



APPLICAZIONE DELLA TECNOLOGIA AUTORECUPERATIVA SU DI UN FORNO CONTINUO PER LA RICOTTURA IN BIANCO DI TUBI SALDATI

Attilio Mattarini

Livio Minoggio

Sommario

Recupero di calore in un forno

Storicamente, la riduzione dei consumi nei forni di riscaldamento, di qualsiasi tipologia, si basa sul recupero di entalpia dai fumi esausti, per mezzo del preriscaldamento dell'aria (e raramente del gas) di combustione.

Per ottenere questo risultato si utilizzano varie soluzioni tecniche, le più diffuse si basano su di un recuperatore centralizzato con successiva distribuzione dell'aria calda.

Questa classica soluzione prevede di inserire un recuperatore di calore (generalmente a fascio tubiero) nel collettore di evacuazione fumi, il fascio tubiero viene attraversato dall'aria di combustione che pertanto viene riscaldata a spese del calore ceduto dai fumi esausti che lambiscono la superficie esterna dei tubi.

Spesso nei forni di riscaldamento o trattamento continui, il recupero di calore inizia all'interno del forno in una zona di ingresso passiva, dove i fumi esausti scambiano direttamente calore col carico freddo.

Questa zona che spesso viene denominata "preriscaldamento", ma che dovrebbe essere più opportunamente chiamata tunnel passivo, è una zona a bassa intensità di scambio, questo comporta un dimensionamento maggiore dei forni che la adottano rispetto a forni tutti attivi, per contro i forni con il tunnel di recupero hanno un rendimento generale migliore rispetto a quelli che non ne sono muniti.

Nei forni con temperature di processo elevate poi, il tunnel passivo diventa quasi obbligatorio, in quanto se la temperatura dei fumi esausti non viene abbattuta nel forno stesso darebbe molti problemi al recuperatore di calore.

Questo schema strutturale è stato evoluto via via con tunnel di recupero sempre più importanti nei nuovi forni da riscaldamento continui (Walking beams, walking heart, pusher furnaces) divenendo la soluzione standard per questa tipologia di impianto.

Per ciò che riguarda la tipologia dei forni continui da trattamento termico, durante la prima crisi energetica degli anni 70, si assistette alla trasformazione di molti forni con l'introduzione di tunnel passivo e recuperatore centralizzato, schema che viene ancora adesso adottato da diversi impiantisti anche importanti.

Per contro una decina di anni fa l'obsolescenza dei primi impianti costruiti con questo schema, unitamente alla continua ricerca di incremento della produttività, ha portato alla ribalta un'altra soluzione per il problema del recupero di rendimento nei forni.

La soluzione del recupero centralizzato ha il grave svantaggio della complicazione impiantistica dovuta alla necessità di distribuire l'aria di combustione calda.

Lo svantaggio è anche energetico, in quanto una parte dell'entalpia recuperata viene dispersa nella rete di distribuzione.

Se a tutto questo si aggiunge poi la necessità di incrementare la produttività di forni che, incastonati all'interno di linee di produzione, hanno una lunghezza obbligata, si capisce come una soluzione di recupero che preveda il forno integralmente attivo sia estremamente vantaggiosa.

Questa possibilità si realizza passando dalla tecnica del recupero centralizzato alla tecnica del recupero distribuito fig. 1.

Si tratta pertanto di dotare ogni bruciatore di un sistema locale di recupero di calore il più possibile integrato al bruciatore stesso.

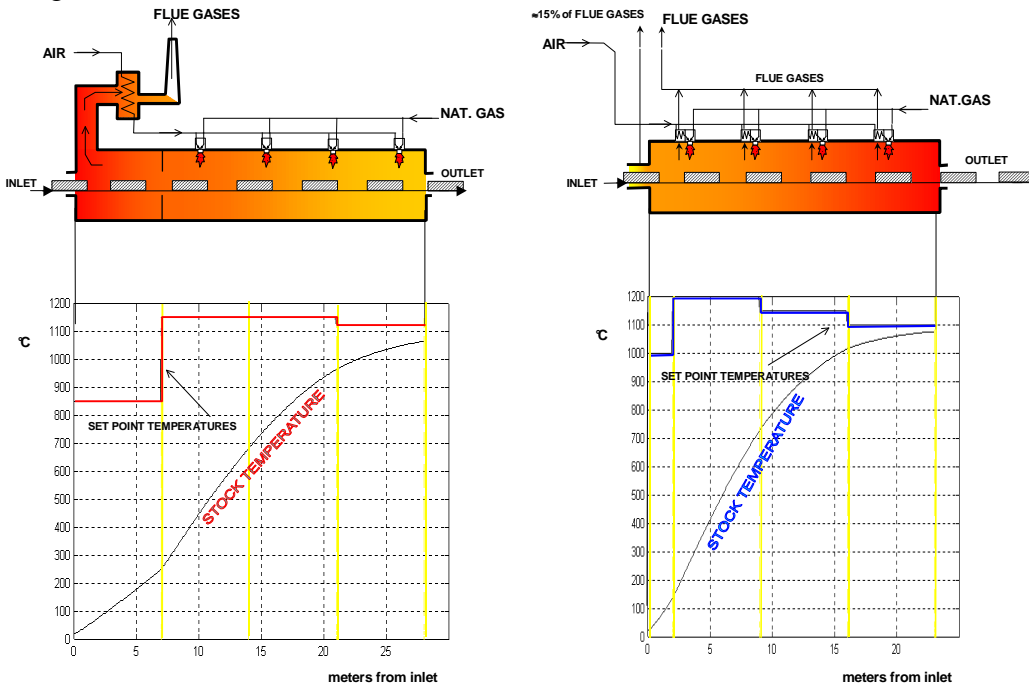


figura 1



figura 2

Bruciatori autorecuperativi a fiamma libera

Come già precedentemente accennato un bruciatore autorecuperativo nasce dall'integrazione di un bruciatore e di un recuperatore, nel tempo si sono viste diverse soluzioni tecniche che hanno avuto più o meno successo e diffusione.

Le prime soluzioni prendevano spunto dai recuperatori tradizionali, il bruciatore veniva accoppiato ad un piccolo recuperatore a fascio tubiero con disegno più o meno felice, in fig. 2 si può vedere una di queste realizzazioni.

L'affidabilità di questi complessi era piuttosto scarsa ed il loro ingombro elevato.

Una semplice soluzione applicativa è quella mostrata nella fig.3, in questo caso un bruciatore commerciale di tipo alta velocità è stato connesso a un recuperatore esterno a flusso concentrico biallettato

Questa soluzione estemporanea è stata pensata allo scopo di distanziare il collettore di scarico dei



fumi dal bruciatore in modo da realizzare, nella particolare camera di combustione a cui erano applicati, un moto convettivo particolarmente evoluto e funzionale, seppur con soli quattro bruciatori.

Lo schema relativo a questa semplice applicazione permette di capire più facilmente il giro dei fluidi che determina sempre il funzionamento nei bruciatori autorecuperativi.

In questo caso, la particolare applicazione costringe ad utilizzare lo scambiatore in equicorrente, con svantaggi in termini di efficienza, svantaggi compensati da un generoso dimensionamento delle superfici di scambio.

figura 3

La stragrande maggioranza dei bruciatori autorecuperativi commerciali reperibili sul mercato, adotta una forma ormai divenuta canonica che vede il recuperatore coassiale al bruciatore stesso. Questo disegno presenta un serie innumerevole di vantaggi; per prima cosa gli ingombri vengono limitati a poco più di quelli di un bruciatore senza recupero ed anche l'impatto sulle murature è poco più di quello di un tradizionale bruciatore.

In secondo luogo non sono praticamente necessari isolamenti, in quanto gli stessi refrattari delle pareti in cui sono inseriti svolgono questa funzione.

Altro grande vantaggio è che lo scambio avviene in controcorrente, con grande vantaggio in termini di efficienza e quindi di dimensionamento della superficie di scambio.

Qualsiasi sia la soluzione adottata rimane il problema legato all'aspirazione dei fumi esausti, infatti, causa la perdita di carico rilevabile sulla sezione di passaggio dei fumi, sarebbe impossibile evacuarli naturalmente, senza avere una pressione interna alla camera di combustione insostenibile. Si rende necessario quindi avere a disposizione un sistema di aspirazione autonomo, che aspiri i fumi solo quando questi vengono prodotti.

La soluzione ideale è quella che si ottiene accoppiando un eiettore a ciascun bruciatore, l'eiettore viene alimentato con parte dell'aria ventilata del bruciatore, spillata dopo la valvola di blocco, in modo che i fumi vengano aspirati solo durante la fase di bruciatore acceso.

In questo modo, regolando opportunamente l'aria di eiezione, si può regolare il tiraggio e quindi la pressione interna del forno, evitando di metterlo in depressione durante la fase di spento del bruciatore stesso, come invece avverrebbe se fosse installato un aspiratore autonomo.

Anche in questo caso nella fig. 4 sono ben visibili i flussi dei fluidi interessati durante la fase di START e di ON.

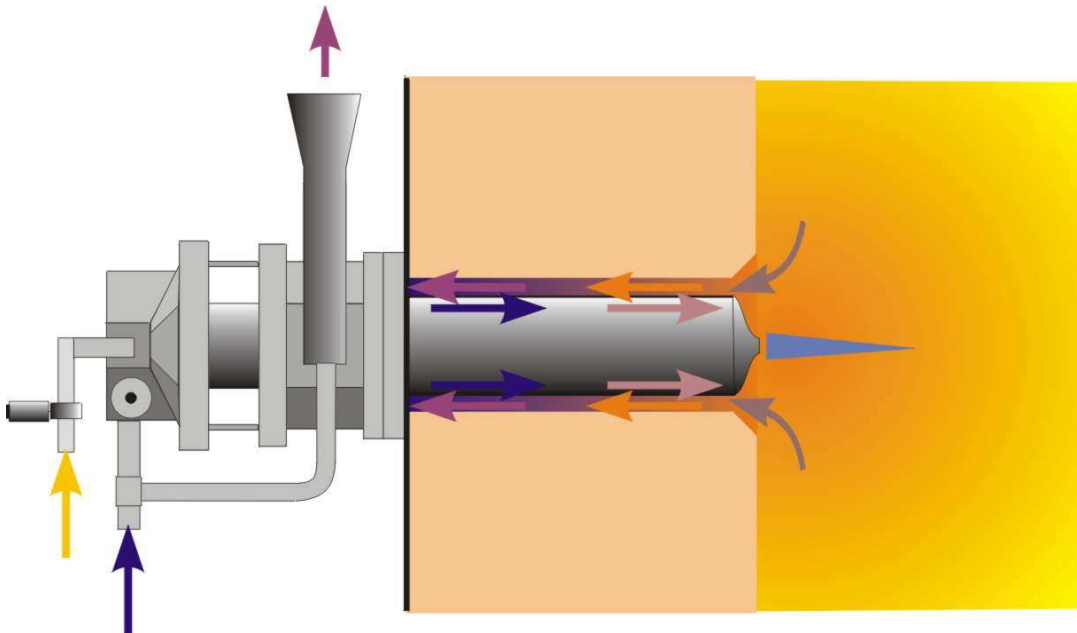


figura 4

Bruciatori autorecuperativi applicati ai tubi radianti

In molti forni da trattamento termico il processo esige l'uso di una atmosfera controllata, a volte per motivi di protezione delle superfici, altre come parte integrante del trattamento stesso.

Escludendo i forni elettrici che esulano dalle finalità di questa memoria, rimangono due possibili soluzioni tecniche per garantire un riscaldamento senza inquinamento dell'atmosfera.

La prima prevede l'utilizzo di una muffola metallica che garantisca la separazione tra l'atmosfera interna a contatto con il carico e quella esterna di riscaldamento generata da bruciatori a fiamma libera. Date le difficoltà a realizzare muffole molto grandi soprattutto in forni orizzontali la soluzione a muffola incontra successo soprattutto per piccoli forni da trattamento.

Soluzione molto più diffusa è quella che prevede l'uso dei tubi radianti quale fonte di riscaldamento.

La combustione avviene all'interno di un tubo che può assumere forme differenti a seconda delle necessità e delle scelte tecniche del costruttore, il tubo metallico (ma volendo anche ceramico) riscaldato dall'interno irraggia verso la camera in cui è contenuto il carico da riscaldare come se fosse una resistenza elettrica.

In fig.5 sono riportate diverse possibili forme utilizzabili per la realizzazione di tubi radianti, si va dalla forma semplice del tubo dritto passante a quella classica ad U con la sua variante a ricircolo a P, da quella a grande sviluppo ad M a quella a ricircolo a doppio P.

Sui tubi in cui ingresso ed uscita dei fumi sono separati, l'utilizzo di un sistema di recupero di calore deve fare capo necessariamente ad un recuperatore disgiunto dal bruciatore stesso.

Nei tubi invece dove abbiamo un unico bocchello, possono essere installati con grande profitto i bruciatori autorecuperativi propriamente detti.

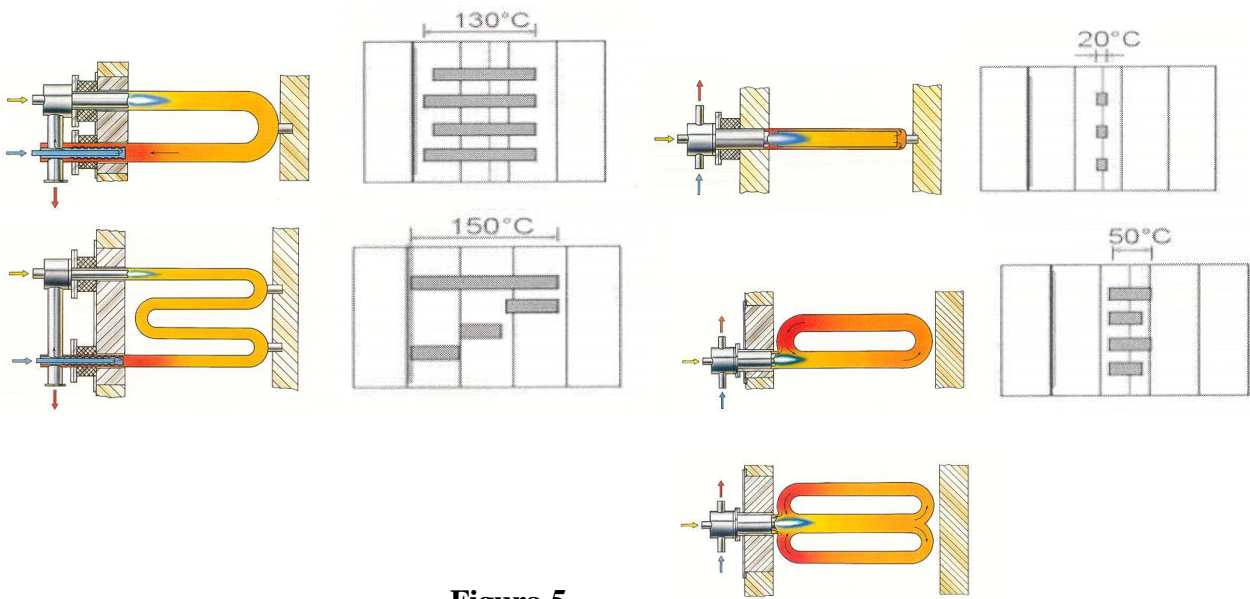


Figura 5

Come già accennato in precedenza la scelta della morfologia del tubo da adottare passa attraverso scelte e considerazioni di tipo impiantistico, funzionale e non ultimo economico.

Su impianti di grande potenzialità produttiva, come i forni delle linee di zincatura continua, si tende ad installare tubi radianti ad U od a M al posto di tubi dritti, per limitare il numero di unità a parità di superficie radiante.

Se questo comporta un indubbio risparmio in termini economici e impiantistici, è altrettanto vero che dal punto di vista della uniformità termica la soluzione del tubo dritto con ricircolo interno garantisce migliori performance, anche per ciò che riguarda le emissioni.

A titolo di esempio sempre in fig. 5 sono riportate le differenze in termini di uniformità termica ottenibili con le differenti tipologie di tubi radianti citate in precedenza.

Per ciò che riguarda il problema dell'astrazione dei fumi esausti, essendo il tubo radiante ermeticamente chiuso, i fumi fuoriescono autonomamente dallo stesso attraverso il recuperatore. E' però vero che questo determina uno stato di leggera sovrappressione interna nel tubo stesso.

Alcune applicazioni industriali prevedono delle atmosfere molto critiche alla presenza di umidità, allora in questi casi si rende necessaria l'installazione di un sistema di estrazione, al solo scopo di garantire una costante depressione all'interno del tubo durante il suo funzionamento; in caso di rottura di uno dei tubi non si avrà passaggio di fumi dal tubo alla camera, con conseguente inquinamento dell'atmosfera interna.

Applicazione industriale di tubi radianti autorecuperativi

Per meglio chiudere questa superficiale trattazione teorica sull'argomento autorecuperato, si passa ad illustrare le fasi che hanno portato alle scelte tecniche e progettuali di un moderno forno con impianto di riscaldamento autorecuperativo

L'impianto in questione è un impianto di ricottura per tubi commerciali ottenuti per saldatura.

Il processo che vi si realizza prevede una ricottura in bianco per tubi saldati di diametri variabili, la ricottura permette di restituire caratteristiche meccaniche ottimali alla zona alterata termicamente della saldatura, tutto questo in condizioni di atmosfera che limitino al minimo il problema di una decarburazione superficiale.

L'impianto completo prevede una sezione di caricamento dei tubi a formare un letto quasi continuo, un forno a rulli con apparato di riscaldamento costituito da tubi radianti, una zona di raffreddamento in atmosfera controllata a camicia d'acqua e una sezione di scarico e legatura dei fasci di tubi.

L'intervento che si va a descrivere ha comportato il rifacimento completo dell'apparato originale di riscaldamento del forno.

Nella situazione originale il forno montava tubi radianti a U nella prima zona di riscaldamento e tubi dritti nelle altre zone di riscaldamento e mantenimento fig. 6.



figura 6

I tubi avevano montati dei rudimentali recuperatori di calore coassiali.

L'intervento ha comportato lo smantellamento completo del forno, il rifacimento di parte delle carpenterie metalliche, in modo da adeguarle al nuovo assetto, il rifacimento completo dei rivestimenti interni al forno e la sostituzione completa del sistema di combustione e del sistema di regolazione e controllo con uno allo stato dell'arte.

La progettazione del nuovo assetto del forno, si è svolta avendo come punto di partenza una semplice e concisa serie di condizioni al contorno, da utilizzare come specifiche di partenza, nella tabella I sono riportate sinteticamente.

SPECIFICHE PER FORNO DI RICOTTURA IN BIANCO				
			max	Min
Dimensioni forno	27.150 x 2.000 mm			
Produttività		6,5 t/h		
Dimensioni tubi			Ø168,3 mm	Ø17,0 mm
Spessore tubi			11,00 mm	1,2 mm
materiali	Acciai carbonio		800 N/mm ²	280 N/mm ²
Trattamento di distensione			700 °C	750 °C
Trattamento di normalizzazione			840 °C	950 °C

Tabella I

La prima scelta operata è stata quella relativa al tipo di tubo e bruciatore da utilizzare.

Si è scelto di standardizzare tutto il forno su un medesimo modello di tubo radiante, poiché la lunghezza del forno era fissata, per poter ottenere un tempo di trattamento sufficiente la parte di riscaldamento del carico doveva essere rapida.

Questo comportava di massimizzare lo scambio e la potenza installata sulle prime zone.

Poiché lo scambio tra tubo radiante e forno dipende dalla differenza di temperatura tra la superficie del tubo e l'ambiente, fissata la seconda dal processo rimane come unico parametro su cui agire la temperatura superficiale.

A questo punto il valore massimo raggiungibile dalla superficie del tubo dipende dalla resistenza del materiale usato.

Rimanendo nel campo delle leghe Ni-Cr, la temperatura massima di esercizio aumenta all'aumentare del tenore dei due elementi, ma in parallelo ne aumenta anche in maniera notevole il prezzo.

Ecco allora che per poter ottenere il miglior compromesso tecnico economico, bisogna scegliere la soluzione che permetta di avere una uniformità superficiale ottimale, in modo che tutta la superficie del tubo radiante sia vicino alla temperatura massima di esercizio del materiale senza superarla.

In questo modo lo scambio termico per unità di superficie viene massimizzato.

Ricordando quello già mostrato nella fig. 5 risulta chiaramente perché la scelta è caduta sul tubo dritto con ricircolo interno.

La seconda scelta da fare era legata alla distribuzione dei tubi radianti per zona, in funzione della curva di riscaldamento ottenibile.

Questa è stata studiata utilizzando un modello alle differenze finite, che tiene contemporaneamente conto dello scambio termico tra superficie del tubo radiante, pareti del forno, superficie e geometria del carico.

In questo modo, variando la disposizione dei tubi, è possibile ottimizzare la distribuzione del carico termico, anche allo scopo di limitare al necessario il numero dei tubi installati.

In fig. 7 è possibile vedere un esempio del risultato grafico ottenuto durante questa analisi.

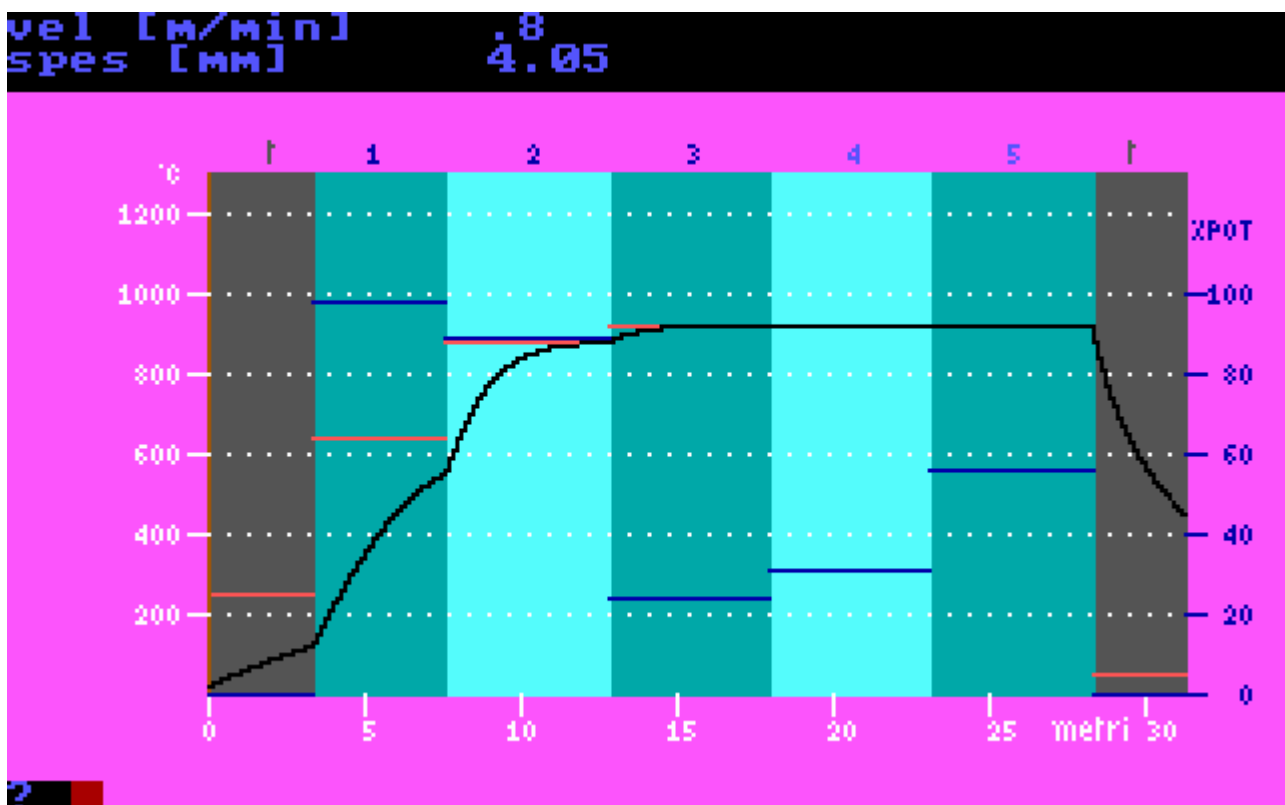


figura 7

Nella tabella II, sono invece riassunti i risultati delle scelte, in termini di potenza installata, nelle varie zone in cui alla fine è stato suddiviso il forno, al termine dell'analisi descritta in precedenza.

	Zona 1	Zona2	Zona3	Zona4	Zona5	Un.
Lunghezza	4.300	5.160	5.160	5.160	3.895	mm
N° bruciatori	20	20	12	6	4	pz
Potenza unit.	30	30	30	30	30	kW
Potenza tot.	600	600	360	180	120	kW

Tabella II

Realizzazione del progetto industriale

Al termine della fase di analisi teorica del progetto si è passati alla progettazione esecutiva dell'intervento, il fig. 8 si può vedere la vista laterale definitiva del forno dopo la progettazione. Sul disegno esecutivo per una migliore chiarezza è stato riportato anche lo schema di divisione in zone adottato.

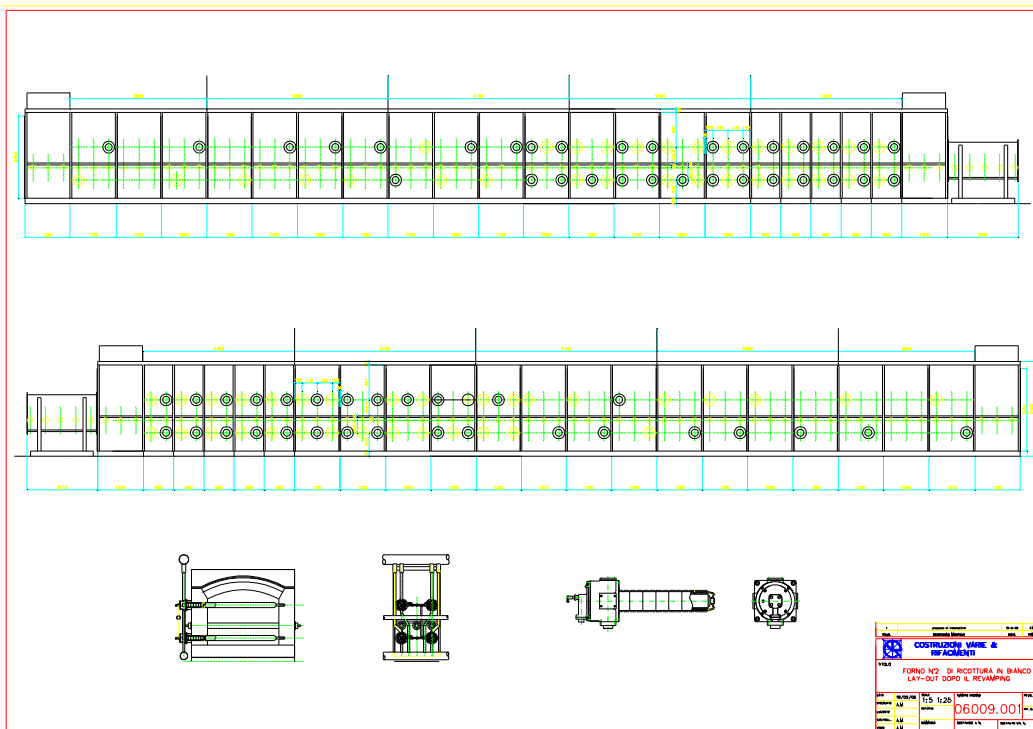


figura 8

La progettazione esecutiva ha tenuto conto delle necessità manutentive dell'impianto, proponendo un disegno di installazione modulare, che facilitasse l'eventuale accesso manutentivo anche alla meccanica di movimentazione, allo scopo di minimizzare i tempi di fermo.

In fig. 9 il disegno del piping tipico per il caso della massima densità dei tubi.

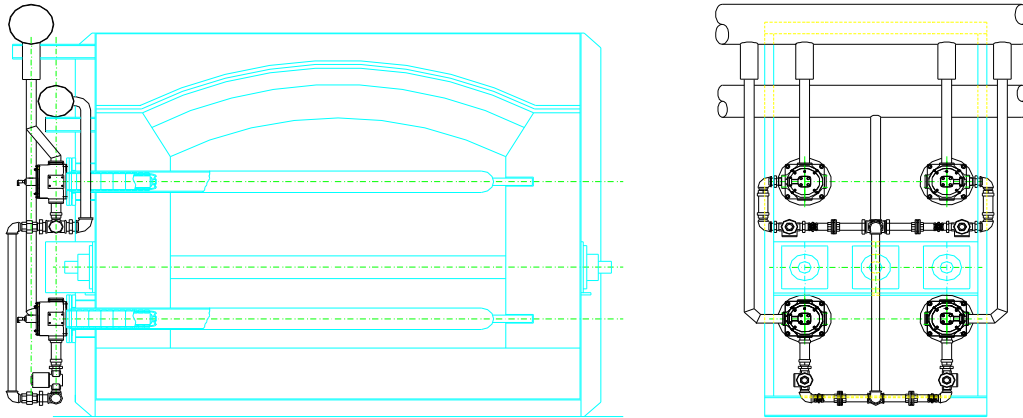


Figura 9

Per ciò che riguarda il sistema di controllo e regolazione, è stato sviluppato un sistema ottimizzato per il mantenimento di tolleranze di temperatura particolarmente ristrette.

Il sistema fa capo ad un PLC che gestisce tutto il sistema di regolazione, la movimentazione del carico rimane affidata ad un'altra unità, che sovrintende a tutte le movimentazioni dell'intero impianto.

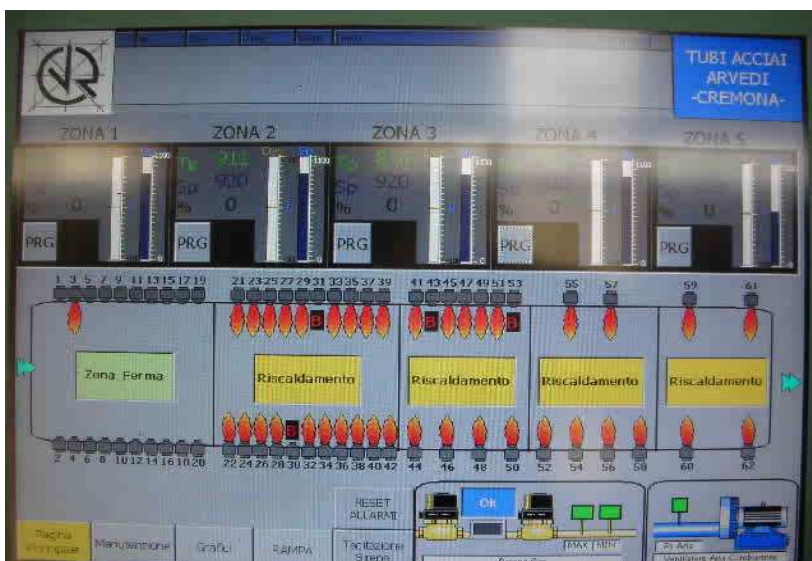


figura 10

Ogni bruciatore è gestito localmente da una centralina di controllo che ne produce accensione, spegnimento e diagnostica di eventuali anomalie.

Il PLC dialoga con ogni singola unità per mezzo di un BUS, attraverso cui si ha un flusso di informazioni biunivoco tra PLC e centralina locale, che permette di avere dal pulpito un controllo totale del forno.

La gestione della potenza erogata per zone avviene utilizzando il sistema di regolazione ON-OFF, con gestione della sequenza di accensione tipo “sequential-firing” per massimizzare la distribuzione termica e quindi il mantenimento dell’uniformità.



In fig. 10 una schermata tipica visibile sul pannello operatore. Il progetto totale ha richiesto 100 giorni tra l’assegnazione dell’incarico e l’uscita del primo tubo dal forno, la fase di impianto fermo è stata limitata a 4 settimane compresa la settimana di essiccazione dei refrattari.

Prestazioni del forno

Dopo un congruo periodo di assestamento della produzione, sono stati rilevati tutti i parametri sensibili relativi al funzionamento.

Questo allo scopo di determinare la rispondenza delle prestazioni alle specifiche iniziali, oltre che determinare eventuali margini disponibili per un funzionamento con fuori servizio di parte del sistema di riscaldamento.

Per determinare la curva di riscaldamento operata sul carico sono state condotte delle prove con tubi strumentati di diverse dimensioni, utilizzando un sistema di registrazione inseribile in camera. Uno dei risultati campione ottenuti è mostrato in fig. 12

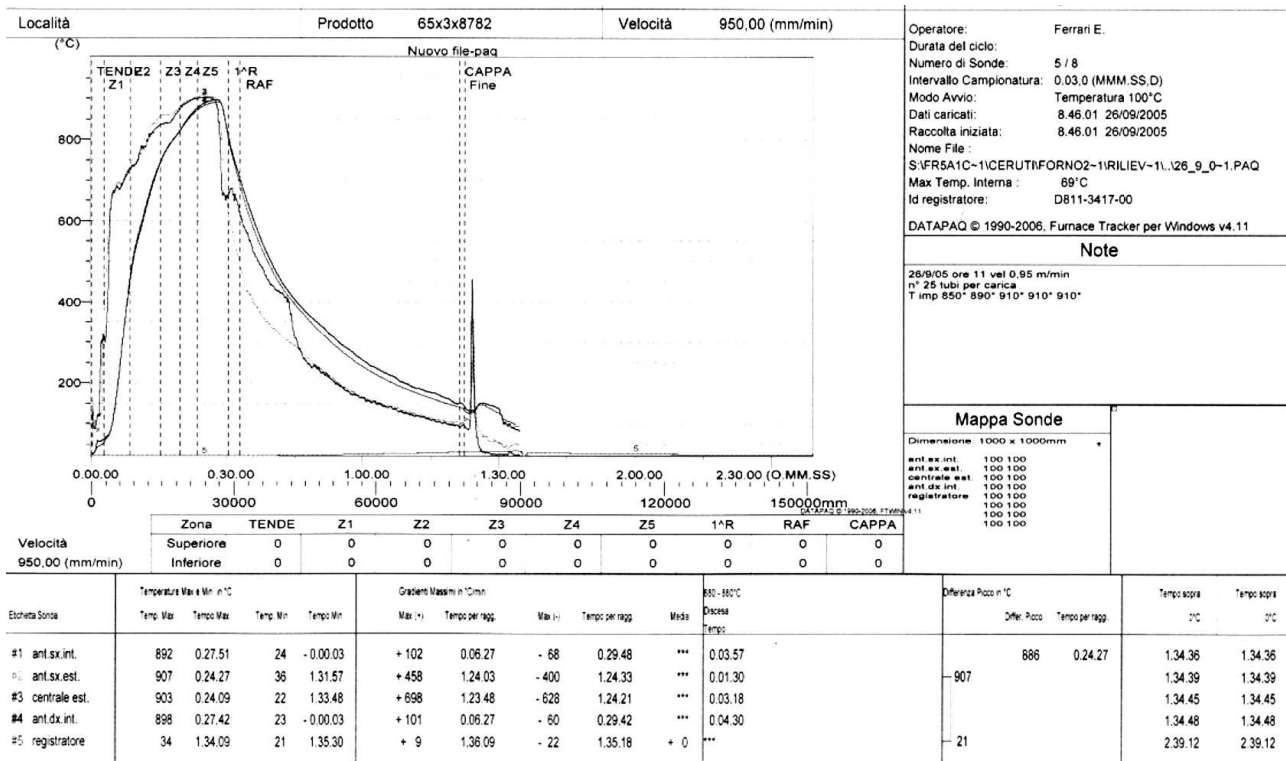


figura 12

In termini di rendimento e poi di consumo, sono state rilevate le temperature di scarico dei fumi ed eseguiti rilievi di portata, in periodi di funzionamento continuo. In tabella III sono visibili i valori rilevati per le temperature dei fumi alle caminelle di ogni singolo bruciatore, le condizioni di funzionamento erano quelle di targa.

1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
480	478	475	486	481	484	476	478	481	490
1-11	1-12	1-13	1-14	1-15	1-16	1-17	1-18	1-19	1-20
485	485	490	479	480	491	486	492	487	488
2-1	1-1	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
492	490	496	491	497	495	492	500	493	498
2-11	2-12	2-13	2-14	2-15	2-16	2-17	2-18	2-19	2-20
497	501	503	498	507	501	502	507	504	509
3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
511	509	518	512	520	519	516	518	520	521
3-11	3-12								
516	520								
4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6				
523	530	527	526	529	528				
5-1	5-2	5-3	5-4						
528	529	524	530						

Tabella III-a

Zone	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Temperatura Media Dei fumi	484	499	516	527	527

Tabella III-b

La taratura dei bruciatori prevedeva un ossigeno nei fumi prossimo al 2% ciò che determina un valore di $\lambda = 1,1$

Facendo riferimento a questo valore medio del lambda e alle temperature medie rilevate per zona, è stato possibile calcolare il rendimento di ogni singola zona.

I valori ottenuti sono quelli visibili nella tabella dei risultati, tabella IV.

Zone	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
rendimento	0.79	0.77	0.75	0.74	0.74

Tabella IV

I consumi sono stati determinati rilevando il gas consumato durante un periodo di funzionamento regolare di 2 ore sempre con lo stesso prodotto, i rilievi sono stati effettuati per produzione di tubi piccoli e grandi ma sempre alla produttività di targa.

Anche in questo caso i risultati sono visibili nella tabella V.

FORNO REVAMPATO		
	Tubo piccolo	Tubo grande
Consumo specifico [Nm ³ /t]	30	29
FORNO ORIGINALE		
Consumo specifico [Nm ³ /t]	33-35	
FORNO CALCOLATO SENZA RECUPERO		
Consumo specifico [Nm ³ /t]	44	

In questa tabella oltre ai risultati rilevati in campo, sono riportati i consumi specifici del forno prima dell'intervento e quelli calcolati per un forno simile ma senza recupero.

E' possibile apprezzare il risparmio ottenibile rispetto al forno senza recupero, e quello ottenuto rispetto alla soluzione originale, non allo stato dell'arte.