



Ricerca di Sistema elettrico

## Aggiornamento del programma di controllo del sistema trasportabile di misura del FEE per i sistemi di saldatura per il settore automotive

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

## AGGIORNAMENTO DEL PROGRAMMA DI CONTROLLO DEL SISTEMA TRASPORTABILE DI MISURA DEL FEE PER I SISTEMI DI SALDATURA PER IL SETTORE AUTOMOTIVE

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

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

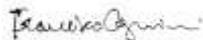
Progetto: Processi e macchinari industriali

Obiettivo: A. Etichettatura energetica per l'efficientamento di macchinari  
A.2 Tecniche di 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 "Aggiornamento del programma di controllo del sistema trasportabile di misura del FEE per i sistemi di saldatura per il settore automotive"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Francesco Cognini



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



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 ANALISI DI SISTEMI DI SALDATURA/GIUNZIONE IN AMBITO “AUTOMOTIVE” .....	5
2.1.1 <i>Analisi dei principali sistemi di saldatura di tipo resistivo</i> .....	5
2.1.2 <i>Analisi di sistemi di Clinchiatura (Clinching)</i> .....	7
2.2 CAMPAGNA DI MISURA PRESSO STABILIMENTI INDUSTRIALI.....	8
2.3 PROGETTO DELL’ADEGUAMENTO HARDWARE E SOFTWARE DEL SISTEMA DI MISURA .....	16
2.3.1 <i>Analisi delle criticità</i> .....	17
2.3.2 <i>Definizione delle specifiche e progetto dell’adeguamento del sistema di misura</i> .....	17
3 CONCLUSIONI .....	18
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	19
5 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	20

## Sommario

L'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" ha riguardato lo studio dei sistemi di saldatura maggiormente utilizzati nel settore manifatturiero automobilistico ("automotive") al fine di valutare le possibilità e le eventuali criticità del sistema di misura portatile realizzato nelle precedenti annualità dell'accordo di collaborazione.

Il settore *automotive* è, infatti, un particolare settore industriale nel quale sono ampiamente utilizzati varie tecnologie di saldatura, oltre ad altri metodi per la giunzione di materiali, e dove è particolarmente attiva la ricerca sia nell'ambito dello sviluppo di nuovi materiali che nello studio di nuove tecniche di assemblaggio.

In particolare, l'attività di ricerca si è orientata nello studio delle varie tecniche di giunzione e di saldatura maggiormente utilizzate in ambito *automotive* al fine di verificare le possibilità di impiego in tale applicazione del sistema di misura portatile realizzato nelle precedenti annualità dell'accordo di collaborazione, nonché valutare le eventuali criticità che potrebbero emergere nel suo utilizzo. In una fase successiva, sulla base delle analisi effettuate sui risultati della sperimentazione, verranno studiati gli aggiornamenti hardware/software necessari al superamento delle criticità emerse.

La presente relazione è articolata secondo i seguenti punti:

- Analisi dei principali sistemi di saldatura/giunzione nel settore automobilistico
- Partecipazione a campagne di misura presso stabilimenti industriali ed acquisizione di dati elettrici da macchine per:
  - Saldatura MIG
  - Saldatura Laser
  - Saldatura di tipo resistivo
  - Processo di clinchiatura
- Analisi, sulla base dell'esperienza maturata sul campo, delle possibilità offerte dal sistema e delle criticità emerse nel suo utilizzo
- Definizione delle specifiche e progetto degli aggiornamenti hardware/software necessari al superamento delle criticità emerse nel precedente punto.

## 1 Introduzione

L'esigenza di voler ottenere un sempre maggiore contenimento dei consumi di carburante costringe i produttori di automobili a dover utilizzare materiali alternativi sempre più leggeri e robusti e che consentano la realizzazione di veicoli con peso sempre più ridotto. Questa esigenza, insieme ad una ottimizzazione dei costi energetici della produzione, comporta la necessità di sviluppare nuove tecniche di saldatura (o giunzione) necessarie per l'assemblaggio delle diverse parti della carrozzeria.

Ad oggi, i metodi di saldatura più comunemente utilizzati per le applicazioni automobilistiche sono:

- Saldatura resistiva
  - Resistance Spot Welding (RSW)
  - Resistance Seam Welding (RSEW)
  - Resistance Projection Welding (RPW)
- Saldatura ad arco
  - Saldatura Metal Inert Gas (MIG),
  - Saldatura Tungsten Inert Gas (TIG)

- Saldobrasatura ad arco (Arc Braze Welding – ABW)
- Plasma Arc Welding (PAW)
- Saldatura Laser
  - Laser Beam Welding (LBW)
- Saldatura per attrito
  - Friction Stir Welding (FSW)

Inoltre, negli ultimi anni, in particolare per la giunzione di leghe dissimili, acciai ad elevata resistenza e leghe di alluminio si stanno sviluppando nuove tecnologie di giunzione quali:

- Clinchiatura (Clinching)
- Friction Element Welding (FEW)

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Analisi di sistemi di saldatura/giunzione in ambito “automotive”*

Il processo di fabbricazione dei veicoli segue generalmente un processo ormai standardizzato: si parte dallo stampaggio delle lamiere seguita dalla saldatura delle singole parti, la loro verniciatura per poi passare al montaggio del motore, l'assemblaggio e, al termine, l'ispezione finale. Tra i processi di saldatura utilizzati in ambiente industriale, oltre alla saldatura ad arco, la saldatura resistiva è uno dei metodi più diffusi per collegare fra loro parti in lamiera.

Oltre alla saldatura, possono essere impiegate altre tipologie di tecniche di giunzione tradizionali per legare fra loro più lamiere, quali:

- Clinchiatura
- Rivettatura a strappo
- Rivettatura auto perforante

#### 2.1.1 *Analisi dei principali sistemi di saldatura di tipo resistivo*

La saldatura di tipo resistivo è un processo in cui le superfici metalliche in contatto fra loro sono unite dal calore ottenuto per effetto Joule dalla resistenza da loro presentata al flusso di corrente elettrica che li attraversa.

Tra i diversi processi di saldatura resistiva si sono rappresentati nella Figura 1 quelli principali, in particolare:

- Resistance Spot Welding (RSW)
- Resistance Seam Welding (RSEW)
- Resistance Projection Welding (RPW)

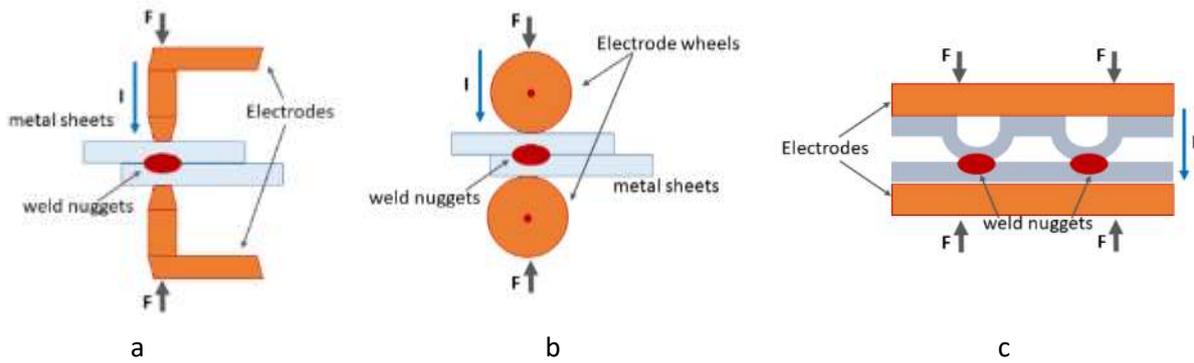


Figura 1. Processi di saldatura resistivi

**Resistance Spot Welding (RSW)**

La RSW (Figura 1a) è il metodo di saldatura a resistenza di gran lunga più utilizzato ed è in grado di unire più lamiere sovrapposte di spessore fino a 3 mm ciascuna. Il principio di funzionamento è il seguente: alcune pinze meccaniche tengono premute fra loro le lamiere ed i punti di contatto fra lamiera e pinze vengono portati a fusione per effetto Joule mediante il passaggio, per un tempo predeterminato, di corrente elettrica alternata e ad alto amperaggio (ordine superiore alla decina di kA alla frequenza di 1kHz per qualche centinaio di ms). Il processo viene ripetuto in sequenza in un numero, solitamente ampio, di punti isolati.

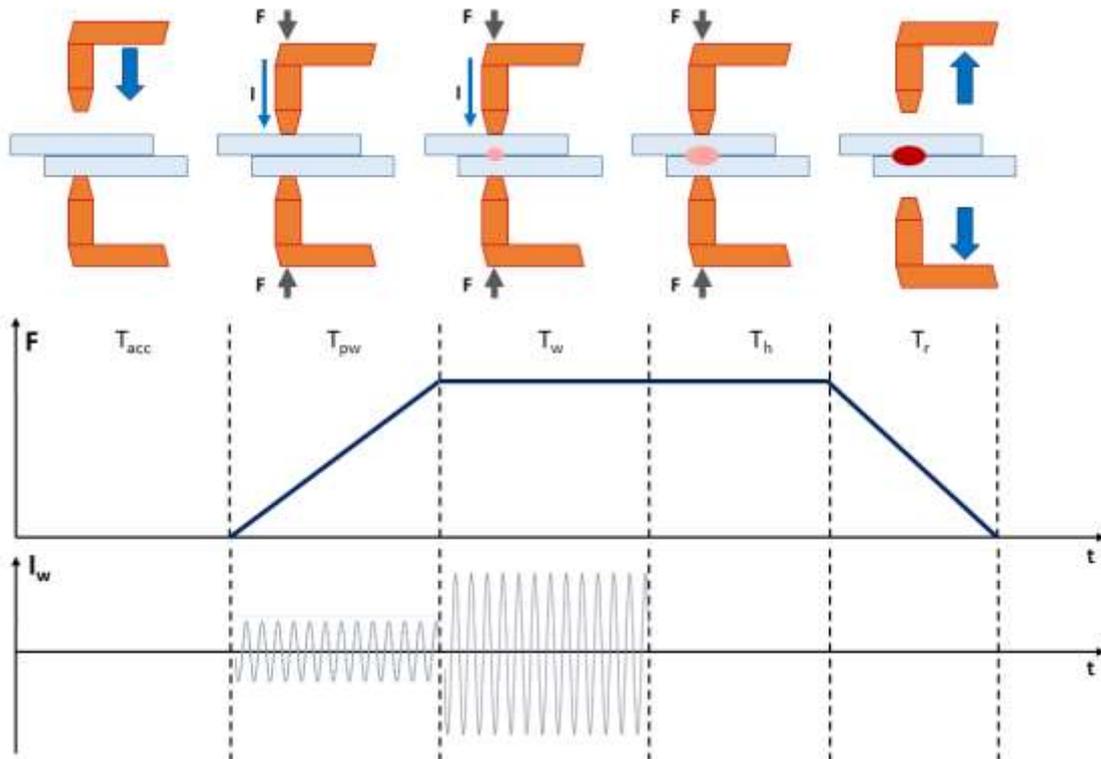


Figura 2. Resistance Spot Welding (RSW)

Nella Figura 2 sono illustrati i vari passaggi del processo di saldatura mentre, nella tabella 1, è riportata la legenda dei simboli utilizzati in figura.

$T_{acc}$	Tempo di accostamento
$T_{pw}$	Tempo di pre-saldatura (Squeezing)
$T_w$	Tempo di saldatura (Welding)
$T_h$	Tempo di tenuta (Holding)
$T_r$	Tempo di rilascio
$I_{pw}$	Corrente di pre-saldatura
$I_w$	Corrente di saldatura

**Tabella 1.**

Nella fase iniziale vengono avvicinati gli elettrodi alle lamiere che sono state posizionate, sovrapposte, fra gli elettrodi stessi (Tempo di accostamento); questa prima fase è seguita da una fase di pre-saldatura (Squeezing) nella quale ad una crescente pressione esercitata dalla pinza di saldatura è associata una corrente di limitata intensità. La terza fase è la fase di saldatura vera e propria (Welding) nella quale, mantenendo costante la pressione della pinza sulla lamiera, viene erogata la corrente di saldatura. Nella fase successiva (Holding) viene interrotto il passaggio di corrente ma viene mantenuta la pressione da parte della pinza, mentre nella fase finale vengono allontanati gli elettrodi dalle lamiere.

### **Resistance Seam Welding (RSEW)**

È un processo di saldatura molto simile alla RSW, con la differenza che in questo caso vengono utilizzati elettrodi rotanti di forma circolare: due o più lamiere vengono fatte transitare tra i rulli che costituiscono l'elettrodo e, come nella saldatura RSW, il punto di contatto fra lamiera e rulli viene portato a fusione per effetto Joule mediante il passaggio di corrente elettrica ad alto amperaggio (Figura 1b). Il cordone di saldatura ottenuto è normalmente a tenuta di liquido e di gas.

### **Resistance Projection Welding (RPW)**

In questa tipologia di processo, una o entrambe le lastre vengono trattate prima di iniziare la saldatura e ne viene alterato il profilo (vedi Figura 1c). Le due lastre vengono quindi pressate mediante due elettrodi ed i punti di contatto fra le lamiere vengono portati a fusione per effetto Joule mediante passaggio di corrente elettrica ad alto amperaggio. Tali punti di contatto, riscaldati e ammorbiditi dall'aumento di temperatura, a causa della pressione a cui sono sottoposti, tenderanno a collassare fino a formare la saldatura.

#### **2.1.2 Analisi di sistemi di Clinchiatura (Clinching)**

Si tratta di un processo di assemblaggio di lamiere metalliche effettuato a freddo senza l'utilizzo di componenti di assemblaggio e basato sulla deformazione plastica dei metalli (pressodeformazione).

Si realizza (Vedi Figura 3) mettendo in contatto tra loro le superfici metalliche e pressandole tra una matrice ed un punzone e realizzando in questo modo un bottone a forma generalmente circolare. Il punzone comprime puntualmente le lamiere con una forza predeterminata e tale da realizzare la penetrazione del punzone: in questo modo si viene a formare il bottone che costituisce il punto di giunzione e la cui forma dipende dalla geometria degli utensili utilizzati.

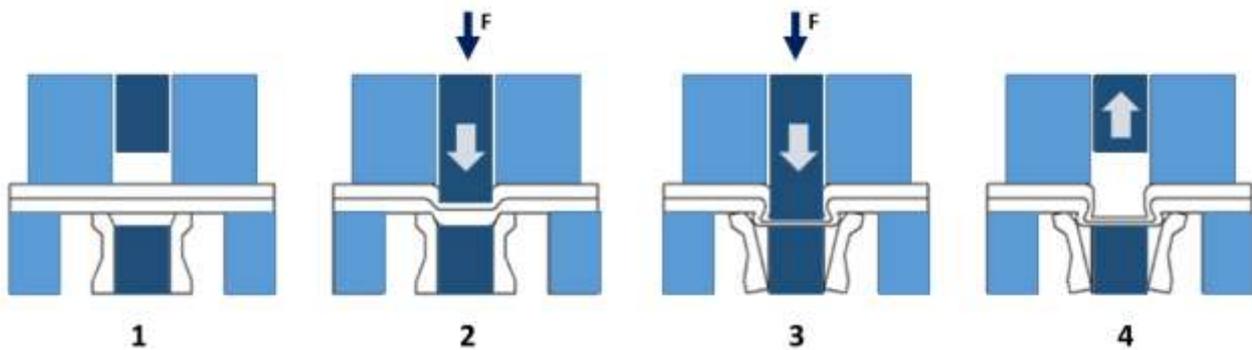


Figura 3. Fasi del processo di Clinatura

È una tipologia di processo che risulta particolarmente utile per unire superfici estese come le lamiere e presenta vantaggi sia sulla rivettatura che sulla saldatura resistiva a punti. La rivettatura richiede infatti elementi di fissaggio che, oltre a presentare un costo, richiedono una particolare e delicata procedura di assemblaggio: le lamiere devono essere infatti pre-forate e allineate durante il processo. Rispetto invece al processo di saldatura resistiva a punti (RSW), oltre a non generare scintille o bruciature, il processo di clinatura consente di unire fra loro anche materiali di tipo differente, operazione che non è invece sempre possibile utilizzando processi di saldatura.

Il processo di clinatura è caratterizzato da 4 fasi distinte:

1. I fogli di lamiera vengono bloccati tra due piastre.
2. La punta di un punzone viene premuta verso il basso oltre la superficie della lamiera. La forma del punzone è tale da realizzare la deformazione plastica delle lamiere senza però tagliare o danneggiare la loro superficie.
3. La punta del punzone quindi preme le lamiere contro una matrice inferiore e tale pressione va a deformare il metallo realizzando una particolare forma a "fungo" necessaria per realizzare l'unione fra le due lamiere.
4. La piastra superiore (di estrazione) mantiene le due lamiere in posizione mentre viene ritirata la punta del punzone. Questa fase deve essere effettuata molto velocemente e realizzata in un singolo colpo.

## 2.2 Campagna di misura presso stabilimenti industriali

Nel corso dell'attività di ricerca è stata organizzata una campagna di misure presso il Centro Ricerche FCA di Melfi (PZ). Presso il Centro di Ricerca sono state effettuate misure su diverse tipologie di macchine saldatrici in ambito *automotive* ed in particolare su:

- Saldatrice Laser
- Saldatrice MIG
- Saldatrice RSW
- Macchina di clinatura

Per effettuare le misure è stato utilizzato, ove possibile, il sistema di misura portatile sviluppato nel corso dei tre anni dell'accordo di collaborazione (Figura 4) e, a supporto, un Power Energy Logger Fluke 1738 ed un analizzatore di rete Fluke 435-II.

In particolare, le misure sulla macchina RSW e sulla macchina di clinciatura sono state realizzate con un analizzatore di rete Fluke 435-II e un Power Energy Logger Fluke 1738 e hanno avuto lo scopo di studiare le grandezze elettriche in gioco nel corso dei due processi al fine di determinare le specifiche tecniche dell'adeguamento del sistema di misura portatile.

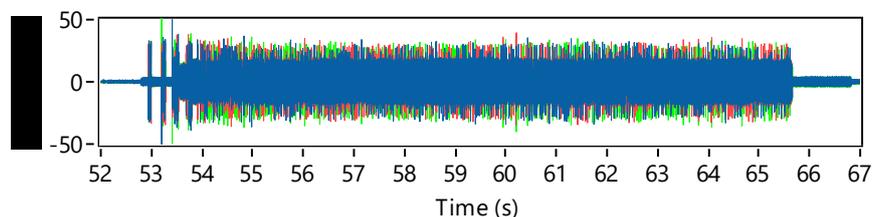


**Figura 4. Sistema portatile di misura**

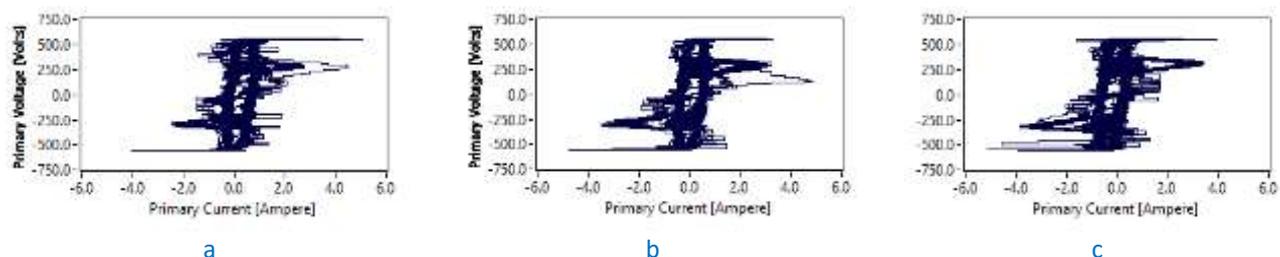
### **Saldatrice MIG**

La prima macchina oggetto di misura è stata una macchina di tipo MIG sulla quale sono stati misurati gli assorbimenti elettrici durante il processo di saldatura. Le misure sono state effettuate con il sistema di misura portatile collegato fra la presa elettrica di rete e la macchina saldatrice. Nella Figura 4 è mostrato l'andamento delle tre correnti di fase nel corso del processo di saldatura di una delle prove effettuate, mentre in Figura 5 il diagramma tensione-corrente relativo all'ingresso della macchina MIG.

Input currents



**Figura 4. Misura delle correnti di ingresso durante il processo di saldatura**



**Figura 5. Diagramma I-V lato alimentazione della macchina MIG**

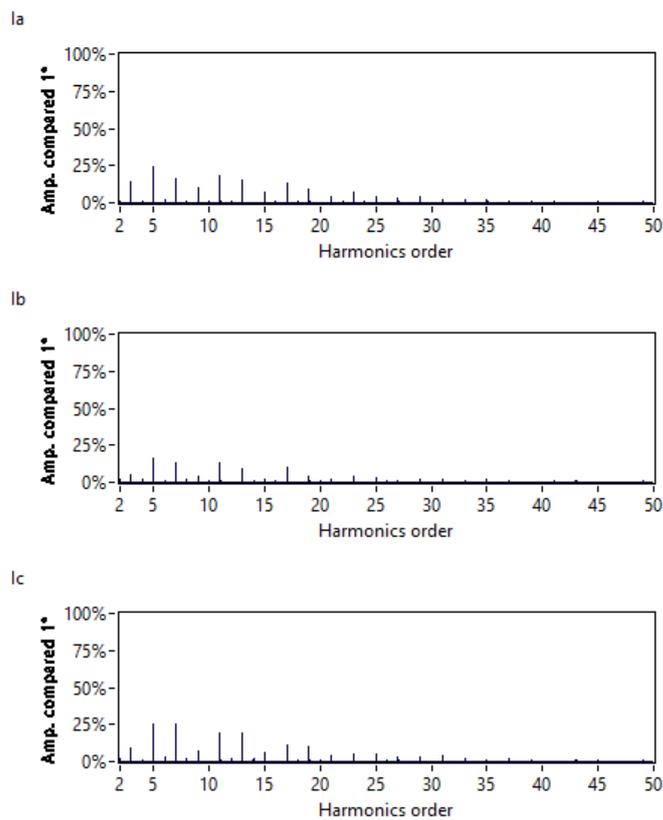


Figura 6. Contenuto armonico delle tre correnti di fase

Nella Figura 6 è invece mostrato il contenuto armonico delle tre correnti di fase mentre, nella Tabella 2, è riportata la misura del valore di THD (Total Harmonic Distorsion) misurato per ciascuna di esse.

	$I_a$	$I_b$	$I_c$
<b>THD</b>	44.8%	29.0%	49.4%

Tabella 2.

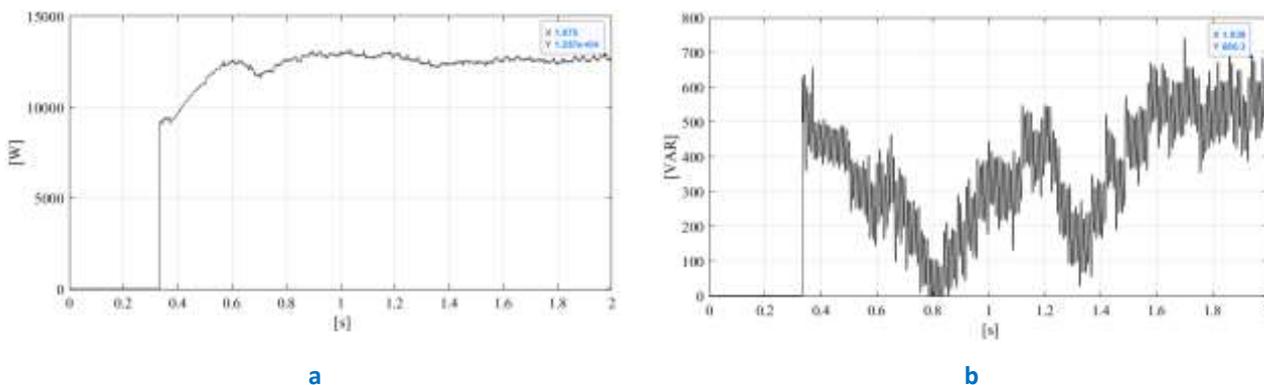


Figura 7. Misura della potenza attiva e reattiva nel corso della prova

La Figura 7 mostra l’andamento della potenza attiva e di quella reattiva durante il processo di saldatura mentre la Tabella 3 mostra gli intervalli di variazione della potenza attiva (P) e reattiva (Q) rilevati durante il test.

P	Q
9-12 kW	0 - 700 VAR

**Tabella 3.**

### **Saldatrice a resistenza RSW**

Le misure effettuate sono relative ad una saldatura a resistenza di due lastre di alluminio di spessore pari ad 1mm (ALLUMINIO 6016-T4 – 1mm + 1mm).

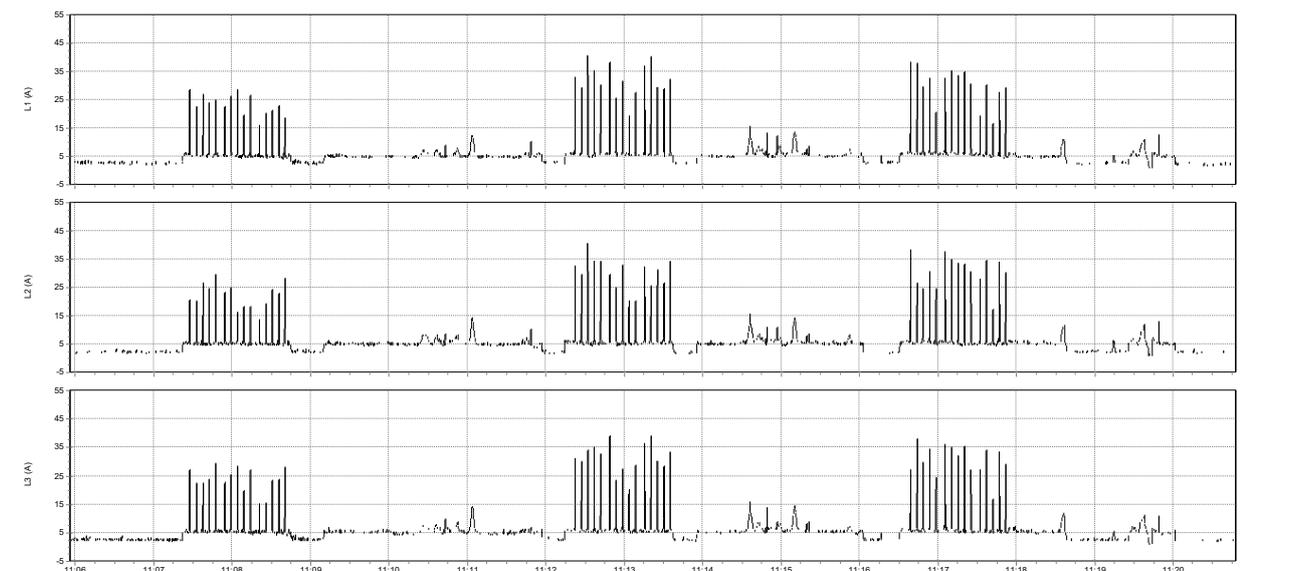
Sono stati eseguiti 45 punti di saldatura in sequenza ad una distanza di 25mm l'uno dall'altro ed è stata effettuata una procedura di rinvivatura degli elettrodi dopo ogni sequenza di 15 punti di saldatura.

I parametri utilizzati nel processo per i tre differenti set sono riportati nella seguente Tabella 4.

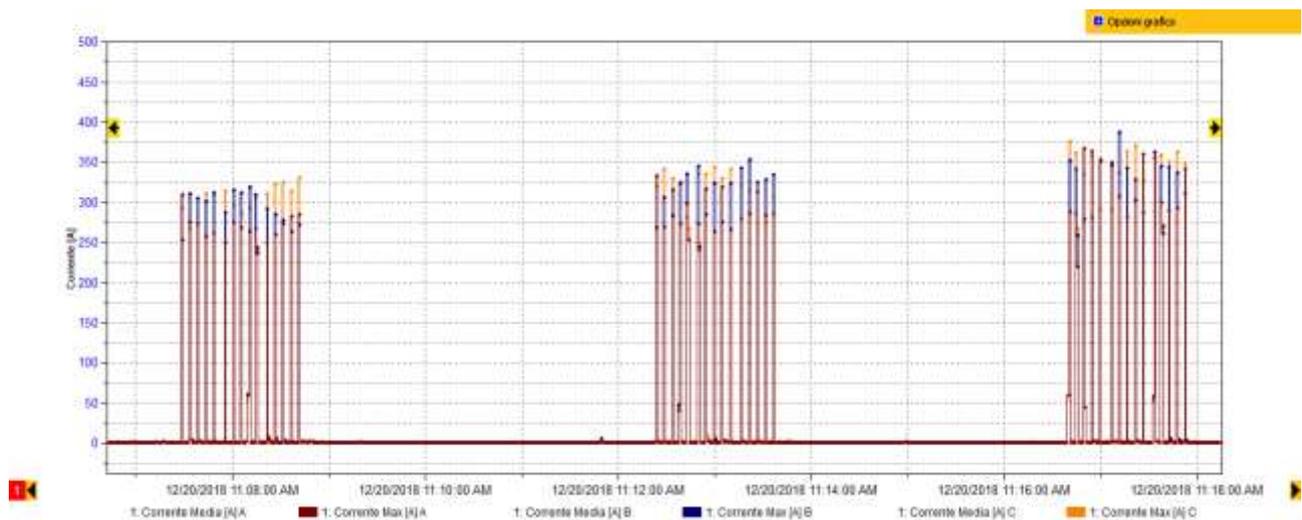
Set	T <sub>acc</sub>	T <sub>pw</sub>	I <sub>pw</sub>	T <sub>w</sub>	I <sub>w</sub>	T <sub>r</sub>	Forza
<b>1</b>	200 ms	100 ms	10kA	100 ms	28 kA	100 ms	3kN
<b>2</b>	200 ms	100 ms	10kA	100 ms	29kA	100 ms	3,5kN
<b>3</b>	200 ms	100 ms	10kA	80 ms	30 kA	100 ms	3,5kN

**Tabella 4.**

Le misure sono state effettuate mediante un Power Energy Logger Fluke 1738 collegato all'ingresso dell'alimentazione della macchina saldatrice ed un analizzatore di rete Fluke 435-II collegato all'ingresso dell'alimentazione del robot.



**Figura 8 – Processo di saldatura RSW: Correnti in ingresso al robot (RMS)**

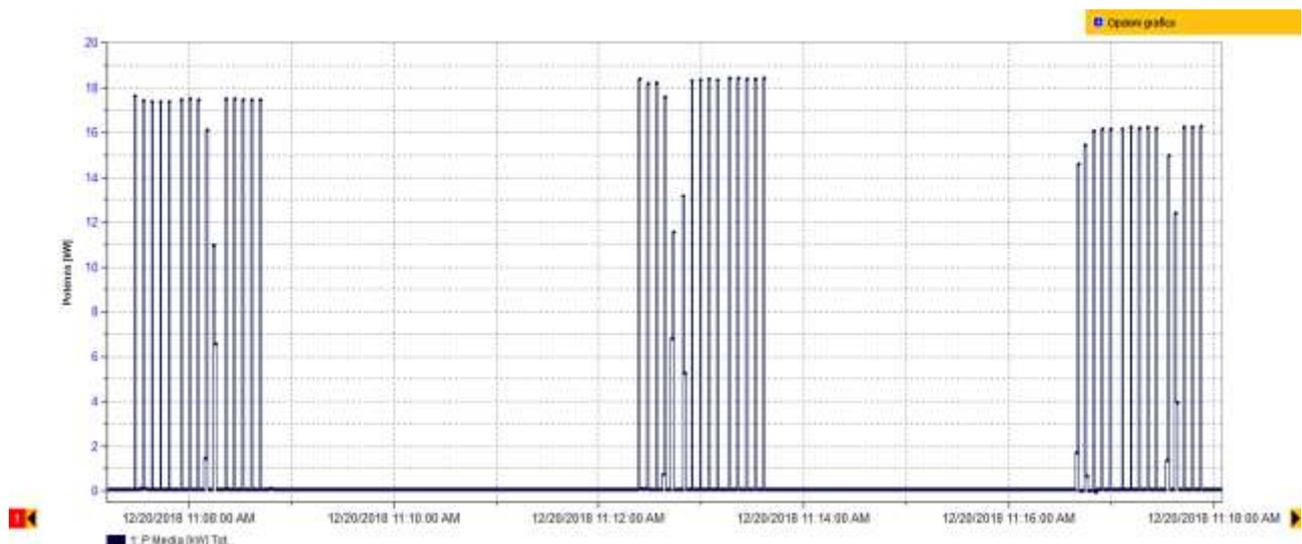


**Figura 9 – Processo di saldatura RSW: Correnti (RMS) in ingresso alla saldatrice RSW**

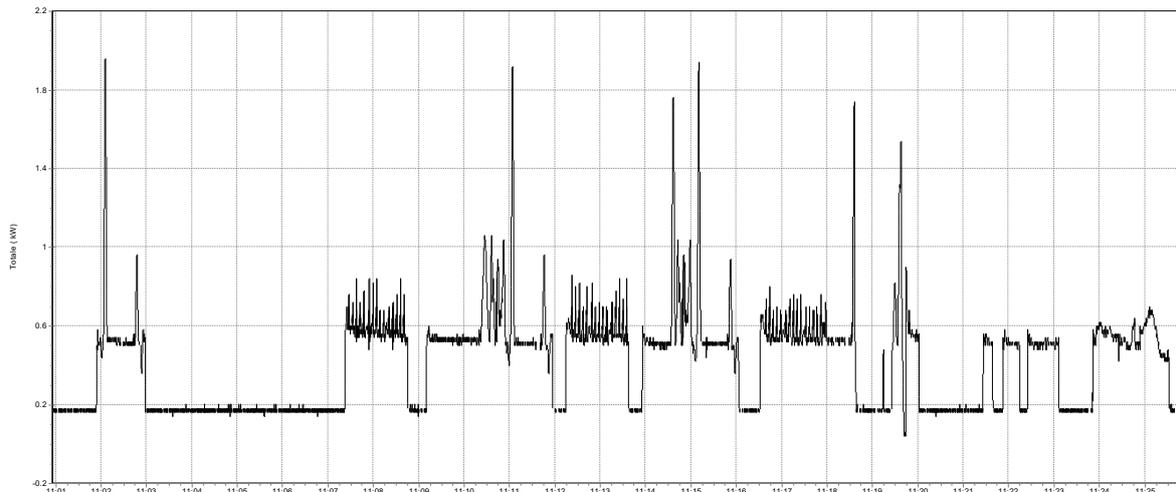
Nella Figura 8 si possono osservare le tre sequenze ai 15 punti di saldatura realizzati e, tra una sequenza e l'altra, l'assorbimento elettrico relativo alla movimentazione del robot durante le procedure di rinvigore degli elettrodi. Si può osservare come, a fronte di una maggiore forza applicata dalla pinza sulle lamiere (da 3kN per la prima sequenza a 3.5kN per la seconda e la terza), corrisponda un incremento nell'assorbimento di corrente da parte del robot.

La Figura 9 mostra le tre fasi della corrente (valori RMS) in ingresso alla saldatrice. Si può inoltre notare come, ad un incremento per le tre sequenze della corrente impostata per la saldatura (da 28kA a 30kA), si osservi un conseguente aumento della corrente ingresso alla saldatrice.

Per quanto riguarda la potenza assorbita, durante l'intero processo, rispettivamente dalla saldatrice e dal robot, è possibile osservare in Figura 10 la potenza attiva (valori di potenza media su un periodo di 1s) assorbita dalla saldatrice mentre, in Figura 11, la potenza attiva media assorbita dal robot e relativa alle operazioni di movimentazione pinza, di rinvigore elettrodi e relativa alla pressione esercitata dagli elettrodi sulla lamiera.

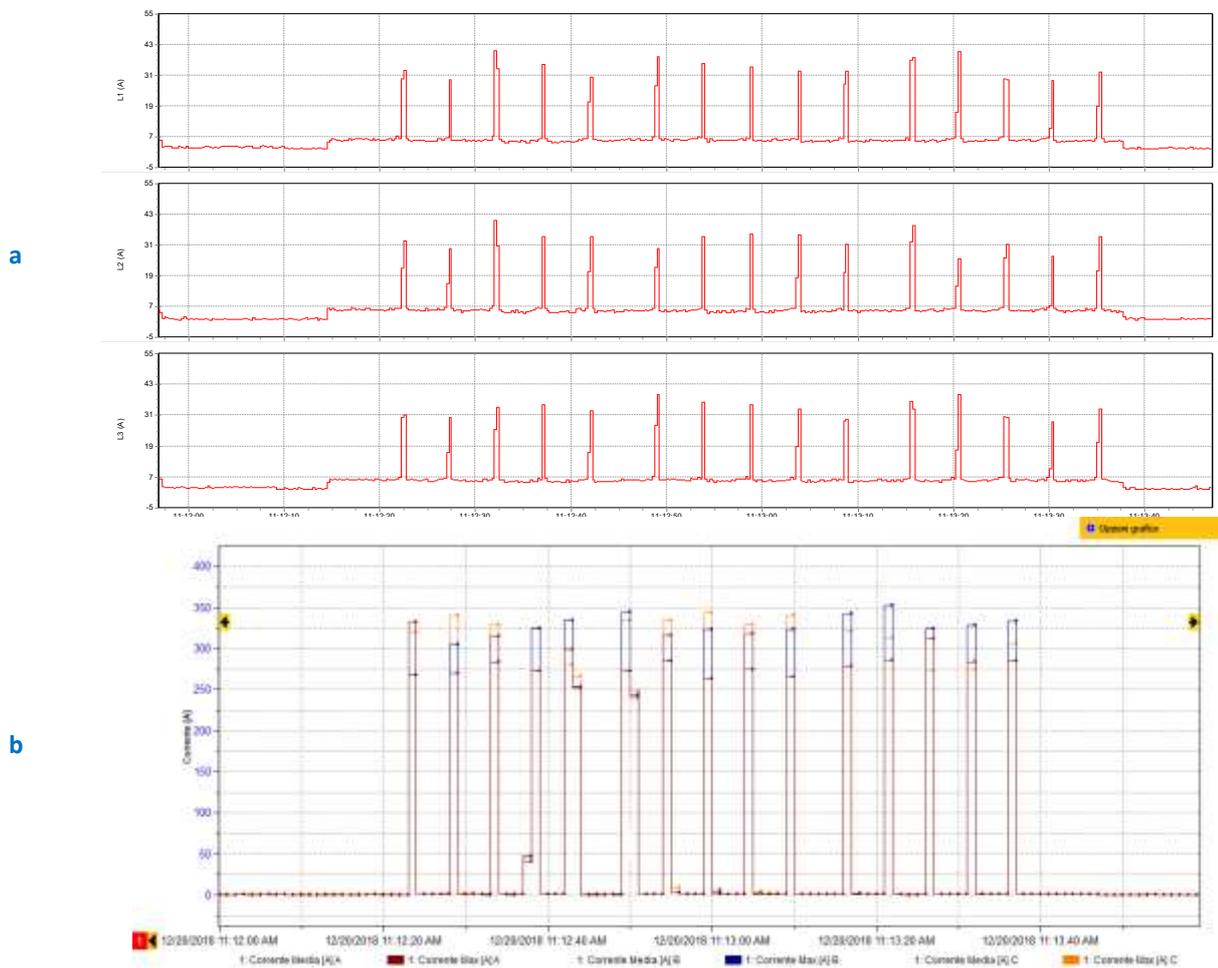


**Figura 10 – Processo di saldatura RSW: Grafico potenza**



**Figura 11 – Processo di saldatura RSW - Grafico potenza del Robot: intero processo**

Per quanto riguarda la potenza assorbita dalla saldatrice, sono stati misurati valori intorno ai 17.5kW (potenza attiva) per la prima sequenza di 15 punti, intorno ai 18.3kW per la seconda e 16.1kW per la terza sequenza. La stessa misura effettuata sul robot ha mostrato valori di assorbimento intorno ai 500W per le operazioni di movimentazione pinze e ravvivatura elettrodi e fino a valori fra circa 1kW e 2kW quando le pinze premono sul pezzo durante l'operazione di saldatura.



**Figura 12. Dettaglio sequenza analisi correnti di alimentazione: a) ingresso robot, b) ingresso saldatrice RSW**

Nella Figura 12 è mostrato il dettaglio delle correnti trifase assorbite rispettivamente dalla saldatrice (Fig. 12a) e dal robot (Fig. 12b) relativamente ad una singola sequenza di 15 punti di saldatura (in particolare si tratta della seconda sequenza). È possibile osservare, macchina saldatrice, un valore medio di corrente pari a circa 300A<sub>RMS</sub> per ciascun impulso e di circa 35A per l'alimentazione del robot. A fronte di questi valori di corrente in ingresso possiamo osservare, nella Figura 13, l'andamento della potenza attiva assorbita dalla saldatrice e di quella assorbita dal robot (Fig. 14).

I valori misurati risultano, in questo caso, pari a 18.5kW di potenza attiva per la saldatrice durante le operazioni di saldatura. Per quanto riguarda il robot si osservano valori di potenza attiva pari a circa 550W durante le operazioni di movimentazione pinze e tra 700W e 850W nell'intervallo di tempo in cui la pinza preme sulla lamiera.

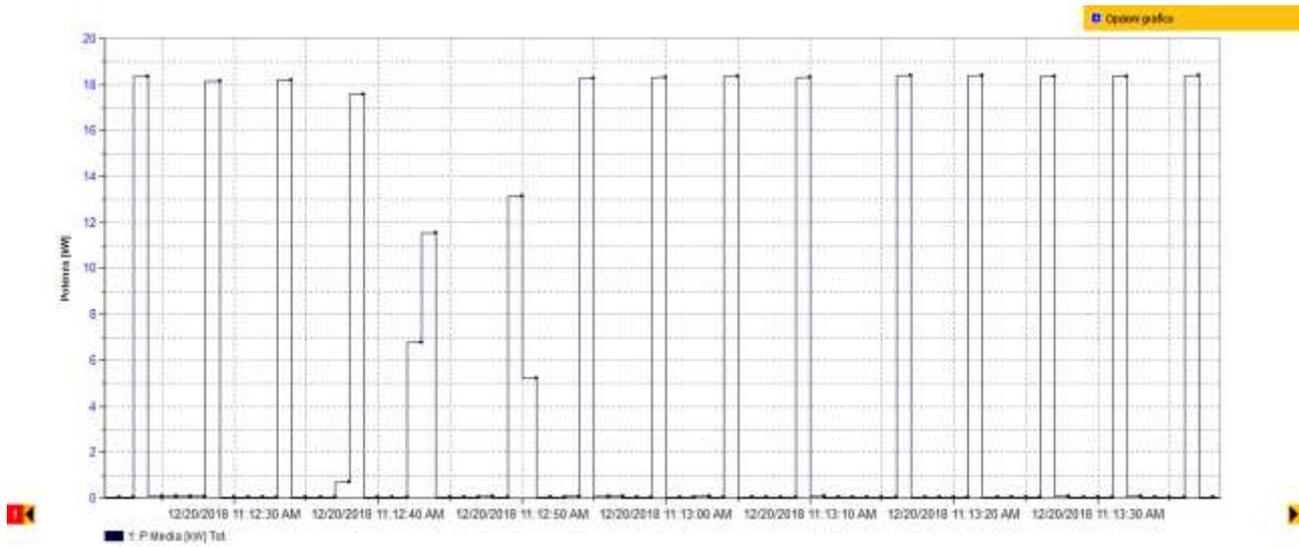


Figura 13. Dettaglio sequenza ingresso saldatrice RSW: grafico potenza

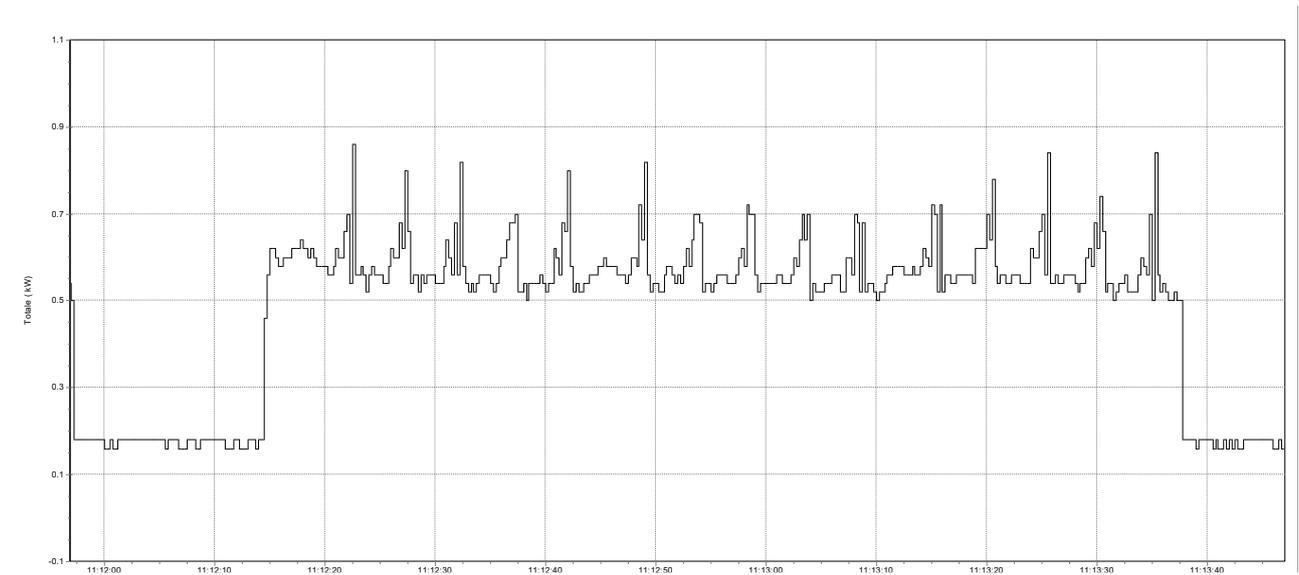


Figura 14 – Processo di saldatura RSW – Grafico potenza del Robot: dettaglio seconda sequenza

### Clinchiatura (Clinching)

Le misure effettuate sono relative alla clinchiatura di due lastre di alluminio di spessore pari ad 1mm (ALLUMINIO 6016-T4 – 1mm + 1mm). Le misure sono state effettuate utilizzando il Power Energy Logger Fluke 1738 collegato all'ingresso dell'alimentazione della macchina in quanto il sistema di misura portatile, pur compatibile con le caratteristiche di questa misura, era, contemporaneamente, utilizzato per le misure sulla saldatrice MIG. I parametri impostati per il processo sono riportati nella seguente tabella

Forza applicata	27.6 kN
Spessore fondo	0.6 mm
Punzone	5.6 mm
Diametro matrice	9 mm

Tabella 3

Durante la prova sono state realizzate 45 operazioni di clinchiatura. Le correnti trifase di ingresso alla macchina presentano un valore intorno ai 10A<sub>RMS</sub> (Fig.15). Nella Figura 16 è mostrato un dettaglio della stessa sequenza.

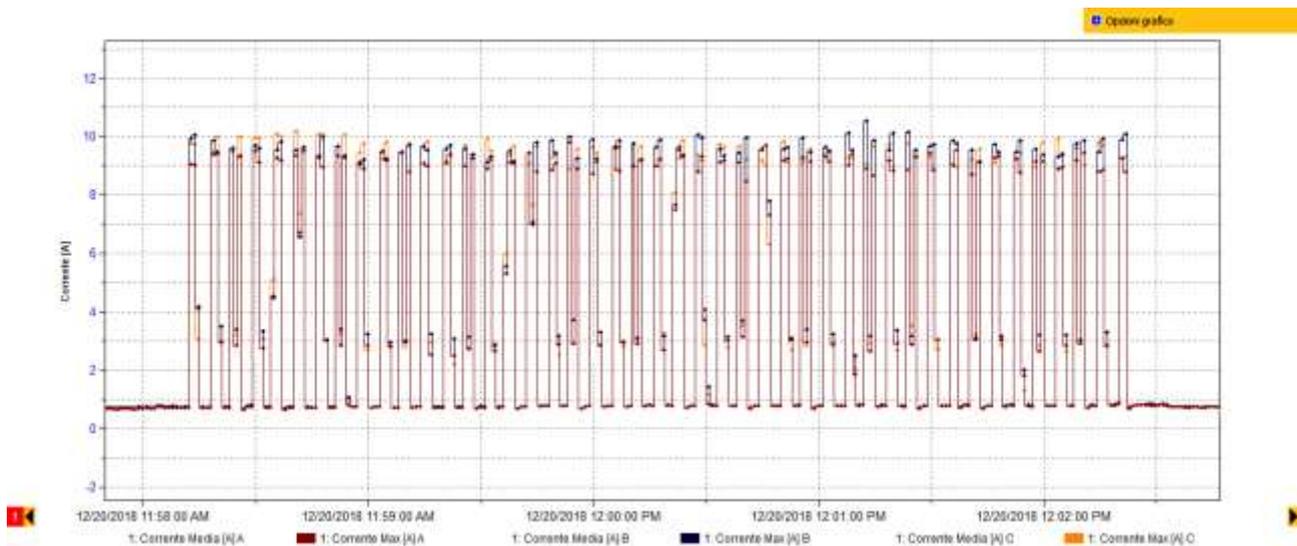


Figura 15. Clinchiatura: Correnti in ingresso alla macchina

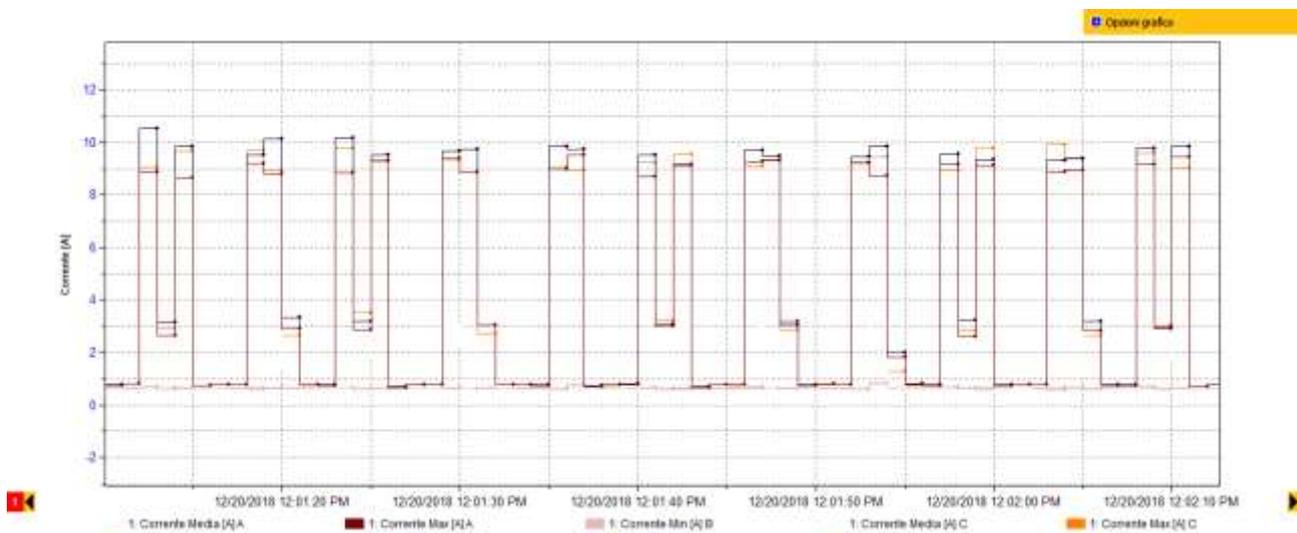


Figura 16. Clinchiatura: Dettaglio delle correnti in ingresso alla macchina

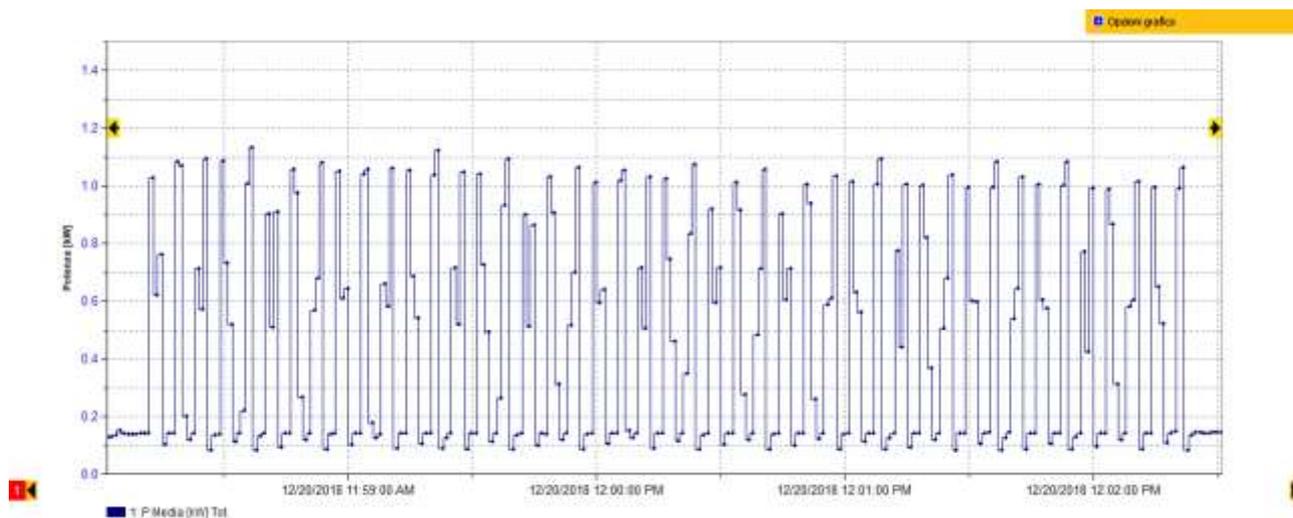


Figura 17. Clinciatura: Grafico potenza

La Figura 17 mostra il grafico della potenza durante lo stesso processo. È possibile misurare valori di potenza attiva nell’intorno 1kW-1.2kW.

### 2.3 Progetto dell’adeguamento hardware e software del sistema di misura

Il sistema di misura messo a punto nel corso dei tre anni del progetto permette 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, FSW, ecc.). Le acquisizioni vengono realizzate con una frequenza di campionamento pari a 10kHz che garantisce la visualizzazione anche di transitori veloci.

Per quello che riguarda la misura delle grandezze elettriche in uscita dalla macchina saldatrice (es. tensione e corrente sulla torcia nel caso di saldatura ad arco), queste vengono realizzate mediante apposite sonde di misura. Allo stato attuale il sistema di misura è stato equipaggiato con una sonda in tensione, protetta da sovratensioni fino ad un valore di tensione massimo pari a 3 kV, e con due sonde di corrente con fondo scala pari a rispettivamente a 50 A e 300 A.

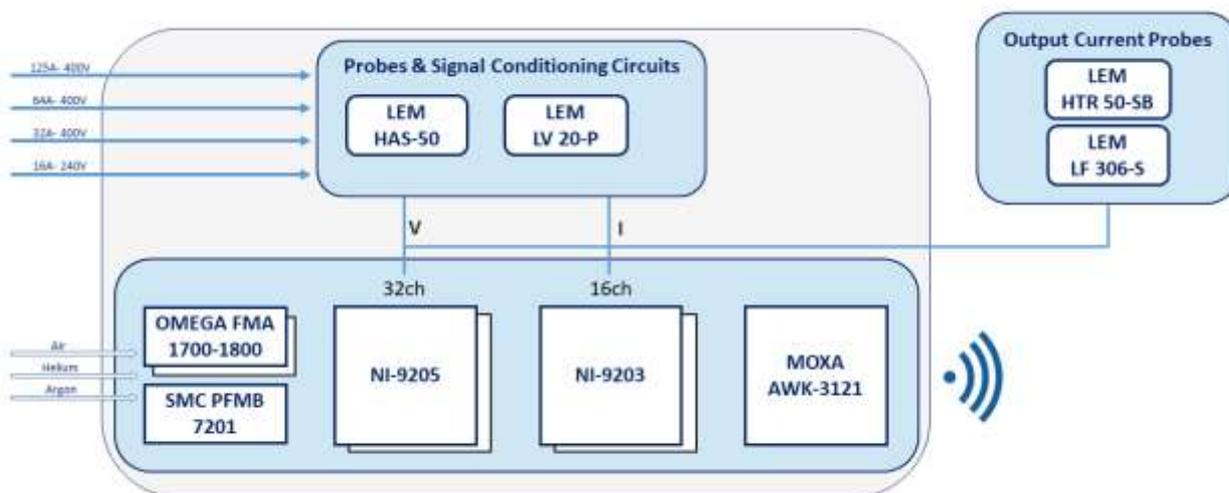


Figura 18. Schema a blocchi del sistema di misura

### 2.3.1 Analisi delle criticità

Lo studio effettuato sulle caratteristiche delle macchine saldatrici di tipo resistivo nonché l'attività di misura svolta presso il C.R. FCA di Melfi (PZ) ha evidenziato come il sistema, pur essendo in grado di acquisire correttamente i transitori di corrente dal punto di vista dell'accuratezza temporale, non dispone di sensori di corrente con una portata sufficientemente elevata. Per ampliare l'intervallo delle misure di corrente sarebbe necessario utilizzare altra tipologia di sonde in grado di misurare correnti in fino ad un valore massimo di qualche decina di kA.

Nessun problema è invece emerso nell'utilizzo del sistema di misura con il processo di clinciatura per il quale è sufficiente acquisire la sola misura degli assorbimenti elettrici in ingresso.

Al fine quindi ampliare il set di macchine saldatrici sulle quali utilizzare il sistema e di rendere possibile la misura anche su macchine saldatrici di tipo resistivo è necessario procedere ad un adeguamento del sistema sia attraverso un'integrazione hardware del sistema che realizzando il conseguente aggiornamento del software di acquisizione.

### 2.3.2 Definizione delle specifiche e progetto dell'adeguamento del sistema di misura

A questo proposito, forti dell'esperienza maturata nel corso delle sessioni di misura presso il C.R. FCA, sono state definite le specifiche e, di conseguenza, delineato un progetto di adeguamento del sistema di misura.

L'adeguamento hardware del sistema prevede la definizione di ulteriori ingressi di segnale che permettano la misura della corrente in uscita della macchina saldatrice e predisposte per l'utilizzo di sonde amperometriche di tipo Rogowski. Tali sonde, utilizzate per la misura di correnti AC, permettono di valutare transienti ad alta velocità, correnti pulsate o correnti sinusoidali (non permette la misura di grandezze in DC). L'utilizzo di tale tipologia di sonde rappresenta un giusto compromesso presentando ampio range di misura e buone caratteristiche meccaniche (è una sonda di tipo *split core*) che ne permette un'agevole installazione: è caratterizzata infatti da un sensore flessibile che può essere facilmente avvolto attorno al conduttore. Dall'analisi delle specifiche tecniche di varie sonde disponibili sul mercato, la scelta è caduta sulla sonda CWT – 600 (Power Electronic Measurements Ltd) mostrata nella Figura 19. Questa è una sonda per misure in corrente alternata con banda compresa tra 0.1Hz e 16 MHz in grado di misurare correnti di picco fino a 60kA. Le principali caratteristiche della sonda sono riportate nella Tabella 4. Presenta un'uscita compresa fra +/-6V che la rende compatibile per misure con un oscilloscopio o con altri sistemi di acquisizione (è direttamente collegabile ad uno degli ingressi della scheda NI 9205). È provvista, inoltre, di un circuito di interfaccia necessario per l'amplificazione ed il filtraggio del segnale acquisito.

<b>Peak current</b>	60kA peak
<b>Bandwidth (-3dB)</b>	0.1Hz – 16MHz (300mm coil) 10MHz (700mm coil)
<b>Output</b>	±6.0V peak
<b>Accuracy (typ.)</b>	Calibrated to ±0.2% with conductor central in the Rogowski loop
<b>Coil Lengths</b>	300, 500, 700 or 1000mm
<b>Coil thickness</b>	8.5mm max.
<b>Peak coil insulation</b>	10kV peak
<b>Operating temperature range</b>	0°C to +40°C ( <i>Integrator electronics</i> ) -20°C to +100°C ( <i>Coil and cable</i> )

Tabella 4

Per quello che riguarda l'installazione su una saldatrice di tipo resistivo, si ritiene che una possibile soluzione potrebbe essere quella di posizionare, opportunamente fissata, tale sonda direttamente intorno alla pinza di saldatura. Infatti, poiché il calore generato nel corso del processo di saldatura è praticamente tutto concentrato all'interno del pezzo e, considerando anche il fatto che le pinze sono provviste di un sistema di refrigerazione, la temperatura raggiunta dalla sonda durante l'acquisizione non dovrebbe essere in grado di superare il massimo valore consentito ( $T_{max} 100^\circ$ ).



Figura 19. Sonda di Rogowski CWT 600 (Power Electronic Measurements Ltd)

### 3 Conclusioni

L'attività di ricerca svolta in questi tre mesi ha riguardato la valutazione dell'utilizzo del sistema di misura portatile realizzato nel corso dei tre anni della collaborazione nello specifico settore industriale dell'*automotive*. Il sistema è stato utilizzato con successo per quei sistemi di saldatura (sistema ad arco e laser) per il quale era stato inizialmente progettato. L'utilizzo del sistema per le misure su saldatrici di tipo resistivo ha mostrato delle limitazioni di tipo hardware dovute essenzialmente all'alto valore delle correnti utilizzate per il processo e non misurabili con la tipologia di sonde a disposizione da parte del sistema. Grazie alle caratteristiche di alta versatilità con cui è stato progettato, il sistema può essere adeguato alle nuove esigenze con semplici modifiche. In particolare, è stata definita un'integrazione che prevede l'implementazione di ulteriori canali di ingresso collegabili a sonde (tipo Rogowski) che consentono la misura di correnti con una dinamica di ingresso più ampia.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] J. Zurschmeide, "Automotive Welding: A Practical Guide", 2009
- [2] Stavrov, D. and Bersee, H.E.N., 2005. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(1), pp.39-54.
- [3] Gawrysiuk, W., 2006. Technology of the arc-braze welding process. Recommendations and examples of industrial applications. *Welding international*, 20(1), pp.10-16.
- [4] Govindan, P. and Sankar, S., 2013. Modeling of resistance spot welding process—a review. *BEST: International Journal of Management, Information Technology and Engineering*, 1(3), pp.67-78.
- [5] Htay, M.M., Sun, L.B. and Khaing, M.A.S., 2012. Quality Management Information in Auto Manufacturing Process. In *Advanced Materials Research* (Vol. 529, pp. 436-440). Trans Tech Publications.
- [6] Stavrov, D. and Bersee, H.E.N., 2005. Resistance welding of thermoplastic composites-an overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(1), pp.39-54.
- [7] [http://www.pemuk.com/Userfiles/CWT/cwt\\_0318.pdf](http://www.pemuk.com/Userfiles/CWT/cwt_0318.pdf)

## 5 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.