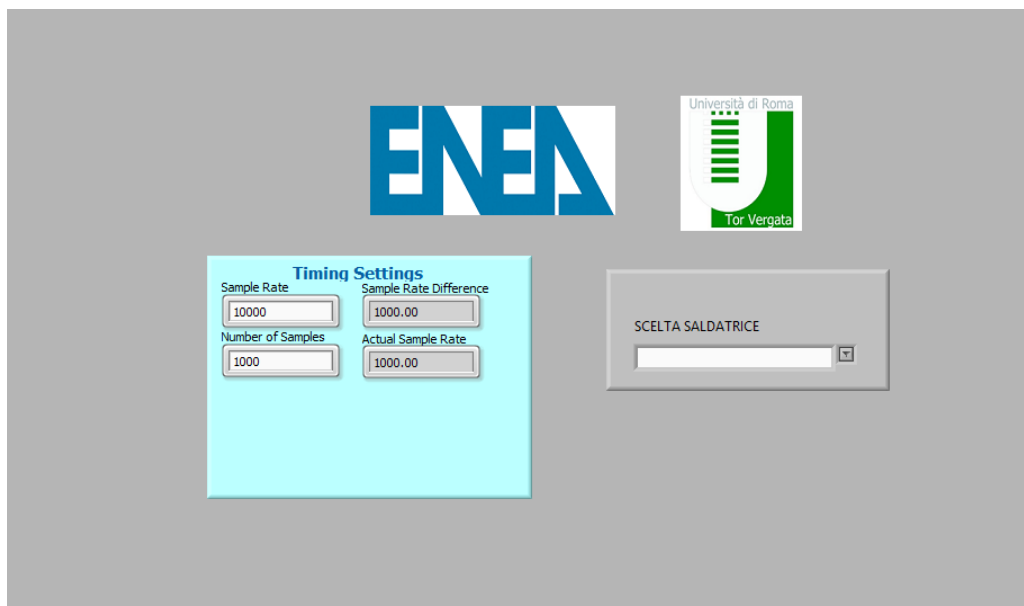
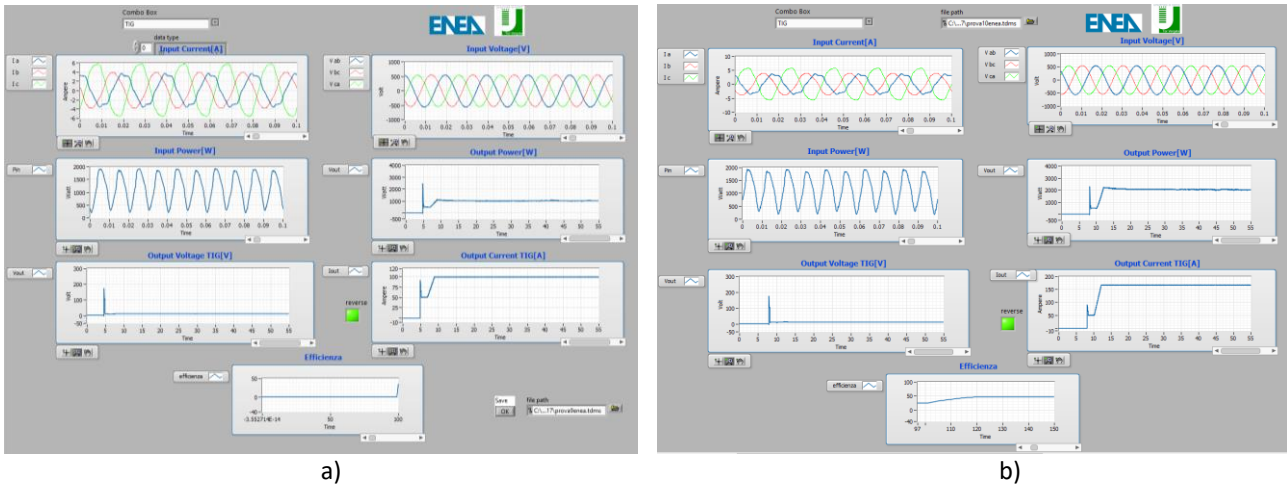
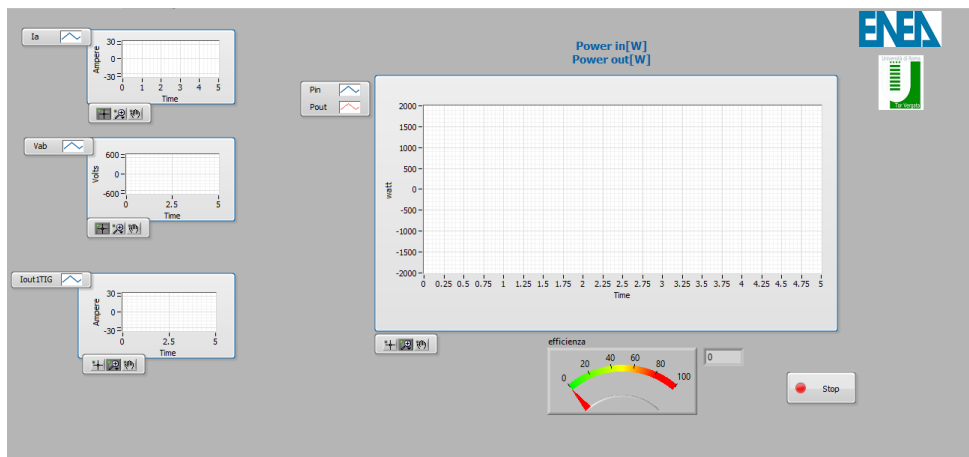


Fig.8 Interfaccia utente: configurazione del sistema

In figura 9 sono mostrati, rispettivamente, il pannello di acquisizione dati (a) e per la visualizzazione e analisi delle misure in archivio (b).



**Fig.9** Interfaccia utente: a) Visualizzazione dei dati acquisiti e b) Analisi offline dei dati misurati

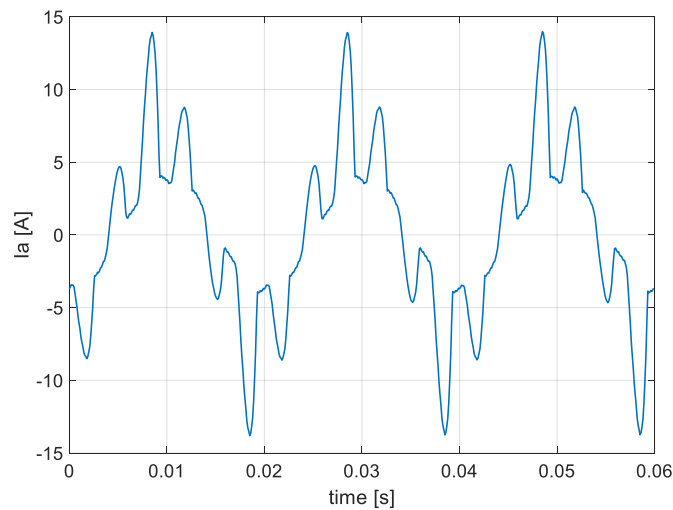


**Fig.10** Interfaccia utente: valutazione dell'efficienza energetica

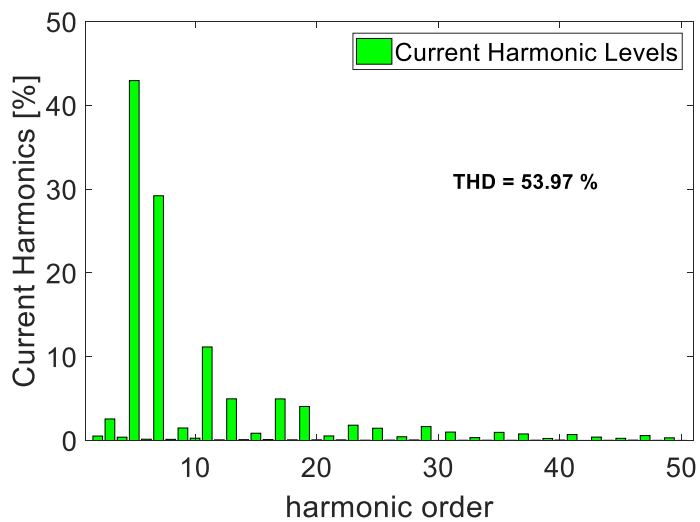
La figura 11 mostra un particolare del pannello per l'analisi armonica delle correnti di ingresso e per il calcolo del coefficiente THD (Total Harmonic Distorsion – per le macchine saldatrici con alimentazione compresa fra 16A e 75A per fase è definito dalla norma CEI EN 61000-3-12). L'analisi spettrale è utilizzata per avere un'indicazione visuale della deformazione del segnale. Il THD, normalmente espresso in percentuale, permette invece di valutare la deformazione di un segnale di tensione o di corrente in un punto della rete. La ricerca della fonte delle perturbazioni si effettua misurando il THD della corrente (THC) sull'arrivo e su tutte le partenze dei diversi circuiti. In funzione del valore del THC misurato è possibile individuare possibili malfunzionamenti del sistema e adottare specifici accorgimenti. Se il valore misurato di

THC è inferiore al 13 % (la normativa prevede però valori anche maggiori in funzione dell'impedenza di linea), il valore è da considerarsi normale.

Nel caso specifico, tale analisi mostra alcune difficoltà poiché il THD dipende dalla particolare situazione operativa della macchina e può essere calcolato solo negli intervalli di tempo durante i quali le grandezze elettriche possono considerarsi in regime permanente.



(a)



(b)

**Fig.11 Analisi armonica delle correnti di ingresso e calcolo THD:**  
**(a) forma d'onda della corrente (b) armoniche di corrente**

## 2.2 Aggiornamenti del sistema

Sulla base dello studio effettuato nel corso della prima annualità, si è proceduto ad un aggiornamento sia dell'hardware che delle procedure software del sistema di misura, come descritto nei paragrafi seguenti.

### 2.2.1 Aggiornamento hardware

Un primo problema riscontrato nel corso delle prime misure è la mancanza, in molti casi, della disponibilità del collegamento di neutro sull'alimentazione della macchina saldatrice. Questo comporta la necessità di effettuare la misura sulla tensione concatenata e, quindi, la necessità di utilizzare per quanto riguarda le misure di tensione in AC, una scheda di acquisizione (NI 9242) in grado di sopportare tali valori di tensione. Inoltre, il modulo NI 9225 è utilizzato per la misura diretta della tensione di uscita (ove disponibili) al fine di avere una maggiore accuratezza.

Per quello che riguarda la realizzazione e relativi test della connettività wireless, è stato individuato un access point/bridge di tipo industriale (Moxa AWK-3121 - Fig. 12) predisposto per montaggio su barra DIN e collegabile allo chassis cDAQ-9188 che permette il collegamento remoto del sistema qualora, per esigenze di sicurezza, non sia possibile un collegamento "wired" del sistema di misura al software LabVIEW di controllo.



**Fig.12 Access point Moxa AWK-3121**

Il Moxa AWK-3121 è conforme allo standard IEEE 802.11a/b/g, garantisce il trasferimento su lunga distanza prevede sicurezze per la trasmissione di tipo WEP/WPA/WPA2/802.11X e filtri.

Il sistema è stato inoltre predisposto per permettere anche la misura della portata rispettivamente di aria, argon e elio mediante opportuni misuratori di portata. A tale proposito, sono stati individuati i dispositivi elencati in Tabella 3 le cui uscite verranno collegate agli ingressi della scheda di acquisizione NI 9205.

Marca e modello	Portata	Pressione Max	Uscita	Alimentazione	
SMC PFM711-F02-E	2-100 Nlt/min (Argon) 2-50 Nlt/min (CO2)	750 kPa	pnp e analogica 1-5V	24Vcc $\pm$ 10%, 55 mA	Argon
SMC PF2A706H-F14-68N	300-6000 lt/min	1,5 MPa	pnp e analogica 1-5V	24Vcc, 150 mA	Aria
Omega FMA 1741°	0-80 Nlt/min	69 bar	0-5 V	12Vcc, 200 mA	Elio

Tabella 3

### 2.2.2 Aggiornamento software

Si è proceduto ad un aggiornamento delle procedure del software LabVIEW di controllo secondo i seguenti passi:

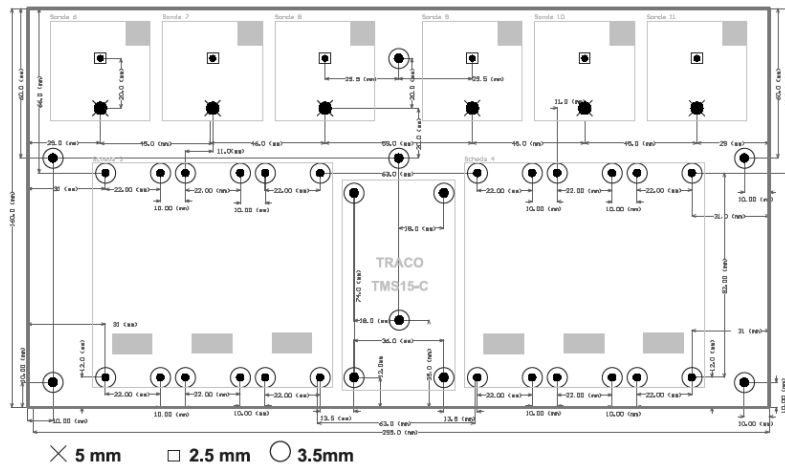
- Sviluppo delle procedure per l'analisi armonica delle correnti di alimentazione;
- Revisione dell'interfaccia utente che è stata suddivisa in quattro differenti panel per:
  - 1 Operazioni di configurazione del sistema e selezione della tipologia di macchina saldatrice da valutare;
  - 2 Monitor di controllo, a risoluzione ridotta, di tutti i parametri elettrici sotto indagine per permettere una più agevole la verifica dei collegamenti e del funzionamento dell'intero sistema;
  - 3 visualizzazione dei parametri elettrici oggetto della misura. calcolo delle potenze e dell'efficienza;
  - 4 Analisi armonica delle correnti di alimentazione della macchina.
  - 5 Analisi offline dei dati di misura

### 2.3 Indicazioni per il progetto meccanico ed elettrico del sistema trasportabile

È stato fornito supporto a ENEA per il capitolato tecnico di fornitura dei componenti necessari alla realizzazione di un sistema di misura portatile. È stato, inoltre, realizzato uno schema delle connessioni elettriche corredato di alcune indicazioni sulle caratteristiche meccaniche che tale sistema deve presentare. Nella Fig. 13a è mostrato il "conceptual design" del progetto meccanico del box dove verrà alloggiato il sistema di misura portatile e (Fig. 13b) lo schema di posizionamento delle sonde di tensione e corrente all'interno del box.



a)



b)

**Fig.13 Progetto meccanico del sistema di misura portatile**

### 3 Misure

Sono state effettuate alcune misure di funzionalità del sistema realizzato e delle procedure per la valutazione dell'efficienza energetica delle macchine. In particolare, sono stati effettuati una serie di test "elettrici" per la misura delle perdite e della efficienza energetica dal solo punto di vista elettrico (potenza in uscita – potenza in entrata). Poiché si vuole legare la misura dell'efficienza della macchina alla quantità di metallo fuso ottenuto nel corso del processo di saldatura, sono state messe a punto le metodologie metallurgiche per la valutazione di tale parametro.

Per quello che riguarda i test "elettrici", il prototipo del sistema di misura è stato provato, presso il CR ENEA di Casaccia, su una saldatrice TIG (Tungsten Inert Gas, modello NERTAMATIC 450) e su una saldatrice laser (modello YLS 2000 CT) mostrate nella Fig. 14.



a)



b)

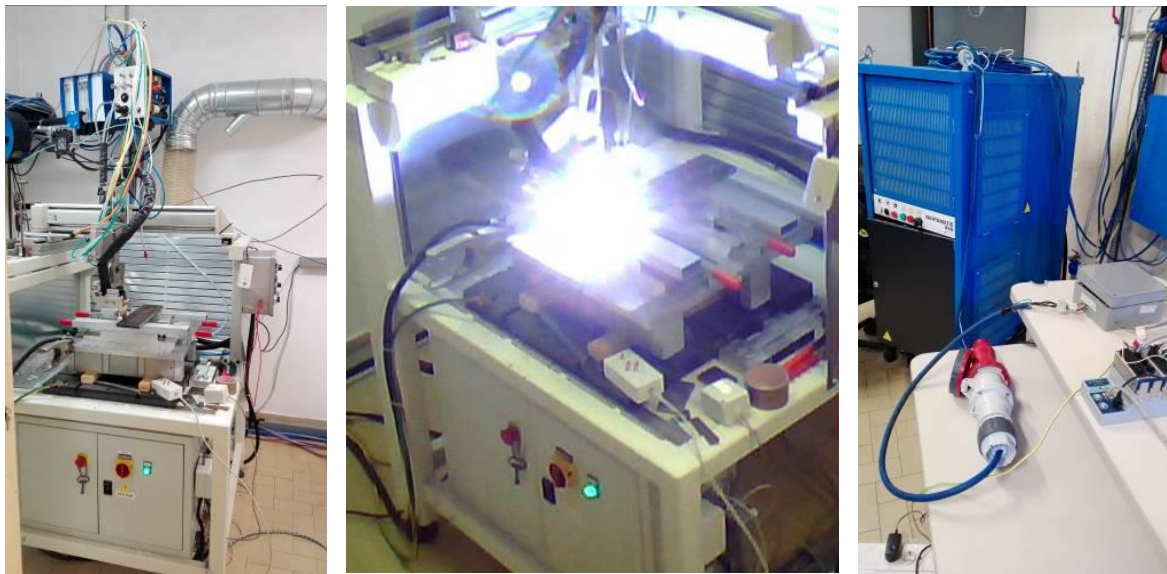
**Fig.14 TIG NERTAMATIC 450 e Laser YLS 2000 CT**



### 3.1 Misure su saldatrice TIG NERTAMATIC 450

La campagna di misure è stata eseguita eseguendo dieci test di saldatura su acciaio al carbonio e acciaio inox secondo le seguenti modalità:

- 1 prova in modalità TIG in continua con andamento a scalino
- 9 prove in modalità TIG in continua al variare dell'altezza della testa di saldatura



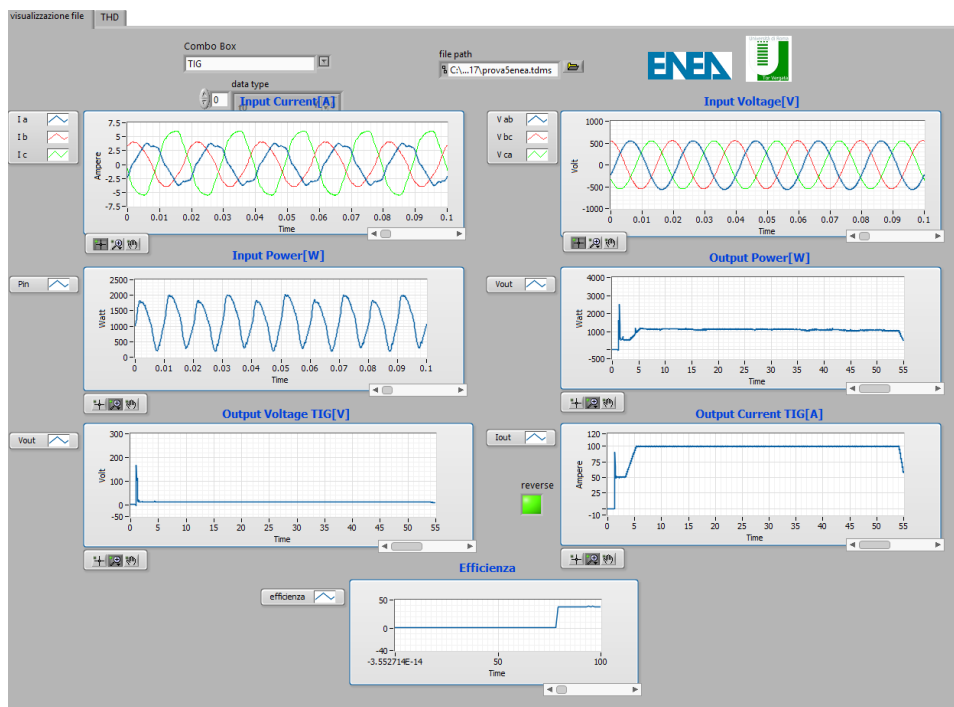
**Fig.15 Setup di misura Saldatrice TIG NERTAMATIC 450**

Ciascun test è stato eseguito variando i parametri del processo di saldatura di seguito elencati:

- Lunghezza d'arco (con range variabile da 2 a 4 mm)
- Corrente di saldatura (con range variabile da 100 ai 180 A)

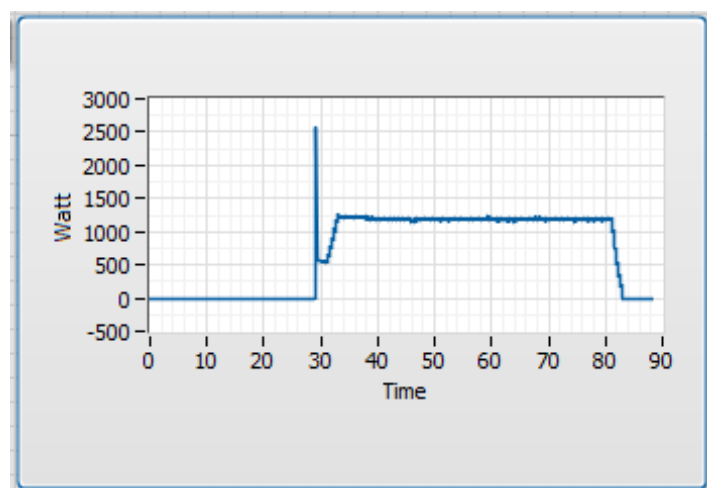
I seguenti parametri, invece, sono stati mantenuti costanti per tutte le prove:

- Velocità di saldatura di 2 mm/s
- Gas protettivo argon con portata di 6 l/min



**Fig.16 misure dei parametri elettrici per test su TIG NERTAMATIC 450**

Esaminando la Fig. 16, è possibile notare come i valori della tensione e della corrente in uscita, dopo l'innesco della scintilla pilota, presentino un andamento costante nel tempo. Tale andamento è giustificato dal fatto che la prova di saldatura effettuata è di tipo automatizzato e la lunghezza d'arco, la cui variazione tende ad influenzare i valori di tensione e di corrente, è rimasta costante durante tutto il periodo dell'acquisizione. Un tipico andamento della potenza in uscita è mostrato nella Fig. 17.



**Fig.17 Andamento della potenza in uscita per test su TIG NERTAMATIC 450**

Sono stati effettuati diversi test per verificare il comportamento del sistema di misura. Il materiale utilizzato per tutte le prove è un campione di acciaio al carbonio, la velocità di saldatura pari a 2mm/s con gas di tipo

Argon ad una portata di 6l/min. Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati della misura della corrente di uscita per alcuni dei test effettuati:

- a) test 1: valore della corrente in uscita fissato a 100 A; lunghezza dell'arco: 3 mm
- b) test 2: valore della corrente in uscita fissato a 100 A; lunghezza dell'arco: 4 mm
- c) test 3: valore della corrente in uscita fissato a 100 A; lunghezza dell'arco: 5 mm
- d) test 4: valore della corrente in uscita fissato a 170 A; lunghezza dell'arco: 2 mm

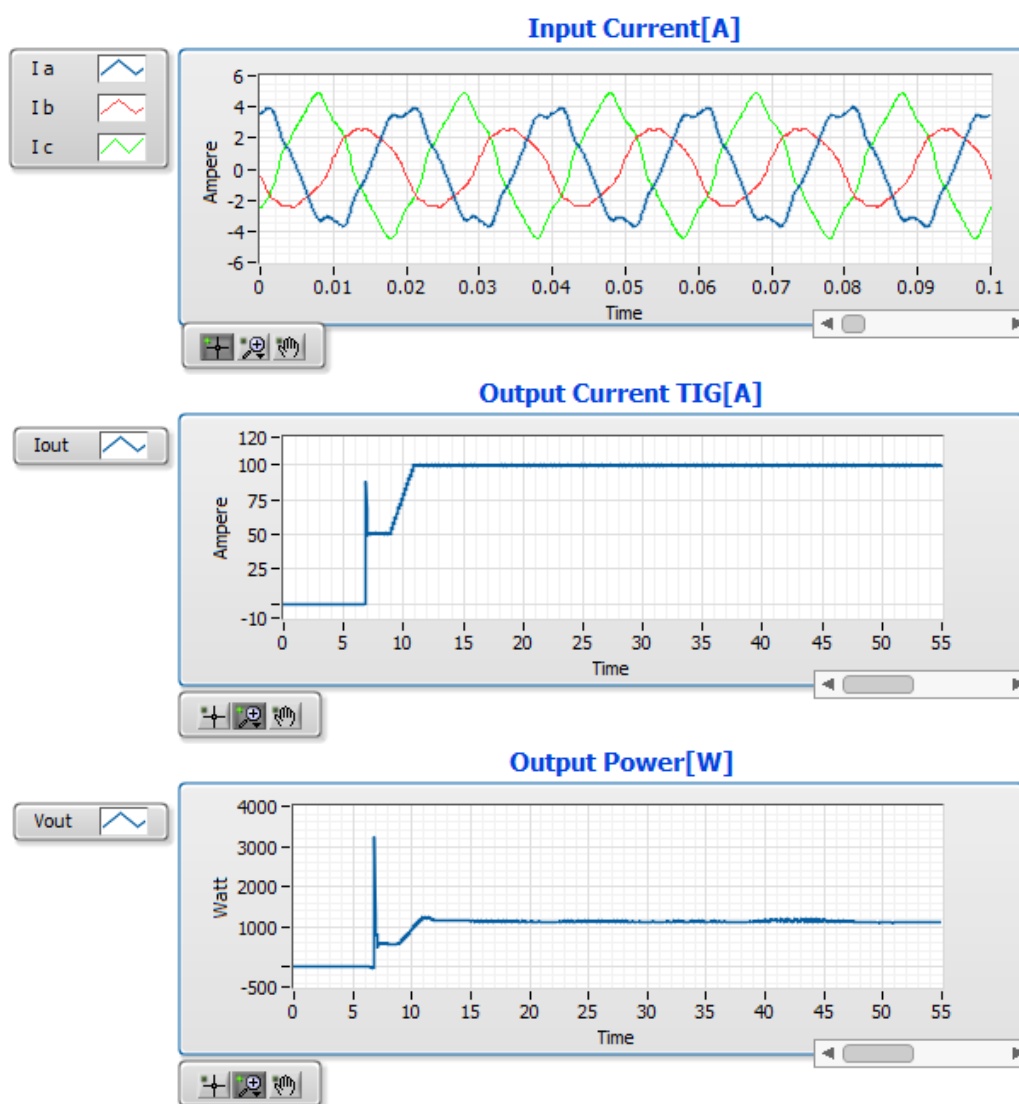


Fig. 18 TIG NERTAMATIC 450 test 1

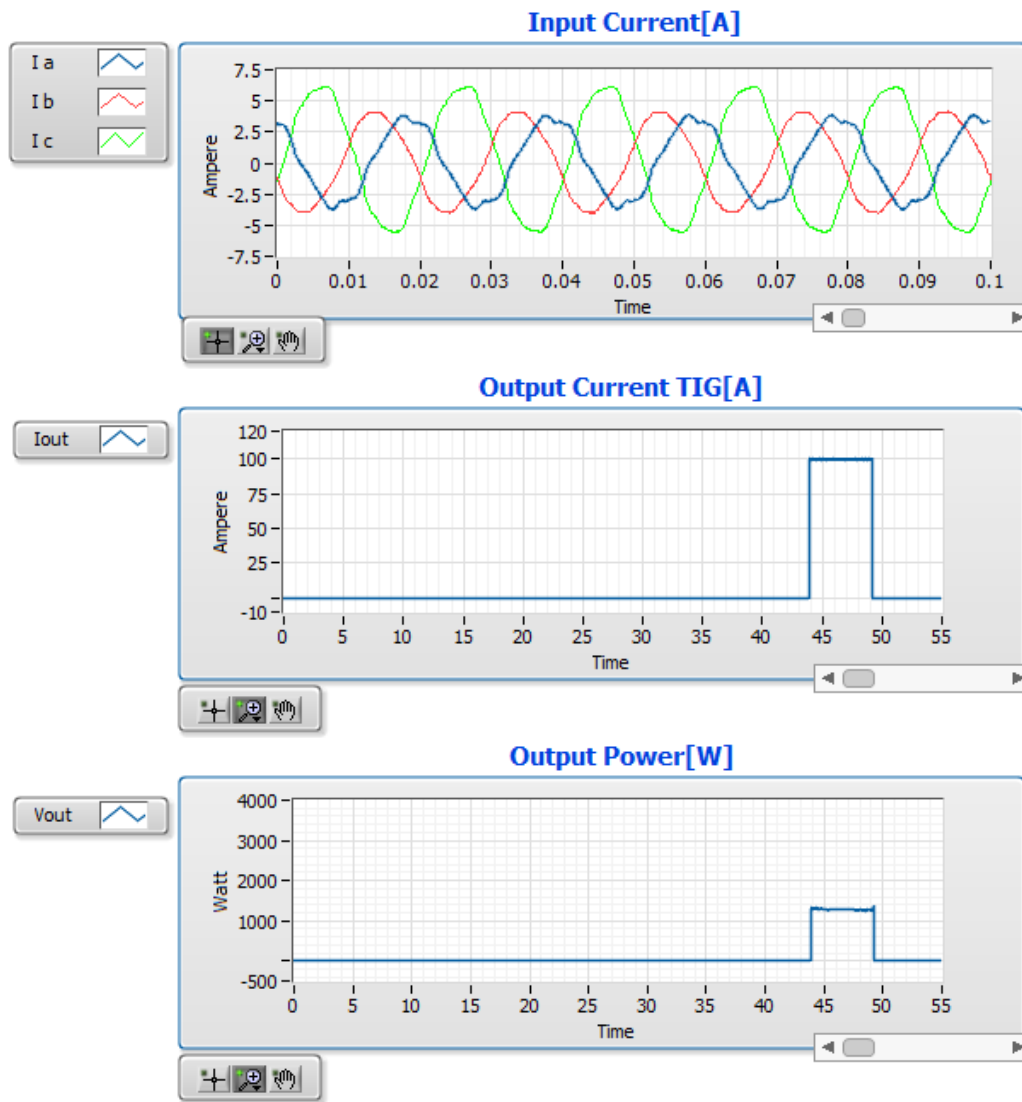


Fig. 19 TIG NERTAMATIC 450 test 2

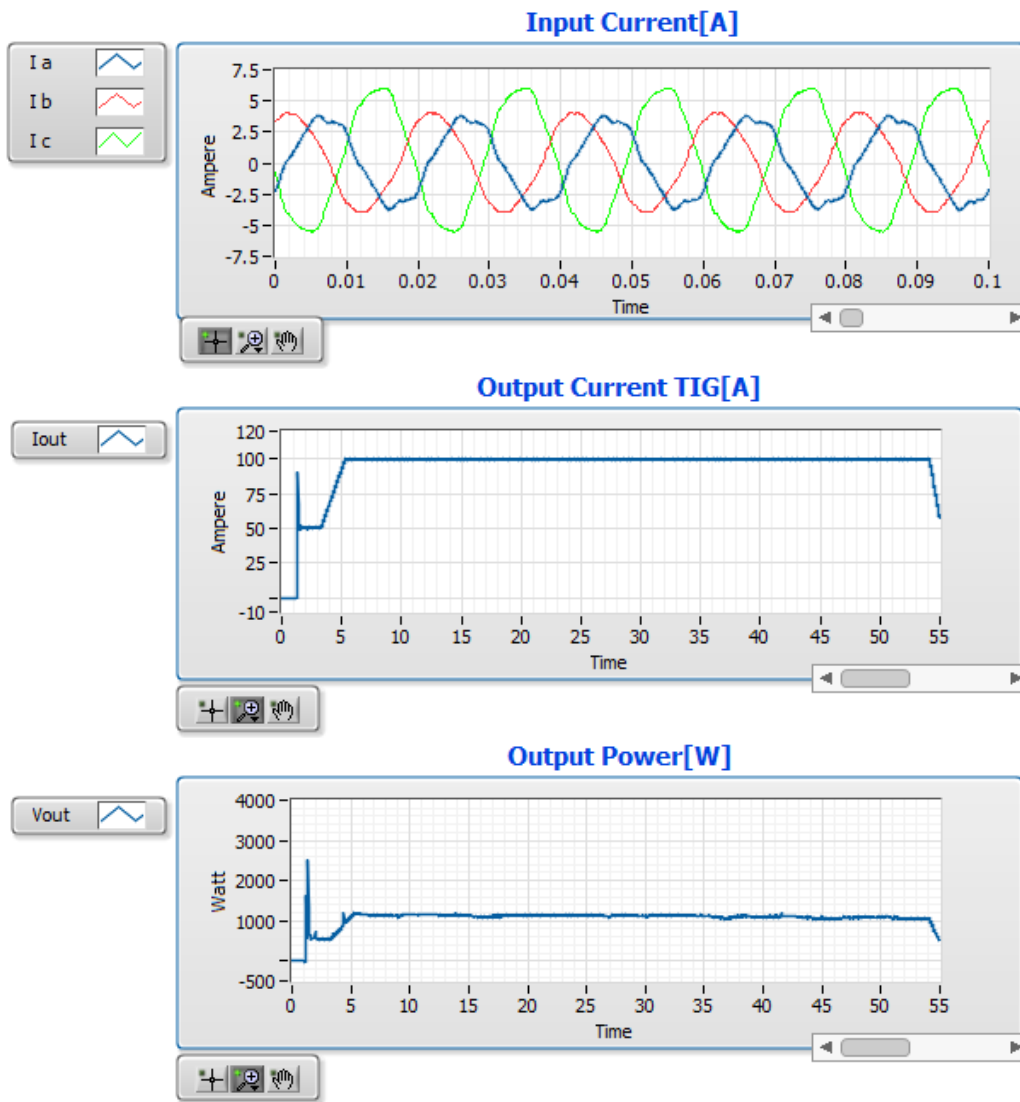


Fig. 20 TIG NERTAMATIC 450 test 3

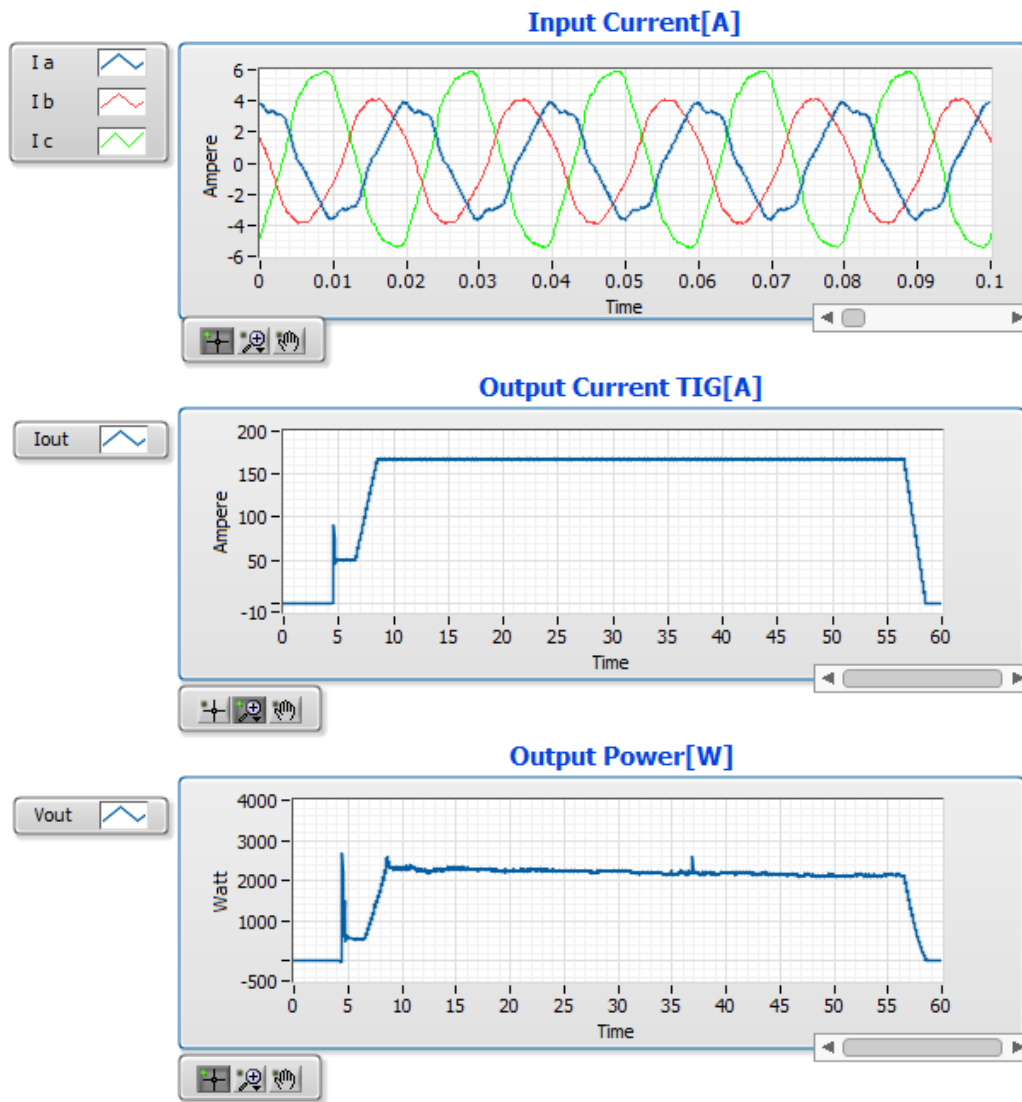
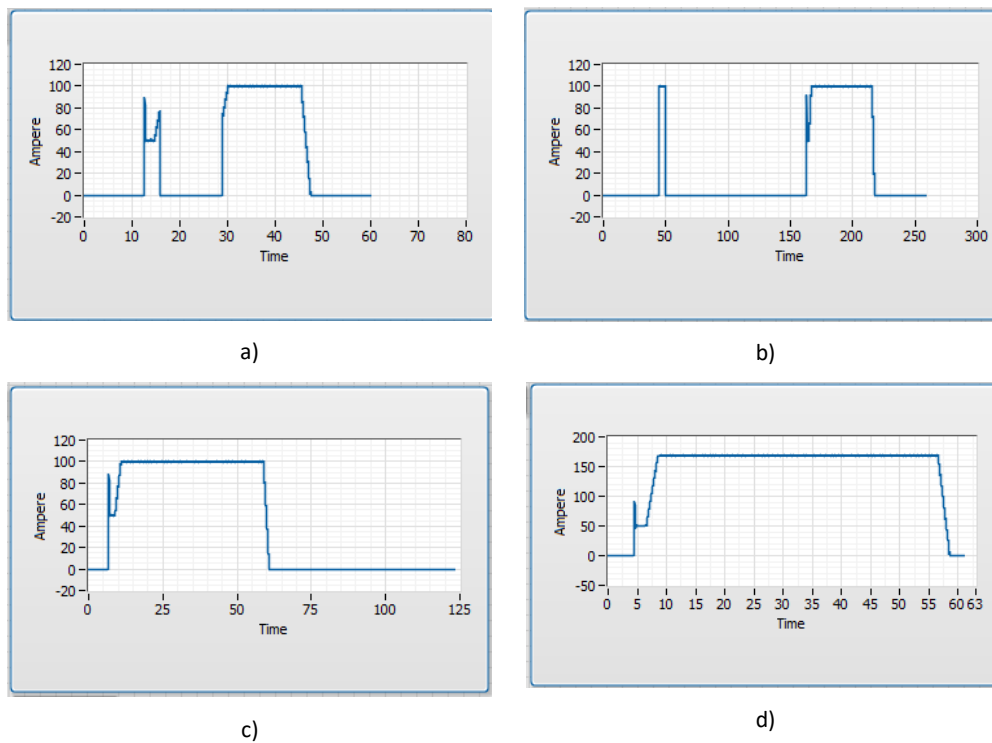


Fig. 21 TIG NERTAMATIC 450 test 4



**Fig.22 Test su TIG NERTAMATIC 450: Misura della potenza in uscita, nei 4 test descritti per tutta la durata del processo di saldatura**

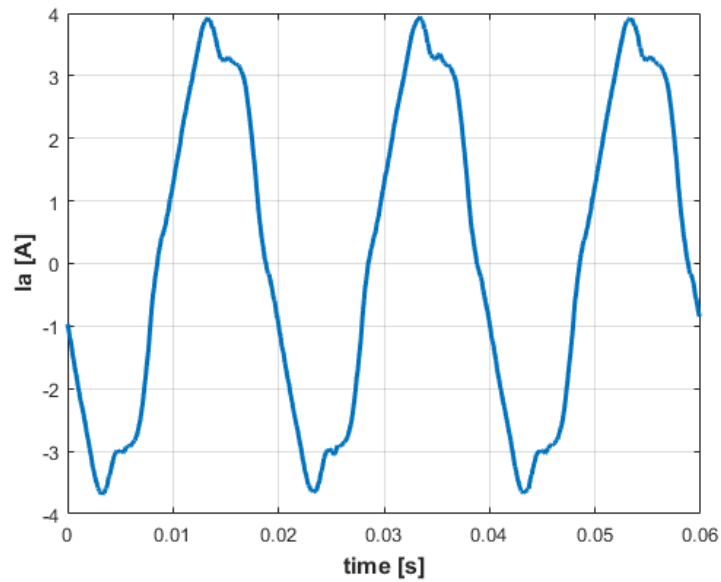
La figura 22 mostra la misura della potenza in uscita calcolata per i quattro test descritti precedentemente. Come precedentemente affermato, si tratta di prove di saldatura automatizzate in cui la lunghezza d’arco viene mantenuta costante durante tutto il processo e, quindi, non si registrano variazioni significative nei valori di tensione e di corrente di uscita misurati e, di conseguenza, nel valore calcolato della potenza. Per quello che riguarda il calcolo dell’efficienza, considerando esclusivamente i valori di tensione e corrente l’ingresso e in uscita della macchina, sono stati registrati, nel corso delle prove, valori di efficienza compresi tra il 35% e il 45%. Il test che ha presentato un valore di efficienza maggiore (pari a del 44,6 %) è stato il numero 4 caratterizzato una lunghezza d’arco di 2 mm e una corrente massima in uscita impostata al valore di 170 A. Questa valutazione, solo parziale, non tiene in considerazione quello che dovrebbe essere una misura più accurata di tale efficienza che deve prendere in considerazione anche la quantità di metallo fuso nel corso del processo.

### 3.1.1 Analisi armonica delle correnti di ingresso e misura del THD

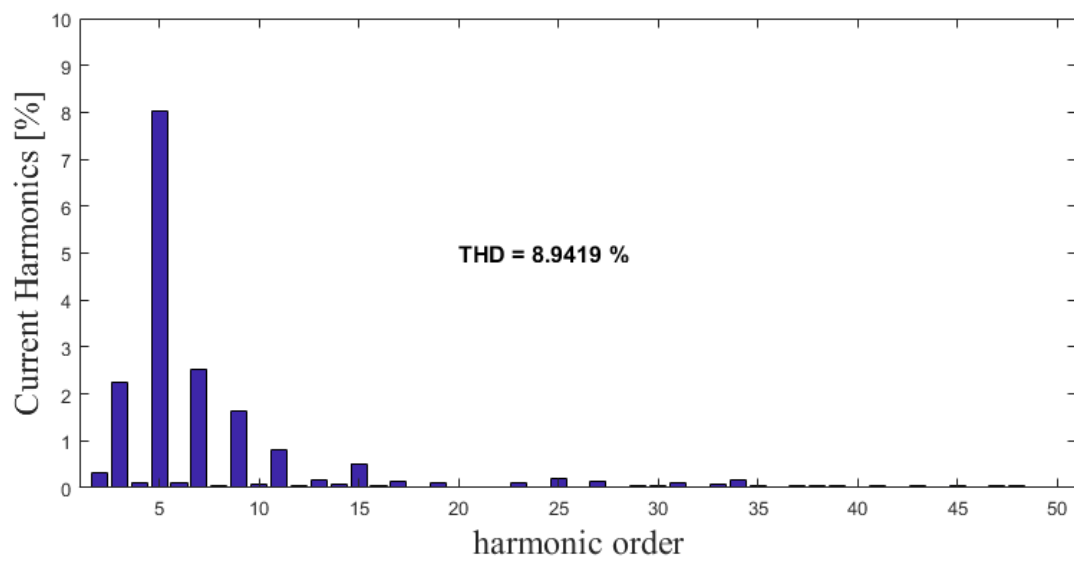
È stato effettuato uno studio sul contenuto armonico delle correnti di ingresso alla saldatrice TIG nelle varie condizioni operative oggetto delle misure. Un esempio dei risultati ottenuti è mostrato nelle Fig.23 e 24 dove è mostrato in due fasi del processo di saldatura (una prima fase con la macchina accesa ma senza accensione dell’arco e la fase vera e propria di saldatura con emissione dell’arco), un intervallo



dell'andamento nel tempo della corrente (a) e il contenuto armonico che risulta dall'analisi di tale intervallo (b).

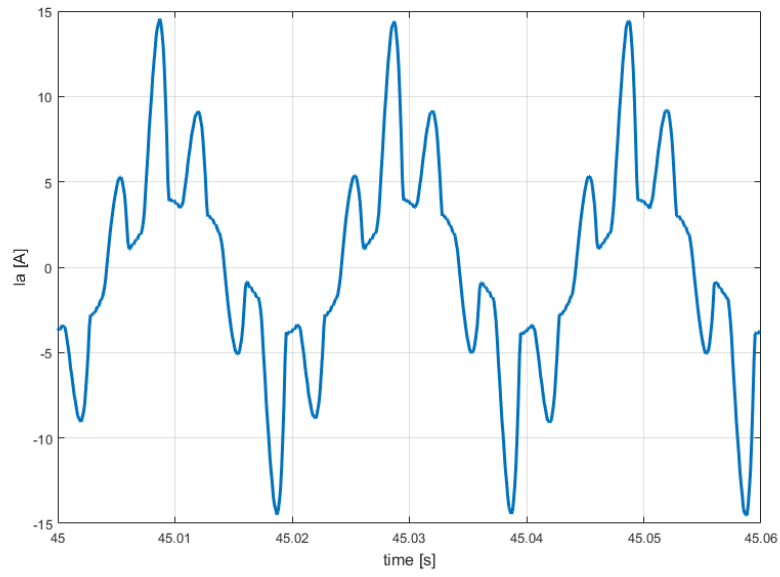


(a)

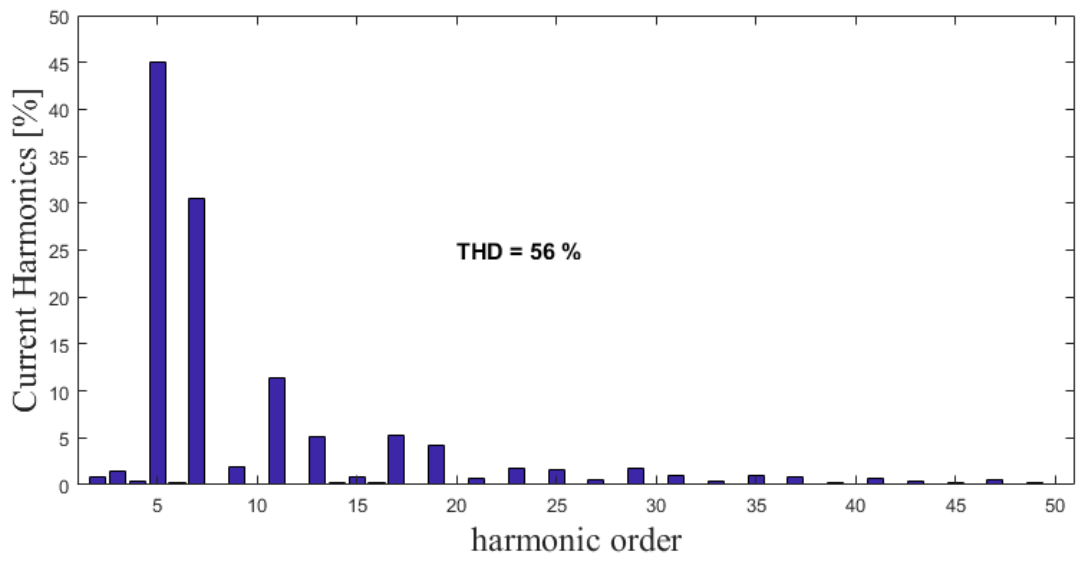


(b)

**Fig.23 TIG NERTAMATIC 450 (a) particolare di una delle correnti di ingresso (b) contenuto armonico e calcolo THD**



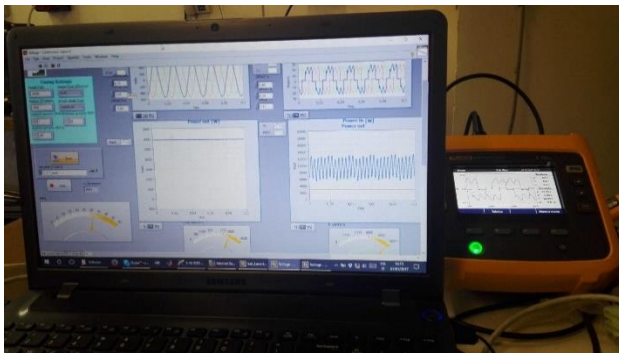
(a)



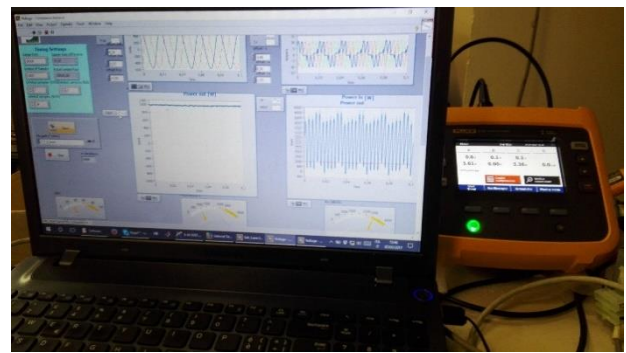
(b)

Fig.24 TIG NERTAMATIC 450 (a) particolare di una delle correnti di ingresso  
(b) contenuto armonico e calcolo THD

### 3.2 Misure su saldatrice Laser YLS 2000 CT



a)



b)

**Fig.25 Misure su saldatrice laser YLS 2000 CT: confronto con FLUKE energy meter 1736**

Sono state effettuate (Fig. 25) delle prove preliminari per verificare il corretto funzionamento del sistema ed effettuare un primo confronto dei risultati delle misure con quelle ottenute con lo strumento Energy Meter FLUKE 1736 messo a disposizione da ENEA. Tale Energy Meter permette la misura di tensioni nel range 0-1000V (con risoluzione 0.1V e accuratezza 0.01% rispetto al fondo scala) e correnti fino a 600A (con risoluzione 0.1A e accuratezza 0.03% rispetto al fondo scala) e fino a 6000A (con risoluzione 10A e accuratezza 0.03% rispetto al fondo scala).

In particolare è stata provata una nuova versione del software, adattata alle caratteristiche della saldatrice per la quale la potenza in uscita è misurabile solo con un calorimetro messo a disposizione da ENEA.

Il calorimetro utilizzato (PRIMES PM48) è uno strumento in grado di misurare la potenza in uscita, nell'intervallo 300 W – 8 kW, di sorgenti laser a onda continua nell'intervallo delle lunghezze d'onda, in funzione della calibrazione, di laser a stato solido (NIR) o a CO<sub>2</sub>. Presenta un'accuratezza di misura pari a  $\pm 2\%$  e una precisione del  $\pm 1\%$ . Presenta, inoltre, una costante di tempo fino a 15s per raggiungere il 99% del valore finale della grandezza da misurare. È provvisto di uscita digitale (RS232 o USB) e analogica (0-10V DC). Quest'ultima è stata collegata ad uno degli ingressi della scheda di acquisizione NI9205.

Le prove effettuate hanno dato esito positivo e le misure effettuate con FLUKE 1736 hanno fornito una buona corrispondenza con quelle ottenute dal sistema di misura realizzato.

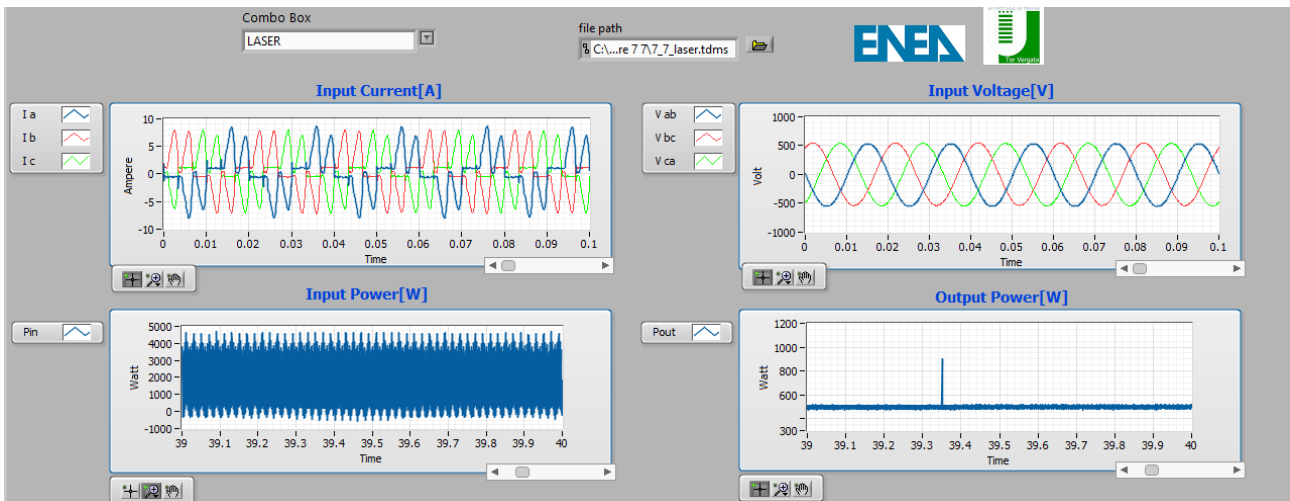


Fig.26 Misure su saldatrice laser YLS 2000 CT

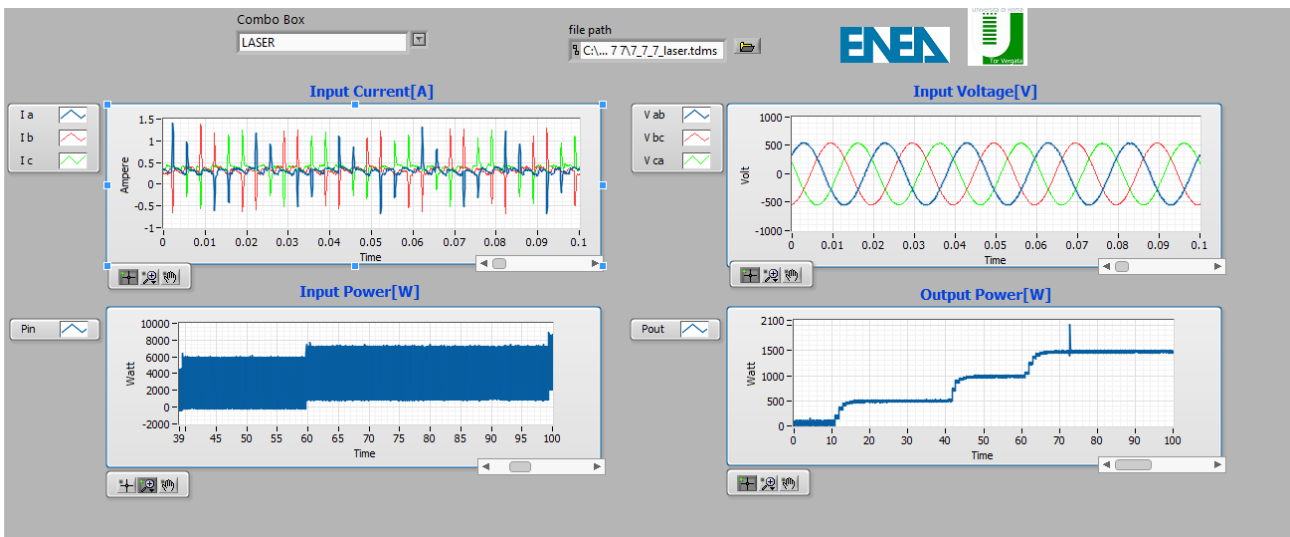


Fig.27 Misure su saldatrice laser YLS 2000 CT

Nelle Fig. 26 e 27 sono mostrate le schermate del programma relative ad alcuni dei test effettuati, mentre la Fig. 28 mostra un particolare delle correnti di ingresso.

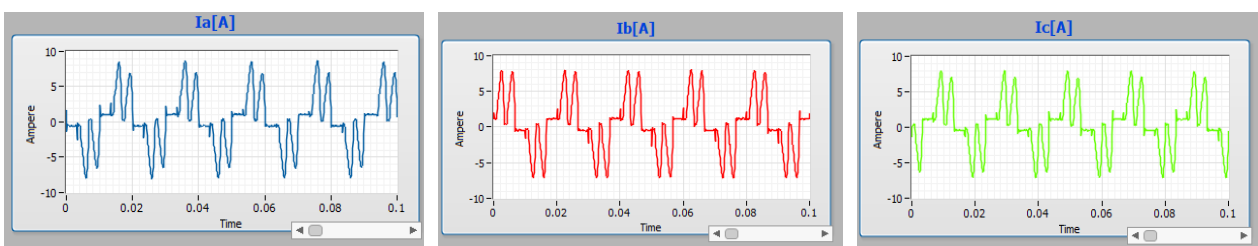
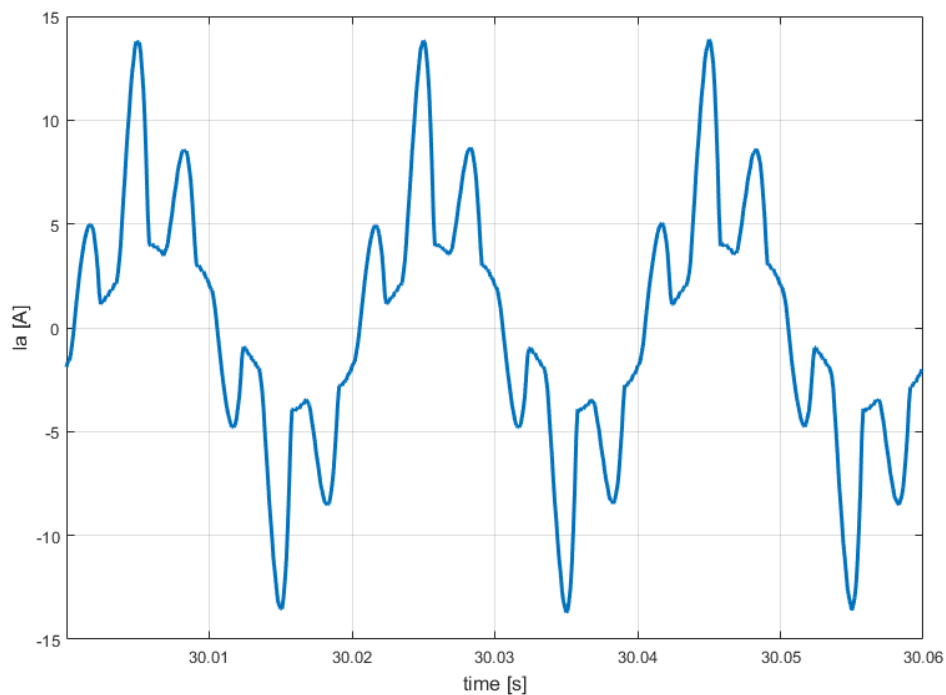


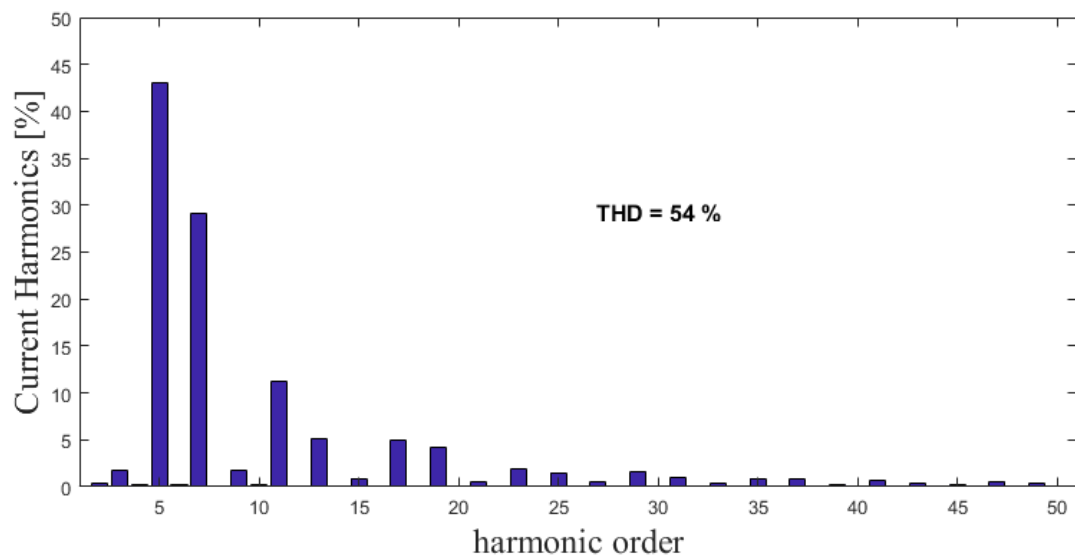
Fig.28 Misure su saldatrice laser YLS 2000 CT: particolare delle correnti di ingresso

### 3.2.1 Analisi armonica delle correnti di ingresso e misura del THD

Anche in questo caso è stata effettuata l'analisi armonica delle correnti di ingresso alla saldatrice nelle varie condizioni operative oggetto delle misure. Un esempio dei risultati ottenuti è mostrato nelle Fig.29 e Fig. 30 dove è mostrato, rispettivamente per i test 1 e 4, un intervallo dell'andamento nel tempo della corrente (a) e il contenuto armonico che risulta dall'analisi di tale intervallo (b).

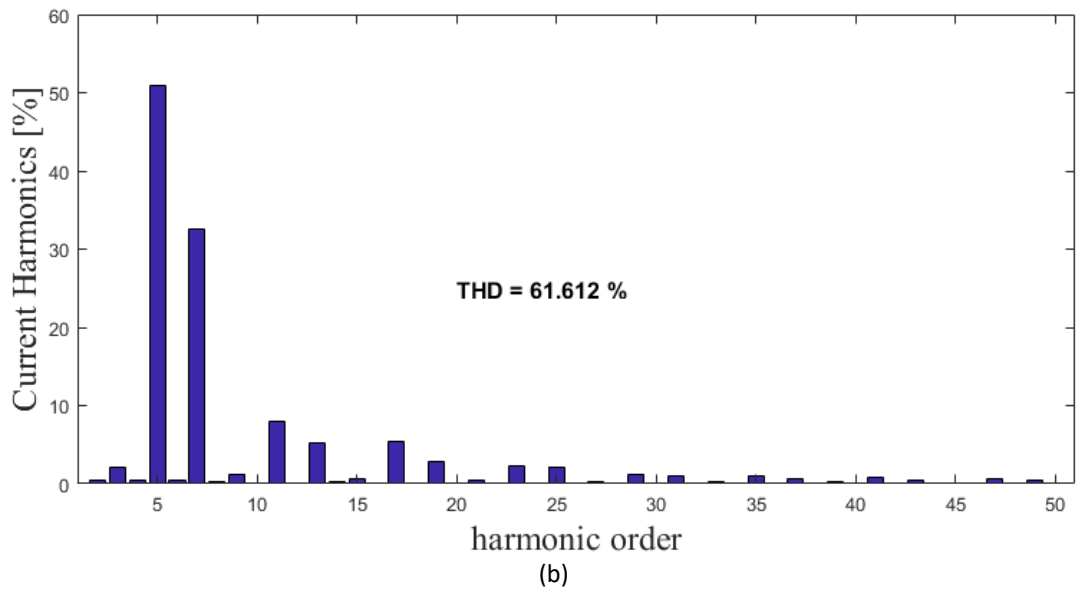
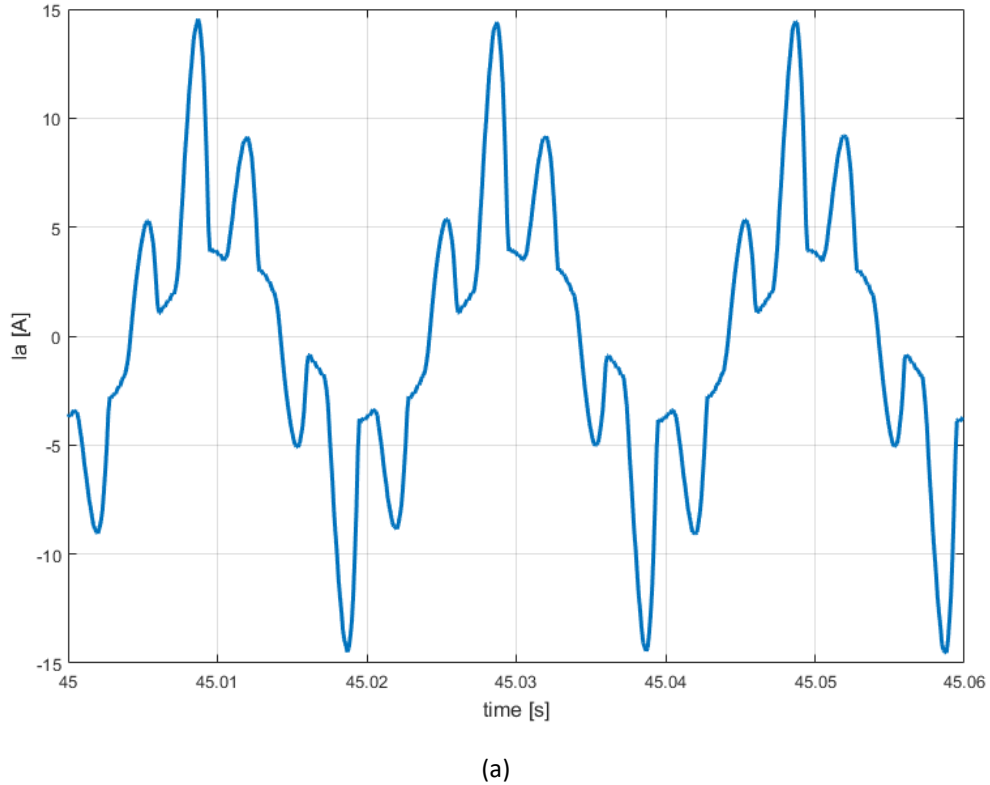


(a)



(b)

**Fig.29 Test 1 su YLS 2000 CT: (a) particolare di una delle correnti di ingresso  
(b) contenuto armonico e calcolo THD**



**Fig.30 Test 4 su YLS 2000 CT: (a) particolare di una delle correnti di ingresso  
(b) contenuto armonico e calcolo THD**

Come di può notare, il valore di THD misurato dipende dalle condizioni operative in cui sta lavorando la macchina e risulta pari, relativamente alle misure effettuate al 54% per il test 1 e al 61.61% per il test 4.





## 4 Analisi metallurgica dei giunti di saldatura realizzati

Lo studio metallurgico è stato rivolto alla caratterizzazione geometrica, strutturale e meccanica dei cordoni di saldatura realizzati nei laboratori ENEA. Le giunzioni sull' acciaio al carbonio S460 sono state effettuate mediante TIG mentre sulla superlega IN792 mediante laser.

Nella fase preliminare sono stati selezionati gli opportuni attacchi chimici per evidenziare la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA) dei giunti saldati. Per acciaio al carbonio è stato utilizzato il Nital 5% mentre per la superlega IN792 sono state utilizzate due diverse soluzioni.

Il primo attacco (10 ml di HNO<sub>3</sub> e 20 ml HCl) è stato utilizzato per evidenziare la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA) del giunto saldato di superlega IN792 e determinare il volume di metallo fuso e poi solidificato. Il secondo attacco è invece di tipo elettrolitico (5ml di HF, 10 ml di glicerolo e 85 ml di etanolo) e al contrario del precedente ha consentito di osservare la microstruttura ed in particolare la fase ordinata  $\gamma'$ .

I campioni lucidati meccanicamente e sottoposti a macroetching con i reagenti indicati sono stati esaminati mediante ispezione visiva (per individuare eventuali difetti macroscopici), microscopia stereo e ottica. Dalle micrografie ottenute è stato poi determinato il volume (V) del metallo fuso e solidificato.

### 4.1.1 Saldatura laser della superlega IN792

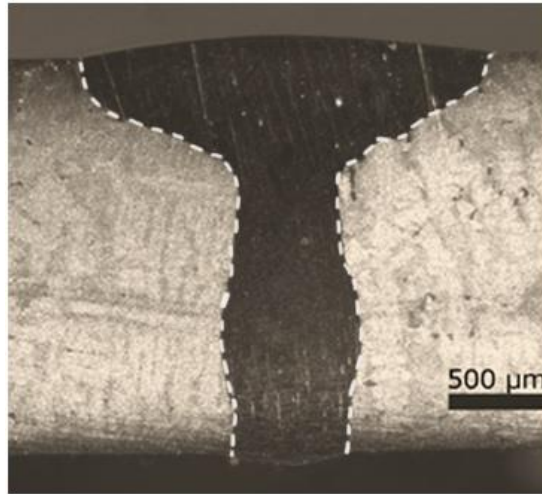
In Tabella 4 si riportano i parametri con cui è stata eseguita la saldatura laser. Le prove di rifusione con fascio laser sono state effettuate con preriscaldamento a 200°C.

<b>campione</b>	<b>cordone</b>	<b>P (W)</b>	<b>V (m/min)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Prerisc. (°C)</b>
Laser	A	1000	<b>1.0</b>	0.224	200
	B	1000	<b>1.5</b>	0.224	200

**Tabella 4**

La Fig. 28 mostra la sezione laterale del cordone di saldatura eseguita sulla superlega IN792 con una velocità di 1.5 m/min dopo attacco chimico.

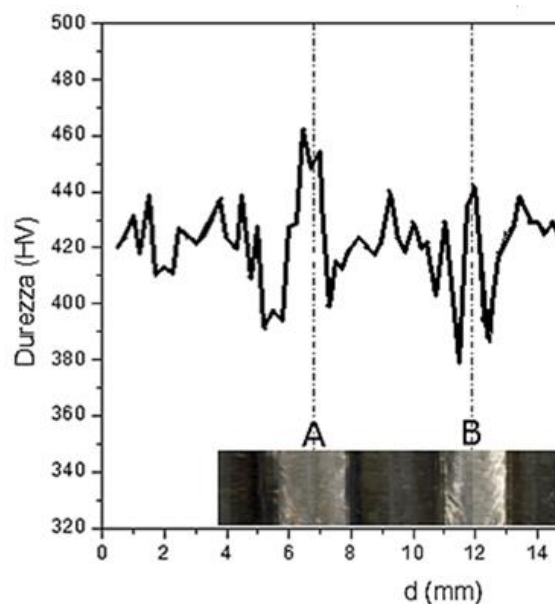
È possibile osservare che il giunto saldato ha la tipica morfologia a chiodo con una larghezza di 2,00mm nella parte superiore e di 0,56 mm nella parte inferiore. L'aspect ratio  $v$ , definito come il rapporto tra la profondità di penetrazione  $p$  e la larghezza massima  $w$ , è pari a 0,88. Nella micrografia viene evidenziata (linea bianca tratteggiata) la zona utile per il calcolo del volume  $V$  del metallo fuso e risolidificato che risulta pari a 15,6 mm<sup>3</sup>; essendo l'area  $A$  della sezione del cordone pari a 1,30 mm<sup>2</sup> e la larghezza della lastra di 12 mm.



**Fig. 31- Sezione laterale della saldatura sulla superlega IN792. In evidenza l'area A utilizzata per il calcolo del metallo fuso e risolidificato durante il processo di saldatura.**

Infine sono stati misurati i profili di microdurezza lungo e attraverso il cordone consentendo una prima stima dei flussi di calore sulla base degli effetti indotti sul metallo in ZF e ZTA. La Fig. 31 mostra i profili di microdurezza Vickers misurati attraverso i cordoni (A, B) applicando un carico di 200 g. Le prove sono distanziate di 250 μm.

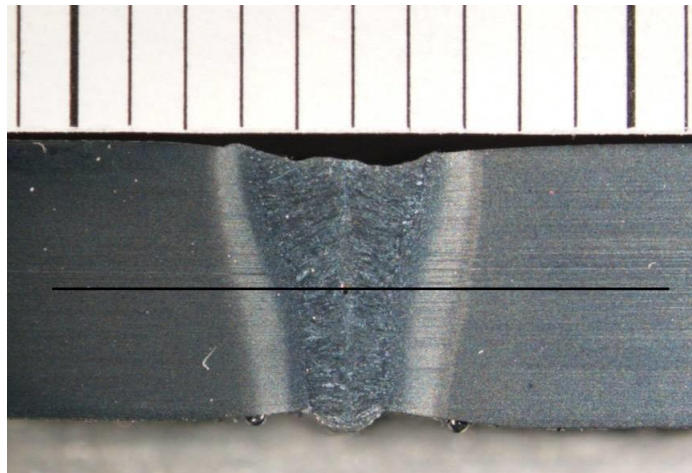
Il profilo di microdurezza ha chiaramente evidenziato un incremento della durezza in ZF rispetto ai valori ottenuti in ZTA. Le linee tratteggiate sono i centri dei cordoni e la durezza media del materiale base è risultata pari a 420 HV.



**Fig. 32- Profili di microdurezza Vickers attraverso il cordone di giunti saldato di superlega IN792 (cordone A: 1 m/min, cordone B: 1.5 m/min )**

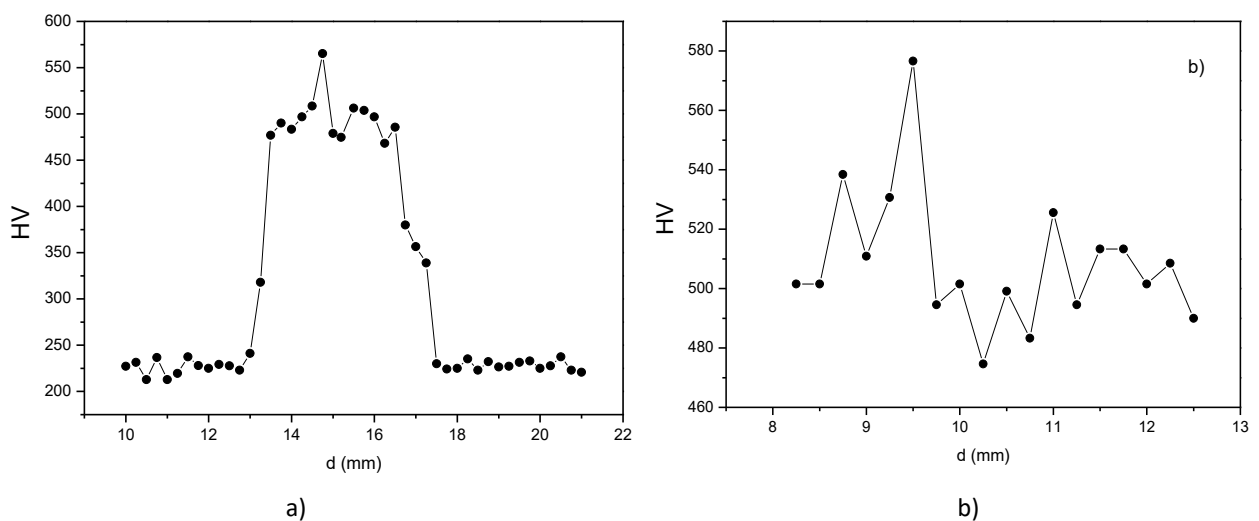
**4.1.2 Saldatura TIG su acciaio al carbonio**

La Fig. 30 mostra la saldatura sull'acciaio al carbonio S460 dopo attacco con reagente Nital 5%.  
L'area della sezione del cordone è 21,26 mm<sup>2</sup>, lo spessore della lastra è pari a 7,5 mm per cui il volume V risulta essere 159,48 mm<sup>3</sup>.



**Fig. 33 - Cordone di saldatura su acciaio S460**

La linea nera indica dove sono state eseguite le microdurezze Vickers, il cui profilo è riportato in Fig. 34a). In Fig. 34b) viene invece rappresentato l'andamento della microdurezza lungo il cordone di saldatura.



**Fig. 34 - Giunto saldato di acciaio al carbonio mostrato in Fig. 30: profili di microdurezza Vickers attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale (b).**



## 5 Abbreviazioni ed acronimi

DAQ – Digital Acquisition System

THD – Total Harmonic Distortion

THC – Total Harmonic Current Distorsion

ZF – Zona Fusa

ZTA – Zona Termicamente Alterata

## Riferimenti bibliografici

- [1] B. Riccardi and R. Montanari: Indentation of metals by a flat-ended cylindrical punch *Materials Science and Engineering A* Vol. A381 (2004), p. 281
- [2] Shrivastava, M. Krones, F. E. Pfefferkorn, Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9 (2015) 159–168.
- [3] A. Bahrami, D.T. Valentine, D. Aidun, Computational analysis of the effect of welding parameters on energy consumption in GTA welding process, *International Journal of Mechanical Sciences*, 93 (2015) 111–119.
- [4] S. Chayoukhi, Z. Bouaziz, A. Zghal, Cost estimation of joints preparation for GMAW welding process using feature model, *Journal of materials processing technology*, 199 (2008) 402–411.
- [5] S. Chayoukhi, Z. Bouaziz, A. Zghal, Cost evaluation for welding process by using preparing features, *INCOM'2006: 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEEE/IMS, Symposium Information Control Problems in Manufacturing*, May 17-19 2006, Saint-Etienne, France.
- [6] A. Haelsing, P. Mayr, Energy balance study of gas-shielded arc welding processes, *Weld World* DOI 10.1007/s40194-013-0073-z.
- [7] Wei Li, E. Feng, D.I Cerjanec, G.A. Grzadzinski, *Sheet Metal Welding Conference XI Sterling Heights, MI*, May 11-14, 2004.
- [8] H. Wei, Yi Zhang, L. Tan, Z. Zhong, Energy efficiency evaluation of hot-wire laser welding based on process characteristic and power consumption, *Journal of Cleaner Production*, 87 (2015) 255-262.
- [9] B. Bajcer M. Hrzenjak, K. Pompe, B. Jez, Improvement of energy and materials efficiencies by introducing multiple-wire welding, *METALURGIJA* 46 (2007) 1, 47-52.
- [10] G. Sproesser, A. Pittner, M. Rethmeier, Increasing performance and energy efficiency of Gas Metal Arc Welding by a high power tandem process, *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use, Procedia CIRP* 40 ( 2016 ) 642–647.
- [11] Q. Zhang, M. Mahfouf, G. Panoutsos, K. Beamish, X. Liu, Multi-objective optimal design of friction stir welding considering quality and cost issues, *Science and Technology of Welding and Joining*, ISSN: 1362-1718 (Print) 1743-2936 (Online) J. homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/ystw20>.
- [12] D.T. Swift-Hook, A.E.F. Gick, *Penetration Welding with Lasers*, *Welding Research Supplement* 493-s (1973).
- [13] C. Mose, N. Weinert, Process chain evaluation for an overall optimization of energy efficiency in manufacturing-The welding case, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34 (2015) 44-51.
- [14] M.A. Purslow, Reducing the ecological impact of arc welding, *Welding Journal*, December (2012) 24-27.
- [15] H. Liu, Q. Zhao, W. Cao, N. Huang, X. Zhao, Simulation Based Evaluation and Optimization for Energy Consumption of a Typical Welding Shop, *2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering Trieste, Italy - August 24-27, 2011*, 660-665.
- [16] A. Ruggiero, L. Tricarico, A.G. Olabi, K.Y. Benyounis, Weld-bead profile and costs optimization of the CO2 dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI 316, *Optics & Laser Technology* 43 (2011) 82–90.
- [17] D. S. Correia, V. A. Ferraresi, Welding process selection through a double criteria: Operational costs and non-quality costs, *Journal of Materials Processing Technology* 184 (2007) 47–55.
- [18] A. K. Paul, "Power electronics help reduce diversity of arc welding process for optimal performance," *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, 2010 Joint International Conference, New Delhi, 2010, 1-7.doi: 10.1109/PEDES.2010.5712427.

- [19] S. Narula; B. Singh; G. Bhuvaneswari; R. Pandey, "Improved Power Quality Bridgeless Converter Based SMPS for Arc Welding," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Early Access, doi: 10.1109/TIE.2016.2598519

## Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro sarà costituito dal Prof. Roberto Montanari, Professore Ordinario di Metallurgia (ING-IND/21), dal Prof. Stefano Bifaretti Professore Associato di Convertitori, macchine e azionamenti elettrici (ING-IND/32), dal Prof. Vincenzo Bonaiuto Professore Associato di Elettrotecnica (ING-IND/31), dall'Ing. Sabino Pipolo e dall'Ing. Alessandra Varone. Il gruppo di lavoro presenta, nei rispettivi ambiti di ricerca, pluriennale esperienza nello studio dei processi di saldatura, di convertitori elettronici di potenza per applicazioni industriali e di sistemi per il condizionamento e l'analisi di segnali e nella progettazione, realizzazione e test di sistemi elettrici ed elettronici.

### **Prof. Roberto Montanari**

Born in Bologna (31.12.1953).

1981. Physics Degree at the University of Bologna.

1984. Researcher / 1998. Associate Professor / 2001. Full Professor of Metallurgy at the University of Rome-Tor Vergata.

2004-2008. President of the Centre "Physical Metallurgy and Materials Science" of AIM (Italian Metallurgy Society).

2011. Coordinator of the PhD programme in Industrial Engineering at the University of Rome-Tor Vergata.

Since 2014- President of COMET (Council of Italian Academics of Metallurgy).

The research activity covers the following topics: 1. Explosive deformation of metals; 2. Melting and solidification of metallic alloys in reduced gravity; 3. Materials for applications in future nuclear fusion reactors; 4. Microstructure and mechanical properties of metal matrix composites, 5. Development of a new type of indentation test (FIMEC); 6. Welding of metals; 7. Structure of liquid metals and precursor effects of melting and solidification; 8. Microstructure and mechanical properties of Ni base superalloys; 9. Metal foams.

Author of about 270 scientific papers and 10 books

Author of the patents:

- 1- Portable apparatus of cylindrical indenter FIMEC;
- 2- Process for the production of coins with high security standards.

Referee of international scientific journals (Material Science and Engineering, Physical Review, Materials, etc).

**Prof. Stefano Bifaretti** received the PhD degree in Electronic Engineering from University of Rome Tor Vergata, Italy, in 1999 and 2003. In 2004, he became, at the same University, Assistant Professor in Power Electronics and, in 2015, he joined as an Associate Professor. In 2007, he was, as a Research Fellow, with the Power Electronics and Motion Control group at the University of Nottingham (UK), collaborating on the European project FP6-SUSTDEV-UNIFLEX-PM *Advanced Power Converters for Universal and Flexible Power Management in Future Electricity Network*.

He has been also responsible of different national projects, such as *High efficiency power converters for smart LED lighting management in public buildings*. His research interests include power electronics converters, industrial drives and future electricity networks. He has published over 90 papers in international journals and conferences. He is currently an Associate Editor of the IEEE Transaction on Industry Applications.

**Prof. Vincenzo Bonaiuto** received, in 1997, the PhD in Telecommunication and Microelectronics from University of Rome Tor Vergata. From 1996 to 2002, he was Assistant Professor in Electrical Engineering and, in March 2002, at the same university he joined as an Associate Professor.

His main research interests are in the field of the hardware design for real time signal processing by using analog solutions as well as digital (DSP, FPGA, etc.). He published more than 90 papers on international journal and conferences and he was reviewer of several projects for Italian Ministry of Research as well as for international journals and conferences.

He participated in several projects funded by Italian Research Ministry (PRIN). Since 2009, he is involved in the experiment NA62 at CERN and he is working on the project of the electronics section of Trigger and Data Acquisition System.

**Sabino Pipolo** received the M.S. degree in Electronic Engineering from ROMA TRE University, Italy, in 2013. Since 2014, he has been working toward the Ph.D. degree in the Department of Electronic Engineering, University of Rome TOR VERGATA, Italy. His research interests include solid-state transformers, smart grid, power electronic converters and power converter control.