



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di un sistema di monitoraggio wireless
per il rilievo dell'energia complessiva assorbita
dalla rete e delle energie utilizzate per vari
processi di saldatura e supporto all'analisi di
efficienza dell'accoppiamento energia-materia

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

TITOLO: DEFINIZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO WIRELESS PER IL RILIEVO DELL'ENERGIA COMPLESSIVA ASSORBITA DALLA RETE E DELLE ENERGIE UTILIZZATE PER VARI PROCESSI DI SALDATURA E SUPPORTO ALL'ANALISI DI EFFICIENZA DELL'ACCOPIAMENTO ENERGIA-MATERIA

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

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: D3 "Efficienza energetica nel settore industria"

Obiettivo: D. Impiego tecnologie elettriche nei processi industriali

D.1 Efficientamento dei processi di saldatura industriale

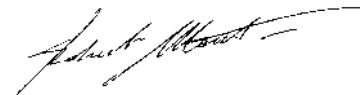
Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Definizione di un sistema di monitoraggio wireless per il rilievo dell'energia complessiva assorbita dalla rete e delle energie utilizzate per vari processi di saldatura e supporto all'analisi di efficienza dell'accoppiamento energia-materia"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. F. Cognini



Responsabile scientifico Università degli Studi di Roma "Tor Vergata": Prof. Roberto Montanari



Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 RISULTATI DELLE MISURE PRELIMINARI SU MACCHINA SALDATRICE TELWIN SUPERIOR 300 CE (TIG).....	9
2.2 PROGETTO E DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI MISURA	12
2.2.1 NI 9225	14
2.2.2 NI 9205	14
2.2.3 NI 9203	15
2.2.4 NI cDAQ-9188 NI COMPACTDAQ 8-SLOT ETHERNET CHASSIS.....	15
2.3 SETUP PER MACCHINA SALDATRICE TIG TELWIN SUPERIOR 300 CE.....	16
2.4 SETUP PER MACCHINA SALDATRICE TIG NERTAMATIC 450	18
2.5 SETUP PER MACCHINA SALDATRICE A FASCIO ELETTRONICO	19
2.6 SETUP PER MACCHINA SALDATRICE LASER YLS 2000	20
2.7 SUPPORTO ALL'ANALISI DELL'EFFICIENZA DI SALDATURA MEDIANTE L'ANALISI GEOMETRICA DI CORDONI DI SALDATURA EFFETTUATI CON DIFFERENTI PROCESSI (EBW E LASER).	21
2.7.1 SALDATURA LASER DELLA LEGA DI ALLUMINIO AA6082	22
2.7.2 SALDATURA DI P91 AL FASCIO ELETTRONICO	24
2.7.3 SALDATURA LASER DELL'ACCIAIO AL CARBONIO S460	28
2 CONCLUSIONI.....	29
3 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	30
4 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	32

Sommario

Gli obiettivi dell'attività del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" sono:

1: "Progettazione di un sistema di valutazione delle perdite energetiche wireless":

2: "Analisi di efficienza dell'accoppiamento energia -materia".

Complessivamente l'obiettivo finale dell'attività di ricerca è la realizzazione di un sistema di misura ad alte prestazioni in grado di ottenere un'approfondita valutazione delle prestazioni energetiche su macchine saldatrici e generatori di differente tipo. Preliminarmente è stata esaminata la letteratura scientifica dove sono presenti lavori sia sperimentali che teorici e di modellazione riguardanti diversi processi tecnologici di saldatura. Da questo studio non è tuttavia emerso un approccio sistematico al problema come quello proposto in questo progetto, che sembra essere di assoluta originalità.

Il primo passo, in accordo con ENEA, è stato quello di definire un parametro in grado di caratterizzare l'efficienza di un qualsiasi processo di saldatura per fusione con la valutazione anche delle diverse efficienze di accoppiamenti energia materia. Questo parametro che in prima approssimazione è stato definito come V/E , il rapporto tra volume totale del metallo fuso e risolidificato (V) e l'energia spesa nel processo (E) (energia prelevata dalla rete, indipendentemente dalla frazione realmente utilizzata per fondere il metallo).

Il lavoro del DII è stato concentrato sulla progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio della linea di trasmissione per individuare dove hanno luogo le perdite per l'analisi energetica sia del generatore e degli ausiliari. Al fine di garantire un buon grado di flessibilità ed espandibilità, si è scelto un sistema di misura modulare costituito dallo chassis National Instruments Compact DAQ 9188 capace di ospitare fino a 8 schede di acquisizione di diverso tipo e, al contempo, fornire un'opportuna connessione verso un PC remoto. Il sistema è controllato mediante un software in linguaggio LabView, appositamente sviluppato, che permette la visualizzazione, la memorizzazione dei risultati nonché la loro esportazione in formati compatibili con i più comuni sistemi di calcolo (es. Excel, Matlab, ecc.).

Il sistema di misura è stato progettato ad hoc avendo valutato la non applicabilità delle tradizionali metodologie di misura basate su strumenti quali wattmetro o power analyzer, non idonei per la natura non periodica e non sinusoidale delle grandezze oggetto della misura ; inoltre, si sono prese in considerazione le peculiari caratteristiche delle misure da effettuare, conseguenza sia della tipologia dei segnali elettrici da acquisire che delle differenze nella realizzazione dei vari processi di saldatura. I modelli dei sensori di corrente, tutti del tipo ad effetto Hall, sono stati scelti sulla base del valore di corrente nominale da misurare e di quella massima misurabile. Si è optato per tale topologia di sensori anche per le misure di correnti in AC poiché garantiscono maggiore accuratezza e migliore banda passante rispetto ai tradizionali trasformatori di corrente. Per quanto riguarda le misure di tensione in AC, si è preferito impiegare una

scheda di acquisizione (NI 9225) in grado di sopportare le tensioni della rete trifase. Il sistema è composto dai moduli della National Instruments scelti in modo da assicurare un sample rate sufficientemente elevato per garantire una buona definizione dei segnali da acquisire e un sufficiente numero di canali di acquisizione, tenendo conto anche di successive espansioni.

Sono stati ottenuti alcuni risultati preliminari su macchina saldatrice Telwin Superior 300 CE (TIG), utilizzando la macchina in configurazione SMAW con elettrodi rutilici da 2.5 mm di diametro, impostando una corrente di base tra 60 e 140 A ed un valore di Arc Force al 20%. Il sistema di misura è stato realizzato con una scheda di acquisizione NI myRIO 1900 (National Instruments) di prestazioni non molto elevate (A/D 12 bit risoluzione con un sample rate massimo di 500 kS/s) ma che ha permesso uno studio preliminare degli andamenti e dei valori delle grandezze elettriche oggetto del presente studio. In particolare, per la misura delle correnti di fase è stato utilizzato un sensore TA151110 (Sirio Inductive Components) con rapporto di spire di 250 ed una resistenza da 47Ω che ha permesso di interfacciare il sensore ad uno degli ingressi analogici della scheda di acquisizione. Sono state effettuate diverse misure, variando l'impostazione della corrente di saldatura e lasciando costanti i valori di Arc Force (20%) e il diametro dell'elettrodo (2.5 mm). L'intervallo di tempo misurato è funzione della singola saldatura. Si è notato che, all'inizio ed alla fine del processo di saldatura, si presenta un innalzamento della corrente assorbita (l'effetto è più accentuato quando la corrente impostata è più bassa):

- Nella fase iniziale, l'innesco dell'arco è provocato dal corto circuito dovuto al breve contatto pezzo-elettrodo.
- Nella fase finale l'operatore allontana progressivamente l'elettrodo dalla zona di saldatura, quindi la macchina tende a erogare più corrente per compensare la maggiore lunghezza dell'arco fino all'estinzione dell'arco.

Per quanto riguarda l'analisi dell'efficienza di accoppiamento energia - materia, il DII ha supportato ENEA con la messa a punto di procedure per la corretta valutazione della dimensione della zona fusa (ZF). I materiali trattati, forniti da ENEA sono stati, acciai da costruzione strutturali (S460 J0), acciai per caldaieria ad elevate prestazioni (P91), e leghe di alluminio da costruzione (AA6082). I giunti sono stati prodotti mediante Electron Beam, Laser e TIG.

Si è proceduto preliminarmente all'individuazione degli attacchi chimici idonei per evidenziare la zona fusa e la zona termicamente alterata (ZTA) dei giunti saldati. Dopo una serie di test con diversi reagenti per la lega di alluminio il Poulton (12 ml HCl, 6 ml HNO₃, 1 ml HF, 10 ml H₂O) ha evidenziato i risultati migliori, mentre per l'acciaio martensitico P91 l'attacco più adatto è risultato il Vilella (5 ml HCl, 100 etanolo, 1 g acido picrico) e per l'acciaio S460 il classico Nital 5%.

I campioni lucidati meccanicamente e sottoposti a macro-etching con i reagenti indicati sono stati esaminati mediante ispezione visiva (per individuare eventuali difetti macroscopici), microscopia ottica. Il

volume V del metallo fuso e risolidificato è stato determinato dall'analisi d'immagine eseguita sulla sezione trasversale del giunto. Sono stati inoltre misurati profili di microdurezza nelle sezioni trasversali dei giunti lungo e attraverso il cordone. Queste prove permettono di fare una prima stima dei flussi di calore sulla base degli effetti indotti sul metallo in ZF e ZTA.

Le sezioni trasversali analizzate riguardano tutti processi consolidati per i quali ENEA ha dimostrato preliminarmente l'efficacia del processo.

1 Introduzione

Il problema dei consumi energetici nei processi di saldatura e dei relativi costi ha acquisito nel tempo un'importanza via via crescente; negli ultimi venti anni agli aspetti strettamente economici si è aggiunta anche una maggior sensibilità per quanto riguarda l'inquinamento e la sostenibilità ambientale. La ricerca scientifica stimolata da queste esigenze ha prodotto una serie di lavori sia sperimentali che teorici e di modellazione (vedi per esempio ref. [1-16]) riguardanti i diversi processi tecnologici di saldatura.

Obiettivo della nostra attività è la realizzazione di un sistema di misura ad alte prestazioni in grado di ottenere un'approfondita valutazione delle prestazioni energetiche su macchine saldatrici. Le principali macchine per la saldatura si possono distinguere in macchine portatili e macchine industriali (industria meccanica leggera e pesante). Alcuni esempi sono riportati di seguito.

1. Macchine portatili

1. MMA
2. TIG
3. MIG Brazing (MIG/MAG)

2. Macchine industriali (Industria meccanica medio – leggera)

- MIG/MAG
- Welding automation
- Laser (varie sorgenti)
- Spot welding (TIG and MMA)

3. Macchine industriali (Industria meccanica pesante)

- Submerged arc welding
- Plasma arc welding
- Friction Welding
- Explosion welding (MIG/MAG)

Per poter intervenire sul processo di saldatura, comunque esso sia realizzato, al fine di ridurre i consumi energetici è necessario preliminarmente valutare la sua efficienza energetica. Pertanto come primo punto della nostra attività è stato definito un parametro in grado di caratterizzare l'efficienza di un qualsiasi processo di saldatura. Questo parametro è V/E , il rapporto tra volume totale del metallo fuso e risolidificato V e l'energia spesa nel processo E .

I diversi processi di saldatura presentano caratteristiche anche molto differenti tra loro, per esempio in alcuni casi la giunzione è effettuata in una singola passata mentre in altri casi richiede più passate per cui ci sono porzioni di materiale che fondono e solidificano più volte nel corso del processo. Al fine della valutazione di V si considera solo il prodotto finale, cioè il volume del cordone di saldatura.

Per quanto riguarda E si considera invece l'energia prelevata dalla rete, indipendentemente da quanta di questa energia viene realmente utilizzata per fondere il metallo.

Tipologie diverse di saldatura implicano forme diverse del cordone e quindi volumi diversi di metallo fuso. In particolare le saldature ad alta densità di energia (laser e fascio elettronico) permettono di realizzare cordoni più stretti rispetto ad altre tecniche di saldatura come per esempio TIG. Questo concetto è mostrato in modo chiaro da Fig. 1, che mette a confronto i cordoni di saldatura realizzati con fascio elettronico su una superlega a base nichel (IN792 DS) e mediante TIG su un acciaio martensitico (Eurofer).

Pertanto tipologie diverse di saldatura implicano intrinsecamente efficienze energetiche diverse. Partendo da questa constatazione di base il problema generale che si pone il presente lavoro di ricerca è ridurre il consumo di energia in ogni tipologia di processo considerando le specifiche caratteristiche di ognuna. Per realizzare questo obiettivo si debbono rendere minime le perdite energetiche, cioè la quantità di energia che, una volta assorbita dalla rete, viene dissipata in altro modo e non contribuisce direttamente alla fusione del metallo. A tal fine è necessario analizzare passo passo la linea lungo la quale si trasferisce l'energia per individuare le perdite e dove esse hanno luogo per poter poi provvedere in modo opportuno. Il monitoraggio della linea di trasmissione è quindi fondamentale allo scopo prefissato.

Dopo aver preso in considerazione le diverse tecniche di saldatura e le diverse tipologie di macchine disponibili in commercio, si è iniziato lo studio delle diverse architetture hardware tipiche di ogni specifica tecnica. In primo luogo, è emerso che tali macchine presentano, dal punto di vista dell'assorbimento elettrico dalla rete, un comportamento molto diverso fra loro e che è ovviamente legato alla specifica tecnica utilizzata per il processo di saldatura.

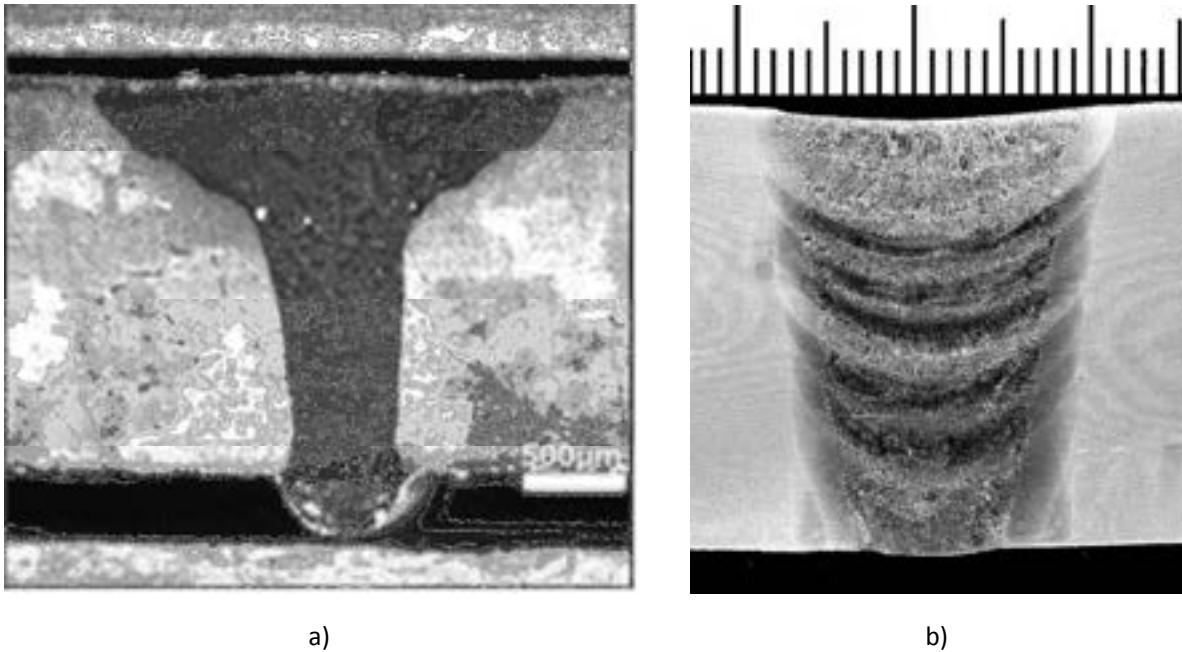


Fig.1- Cordone di saldatura realizzato con fascio elettronico sulla superlega IN792 DS (a) e mediante TIG sull'acciaio martensitico Eurofer (b).

L'unità operativa del DII all' Università di Roma "Tor Vergata", che ha competenze sia elettroniche (S. Bifaretti e V. Bonaiuto) che metallurgiche (R. Montanari e A. Varone), nell'arco di questo piano Annuale di Realizzazione, ha mirato il suo lavoro principalmente l'analisi di tre tipi differenti di processi e quindi generatori di Saldatura, TIG, Fascio elettronico e fascio laser, questi ultimi disponibili presso il CR ENEA di Casaccia. La comprensione dei differenti tipi di generatori e l'analisi del processo di fusione è stato necessario per identificare lo schema di ottimale di un sistema di acquisizione adattabile a differenti generatori e processi che sia in grado sia di monitorare i consumi dalla rete per i generatori principali e per i sistemi ausiliari, sia per monitorare le energie messe in gioco sui vari tipi di Teste/torche di saldatura, sia in specifici punti intermedi in grado di monitorare e mappare i punti /componenti in cui si verificano le perdite energetiche e che quindi possono essere soggetti a interventi di efficientamento.

A questo proposito, al fine di dimensionare in modo corretto il sistema di misura, lo studio è iniziato effettuando alcune misure preliminari su una macchina portatile di tipo TIG. L'analisi di tali misure e l'analisi tecnica delle diverse architetture delle macchine hanno suggerito il progetto e il relativo dimensionamento di un sistema di misura che dovrà essere necessariamente ad hoc avendo valutato la non applicabilità delle tradizionali metodologie di misura basate su strumenti quali wattmetro o power analyzer che sono risultati non idonei per la natura non periodica e non sinusoidale delle grandezze oggetto della misura [17-18].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Risultati delle misure preliminari su macchina saldatrice Telwin Superior 300 CE (TIG)

Per questa prima sessione di misure è stata utilizzata la saldatrice SMAW/TIG Superior 300CE (TELWIN SpA). La macchina presenta un'alimentazione di tipo trifase e dispone di un sistema di regolazione a inverter. Può erogare in uscita fino a 300 A DC con un rapporto di intermittenza del 35%, con una tensione massima di picco a vuoto pari a 92 V e può assorbire fino ad 11 kW; può montare elettrodi fino a 6 mm di diametro.

Abbiamo utilizzato questa macchina in configurazione SMAW con elettrodi rutilici da 2.5 mm di diametro, impostando una corrente di base tra 60 e 140 A (il *range* consigliato è 60-110 A per il diametro di elettrodo utilizzato) ed un valore di *Arc Force* (comportamento dinamico della macchina: la sovracorrente di corto circuito assume valori tra 0 ed una percentuale compresa tra la corrente di base ed il valore massimo di 390A) fissato al 20%.

Per le misure è stato utilizzato un Oscilloscopio Tektronix (TPS 2024) a quattro canali isolati ed è stato realizzato un sistema di *log* delle grandezze elettriche mediante la scheda di acquisizione NI myRIO 1900 (National Instruments). In particolare, tale scheda pur presentando prestazioni non molto elevate (un unico ADC (Analog to Digital Converter) con risoluzione 12 bit e un sample rate massimo di 500 kS/s che è però moltiplicato tra i diversi canali di ingresso) ha però permesso l'analisi preliminare degli andamenti e dei valori delle grandezze elettriche oggetto del presente studio. In particolare, per la misura delle correnti di fase è stato utilizzato un sensore TA151110 (Sirio Inductive Components) con rapporto di spire di 250 ed una resistenza da 47 Ω che ha permesso di interfacciare il sensore ad uno degli ingressi analogici della scheda di acquisizione (Fig. 2). Per la misura invece delle correnti all'interno della macchina (in uscita al trasformatore indicato con il numero 3 in Fig.2) è stato sfruttato il sensore TA-331210 (UTK Components) disponibile all'interno della macchina.

Sono state effettuate diverse misure sulla corrente di ingresso alla macchina variando, sul pannello, l'impostazione della corrente di saldatura ma lasciando costanti i valori di *Arc Force* (20%) e il diametro dell'elettrodo (2.5 mm).

In figura 3 è possibile osservare il dettaglio delle forme d'onda (circa 30ms), acquisite mediante oscilloscopio, della corrente in uscita (colore ciano – punto misura B in Fig.2) e di una fase della corrente di ingresso (colore verde – punto misura B in Fig.2) della macchina saldatrice. La curva gialla, invece, rappresenta un'ulteriore andamento della stessa corrente di ingresso misurata con un diverso trasduttore ai fini della calibrazione.

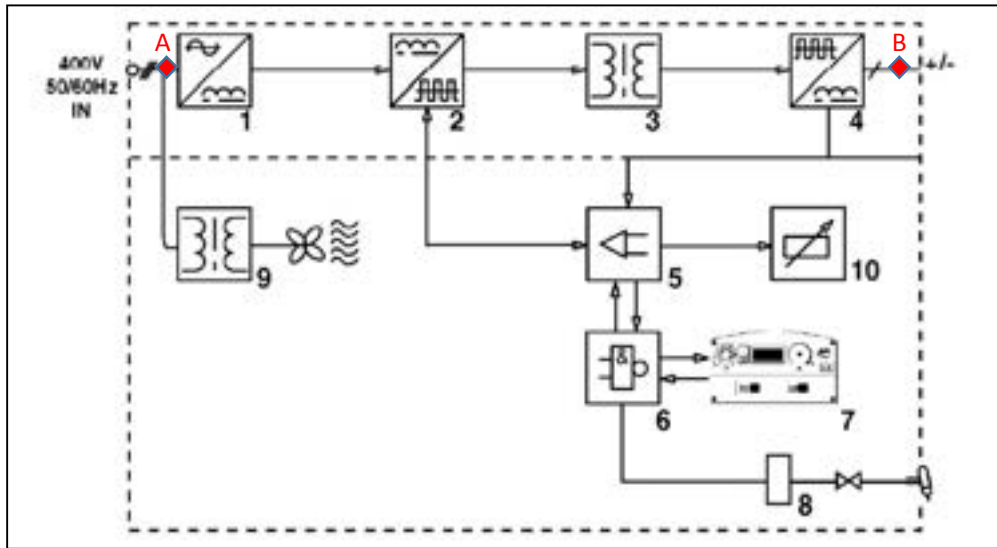


Fig. 2- Schema di funzionamento Telwin Superior 300 CE; sono evidenziati in rosso i punti di misura.

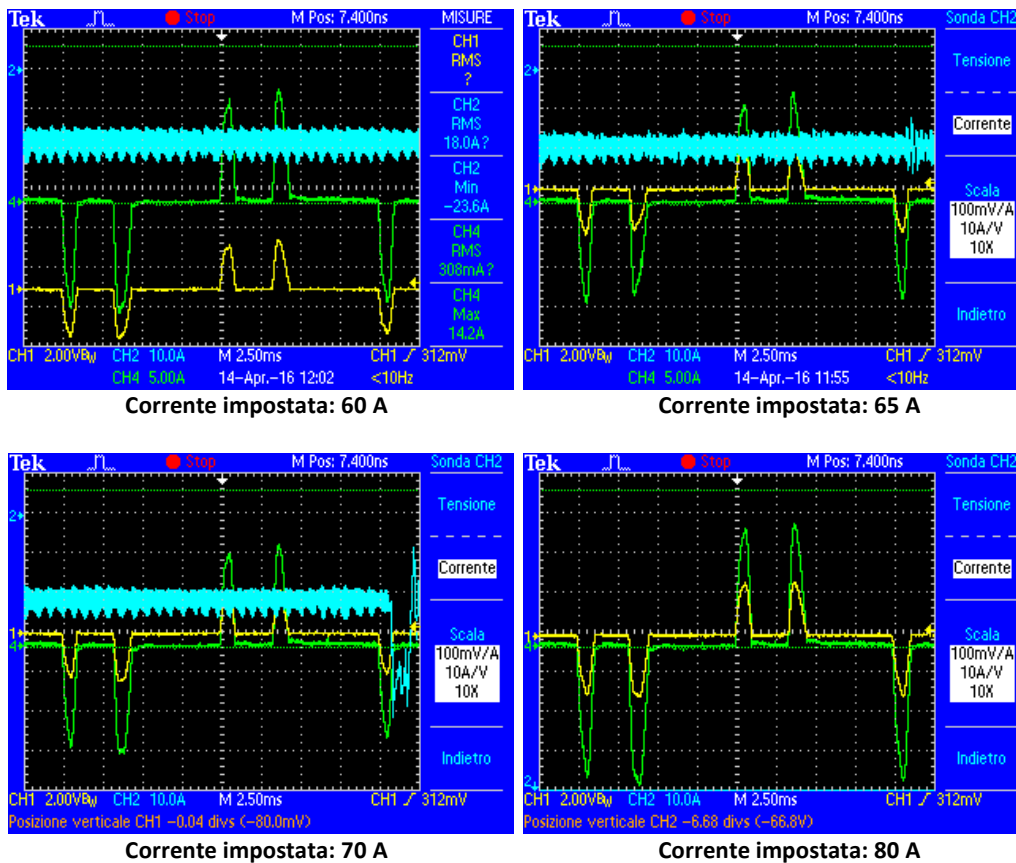
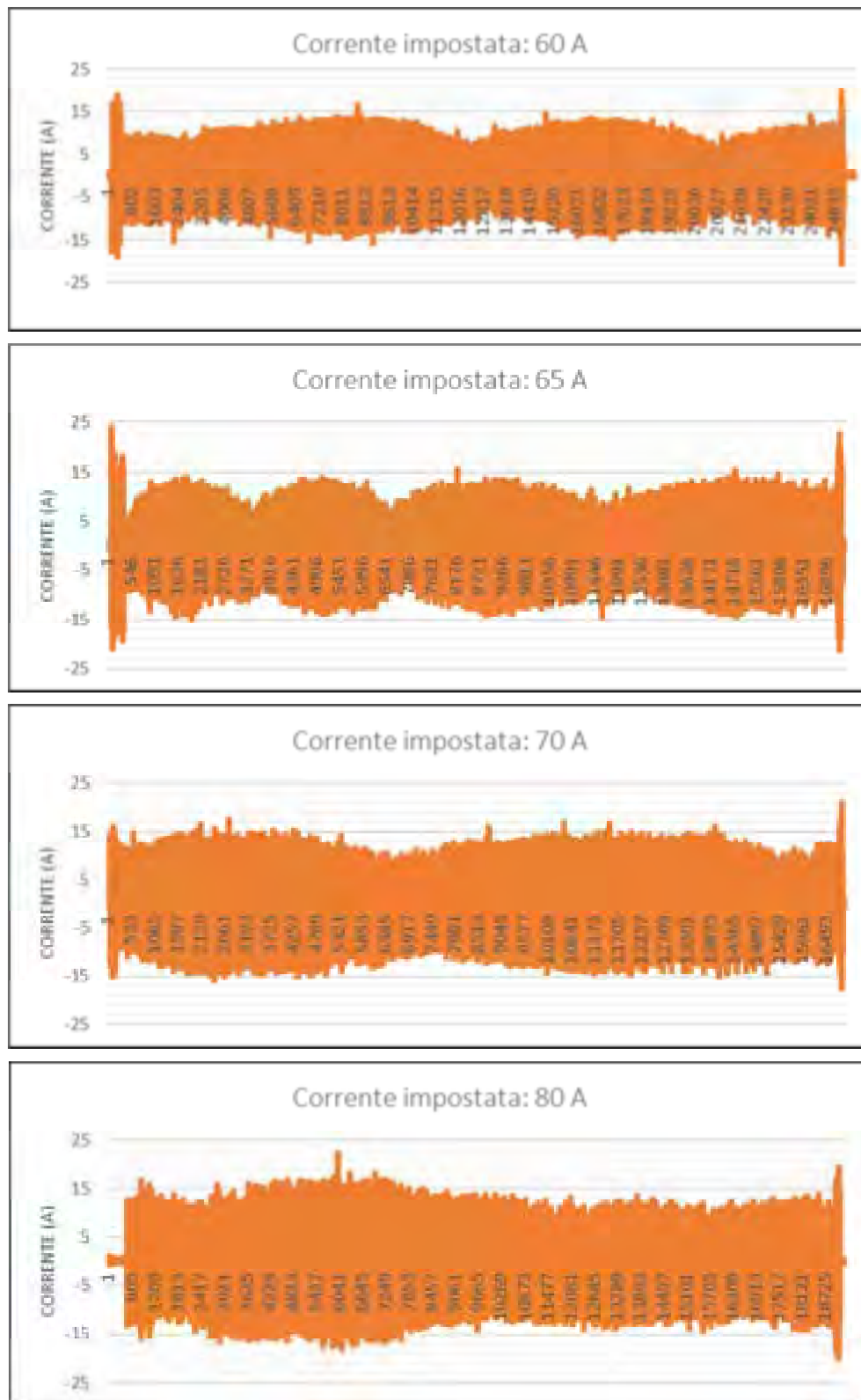


Fig. 3- Misura di corrente (ciano) di uscita, di ingresso alla macchina (verde e giallo – solo una fase)

La figura 4 mostra un'acquisizione, della durata di circa 20 s realizzata con il sistema di misura MyRio, di una fase della corrente di ingresso per quattro valori diversi, impostati sul pannello della macchina, della corrente di uscita. L'intervallo di tempo misurato è funzione della durata di una singola saldatura.



Si può notare, all'inizio ed alla fine del processo di saldatura, la presenza di un innalzamento della corrente assorbita (l'effetto è più accentuato quando la corrente impostata è più bassa):

- Nella fase iniziale, l'innesco dell'arco è provocato dal corto circuito dovuto al breve contatto pezzo-elettrodo.
- Nella fase finale l'operatore allontana progressivamente l'elettrodo dalla zona di saldatura, quindi la macchina tende a erogare più corrente per compensare la maggiore lunghezza dell'arco fino all'estinzione dell'arco.

2.2 Progetto e dimensionamento del sistema di misura

Al fine di garantire un buon grado di flessibilità ed espandibilità, si è scelto di realizzare un sistema di misura modulare montato su uno chassis National Instruments Compact DAQ 9188 capace di ospitare fino a 8 schede di acquisizione di diverso tipo e, al contempo, fornire connessioni wired (Ethernet) e wireless (IEEE 802.11g) verso un PC remoto (Fig. 5). La scelta delle schede di acquisizione è stata effettuata in base al numero e al tipo di misuratori, sia di tensione che di corrente, da applicare ai terminali di ingresso e uscita della macchina e, ove ritenuto opportuno, anche al suo interno.

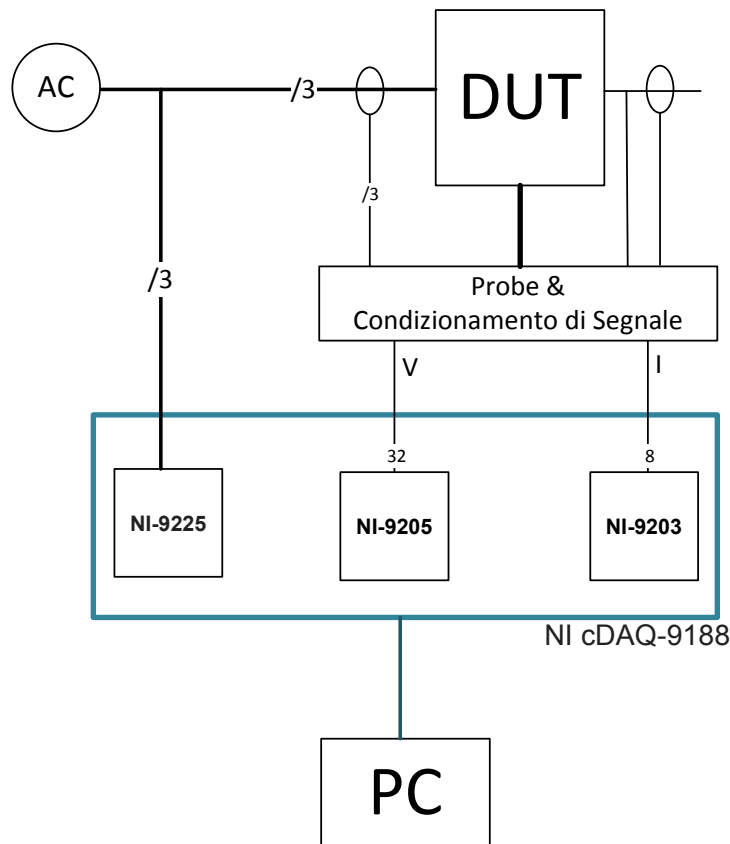


Fig. 5 - Schema logico del sistema di misura

Il sistema sarà controllato mediante un Personal Computer ed un software in linguaggio LabView, appositamente sviluppato. Tale software permetterà la visualizzazione, la memorizzazione dei risultati nonché la loro esportazione in formati compatibili con i più comuni sistemi di calcolo (es. Excel, Matlab, ecc.). In particolare, a causa delle peculiari caratteristiche delle misure da effettuare, conseguenza sia della tipologia dei segnali elettrici da acquisire che delle differenze nella realizzazione del processo di saldatura tipico della specifica macchina in esame, il sistema di misura deve essere progettato avendo cura di rispettare opportune specifiche tecniche.

Nella Tabella 1 sono indicati i modelli dei sensori di corrente, tutti del tipo ad effetto Hall, scelti sulla base del valore di corrente nominale da misurare e di quella massima misurabile. Si è optato per tale topologia di sensori anche per le misure di correnti in AC poiché garantiscono maggiore accuratezza e migliore banda passante rispetto ai tradizionali trasformatori di corrente. Per quanto riguarda le misure di tensione in AC, si è preferito impiegare una scheda di acquisizione (NI 9225) in grado di sopportare le tensioni della rete trifase.

Collocazione	Modello	Range	Accuratezza	Uscita	Diametro max cavo (mm)
Ingresso AC trifase	LEM HAS-50 PANEL MOUNT	nom: $\pm 50A$ max $\pm 150A$	$<1\%$ @IPN =0.5A	Tensione $\pm 4V$ closed-loop	20.4 x 10.4
Pompe (a vuoto o diffusione) Fascio elettronico	LEM HTR 50-SB Split core	nom: $\pm 50A$ max $\pm 100A$	$<2\%$ @IPN =1A	Tensione $\pm 4V$ Open loop	21
Uscita DC TIG	LEM LF 306-S PANEL MOUNT	nom: $\pm 300A$ max $\pm 500A$	0.4% @IPN = 1.2A	Corrente nom 150 mA Max 250mA	24.5

Tabella 1

Successivamente, sono stati individuati i moduli di acquisizione scelti in modo da assicurare un sample rate sufficientemente elevato in grado di garantire una buona definizione dei segnali da acquisire e un numero sufficiente di canali di acquisizione, tenendo conto anche di successive espansioni. Il sistema è composto da moduli della National Instruments le cui principali caratteristiche sono descritte nella Tabella 2 e la cui descrizione è riportata nei seguenti sotto paragrafi.

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

Tabella 2

2.2.1 NI 9225

Il modulo di ingresso analogico della Serie C NI 9225 (Fig. 6) dispone di una gamma di misurazione completa di 300Vrms per applicazioni di misura ad alta tensione, come la misura della potenza, la valutazione della power quality, le prove di celle a combustibile, ecc. Dispone di tre canali di ingresso di tipo differenziale che permettono l'acquisizione dei transitori e l'analisi armonica con campionamento con una risoluzione pari a 24 bit e simultaneo su tutti i canali (il campionamento è possibile fino ad un valore massimo di 50 kS/s per canale). Inoltre, è possibile prevenire loop di massa in quanto riesce a garantire un isolamento di 600 Vrms canale-canale tra i tre canali del modulo. Il modulo NI 9225 utilizza inoltre una combinazione di filtri di tipo analogico e digitale per fornire una rappresentazione accurata di segnali nella banda di interesse e attenuando opportunamente tutti i segnali fuori banda.



Fig. 6 - NI 9225

2.2.2 NI 9205

Il NI 9205 (Fig. 7) è un modulo della Serie C per l'utilizzo con qualsiasi sistema CompactDAQ o CompactRIO. Dispone di 32 canali di ingresso e ciascuno dei canali presenta un range di tensione di ingresso programmabile di ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V e ± 10 V. Tali canali di ingresso possono essere configurati come differenziali o *single-ended*. Per garantire la protezione durante i transitori dovute a sovratensioni, il NI 9205 include appositi circuiti di protezione tra i diversi canali di ingresso ed il morsetto comune (COM) di ± 30 V. Inoltre, il NI 9205 include anche una doppia barriera di isolamento canale-terra-terra per sicurezza e per garantire l'immunità al rumore. Il modulo è inoltre garantito per 1.000 Vrms di protezione da sovratensione in transitorio. Tutti i canali condividono un amplificatore per strumentazione a guadagno programmabile e sono multiplati ad un unico ADC (Analog to Digital Converter) a 16 bit e una frequenza massima di campionamento (complessiva per tutti i canali) pari a 250kS/s. Presenta un'accuratezza di misura (a fondo scala) che varia da $174 \mu\text{V} @ \pm 0.2\text{V}$ fino a $6,230 \mu\text{V} @ \pm 10\text{V}$.



Fig. 7- NI 9205

2.2.3 NI 9203

Il NI 9203 (Fig. 8) è un modulo C Series DAQ con 8 canali di ingresso analogici per applicazioni di controllo e monitoraggio ad alte prestazioni. Presenta otto ingressi programmabili nel range di ± 20 mA oppure 0 mA fino a 20 mA, con risoluzione a 16 bit, e una frequenza di campionamento massima di 200 kS/s per ciascun canale. Per la protezione dai transitori di segnale, il modulo NI 9203 presenta un doppio isolamento tra canale e ground (250 Vrms isolamento) per la sicurezza e per garantire l'immunità ai disturbi.

Per quanto riguarda l'accuratezza di misura presenta un errore di guadagno tipico pari a $\pm 0.05\%$ (massimo $\pm 0.20\%$) e un errore di offset tipico pari a $\pm 0.02\%$ (massimo $\pm 0.09\%$)



Fig. 8- NI 9203

2.2.4 NI cDAQ-9188 NI CompactDAQ 8-Slot Ethernet Chassis

NI cDAQ-9188 (Fig. 9) è uno chassis CompactDAQ Gigabit Ethernet a 8 slot progettato per alloggiare sistemi di sensori remoti o distribuiti e per misure elettriche. Un singolo chassis è in grado di misurare fino a 256 canali di segnali provenienti da sensori, I/O analogici o digitali e presenta un'interfaccia Ethernet (1000 Base-TX, full-duplex e protocolli TCP/IP e UDP) per la connessione ad un PC remoto. La piattaforma NI CompactDAQ è in grado di trasmettere dati ad alta velocità e presenta una buona facilità d'uso e risulta molto flessibile per la realizzazione di sistemi di misura.

Presenta un'accuratezza temporale pari a 50ppm della velocità di campionamento e una risoluzione in tempo pari a 12.5ns. Dispone inoltre di un buffer di uscita condiviso fra i vari canali e pari,

complessivamente, a 8191 campioni (in particolare 2047 campioni per gli slot da 1 a 4 e 1023 campioni per gli slot da 5 a 8). L'utilizzo di un router wireless (es. Wi-Fi o Bluetooth) collegato alla porta Ethernet consente il collegamento fra PC e sistema di misura qualora una rete wired non fosse disponibile o di difficile realizzazione.



Fig. 9- NI cDAQ-9188

2.3 Setup per macchina saldatrice TIG Telwin Superior 300 CE

Il sistema di acquisizione basato su CompaqDAQ è stato preliminarmente configurato sulla saldatrice Telwin Superior 300 CE, disponibile nei laboratori del Dipartimento, al fine di consentire la realizzazione del software di supervisione in linguaggio LabVIEW e per effettuare alcuni test di verifica dell'hardware. Nella Fig. 10 è illustrato lo schema logico relativo alla connessione del sistema di misura specializzato per la macchina Telwin Superior 300 CE. Si sono rappresentati i punti di prelievo per le misure della corrente e della tensione in ingresso e in uscita alla macchina e i loro collegamenti verso le schede di acquisizione, indicate nella Tabella 2, inserite nello chassis CompaqDAQ.

Nella Fig. 11 è mostrata una foto del setup completo, mentre nella Fig. 12 è illustrato il dettaglio delle connessioni verso i moduli del CompaqDAQ. Nella Fig. 13 è rappresentata una schermata, catturata durante un test di saldatura, del software di supervisione. Allo stato attuale nel pannello di supervisione sviluppato è possibile visualizzare e salvare alla fine del test in formato Excel le seguenti grandezze:

- 3 tensioni di ingresso trifase;
- 3 correnti di ingresso trifase;
- tensione e corrente continua di uscita.

Successivamente il programma sarà predisposto per la visualizzazione di ulteriori misure, ove necessarie per la specifica macchina saldatrice, per il calcolo delle potenze di ingresso e di uscita nonché per il calcolo rendimento.

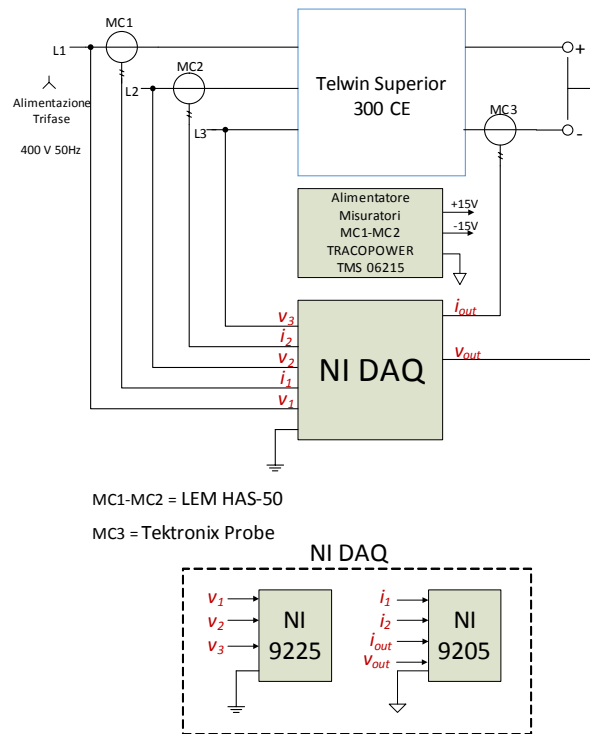


Fig. 10- Schema logico del setup di misura per saldatrice Telwin Superior 300 CE



Fig. 11- Setup di misura per saldatrice Telwin Superior 300 CE



Fig. 12- Connessioni verso il CompaqDAQ

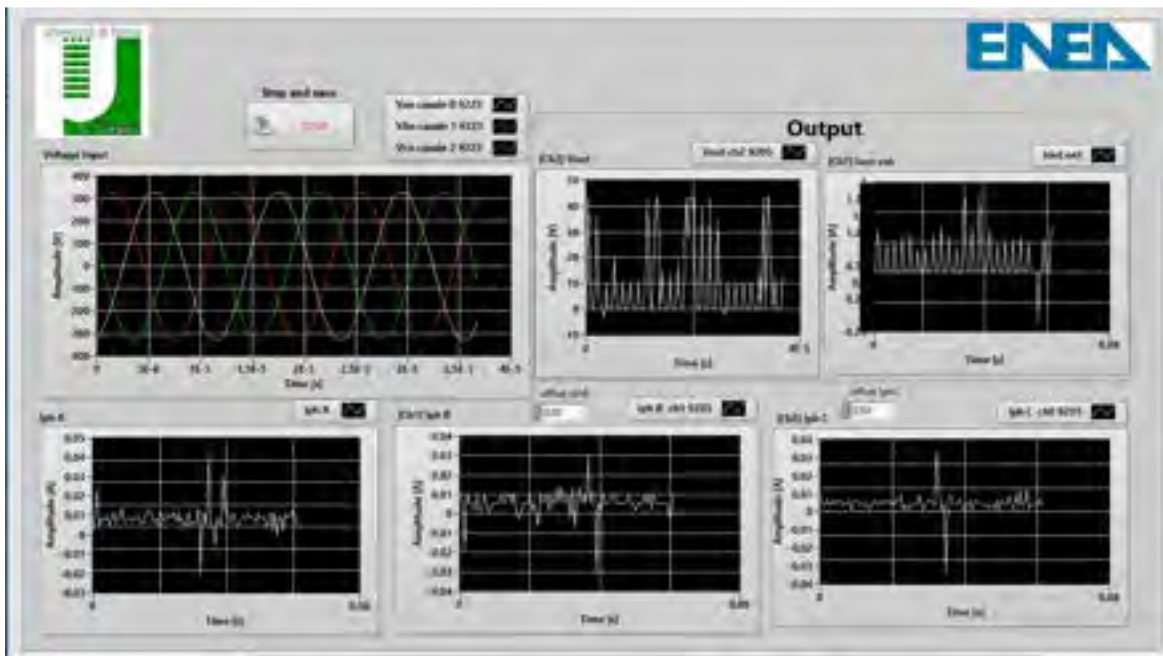


Fig. 13- Pannello del software di supervisione realizzato in LabVIEW

2.4 Setup per macchina saldatrice TIG NERTAMATIC 450

Nella Fig. 14 è illustrato lo schema logico relativo alla connessione del sistema di misura specializzato per la macchina NERTAMATIC 450. Si sono rappresentati i punti di prelievo per le misure della corrente e della tensione in ingresso e in uscita alla macchina e i loro collegamenti verso le schede di acquisizione, indicate nella Tabella 2, inserite nello chassis CompaqDAQ.

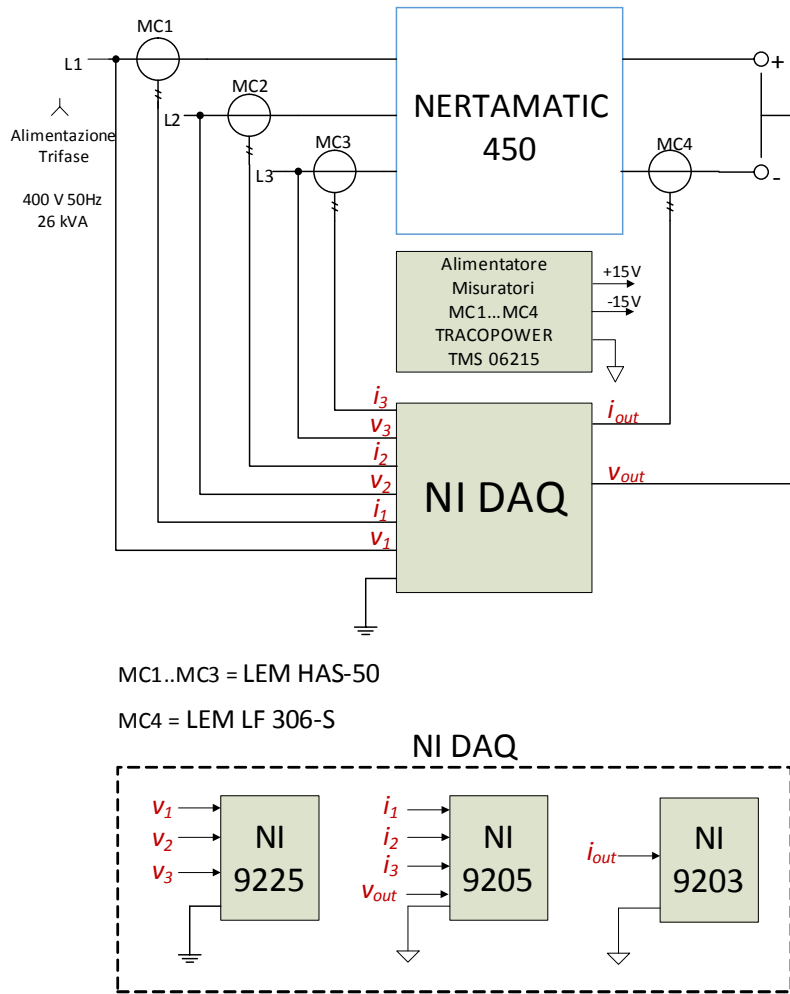


Fig. 14- Schema logico del setup di misura per saldatrice NERTAMATIC 450

2.5 Setup per macchina saldatrice a fascio elettronico

Nella Fig. 15 è illustrato lo schema logico relativo alla connessione del sistema di misura specializzato per la saldatrice a fascio elettronico. Si sono rappresentati i punti di prelievo per le varie misure e i loro collegamenti verso le schede di acquisizione del CompaqDAQ. Nel caso specifico, oltre alle grandezze in ingresso alla macchina, si è scelto di acquisire informazioni sul consumo energetico relativo alla pompa a vuoto e alla pompa a diffusione. Per limitare il numero di trasduttori, si è scelto di misurare una tensione e una corrente di fase per ciascuna pompa poiché tali carichi sono sempre bilanciati. Pertanto la potenza complessiva della singola pompa può ricavata moltiplicando per tre la potenza assorbita da una singola fase.

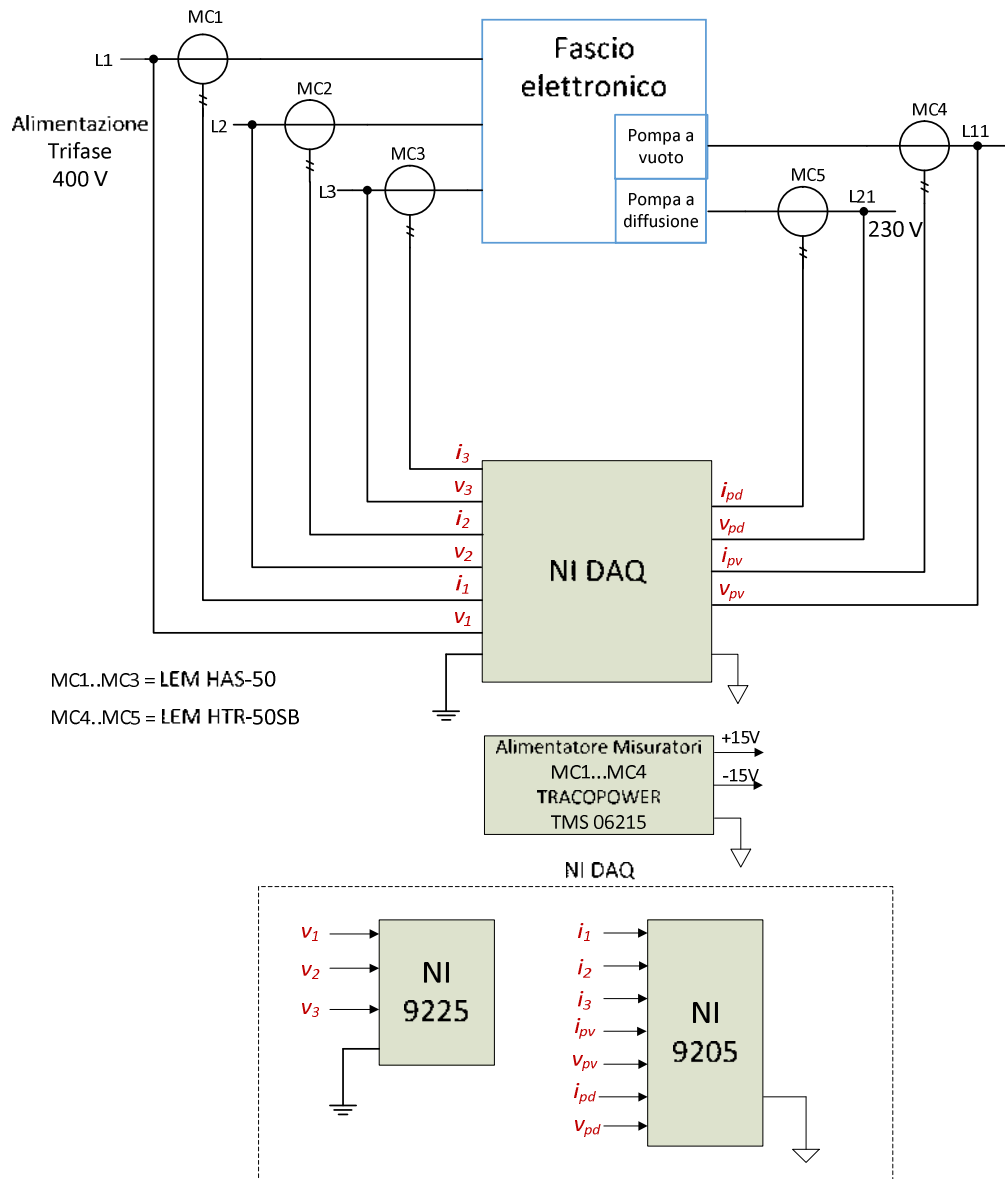


Fig. 15- Schema logico del setup di misura per saldatrice a fascio elettronico

2.6 Setup per macchina saldatrice laser YLS 2000

Nella Fig. 16 è illustrato lo schema logico relativo alla connessione del sistema di misura specializzato per la saldatrice laser YLS 2000. Si sono rappresentati i punti di prelievo per le varie misure e i loro collegamenti verso le schede di acquisizione del CompaqDAQ. Nel caso specifico, oltre alle grandezze in ingresso alla macchina, si è scelto di acquisire informazioni sul consumo energetico dei chillers che vengono alimentati da una presa trifase separata rispetto alla macchina. La stima della potenza di uscita, invece, viene effettuata mediante un calorimetro opportunamente interfacciato al CompaqDAQ tramite un circuito di interfaccia e condizionamento del segnale.

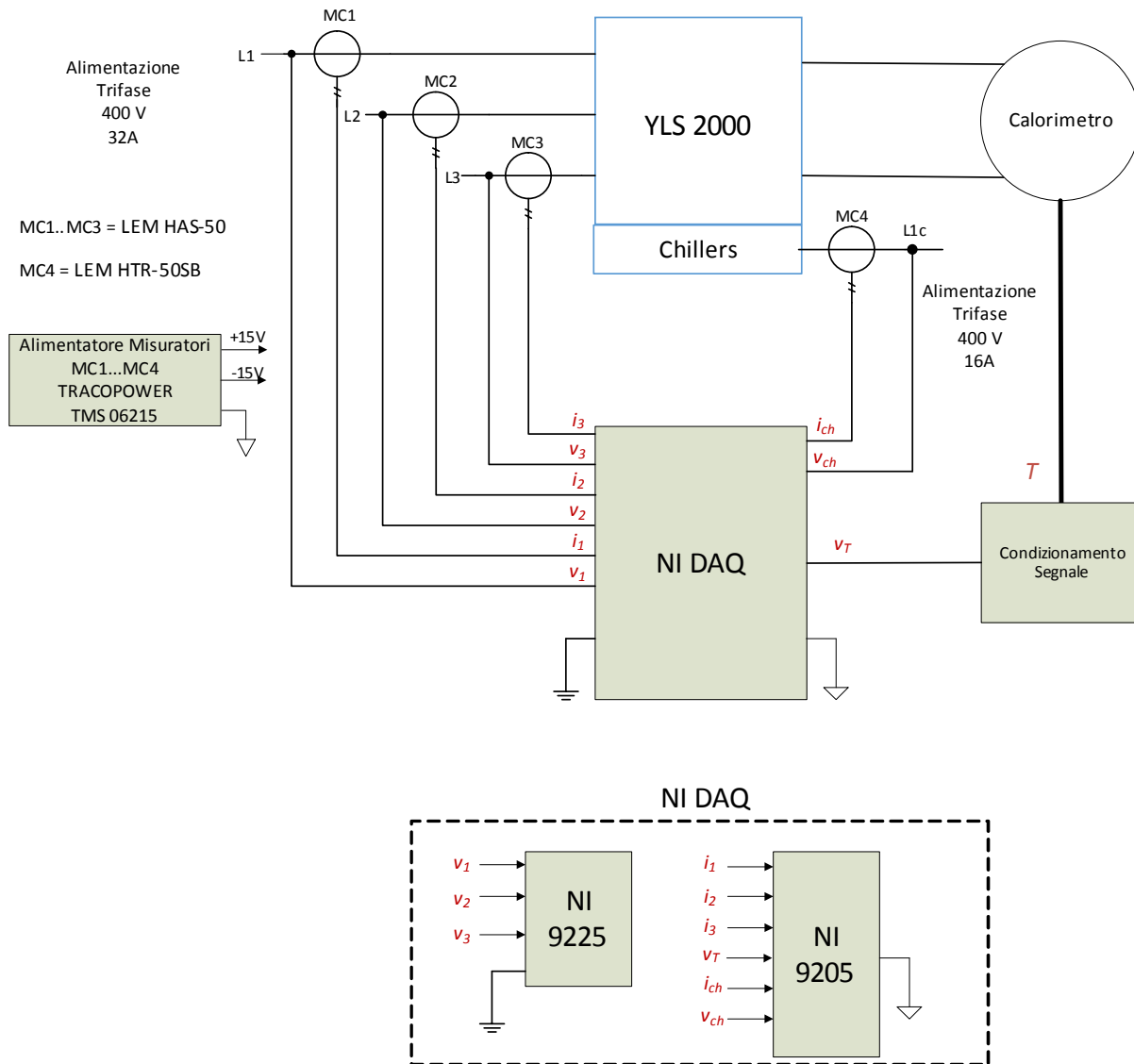


Fig. 16- Schema logico del setup di misura per saldatrice Laser YLS 2000

2.7 Supporto all'analisi dell'efficienza di saldatura mediante l'analisi geometrica di cordoni di saldatura effettuati con differenti processi (EBW e laser).

Per quanto riguarda l'analisi dell'efficienza di accoppiamento energia - materia, il DII ha supportato ENEA con la messa a punto di procedure per la corretta valutazione della dimensione della ZF. I materiali trattati, forniti da ENEA, sono stati: acciai da costruzione strutturali (S460 J0), acciai per caldareria ad elevate prestazioni (P91), e leghe di alluminio da costruzione (AA6082). I giunti sono stati prodotti mediante Electron Beam, Laser e TIG.

Si è proceduto preliminarmente all'individuazione degli attacchi chimici idonei per evidenziare la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA) dei giunti saldati. Dopo una serie di test con diversi reagenti per

la lega di alluminio AA6082 il Poulton (12 ml HCl, 6 ml HNO₃, 1 ml HF, 10 ml H₂O) ha evidenziato i risultati migliori, mentre per l'acciaio martensitico P91 l'attacco più adatto è risultato il Vilella (5 ml HCl, 100 etanolo, 1 g acido picrico) e per l'acciaio S460 il Nital 5%.

I campioni lucidati meccanicamente e sottoposti a macro-etching con i reagenti indicati sono stati esaminati mediante ispezione visiva (per individuare eventuali difetti macroscopici), microscopia ottica. Il volume V del metallo fuso e risolidificato è stato determinato dall'analisi d'immagine eseguita sulla sezione trasversale del giunto. Sono stati inoltre misurati profili di microdurezza nelle sezioni trasversali dei giunti lungo e attraverso il cordone. Queste prove permettono di fare una prima stima dei flussi di calore sulla base degli effetti indotti sul metallo in ZF e ZTA.

Sono state esaminate tre saldature eseguite per calibrare il sistema elettronico sviluppato per rilevare la potenza assorbita. I materiali saldati sono la lega di alluminio AA6082, l'acciaio martensitico T91 e l'acciaio al carbonio S460.

2.7.1 Saldatura laser della lega di alluminio AA6082

Tabella 3 riporta i parametri con cui è stata eseguita la saldatura.

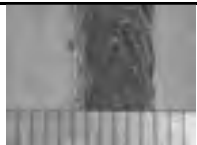
ID	Potenza (W)	V sald. (mm/min)	F (mm)	V filo (mm/min)	Q gas (Nlt/min)	Q [J/mm]	Aspetto al dritto
W11	3800	1200	-2	3000	20	190	

Tabella 3

Fig. 17 mostra la sezione laterale della saldatura eseguita sul lamierino di alluminio di spessore 5 mm. In alto è riportato un righello di riferimento. La superficie è stata lucidata meccanicamente e attaccata con reagente Poulton.

Il giunto saldato ha la tipica morfologia a chiodo con una larghezza di 6 mm nella parte superiore e di 3 mm nella parte inferiore. L'aspect ratio ν , definito come il rapporto tra la profondità di penetrazione p e la larghezza massima w , è 0,83.

Il volume V del metallo fuso e risolidificato è 102,62 mm³; V è stato determinato dall'analisi di immagine del cordone di saldatura (Fig. 18), essendo l'area A della sezione del cordone pari a 18,557 mm² e la lunghezza del tratto di saldatura considerato pari a 5,53 mm.

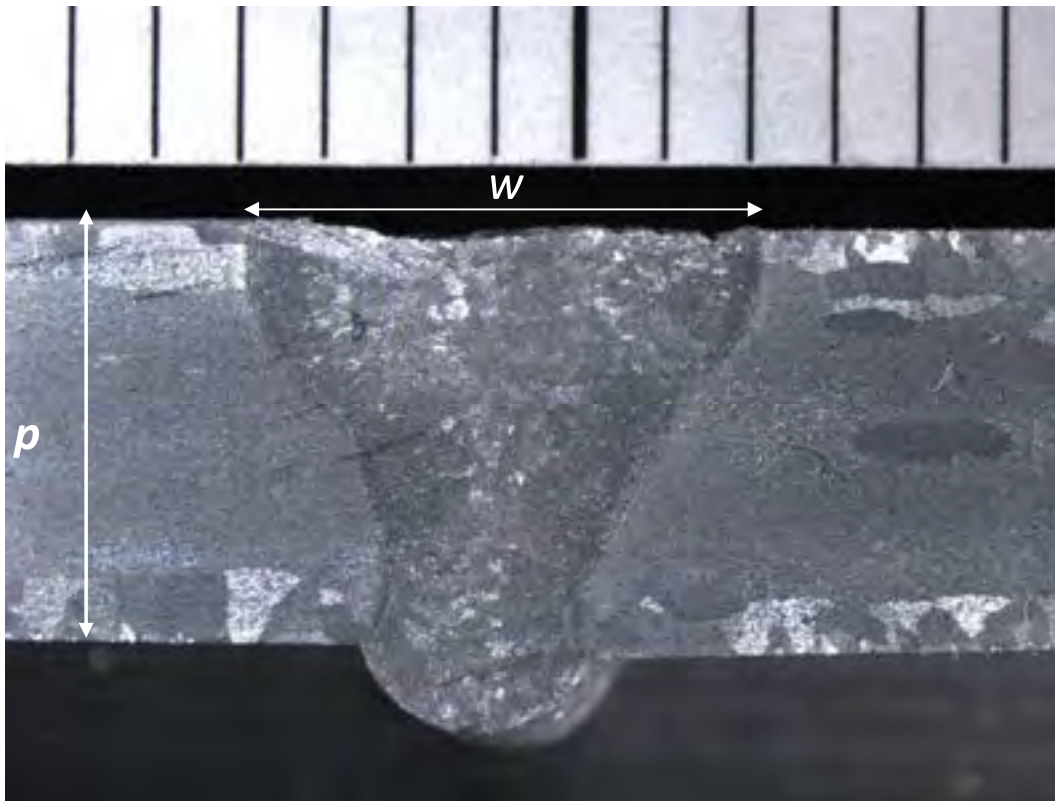


Fig. 17- Sezione laterale della saldatura sul lamierino di alluminio.

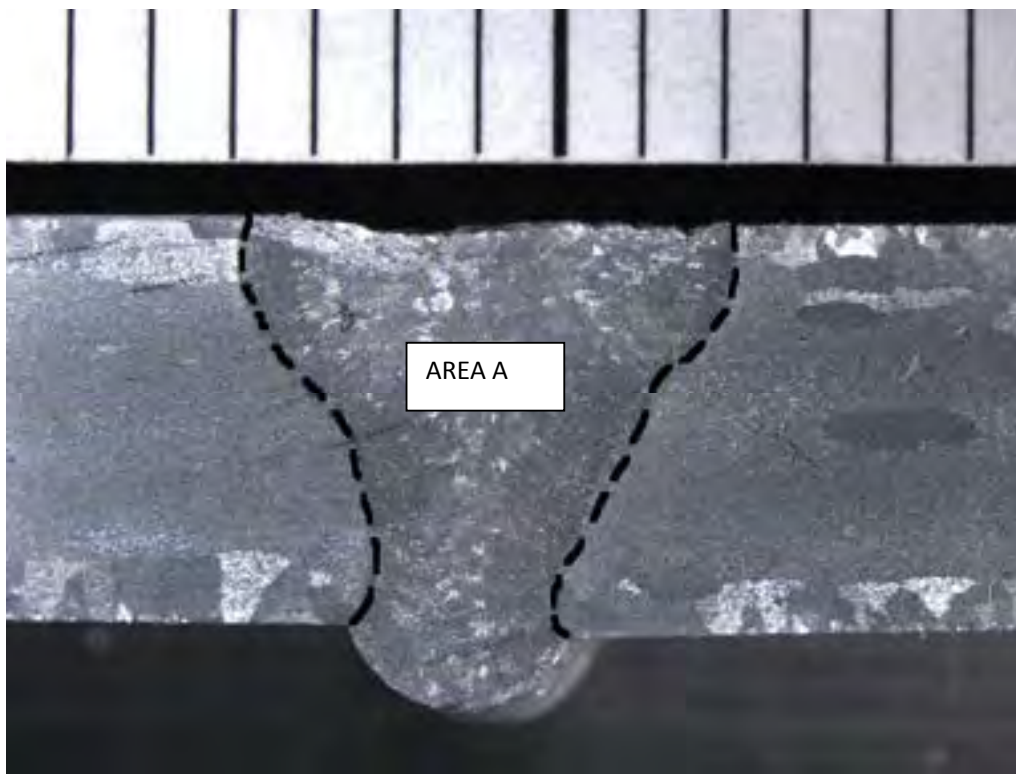


Fig. 18- Sezione laterale della saldatura sul lamierino di alluminio. In evidenza l'area A utilizzata per il calcolo del metallo fuso e risolidificato durante il processo di saldatura.

Fig. 19 mostra i profili di microdurezza Vickers misurati attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale (b). Le prove sono state eseguite con passo di 0.25 mm applicando un carico di 200 g. Si vede chiaramente in Fig. 19 (a) come il materiale presenti una durezza più bassa al centro del cordone di saldatura, indicato dalla linea rossa a tratteggio, dove il materiale è stato fuso e risolidificato. Il profilo di durezza trasversale indica come nelle leghe di alluminio l'elevata conducibilità termica induca ZTA ampie e quindi significative perdite di energia.

I dati riportati in Fig. 19 (b) mostrano una variabilità della durezza lungo l'asse verticale al centro della zona fusa: i valori di durezza cambiano in modo casuale e non sembra esserci una qualche dipendenza dalla specifica posizione. Il valore medio è 81 HV e gli scarti massimi sono di ± 7 HV.

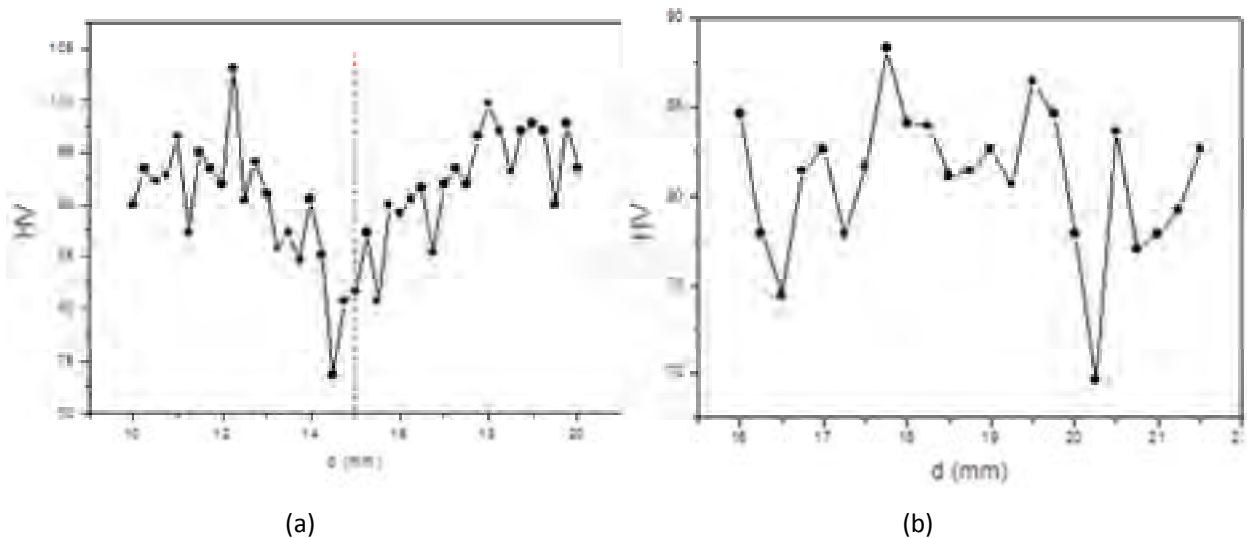


Fig. 19- Giunto saldato di alluminio mostrato in Fig. 14: profili di microdurezza Vickers attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale (b).

2.7.2 Saldatura di P91 al Fascio Elettronico

Le Figure 20 e 21 mostrano una lastra di acciaio P91 (spessore 12 mm) dove sono state eseguite due saldature (S1 e S2) mediante fascio elettronico. I dati che verranno di seguito si riferiscono a S1 perché S2 ha provocato sfondamento sul lato della lastra opposto al fascio.

Principali parametri di saldatura: (i) velocità 1000 mm/min; (ii) tensione 60 kV; (iii) corrente 200 mA per complessivi 12 kW di potenza.

L'apporto termico risulta $Q = V \cdot I / v = 12000 \cdot 60 / 1000 = 720 \text{ J/mm}$ (*single pass*). La tabella 4 permette di confrontare questo valore di Q con quelli molto più alti ottenibili per una analoga saldatura TIG *multi-pass*.

In Fig. 22 è possibile vedere il campione prelevato per le analisi mentre la tabella 5 mostra in dettaglio testa, sezione trasversale e retro del talloncino per le prove di durezza.

analoga saldatura TIG

Id	I(A)	V(V)	Ws(mm/min)	Wfs(mm/min)	HI(KJ/mm _[MSOffice1])	N.pass.	D.R.(g/cm)	Bevel	Q _[MSOffice2] (J/mm)
G75xy	230	12	120	1320	1,41	11	0,67	75°	15510
G60xy	250	12	90	990	1,84	8	0,67	60°	14720

Tabella 4- Valori di Q ottenibili in saldatura TIG analoga a quella in esame (realizzata con fascio elettronico).



Fig. 20: Lato A. la freccia blu indica la testa del cordone (S1)



Fig. 21- Lato B. la freccia indica il retro della saldatura (S1)_[MSOffice3]

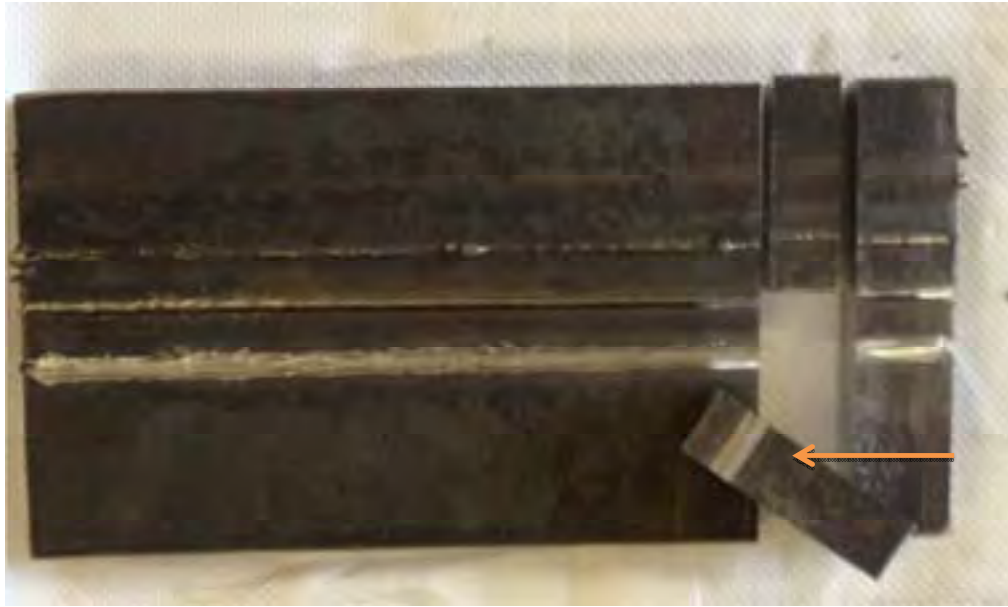


Fig. 22- La freccia indica il talloncino per le prove di durezza



Tabella 5- Testa, sezione trasversale e retro del talloncino per le prove di durezza

Fig. 23 mostra la saldatura eseguita sull'acciaio inossidabile martensitico P91. La superficie è stata lucidata meccanicamente e attaccata con reagente Vilella.

Il giunto saldato presenta una larghezza di 8 mm nella parte superiore e di 3.8 mm nella parte inferiore; l'aspect ratio v è 1.4. Il volume V del metallo fuso e risolidificato, nel tratto considerato di lunghezza mm X , è $1279,78 \text{ mm}^3$

Fig. 24 mostra i profili di microdurezza Vickers misurati attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale (b). Le prove sono state eseguite con passo di 0.25 mm applicando un carico di 500 g. Come mostrato in (a), i valori di durezza più alti sono al centro del cordone di saldatura: nella zona fusa e risolidificata si forma martensite vergine che ha durezza superiore a quella della martensite rinvenuta presente altrove. La zona termicamente alterata è larga circa 2 mm e presenta i valori di durezza più bassi per l'esposizione ad intensi flussi termici durante il processo di saldatura.

I valori di durezza lungo l'asse verticale al centro della zona fusa cambiano in modo casuale e non sembra esserci una qualche dipendenza dalla specifica posizione (b). Il valore medio di durezza è 440 HV e le variazioni sono nell'intervallo 487 – 411 HV.

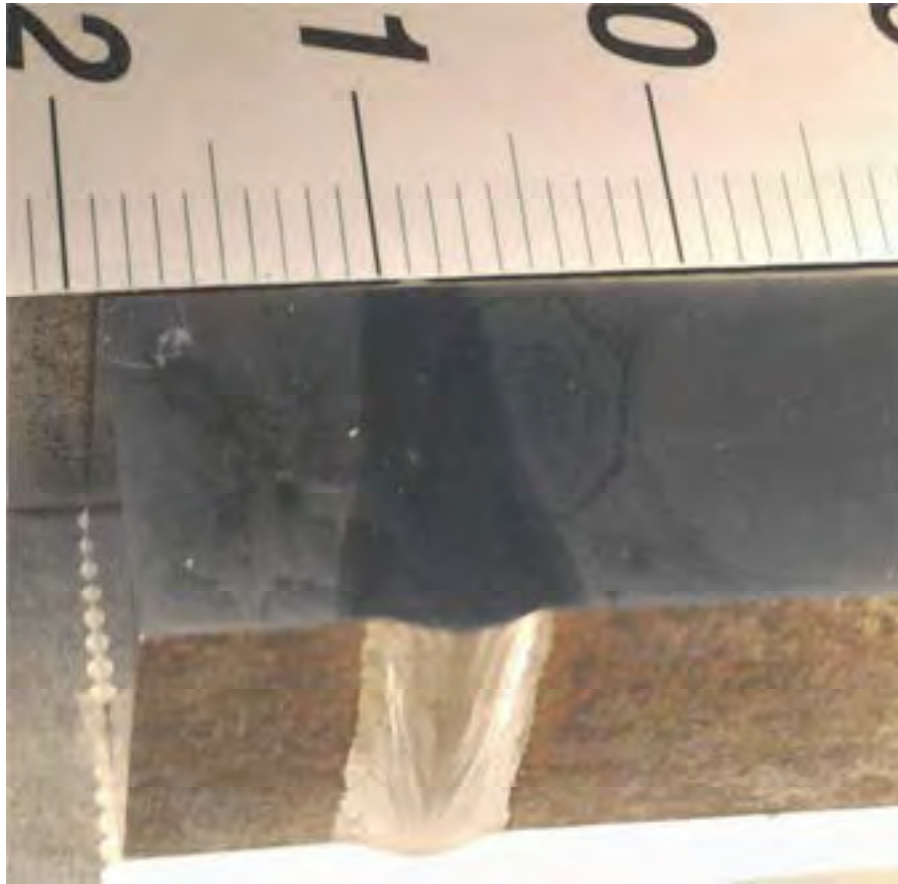


Fig. 23- Cordone di saldatura su acciaio martensitico P91.

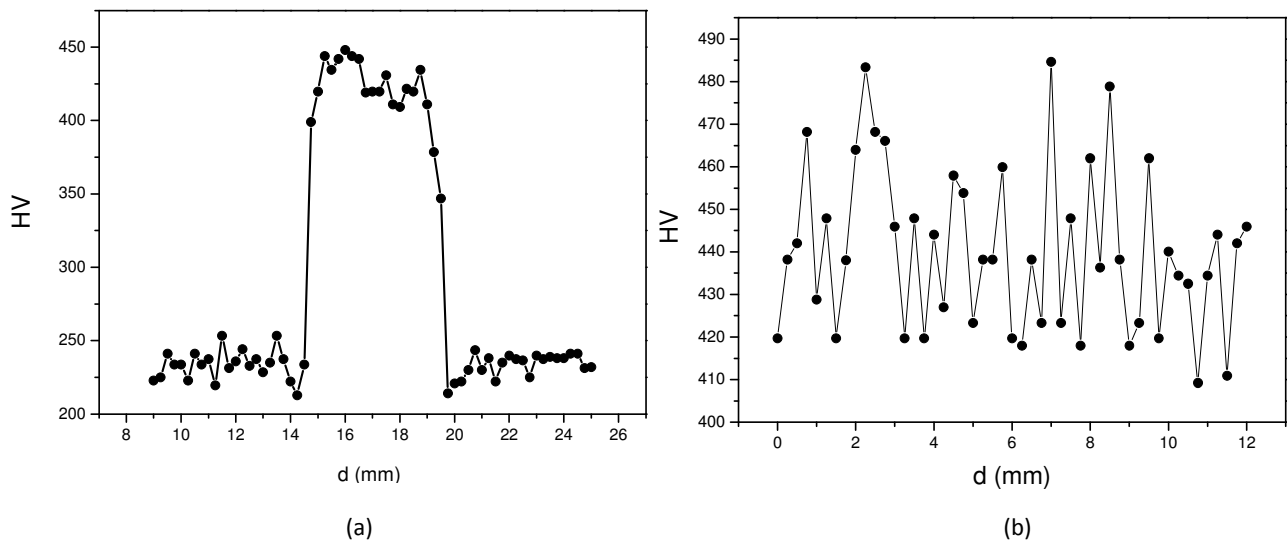


Fig. 24- Giunto saldato di acciaio martensitico T91 mostrato in Fig. 4: profili di microdurezza Vickers attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale (b).

2.7.3 Saldatura laser dell'acciaio al carbonio S460

La Fig. 25 mostra la saldatura laser CO₂ sull'acciaio al carbonio S460, spessore 5 mm, dopo attacco con reagente Nital 5%. Parametri: potenza 5100 W, velocità 1200 mm/min, gas di assistenza elio 30 Nlt/min. L'apporto termico è pari a 255 J/mm. L'area della sezione del cordone è 15,15 mm², la lunghezza del tratto considerato è 6,50 mm per cui il volume V risulta essere 98,57 mm³. La linea nera indica dove sono state eseguite le microdurezze Vickers il cui profilo è riportato in Fig. 26 a). In Fig. 26 b) viene rappresentato l'andamento della microdurezza lungo l'asse verticale nella zona centrale di ZF.

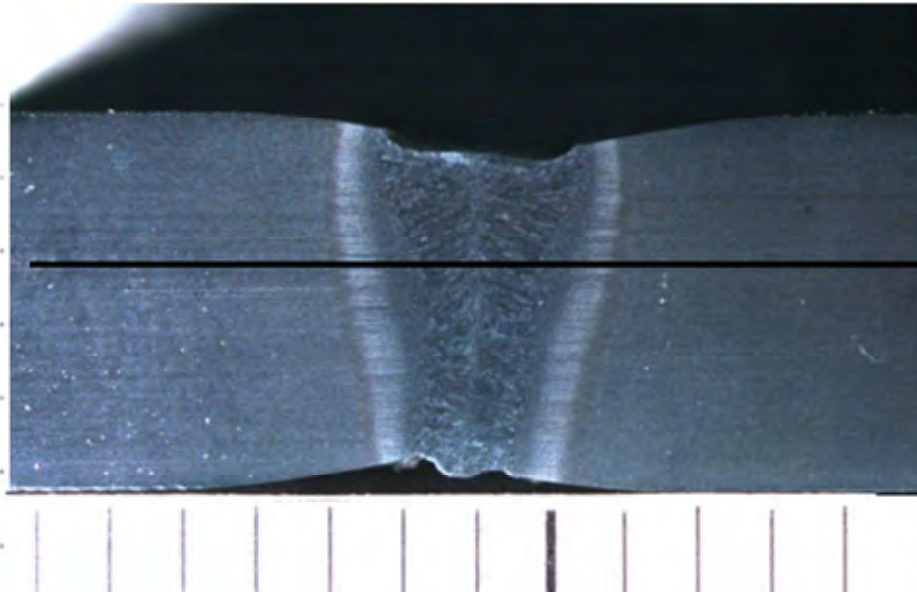


Fig. 25- Cordone di saldatura su acciaio S460 (campione 1). La linea nera indica dove sono state eseguite le microdurezze Vickers il cui profilo è riportato in Fig. 22 a).

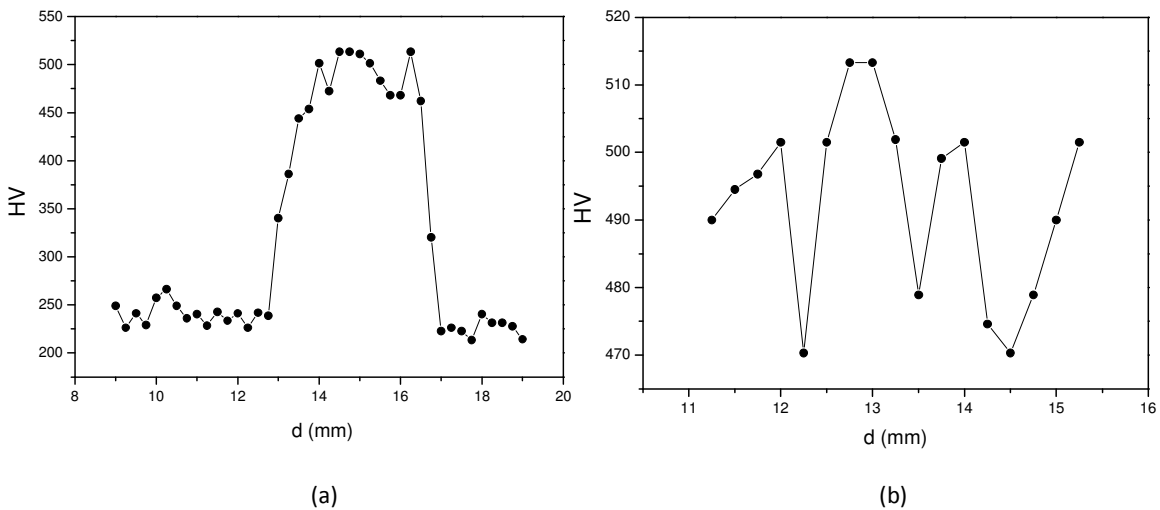


Fig. 26- Cordone di saldatura su acciaio S460 (campione 1): profili di microdurezza Vickers attraverso il cordone (a) e verticalmente lungo l'asse centrale.

2 Conclusioni

L'attività del DII dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" si poneva due obiettivi: 1) la progettazione di un sistema di valutazione delle perdite energetiche wireless, 2) l'analisi di efficienza dell'accoppiamento energia -materia. I risultati ottenuti possono essere così riassunti.

1) Progettazione di un sistema di valutazione delle perdite energetiche wireless

L'attività si è focalizzata sul progetto di un sistema di misura flessibile ed espandibile in grado di ottenere un'approfondita valutazione delle prestazioni energetiche su tre diverse tipologie di macchine saldatrici.

A valle di uno studio preliminare svolto sulla saldatrice SMAW/TIG Superior 300CE, sono state individuate le specifiche del sistema di misura da realizzare e le caratteristiche, meccaniche ed elettriche, dei sensori da impiegare nei tre setup di misura. La scelta è ricaduta sul sistema modulare National Instruments della famiglia Compact DAQ equipaggiato con tre schede di acquisizione, una delle quali specializzata per ingressi a tensione industriale, e le altre utili ad acquisire i segnali, sia di tensione che di corrente, forniti dai misuratori. A completamento del sistema di acquisizione, è stato sviluppato uno specifico software di supervisione e controllo in linguaggio LabVIEW dedicato alla gestione delle schede di acquisizione. Al fine di permettere un'agevole interazione con l'utente, è stata realizzata un'opportuna interfaccia grafica per la visualizzazione e la memorizzazione dei risultati, nonché per la modifica delle impostazioni del sistema di acquisizione.

Il sistema è stato installato e testato sulla saldatrice SMAW/TIG Superior 300CE verificandone la piena funzionalità anche attraverso il confronto di alcune forme d'onda, memorizzate tramite Compact DAQ, con la strumentazione disponibile in laboratorio. Sono state, infine, definite le configurazioni del sistema di misura per le altre tipologie di macchine saldatrici che saranno oggetto di successive valutazioni.

2) Analisi di efficienza dell'accoppiamento energia -materia.

E' stato definito un parametro in grado di caratterizzare l'efficienza di un qualsiasi processo di saldatura per fusione con la valutazione anche delle diverse efficienze di accoppiamenti energia-materia. Questo parametro è V/E , il rapporto tra volume totale del metallo fuso e risolidificato (V) e l'energia spesa nel processo (E). E rappresenta l'energia prelevata dalla rete, indipendentemente dalla frazione realmente utilizzata per fondere il metallo.

Il DII ha messo a punto le procedure per la valutazione della dimensione della ZF e ZTA sui materiali metallici forniti da ENEA: acciaio da costruzione strutturale (S460 J0), acciaio martensitico ad elevate prestazioni (P91), e lega di alluminio da costruzione (AA6082). I giunti sono stati prodotti mediante Electron Beam, Laser e TIG.

Sono stati individuati gli attacchi chimici idonei per evidenziare la zona fusa (ZF) e la zona termicamente alterata (ZTA) dei giunti saldati: per la lega di alluminio AA6082 il Poulton (12 ml HCl, 6 ml HNO₃, 1 ml HF, 10 ml H₂O), per l'acciaio P91 Vilella (5 ml HCl, 100 etanolo, 1 g acido picrico) e per l'acciaio S460 il Nital 5%. I campioni lucidati meccanicamente e sottoposti a macro-etching con i reagenti indicati sono stati esaminati mediante microscopia ottica. Il volume V del metallo fuso e risolidificato è stato determinato dall'analisi d'immagine eseguita sulla sezione trasversale del giunto. Sono stati inoltre misurati profili di microdurezza nelle sezioni trasversali dei giunti lungo e attraverso il cordone. Queste prove permettono di fare una prima stima dei flussi di calore sulla base degli effetti indotti sul metallo in ZF e ZTA.

In conclusione, come previsto dal progetto l'attività svolta ha permesso di sviluppare il sistema di misura, il software e tutte le metodiche necessarie per valutare l'efficienza di tre sistemi di saldatura: TIG, laser ed Electron Beam.

3 Riferimenti bibliografici

- [1] A. 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] A. Haelsig, P. Mayr, Energy balance study of gas-shielded arc welding processes, *Weld World* DOI 10.1007/s40194-013-0073-z.
- [6] Wei Li, E. Feng, D.I Cerjanec, G.A. Grzadzinski, *Sheet Metal Welding Conference XI Sterling Heights, MI*, May 11-14, 2004.
- [7] 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.
- [8] B. Bajcer M. Hrzencak, K. Pompe, B. Jez, Improvement of energy and materials efficiencies by introducing multiple-wire welding, *METALURGIJA* 46 (2007) 1, 47-52.
- [9] 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.
- [10] Q. Zhang, M. Mahfouf, G. Panoutsos, K. Beamish, X. Liu, Multiobjective 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>.
- [11] D.T. Swift-Hook, A.E.F. Gick, *Penetration Welding with Lasers*, *Welding Research Supplement* 493-s (1973).
- [12] 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.
- [13] M.A. Purslow, Reducing the ecological impact of arc welding, *Welding Journal*, December (2012) 24-27.

- [14] 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.
- [15] A. Ruggiero, L. Tricarico, A.G. Olabi, K.Y. Benyounis, Weld-bead profile and costs optimisation of the CO₂ dissimilar laser welding process of low carbon steel and austenitic steel AISI 316, Optics & Laser Technology 43 (2011) 82–90.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] S. Narula; B. Singh; G. Bhuvaneshwari; 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

4 Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

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).

Alessandra Varone was born in Rome (16.07.1983). She holds a M.S. in Materials Science and Technology Degree (61/S) from University of Rome "Tor Vergata" (Grade: 110/110 cum laude). She obtained her Ph.D. in Materials Engineering from University of Rome "Tor Vergata" in 2013 where she worked with Prof. R. Montanari on the structure of liquid metals by HT-XRD.

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

Currently she is a postdoc at University of Rome "Tor Vergata". 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. 3- Microstructure and mechanical properties of different materials by using XRD, HT-XRD, Mechanical Spectroscopy, Optical Microscopy and Hardness Tests. 4- Microstructure and mechanical properties of Ni base superalloys before and post welding.

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.