



Ricerca di Sistema elettrico

Upgrading del programma di controllo del sistema trasportabile di misura di efficienza energetica per etichettatura ECOWELDESIGN

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

UPGRADING DEL PROGRAMMA DI CONTROLLO DEL SISTEMA TRASPORTABILE DI MISURA DI EFFICIENZA ENERGETICA PER ETICHETTATURA ECOWELDESIGN

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

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2017

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. Efficientamento dei processi di saldatura industriale

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Upgrading del programma di controllo del sistema trasportabile di misura di efficienza energetica per etichettatura ECOWELDESIGN"

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.....	7
2.1 DESCRIZIONE HARDWARE	7
2.2 DESCRIZIONE SOFTWARE	11
3 PROCEDURA DI CALIBRAZIONE.....	14
4 MISURE	17
4.1 SALDATRICI LASER	17
4.1.1 SALDATRICE IPG – YLS 2000 W [ENEA-C.R. CASACCIA]	17
4.1.2 SALDATRICE TRUDISK 4002 TRUMPF [TESEO-UNIVERSITÀ DI SALERNO].....	19
4.1.3 SALDATRICE TRUDISK 4002 TRUMPF: PROVA SALDATURA.....	22
4.2 SALDATRICE IPG – YLS 10000 W [ELIOS-UNIVERSITÀ DI SALERNO].....	23
4.2.1 SALDATRICE IPG-YLS 10000 W: PROVA SALDATURA	26
4.3 SALDATRICI AD ARCO ELETTRICO	28
4.3.1 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE LISCIA – [ENEA-C.R. CASACCIA]	28
4.3.2 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE PULSATA – [ENEA-C.R. CASACCIA].....	32
4.3.3 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE ALTERNATA – [ENEA-C.R. CASACCIA]	34
4.3.4 TRANSTIG FRONIUS 4000 – AZIENDA WALTER TOSTO SPA - CHIETI	37
4.3.5 MIG ESAB WARRIOR 400i – AZIENDA WALTER TOSTO SPA – CHIETI	41
4.4 SALDATRICI PER ATTRITO	46
4.4.1 MACCHINA FSW – UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA	46
4.4.2 RAMBAUDI RAM-MILL – AZIENDA RGM METALWORKS SPA – OVADA (AL)	50
4.4.3 RAMBAUDI RAM-MILL: FASE DI PRE-SALDATURA.....	52
4.4.4 RAMBAUDI RAM-MILL:FASE DI SALDATURA EFFETTIVA SULLA LEGA METALLICA	53
4.4.5 RAMBAUDI RAM-MILL: FASE DI POST-SALDATURA	53
5 STUDIO METALLURGICO	55
5.1 SALDATURA TIG SU ACCIAIO 316 (SERIE 8B, 8C E 8D).....	55
5.2 SALDATURA TIG SU ACCIAIO 316 (SERIE 12E, 12F, 12C E 12D)	57
6 CONCLUSIONI	59
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	60
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	60
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	62

Sommario

Sulla base dei risultati ottenuti nel corso delle prime due annualità del progetto, l'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" durante il terzo anno ha riguardato, la validazione e calibrazione dello strumento mediante l'utilizzo di strumenti di riferimento di classe elevata e, in una seconda fase, la realizzazione di una serie di test approfonditi in condizioni di utilizzo operative industriali su macchine laser di diversa tipologia (Laser, TIG, MIG, FSR, ecc.) che hanno consentito la messa a punto di alcune peculiarità del sistema di misura nonché l'ottimizzazione delle relative procedure software.

La presente relazione illustra, nella prima parte, le caratteristiche del sistema di misura portatile che è stato messo a punto al termine dei tre anni dell'attività. In particolare, verranno descritte sia le caratteristiche dell'hardware utilizzato che le funzionalità offerte dal relativo software di controllo. Nella seconda parte verranno descritte le procedure di validazione e di calibrazione utilizzate sull'hardware e, infine, nella terza parte verranno illustrati i risultati delle varie misure effettuate dapprima presso il Centro Ricerche di ENEA Casaccia e, in una seconda fase, presso alcuni laboratori universitari e industrie che hanno messo a disposizione le loro macchine per la sperimentazione. L'ultima parte della relazione riguarda invece l'analisi metallurgica effettuata su alcuni campioni di cordone di saldatura realizzati nel corso delle campagne di misura. Tale analisi è 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 che non sia legata al solo utilizzo dei parametri elettrici in ingresso e uscita dalla macchina ma che possa tenere conto, vista la complessità dell'interazione fra tutti i parametri coinvolti nell'operazione di saldatura, l'efficienza del processo nel suo complesso.

In particolare, verranno illustrati i risultati di alcune misure realizzate presso le industrie:

- "Walter Tosto Spa" di Chieti
- "RGM S.p.A – Metalworks" di Ovada (AL)

e presso due laboratori universitari:

- il laboratorio di "Tecnologie e Sistemi di Lavorazione (TESEO ed ELIOS)" del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno
- il laboratorio di "Tecnologie di Giunzione e Prove Materiali Metallici e Polimerici" del Dipartimento di Ingegneria meccanica, energetica, gestionale e dei trasporti (DIME) dell'Università degli Studi di Genova.

1 Introduzione

L'obiettivo dell'attività di ricerca è lo sviluppo di un sistema di misura portatile ad elevate prestazioni per la caratterizzazione di processi di saldatura industriali sia dal punto di vista dello studio dei singoli elementi specifici del processo di saldatura che della valutazione delle sue prestazioni energetiche.

Considerando che, nella sua accezione più generale, l'efficienza complessiva del processo di saldatura può essere definita come il rapporto tra la potenza finale effettivamente impiegata per realizzare il giunto e la potenza iniziale messa a disposizione dalla rete elettrica, è possibile considerare come questa dipenda da tre diversi fattori:

- efficienza del generatore di potenza
- efficienza di trasferimento dell'energia al fuso
- efficienza della procedura di saldatura

La valutazione dei vari parametri coinvolti può essere molto complessa dipendendo dalla specifica tecnologia di saldatura e dal fatto che, inoltre, nella definizione di ciascuno di essi, intervengono diversi fattori. Ad esempio per la saldatura laser è possibile identificare [1]:

- parametri di processo: potenza del laser, diametro del fascio, velocità di saldatura, posizione del punto focale.
- proprietà fisiche del materiale: riflettività corrispondente alla lunghezza d'onda del fascio laser, diffusività termica, tensione superficiale, contenuto di elementi volatili, rugosità superficiale.
- condizioni ambientali: aria, pressione atmosferica, tipo di gas di protezione, portata e composizione del gas di protezione, vapore del metallo indotto dal laser.

Da ciò è allora possibile, ad esempio per una saldatrice laser, esprimere il bilancio energetico durante il processo di saldatura, come:

$$P_L = P_a + P_d$$

Dove

- P_a è la potenza assorbita dal pezzo
- P_d è la potenza dissipata per conduzione, convezione e irraggiamento

$$P_d = P_p + P_R + P_c + P_b + P_T$$

dove

- P_L è la potenza incidente del laser
- P_p la variazione di potenza dovuta all'interazione col materiale per effetto della nube plasma e del vapore
- P_R la potenza laser riflessa
- P_b la potenza laser utilizzata per vaporizzare il materiale e ionizzare il vapore
- P_T altre perdite.

È allora evidente come solo attraverso la contemporanea valutazione di più parametri di processo sia possibile ottenere una sua reale caratterizzazione e, quindi, una corretta definizione di quella che è una stima reale dell'efficienza energetica. Da questo nasce l'esigenza di disporre di un sistema che sia in grado di realizzare, la misura simultanea di più parametri caratteristici del processo di saldatura e che sia sufficientemente versatile per poter essere utilizzato per i diversi processi.

Il prototipo del sistema di misura portatile (mostrato in Fig.1), il cui progetto è stato messo a punto nel corso della seconda annualità dell'attività di ricerca, è stato realizzato e validato nel corso di questo terzo anno di attività. Esso è basato sul sistema di acquisizione digitale COMPACT DAQ della National Instruments ed è stato progettato per essere utilizzato in ambiente operativo industriale. L'idea è stata quella di realizzare un sistema in grado di rendere possibile la misura, in modalità sincrona, di molteplici parametri di processo (assorbimenti elettrici, portata dei gas utilizzati nel processo, ecc.) su macchine saldatrici di diversa tipologia (arco, laser, friction, ecc.) permettendo, inoltre, di effettuare la misura, sia dei sistemi principali della macchina, che degli altri sistemi accessori come ad esempio gli assorbimenti elettrici dei sistemi automatici per il posizionamento della torcia e per l'avanzamento del pezzo oppure di un *chiller* come nel caso di una macchina a saldatura Laser.



Fig. 1 – Foto del sistema di misura portatile

2 Upgrade del sistema di misura

2.1 Descrizione hardware

Il sistema di misura, il cui schema a blocchi mostrato in Fig.2, è pensato per essere inserito tra la rete di alimentazione e la macchina saldatrice.

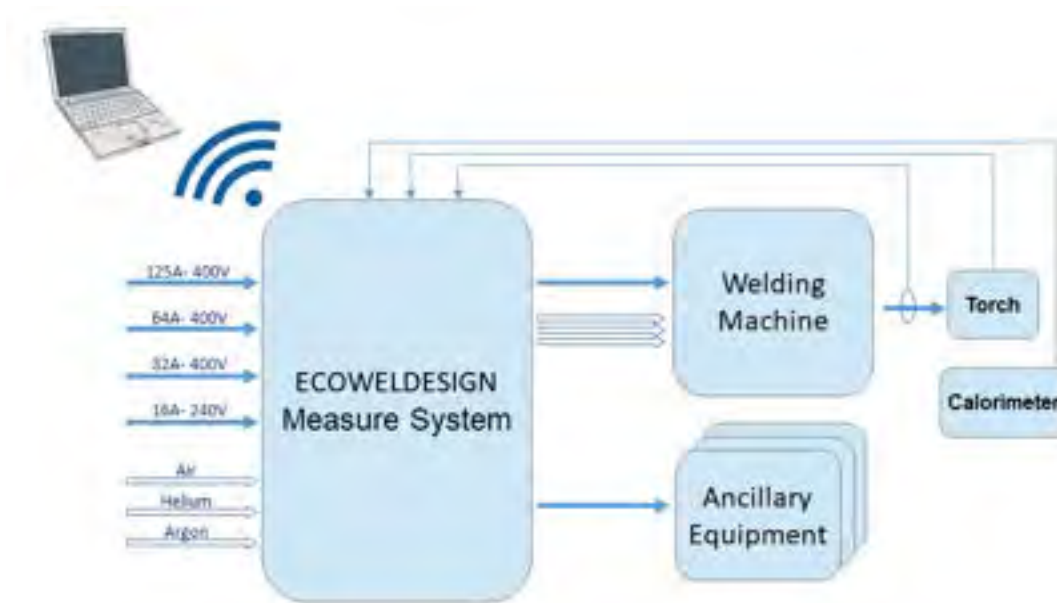


Fig. 2 – Schema a blocchi del sistema di misura

Dispone di quattro ingressi per la misura delle grandezze lato rete di alimentazione:

- Linea Trifase 400 V/125 A (a sinistra nella Fig. 3a)
- Linea Trifase 400 V/64 A
- Linea Trifase 400 V/32 A
- Linea Monofase 220 V/16 A

e di nove ingressi per le misure lato saldatrice:

- 2 Ingressi in Bassa Tensione (10 V) (a destra nella Fig. 3c)
- 2 Ingressi in tensione (protetti fino ad una tensione massima di 3 kV) (al centro nella Fig. 3c)
- 2 Ingressi in corrente (50 A - 300 A) (a sinistra nella Fig. 3c)
- 3 ingressi in tensione per le portate Gas (aria, elio o argon) (in basso nella Fig. 3a)

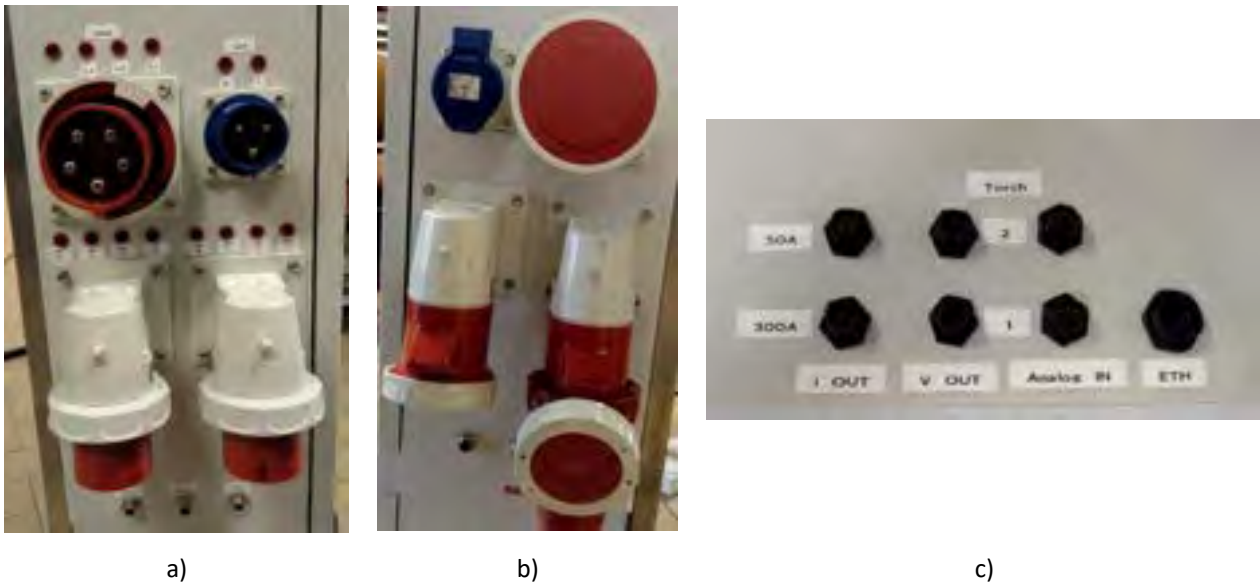


Fig. 3 – a) Input (dalla rete), b) uscita (verso la macchina), c) Ingresso torcia (corrente e tensione), calorimetro, ecc.

Per consentire la connessione in parallelo di un wattmetro, sono disponibili apposite prese di test (Fig. 3a) per ciascuno dei quattro canali e per ciascuna delle fasi e del collegamento di neutro. Il sistema è inoltre dotato di connessione Ethernet (a destra nella Fig. 3c) e/o wireless (Wi-Fi IEEE 802.11g) verso un PC remoto all'interno del quale è stato installato il software (sviluppato in LabView) per l'acquisizione e l'elaborazione delle misure effettuate.

Per quello che riguarda le grandezze in uscita della saldatrice è possibile utilizzare, in caso di saldatura TIG e MIG, per la corrente sulla torcia due diverse sonde ad effetto Hall con portata massima rispettivamente di 50A e 300A:

- LEM HTR 50-SB
- LEM LF 306-S

Per quello che riguarda invece la misura della tensione sulla torcia, è possibile utilizzare una scheda con sonda LEM LV 20 che è in grado di garantire una protezione da sovratensione fino a 3kV, protezione necessaria per garantire l'incolumità del sistema durante la fase di innesco dell'arco. In caso di saldatura Laser, si può invece effettuare una misura del calore trasferito al pezzo mediante un calorimetro (es. PRIMES PM48 – Fig.4) che presenta in uscita una tensione massima di 10V e che può essere acquisito attraverso uno dei canali in bassa tensione disponibili. Nel caso di una macchina laser, la misura della potenza in uscita può essere effettuata con un metodo di tipo calorimetrico: il fascio entra in un assorbitore perfetto (corpo nero) raffreddato ad acqua ed isolato termicamente dall'ambiente; l'energia incidente in un determinato intervallo temporale risulterà quindi proporzionale al prodotto di portata, calore specifico e differenza di temperatura dell'acqua fra ingresso e uscita dello strumento. Lo strumento fornisce in uscita un segnale in tensione (0-10V) proporzionale al valore misurato che può essere letto da una delle schede (NI 9205).



Fig. 4 – Foto calorimetro PRIMES PM48

Inoltre, il sistema permette la misura, attraverso tre appositi misuratori di portata, dei flussi di aria, elio ed argon. Questi gas hanno ampio utilizzo all'interno dei processi di saldatura industriali in quanto, oltre ad incidere sulle caratteristiche della giunzione realizzata, sono in grado di modificare, nella saldatura ad arco, le proprietà dell'arco elettrico per quello che riguarda sia la relativa procedura di innesco che la sua stabilità.

Modello	Range	Sample Rate	Risoluzione	n. Canali
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

Tabella 1 – Schede di acquisizione

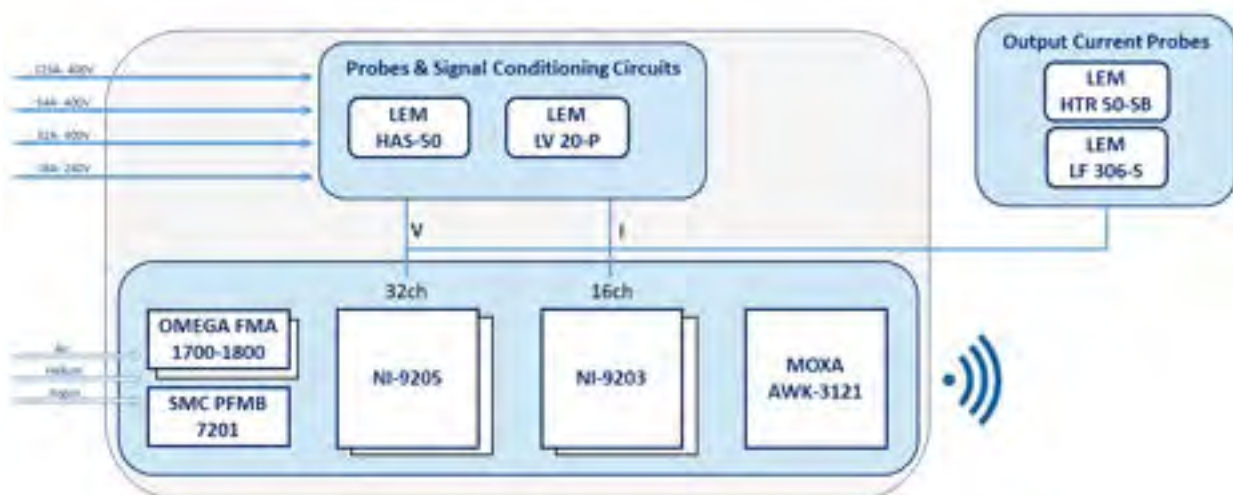


Fig. 5 – Schema a blocchi del sistema di misura

Il prototipo hardware è costituito da uno chassis (modello NI-9188) in grado di ospitare fino otto diverse schede di acquisizione sul quale sono state installate due schede di acquisizione NI-9205 utili per

l'acquisizione di segnali in tensione e due schede NI-9203 utili per l'acquisizione di segnali in corrente. Il sistema, nel suo complesso, è quindi in grado di acquisire fino ad un massimo di 32 canali differenziali in tensione (16 per ciascuna scheda) e 16 in corrente (8 per ciascuna scheda). Le caratteristiche delle schede sono riportate in Tabella 1.

Come mostrato in Fig. 5, la misura dei quattro canali per l'acquisizione delle grandezze di rete sono effettuate mediante sonde LEM LV 20-P per la misura dei valori di tensione, e con sonde LEM HAS-50 per la misura dei valori di corrente. L'uscita delle prime (segnale in corrente) è collegata ad uno degli ingressi alle schede NI-9203, mentre l'uscita delle seconde (segnale in tensione) è collegata ad uno degli ingressi alle NI-9205.

Input	Modello	Range	Accuratezza	Output	Ø cable [mm]
Corrente	LEM HAS-50 panel mount	nom: ±50 [A] max ±150 [A]	<1% @ $I_{PN} = 0.5$ [A]	Tensione ±4V Closed-loop	20.4 x 10.4
Corrente	LEM HTR 50-SB split core	nom: ±50 [A] max ±100 [A]	<2% @ $I_{PN} = 1$ [A]	Tensione ±4V Open-loop	21
Corrente	LEM LF 306-S panel mount	nom: ±300 [A] max ±500 [A]	0.4% @ $I_{PN} = 1.2$ [A]	Corrente nom 150 [mA] max 250m [A]	24.5
Tensione	LEM LV 20-P	Max 500 [V]	±1.0% @ $V_{PN} = 250$ [V]	Corrente	NA

Tabella 2 – Sonde di corrente e tensione

La misura dei parametri in uscita della macchina saldatrice sarà, per le saldatrici ad arco, mediante l'acquisizione dei valori di tensione e di corrente sulla torcia. La corrente può essere letta mediante una delle sonde LEM HTR 50-SB (split core) oppure LEM LF 306-S in funzione del valore di portata richiesto (50A per la prima e 300A per la seconda). I due segnali in uscita dalle sonde sono collegati ad uno degli ingressi NI-9205 o direttamente (per la LF 306) o tramite un apposito trasduttore di tensione (per la HTR 50-SB). Le caratteristiche delle sonde utilizzate sono riportate in Tabella 2. Per quello che riguarda invece la misura della tensione sulla torcia, a causa delle diverse modalità utilizzate per l'innesco dell'arco che possono provocare valori di tensione anche dell'ordine del kV, è stato necessario utilizzare un apposito circuito di interfaccia in grado di garantire un valore di protezione fino a tensioni intorno ai 3kV che dovrebbero essere in grado di garantire una sufficiente robustezza al sistema. Il sistema prevede due ingressi identici per questa misura e l'uscita dei rispettivi circuiti di interfaccia è collegata ad una degli ingressi delle NI-9203.

Per quanto riguarda invece la misura delle portate di gas sono stati utilizzati appositi misuratori di flusso (le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 3) che presentano uscita in tensione con valore massimo di

5V che può essere facilmente letto da uno degli ingressi della scheda NI-9205.

Infine, anche per garantire l'utilizzo del sistema in luoghi non facilmente accessibili, il sistema è stato dotato di connessione wireless (WiFi IEEE 802.11g) è stata utilizzata una scheda MOXA AWK-3121 il cui ingresso è collegabile all'uscita dello chassis NI-9188.

Marca e modello	Portata	Pressione Max	Uscita	Gas
OMEGA FMA 1700-1800	2-100 L/min	750 kPa	Analogue 1-5V	Argon
SMC PFMB 7201	300-6000 L/min	1,5 MPa	Analogue 1-5V	Aria
OMEGA FMA 1700-1800	0-80 L/min	69 bar	Analogue 0-5 V	Elio

Tabella 3 – Misuratori di portata

2.2 Descrizione software

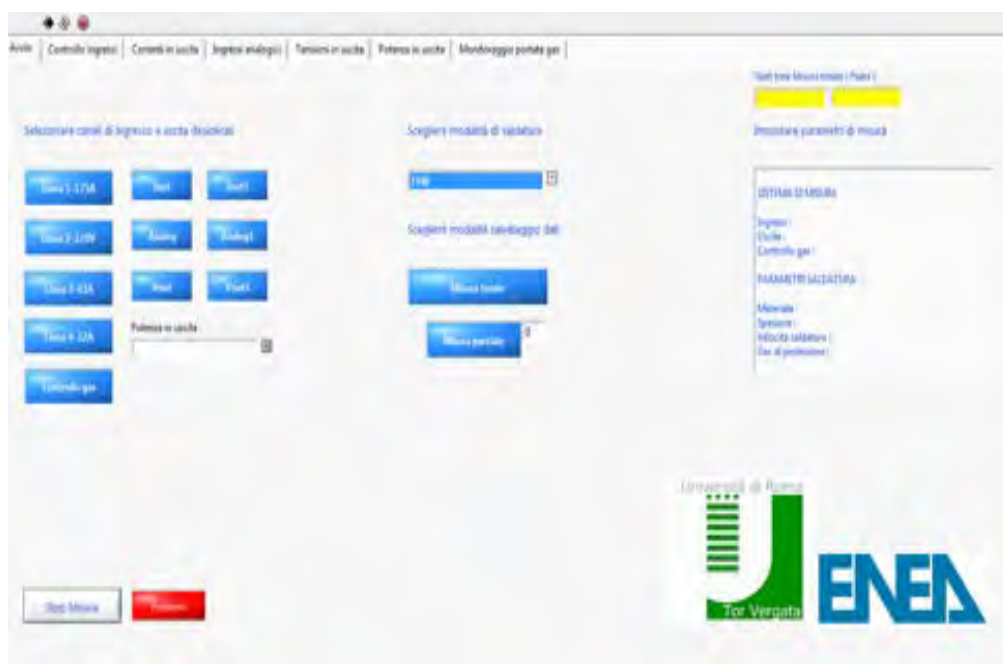


Fig. 6 – Pannello frontale del software di acquisizione

Il sistema di misura è controllato da un apposito software, sviluppato in linguaggio LabView, che, nella sua versione finale, consente di:

- Impostare i parametri della sessione di misura (Fig. 6)
 - selezione dei canali da acquisire (in ingresso e uscita della macchina saldatrice)
 - selezione dei canali con i quali effettuare il calcolo della potenza in uscita dalla macchina saldatrice (solo per saldatura ad arco)

- selezione della tipologia di saldatura (TIG, FSW, Laser, ecc.)
- memorizzazione dei dati acquisiti
- scrittura, in campo libero, di note sul processo di saldatura oggetto della misura
- visualizzare, in tempo reale, tensioni, correnti e potenze sia in ingresso che in uscita della macchina
- visualizzare, in tempo reale, la portata di aria, elio e argon utilizzata nel processo di saldatura

Un secondo software permette l'analisi dei dati (offline) precedentemente acquisiti ed in particolare permette di:

- calcolare il fattore di potenza dei vari dispositivi misurati
- effettuare l'analisi armonica e il calcolo del THD (Total Harmonic Distortion) delle tensioni e correnti di alimentazione
- studiare diagrammi di stabilità dell'arco elettrico (solo per saldatura ad arco) (Fig. 8)
- calcolare l'efficienza del processo di saldatura come definito da protocollo di etichettatura ECOWELDLABELLING [1].

Il software è quindi in grado di considerare il calcolo dell'efficienza energetica del processo secondo le linee guida indicate in [1]. In tale rapporto, viene indicato come "l'efficienza del processo possa essere valutata come: $\eta_w = v_w \frac{d}{P_L}$ dove v_w [m/s] è la velocità di fusione, d [m] è la profondità di penetrazione della saldatura, P_L [W]. Questo parametro di efficienza ha unità di misura m^2/J e indica quindi l'estensione della giunzione creata da un apporto di energia unitario".



Figura 7 – Particolari del software di analisi offline dei dati: a) pannello frontale e analisi armonica

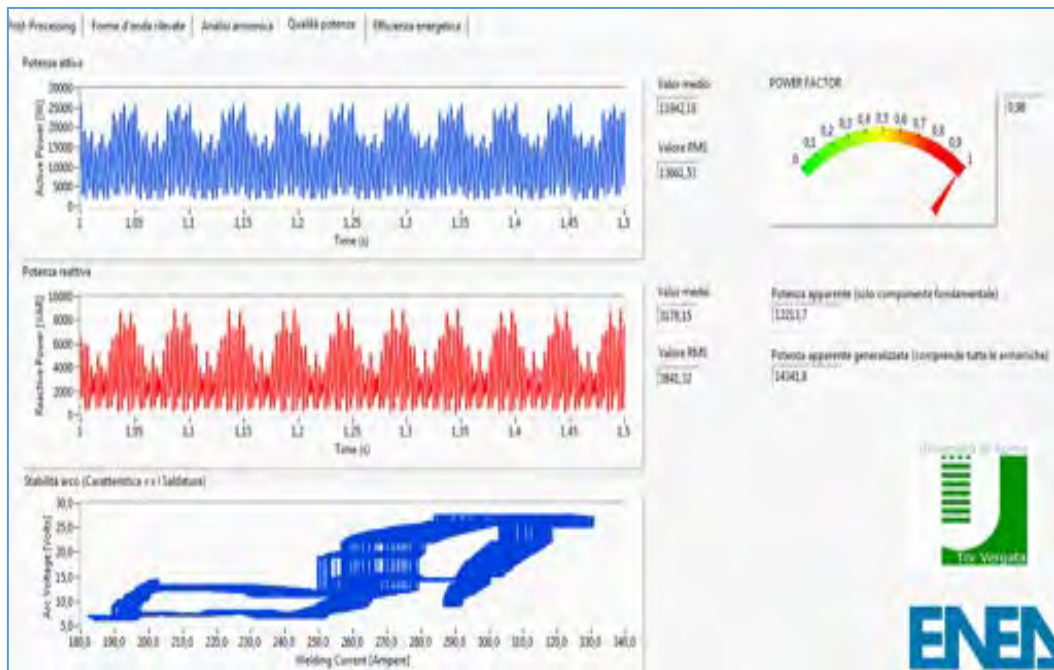


Figura 8 – Software di analisi offline dei dati: Analisi delle potenze in ingresso e di stabilità dell’arco elettrico

In Fig. 9 è mostrato un particolare del diagramma tensione corrente utile per la verifica della stabilità dell’arco sulla torcia (misura su ESAB Warrior 400i in modalità MIG).

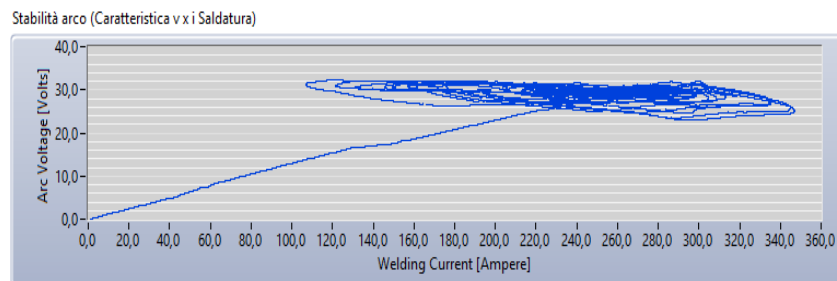


Fig. 9 – Diagramma VxI per tensione e corrente sulla torcia (ESAB Warrior 400i)

3 Procedura di calibrazione

Per la procedura di calibrazione si è utilizzato un *Power Energy Logger* (FLUKE mod. 1738 – Fig.10) le cui caratteristiche tecniche sono riportate in tabella 4 [2].

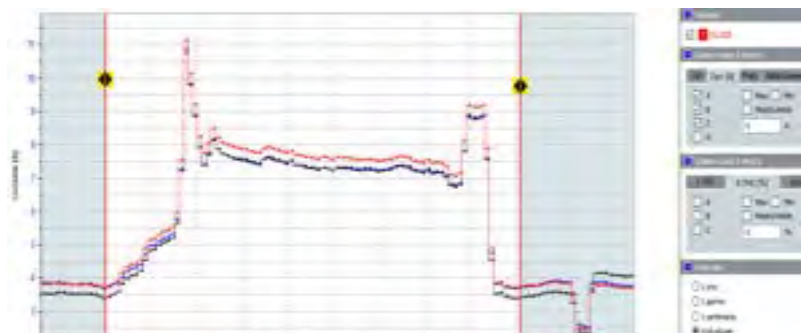
Accuracy				
Parameter	Range	Resolution	Intrinsic Accuracy at Reference Conditions (% of Reading +% of Full Scale)	
Voltage	1000 V	0.1 V	$\pm(0.2\% + 0.01\%)$	
Current: Direct input	i17xx-flex 1500 12"	150 A	0.1 A	$\pm(1\% + 0.02\%)$
		1500 A	1 A	$\pm(1\% + 0.02\%)$
	i17xx-flex 3000 24"	300 A	1 A	$\pm(1\% + 0.03\%)$
		3000 A	10 A	$\pm(1\% + 0.03\%)$
	i17xx-flex 6000 36"	600 A	1 A	$\pm(1.5\% + 0.03\%)$
		6000 A	10 A	$\pm(1.5\% + 0.03\%)$
	i40s-EL clamp	4 A	1 mA	$\pm(0.7\% + 0.02\%)$
		40 A	10 mA	$\pm(0.7\% + 0.02\%)$
Frequency	42.5 Hz to 69 Hz	0.01 Hz	$\pm(0.1\%)$	
Auxillary input	± 10 V dc	0.1 mV	$\pm(0.2\% + 0.02\%)$	
Voltage min/max	1000 V	0.1 V	$\pm(1\% + 0.1\%)$	

Tabella 4 – Specifiche tecniche di FLUKE 1738 Advanced Power Energy Logger [2]

Le misure si riferiscono ad assorbimenti energetici di una macchina saldatrice nell'intervallo di saldatura della durata di 100 s. Nei grafici che seguiranno verranno confrontate le correnti lette dal sistema e dal campione prima in tutto l'intervallo e poi in periodi di osservazione più stretti.



a)



b)

Figura 10 - FLUKE 1738 Advanced Power Energy Logger (a) e schermata del software di visualizzazione FLUKE (b)

Il sistema di misura è stato inserito in serie ad un motore trifase da 10 HP e sono state effettuate le misure in parallelo con il FLUKE 1738 e il sistema di misura portatile. Come si può osservare dalla figura 10, il sistema Fluke, pur campionando ad una frequenza simile al nostro sistema ($f_s = 10,24 \text{ kHz}$) effettua una media sui dati acquisiti in un secondo (in Fig.11a sono mostrati i valori RMS delle correnti acquisite per un intervallo di tempo di circa 90s). Effettuando la medesima procedura sui dati acquisiti dal nostro sistema, abbiamo ottenuto i risultati mostrati in Fig.11b.

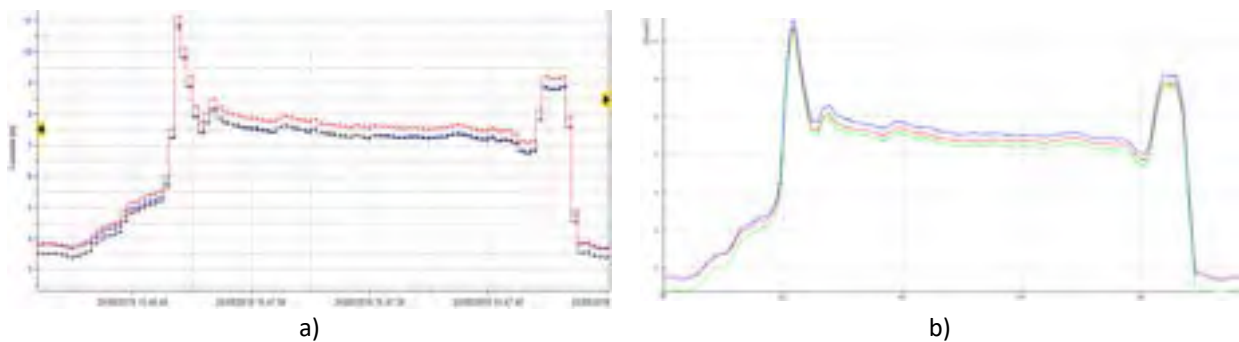


Figura 11 – Misura delle correnti in con FLUKE 1738 (a) e sistema di misura prototipo (b)

Sullo stesso intervallo di tempo è stata quindi effettuato un confronto, per ciascuna fase, fra i valori RMS ottenuti dai due sistemi; i risultati di tale confronto sono mostrati in Fig. 12 per le tre correnti di fase I_A , I_B e I_C per le tre tensioni concatenate V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} (in rosso i valori delle misure con il Fluke e in blu i valori misurati con il sistema prototipo). Lo studio ha mostrato un errore medio che, per ciascun valore misurato, è riportato in Tabella 5.

	<i>Errore Medio</i>
I_A	3.01%
I_B	1.16%
I_C	1.80%
V_{AB}	0.46%
V_{BC}	0.03%
V_{CA}	0.02%

Tabella 5 – Errore nel confronto fra misure con FLUKE 1738 e sistema di misura prototipo

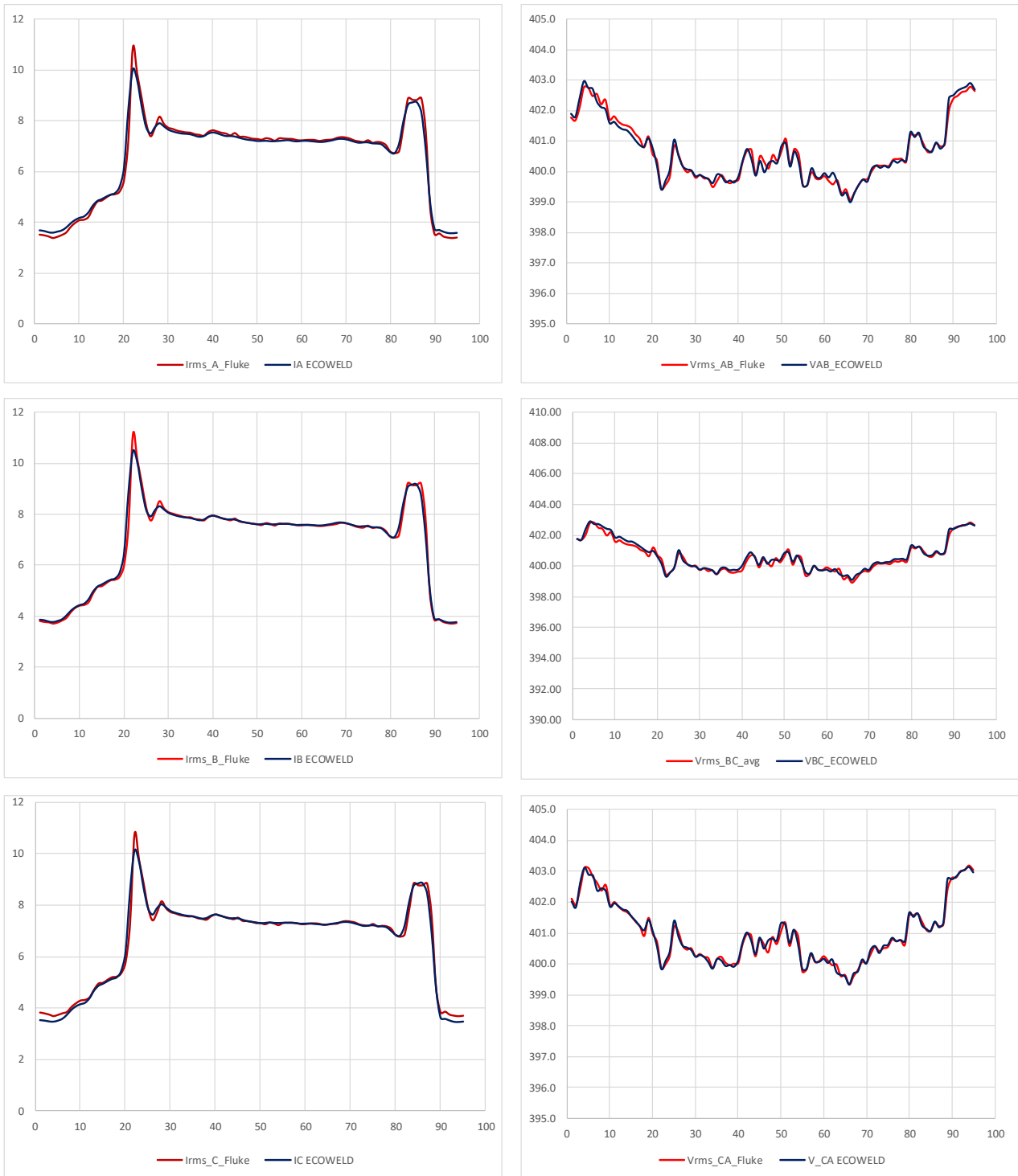


Figura 12 – Confronto misure fra FLUKE 1738 e sistema di misura prototipo

4 Misure

Il sistema prototipo è stato utilizzato per la caratterizzazione di tre tipologie di macchine saldatrici (Laser, Arco elettrico, Attrito). In questo paragrafo vengono riportati i risultati di tali misure ottenute in diverse sessioni effettuate sia presso laboratori universitari (o di centri di ricerca) che presso impianti industriali.

4.1 Saldatrici Laser

4.1.1 SALDATRICE IPG – YLS 2000 W [ENEA-C.R. Casaccia]

Modalità funzionamento	Onda continua (CW) o modulata
Frequenza di modulazione	5 kHz
Potenza nominale	2200 W con upgrade a 4000 W
Tensione alimentazione	Trifase, 400 V
Prodotto caratteristico (BPP)	3,5 mm·mrad

Tabella 6 - Specifiche tecniche saldatrice IPG 2000

Le prove sperimentali sono state effettuate regolando, nell'intervallo 500W – 2000W la potenza in uscita dalla saldatrice. Nella Fig. 13 vengono riportate le curve relative alla potenza utile in uscita dalla saldatrice (misurata con calorimetro PRIMES PM48) e il corrispondente andamento dell'assorbimento di potenza dalla rete elettrica.

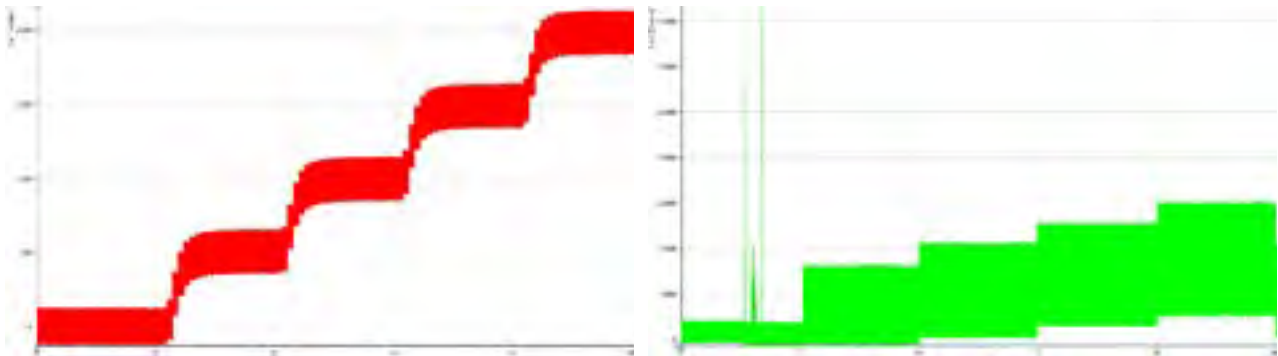


Figura 13 – Potenza alla testa di focalizzazione (misurata con calorimetro PRIMES PM48) e potenza assorbita da rete

Da notare la presenza, nella fase iniziale del processo (circa 10s dall'inizio dell'acquisizione), di alcuni picchi di assorbimento della durata di qualche decimo di secondo e particolarmente elevati (maggiori di 20 kW). Tali picchi nell'assorbimento si verificano quando la potenza utile in uscita non ha ancora raggiunto il valore di regime preimpostato e sono riconducibili alla fase di pompaggio diodi e apertura otturatori.

La tabella 7 riassume i valori di potenza misurati in funzione della potenza del laser che è stata impostata in uscita e il relativo valore del fattore di potenza. Si può notare, a fronte di un basso fattore di utilizzo, un

rendimento elettrico considerevolmente limitato che tende a migliorare all’approssimarsi al valore di 2000W dove la macchina presenta il massimo rendimento. Per quanto riguarda invece il valore del fattore di potenza, questo non sembra variare apprezzabilmente al variare delle condizioni di funzionamento della macchina mantenendosi su valori sufficientemente elevati.

	Potenza impostata (W)	Potenza attiva (W)	Potenza apparente (VA)	Power factor
Prova 1	500	3368	4104	0,82
Prova 2	1000	4912	6034	0,81
Prova 3	1500	6601	8027	0,82
Prova 4	2000	8383	10120	0,83

Tabella 7 – Analisi della potenza in ingresso

Le Fig.14 e 15 mostrano, rispettivamente le correnti sul primario della saldatrice e un dettaglio di queste con il caratteristico doppio picco conseguenza della presenza di uno stadio ad inverter.

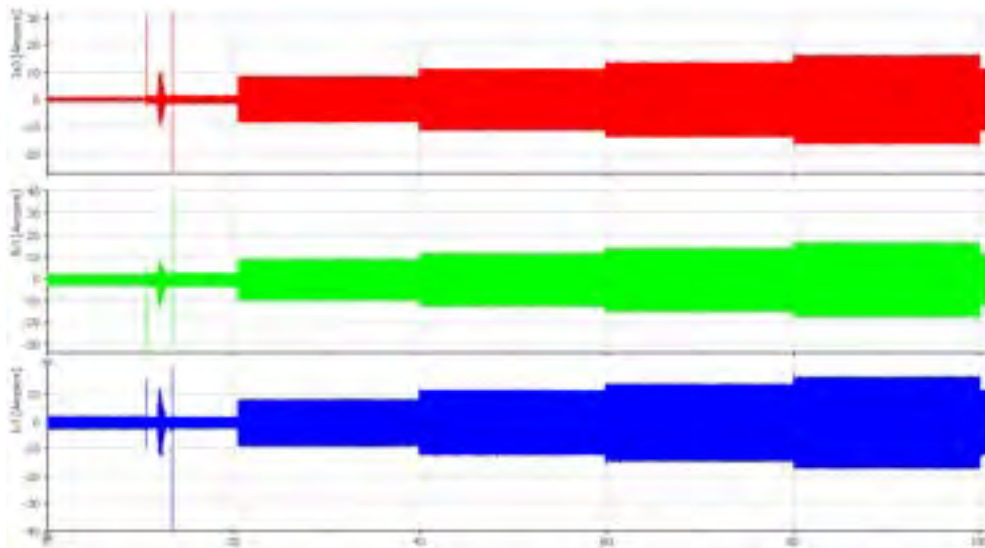


Figura 14 – Correnti sul primario Saldatrice Laser IPG YLS 2000

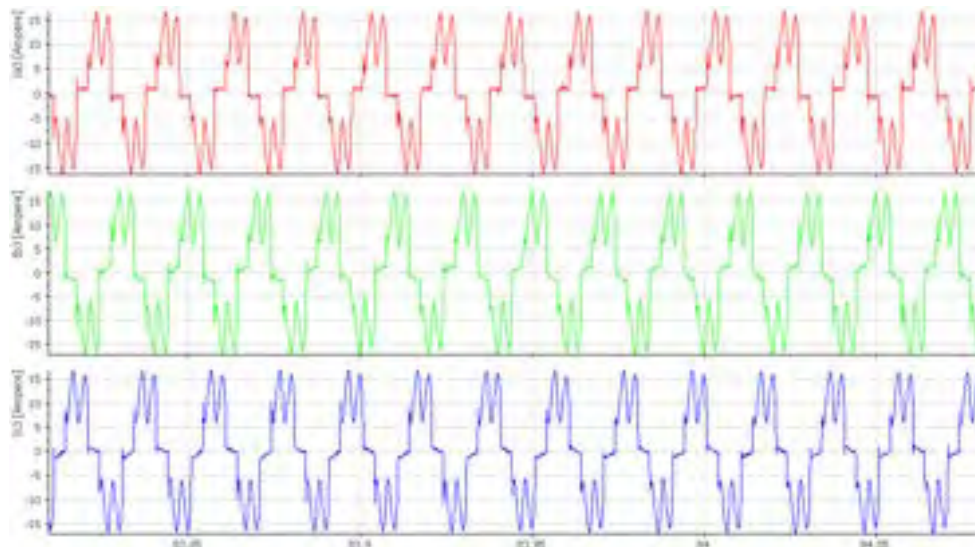


Figura 15 – Dettaglio delle correnti sul primario

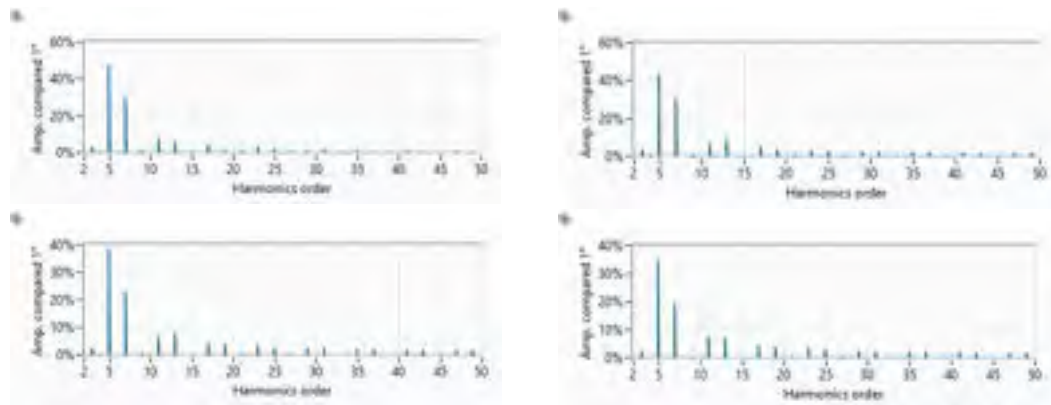


Figura 16 – Analisi armonica delle correnti sul primario

La Fig.16 mostra un'analisi del contenuto armonico delle correnti di alimentazione misurato per una delle fasi che ha evidenziato un THD sempre superiore al 40% per ognuno dei test eseguiti. Tale risultato è dovuto, principalmente, alle ampiezze molto rilevanti delle armoniche di ordine 5 e 7. Per quanto concerne invece il rendimento elettrico, questo si può ottenere dal rapporto integrale della potenza utile in uscita rispetto alla potenza assorbita nell'intero intervallo di saldatura. I risultati delle misure, al variare della potenza laser impostata, sono riassunti in Tabella 8. I valori di rendimento elettrico rilevati risultano, a conferma di quanto noto in letteratura, risultano sensibilmente limitati.

	Potenza impostata (W)	Potenza ingresso (W)	Potenza uscita (W)	Rendimento
Prova 1	500	3654	500	0,138
Prova 2	1000	5448	1000	0,182
Prova 3	1500	7210	1500	0,206
Prova 4	2000	9066	2000	0,218

Tabella 8 – Analisi della Saldatrice Laser IPG YLS 2000

4.1.2 SALDATRICE TRUDISK 4002 TRUMPF [Teseo-Università di Salerno]

Modalità funzionamento	Onda continua (CW) o modulata
Campo potenza regolabile	80 W – 4000 W
Potenza laser sul pezzo	4000 W
Tensione alimentazione	Trifase, 400 V
Prodotto caratteristico (BPP)	8 mm·mrad

Tabella 9 - Specifiche tecniche saldatrice TruDisk 4002 TRUMPF

La sessione di misure sul processo di saldatura vero e proprio è stata preceduta da un'analisi dell'efficienza energetica della macchina valutando la potenza utile in uscita a valle della testa di focalizzazione mediante metodo calorimetrico (PRIMES PM48). I test eseguiti, con l'obiettivo di monitorare le prestazioni energetiche

della macchina in funzione del valore di potenza in uscita impostato, sono consistiti nell'aumentare gradualmente il tale parametro (da 500 W fino a 4000 W, con un passo di 500 W). Ogni test ha avuto una durata di 20 secondi (Fig.17).

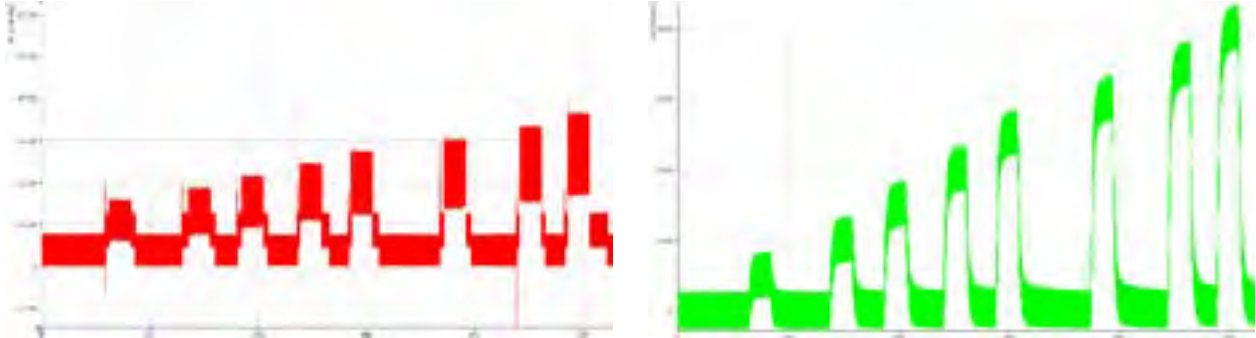


Figura 17 - Potenza utile in uscita e assorbimenti corrente negli otto test



Figura 18 – TruDisk 4002 TRUMPF

In tabella 10 sono riassunti i valori ottenuti dalla misura che mostrano i valori di potenza apparente e attiva al variare della potenza impostata in uscita dal laser.

	Potenza impostata (W)	Potenza apparente (VA)	Potenza attiva (W)	Power factor
Prova 1	500	13454	11417	0.85
Prova 2	1000	16172	13730	0.85
Prova 3	1500	18887	16034	0.85
Prova 4	2000	21641	18365	0.85
Prova 5	2500	24358	20666	0.85
Prova 6	3000	27055	22933	0.85
Prova 7	3500	29902	25313	0.85
Prova 8	4000	32764	27718	0.85

Tabella 10 - Analisi della potenza in ingresso TruDisk 4002 TRUMPF

Nelle figure 19 e 20 sono mostrati, rispettivamente, gli andamenti delle tre correnti di fase che alimentano il primario della macchina saldatrice al variare della potenza di uscita impostata e un loro dettaglio.

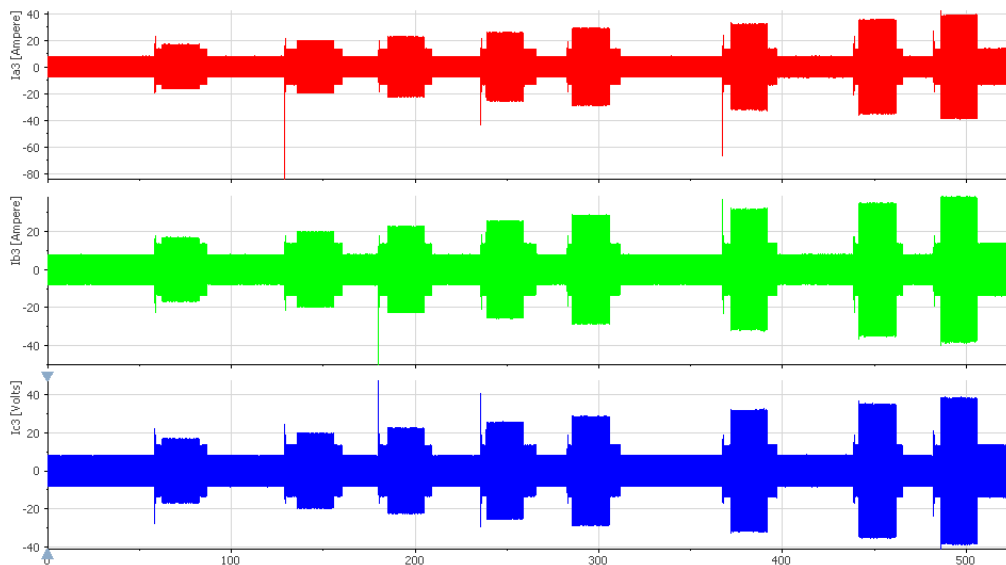


Figura 19 – Assorbimenti corrente lato rete alimentazione TruDisk 4002

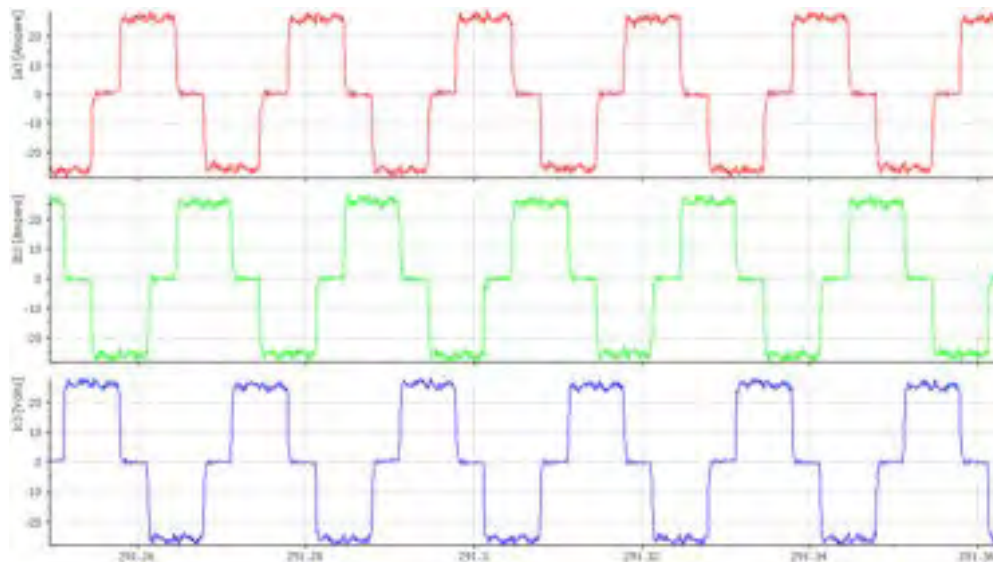


Figura 20 – Dettaglio delle correnti sul primario

Dopo aver individuato i valori efficaci di corrente assorbita sul primario in funzione della potenza laser è interessante analizzare il contenuto armonico delle fasi di corrente su 4 diverse prove (test 1,4,6 e 8). Si nota come, al variare del valore di potenza di uscita impostato, non vi sia un apprezzabile variazione del contenuto armonico delle correnti. Si può notare come le armoniche con un'ampiezza maggiore (20% rispetto la fondamentale) siano quelle di ordine 5 e 7 che contribuiscono ad un valore di THD che si mantiene costante intorno al 27% nei diversi test presi in esame (Fig. 21).

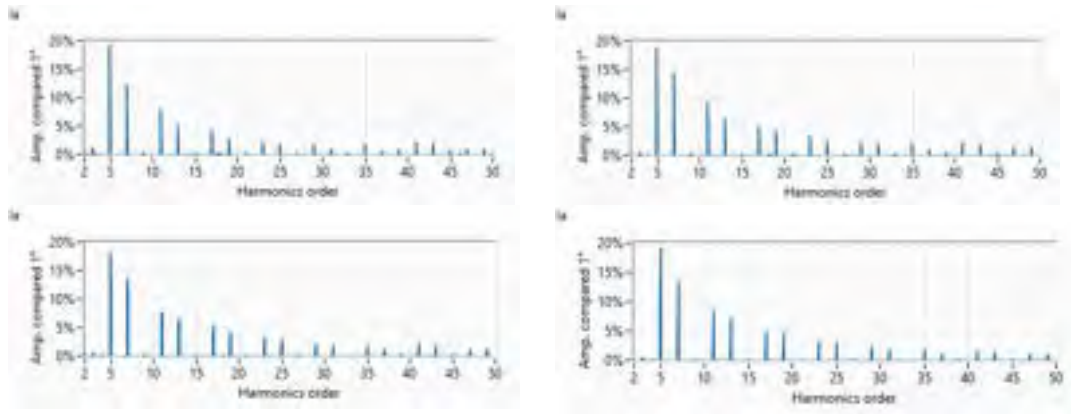


Fig. 21 – Analisi del contenuto armonico delle correnti nei test 1,4,6 e 8

Per quanto concerne invece il rendimento elettrico viene valutato come un rapporto integrale tra la potenza utile e quella assorbita dalla macchina e i risultati sono riassunti nella seguente tabella 11 dove si può osservare come, in generale, tale rendimento si mantenga su valori sensibilmente modesti soprattutto a bassi regimi.

	P_ingresso (W)	P_uscita (W)	Rendimento
Prova 1	11774	500	0,041
Prova 4	18948	2000	0,106
Prova 8	28773	4000	0,138

Tabella 11 – Calcolo del rendimento elettrico date le potenze in ingresso e uscita

4.1.3 SALDATRICE TRUDISK 4002 TRUMPF: Prova Saldatura

Il test è stato effettuato su un materiale acciaiolo inossidabile. I diversi parametri di saldatura e di controllo del sistema laser sono riportati in Tabella 12:

Spessore lastra acciaio inox	4 mm
Inclinazione fascio laser	4 °
Velocità di avanzamento	17 mm/s
Potenza laser impostata	3000 W

Tabella 12 – Parametri di saldatura a disco realizzata

Obiettivo principale del test è stato quello di monitorare il flusso d’aria (tramite flussimetro SMC) durante l’operazione di saldatura e quindi di confrontarlo con l’assorbimento in potenza. Quando la potenza è massima e più o meno costante (saldatura effettiva) la portata d’aria corrisponde a 32 L/min (Fig.22).

	Potenza assorbita (W)	Portata d’aria (L/min)
Saldatura acciaio inox	23694	32

Tabella 13 – Valori di potenza e portata d’aria ottenuti nella prova di saldatura

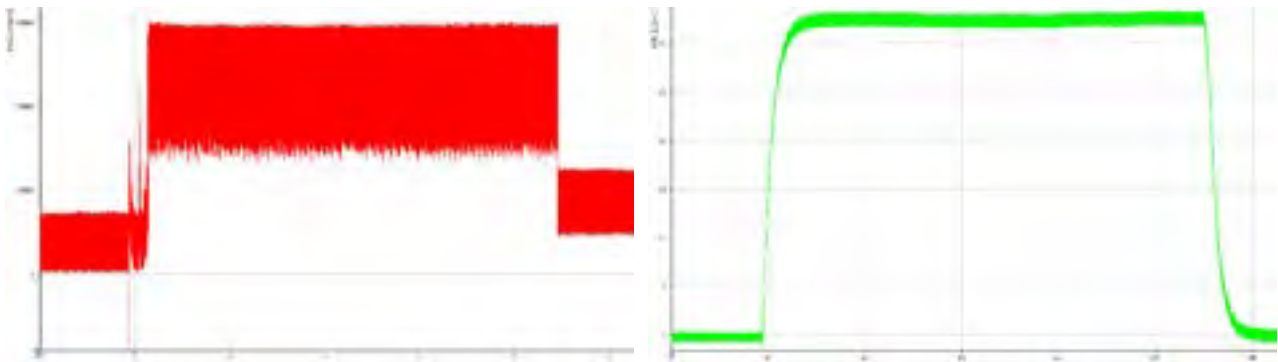


Figura 22 – Potenza in ingresso e flusso d’aria durante l’intera prova di saldatura

4.2 SALDATRICE IPG – YLS 10000 W [ELIOS-Università di Salerno]

La macchina ha un’architettura modulare che consente, entro certi limiti, il potenziamento del laser integrando semplicemente moduli aggiuntivi. Il fascio è accoppiato internamente con una fibra ottica che lo trasporta alla testa di focalizzazione dove è presente un sistema di lenti in grado di concentrare la radiazione sul pezzo da saldare. Le caratteristiche sono riportate in Tabella 14

Modalità funzionamento	Onda continua (CW) o modulata
Frequenza di modulazione	5 kHz
Potenza nominale	10000 W
Campo regolazione potenza	10-105%
Tensione alimentazione	Trifase, 400 V
Prodotto caratteristico (BPP)	8 mm*mrad

Tabella 14 - Specifiche tecniche Saldatrice laser IPG 10000

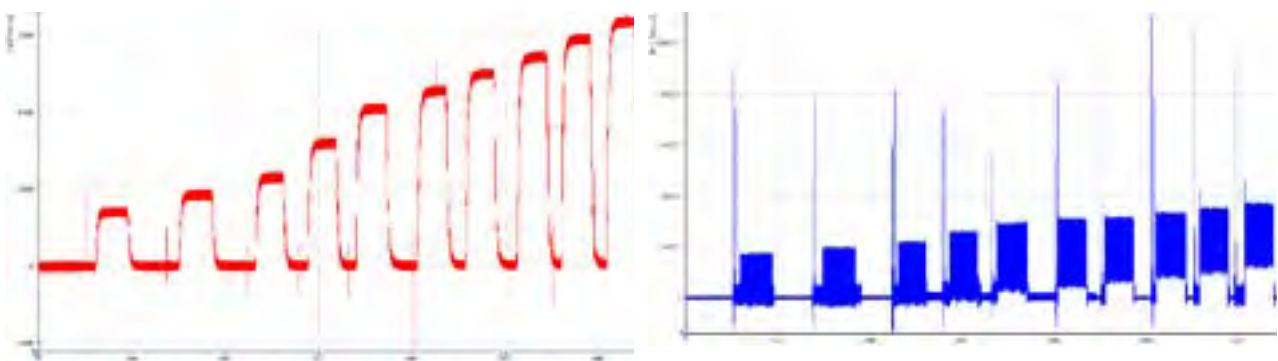


Figura 23 – Analisi rampa di potenza IPG-YLS 10000 W

L’energia non trasformata in fascio laser deve essere continuamente asportata per evitare un surriscaldamento eccessivo del generatore. Il laser è quindi accoppiato con un refrigeratore acqua-aria. L’analisi quantitativa energetica del sistema consiste nella misura dell’assorbimento elettrico da rete (trifase, 400 V, 50 Hz) e dalla misura della potenza utile dopo la testa di focalizzazione. La misura di questa potenza è

effettuata con un metodo calorimetrico. Le prove sperimentali sono state effettuate regolando la potenza utile in uscita da 1500 W fino a 7000W. Nella Figura 23 sono rappresentate le forme d'onda relative alle potenze in ingresso e in uscita al sistema misurate nel corso delle diverse prove. I test sono stati eseguiti monitorando anche gli assorbimenti energetici della macchina di raffreddamento acqua-aria (chiller). Nella Figura 24 è riportata la curva di potenza assorbita da parte del refrigeratore.



Figura 24 - Potenza assorbita dalla macchina e dal chiller nei diversi test

	Potenza impostata (W)	Potenza apparente (VA)	Potenza attiva (W)	Power factor
Prova 1	1500	9038	7980	0.88
Prova 2	2000	11031	9496	0.86
Prova 3	2500	12970	11505	0.89
Prova 4	3500	17453	15433	0.88
Prova 5	4500	21365	18906	0.88
Prova 6	5000	23451	20756	0.89
Prova 7	5500	24493	21509	0.88
Prova 8	6000	26552	23326	0.88
Prova 9	6500	28681	25195	0.88
Prova 10	7000	30844	27161	0.86

Tabella 15 – Analisi della potenza in ingresso per i diversi test

La Tabella appena riportata mostra un ragionevole andamento delle potenze assorbite in funzione della potenza laser in uscita impostata sulla macchina. Il fattore di potenza si attesta ad un valore sufficientemente elevato (nel range 0.86-0.89) indipendentemente dal valore di potenza in uscita impostato.

Nelle figure 25 e 26 sono mostrati, rispettivamente, gli andamenti delle tre correnti di fase che alimentano il primario della macchina saldatrice al variare della potenza di uscita impostata e un loro dettaglio rispettivamente nei test con potenza impostata ai valori di 1500 W e 7000 W.

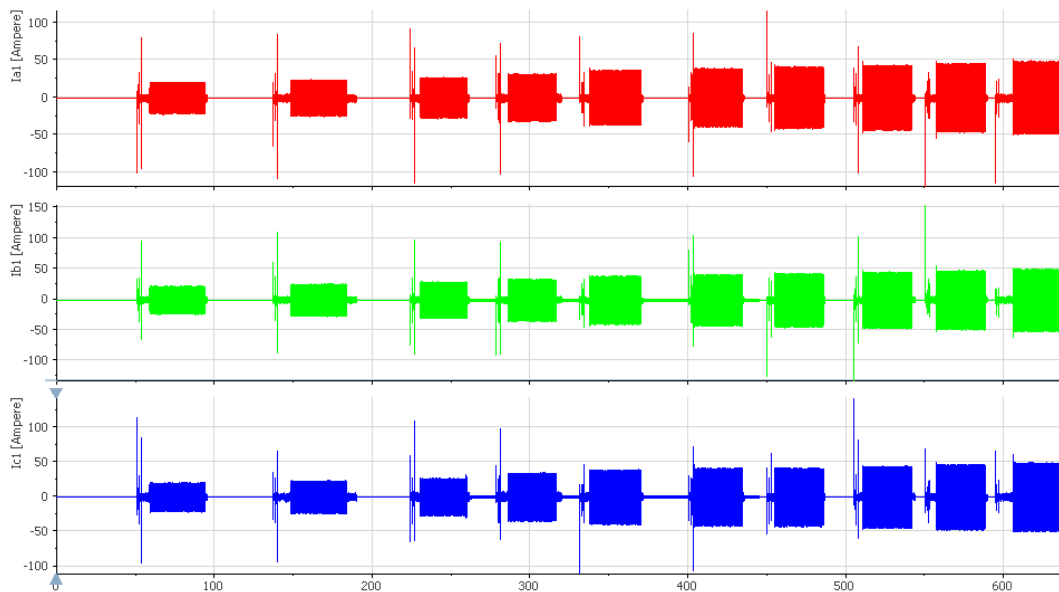


Figura 25 – Corrente sul primario nelle diverse prove

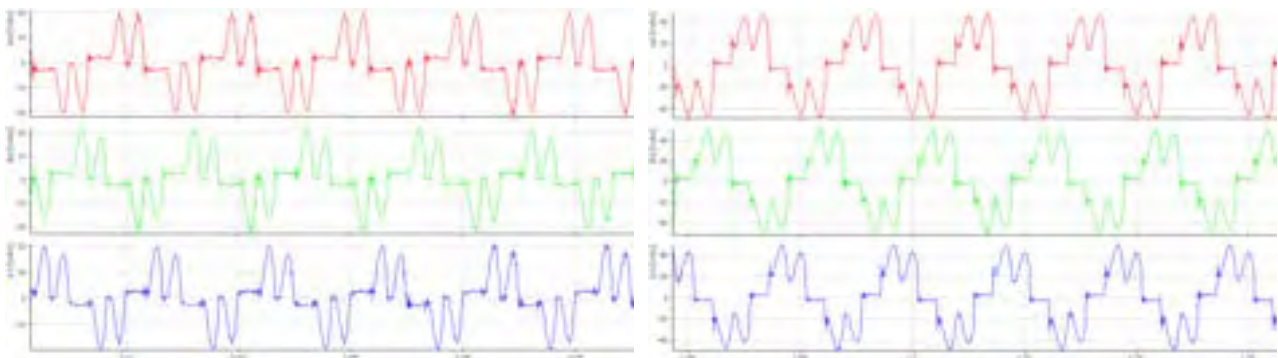


Figura 26 – Dettaglio delle correnti sul primario nei test a 1500 W e 7000 W

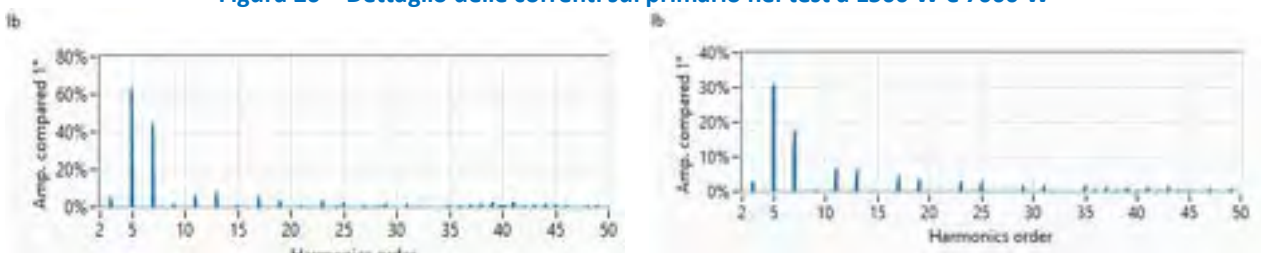


Figura 27 – Analisi armonica correnti sul primario nei test a 1500 W e 7000 W

Nell'analisi armonica delle correnti sul primario della saldatrice (Fig.27) è stato riscontrato, per quello che riguarda il test a bassa potenza (1500 W), un valore calcolato di THD molto elevato (maggiore dell'80%), mentre si raggiungono valori molto più ragionevoli nel test ad alta potenza (7000 W) dove tale valore si abbassa drasticamente al 40%. In entrambi i test rimane da evidenziare un contributo elevato delle armoniche di ordine 5 e 7.

4.2.1 SALDATRICE IPG-YLS 10000 W: Prova Saldatura

. I diversi parametri di saldatura e di controllo del sistema laser sono riportati in Tabella 16:

Spessore lastra acciaio inox	4 mm
Inclinazione fascio laser	4 °
Velocità di avanzamento	1500 mm/min
Potenza laser impostata	3000 W

Tabella 16 – Parametri di saldatura

Il sistema di misura ha monitorato simultaneamente i consumi della macchina saldatrice sulla linea trifase 1 (125 A) e i consumi del chiller di raffreddamento acqua-aria sulla linea trifase 3 (32 A). Inoltre è stato elaborato anche il segnale proveniente dal flussimetro SMC finalizzato a misurare la portata d’aria che ha interessato il processo. Di seguito (Fig. 28) vengono riportate le curve di assorbimento della corrente relative alle tre fasi della saldatura. Si notano dei picchi che si riferiscono alle diverse fasi prima dello sparo del fascio laser, ovvero pompaggio dei diodi ed apertura dell’otturatore, ed un tratto costante relativo al processo di saldatura.

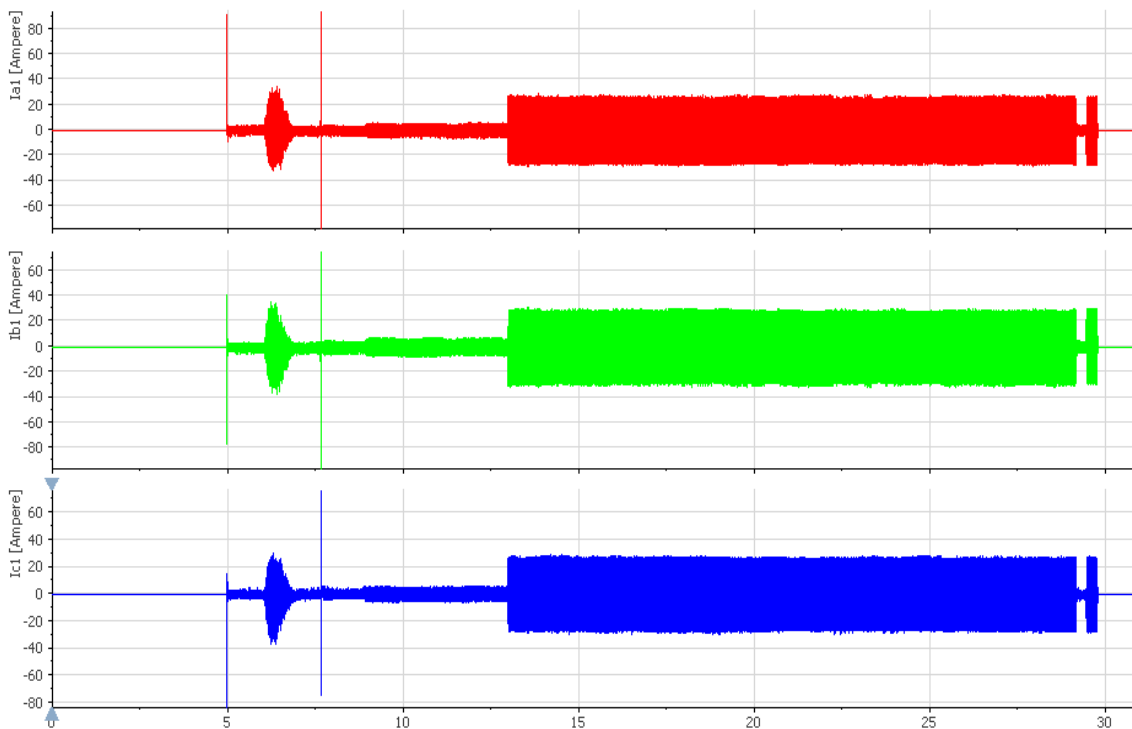


Figura 28 – Andamenti corrente trifase durante tutta la prova di saldatura

Nella Fig.29 sono riportati la potenza assorbita dalla macchina saldatrice e dal chiller di raffreddamento

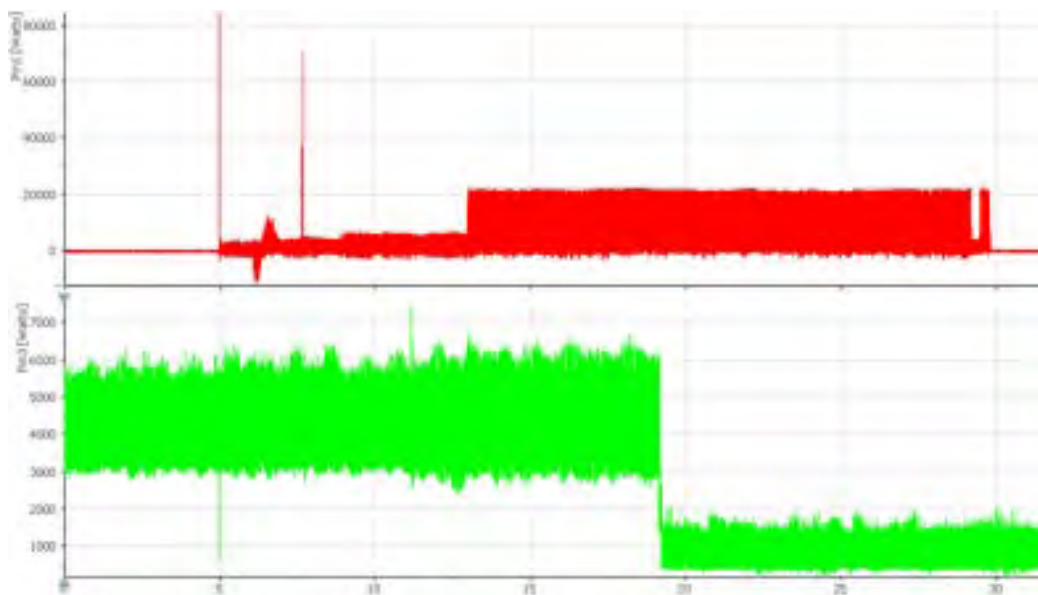


Figura 29 – Potenza in ingresso alla macchina saldatrice e al chiller di raffreddamento

Si notano appunto dei picchi e degli assorbimenti inizialmente bassi durante le fasi di pompaggio diodi e apertura otturatori. L'assorbimento risulta elevato invece durante la saldatura effettiva. Interessante anche l'assorbimento del chiller che lavora quasi a pieno regime nelle fasi iniziali e per un tratto del periodo di saldatura per poi presentare assorbimenti sensibilmente più limitati nell'ultima fase del processo. In Fig. 30 è riportata la curva, ottenuta tramite flussimetro SMC, della portata dell'aria durante tutto il processo di saldatura.

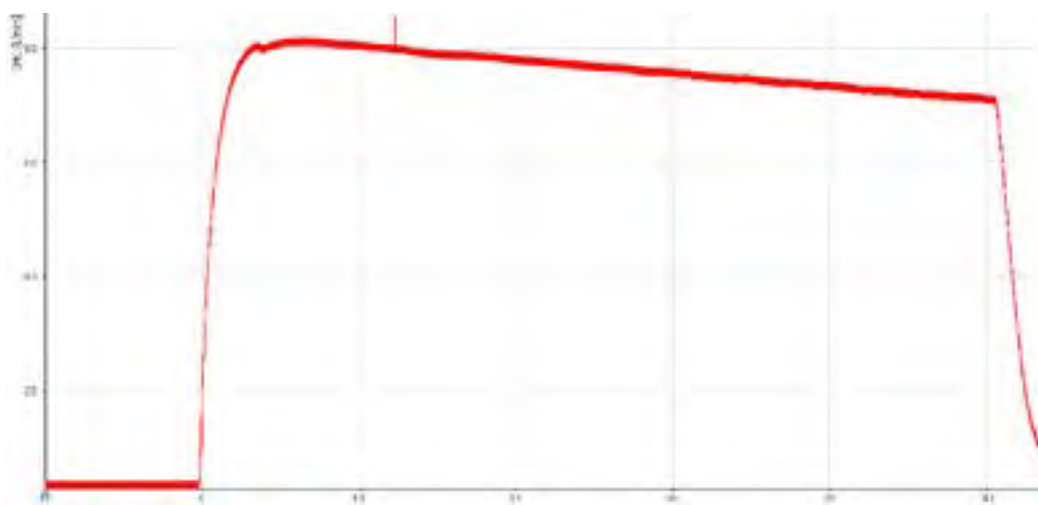


Figura 30 – Portata dell'aria durante il processo di saldatura monitorata tramite flussimetro SMC

4.3 Saldatrici ad arco elettrico

4.3.1 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE LISCIA – [ENEA-C.R. Casaccia]

Ulteriori test sono stati condotti sull'impianto di saldatura TIG NERTAMATIC 450. Tale impianto di saldatura permette l'implementazione di più processi:

- TIG in corrente continua liscia o ad impulso
- TIG in corrente alternata con polarità variabile
- PLASMA a corrente continua liscia o ad impulso

Si tratta di un sistema automatizzato in cui la lunghezza d'arco rimane costante durante tutto il processo. Le prove che si analizzano in questa sezione si riferiscono alla modalità TIG in corrente continua liscia. L'impianto, oltre che dal generatore appena riportato, è composto da una console di saldatura che permette di gestire manualmente il ciclo di saldatura. Un visualizzatore LCD, pulsanti e un codificatore permettono di programmare dei cicli, modificarli nel corso del processo e di visualizzare le misure. Alcune delle caratteristiche tecniche vengono riportate nella Tabella 17:

Corrente di saldatura	3-450 A
Tensione alimentazione	Trifase, 400 V
Circuito arco pilota	7-25 A
Tensione a vuoto	110 V

Tabella 17 – Parametri di saldatura

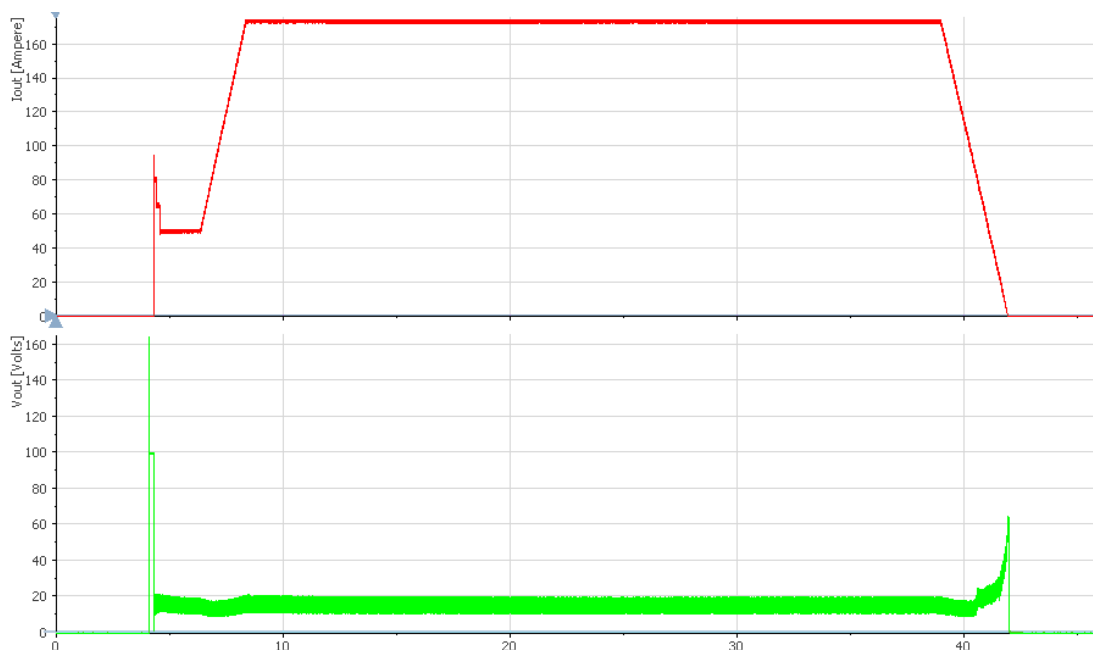


Figura 31 – Tensione(verde) e corrente (rosso) misurata sulla torcia durante il test

In Fig.31 sono riportati le curve, misurate sulla torcia, della tensione e della corrente dell'arco che permettono di individuare le fasi caratterizzanti del processo di saldatura:

- Una prima fase in cui le grandezze assumono valore nullo, corrispondente al momento in cui la torcia è a riposo
- Una seconda fase della durata di millisecondi in cui si ha un picco di tensione e di corrente, corrispondente all'innesco dell'arco (la torcia si avvicina al metallo base)
- Una fase di pre-saldatura caratterizzata da un valore di corrente più basso dell'effettivo valore che prenderà in saldatura
- Una fase in cui tensione e corrente sono più o meno stabili con delle ripercussioni sulla stabilità dell'arco elettrico
- Un'ultima fase in cui la torcia smette di erogare corrente e la tensione tende inizialmente alla tensione a vuoto della macchina per poi diminuire bruscamente fino al valore nullo.

Stesso comportamento può essere riscontrato osservando gli assorbimenti delle correnti sul primario della saldatrice, come si può facilmente osservare in Figura 32.

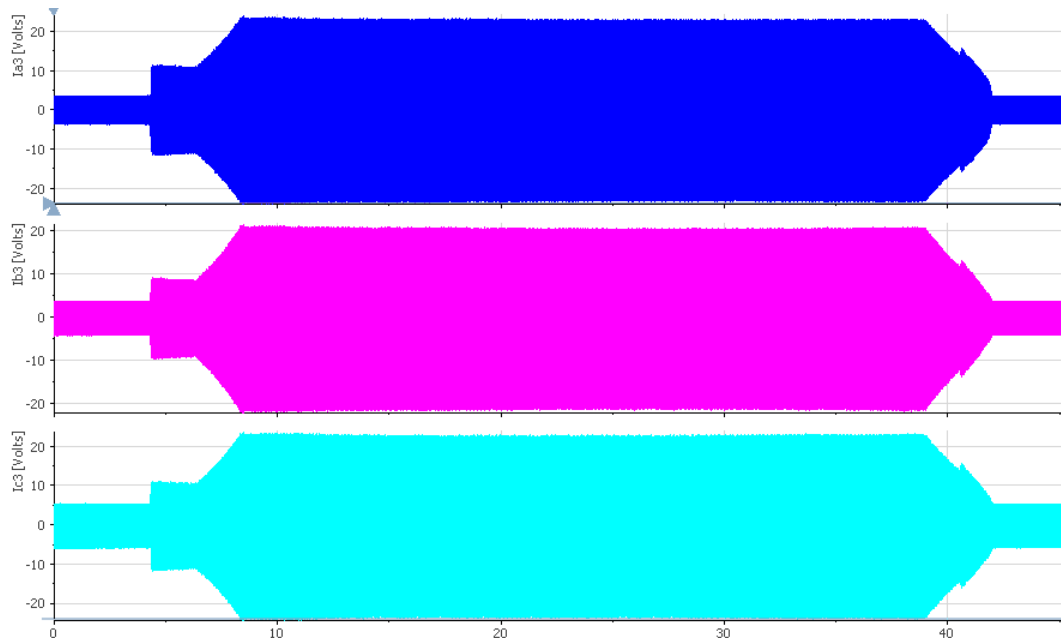


Figura 32 –Corrente sul primario durante il processo di saldatura

Sono stati effettuati 5 test con i parametri di saldatura riportati in tabella 18:

	Corrente pre-saldatura (A)	Corrente saldatura (A)	Velocità di saldatura (mm/min)
Test 1	50	200	6
Test 2	50	175	6
Test 3	50	175	6
Test 4	50	150	6
Test 5	50	150	6

Tabella 18 - Parametri di saldatura nei diversi test

L'obiettivo delle prove è stato quello di monitorare gli assorbimenti energetici sul primario, controllare la stabilità dell'arco elettrico (calcolando quindi la tensione d'arco), e definire fattore di potenza e rendimento elettrico della macchina.

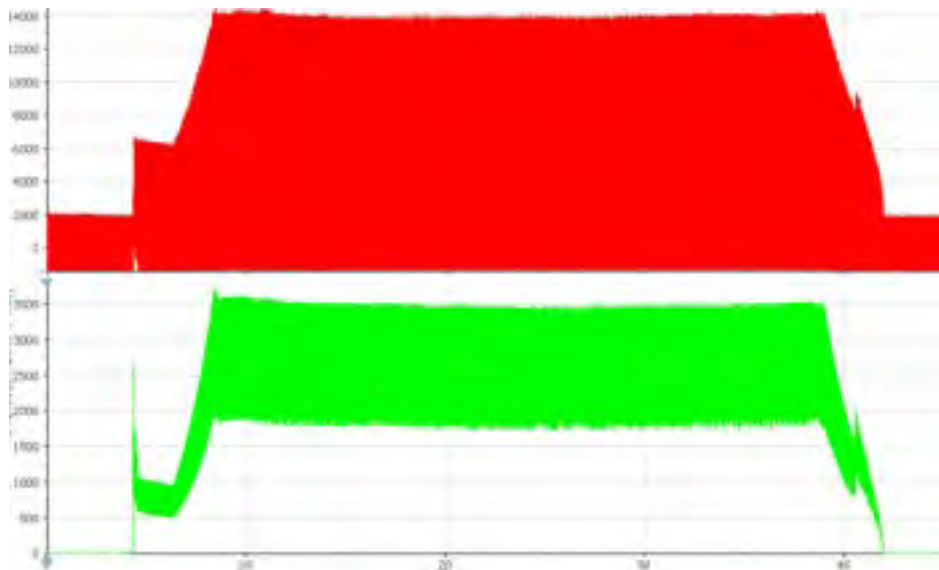


Figura 33 - Assorbimento di potenza e potenza dell'arco elettrico in un test generico

Nella Figura 33 è riportato un esempio di curve in ingresso e in uscita alla macchina utili a riscontrare le fasi del processo sopra esposte. Nella Tabella 19 vengono mostrati i valori della potenza in relazione ai test effettuati. Come si può osservare, la macchina, nei diversi test, presenta un power factor decisamente elevato (0,98) e più o meno costante.

	Corrente saldatura (A)	Potenza apparente (VA)	Potenza attiva (W)	Power Factor
Test 1	200	9468	9360	0.98
Test 2	175	8388	8298	0.98
Test 3	175	9811	9666	0.98
Test 4	150	8572	8500	0.98
Test 5	150	8572	8500	0.98

Tabella 19 - Analisi della potenza in ingresso alla macchina

Per quanto riguarda invece la stabilità dell'arco elettrico si può fare riferimento alla Tabella 20, che riporta la tensione d'arco in funzione della relativa corrente.

	Tensione d'arco elettrico (V)	Corrente d'arco elettrico (A)	Corrente pre-saldatura (A)
Test 1	12	200	50
Test 2	11,6	175	50
Test 3	16	175	50
Test 4	15,4	150	50
Test 5	15,5	150	50

Tabella 20 – Caratteristica dell'arco elettrico

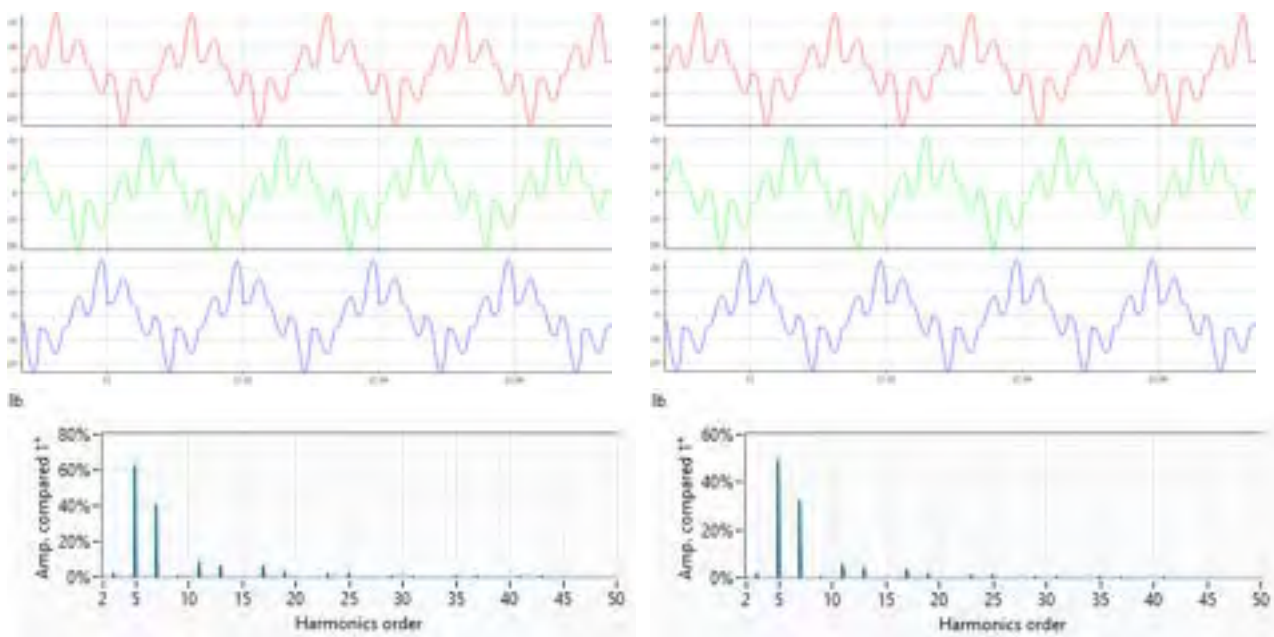


Figura 34 - Forma d'onda e analisi armonica delle correnti sul primario

Le correnti che alimentano il primario della macchina hanno una forma d'onda riportata in Figura 34 dove è mostrato anche il risultato dell'analisi armonica sulle correnti sul primario nei test, rispettivamente, a 200 A e 150 A. Si può notare come i due andamenti siano molto simili; sul contenuto armonico dominano in ampiezza le armoniche di ordine 5 e 7 che arrivano a determinare un THD intorno al 60%.

Per quello che invece riguarda i valori di rendimento elettrico ottenuti, al solito come rapporto integrale tra la potenza istantanea di ingresso e quella di uscita alla macchina saldatrice si ha (Tab.21).

	Corrente saldatura (A)	Potenza ingresso (W)	Potenza uscita (W)	Rendimento
Test 1	200	5840	2260	0,387
Test 2	175	4945	1893	0,382
Test 3	175	6161	2726	0,442
Test 4	150	5166	2279	0,441
Test 5	150	5128	2336	0,456

Tabella 21 - Potenze in ingresso e uscita e calcolo rendimento

4.3.2 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE PULSATA – [ENEA-C.R. Casaccia]

Lo stesso impianto Nertamatic 450 ha permesso di effettuare delle misure di saldatura TIG in regime di corrente continua pulsata. Si è impostato:

- Duty cycle pari al 50% in entrambe le misure
- Frequenza di pulsazione pari a 20 Hz e 100 Hz
- Gas di protezione Argon e corrente di pre-saldatura pari a 50A.

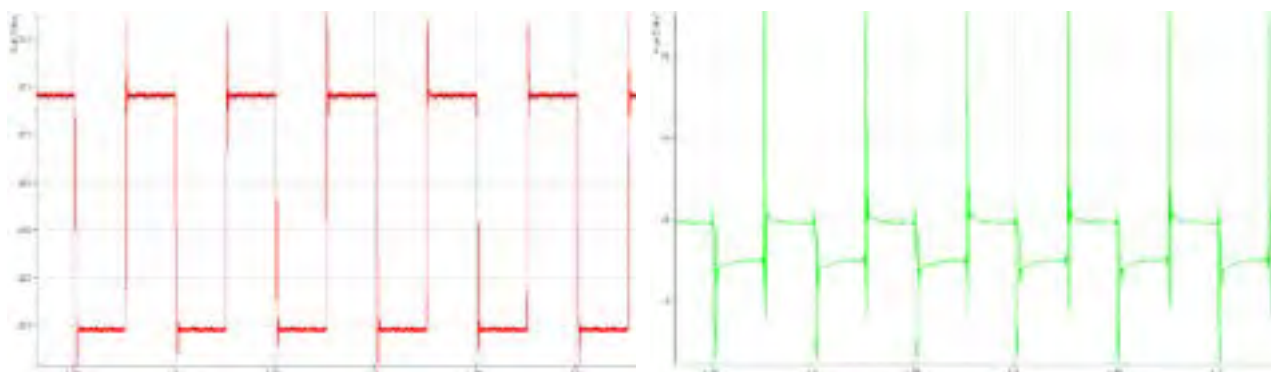


Figura 35 – Tensione e corrente arco elettrico con frequenza pulsazione di 20 Hz

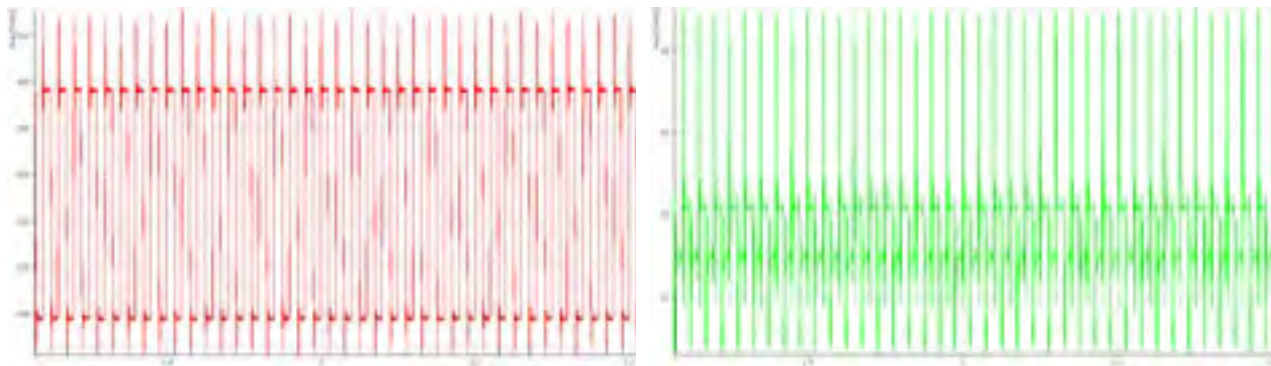


Figura 36 – Tensione e corrente arco elettrico a frequenza di pulsazione di 100 Hz

Come conseguenza diretta di tali andamenti di tensione e corrente, nella Figura 37 si possono visualizzare i valori di potenza misurata sulla torcia a diversa frequenza di pulsazione e caratterizzate dall'aver in comune due livelli differenti a causa del mantenimento della corrente di picco o di base (duty cycle 50%).

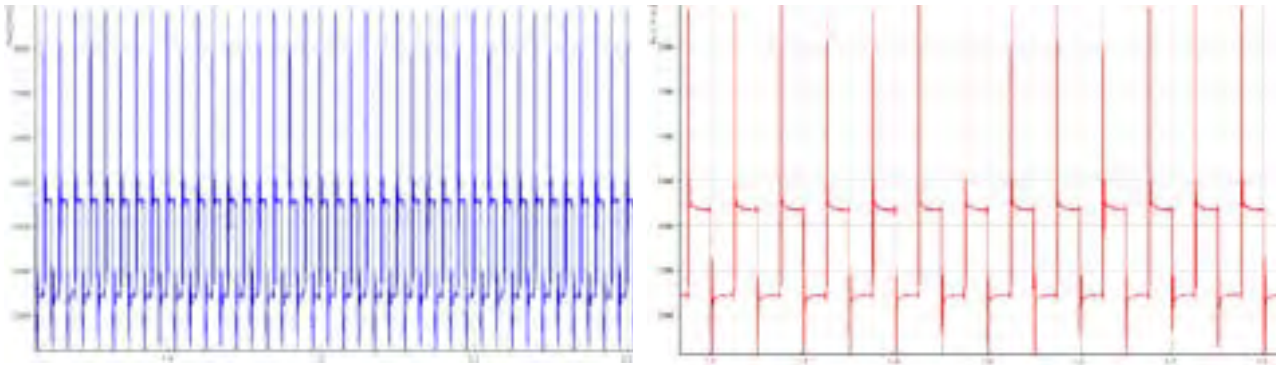


Figura 37 - Potenza arco elettrico nei 2 test a diversa frequenza

Nella Tabella che segue (Tab.22) per ognuno dei test (frequenza di pulsazione di 20 Hz e 100 Hz) sono riportati i valori di tensione dell'arco elettrico e i due livelli di potenza utile alla saldatura.

	Corrente (A)	Tensione (V)	Potenza out (W)
Test 1 (20 Hz)	300-200	15,3-12,7	4400-2500
Test 2 (100Hz)	300-200	15,8-12,4	4450-2460

Tabella 22 - Valori misurati di tensione, corrente e potenza

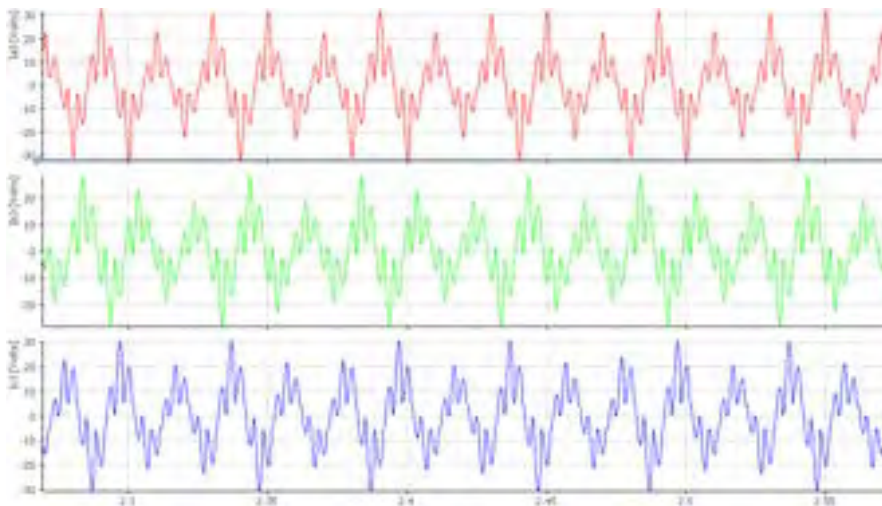


Figura 38 – Dettaglio della corrente sul primario test a 20 Hz

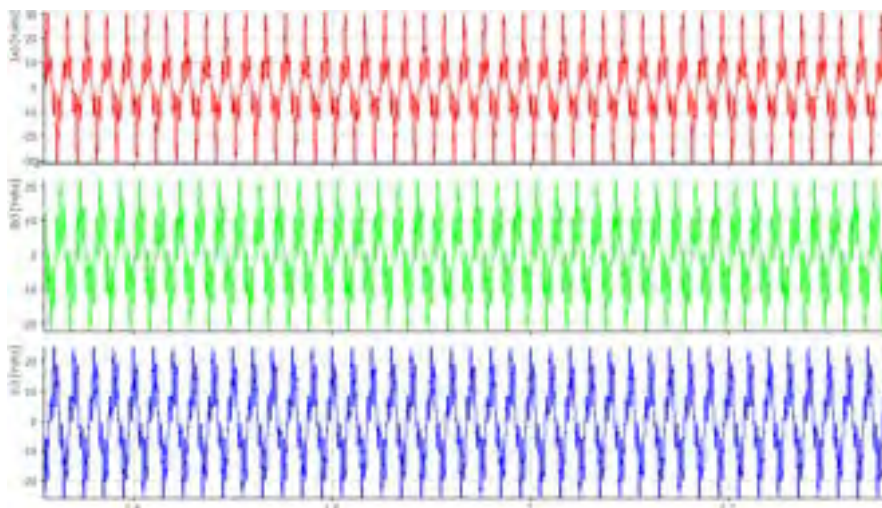


Figura 39 – Dettaglio della corrente sul primario a 100 Hz

Dopo aver visualizzato le forme d'onda delle correnti sul primario dei test effettuati a frequenza diversa è possibile riportare i risultati dell'analisi armonica e del calcolo del THD che risulta pari al 60% in entrambi i test. L'unica differenza che si può riscontrare nell'analisi delle due prove è che nel test effettuato a più bassa frequenza compaiono delle interarmoniche, che invece non si riscontrano nel test a frequenza di pulsazione di 100 Hz (Fig. 40).

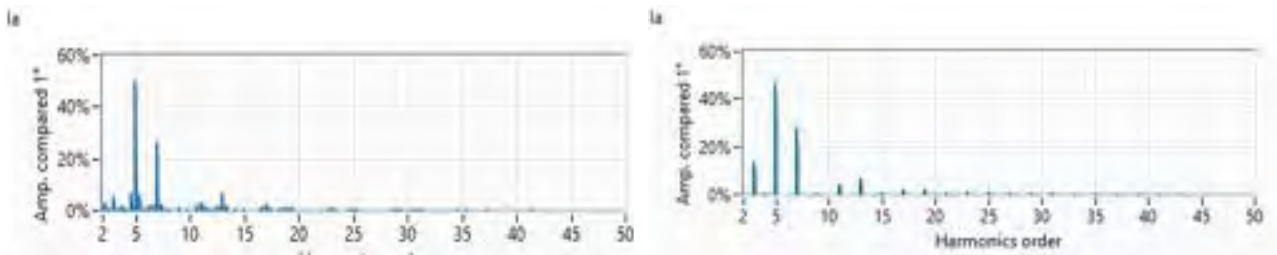


Figura 40 - Analisi contenuto armonico nei 2 test a diversa frequenza di pulsazione

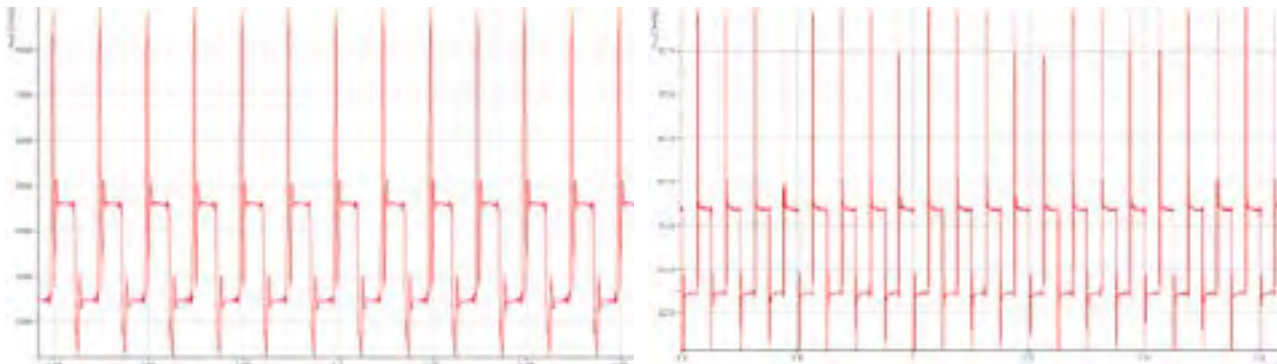


Figura 41 - Potenze assorbite dalla macchina nei 2 test

	Potenza apparente (VA)	Potenza attiva (W)	Power Factor
Test 1 (20 Hz)	12213	11942	0.98
Test 2 (100Hz)	12392	12104	0.98

Tabella 23 - Analisi di potenza

4.3.3 NERTAMATIC 450 MODALITA' TIG CORRENTE ALTERNATA – [ENEA-C.R. Casaccia]

L'impianto NERTAMATIC 450 ha infine permesso di effettuare una misura di saldatura TIG in un regime di corrente alternata con una frequenza di pulsazione pari a 50 Hz e argon come gas protettivo

	Corrente (A)	Fequenza puls.	Duty cycle	Vel.sald.
Test 1	250(+)-200(-)	50 Hz	70%	5 mm/s

Tabella 24 - Parametri di saldatura

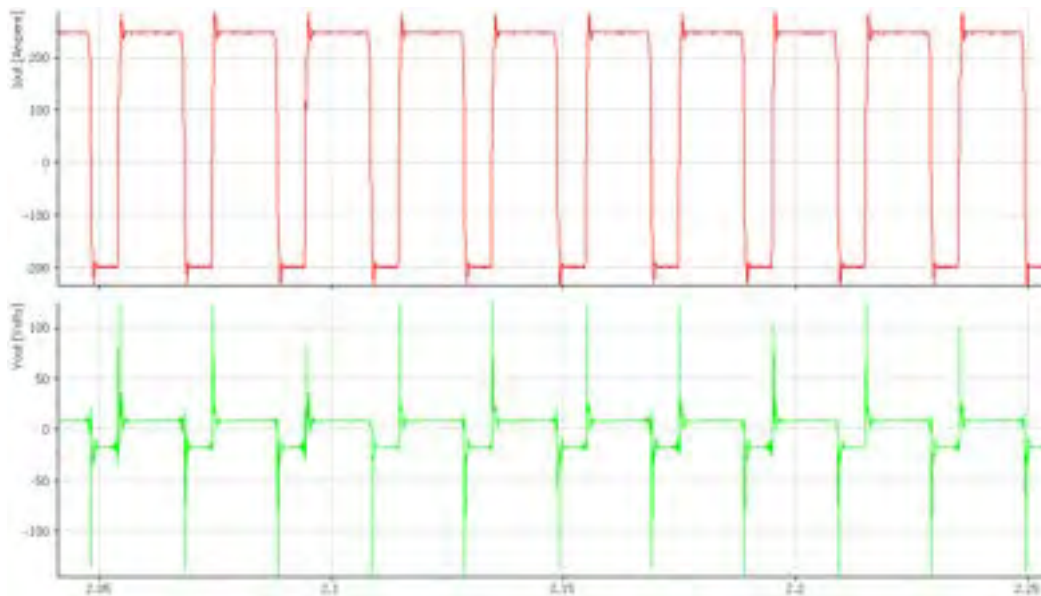


Figura 42 - Corrente e tensione arco elettrico in modalità TIG alternata

Interessante il monitoraggio di tensione e corrente dell'arco elettrico nella modalità di saldatura TIG in corrente alternata. Nella Figura 42 possiamo vedere come la corrente di saldatura sia costante sui +250 A per il 70% del periodo di pulsazione e per il restante 30 % si mantenga su valori di -200 A.

Per quanto riguarda la tensione invece è riscontrabile un re-innesco dell'arco elettrico su ogni periodo di pulsazione:

- La tensione supera i 100 V nell'istante di innesco dell'arco
- Si mantiene stabile sui 10 V in corrispondenza della corrente di picco
- Stabile sui -18 V in corrispondenza della corrente base

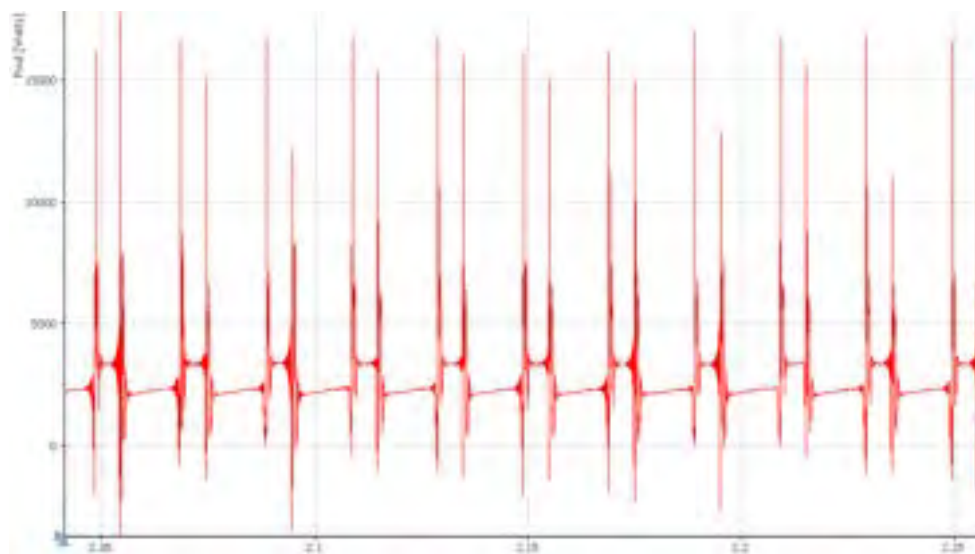


Figura 43 - Andamento della potenza di arco elettrico che inciderà il pezzo da saldare

Nella Figura 43 viene rappresentata la potenza in uscita: come diretta conseguenza degli andamenti di tensione e corrente appena visualizzati, la potenza in analisi assume 2 livelli diversi.

	Corrente sald.	Tensione sald.	Potenza utile
Test 1	+250 A	+ 10 V	3500 W
Test 2	-200 A	- 18 V	2000 W

Tabella 25 – Valori di tensione, corrente e potenza

Per quanto riguarda invece gli assorbimenti energetici sul primario è possibile osservare nelle seguenti figure (Fig.44 e 45) le curve relative alle tre fasi di corrente e alla potenza sul primario della macchina, i cui valori medi sono riportati nella seguente Tabella 26.

	la rms (A)	lb rms (A)	lc rms (A)	Pot. In (W)
Test 1	11,07	10,50	10,97	8266

Tabella 26 - Valori efficaci delle correnti

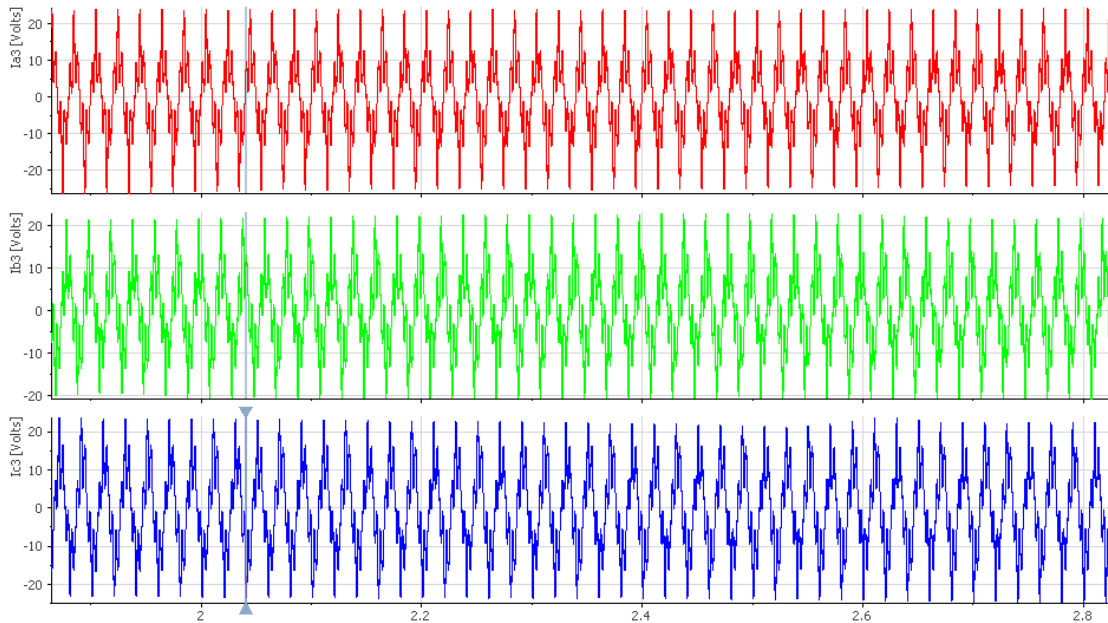


Figura 44 – Corrente sul primario

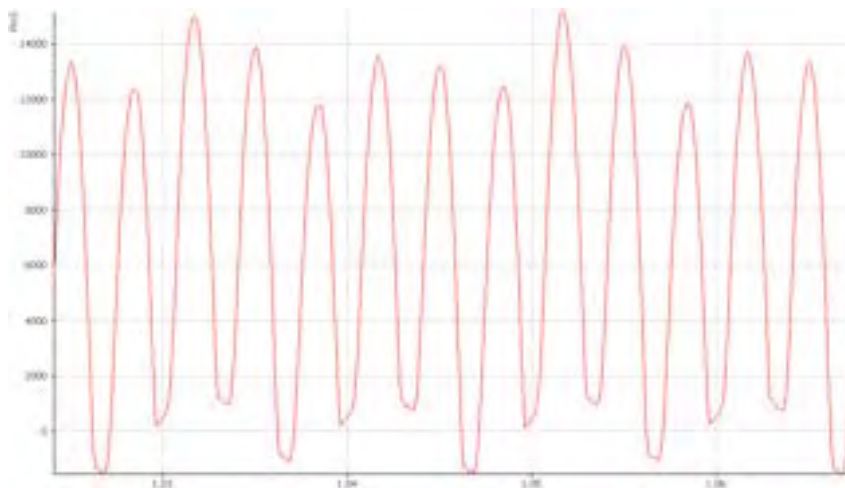


Figura 45 – Dettaglio della potenza in ingresso al primario

In riferimento alla potenza istantanea in ingresso alla macchina sono state calcolate le componenti di potenza attiva ed apparente che hanno portato al calcolo di un fattore di distorsione pari a 0,99.

	Potenza. Attiva (W)	Potenza apparente (VA)	Power factor
Test 1	10362	10516,3	0,99

Tabella 27 - Analisi di potenza e power factor

4.3.4 TRANSTIG FRONIUS 4000 – Azienda WALTER TOSTO Spa - Chieti

Presso la Walter Tosto S.p.A sono stati effettuati test di misura sulla macchina saldatrice TransTig Fronius 4000 (Fig. 46). Si tratta di un alimentatore Tig DC completamente digitalizzato; accanto alle diverse categorie di potenza da 80 a 500 A, i dispositivi variano anche nella loro mobilità, da quello mobile al sistema completo stazionario ad elevata potenza.



Figura 46 – TransTig Fronius 4000



Figura 47 – TransTig Fronius 4000

Le prove di misura sono state effettuate in modalità TIG pulsata su un materiale acciaiolo al carbonio. I parametri del ciclo di lavoro riguardano:

- Corrente di saldatura / Duty cycle = Corrente di picco / 70%
- Frequenza di pulsazione pari a 10 Hz
- Corrente di picco variata tra i 185 e i 250 Ampere
- Corrente di base tenuta più o meno costante sui 50 Ampere

Nella Figura 48 si riportano le curve caratteristiche di una saldatura TIG a corrente pulsata; le curve di tensione e corrente sono caratterizzate da un duty cycle (ciclo di lavoro in cui la corrente assume i due livelli di picco e di base) e da una frequenza di pulsazione costante.

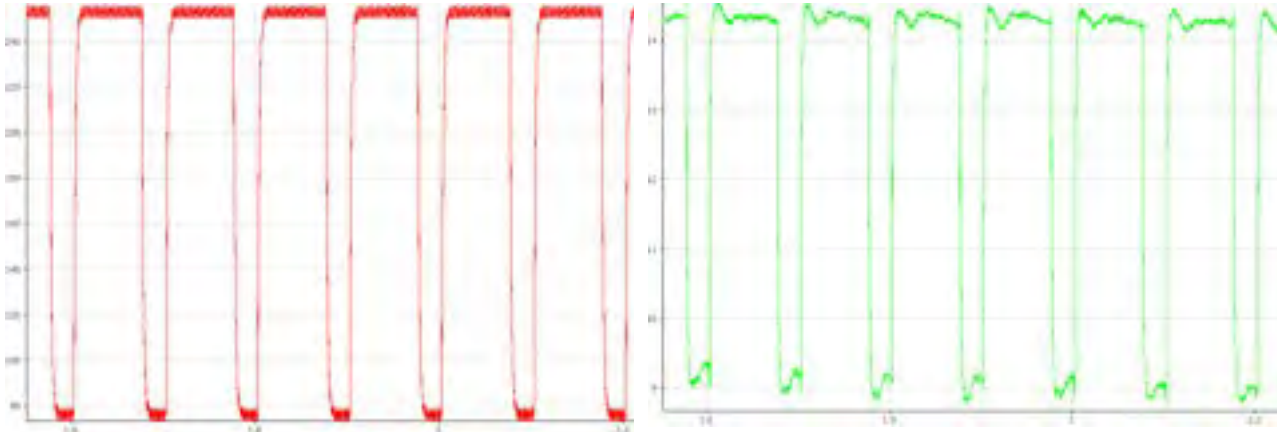


Figura 48 Tensione e corrente arco elettrico in modalità TIG pulsata

Nella Tabella che segue sono riportati i parametri di saldatura relativi ai diversi test eseguiti; ci sono i due livelli di corrente, la percentuale del ciclo di lavoro e la frequenza di pulsazione.

	I_picco (A)	I_base (A)	Duty cycle	Freq. Pulsazione (Hz)
Passata 4	250	80	70%	10
Passata 5	250	80	70%	10
Passata 6	250	80	70%	10
Passata 7	250	80	70%	10
Passata 8	200	60	70%	10
Passata 9	200	60	70%	10
Passata 10	185	55	70%	10

Tabella 27 – Impostazioni di saldatura

Nella Tabella sottostante invece vengono riportati schematicamente i valori medi di potenza apparente e attiva, il power factor e i rendimenti calcolati in funzione dei diversi test.

	Potenza apparente (VA)	Potenza attiva (W)	Power factor	Rendimento
Passata 4	6483,8	5839,3	0,90	0,525
Passata 5	6574,5	5929,2	0,90	0,526
Passata 6	6671,2	6003,9	0,90	0,524
Passata 7	6514,1	5968,8	0,92	0,532
Passata 8	5222,7	4677,9	0,91	0,516
Passata 9	5218,7	4682,5	0,90	0,515
Passata 10	4739,5	4308,6	0,91	0,524

Tabella 28 – Analisi della potenza, power factor e rendimento

Si notano rendimenti elettrici superiori al 50% anche al variare delle condizioni operative e fattori di potenza sostanzialmente insensibili alla variazione della corrente di saldatura e stabili su valori dell'ordine di 0,9. Di seguito si analizzeranno le correnti di alimentazione del primario.

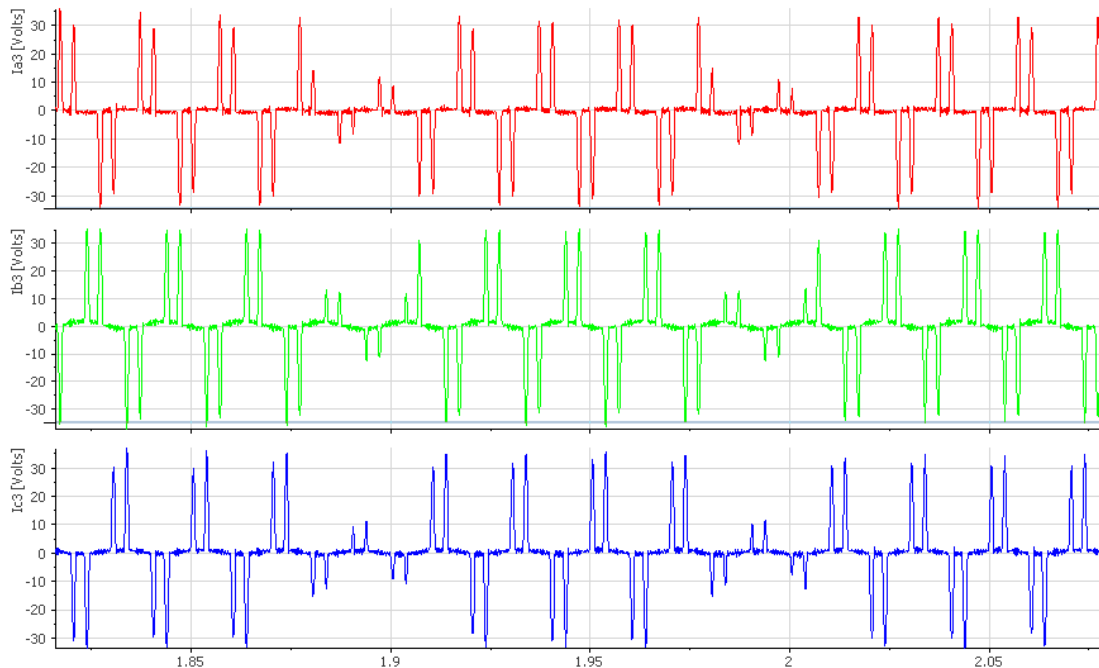


Figura 49 - Forma d'onda delle correnti di alimentazione del primario

Forma d'onda particolarmente interessante quella della corrente in ingresso alla macchina saldatrice; confermata la frequenza di pulsazione impostata a 10 Hz e ben visibile il ciclo di lavoro, caratterizzato dal doppio impulso della corrente di picco e di base. Nella Tabella i valori efficaci delle correnti assorbite dalla macchina in funzione delle correnti di saldatura impostate. Rimangono costanti i parametri relativi al duty cycle e alla frequenza di pulsazione.

	I_sald (A)	I _a rms (A)	I _b rms (A)	I _c rms (A)
Test 4	250-80	9,64	10,58	9,77
Test 8	200-60	8,21	8,73	8,32
Test 10	185-55	7,12	7,48	7,22

Tabella 29 - Valori efficaci di correnti assorbite

Si nota una chiara diminuzione degli assorbimenti al diminuire delle correnti di saldatura. Dopo aver visto quindi le forme d'onda e i valori efficaci si esegue l'analisi del contenuto armonico per ricercare eventuali differenze. Di seguito si riportano i diagrammi del contenuto armonico relativi a due fasi di corrente (comunque rappresentativi dell'intera situazione) per i test 4,8 e 10 in cui appunto si sono variate le condizioni dell'arco elettrico.

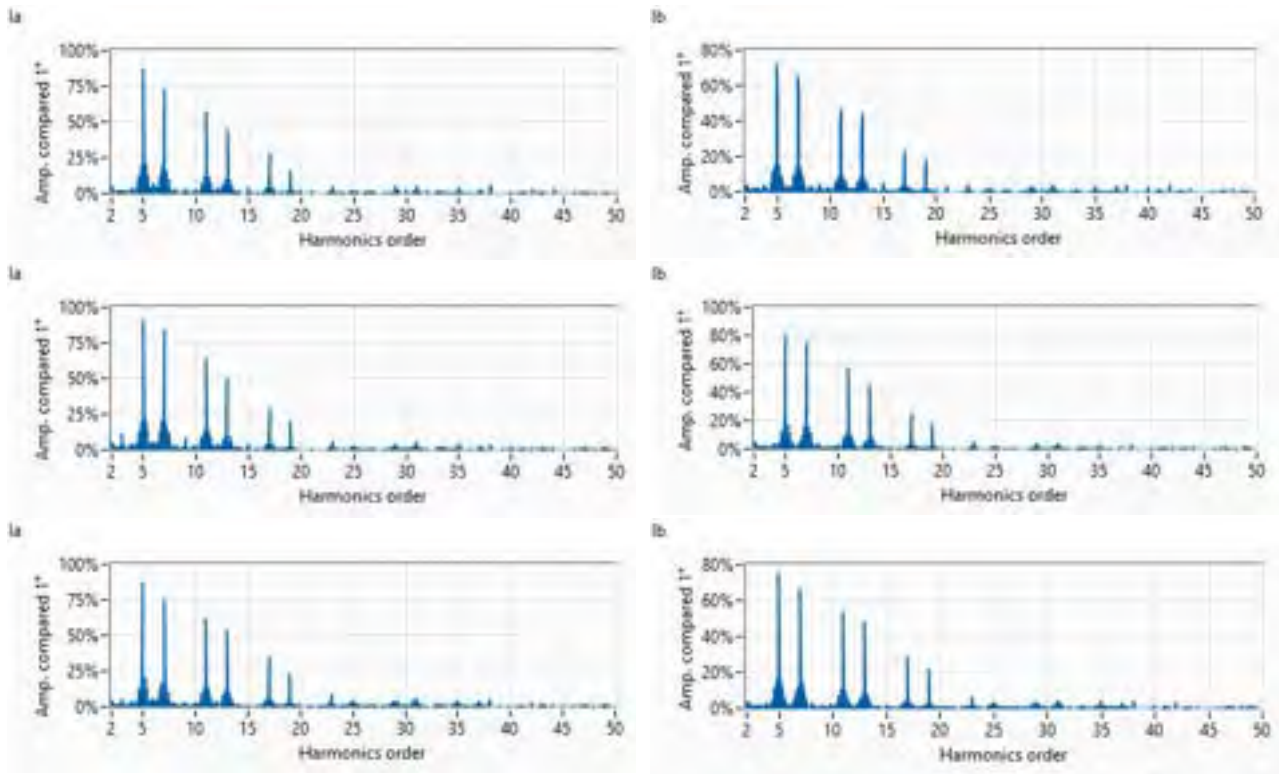


Figura 50 – Analisi del contenuto armonico relativo ai 3 test eseguiti per due delle correnti di fase

Dall’analisi effettuata non si notano differenze rilevanti per quello che riguarda il contenuto armonico in relazione alle diverse correnti di saldatura impostate. I valori del THD sono molto alti (maggiori del 100%) in tutti e tre i casi; notevole l’ampiezza delle armoniche di ordine 5,7,11,13. Presenza di interarmoniche nel circuito.

	P_in rms	P_in media	P_out rms	P_out media
Test 4	9363,2 W	5423 W	3105,3 W	2847,7 W
Test 8	7662,2 W	4444,5 W	2492,8 W	2290,5 W
Test 10	6609,6 W	3879,7 W	2213,4 W	2033,5 W

Tabella 30 - Valori medi ed efficaci di potenze in ingresso e uscita

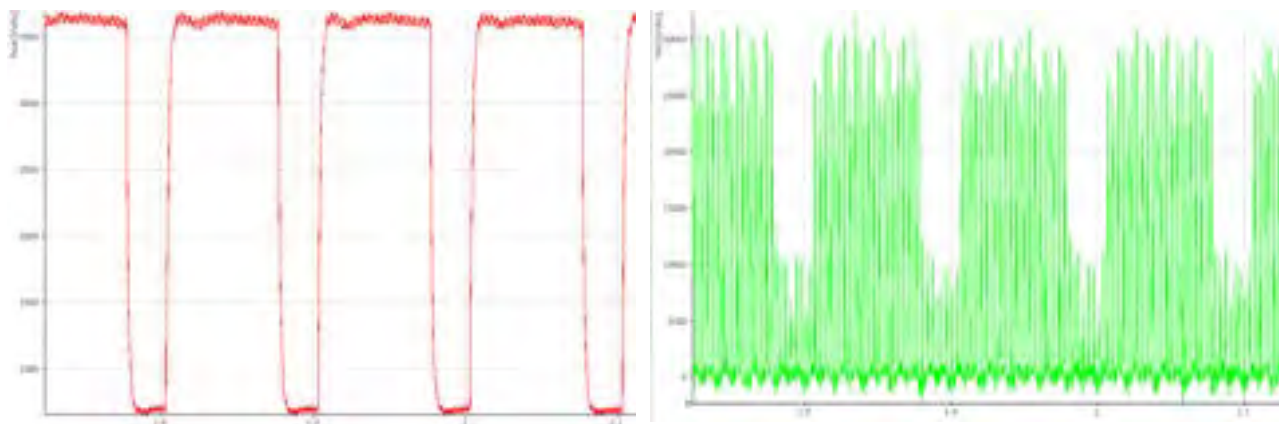


Figura 51 - Potenza in ingresso e in uscita test 4

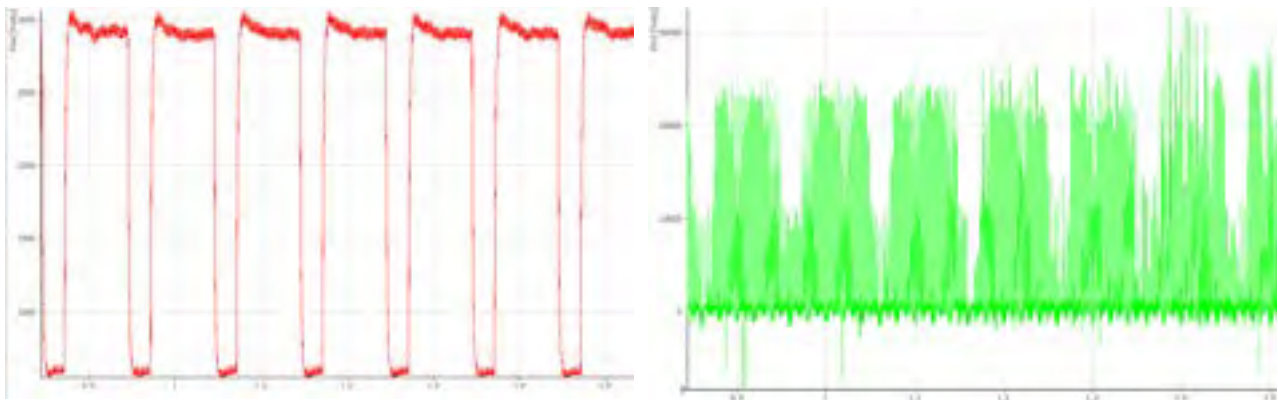


Figura 52 - Potenze in ingresso e uscita test 8

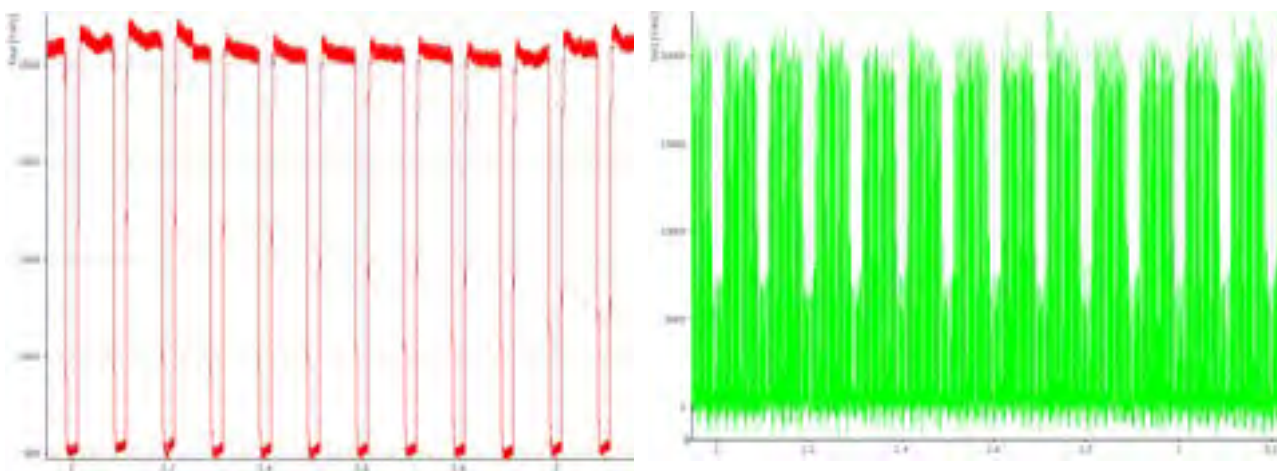


Figura 53 - Potenze in ingresso e uscita test 10

4.3.5 MIG ESAB WARRIOR 400i – Azienda WALTER TOSTO SpA – Chieti

La macchina saldatrice ESAB Warrior 400i permette di realizzare delle saldature multi-processo adatte per operare in GMAW (MIG/MAG), GTAW (TIG) e SMAW (MMA). Eroga fino a 400A con un ciclo di lavoro del 60%. Nella tabella 31 sono riportati alcuni dati tecnici.

Alimentazione trifase	400 V – 50 Hz
Tensione a vuoto	54 V
Consumo a vuoto	120 W
Efficienza a corrente max	86 %
Fattore di potenza a corrente max	0,91

Tabella 31 - Specifiche tecniche MIG ESAB Warrior 400i

I test di misura sono stati effettuati sulla macchina saldatrice in modalità MIG a filo continuo su un acciaio AISI 316, nella tabella 32 sono riportati alcuni parametri di processo utilizzati nelle prove oggetto dei test (velocità del filo, tensione e corrente d'arco).

Velocità filo [m/min]	Corrente [I]	Tensione [V]
3	105	20,00
5	180	20,00
8	210	20,00
10	200	15,50
10	260	28,00
8	230	28,00
5	180	28,00
3	120	28,00
1,5	70	20,00

Tabella 32 - Parametri di saldatura delle diverse prove

Di tutte le prove effettuate si analizzeranno dettagliatamente quelle a corrente impostata rispettivamente più alta e bassa (260 A e 70 A). Ricordando che le prove sono state effettuate manualmente le curve di tensione e corrente risulteranno nettamente diverse da quelle di un processo automatizzato; compariranno infatti dei picchi non periodici corrispondenti al momento in cui è variata la distanza elettrodo-pezzo. Nella Figura 54 Si riportano le curve di corrente sul primario della macchina e un dettaglio di queste relativamente al test effettuato ad amperaggio di saldatura maggiore (260A).

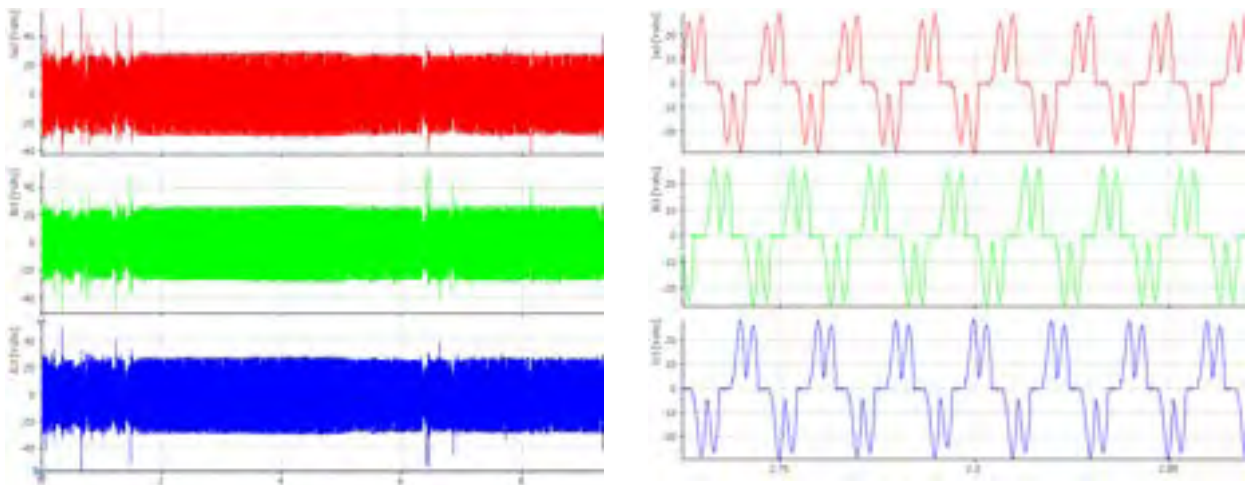


Figura 54 – Corrente sul primario: test a 260A

Dall’analisi dei dati acquisiti si ottiene un valore per la corrente assorbita dalla macchina intorno a 15 A_{rms}. L’analisi del contenuto armonico riportata un’ampiezza significativa per quanto riguarda le armoniche di ordine 5 e 7 che contribuiscono a determinare un valore di THD intorno al 55%.

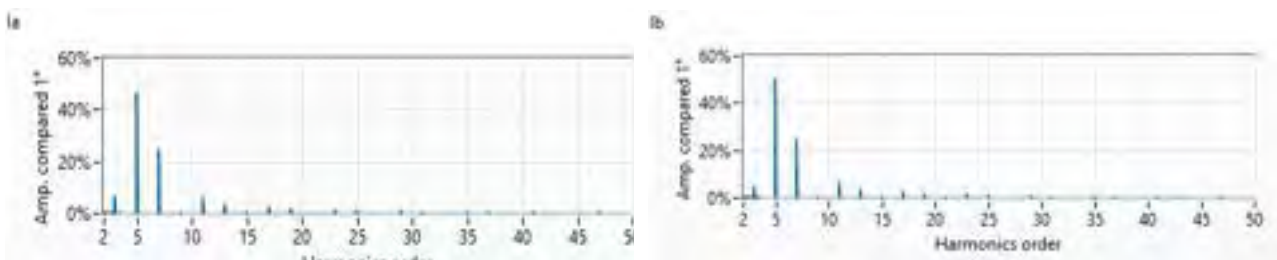


Figura 55 - Analisi del contenuto armonico test a 260A

Per quanto riguarda invece le grandezze in uscita tipiche dell'arco elettrico si possono notare degli andamenti interessanti che sono riportati in Fig. 56.

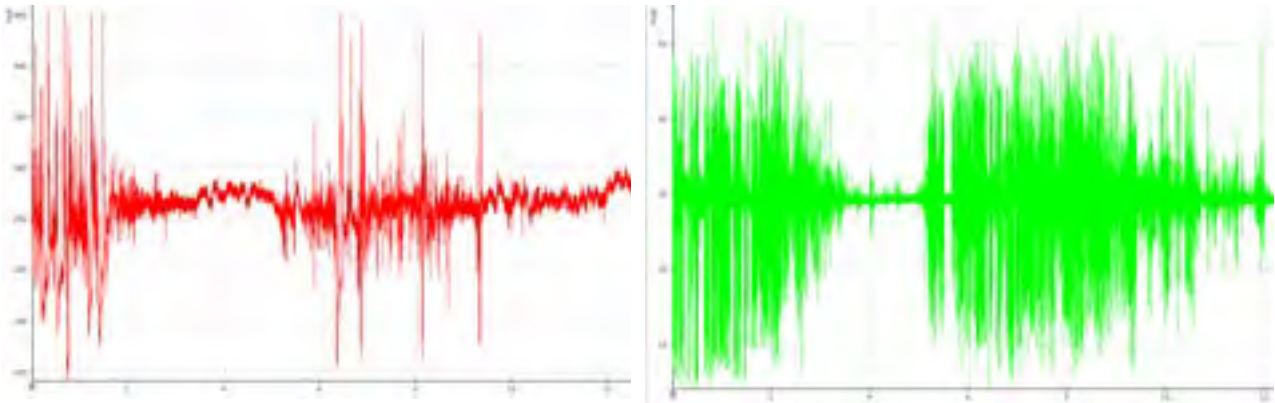


Figura 56 - Tensione e corrente arco elettrico

Di queste forme d'onda sono stati calcolati i valori medi: la corrente in uscita si aggira intorno al valore di 260 A (come da impostazioni della macchina), mentre per quanto riguarda la tensione sono stati misurati valori nell'intorno dei 28 V. Il grafico delle potenze in ingresso e uscita alla macchina sono riportate in Fig. 57 e riassunte in Tabella 33 che riporta i valori medi ed efficaci misurati durante l'operazione di saldatura.

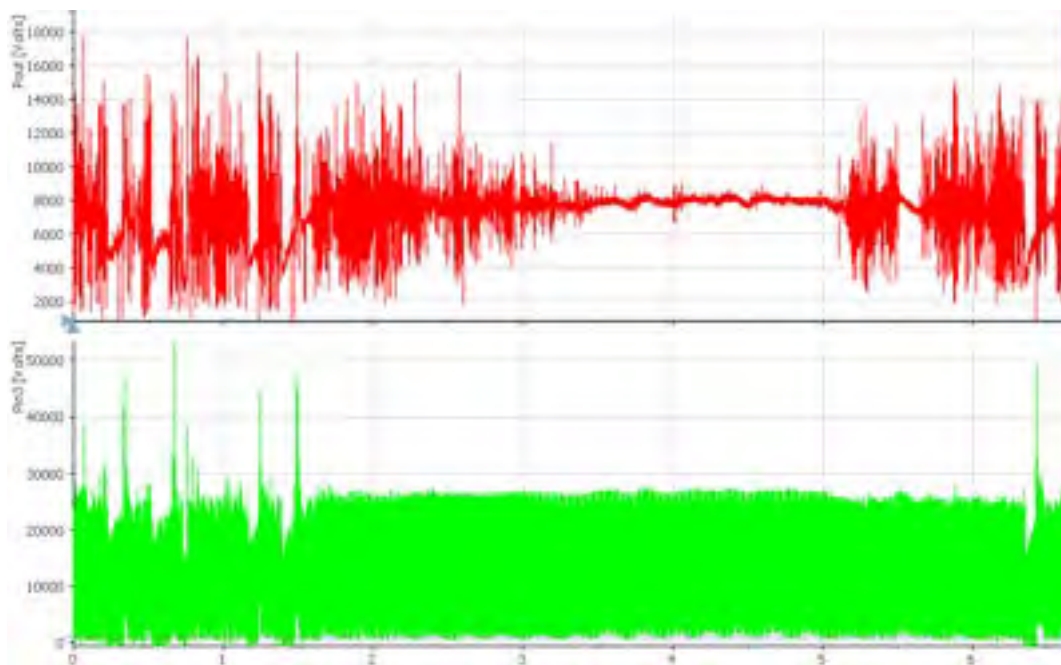


Figura 57 - Curve di potenza in ingresso (verde) e uscita (rosso) della macchina saldatrice

	P_in rms	P_in media	P_out rms	P_out media
Test 260 A	16539,1 W	14570,4 W	7715,1 W	7679 W

Tabella 33 – Valori di potenza in ingresso e in uscita

Sfruttando il rapporto integrale tra la potenza utile alla saldatura (in uscita) e l'energia spesa (potenza assorbita) si è calcolato un rendimento elettrico pari al 0,527.

Per quello che riguarda il test a corrente 70 A, sono mostrati in Fig.58 le curve di corrente in ingresso e un dettaglio di queste. I risultati, in questo caso, sono completamente diversi rispetto al caso, precedentemente analizzato, e relativo al funzionamento a 260A. A fronte di un valore di corrente di saldatura richiesto molto più basso, anche la corrente in ingresso presenta, ovviamente, un valore inferiore (misurato a 4 A_{rms}). Un aumento rilevante si ha invece per il valore del THD che quasi raddoppia raggiungendo un valore di quasi il 100% dovuto principalmente al fatto che le armoniche di ordine 11 e 13 forniscono un contributo maggiore (Fig. 59).

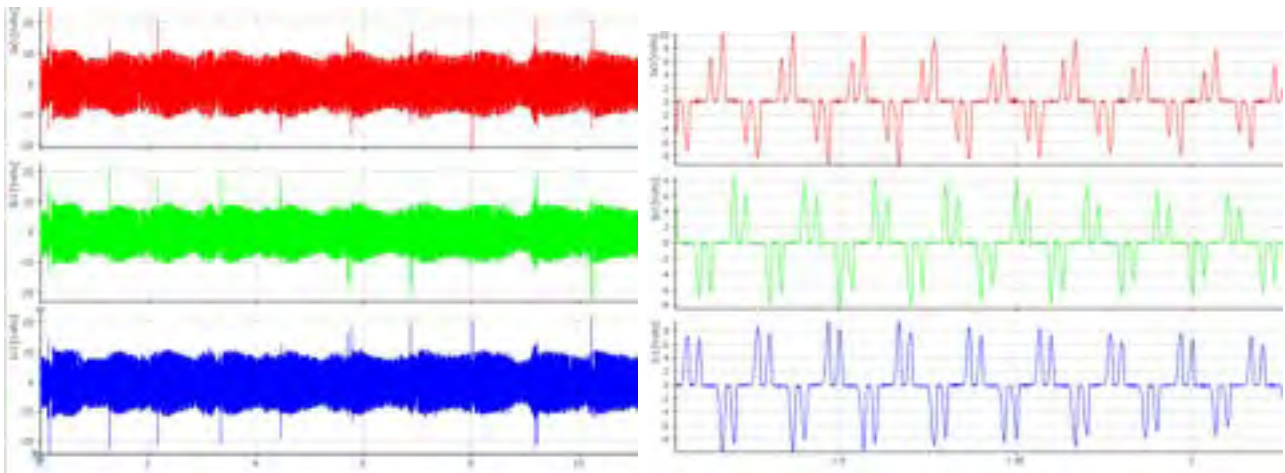


Figura 58 - Assorbimenti corrente sul primario test a 70 A

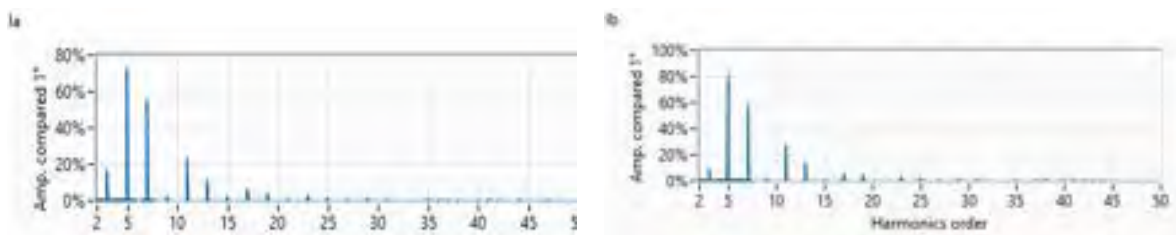


Figura 59 - Analisi armonica correnti lato primario test a 70 A

Focalizzando l'attenzione poi sulle grandezze in uscita, così come fatto precedentemente, si riportano gli andamenti di tensione e corrente d'arco (Fig. 60).

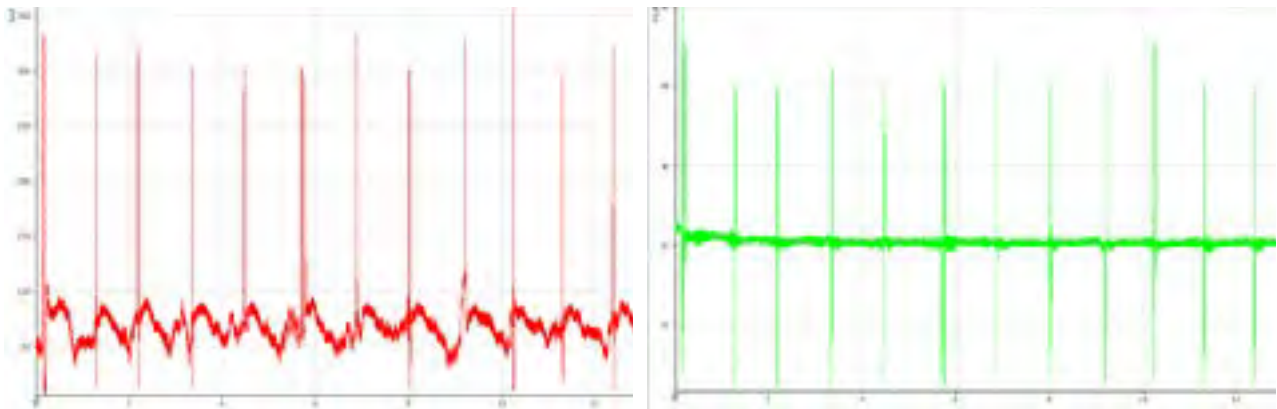


Figura 60 - Tensione e corrente d'arco elettrico test a 70 A

Alla frequenza di 1 Hz si hanno dei picchi di tensione (50 V) e di corrente (maggiori di 300 A) corrispondenti alla fase di re-innesco dell'arco elettrico mentre i valori medi della corrente e della tensione di saldatura risultano rispettivamente pari a 70 A e 20 V. Tali valori determinano una potenza utile di saldatura che rapportata alla potenza in assorbimento restituisce un rendimento elettrico pari al 0,487 (Tab.34).

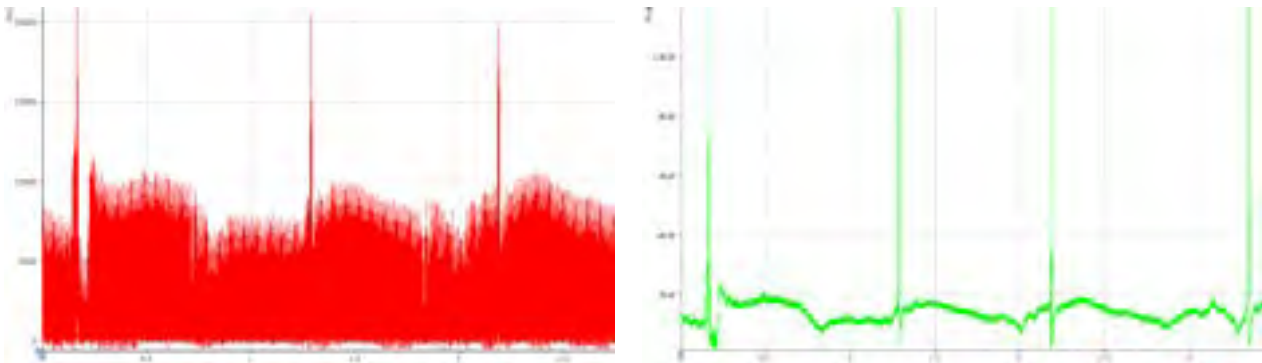


Figura 61 - Potenze in assorbimento e utili alla saldatura

	P_in rms	P_in media	P_out rms	P_out media
Test 70 A	4103,1 W	2885 W	1453,1 W	1405,1 W

Tabella 34 - Valori di potenza in ingresso e in uscita

4.4 Saldatrici per attrito

4.4.1 Macchina FSW – Università degli Studi di Genova



Figura 62 – FSW

L'impianto di saldatura del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Genova (Fig. 62) consiste di due motori elettrici che azionano rispettivamente un mandrino e una tavola vibrante. In questa sezione si analizzerà la qualità della potenza totale in assorbimento alla macchina nelle due fasi di lavoro:

1. Fase di pre-saldatura in cui ruotano mandrino e tavola vibrante
2. Fase di saldatura in cui oltre a ruotare i componenti sopra citati si ha l'affondo della spalla dell'utensile sul materiale base da saldare.

La saldatura FSW è stata effettuata su una lega di alluminio con i seguenti dati:

- Velocità di saldatura (avanzamento utensile) = 260 mm/min
- Velocità di rotazione mandrino = 630 giri/min

Per prima cosa è utile avere un'idea generale in relazione agli assorbimenti di corrente nel processo di saldatura visto nel suo insieme.

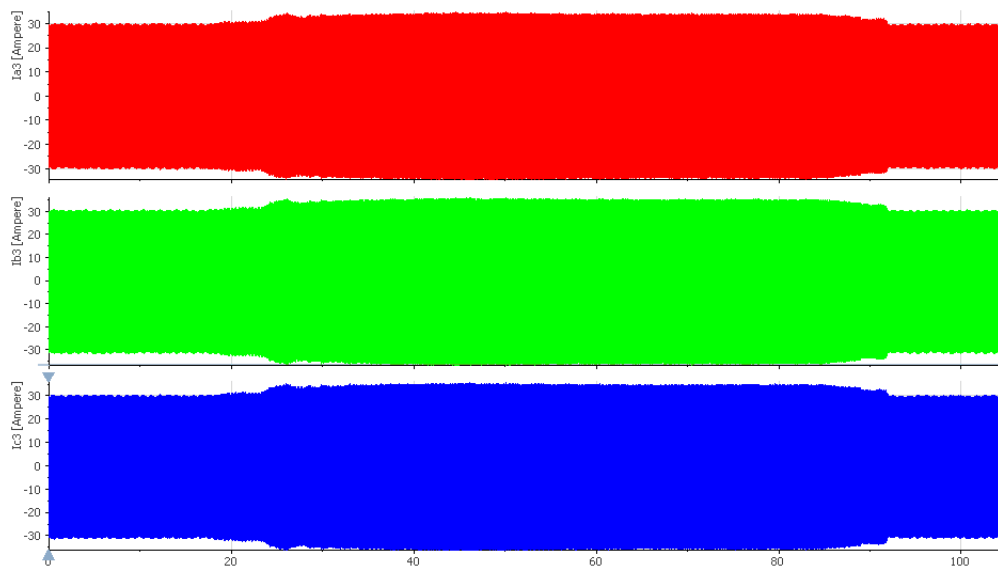


Figura 63 - Andamenti delle fasi di corrente nell'intero processo di saldatura

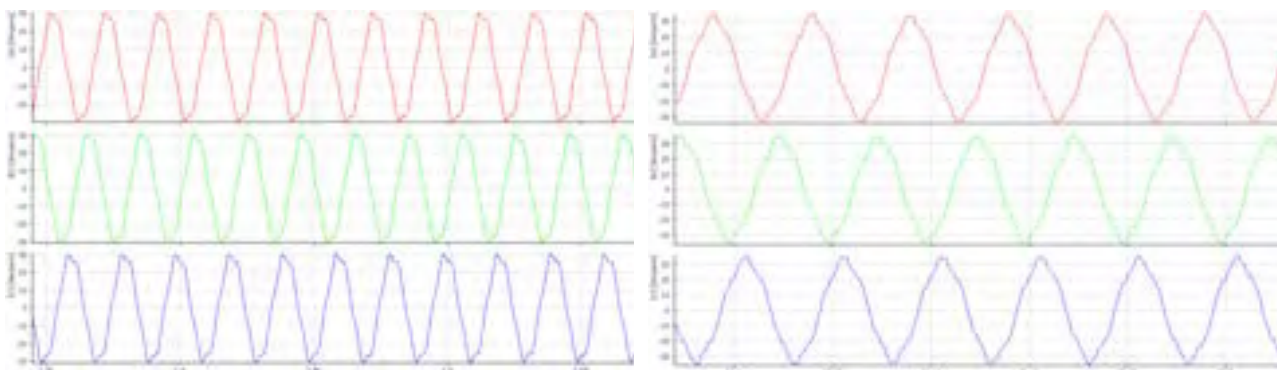


Figura 64 - Forme d'onda corrente trifase nelle 2 fasi di saldatura

L'analisi dei dati misurati ha permesso, in particolare, di calcolare i valori efficaci delle correnti assorbite nelle due fasi di saldatura, come riportato in Tabella 35:

	Ia rms (A)	Ib rms (A)	Ic rms (A)
Fase 1	20,71	21,55	21,09
Fase 2	22,23	23,34	23,01

Tabella 35 - Valori efficaci di correnti assorbite

Tali valori di corrente assorbita piuttosto elevati sono imputabili certamente al fatto che l'impianto di saldatura viene alimentato trifase ad una tensione di 220 V piuttosto che una trifase classica a 380-400 V, come chiaramente mostrato in Figura 65.

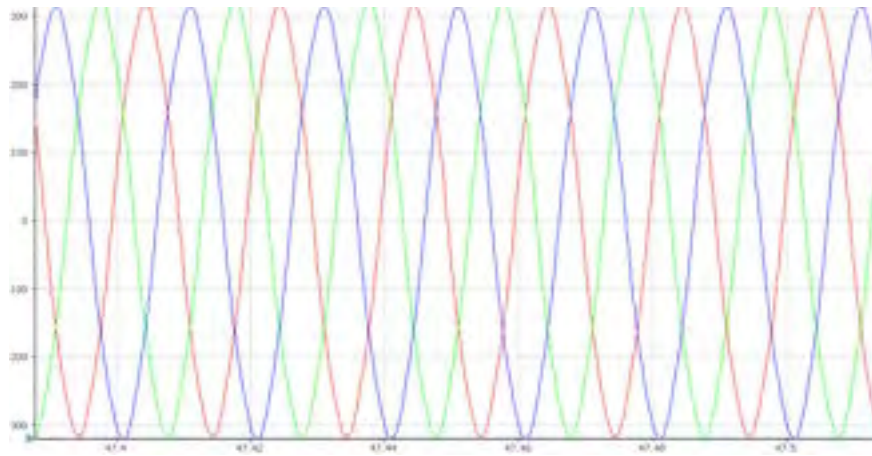


Figura 65 - Tensione di alimentazione trifase 220 V dell'impianto di saldatura

L'analisi delle stesse forme d'onda mostrano un andamento perfettamente sinusoidale in entrambe le situazioni di lavoro; fattore che ha inciso sui diagrammi delle armoniche e sul conseguente calcolo del THD. Dalla Figura 66 è possibile infatti osservare come il THD sia particolarmente basso in entrambe le fasi di saldatura (<8%) e l'unico contributo di ampiezza apprezzabile è fornito dall'armonica di ordine 5 mentre tutte le altre presentano un valore trascurabile ai fini dell'analisi della distorsione.

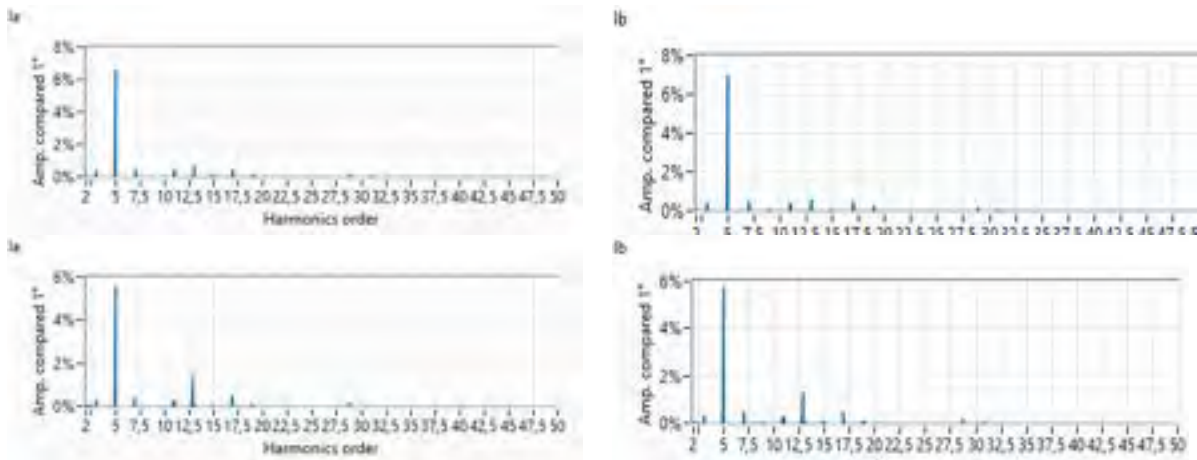


Figura 66 - Analisi armonica delle correnti nelle 2 fasi di saldatura

	THD Ia %	THD Ib %	THD Ic %
Fase 1	7,14	7,56	7,67
Fase 2	6,22	6,46	6,77

Tabella 36 - Fattori di distorsione relativi a due fasi di corrente

Di seguito verrà riportato il diagramma rappresentativo della potenza istantanea in ingresso all'impianto FSW con un andamento apparentemente contro intuitivo; si può notare come l'assorbimento corrispondente alla macchina che sta lavorando sia leggermente più basso di quando la spalla dell'utensile azionata dal mandrino non incide sul pezzo. Rimane comunque un assorbimento piuttosto elevato nella fase di pre-saldatura.

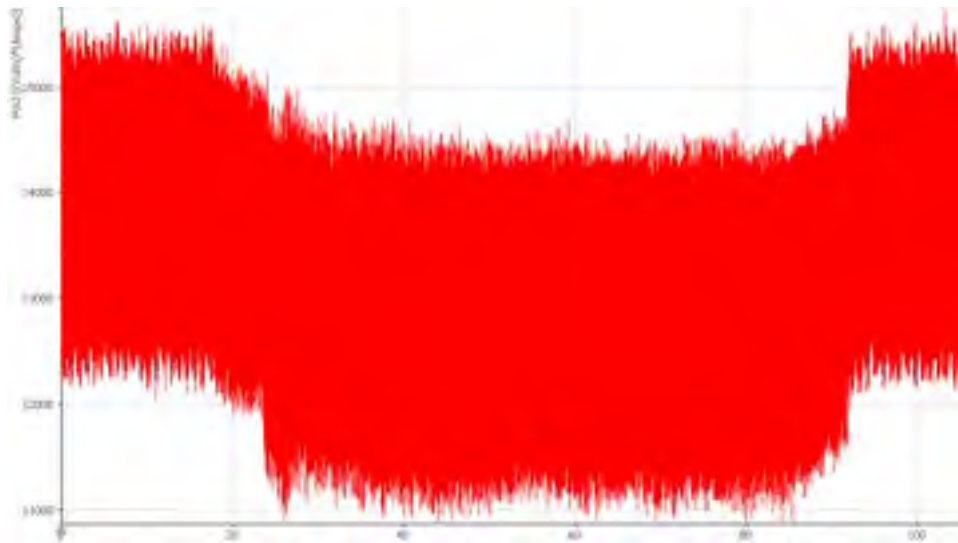


Figura 67 - Andamento della potenza istantanea in ingresso alla macchina

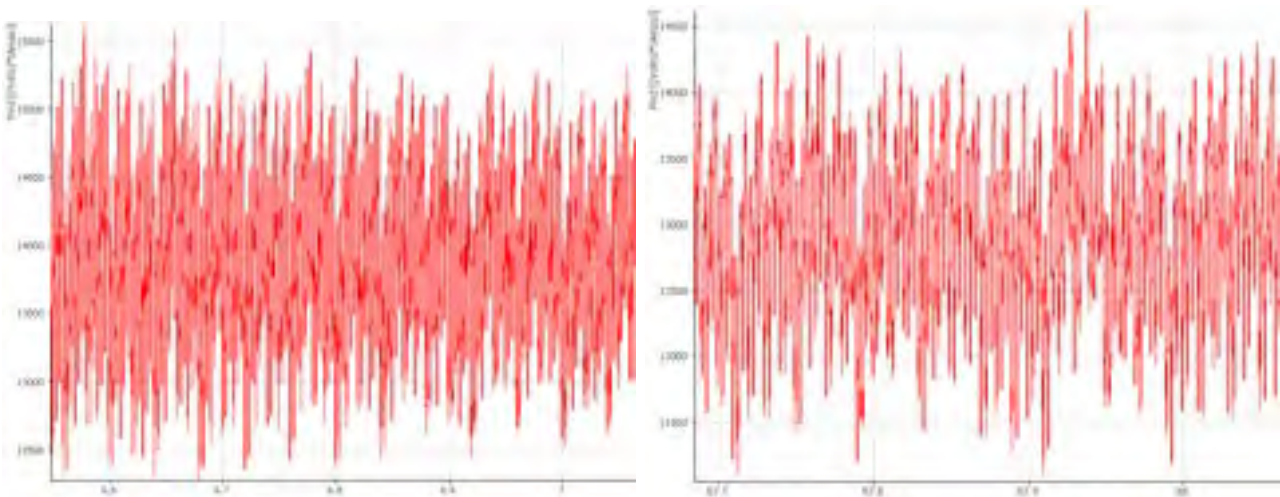


Figura 68 - Dettaglio della potenza istantanea in assorbimento nelle 2 fasi

Dopo aver riportato la curva di potenza di assorbimento in funzione del tempo è possibile osservare un riepilogo dei dati acquisiti nella Tabella 37 in cui si possono visualizzare i valori medi di potenza attiva e apparente calcolati nelle due fasi del processo.

	Potenza Attiva (W)	Potenza apparente (VA)
Fase 1	9498	14209,7
Fase 2	13334,6	15146,8

Tabella 37 – Analisi di potenza

4.4.2 Rambaudi Ram-Mill – Azienda RGM Metalworks SpA – Ovada (AL)

L'impianto Rambaudi Ram-Mill della RGM Metalworks SpA consiste di una fresa adattata alla tecnologia di Friction Stir Welding. Un motore elettrico asincrono trifase aziona un mandrino che potrà ruotare ad una velocità regolabile dai 40 rpm ai 3000 rpm. La potenza di tale motore è di 10 hp (7,5 kW).

Corsa Asse x	1160mm
Corsa Asse y	460mm
carico ammesso	1500kg
velocità mandrino	40-3000rpm
potenza mandrino	10 hp

Tabella 38



Figura 69 – Rambaudi Ram-Mill – FSW

La macchina descritta ha saldato per attrito una lega di alluminio 6082 ad una velocità di saldatura di 260 mm/min ed una velocità di rotazione del mandrino di 720 rpm. L'obiettivo dell'analisi che seguirà sarà quello di valutare gli assorbimenti energetici dell'impianto durante le diverse fasi del processo:

- Mandrino rotante che non incide sul pezzo (consumo a “vuoto”)
- Mandrino rotante che incide sulla lega di alluminio

Per prima cosa si visualizzeranno gli andamenti di corrente e di potenza assorbita durante il processo di saldatura completo (comprensivo anche della fase “senza carico”).

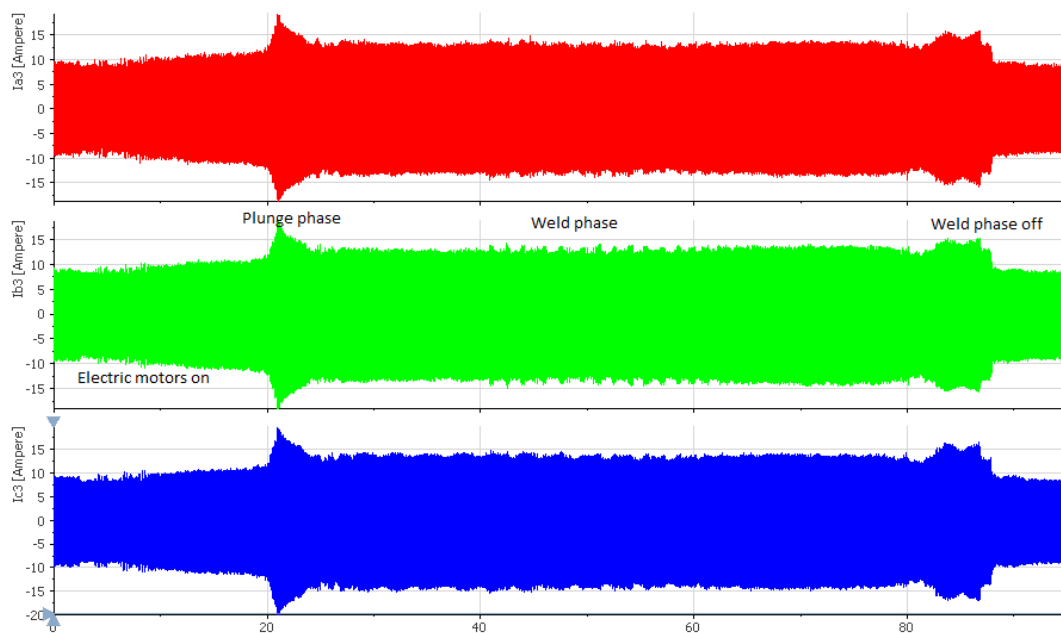


Figura 70 - Andamento delle correnti durante il processo di saldatura totale

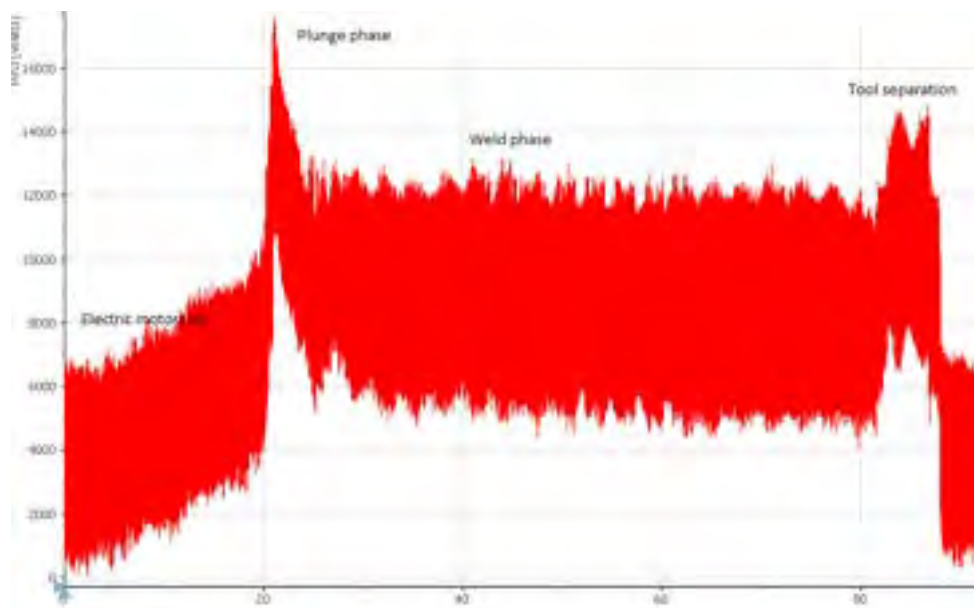


Figura 71 - Andamento della potenza assorbita durante il processo di saldatura totale

Queste curve mostrano gli assorbimenti della macchina saldatrice nelle diverse fasi del processo ed hanno lo scopo di evidenziarne il contributo energetico. Si ha una fase iniziale in cui ruota soltanto il mandrino ad una velocità di 720 rpm, in seguito si osserva un rapido e forte incremento della corrente e quindi della potenza nella “plunge phase”, momento della durata di qualche secondo in cui l’utensile affonda il pezzo da saldare (picco di potenza assorbita di quasi 15 kW). Ancora, si nota una fase più o meno stabile e anche abbastanza

lunga in cui la potenza rappresenta quella di saldatura effettiva. Dopo l'intera operazione di saldatura si può osservare un picco di potenza relativo alla fase in cui l'utensile si stacca dai lembi ormai uniti

4.4.3 Rambaudi Ram-Mill: Fase di pre-saldatura

In questa sezione verranno riportati i risultati del monitoraggio di prestazioni energetiche della macchina nella fase in cui il mandrino ruota ad una velocità di 720 rpm ma non affonda il pezzo.

Le forme d'onda delle correnti vengono riportate in Figura 72. Si tratta di sinusoidi composte da componenti a diverse frequenze e nella stessa Figura viene anche riportata la curva di potenza in ingresso alla macchina di cui si definirà un valor efficace. La potenza in ingresso alla macchina è stata analizzata tramite un codice LabVIEW per individuare e calcolare le componenti di potenza attiva, reattiva ed apparente, utili nella definizione del fattore di potenza. Rapportando la potenza attiva alla potenza apparente (che comprende solo l'armonica fondamentale) si è ottenuto un power factor di 0,25.

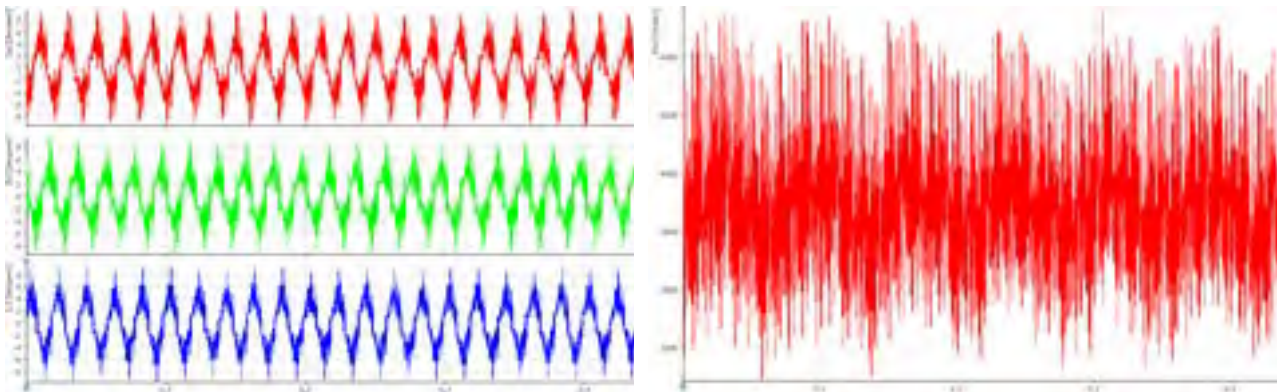


Figura 72 - Andamenti di corrente e potenza in ingresso nella fase di pre-saldatura

Consumi in pre-saldatura	Valori misurati
Corrente (x3 phases) rms	3,75 A
Potenza istantanea rms	3520 W
Potenza apparente	3881 VA
Potenza attiva	1019 W

Tabella 39 - Valori in pre-saldatura

L'analisi armonica ha determinato un valore del THD intorno al 50% per tutte e tre le fasi. Risulta evidente dalla Fig.73 come il contributo più importante in termini quantitativi sia dato dalle armoniche di ordine 17 e 19. Le altre componenti hanno un'entità decisamente più modesta.

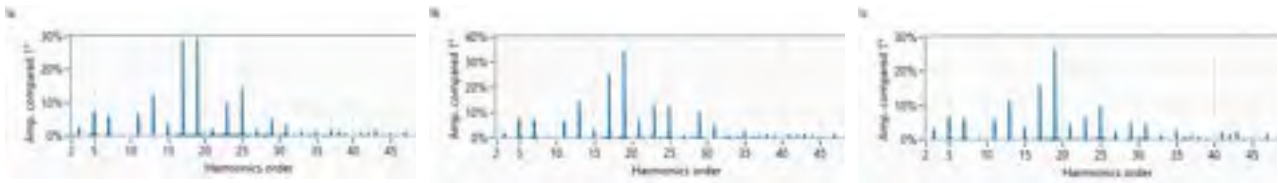


Figura 73 - Analisi del contenuto armonico delle correnti

4.4.4 Rambaudi Ram-Mill: Fase di saldatura effettiva sulla lega metallica

Nella fase in cui il mandrino, rotante ad una velocità di 720 rpm, affonda il pezzo in lega di alluminio si sono riscontrati ovviamente assorbimenti energetici maggiori corrispondenti a 2,5 volte i consumi senza carico.

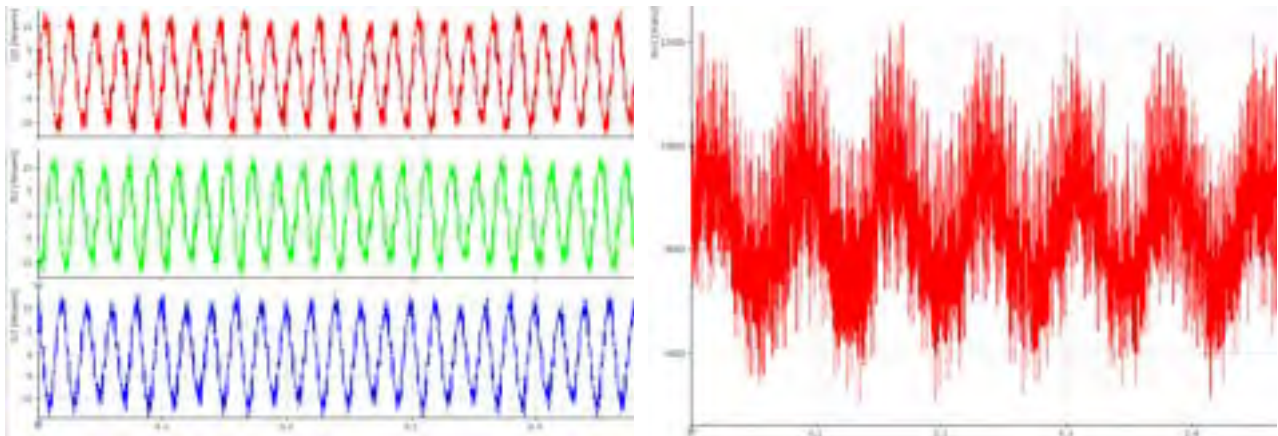


Figura 74 - Andamento delle correnti e potenza in ingresso durante la saldatura

Consumi della macchina in saldatura	Valori misurati
Corrente (x3 phases) rms	7,5 A
Potenza istantanea rms	8541 W
Potenza apparente	8544 VA
Potenza attiva	4505 W

Tabella 40 - Valori in saldatura effettiva

Si noti come la potenza attiva in fase di saldatura sia decisamente più alta rispetto la fase precedente. Questo comporta quindi un funzionamento della macchina con un fattore di potenza pari esattamente il doppio (PF=0,5).

4.4.5 Rambaudi Ram-Mill: Fase di post-saldatura

Dopo che l'utensile ha effettuato la saldatura dei lembi, si stacca dal pezzo e il mandrino continua a ruotare ancora per più di qualche decina di secondi determinando un fattore di consumo energetico

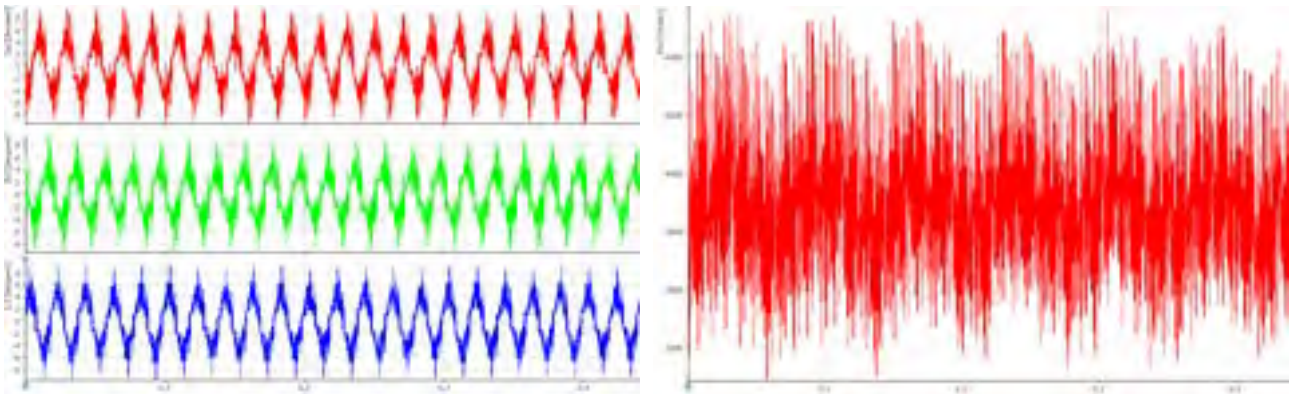


Figura 75 - Andamenti delle correnti e della potenza in ingresso in fase di post-saldatura

Consumi in post-saldatura	Valori misurati
Corrente (x3 phases) rms	3,62 A
Potenza istantanea rms	3500 W
Potenza apparente	3875 VA
Potenza attiva	1001 W

Tabella 41 - Fase di post-saldatura

I dati appena riportati permettono di calcolare un power factor di 0,26. Quel che emerge da suddetta analisi per quanto riguarda il fattore di potenza è che prescindendo dalla saldatura effettiva, nelle altre fasi la macchina funziona con un power factor molto basso e da un punto di vista energetico è un punto decisamente migliorabile. Così come riscontrato nella fase di pre-saldatura anche in questo periodo di osservazione il contenuto armonico delle correnti sul primario è decisamente più alto a quello corrispondente alla fase di saldatura.

I fattori THD relativi alle tre fasi di corrente sono ampiamente superiori al 50%. Le armoniche di ordine 17 e 19 (vedi Fig.76) sono anche in questo caso decisamente maggiori delle altre la cui entità si può ritenere trascurabile.



Figura 76 - Analisi del contenuto armonico delle correnti in fase di post-saldatura



Figura 77 – Piastre saldate dalla Rambaudi Ram-Mill nel corso dei test effettuati

5 Studio metallurgico

Lo studio metallurgico è stato rivolto alla caratterizzazione geometrica, strutturale e meccanica dei cordoni di saldatura realizzati nei laboratori ENEA. Le giunzioni sull'acciaio AISI 316 sono state effettuate mediante saldatura TIG variando i parametri di processo.

Nella fase preliminare è stato selezionato l'attacco chimico opportuno per evidenziare la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA) dei giunti saldati e per determinare il volume di metallo fuso e poi solidificato. L'attacco selezionato è il Vilella (5 ml HCl, 100 ml etanolo, 1 g acido picrico).

Dalle piastre saldate sono stati ricavati dei saggi trasversali, i quali sono stati inglobati a freddo in una resina, levigati mediante carte abrasive in carburo di silicio e successivamente lucidati con panni di allumina. In seguito i campioni sono stati sottoposti a macroetching con il reagente indicato ed esaminati mediante ispezione visiva, per individuare eventuali difetti macroscopici, microscopia stereo e ottica. Dalle macrografie ottenute è stato poi determinato il volume (V) del metallo fuso e solidificato.

5.1 Saldatura TIG su acciaio 316 (serie 8B, 8C e 8D)

Tre saggi trasversali ottenuti da tre giunti saldati (8B, 8C, 8D) in acciaio inox AISI 316 sono stati sottoposti a ispezione visiva mediante microscopio stereo, dopo lucidatura e macroetching. A titolo di esempio si riporta, in Fig. 78, la sezione trasversale del cordone di saldatura 8B dopo attacco chimico.

Tutti e tre i giunti saldati 8B, 8C e 8D presentano una profondità di penetrazione (p) inferiore allo spessore

della piastra (4 mm). L'aspect ratio v , definito come il rapporto tra la profondità di penetrazione p e la larghezza massima w , è pari a 2,8 per il campione 8B. Nella micrografia viene inoltre evidenziata (linea bianca tratteggiata) la zona utile per il calcolo del volume V del metallo fuso e poi solidificato. Tale volume risulta pari a 110 mm^3 , essendo l'area A della sezione del cordone pari a $8,4 \text{ mm}^2$ e la larghezza della lastra di 13 mm.



Fig. 78- Sezione laterale del campione 8B. In evidenza l'area A utilizzata per il calcolo del metallo fuso e risolidificato durante il processo di saldatura.

In Tabella 42 vengono riassunti i valori del volume coinvolto nel processo di saldatura per tutti e tre i giunti saldati (8B, 8C e 8D).

Campione	prof. di penetrazione (p) [mm]	aspect ratio (v)	Area (A) [mm ²]	Volume (V) [mm ³]
8B	2,3	0,33	8,4	110
8C	2,5	0,36	10,86	142,22
8D	2,2	0,31	9,16	119,95

Tabella 42. Valori di profondità di penetrazione (p), aspect ratio (v), area (A) e volume (V) ottenuti per i tre cordoni in acciaio AISI 316.

Tutti i cordoni sono stati successivamente osservati al microscopio ottico al fine di osservare la microstruttura nella ZTA e nella ZF. Si riporta in Fig. 79 la microstruttura ottenuta per il campione 8B che risulta caratterizzata da una struttura completamente dendritica che si sviluppa a seguito del processo di solidificazione. Tutti i campioni presentano la medesima microstruttura nella ZTA e ZF. È possibile inoltre osservare come l'asse principale delle dendriti sia tendenzialmente orientato lungo la direzione di smaltimento del calore (vedi Fig. 80).

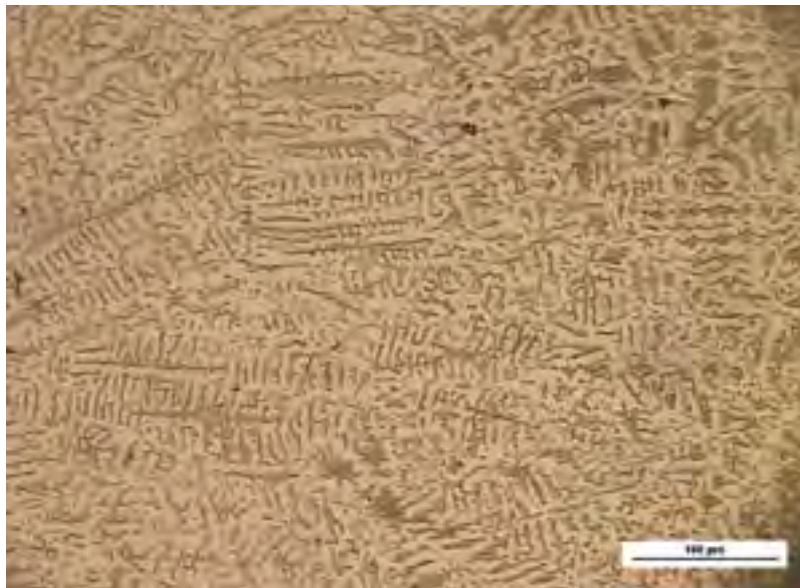


Fig. 79- Campione 8B: microstruttura del giunto saldato

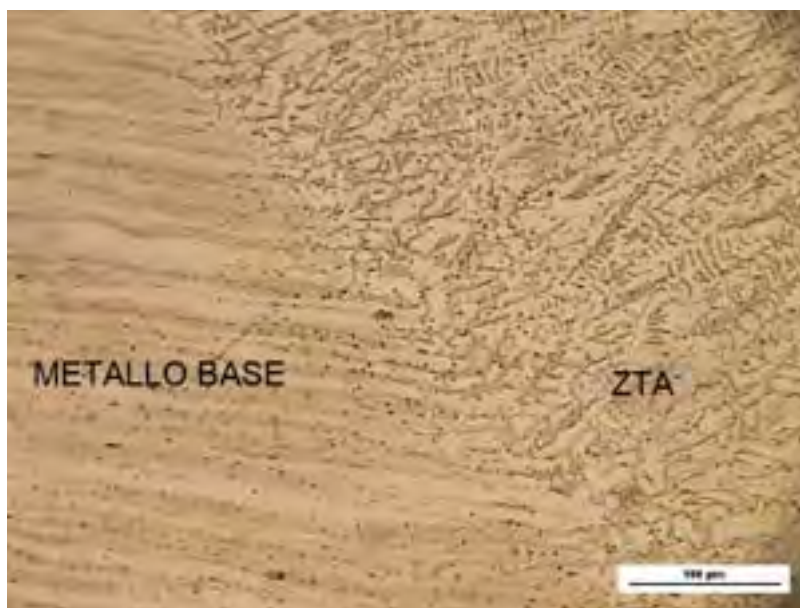


Fig. 80- Campione 8B: Micrografia della zona di passaggio tra la ZTA e il materiale base

5.2 Saldatura TIG su acciaio 316 (serie 12E, 12F, 12C e 12D)

Quattro giunti saldati (12E, 12F, 12C e 12D) in acciaio inox AISI sono stati osservati mediante microscopio stereo dopo lucidatura e macroetching. La Fig. 81 mostra la sezione trasversale del campione 12E dopo attacco con il reagente Vilella.

Anche in questo caso è stata determinata la profondità di penetrazione (p), l' aspect ratio (v) e il volume (V) coinvolto nel processo di saldatura. Per tutte e quattro le saldature si riscontra una profondità di penetrazione uguale allo spessore della lastra che risulta pari a 3 mm.

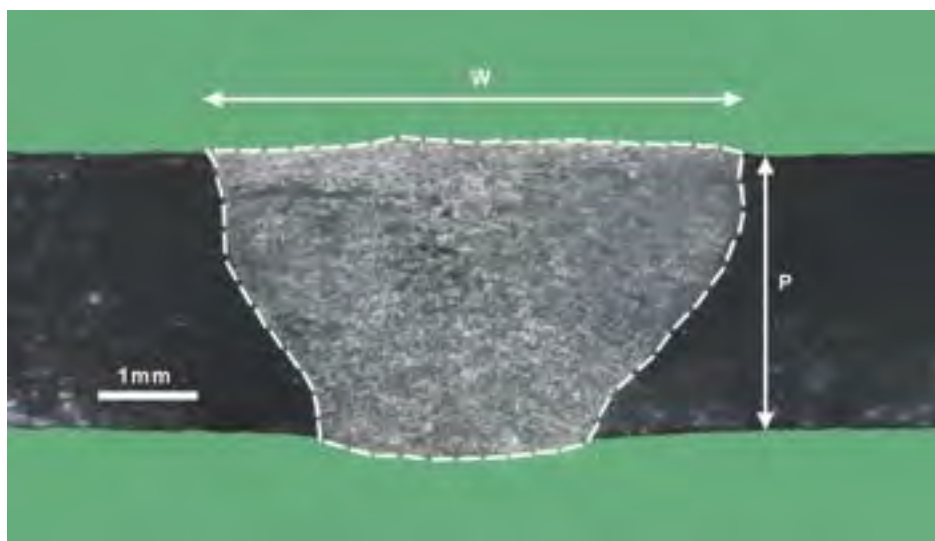


Fig. 81- Sezione trasversale del campione 12E. In evidenza l'area A utilizzata per il calcolo del metallo fuso e risolidificato durante il processo di saldatura

In Tabella 43 sono riassunti i valori ottenuti per i quattro cordoni in esame.

Campione	profondità di penetrazione (p) [mm]	aspect ratio (v)	Area (A) [mm ²]	Volume (V) [mm ³]
12 C	3	0,40	22,2	359,74
12 D	3	0,50	19,89	322,27
12 E	3	0,54	14,23	230,48
12 F	3	0,50	13,73	222,43

Tabella 43- Valori di profondità di penetrazione (p), aspect ratio (v), area (A) e volume (V) ottenuti per i tre cordoni in acciaio AISI 316.

Anche per questa seconda serie di campioni la microstruttura della ZTA e della ZF risulta caratterizzata da una struttura completamente dendritica in cui l'asse principale delle dendriti è tendenzialmente orientato lungo la direzione di smaltimento del calore.

6 Conclusioni

L'attività svolta in questo terzo anno del progetto dal Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" ha riguardato la realizzazione e i primi test di valutazione del prototipo del sistema portatile di misura dedicato alla caratterizzazione di processi di saldatura industriali. Tale sistema è basato su un'architettura COMPACTDAQ della National Instruments e può essere controllato attraverso un'interfaccia wireless con un software appositamente sviluppato in linguaggio LabView.

Il sistema, grazie alla presenza di più canali in ingresso, utilizzabili sia per le misure di potenza che per l'acquisizione di altra strumentazione nonché tre ingressi per la misura delle portate dei gas utilizzati nel processo, permette la misura simultanea di tutti i parametri coinvolti nel processo di saldatura. Apposite procedure software permettono poi al sistema un facile allineamento dei dati acquisiti con quelli provenienti da altra strumentazione.

Il sistema è stato provato attraverso una serie di test approfonditi in condizioni di utilizzo operative industriali su macchine laser di diversa tipologia (Laser, TIG, MIG, FSR, ecc.) sia all'interno di laboratori universitari e di ricerca nonché presso alcune aziende nazionali. Queste hanno consentito di valutare le prestazioni del sistema di misura e la messa a punto di alcune caratteristiche del sistema di misura nonché l'ottimizzazione delle relative procedure software.

7 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] F. Cognini, G. Barbieri, M. Moncada, D. Mirabile Gattia, G. Di Girolamo, G. De Santis, U. De Angelis, “Misure di efficienza energetica di processi laser in condizioni operative su leghe di acciaio e alluminio con analisi dei componenti e parametri critici”, *Ricerca di Sistema Elettrico*, AdP MiSE-ENEA 2015-2017- RdS_PAR2016_097
- [2] <https://www.fluke.com/en/product/electrical-testing/power-and-energy-loggers/three-phase-power-and-energy-loggers/fluke-1738>
- [3] B. Riccardi and R. Montanari: Indentation of metals by a flat-ended cylindrical punch *Materials Science and Engineering A* Vol. A381 (2004), p. 281
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Haelsing, P. Mayr, Energy balance study of gas-shielded arc welding processes, *Weld World* DOI 10.1007/s40194-013-0073-z.
- [9] Wei Li, E. Feng, D.I Cerjanec, G.A. Grzadzinski, *Sheet Metal Welding Conference XI Sterling Heights, MI, May 11-14, 2004*.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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>.
- [14] D.T. Swift-Hook, A.E.F. Gick, *Penetration Welding with Lasers*, *Welding Research Supplement* 493-s (1973).
- [15] 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.
- [16] M.A. Purslow, Reducing the ecological impact of arc welding, *Welding Journal*, December (2012) 24-27.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

Ing. 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.

Dott.ssa Alessandra Varone Born in Rome (16.07.1983).

2009. Materials Science and Technology Degree (61/S) at University of Rome "Tor Vergata".

2012. Winner of award "The Felice De Carli Prize": awarded to an Italian recently graduated or final-year undergraduates in metallurgy or materials science by AIM (Associazione Italiana Metallurgia).

2013. PhD in Materials Engineering at University of Rome "Tor Vergata".

2013. Post-doc researcher at University of Rome "Tor Vergata".

2014-2016. Project: "Micro-scale energy storage and conversion". A*MIDEX University Foundation: Initiative of excellence, Mediterranean program. Title: Micro-scale Energy Storage and Conversion (MESOC) (Participant).

2015. "Laboratory Ionomer Materials for Energy (LIME)" between University of Rome Tor Vergata, Aix-Marseille University, France and CNRS, France (Participant).

The research activity covers the following topics:

1- Structure of liquid metals: determination of the Radial Distribution Function (RDF) curve for mono-atomic and poly-atomic liquids.

2- Precursor effects of melting and solidification in pure metals and alloys.

4- Study of liquid Pb–Bi eutectic (LBE) selected as a coolant and neutron spallation source for the development of MYRRHA.

5- Microstructure and mechanical properties of Ni base superalloys before and post welding.

6- Microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel before and post welding.

7- Microstructure and mechanical properties of different materials by using XRD, HT-XRD, Mechanical Spectroscopy, FIMEC Test, Vickers Test.