



Ricerca di Sistema elettrico

Apparato sperimentale per la caratterizzazione di letti adsorbenti innovativi in cicli aperti per il recupero di cascami termici in processi di essiccazione industriale

G.L. Guizzi - M. Manno - A. Zaccagnini - M. Salvatori - S. Bellocchi

APPARATO SPERIMENTALE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI LETTI ADSORBENTI INNOVATIVI IN CICLI APERTI PER IL RECUPERO DI CASCAMI TERMICI IN PROCESSI DI ESSICCAMENTO INDUSTRIALE.

G.L. Guizzi - M. Manno - A. Zaccagnini - M. Salvatori - S. Bellocchi
(Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Roma "Tor Vergata")

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Tematica di ricerca: Processi e macchinari industriali

Progetto: D3 Efficienza energetica nel settore industria

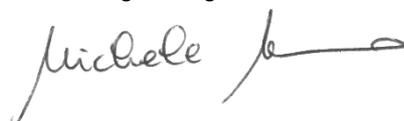
Obiettivo: B.1 Materiali innovativi per lo sviluppo di sistemi per il recupero energetico da cascami termici in ambito industriale

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Sviluppo di sistemi per il recupero energetico da cascami termici a bassa temperatura. Caratterizzazione sperimentale di letti di materiali adsorbenti innovativi in cicli aperti"*

Responsabile scientifico ENEA: Dott.ssa Marzia Pentimalli

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Roma "Tor Vergata": Ing. Michele Manno



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 LAYOUT APPARATO SPERIMENTALE	7
2.1 CASCAMI TERMICI E IDRICI NEI PROCESSI DI ESSICCAMENTO DELLA PASTA	7
2.2 METODOLOGIA INNOVATIVA PER IL RECUPERO DI CALORE E ACQUA DAL PROCESSO DI ESSICCAMENTO DELLA PASTA	9
2.3 DESCRIZIONE LAYOUT APPARATO SPERIMENTALE	14
3 SOTTOSISTEMI APPARATO SPERIMENTALE	19
3.1 LETTO MATERIALE ADSORBENTE (MOF) E FILTRO HEPA	19
3.2 RISCALDATORE ELETTRICO (HEATER)	21
3.3 UMIDIFICATORE (UMI).....	23
3.4 CONDENSATORE E CIRCUITO IDRAULICO	24
3.5 VENTILATORI CIRCUITO AERAUICO	26
3.6 CONDOTTE E VALVOLE.....	28
4 SENSORISTICA E SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI	29
4.1 SENSORISTICA.....	29
4.1.1 <i>Sensori di umidità</i>	29
4.1.2 <i>Sensori di temperatura</i>	30
4.1.3 <i>Misuratori di flusso</i>	31
4.1.4 <i>Sensori di pressione</i>	34
4.2 SISTEMA ACQUISIZIONE DATI	35
4.2.1 <i>Conversione del segnale</i>	35
4.2.2 <i>Acquisizione, registrazione e visualizzazione dei dati</i>	36
5 TEST FUNZIONALI DELL'APPARATO SPERIMENTALE	38
5.1 MATERIALE ADSORBENTE.....	38
5.2 PROVE DI ADSORBIMENTO	38
5.3 PROVE DI DESORBIMENTO.....	42
5.4 ANALISI DEI DATI	43
6 CONCLUSIONI	45
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	47

Sommario

Il presente documento intende descrivere un apparato sperimentale realizzato, presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UTV), nell'ambito delle attività di sviluppo di una metodologia innovativa basata sull'impiego di materiali adsorbenti avanzati (MOF) e finalizzata al recupero di cascami termici a bassa temperatura nel settore agroalimentare, specificatamente nella fase di essiccazione del processo di produzione della pasta alimentare. Adottando la soluzione tecnologica proposta si realizza un parziale trasferimento dei consumi termici di un essiccatore, che generano cascami non recuperabili, verso quelli elettrici che permettono il recupero completo internamente al processo di essiccazione di tutti i cascami termici generati, con riduzione complessiva del consumo di energia primaria.

L'apparato sperimentale in questione, denominato STEAM – Sistema Termico per Essiccazione d'Aria mediante Materiali adsorbenti avanzati, è in particolare destinato alla caratterizzazione dei letti adsorbenti innovativi di tipo MOF e del ciclo termodinamico che sono alla base della metodologia proposta.

Dopo una breve introduzione nel primo capitolo, che inquadra il lavoro di progettazione e sviluppo dell'apparato svolto dal gruppo di ricerca di UTV nel quadro dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, nel secondo capitolo viene presentato il layout dell'apparato sperimentale ideato e realizzato presso i laboratori dell'Università, richiamando preliminarmente gli elementi principali che caratterizzano i processi industriali di essiccazione della pasta e i principi di funzionamento della tecnologia di efficientamento proposta.

Nel terzo capitolo vengono quindi descritti nel dettaglio tutti i sottosistemi del medesimo apparato, le loro modalità di funzionamento e i relativi componenti, mentre nel quarto capitolo viene presentato il relativo sistema di acquisizione dati completo di sensoristica. Infine, nel quinto ed ultimo capitolo vengono analizzati i risultati delle prime prove sperimentali condotte con STEAM.

Le successive conclusioni, riassumendo lo stato di avanzamento dello sviluppo della metodologia di efficientamento proposta, si completano con l'indicazione delle linee di sviluppo future.

1 Introduzione

Il presente rapporto tecnico riguarda la descrizione di un *apparto sperimentale*, denominato STEAM - Sistema Termico per Essiccazione d'Aria mediante Materiali adsorbenti avanzati, realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata (UTV), nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA.

L'intervento rappresenta la prima fase di sviluppo sperimentale della *metodologia innovativa per il recupero di cascami termici a bassa temperatura dai processi di essiccazione industriale nel settore agroalimentare* definita nel corso della prima annualità della collaborazione (PAR 2015) focalizzando in particolare l'attenzione sull'*essiccazione della pasta alimentare*; tale processo è stato infatti valutato come il più interessante da un punto di vista dello sviluppo industriale di un sistema di recupero energetico, essendo questo un processo continuo, che non prevede stagionalità, effettuato a temperature sufficientemente alte e largamente diffuso sul territorio nazionale.

La metodologia proposta si basa su un ciclo termodinamico ad adsorbimento di nuova concezione, appositamente ideato nell'ambito dell'attività, sostanzialmente di tipo aperto, che prevede l'impiego di materiali adsorbenti avanzati ad elevata superficie specifica come zeoliti, materiali organici e ibridi metallorganici (meglio noti come MOF). Il ciclo è stato già completamente caratterizzato dal punto di vista teorico per la specifica applicazione nell'industria pastaria e, congiuntamente con il gruppo di ricerca dell'ENEA, sono stati individuati alcuni materiali avanzati di tipo MOF utilizzabili per la realizzazione dei letti assorbenti.

L'*apparato sperimentale* in questione, dimensionato in scala banco e ad oggi completamente realizzato e testato funzionalmente, verrà utilizzato nella terza annualità per le attività di caratterizzazione del comportamento termofisico dei letti di materiali adsorbenti, al variare delle condizioni termogrometriche dei flussi che li attraversano, e di caratterizzazione termodinamica del ciclo. Tale caratterizzazione dei materiali adsorbenti è fondamentale soprattutto al fine di colmare la sostanziale carenza di informazioni in letteratura (riscontrata nell'analisi bibliografica condotta su tali materiali nella corso della prima annualità [2,7,12,14]), particolarmente significativa in relazione ai parametri che regolano le cinetiche delle reazioni di adsorbimento e desorbimento. I parametri cinetici risultano di fatto indispensabili per valutare l'effettiva percorribilità della soluzione tecnologica dal punto di vista industriale e sono discriminanti in fase di selezione del materiale stesso, in quanto cinetiche troppo lente comportano la realizzazione di apparecchiature caratterizzate da ingombri elevati che potrebbero superare quelli massimi consentiti per l'applicabilità impiantistica. Le risultanze sperimentali che potranno essere ottenute con il dispositivo scala banco dovranno essere confrontate con quelle ottenute dall'ENEA per piccoli campioni dei medesimi materiali, al fine di evidenziare la presenza di eventuali effetti di scala: è infatti dimostrato in letteratura [13] che i materiali adsorbenti in condizioni di *bulk* (come nel caso dei letti) possono manifestare effetti di scala con scostamenti anche significativi del comportamento dei letti stessi rispetto a quanto atteso sulla base delle caratteristiche dei materiali adsorbenti che li costituiscono.

Per lo sviluppo dell'apparato, condotto dagli autori del presente documento sempre in stretta collaborazione con il gruppo di ricerca dell'ENEA, si è proceduto preliminarmente con l'analisi delle effettive esigenze sperimentali in termini di misura delle grandezze fisiche di interesse e modalità di esecuzione delle prove. Tale analisi è stata condotta al fine di conseguire le caratterizzazioni richieste, con valutazione contestuale delle effettive capacità di indagine dei due gruppi di ricerca tenendo conto delle risorse strumentali (di laboratorio), economiche e umane disponibili; in tal modo è stato possibile definire i limiti di possibile intervento dell'attività di ricerca e i requisiti di massima dell'apparato sperimentale.

Sulla base di quanto stabilito si è quindi proceduto all'ideazione e progettazione dell'apparato individuando soluzioni idonee per la realizzazione dei singoli sottosistemi (letto adsorbente, umidificatore, condensatore, ecc.) che lo costituiscono. Si è poi proceduto, nei vincoli di budget, alla selezione dei materiali costruttivi, dei componenti e degli strumenti di misura e controllo necessari, valutandone la disponibilità sul mercato, individuando i fornitori e seguendo successivamente il complesso processo di approvvigionamento. Parallelamente è stato avviato l'acquisto dell'hardware e lo sviluppo del software dedicato all'acquisizione

e alla gestione dei dati. Una volta disponibili tutti i componenti si è effettuato presso i laboratori di UTV l'assemblaggio dell'intero sistema, completo di sensoristica, sistemi di controllo e sistema di monitoraggio. Sono state infine condotte tutte le verifiche funzionali dell'apparato sperimentale sia attraverso l'esecuzione di procedure per il controllo della corretta calibrazione degli strumenti di misura, basate su misure di riscontro e sul rispetto dei bilanci energetici lato aria e lato acqua, sia attraverso l'esecuzione di opportuni test di verifica del corretto funzionamento del banco nel suo complesso e della sua capacità di creare e mantenere nel tempo il flusso di aria umida richiesto alle condizioni termoigrometriche previste nelle varie sezioni dell'apparato. Nel corso di queste attività è stato necessario implementare, di volta in volta, numerosi interventi migliorativi sul banco di prova al fine di superare in maniera adeguata le differenti problematiche e criticità riscontrate.

2 Layout apparato sperimentale

Il layout dell'apparato sperimentale è stato definito nel rispetto dei requisiti ad esso richiesti per la caratterizzazione sia termofisica dei letti adsorbenti sia del ciclo termodinamico che essi dovranno compiere, simulando con sufficiente veridicità il successivo utilizzo in applicazioni industriali; in particolare l'apparato è stato progettato e sviluppato per essere in grado di ricreare le condizioni di lavoro alle quali il materiale adsorbente dovrebbe essere sottoposto nel reale funzionamento.

La metodologia innovativa ideata per realizzare il recupero dei cascami termici ed idrici associati ad un generico processo di essiccazione della pasta è stata ampiamente descritta nel rapporto tecnico della precedente annualità (PAR2015) [1] e in un articolo pubblicato sulla rivista Energy [19] ai quali si rimanda per i necessari approfondimenti.

Nel presente capitolo per completezza vengono richiamati prima alcuni elementi salienti del processo di essiccazione, poi il principio di funzionamento della metodologia di recupero del calore proposta e gli schemi di implementazione impiantistica, e quindi descritto il layout dell'apparato sperimentale realizzato.

2.1 Cascami termici e idrici nei processi di essiccazione della pasta

Il processo di produzione della pasta può essere realizzato in numerose varianti [8], che portano a differenti disegni della linea di produzione e diverse modalità operative di gestione della stessa. Tali varianti sono spesso dettate dalla necessità di configurare il processo in base alle caratteristiche specifiche delle materie prime impiegate e del prodotto che si vuole ottenere (caratteristiche organolettiche, tempi di cottura ecc.), ma possono anche dipendere dal semplice fatto che il generico pastificio prediliga per "tradizione" una soluzione tecnologica ad un'altra. In ogni caso il processo di produzione della pasta nel suo complesso può essere visto come la successione di due fasi, la prima che comprende la formazione e la lavorazione dell'impasto e che termina con la trafilatura, la seconda costituita dall'essiccamento.

Con riferimento specifico alla fase di essiccamento, che in genere avviene in più sezioni, la variabilità delle tecnologie di processo adottabili si traduce in profili di temperatura e umidità residua della pasta e in parametri di processo, quali soprattutto temperature, umidità e portate dell'aria in ingresso/uscita dall'impianto e/o riciclate, molto differenti da caso a caso.

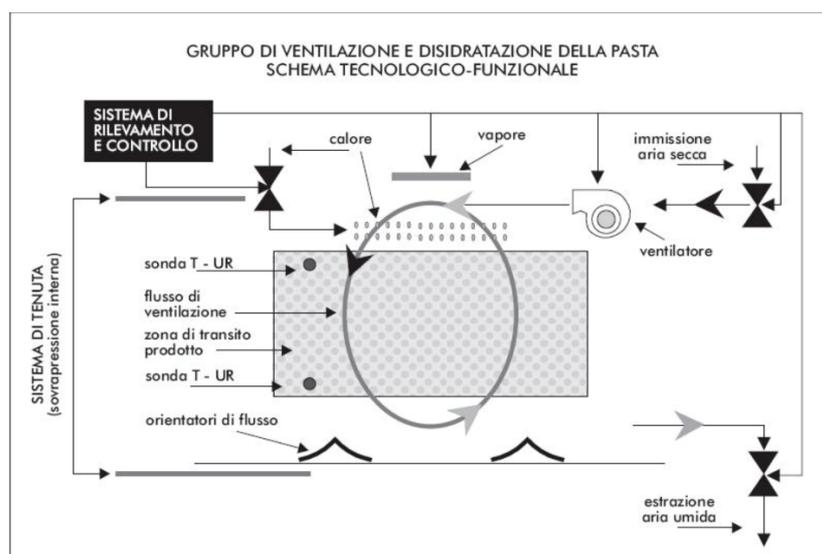


Figura 1. Schema funzionale di un gruppo di ventilazione all'interno di un essiccatore.

Dal punto di vista impiantistico una sezione di essiccatore è generalmente costituita — come mostrato in maniera schematica in **Figura 1** — da uno scompartimento all'interno del quale con continuità circola aria a

temperatura e umidità controllate, che vengono mantenute regolando il flusso di aria di rinnovo prelevata dall'esterno (ovviamente pari al flusso di aria estratta) che va a miscelarsi con l'aria di ricircolo, e il livello di riscaldamento della miscela così ottenuta.

Volendo caratterizzare energeticamente il processo di essiccamento al fine di effettuare una valutazione *qualitativa* dei reali margini di efficientamento disponibili, è possibile definire una schematizzazione sufficientemente generica del processo di lavorazione della pasta secca, che permette di valutare i cascami termici ed idrici in esso presenti e le potenzialità di recupero degli stessi. Secondo tale schematizzazione le due fasi del processo produttivo si realizzano rispettivamente in due distinte sezioni della linea di produzione: l'impastatrice e l'essiccatore (visto come l'insieme delle sue sotto-sezioni)

Concentrando l'attenzione sui flussi energetici e di massa di maggiore interesse che attraversano dette due sezioni di impianto (trattate in questo approccio semplificato come blackbox) è possibile definire lo schema di massima rappresentato nella seguente **Figura 2**.

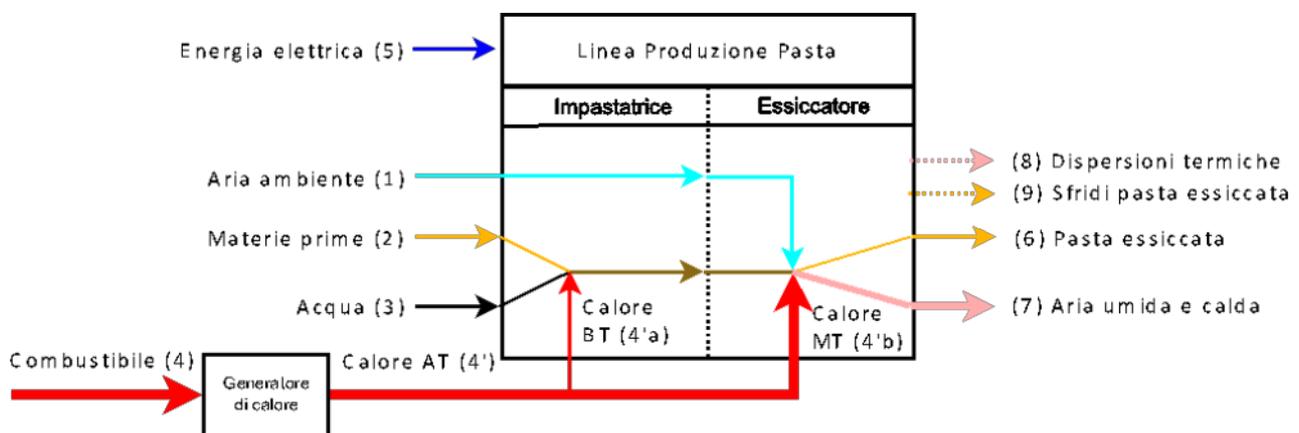


Figura 2. Schematizzazione dei flussi energetici e di massa in un generico processo di essiccamento della pasta.

È facile individuare tra i flussi riportati nello schema i *cascami* in essi presenti nonché comprendere quali siano le inefficienze più meno manifeste che caratterizzano il processo produttivo. In estrema sintesi, l'aria ambiente (1) prelevata dall'esterno viene impiegata nell'essiccatore come fluido termovettore e come mezzo di trasferimento all'esterno, mediante il flusso (7), dell'umidità sottratta alla pasta. All'interno dell'essiccatore vi è infatti aria calda e umida che viene continuamente ricircolata in ciascuna delle varie sezioni in cui questo è suddiviso; tale aria lambendo la pasta si umidifica seguendo una trasformazione approssimativamente isoentalpica e conseguentemente si raffredda, successivamente passando attraverso scambiatori di calore - alimentati dal flusso (4'b) - incrementa il suo contenuto energetico riportandosi al valore di temperatura di inizio ciclo. Il flusso (1) nello schema rappresenta la somma di tutti i flussi di aria secca di rinnovo inviati alle varie sezioni dell'essiccatore che si miscelano continuamente con i flussi riciclati ottenendo una regolazione del contenuto medio in umidità dell'aria riciccolata; parallelamente il flusso (7) rappresenta l'insieme di tutti i flussi caldi ad elevato tasso di umidità espulsi dalle medesime sezioni dell'essiccatore per compensare i flussi in ingresso e mantenere così costante il contenuto di aria all'interno dell'apparecchiatura. A meno di perdite per trafile e dispersioni di aria dalle sezioni di ingresso ed uscita dell'essiccatore, la portata di aria secca relativa al flusso (1) in ingresso è pari alla portata di aria secca del flusso (7) in uscita dall'apparecchiatura.

Il flusso di acqua potabile in ingresso all'impastatrice per la formazione dell'impasto lo si ritrova quasi integralmente in uscita dall'essiccatore nella forma di vapore contenuto nel flusso (7) di aria umida disperso in ambiente. *L'acqua rappresenta quindi una materia prima potenzialmente recuperabile a valle del processo* in quanto non concorre alla formazione del prodotto finito che possiede un contenuto di acqua

(mediamente 12,5% in peso, riferito alla sostanza umida) in genere leggermente inferiore a quello (in genere 14%) delle materie prime impiegate nella formazione dell'impasto.

Il calore introdotto con il flusso (4'), viene prodotto a temperature medio alte (comunque inferiori a 200 °C) ma è impiegato in minima parte (4'a) a temperature basse (anche inferiori a 50 °C) nell'impastatrice, ma soprattutto (4'b) a temperature medie (intorno ai 70-100 °C) nell'essiccatore. Tale flusso energetico è destinato prevalentemente ad alimentare l'evaporazione dell'acqua e a compensare le perdite di calore verso l'esterno (che in molti casi possono essere molto consistenti) e lo si ritrova quindi in gran parte nell'entalpia del flusso (7) dell'aria umida e calda in uscita dall'essiccatore che rappresenta *il principale cascame del processo*.

In conclusione il flusso (7) è quindi sostanzialmente costituito dal flusso (1) di aria secca entrante nell'impianto e dal flusso (3) di acqua inviata all'impastatrice, ed ha un contenuto energetico corrispondente alla quota parte del flusso (4'b) destinata ad alimentare termicamente il processo evaporativo dell'acqua contenuta nella pasta umida in uscita dalla trafila.

Trattandosi di aria calda ad elevato tasso di umidità, ovvero elevato contenuto di vapore acqueo, l'entalpia del flusso (7) risulta estremamente elevata e viene continuamente dispersa in ambiente. Scopo dell'intervento di efficientamento energetico descritto nel successivo paragrafo è quindi quello di recuperare in maniera significativa il cascame termico e quello idrico presenti nello stesso flusso (7).

2.2 Metodologia innovativa per il recupero di calore e acqua dal processo di essiccamento della pasta

La metodologia innovativa in questione si basa, oltreché sull'impiego di *materiali adsorbenti di ultima generazione*, su un ciclo¹ che può considerarsi derivato dall'unione di un ciclo aperto (generalmente utilizzato per la deumidificazione dell'aria) per il quale il flusso di aria da deumidificare mediante *adsorbimento* è quello generato dall'essiccatore, e da uno chiuso (generalmente utilizzato per la realizzazione di sistemi a pompa di calore) per il quale la *rigenerazione* del materiale adsorbente avviene ad elevata temperatura con contestuale recupero al condensatore del calore a temperatura medio-alta.

Il principio di funzionamento della tecnologia proposta può essere presentato introducendo lo schema generale di impianto della successiva **Figura 3** che sintetizza, come già fatto nella **Figura 2** del precedente paragrafo, i flussi energetici e di massa coinvolti nel processo produttivo della pasta modificato con l'adozione del ciclo stesso.

Dal confronto dei due schemi si vede come, nel caso dell'impianto con recupero, il flusso (7) di aria calda e umida in uscita dall'essiccatore venga, in tutto o in parte, ricircolato e fatto passare attraverso un letto di materiale adsorbente trasformandosi nel flusso (7') di aria parzialmente deumidificata e riscaldata; tale recupero ha chiaramente un effetto diretto sulla riduzione del flusso (1) di aria di rinnovo. In questo modo si realizza un ricircolo dell'energia di evaporazione e adsorbimento (condensazione) dell'acqua di impasto:

- l'aria riscaldata del flusso (7'), rinviata all'essiccatore, passando sulla pasta si raffredda fornendo all'acqua il calore necessario alla sua evaporazione; la trasformazione è pressoché isoentalpica in quanto l'aria del flusso (7') pur raffreddandosi si umidifica, incrementando la componente entalpica associata al contenuto di vapore, trasformandosi nel flusso (7) di aria meno calda e più umida;

¹ Per una trattazione introduttiva ai cicli termodinamici ad adsorbimento al solo scopo di disporre di un quadro di massima utile ai fini della comprensione della metodologia proposta, si può fare riferimento a quanto riportato nel capitolo 2 di [1], per ulteriori approfondimenti si rimanda invece all'ampia letteratura esistente sull'argomento della quale alcuni esempi ([3-6,9-11,15,16]) relativi alla presentazione dello stato dell'arte e a casi applicativi specifici sono inseriti tra i riferimenti bibliografici del presente documento.

- il flusso (7) passando sul letto di materiale adsorbente subisce una riduzione del contenuto di vapore che venendo adsorbito sul MOF stesso rilascia il calore di adsorbimento determinando l'incremento della temperatura dell'aria che torna nuovamente al valore di inizio ciclo del flusso (7'); la trasformazione è ancora pressoché isoentalpica ma in questo caso si ha un incremento della componente sensibile del contenuto entalpico e una riduzione di quella latente associata al contenuto in vapore acqueo.

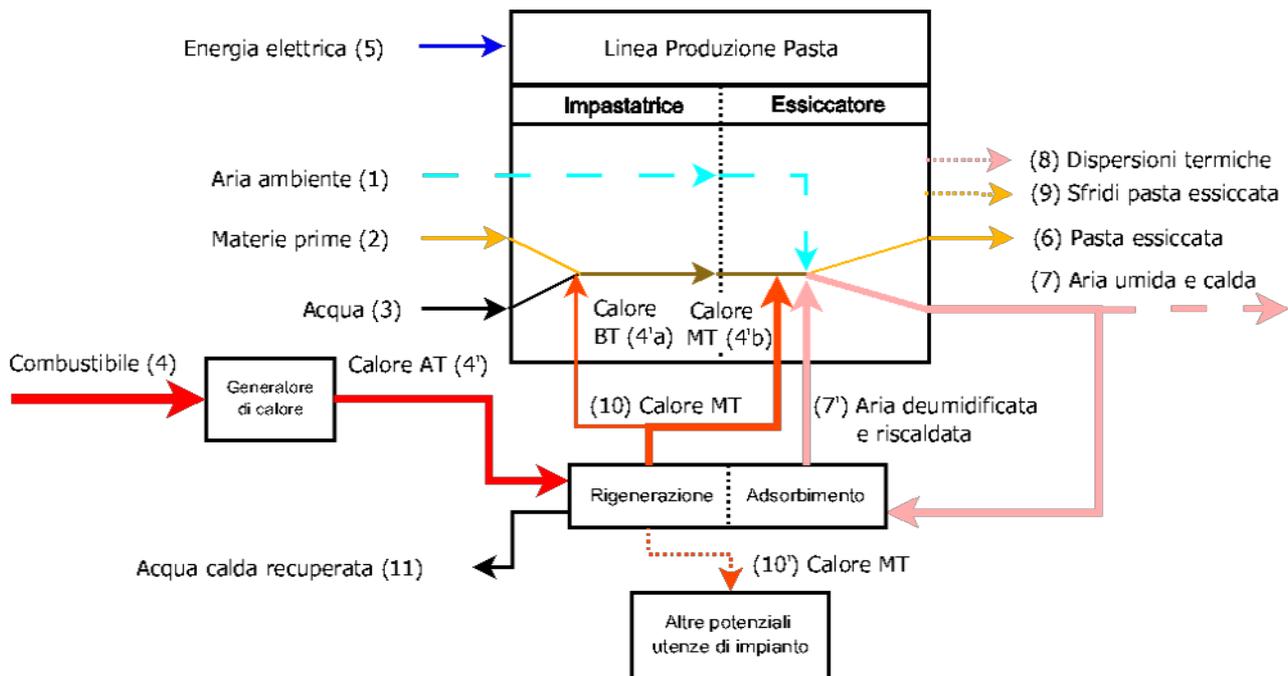


Figura 3. Schematizzazione dei flussi energetici e di massa di un generico processo di essiccamento della pasta con sistema di recupero dei cascami termici ed idrici.

Proseguendo il confronto tra le due soluzioni impiantistiche si osserva che il flusso (4) di combustibile viene ancora utilizzato per produrre calore ad alta temperatura, flusso (4'), ma tale calore non viene più utilizzato nel processo a bassa o media temperatura, flussi (4'a) e (4'b) di **Figura 2**, ma utilizzato tal quale (cioè ad alta temperatura) per la rigenerazione del materiale adsorbente. Lo stesso flusso di calore (4') lo si ritrova quindi quasi integralmente (a meno delle perdite verso l'esterno) nei seguenti flussi a media temperatura in uscita dal rigeneratore:

- flusso (10), inviato all'impianto di produzione della pasta, che potrà essere utilizzato per alimentare l'impastatrice (in sostituzione del flusso a bassa temperatura (4'a) di **Figura 2**) e nell'essiccatore per compensare le perdite termiche verso l'esterno, che sono sempre presenti e generalmente consistenti (normalmente dello stesso ordine di grandezza del flusso di calore di evaporazione), o sezioni di essiccazione per le quali, considerando i parametri di processo, potrebbe risultare economicamente non conveniente l'impiego di un sistema di recupero;
- flusso (10'), eventualmente inviato ad altre utenze dello stesso impianto o di impianto limitrofo;
- flusso (11), calore sensibile associato alla quota di acqua di impasto recuperata al pozzo caldo del condensatore.

I flussi (10) e (10') possono essere trasferiti, come avviene normalmente in questi casi, mediante un fluido termovettore (generalmente acqua, eventualmente in pressione) circolante in un sistema di scambiatori di calore a circuito chiuso.

Si precisa che la rigenerazione richiede calore ad alta temperatura — tanto più alta quanto più piccolo è l'alfa che caratterizza il MOF e quanto maggiore è la temperatura richiesta per il successivo recupero termico (calore MT) associato alla condensazione del vapore rilasciato dal MOF — pertanto il livello di temperatura del flusso (4') nei due casi potrebbe essere leggermente diverso, specificatamente più alto per il caso del sistema con recupero.

Infine è sottinteso che per avere temperature di recupero maggiori di 100 °C sarà anche necessario lavorare, per la sola fase di rigenerazione dei MOF, a pressioni maggiori di quelle atmosferiche.

Un modo per comprendere il principio fisico alla base della metodologia proposta, più avanti illustrata nel dettaglio, è quello di osservare che alcuni MOF manifestano una maggiore affinità con l'acqua rispetto alla pasta in essiccazione; per tale motivo se la pasta da essiccare e il MOF si trovano in uno stesso ambiente si avrà un naturale processo di trasferimento dell'acqua dalla fase condensata trattenuta nell'impasto alla fase adsorbita (condensata) sulla superficie del MOF; tale processo procederà almeno finché il MOF non giunge a saturazione ed avviene attraverso trasformazioni isoentalpiche di evaporazione e successivo adsorbimento del vapore acqueo con un contributo energetico esterno potenzialmente nullo.

La temperatura e l'umidità relativa dell'aria, nella quale si disperde il vapore acqueo e che pertanto viene coinvolta negli scambi energetici tra le varie fasi presenti (sostanze solide – aria – vapore - acqua condensata), nonché l'eventuale ricircolo forzato della stessa, sono parametri che contribuiscono in maniera approssimativamente indipendente a determinare le cinetiche delle due trasformazioni.

Sfruttando tale effetto spontaneo di trasferimento dell'acqua dalla pasta al MOF è possibile ridefinire il processo industriale di essiccazione della pasta, che, come mostrato, è particolarmente oneroso da un punto di vista energetico non risultando possibili recuperi significativi diretti dai flussi di aria calda e umida da esso generati, prevedendo una prima fase di essiccazione della pasta con contestuale adsorbimento su MOF del vapore prodotto e una fase successiva di rigenerazione del MOF stesso *ad un livello di temperatura tale da permettere il recupero del calore di condensazione del vapore generato*.

In prima approssimazione con questo approccio metodologico la fase iniziale richiede un'alimentazione termica limitata alla compensazione delle perdite di calore verso l'esterno, mentre la seconda fase richiede un'alimentazione termica a temperatura medio-alta ma con un contestuale recupero quasi integrale (a meno delle dispersioni verso l'esterno) dello stesso calore di alimentazione ad una temperatura leggermente inferiore (media temperatura). Tale calore, come precedentemente illustrato, potrà in linea di massima essere rinviato al processo per alimentare la fase di essiccazione (compensando le dispersioni termiche) ed altre sezioni dell'impianto. Questa metodologia di efficientamento permette inoltre il recupero integrale dell'acqua di impasto che viene recuperata, a media temperatura, in fase condensata al pozzo caldo del condensatore.

Per garantire il funzionamento in continuo del sistema è chiaramente necessario l'impiego di almeno due letti di materiale adsorbente che lavorano in opposizione di fase (sfasati cioè di mezzo periodo di ciclo) in modo che quando un letto è in fase di adsorbimento l'altro è in fase di rigenerazione e viceversa.

Nella definizione di detta metodologia il primo e principale aspetto che è stato considerato è stato la possibilità di impiegare utilmente il cascame recuperato nell'ambito dello stesso processo produttivo escludendo a priori l'ipotesi di impiego in altri processi esterni (ad esempio processi potenzialmente presenti nello stesso insediamento industriale del pastificio), adottando quindi un approccio fortemente conservativo. Questa scelta chiaramente limita le modalità di recupero dei cascami disponibili, condizionando soprattutto i livelli di temperatura di alimentazione della fase di rigenerazione.

A pagina seguente, nella **Figura 4** viene riportato uno schema rappresentativo del funzionamento di una generica sezione di un impianto di essiccazione della pasta che adotti il sistema di recupero proposto. Nella fase di *adsorbimento* (parte alta della figura) il letto adsorbente (MOF) viene investito da una portata di aria umida estratta dalla sezione dell'essiccatore, che, deumidificata dal MOF e riscaldata dallo stesso calore generato nel processo di adsorbimento, viene reimpressa a monte della pasta da trattare previa miscelazione con il flusso di ricircolo ed eventuale ulteriore riscaldamento.

Nella successiva fase di *rigenerazione* — che viene attivata quando il letto adsorbente è giunto a saturazione e deve pertanto cedere tutta l'umidità precedentemente adsorbita prima di riacquistare la capacità di deumidificare altra aria — le valvole in prossimità delle diramazioni "a" e "b" modificano la loro posizione mettendo il MOF in collegamento con la parte bassa del circuito.

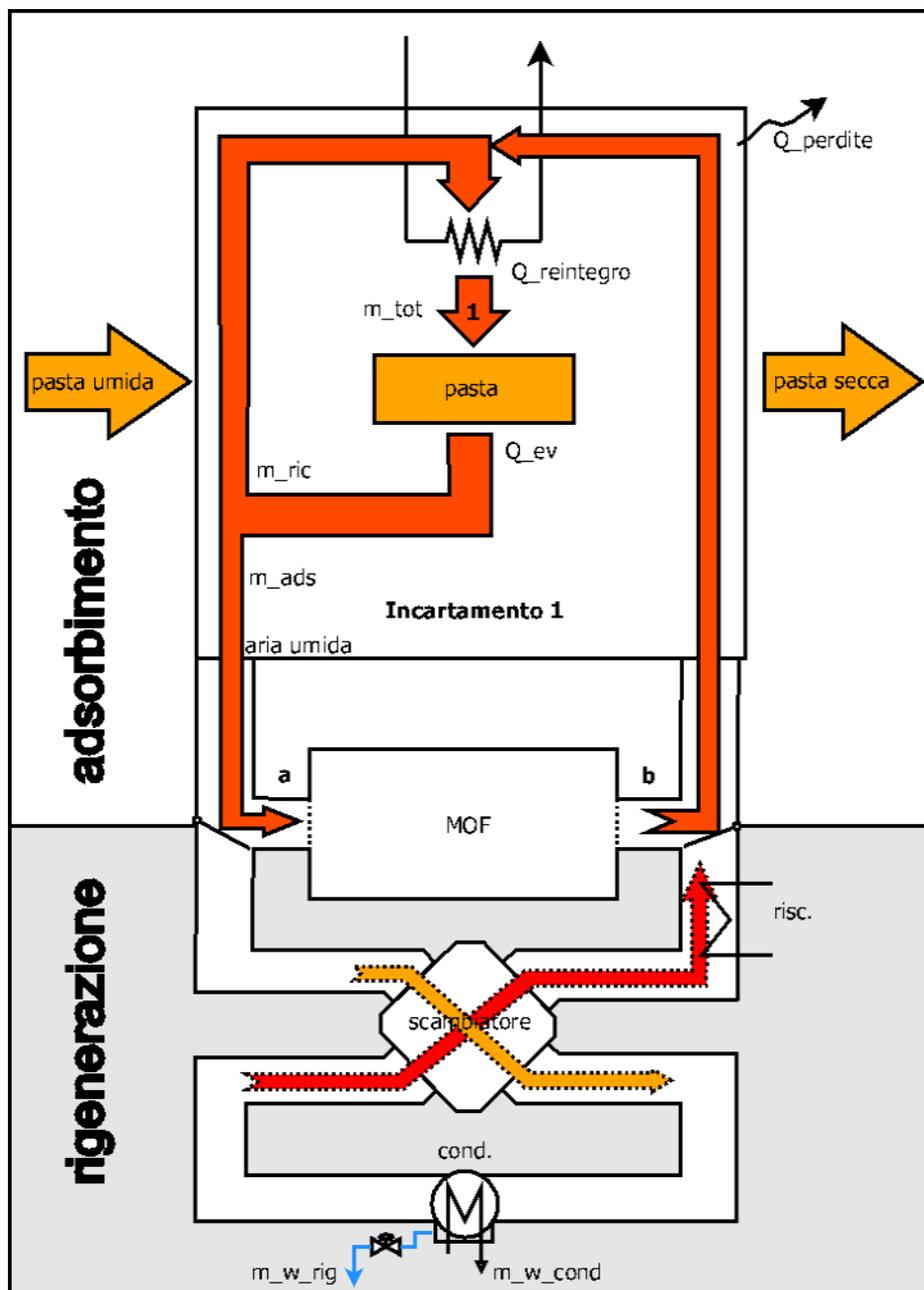


Figura 4. Schema rappresentativo dei flussi di calore e di massa per una singola sezione dell'essiccatore.

In tale condizione di funzionamento il MOF viene investito (in verso opposto al precedente) da aria molto calda e a ridotto contenuto di vapore che pertanto, rigenerando il MOF, viene umidificata e raffreddata; l'aria umida in uscita dal letto adsorbente incontra quindi un recuperatore termico (*scambiatore*) dove cede parte del calore residuo, subendo un ulteriore raffreddamento, poi arriva al *condensatore* dove si verifica il raffreddamento fino alla saturazione e conseguente condensazione della quota di vapore acqueo estratto dal MOF; l'aria, ripristinato il contenuto di umidità iniziale, viene preriscaldata ripassando per lo stesso *scambiatore* di calore a flussi incrociati e quindi, passando per la sezione di alimentazione del processo ("risc." in figura), subisce un riscaldamento ad alta temperatura che la riporta alla temperatura iniziale per essere inviata nuovamente al MOF.

Al condensatore avviene sia il recupero del calore di condensazione (nella forma di calore sensibile associato al flusso m_w_{cond} che raffredda il condensatore) ad una temperatura sensibilmente inferiore a quella di alimentazione, sia il contestuale recupero del vapore condensato (m_w_{rig}).

Rispetto allo schema di base sopra mostrato che prevede un singolo riscaldamento del flusso rigenerativo, a livello di implementazione impiantistica della tecnologia proposta si dovrà sicuramente ricorrere ad una soluzione che preveda l'inter-riscaldamento del flusso di aria umida suddividendo il letto adsorbente in almeno due (o più) sezioni. Come ampiamente motivato in [1], la presenza di una singola fase di riscaldamento comporta infatti la necessità di alimentare il processo a temperature molto elevate al fine di ottenere un livello di temperatura di condensazione adeguata al recupero termico perseguito ed un'efficienza complessiva del processo di rigenerazione; pertanto risulta preferibile riferirsi ad una soluzione alternativa che prevede la rigenerazione con inter-riscaldamento, il cui schema di riferimento (che si riferisce al caso in cui più sezioni dell'essiccatore vengono rigenerate in parallelo) è mostrato in **Figura 5**.

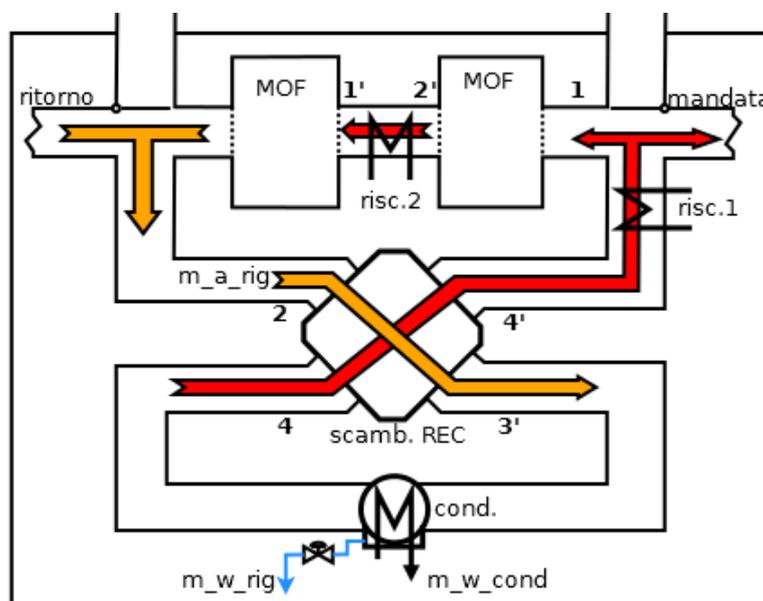


Figura 5. Schema di rigenerazione inter-riscaldata (caso di più sezioni dell'essiccatore rigenerate in parallelo).

Per meglio comprendere quanto sopra esposto in **Figura 6** viene riportato su un diagramma psicrometrico il ciclo di trasformazioni che compie il flusso di aria umida nella fase di rigenerazione con inter-riscaldamento (linea rossa) numerandone i punti caratteristici come indicati nella schematizzazione di **Figura 5**; nello stesso diagramma è anche riportato per confronto il ciclo senza inter-riscaldamento (linea azzurra).

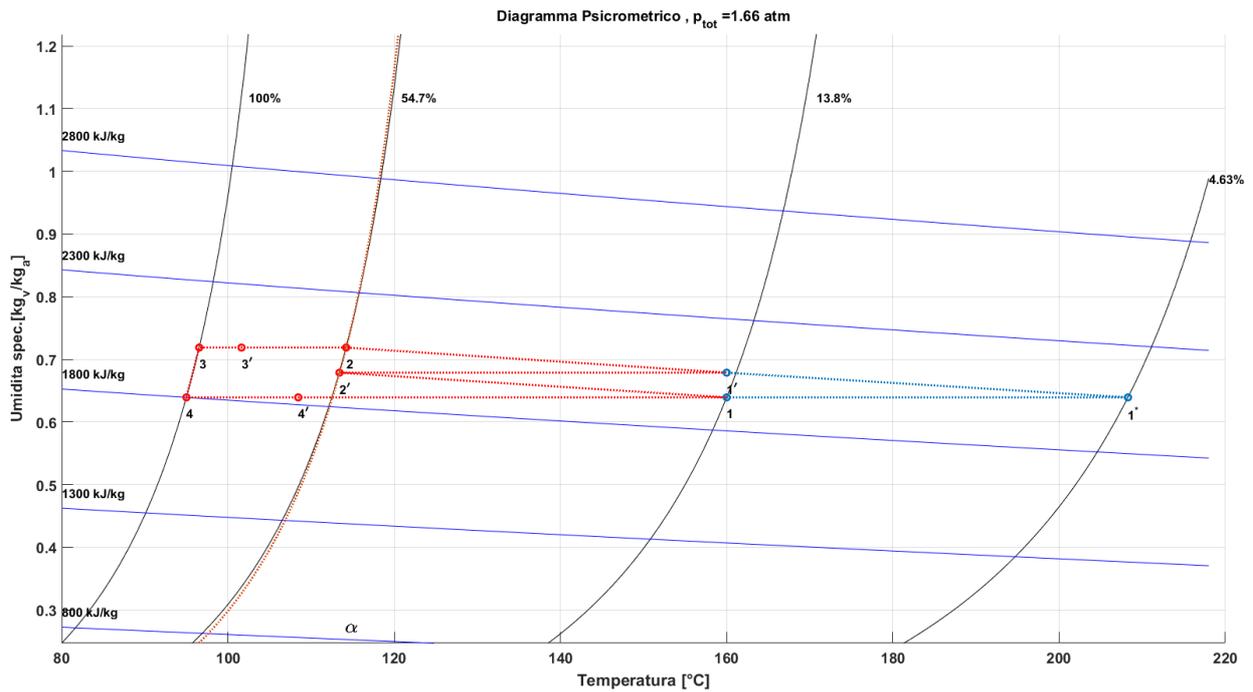


Figura 6. Rappresentazione su diagramma psicrometrico delle trasformazioni nella fase di rigenerazione e recupero per condensazione.

Infine, osservando il percorso del flusso di rigenerazione riportato nei precedenti schemi appare evidente come a differenza dei sistemi chiusi tradizionali - che presentano nel processo di riscaldamento del letto una criticità connessa ai bassi coefficienti di conducibilità termica, che normalmente caratterizzano tali materiali e conseguentemente rendono difficile il trasferimento del calore di alimentazione al materiale adsorbente - lo schema proposto preveda di utilizzare lo stesso flusso di aria umida di rigenerazione (mosso da ventilatori non mostrati nello schema) come fluido termovettore, in analogia a quanto accade nei sistemi aperti ma in questo caso lavorando a circuito chiuso.

2.3 Descrizione layout apparato sperimentale

La definizione del layout dell'apparato sperimentale necessario alla caratterizzazione dei letti adsorbenti a base di MOF e del ciclo termodinamico compiuto dagli stessi per realizzare il recupero termico ed idrico previsto, è stata condotta partendo dagli schemi sopra illustrati di implementazione impiantistica della tecnologia proposta, e dalle caratteristiche distintive delle due fasi di adsorbimento e rigenerazione che compongono il ciclo, tenendo conto soprattutto delle possibili condizioni operative di funzionamento degli essiccatori ampiamente descritte in [1]. In particolare si è cercato di costruire un apparato in grado di ricreare le condizioni di lavoro alle quali il materiale adsorbente dovrebbe essere sottoposto nel reale funzionamento quantomeno nella fase di adsorbimento, mentre per quella di rigenerazione si sono ammesse delle condizioni leggermente meno gravose.

Al fine di ottimizzare l'uso delle risorse a disposizione e nei limiti delle stesse, l'apparato è stato definito comprendendo tutti e soli i principali componenti strettamente indispensabili ai fini dello svolgimento delle attività di ricerca in essere, mentre sono stati esclusi quelli che sebbene previsti dalla tecnologia proposta (e fondamentali per la sua applicabilità industriale) non risultano di fatto indispensabili per le attività di laboratorio. Tali componenti avrebbero introdotto esclusivamente complicazioni impiantistiche e incrementato i costi di realizzazione del sistema, in particolare ci si riferisce a:

- lo *scambiatore* a flussi incrociati; la funzionalità dello scambiatore è infatti quella di operare un recupero termico interno al ciclo, che permette di ridurre il quantitativo di calore richiesto ad alta temperatura in alimentazione che verrebbe quindi recuperato a temperatura inferiore al condensatore; pertanto sebbene la sua presenza risulti indispensabile per la sostenibilità energetico-economica dell'applicazione, esso non ha molta rilevanza ai fini della caratterizzazione dei letti e del ciclo termodinamico;
- i sistemi di inter-riscaldamento per la rigenerazione, che prevedono l'impiego di due (o più) successive fasi di riscaldamento e altrettanti riscaldatori posizionati a monte di ciascuno dei segmenti in cui viene suddiviso il letto adsorbente; la loro presenza è infatti strettamente legata alla limitazione della temperatura di alimentazione del ciclo che può risultare superiore ai 200 °C nel caso in cui si voglia aumentare l'efficienza complessiva del ciclo rigenerativo e recuperare calore a temperatura prossima ai 100°C lavorando con una miscela di aria umida a pressione sufficientemente superiore a quella ambiente. Avendo scelto, per motivi di semplicità costruttiva (sicurezza) del sistema da laboratorio, di lavorare a pressione sostanzialmente prossima a quella ambiente accettando in questa fase sperimentale di recuperare calore a temperature anche inferiori a 80 °C, ed essendo l'incremento di efficienza del ciclo (che incide sostanzialmente solo sui costi operativi del sistema) poco significativo per le caratterizzazioni ricercate, si è concluso che la soluzione con inter-riscaldamento non avrebbe portato alcun beneficio sensibile alla sperimentazione, considerando peraltro che sarebbe stata particolarmente onerosa non solo in sé ma anche per l'incremento della sensoristica necessaria.

Per lo stesso motivo anche dal punto di vista funzionale si è adottata una logica di semplificazione del sistema le cui modalità di funzionamento vengono più sotto illustrate.

Con riferimento all'esigenza di caratterizzare i materiali in *bulk*, si è dimensionato l'apparato in modo da riuscire a processare un quantitativo di MOF superiore di almeno due o tre ordini di grandezza rispetto ai campioni, mediamente pari a 100 mg, utilizzati dal gruppo di ricerca dell'ENEA nelle attività parallele di caratterizzazione dei materiali, così da poter evidenziare i possibili effetti scala.

A pagina seguente, nella **Figura 7** viene presentato il layout dell'apparato sperimentale progettato, mentre nella successiva **Figura 8** viene proposta un'immagine del sistema realizzato presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata".

L'apparato consiste sostanzialmente in un circuito aerulico chiuso, a configurazione variabile grazie all'impiego di n. 6 valvole, realizzato mediante condotti che connettono i quattro componenti fondamentali nei quali si realizzano tutte le trasformazioni termodinamiche previste per il flusso di aria umida mosso da opportuni ventilatori (n.2 KAM 150), che sono:

- *letto MOF*, che deumidifica e riscalda l'aria umida in fase di adsorbimento e la umidifica e raffredda in fase di rigenerazione; il confinamento del materiale adsorbente costituente il letto è realizzato mediante l'inserimento di un sifone a monte e un filtro HEPA a valle del letto stesso;
- *riscaldatore (Heater)*, che riscalda l'aria compensando con continuità le dispersioni verso l'esterno al fine di raggiungere e mantenere costante, sui valori impostati per le diverse fasi previste (pre-test, adsorbimento e rigenerazione), la temperatura del flusso umido. Inoltre fornisce il calore di alimentazione del processo nella fase di rigenerazione del MOF;
- *umidificatore (Umi)*, umidifica e raffredda l'aria nella fase di adsorbimento del MOF simulando il passaggio dell'aria sulla pasta da essiccare;

- *condensatore (Cond.)*, nella fase di rigenerazione raffredda il flusso di aria fino alla saturazione e poi condensa parte dell'umidità in esso contenuta deumidificando il flusso stesso. Nello stesso componente avviene anche l'estrazione del condensato (non riportata nello schema).

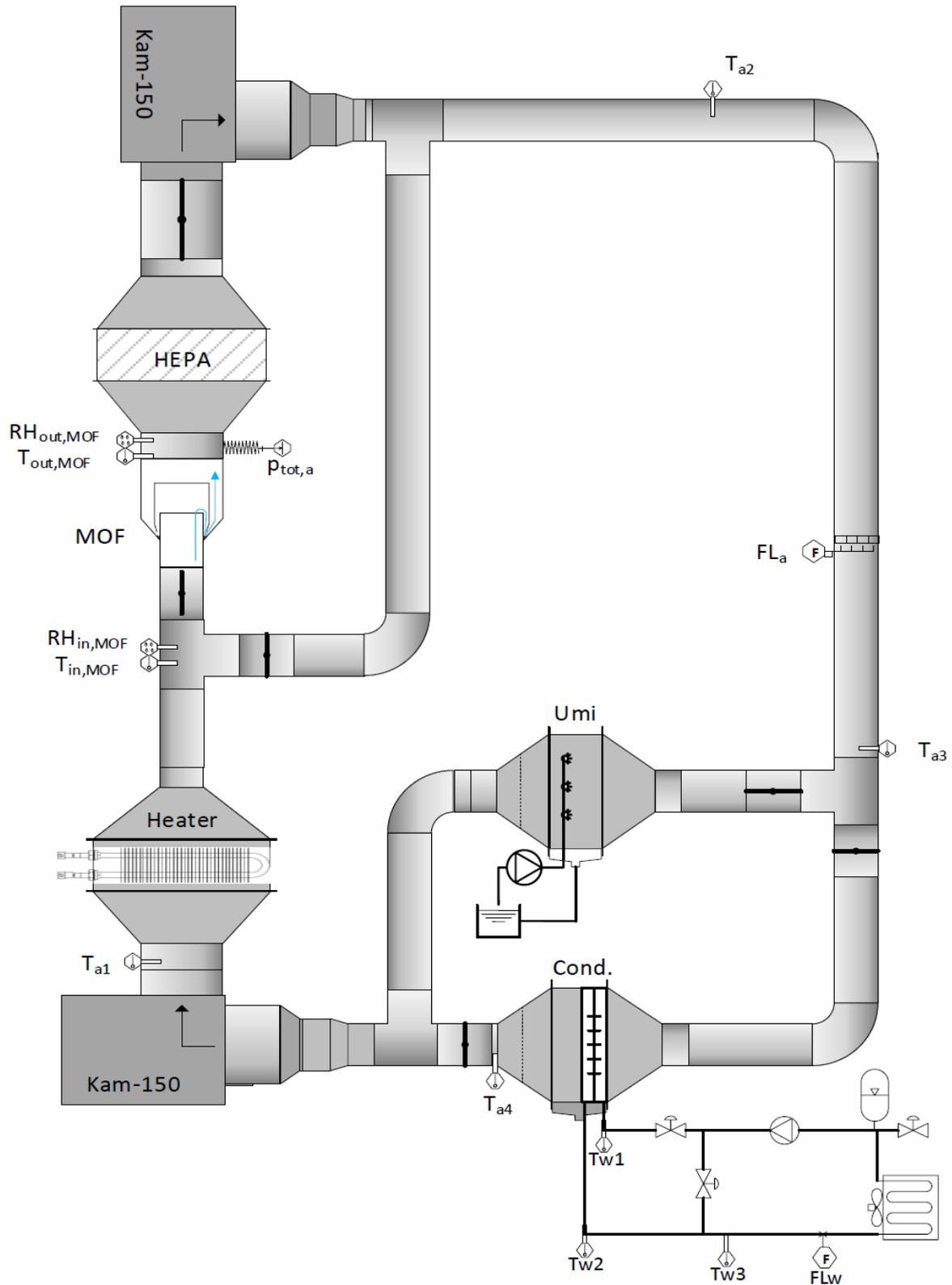


Figura 7. Layout apparato sperimentale (configurazione in fase di adsorbimento).



Figura 8. Apparato sperimentale realizzato presso i laboratori di Ingegneria Industriale di UTV.

La variazione di configurazione nello specifico prevede:

- la chiusura delle valvole a monte e a valle del condensatore e l'apertura di quella a monte dell'umidificatore per realizzare la fase di *adsorbimento* che richiede l'impiego dell'umidificatore, come rappresentato in **Figura 7**;
- l'apertura delle due valvole a monte e a valle del condensatore e la chiusura di quella a monte dell'umidificatore, per realizzare la fase di *rigenerazione* che richiede appunto l'impiego del condensatore.

Vi è poi una diramazione parallela al tratto contenente il letto MOF che permette di realizzare il by-pass del letto tramite chiusura delle due valvole a monte e a valle del predetto tratto e l'apertura della valvola della stessa diramazione; tale configurazione risulta utile, se non indispensabile, nelle fasi di preparazione dei test per portare la miscela di aria e vapore alle condizioni di temperatura e umidità desiderate senza interagire con il materiale adsorbente.

La seguente tabella sintetizza i principali parametri di funzionamento del sistema definiti sulla base di considerazioni di massima effettuate sul comportamento atteso dei MOF selezionati e delle quantità di materiale che si intendono utilizzare (dell'ordine dei 100 g), e quindi sulla base delle caratteristiche termodinamiche del ciclo ideato nel corso della prima annualità che si intende caratterizzare. Tali parametri sono stati poi impiegati per il dimensionamento e la selezione dei vari componenti il sistema e per la scelta della sensoristica idonea.

Parametro	u.m.	Valori limite
Portata aria umida	Nm ³ /h	Min 50 Max 150
Temperatura aria umida	°C	Min T _{amb} Max 150
Pressione relativa vapore massima	mbar	~500
Pressione relativa aria umida	mbar	+/- 50
Portata acqua condensatore	l/min	5
Temperatura acqua condensatore	°C	Min T _{amb} Max 80
Pressione relativa acqua condensatore	bar	Max + 3
Portata acqua umidificatore	l/h	Min 0 Max 2.5

3 Sottosistemi apparato sperimentale

Tutti i sottosistemi che realizzano i quattro componenti fondamentali sono stati progettati ad hoc, ricorrendo ove possibile a componenti standard, nell'ottica di realizzare a costi contenuti le funzionalità minime desiderate. Nel presente capitolo vengono illustrate le caratteristiche costruttive di ognuno di essi e quelle dei sistemi ausiliari che completano l'apparato sperimentale. Per la posizione di ciascun componente nell'ambito dell'apparato si faccia riferimento alla **Figura 7** del precedente capitolo.

3.1 Letto materiale adsorbente (MOF) e filtro HEPA

Il sistema di contenimento del letto di materiale adsorbente rappresenta il cuore dell'apparato implementato ed è senz'altro il componente più delicato ai fini sperimentali, in quanto si tratta di un pezzo non standardizzato all'interno del quale si realizzano le trasformazioni termodinamiche che si intendono indagare.

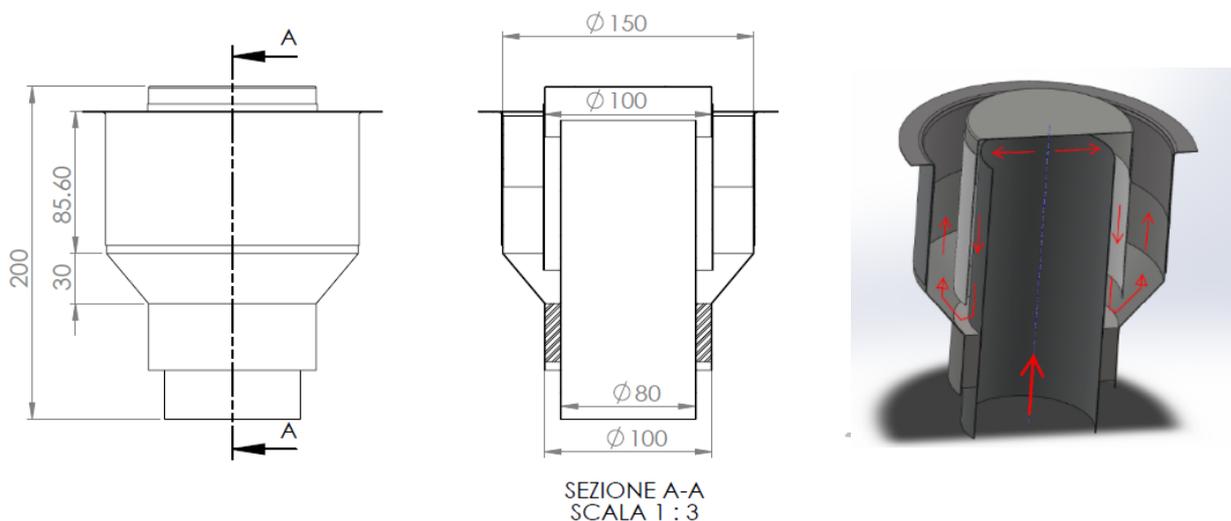


Figura 9. Vista e sezione sistema di contenimento letto MOF completo di sifone.

In questa fase della ricerca, al fine di evitare che l'adozione di substrati di supporto potesse interferire con i complessi scambi di energia e massa che avvengono tra la miscela aria-vapore e il MOF, si è deciso di optare per una soluzione estremamente semplificata che prevede di confinare in un tratto di condotto il materiale tal quale (polvere con granulometria data).

Si è quindi definita una conformazione per il sistema di contenimento del letto, mostrata in **Figura 9**, che permettesse una miscelazione continua del materiale trascinato dal flusso stesso di aria umida che attraversa il letto sempre nello stesso verso. Il contenimento delle polveri è stato pertanto assicurato dal posizionamento ad asse verticale del componente, con flusso dell'aria umida verso l'alto, e dalla presenza di un sifone a monte e di un filtro HEPA a valle, rispetto alla medesima direzione del flusso. La forma conica delle condotte a valle del letto permette inoltre alle particelle di essere raccolte per gravità sul fondo del letto fluido. Sotto questo aspetto il funzionamento del letto è stato verificato in fase preliminare con due materiali di diversa granulometria: borotalco e silica gel in forma di granulare con diametro medio delle particelle di circa 2 mm. In entrambi i casi la fluidificazione del materiale è risultata essere uniforme sulla sezione circolare già a portate basse, al di sotto dei 40 m³/h.

Dal punto di vista delle valutazioni energetiche, il comportamento termico del componente è stato caratterizzato al fine di valutare gli scambi termici che avvengono nelle diverse condizioni di funzionamento

tra le pareti interne dei suoi condotti e il flusso di aria umida che lo attraversa. La questione è di fondamentale importanza nella fase di interpretazione delle variazioni di temperatura e umidità subite dal flusso di aria nell'attraversamento del letto adsorbente (misurate tra monte e valle dello stesso), perché una corretta valutazione degli effettivi scambi energetici avvenuti tra MOF e aria umida richiede di stimare gli scambi termici che l'aria stessa realizza con le pareti metalliche lambite dal flusso.

Nello studio si è tenuto conto delle caratteristiche fisiche del componente, sia in termini di conducibilità termica sia di capacità termica, in quanto le trasformazioni che si andranno a sperimentare sono prevalentemente di natura non stazionaria. Si è quindi proceduto ad effettuare dei test per valutare la dispersione di calore nell'intero tratto interessato. Per la valutazione empirica delle sole dispersioni verso l'esterno le prove sono state condotte portando il sistema in stato stazionario, in modo da escludere gli effetti relativi alle capacità termiche, misurando la temperatura in più punti della parete esterna del condotto e sulla parete esterna della coibentazione in lana di roccia. Tali misure sono state realizzate con l'ausilio di sensori di temperatura e misuratori di flusso termico del sistema ThermoZig della Optivelox.

Le risultanze sperimentali effettuate con temperatura di ingresso di 50 °C, temperatura ambiente prossima ai 20 °C e una portata di 85 m³/h, hanno permesso di calcolare una potenza termica dispersa totale di circa 2 W, che risulta pertanto sufficientemente limitata rispetto alle potenze coinvolte nelle fasi di assorbimento/desorbimento che sono dell'ordine del centinaio di watt; in particolare le dispersioni, unitamente alle capacità termiche, hanno influenza significativa nelle sole fasi finali dei processi di assorbimento/rigenerazione, quando questi procedono verso l'equilibrio e le potenze in gioco sono pertanto estremamente piccole.



Figura 10. Filtro HEPA e tabella caratteristiche tecniche.

Il filtro HEPA (**Figura 10**), posto a valle del letto fluido, ha il compito di trattenere possibili particelle di materiale adsorbente che vincendo la forza di gravità vengano trascinate dal flusso di aria; questo è stato selezionato prevedendo l'esecuzione di test anche ad alta temperatura (fino a 150 °C). La seguente tabella riassume le principali caratteristiche costruttive e prestazionali dello stesso. Il filtro è stato inserito nel circuito in apposito alloggiamento con la possibilità di essere estratto per effettuare operazioni di controllo sullo stato di pulizia dello stesso.

Casa costruttrice	Camfil
Modello	162610QB 1FRSI- 110-1SIHT
Struttura	Acciaio inox
Materiale filtro	Fibra di vetro
Dimensioni	305x305x150 mm
Temperatura max	250 °C
Umidità	100%
Classe filtraggio	H13

3.2 Riscaldatore elettrico (Heater)

Per la realizzazione del riscaldatore (Heater) sono state previste due resistenze elettriche alettate (**Figura 11**), gestite in maniera automatica da un controllore di temperatura industriale, con logica di controllo di tipo PID, che garantisce che la temperatura all'ingresso del letto MOF ($T_{in,MOF}$) resti stabile intorno al valore di riferimento impostato manualmente per ogni specifico test da eseguire.

In tabella vengono riportati il modello e le relative caratteristiche tecniche delle due resistenze elettriche che sono state montate in serie (**Figura 12**) rispetto al flusso di aria umida da trattare. Il collegamento elettrico delle stesse resistenze è stato effettuato in parallelo.

Casa costruttrice	Acim Jouanin
Modello	RA 4080 1000
Tubo	Ø 10 mm inox AISI 304L
Alette	aluzinc.
Alimentazione	230 V
Interasse	40 mm
Lunghezza	325 mm
Potenza specifica	5,4 W/cm ²
Potenza totale	1000 W

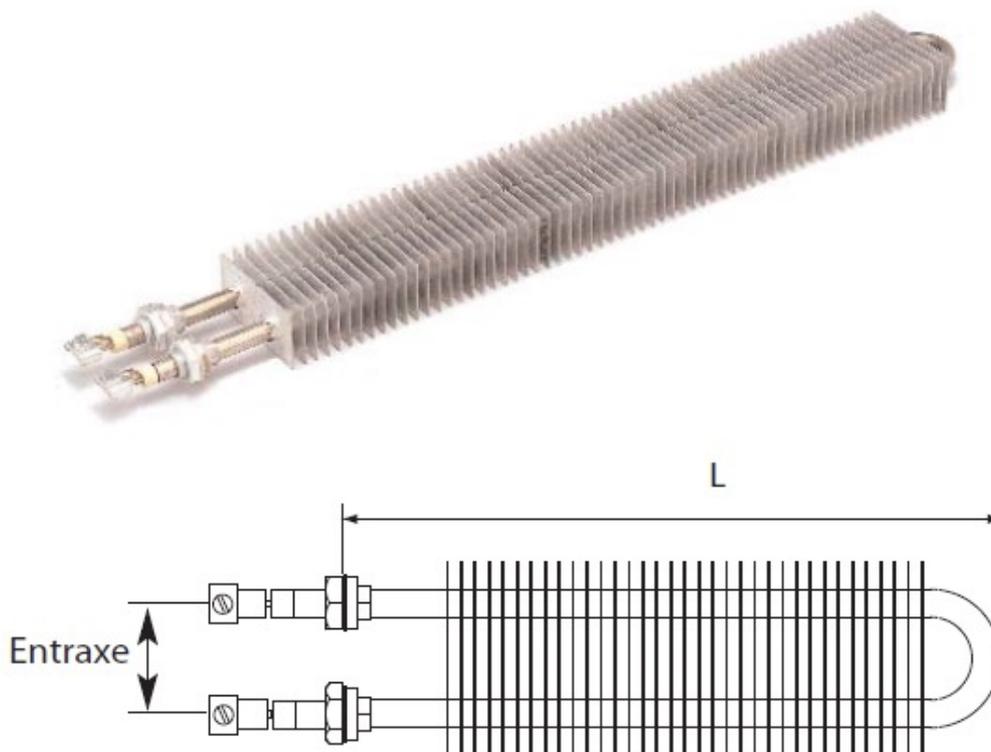


Figura 11. Resistenze elettriche (n. 1 di 2).

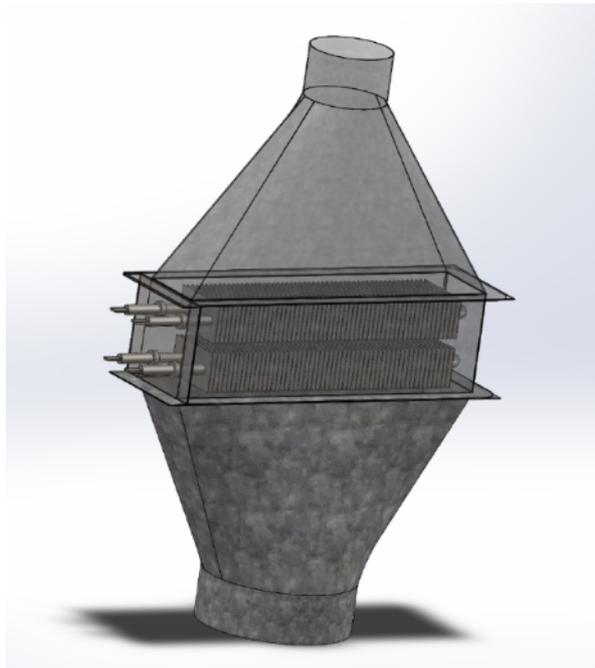


Figura 12 Inserimento in serie (lato aria) dei riscaldatori.

Il sistema di controllo automatico dei due riscaldatori è costituito, come detto, dal controllore di temperatura industriale, che agisce su un relè. Dunque il controllo viene effettuato con una semplice logica on/off, con inseguimento della temperatura di ingresso al letto del materiale adsorbente ($T_{in,MOF}$). I componenti utilizzati per il controllo sono riportati in Figura 13 e di seguito vengono riportate le due relative tabelle delle principali caratteristiche tecniche e infine lo schema elettrico di connessione (Figura 14).



Figura 13. Componenti del sistema di controllo dell'Heater: controllore PID (sx) e Relè (dx).

Casa costruttrice	Schneider Electric
Modello	REG24PUJ1RLU
Alimentazione	24 V
Input segnale temperatura	4-20 mA
Tipo output	Relay output 230 V _{AC} , 3 A
Dimensioni	24x48 mm

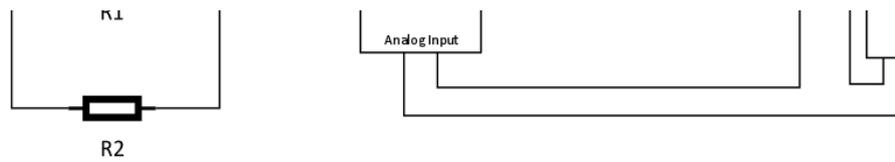


Figura 14. Schema elettrico di connessione controllore PID per Heater

3.3 Umidificatore (Umi)

L'umidificatore è composto principalmente da due componenti, una pompa dosatrice (**Figura 15**), che permette una regolazione proporzionale del flusso trattato tra 0 e 100%, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella presentata a pagina seguente, e un ugello nebulizzatore. Quest'ultimo è stato posto all'interno della condotta, con getto direzionato in controcorrente rispetto al flusso d'aria come mostrato in **Figura 16**.

L'eccesso d'acqua nebulizzata che non vaporizza viene raccolto in un'apposita vaschetta e da qui convogliato all'esterno del circuito in modo da minimizzare la presenza del ristagno d'acqua che potrebbe compromettere la possibilità di regolare in maniera opportuna l'umidità nel circuito illustrato.



Figura 15. Pompa dosatrice dell'umidificatore



Figura 16. Ugello interno all' umidificatore alimentato dalla pompa dosatrice.

Casa Costruttrice	ITC
Modello Dositec	MD
Tensione alimentazione	230 V
Peso	3 kg
Portata max	2.5 l/h
Pressione max	10 bar
Numero colpi minuto @ 100%	120 min ⁻¹ .

Nella fase preliminare di caratterizzazione del sistema di umidificazione è stata testata l'effettiva portata di acqua nebulizzata. Le prove sono state condotte misurando la quantità integrale di acqua nebulizzata in un periodo di circa 15 minuti, e hanno portato a definire una portata massima di 0.017 l/min, sensibilmente inferiore a quanto dichiarato dal costruttore.

3.4 Condensatore e circuito idraulico

Il condensatore, schematizzato in **Figura 17**, è stato realizzato adottando uno scambiatore alettato aria-acqua (inserito nel circuito aeraulico dell'apparato) alimentato da un circuito idraulico chiuso, dotato di pompa di circolazione a velocità di rotazione variabile, che prevede un secondo scambiatore alettato aria-

acqua per la dissipazione verso l'ambiente esterno del calore estratto dal condensatore, raffreddato a sua volta da una ventola (FAN3).

A pagina seguente, in [Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.](#), viene riportato lo schema del circuito idraulico che prevede diverse valvole di carico (V3), di regolazione (V1) e di by-pass (V2), oltreché un vaso d'espansione per contenere le variazioni di pressione del circuito e i necessari sensori.

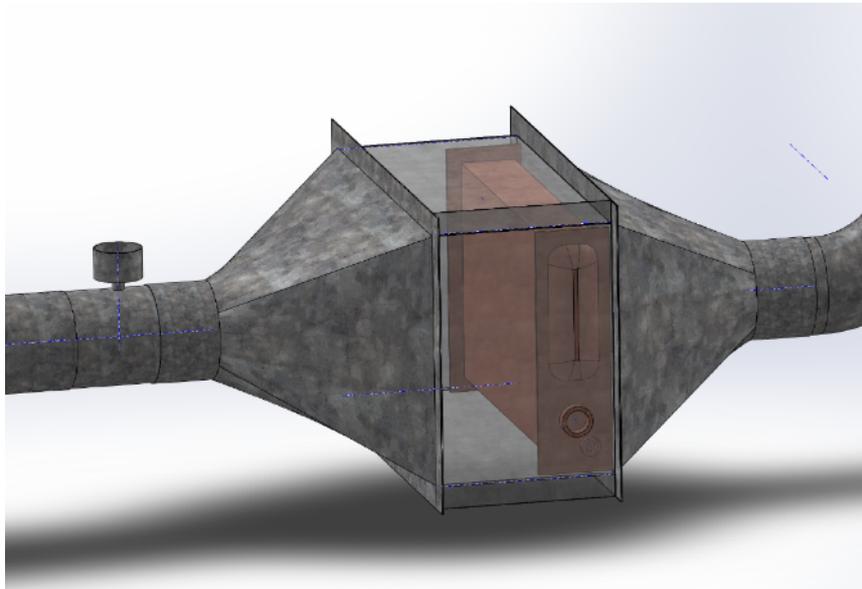


Figura 17. Inserimento del condensatore nel circuito.

La modulazione della portata di acqua di raffreddamento può avvenire in primis mediante la regolazione della velocità di rotazione della pompa, definendo la portata totale che attraversa sempre lo scambiatore verso l'ambiente, e quindi mediante la regolazione manuale delle valvole V1 e V2 per modulare il flusso che interessa il condensatore.

I due scambiatori alettati aria-acqua (lato condensatore e ambiente), tra loro identici, sono stati selezionati tra quelli utilizzati normalmente nelle caldaie da 25 kW per uso domestico. Questo tipo di scambiatori possiede infatti valori di resistenza a stress termici e corrosione che li rende adatti all'applicazione proposta.

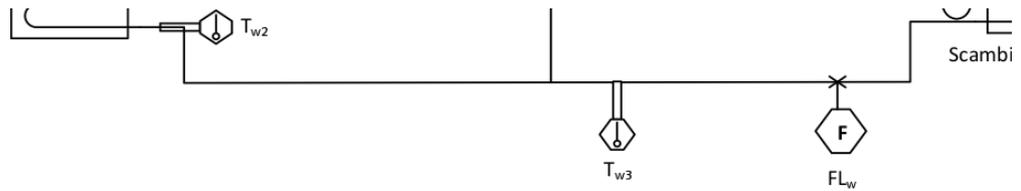
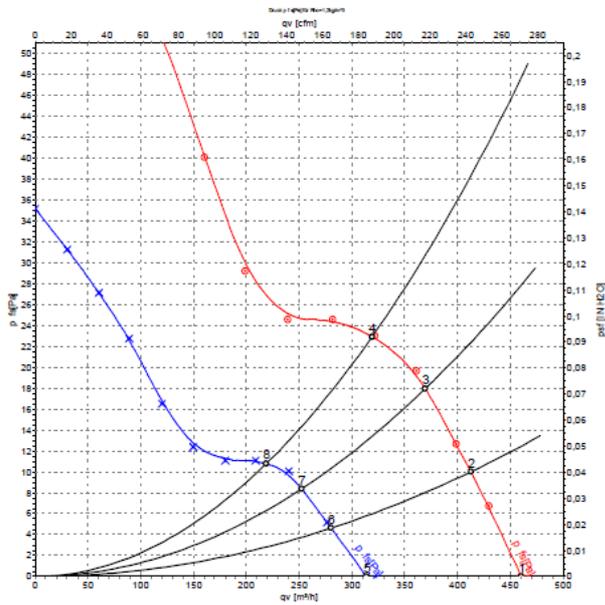


Figura 18 Schema idraulico sistema condensatore.

Per favorire la dissipazione del calore verso l'ambiente allo scambiatore acqua-aria, come detto, è stato accoppiato un ventilatore assiale (FAN3 nello schema) le cui caratteristiche tecniche sono riportate in tabella seguente (Figura 19). Il ventilatore non è stato dotato di alcun controllo in quanto come detto si intende agire direttamente sulla portata dell'acqua per la regolazione della potenza dissipata.



Casa costruttrice	EBM PAPST
Modello	W1G200-EC87-20
Tensione alimentazione	230 V @ 50 Hz
Velocità Max	1300 rpm
Velocità Min	900 rpm
Portata Max @ 1300 rpm	460 m ³ /h

Figura 19. Ventilatore assiale (FAN3) scambiatore ambiente e relative caratteristiche tecniche.

3.5 Ventilatori circuito aeraulico

La movimentazione del flusso di aria umida all'interno del circuito viene effettuata con l'utilizzo di due ventilatori centrifughi (**Figura 20**) in grado di lavorare anche ad alte temperature, fino a 150°C in maniera continuativa. Il modello utilizzato e le relative caratteristiche tecniche sono riportate in tabella seguente.



Figura 20. Ventilatore centrifugo Vents KAM 150.

Casa costruttrice	VENTS
Modello	KAM 150
Tensione alimentazione	230 V @ 50 Hz
Potenza	115 W
Portata massima di aria	520 m ³ /h
Velocità di rotazione massima	1280 rpm
Massima temperatura operativa	150 °C

I ventilatori sono controllati separatamente agendo sulla velocità di rotazione; tale controllo è effettuato manualmente per mezzo di due regolatori (**Figura 21**) le cui caratteristiche sono elencate nella seguente tabella.



Figura 21. Variatore di velocità per ventilatore centrifugo.

Casa costruttrice	3GP SYSTEM
Modello	RCS 300
Tensione alimentazione	230 V @ 50 Hz
Sistema di funzionamento Manuale	Manuale
Interruttore di sezionamento Bipolare	Bipolare
Regolazione della minima velocità.	Da 40 a 180 V _{AC}

Circuito di controllo	Triac Doppio ponte R.C.
Corrente massima	3 A
Corrente si servizio continuo	1.5 A
Sistema di regolazione	Parzializzazione di fase

3.6 Condotte e valvole

L'intero circuito aeraulico è stato realizzato adottando condotti con sistema SPIRO in acciaio galvanizzato. Per variare la configurazione dell'apparato e regolare eventualmente il flusso sono state utilizzate n. 6 valvole a farfalla ad azionamento manuale, dotate di guarnizione; la correlazione tra la posizione delle valvole e la configurazione del circuito aeraulico è stata già descritta nel paragrafo 3 del precedente capitolo, a cui si rimanda.

Nella seguente **Figura 22** si riporta un esempio della tipologia di condotte utilizzate e lo schema di una valvola a farfalla. I tratti di condotto caratterizzati da allargamenti per l'inserimento dei diversi componenti (condensatore, heater, umidificatore, filtro HEPA etc.) sono stati realizzati a disegno sempre in lamiera di acciaio galvanizzato.

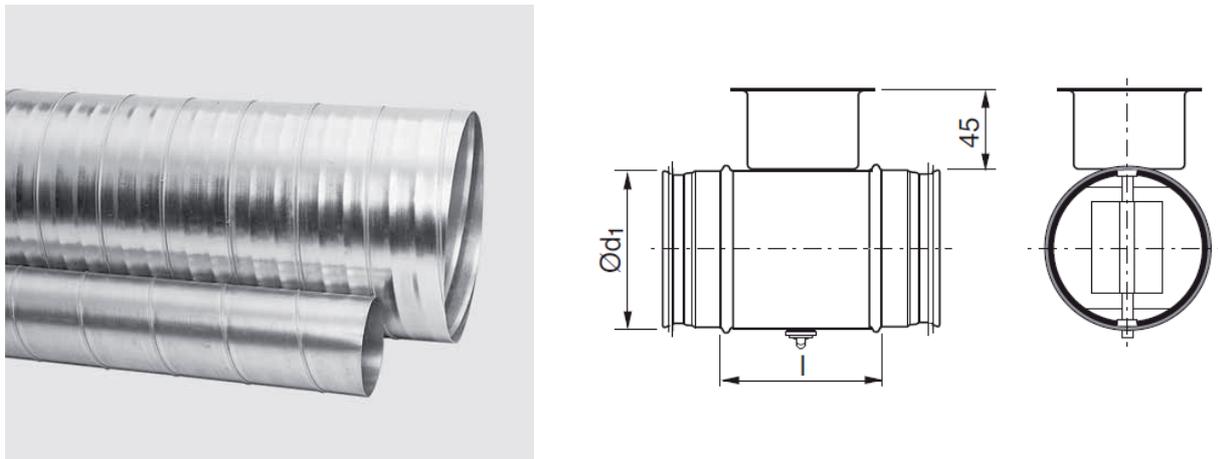


Figura 22. Condotte sistema SPIRO e valvole a farfalla.

4 Sensoristica e sistema di acquisizione dati

L'apparato sperimentale, ai fini della corretta esecuzione delle caratterizzazioni dei materiali e del ciclo termodinamico per le quali è stato realizzato, è stato dotato di idonea sensoristica e di un sistema di acquisizione e storicizzazione delle misure, nonché di loro istantanea visualizzazione per il monitoraggio *online real time*.

Nel presente capitolo vengono descritte le caratteristiche dei singoli sensori selezionati e l'architettura e le caratteristiche del sistema di acquisizione dati completo di interfaccia.

4.1 Sensoristica

L'apparato prevede sensori in grado di monitorare temperatura, umidità, pressione e portata dei flussi in punti strategici sia del circuito principale aerulico sia di quello idraulico del condensatore, come mostrato in **Figura 7** del capitolo 2, alla quale si rimanda per l'individuazione dei punti di inserzione dei diversi sensori.

4.1.1 Sensori di umidità

La misura dell'umidità è particolarmente importante per valutare la quantità di acqua adsorbita o desorbita dal materiale adsorbente: perciò sono stati posti due sensori all'ingresso ($RH_{in,MOF}$) e all'uscita ($RH_{out,MOF}$) del letto contenente il materiale studiato.

I modelli selezionati (**Figura 23**) sono di fatto dei termoigrometri e prevedono pertanto la contestuale misura della temperatura e il calcolo dell'umidità relativa.



Figura 23. Sensore umidità e temperatura (termoigrometro).

Le caratteristiche dei sensori adottati sono riportate nella successiva tabella.

Casa costruttrice	EplusE Elektronik
Modello	EE99-1
Tipo di misura	Umidità relativa
Modello sensore	HC1000-400
Range misura	0-100% RH

Output	4-20 mA
Tempo di risposta	<15 s

In realtà tali sonde presentano un limite massimo di misurazione rispetto all'umidità specifica che è di poco inferiore a $0.16 \text{ kg}_v/\text{kg}_a$, pertanto per temperature superiori ai $60 \text{ }^\circ\text{C}$ si riscontra una progressiva riduzione del limite di validità della misura dell'umidità rispetto al valore nominale indicato del 100%; la linea tratteggiata in rosso, tracciata sul diagramma psicrometrico di **Figura 24**, indica l'andamento del limite effettivo di validità della misura dell'umidità relativa per le sonde adottate come indicato dal costruttore.

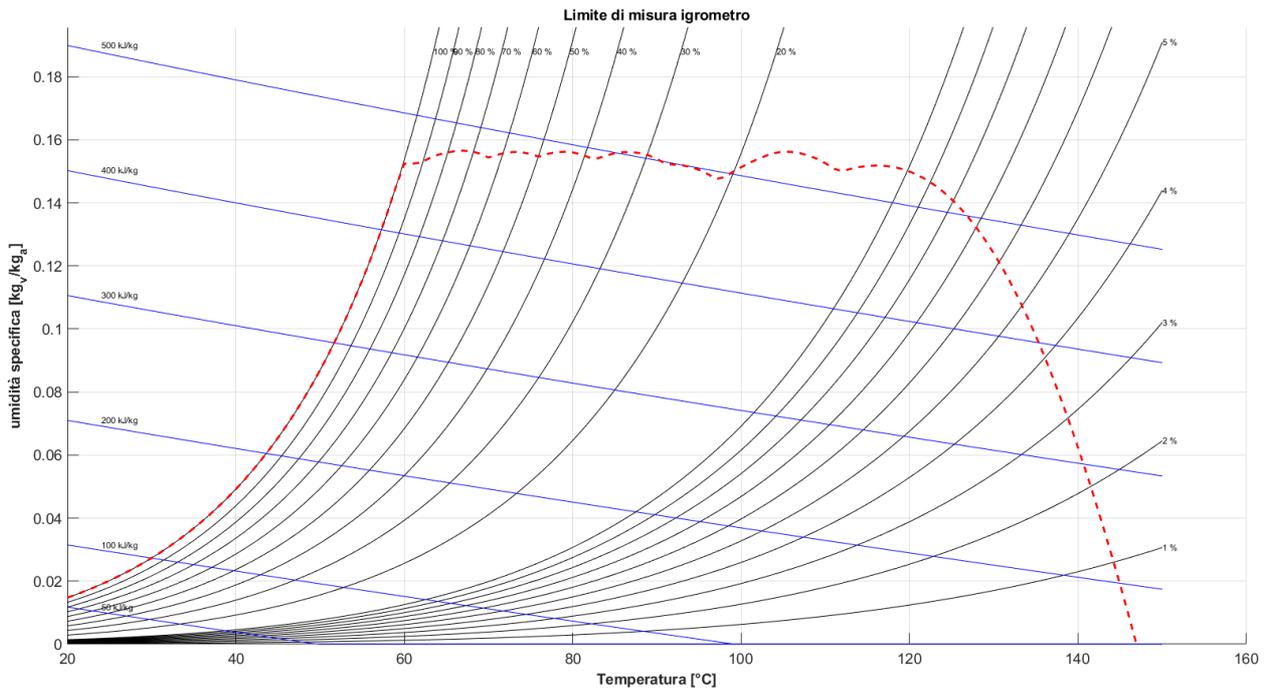


Figura 24. Rappresentazione su diagramma psicrometrico del limite di validità di misura delle sonde di umidità.

4.1.2 Sensori di temperatura

Per le misure di temperatura sia lungo il circuito aeraulico sia lungo quello idraulico sono stati utilizzati sensori RTD (termoresistenze al platino) di tipo PT100 a tre fili (**Figura 25**).

I punti di misurazione per il circuito aeraulico sono T_{a1} , T_{a2} , T_{a3} , T_{a4} , a cui si aggiungono i due sensori di temperatura dei termoigrometri (sempre PT100 a tre fili) all'ingresso ($T_{in,MOF}$) e all'uscita ($T_{out,MOF}$) del MOF. Per il circuito idraulico del condensatore i punti di misura sono tre: T_{w1} , T_{w2} e T_{w3} .



Figura 25. Sensore temperatura (termoresistenza platino) PT100.

Tutte le sonde sono state sottoposte ad un accurato processo di taratura, condotto mediante un termometro di riferimento già tarato (PT 25), utilizzando un vaso Dewar collegato ad un bagno termostato. In **Figura 26** è riportata un'immagine del sistema utilizzato. L'intervallo di taratura è stato

fissato tra 25 °C e 100 °C e nel processo di taratura tutte le sonde e quella di riferimento sono state collegate al sistema di acquisizione dati.



Figura 26. Bagno termostato.

4.1.3 Misuratori di flusso

Sia la portata d'aria umida all'interno del circuito che quella dell'acqua vengono misurate da flussimetri di tipo Vortex; il principio di funzionamento di tali flussimetri è basato sull'instaurazione di vortici di von Kármán a valle di un ostacolo artificiale, all'interno di un dato intervallo di numeri di Reynolds (Re), e prevede la misura della frequenza di formazione dei vortici che si generano, che è proporzionale alla velocità del fluido stesso.

Lato aria

L'aria umida viene misurata nel punto FL_a posizionato nel tratto più rettilineo e sempre attraversato da aria indipendentemente dalle configurazioni assunte dall'apparato; lo strumento adottato è un flussimetro a inserzione a stelo sul processo, modello M23 della Vortek Instruments.

Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e, in **Figura 27**, un'immagine dello strumento e lo schema del principio di funzionamento.

Materiale corpo	Acciaio inox 316L
Taglie disponibili	Ad inserzione su tubazioni a partire da 50 mm fino a 2 m
Attacchi al processo	2" NPT; 2" ANSI 150 - 300 - 600 (DN 50 DIN / UNI PN 16 - 40 - 64)
Limiti di temperatura	-40 +260 °C (ST); -40 +400 °C (HT)
Versioni e grado di protezione	Incorporato oppure separato dal sensore, grado di protezione NEMA 4X (IP 66)
Precisione portata volumetrica	±1,2% del valore letto per liquidi; ±1.5% del valore letto per gas e vapore
Precisione portata massica	±1.5% del valore letto per liquidi; ±2.0% del valore letto per gas e vapore

Precisione T & P	±1°C sulla temperatura; ±0.3% del fondo scala sulla pressione
Ripetibilità	±0.1% v.l. (portata volumetrica); ±0.2 % v.l. (portata massica)
Alimentazione	12 ... 36 V _{DC} (2 fili <i>loop powered</i>); 100 ... 240 V _{AC} , 50/60 hertz, consumo 2 watt
Uscite analogiche	Fino a tre 4-20 mA configurabili (protocollo HART)
Uscita impulsiva	N. 1 uscita impulsiva per totalizzazione (50 ms, 40 V _{DC})
Uscite digitali	Fino a tre uscite digitali per configurazione allarmi
Bus di campo	In opzione MODBUS
Pannello di controllo opzionale	Display alfanumerico 16 caratteri 2 righe; tastiera 6 tasti per programmazione
Area pericolosa ATEX	Gas: II2G Ex d IIB + H2 T6; Dust : II2D Ex tD A21 IP66 T85°C

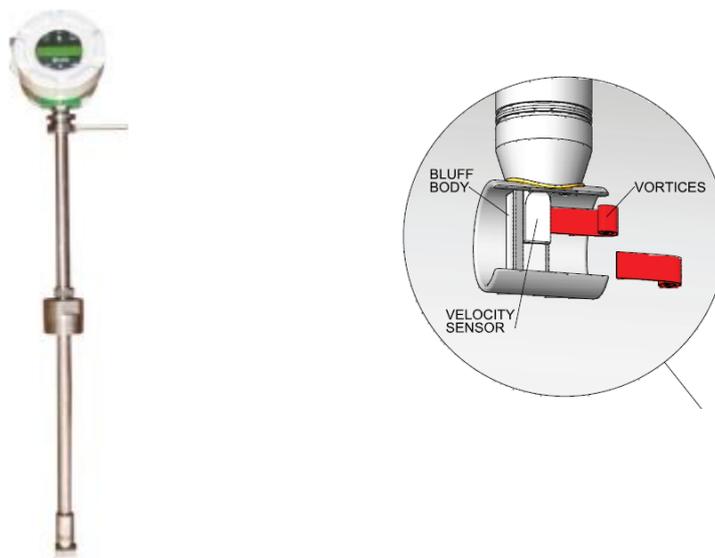


Figura 27. Flussimetro Vortek e schema principio funzionamento vortex.

Il montaggio a inserzione è stato effettuato su idoneo supporto creato ad hoc per il caso specifico. Il supporto permette la regolazione in traslazione e rotazione dello stelo sul quale è montato il sensore. In questo modo si è potuta assicurare la perfetta ortogonalità del sensore al centro del condotto di aria umida. Infine l'elettronica del trasmettitore è stata assicurata alla struttura di contenimento del banco prova in maniera da ridurre al minimo le possibili oscillazioni e vibrazioni a cui sarebbe stato sottoposto il flussimetro.

Dopo la prima fase di montaggio si è provveduto a effettuare una verifica della misura di portata, condotta effettuando un bilancio energetico al condensatore. Tale bilancio è stato ritenuto affidabile avendo già validato le misure delle temperature e del flusso di acqua come descritto in seguito. L'analisi così condotta ha messo in luce un notevole scostamento, rispetto al valore atteso dal bilancio, della misura della portata di aria al di sotto di 110 m³/h circa. Un'analisi più approfondita ha permesso quindi la regolazione del sistema di misura del flusso a partire dalla misura indiretta (da bilancio) della portata di aria.

Nello specifico, come mostrato nel grafico di **Figura 28**, si è proceduto a effettuare delle misure successive di portata (curva blu) tra il minimo ed il massimo osservabile nel circuito, ovvero nei limiti di capacità di regolazione dei ventilatori e di posizionamento delle valvole. Le prove sono state condotte in condizioni stazionarie per eliminare effetti dovuti alle capacità termiche del condensatore. Alla frontiera di questo componente sono state rilevate temperature e portate dei flussi coinvolti nello scambio termico; altresì sono state considerate le dispersioni di calore verso l'ambiente, misurandole per mezzo di un sensore di

flusso termico in aggiunta al sistema di acquisizione ivi descritto (sensore e trasmettitore modello ThermoZig, casa costruttrice OptiVelox). I dati ricavati sono stati poi elaborati in Matlab ottenendo il valore corretto della portata d'aria (curva rossa in figura). Il confronto delle due portate, misurata e calcolata, ha messo quindi in luce un andamento del loro rapporto descrivibile, nel dominio considerato, mediante un polinomio di sesto grado rispetto al segnale acquisito, come mostrato in **Figura 29**. Sulla base di tale informazione si è quindi proceduto alla predetta regolazione del segnale di ingresso al sistema di acquisizione.

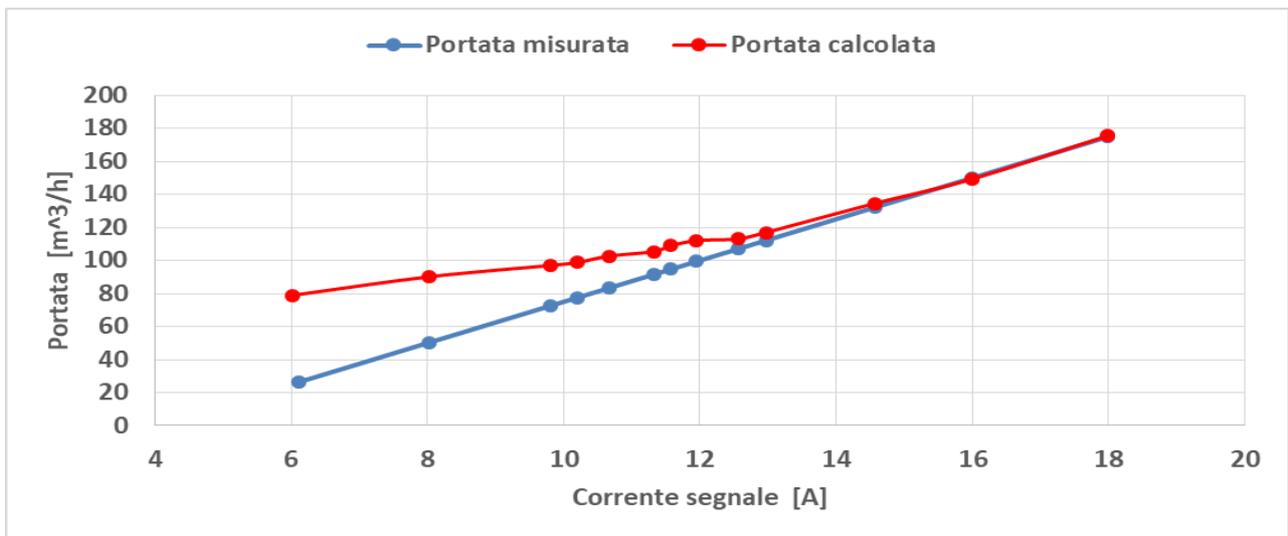


Figura 28. Confronto tra portata misurata e portata calcolata a partire da bilancio di potenza.

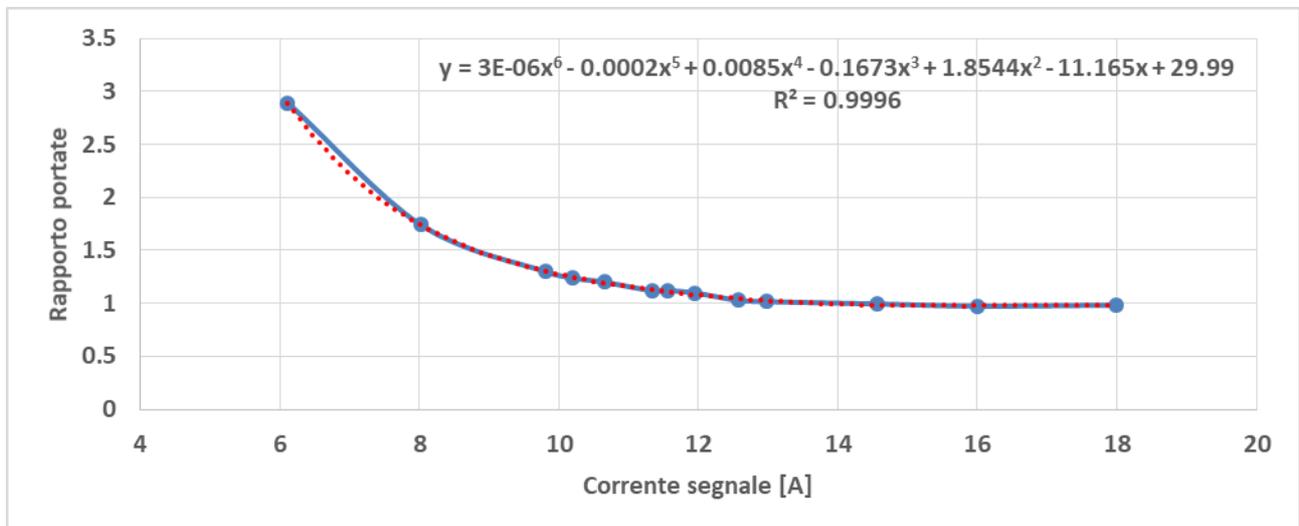


Figura 29. Rapporto della portata calcolata su portata misurata da cui si è ricavato un polinomio di sesto grado per la correzione del segnale in ingresso al sistema di acquisizione.

Lato acqua

La portata dell'acqua che circola nel circuito del condensatore viene misurata in FL_w , mediante un flussimetro (che può avere anche funzioni di flussostato) della marca SMC; di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e, in **Figura 30**, un'immagine dello strumento e lo schema del principio di funzionamento simile a quello ad aria.

Modello	PF3W720
Fluido applicabile	acqua e soluzione acquosa di glicole etilenico
Campo della portata nominale	da 2 a 6 l/min
Campo della portata visualizzato	da 1,7 a 22 l/min
Unita minima di impostazione	0,1 l/min
Temperatura del fluido	0 a 90 °C
Precisione	valore display e uscita analogica : ±3% F.S
Campo pressione d'esercizio	da 0 a 1 Mpa
Tensione di alimentazione	da 12 a 24 VDC ± 10%
Assorbimento	50 mA max
materiale a contatto con il fluido	PPS, acciaio Inox 304, FKM, SCS13

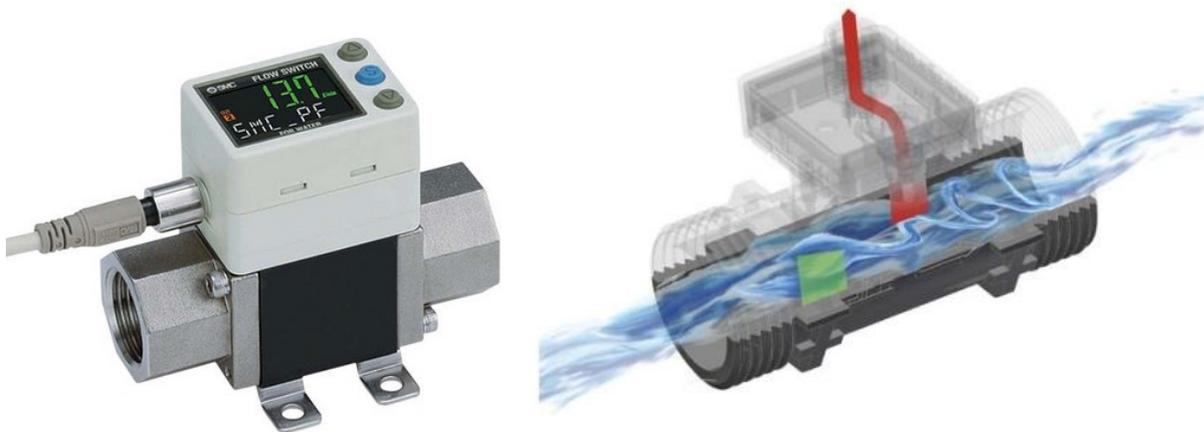


Figura 30. Flussimetro SMC e schema principio funzionamento vortex.

Il montaggio su circuito è stato effettuato rispettando i limiti imposti dal costruttore in termini di direzione del flusso e di lunghezza dei rami di circuito a monte e valle. In seguito si è proceduto a effettuare un controllo della corretta misurazione da parte dello strumento. L'analisi è stata svolta effettuando misure integrali sulla portata ripetuta su tre prove con campioni da 15 litri di acqua. Le prove hanno messo in luce un piccolo scostamento della misura di portata con quanto dichiarato dal costruttore. Ciò ha permesso una regolazione della misura intervenendo su *offset* e *gain* del segnale in ingresso al sistema di acquisizione.

4.1.4 Sensori di pressione

La pressione viene misurata con continuità nel solo circuito aeraulico, essendo un parametro significativo ai fini dei calcoli, mentre nel circuito idraulico viene misurata con manometri portatili direttamente dal vaso di espansione.

All'interno del circuito aeraulico la pressione viene misurata in un punto ($P_{tot,a}$) posizionato all'uscita del letto MOF; il sensore è collegato al circuito attraverso un tubo in rame di circa 70 cm, esterno alla condotta, in maniera tale da evitare un possibile surriscaldamento del sensore stesso.

Di seguito, in **Figura 31**, si riporta un'immagine del sensore e lo schema elettrico di riferimento.

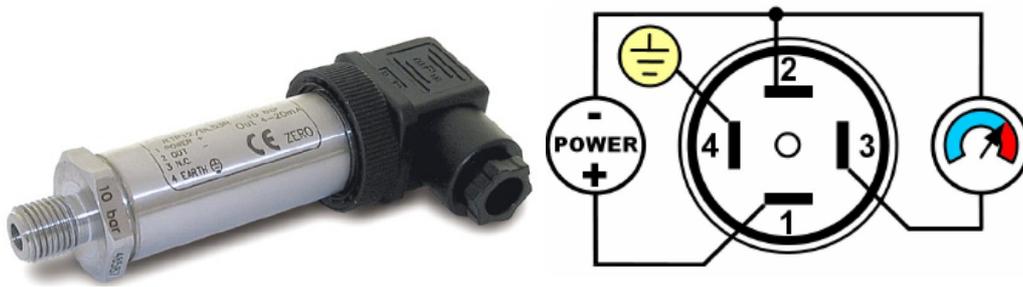


Figura 31. Sensore pressione e schema elettrico.

4.2 Sistema acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati è costituito da un'unica scheda National Instruments, modello NI 9208 (Figura 32) equipaggiata con 16 ingressi analogici in corrente 4-20 mA configurabile; avendo selezionato tutti i sensori con uscita in corrente non è stato necessario prevedere nessuna elettronica d'interfaccia o di condizionamento del segnale.

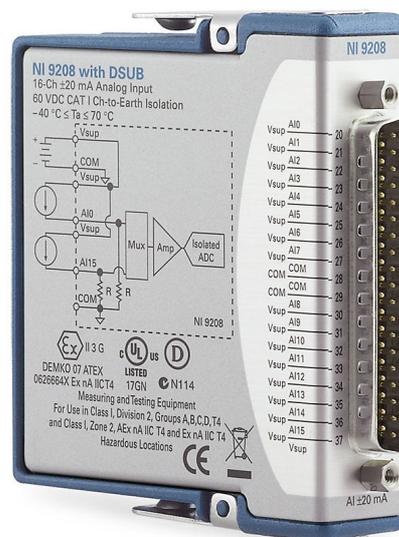


Figura 32. Scheda NI 9208.

4.2.1 Conversione del segnale

La conversione del segnale è stata effettuata utilizzando il software Max (Measurements and Automation Explorer) attraverso cui è possibile definire nomi e corrispondenze fisiche oltre a scale, unità di misura e calibrature. L'unica conversione effettiva, anche se si può considerare un'integrazione accessoria esterna del sensore, è quella del modulo per PT100 (riportato con relativo schema d'inserzione in Figura 33), un'elettronica facilmente programmabile che trasforma il segnale nativo delle PT100 del sistema in uscite analogiche 4-20 mA.

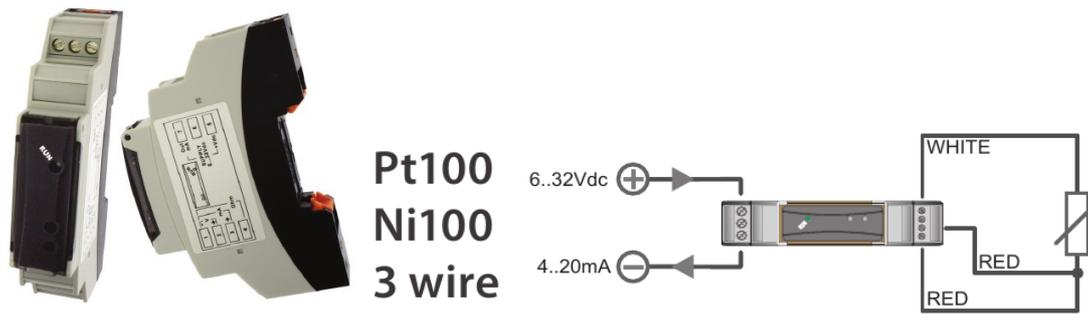


Figura 33. Convertitori e schema d'inserzione.

4.2.2 Acquisizione, registrazione e visualizzazione dei dati

La lettura dei dati avviene tramite un software d'acquisizione sviluppato in ambiente LabView, creato appositamente per il banco prova. Questo è composto da diverse sezioni che si occupano rispettivamente del monitoraggio online, del computo in tempo reale delle potenze termiche scambiate e delle funzioni termodinamiche di interesse, del tracciamento di grafici in differita e in tempo reale e della memorizzazione in un file csv dei dati misurati dai vari sensori. L'interfaccia principale del programma d'acquisizione è rappresentata in **Figura 34**, dove in basso è presente la barra dei comandi, sulla destra lo schema simbolico d'impianto con i valori in tempo reale delle grandezze misurate e sulla sinistra il diagramma psicrometrico che aggiorna in tempo reale le coordinate dei quattro punti che vanno a comporre le trasformazioni d'interesse subite dall'aria umida.

Nelle successive **Figura 35** e **Figura 36** vengono infine presentati due esempi di schermate di dettaglio per la visualizzazione dell'andamento nel tempo delle grandezze misurate direttamente e/o calcolate dal software sulla base delle misure acquisite.

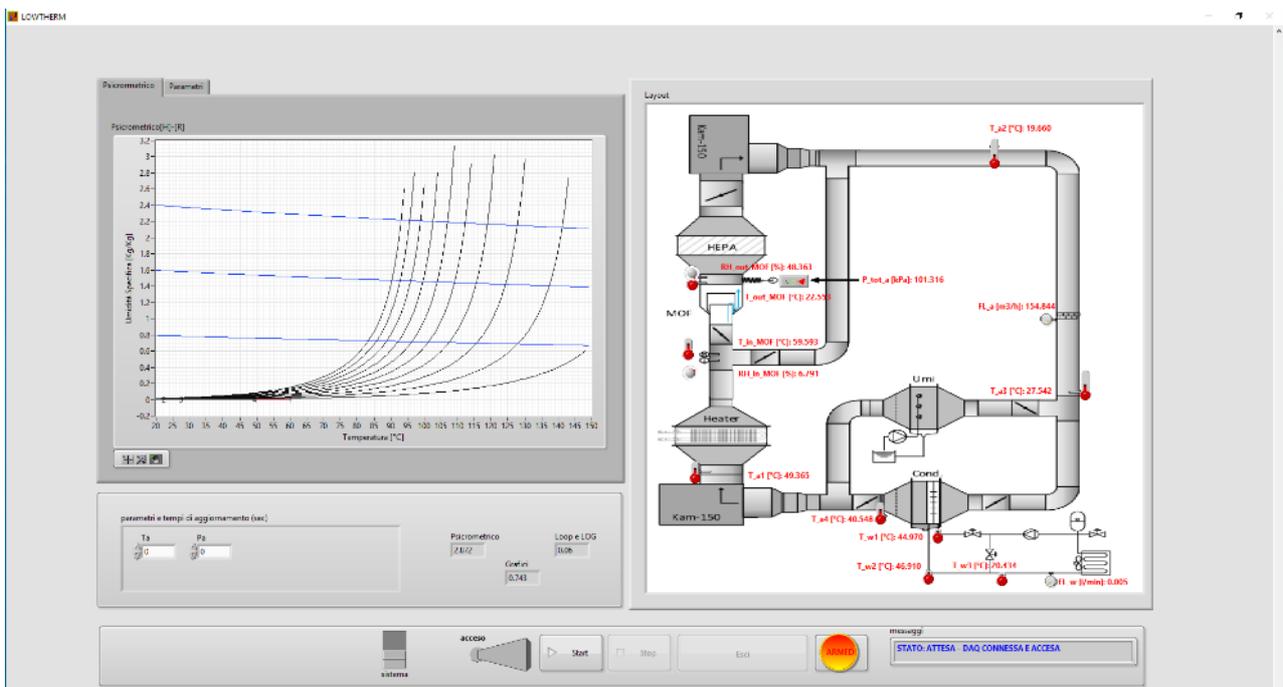


Figura 34. Schermata principale del sistema di monitoraggio.

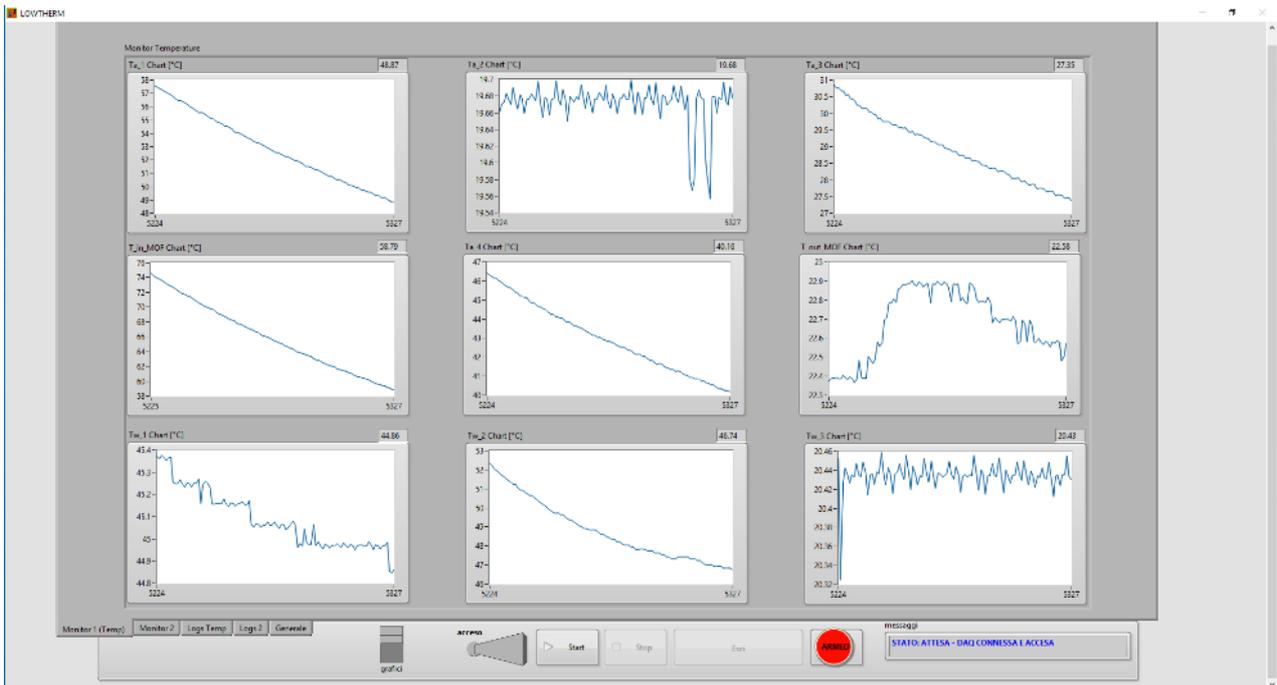


Figura 35. Schermata riservata ai grafici in tempo reale delle grandezze misurate.



Figura 36. Nella schermata rappresentata è possibile confrontare gli andamenti di una o più grandezze contemporaneamente.

5 Test funzionali dell'apparato sperimentale

In questo capitolo vengono presentate le prove sperimentali condotte al fine di testare le funzionalità dell'apparato in termini di controllo e misura dei parametri di rilievo. In questa prima fase sperimentale è stato utilizzato un materiale adsorbente di riferimento di uso comune e caratteristiche note. Di seguito verrà descritta la tipologia di materiale e le relative prove effettuate su banco prova. Infine sarà presentata una breve analisi dei dati al fine di confermare la validità del sistema sperimentale proposto.

5.1 Materiale adsorbente

Come detto in precedenza in questa fase di test dell'apparato sperimentale si è preferito far riferimento a un materiale le cui caratteristiche fossero ben note in letteratura e di facile reperibilità, anche se con caratteristiche di adsorbimento differenti rispetto ai materiali d'interesse MOFs; il materiale commerciale selezionato a tal fine è il "White Silica Gel" in forma cristallina, mostrato in **Figura 37**.

Il materiale viene fornito in forma granulare, con granuli di diametro compreso tra 1 e 4 mm; ha un *uptake* massimo nominale del 19.2% in peso [17], e un'isoterma di adsorbimento quasi lineare. Al fine di evidenziare con maggior forza le trasformazioni di adsorbimento e desorbimento, nelle prove di seguito illustrate si è utilizzato una quantità di materiale pari a 200 g, ovvero circa il doppio rispetto alla quantità attesa per i MOF.



Figura 37. Silica Gel in forma cristallina.

5.2 Prove di adsorbimento

La fase di adsorbimento rappresenta il processo più delicato dell'intero sistema di trattamento dell'aria umida in quanto deve sottostare ai parametri imposti dal processo di essiccazione. Su questa fase, anche nelle future attività di sviluppo della tecnologia, si concentreranno i maggiori sforzi a livello progettuale affinché si possa proporre un efficiente scambio di massa e di calore tra materiale adsorbente e aria. Le prove sono state condotte allo scopo di evidenziare i limiti operativi del banco prova e di ricavare un modello descrittivo delle trasformazioni che interessano il letto di materiale reagente.

La procedura di test prevede una fase iniziale di preparazione del circuito, durante la quale si effettua un riscaldamento di tutto il sistema alla temperatura di adsorbimento a cui deve essere testato il materiale. Questa prima fase risulta necessaria al fine di uniformare le temperature nelle varie parti del circuito ed

evitare di avere “punti freddi” sui quali possano insorgere fenomeni di condensazione “parassita”, ovvero non controllata. In questa fase anche il condensatore stesso viene scaldato ed utilizzato come zavorra termica sfruttando la sua capacità termica.

A seguito di questa prima fase di assestamento termico dell’apparato si procede con l’isolamento del letto adsorbente, mediante chiusura delle relative valvole, e con la progressiva umidificazione dell’aria fino al raggiungimento delle condizioni di umidità richieste.

Giunti alle condizioni di temperatura e umidità volute, si procede aprendo il ramo di circuito contenente il letto di materiale da testare. In queste condizioni viene mantenuta una quota di umidificazione costante (pompa dosatrice fissa a una percentuale di pompaggio, che è stata pari al 15% per le prove qui presentate) per un periodo di tempo di circa 1000 secondi.

Nel corso della prova è possibile controllare in tempo reale lo stato di avanzamento della fase di adsorbimento controllando le condizioni di umidità specifica in ingresso ed uscita dal letto fluido. Dopo aver verificato che il materiale adsorbente abbia smesso di reagire con l’aria umida in ingresso si fa terminare la prova chiudendo il passaggio di aria attraverso il letto. Si procede dunque con la successiva fase di rigenerazione.

Di seguito sono riportati alcuni dei dati più significativi ottenuti in uno dei numerosi test condotti, di cui si è riscontrato un sufficiente grado di ripetibilità. I valori rappresentano solo la fase di adsorbimento mentre è stata tagliata la precedente fase di preparazione del circuito.

I seguenti tre grafici di **Figura 38**, **Figura 39** e **Figura 40**, rappresentano rispettivamente la temperatura, l’umidità specifica e l’umidità relativa dell’aria umida in ingresso (curve blu) e uscita (curve rosse) dal letto. È chiaramente evidente come alla riduzione di umidità specifica tra ingresso ed uscita dal letto corrisponda correttamente un sensibile incremento della temperatura, dovuta al rilascio di calore nella fase di adsorbimento, che, come atteso, via via tende a ridursi. La progressiva riduzione di umidità specifica in ingresso nei primi 200 secondi è dovuta al fatto che il quantitativo di vapore prodotto dall’umidificatore è costante e nella fase iniziale risulta inferiore a quello assorbito dal letto.

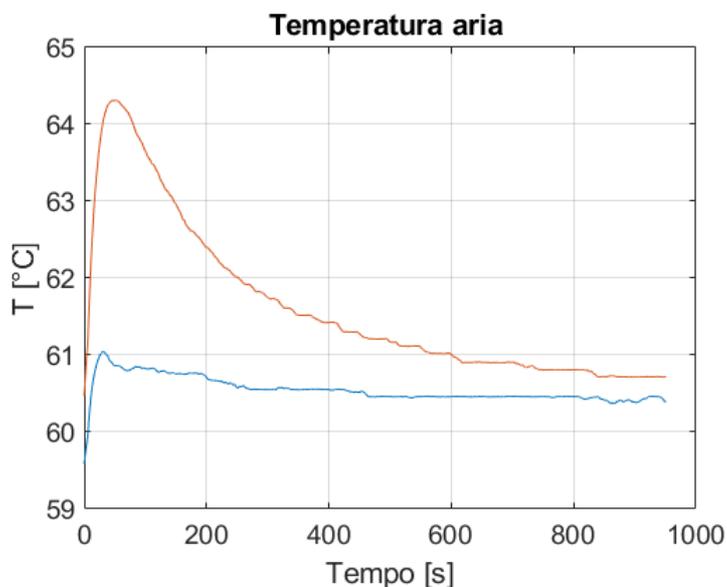


Figura 38. Misura della temperatura a monte (curva blu) e valle (curva rossa) del letto reagente.

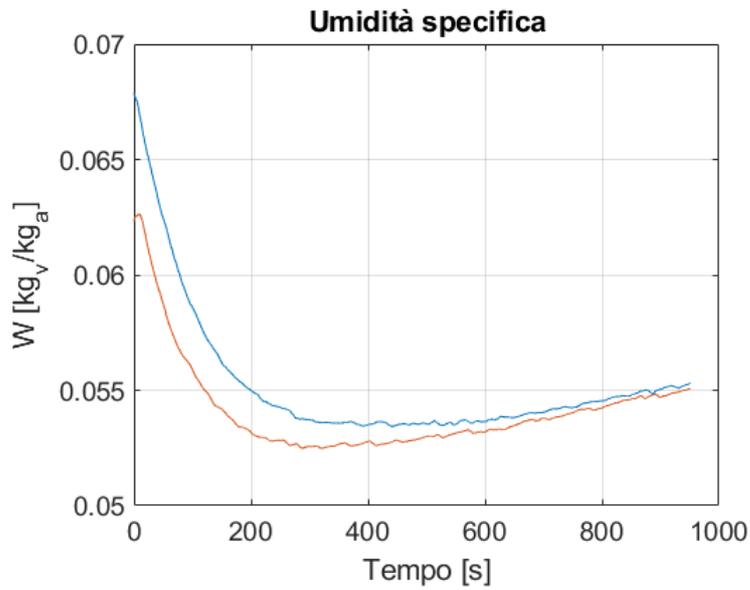


Figura 39. Misura indiretta dell'umidità specifica a monte (curva blu) e valle (curva rossa) del letto reagente.

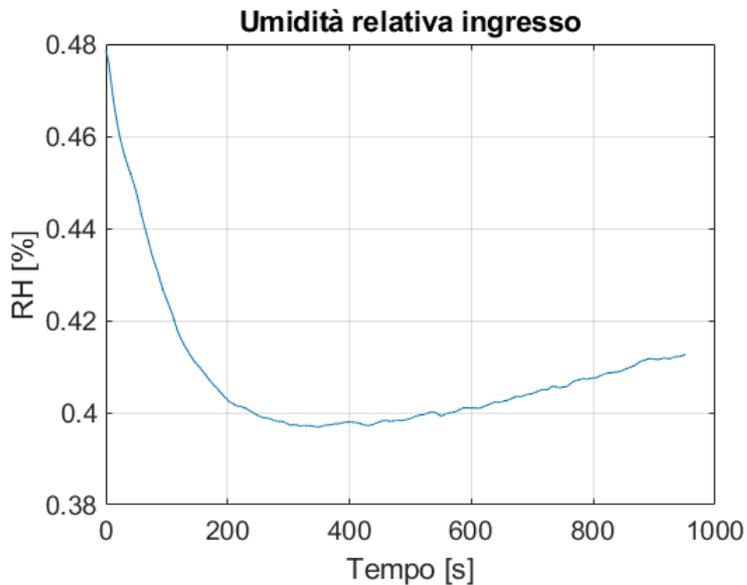


Figura 40. Condizioni di umidità relativa in ingresso al letto.

La prova è stata condotta con un flusso di aria umida di circa $82 \text{ m}^3/\text{h}$ alle condizioni di temperatura e umidità indicate a cui corrisponde una portata di aria secca di circa $62 \text{ Nm}^3/\text{h}$. In **Figura 41** viene inoltre rappresentata la trasformazione termodinamica su diagramma psicrometrico, riportando i valori di temperatura e umidità specifica dell'aria umida in ingresso (punti blu) e uscita (punti rossi) dal letto. La serie di dati rappresenta i primi 405 secondi di adsorbimento, mentre la restante parte di dati è stata esclusa per chiarezza di esposizione. Al fine di evidenziare la trasformazione tra ingresso ed uscita dal letto si è proceduto a suddividere questi dati in tre finestre temporali da 135 secondi l'una, e rispetto a questi intervalli si sono calcolati i valori medi di temperatura e umidità. Sul grafico tali punti sono rappresentati dai *marker* a forma di croce di colore nero. Collegando i punti medi tra ingresso e uscita (tratto nero) si evidenzia il percorso della trasformazione avvenuta nel letto di materiale adsorbente. Questa mette in luce

un andamento con pendenza maggiore rispetto a quella della curva isoentalpica rappresentata dalla linea continua azzurra, come atteso dalle analisi precedentemente svolte.

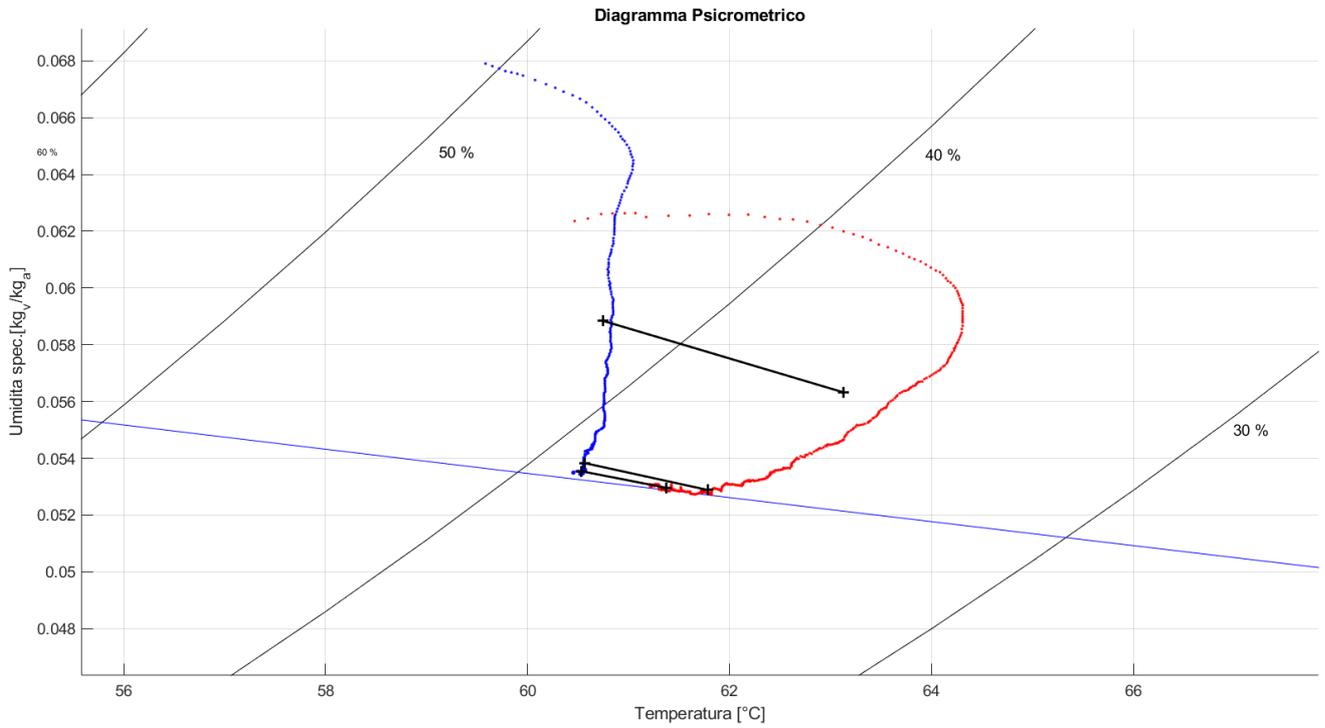


Figura 41. Rappresentazione dei punti di ingresso (blu) e uscita (rosso) dell'aria umida su diagramma psicrometrico.

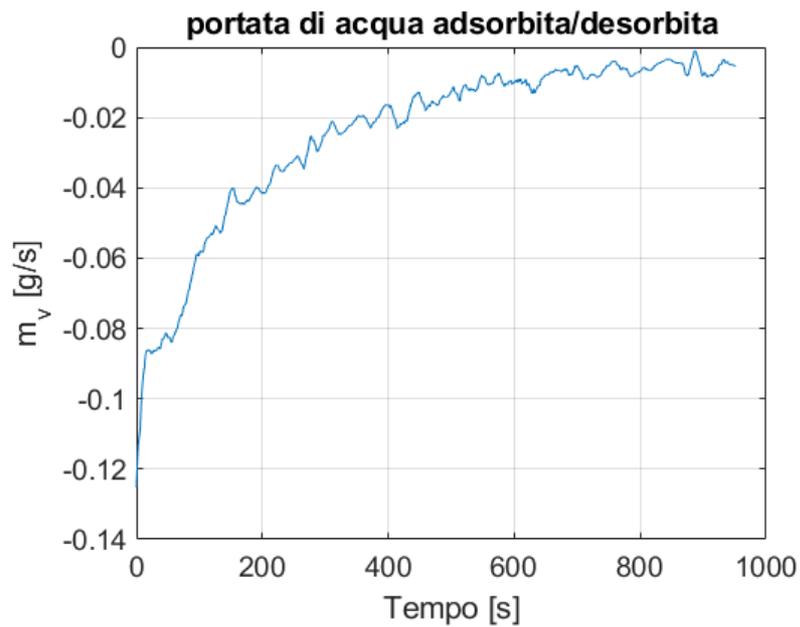


Figura 42. Grafico della misura indiretta della portata di acqua adsorbita.

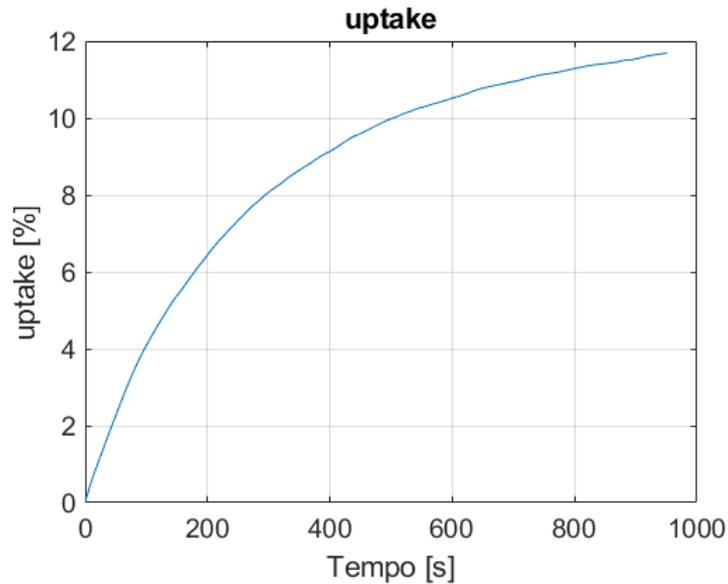


Figura 43. Grafico della quantità integrale di acqua adsorbita nel tempo rappresentata come rapporto in percentuale sul peso.

Dai dati sopra esposti infine si ricavano l'andamento della portata di acqua adsorbita/desorbita dal materiale trattato, riportato in **Figura 42**, e il dato più importante della prova condotta ovvero il valore della quantità di acqua adsorbita nel tempo, riportato in **Figura 43**, che in corrispondenza dell'istante di interruzione della prova fornisce il quantitativo totale di acqua adsorbita (*uptake*) dal materiale. Tutti i dati acquisiti, opportunamente correlati, permettono inoltre di ricavare informazioni sulla velocità con la quale il processo avviene, per fissate condizioni di umidità e temperatura, e dunque sulla cinetica del materiale.

5.3 Prove di desorbimento

Le prove di desorbimento allo stesso modo delle precedenti hanno lo scopo di valutare principalmente la cinetica della trasformazione. Questo dato risulta essere di notevole importanza nell'ottica di una implementazione industriale, in quanto la fase di rigenerazione, all'interno del ciclo di trattamento aria sopra illustrato, deve avvenire in un tempo pari o minore alla parallela fase di adsorbimento (ipotizzando, come più volte detto, l'impiego di almeno due letti gemelli lavoranti in controfase). Tale condizione è dettata dalla necessità di mantenere la continuità del processo di adsorbimento essendo continuo quello di essiccazione della pasta.

Temperatura e pressione parziale del vapore (o umidità relativa) rappresentano i parametri che influiscono sulla cinetica della trasformazione; pertanto agendo sul generatore (*Heater*) e sul raffreddamento del condensatore, è possibile variare le condizioni in ingresso al letto e definire una relazione tra la cinetica rilevata e questi due parametri, con lo scopo di individuare una regione di valori ai quali la cinetica sarà pari o superiore a quella osservata in fase di adsorbimento.

In termini operativi le prove vengono condotte nella seguente maniera. Alla fine della fase di adsorbimento viene isolato il letto reagente dal resto del circuito e ovviamente viene interrotta l'umidificazione dell'aria. A seguire viene effettuato un riscaldamento fino a raggiungere le condizioni di rigenerazione volute. Raggiunta una temperatura stabile si procede al trattamento del materiale adsorbente, facendo progressivamente condensare ed estraendo dal circuito aerulico il vapore rilasciato dal MOF, fino al raggiungimento di condizioni stazionarie alle quali viene fatta terminare la fase di rigenerazione. Per snellezza di trattazione di seguito non vengono mostrati i dati relativi a questa fase, in quanto sostanzialmente ridondanti rispetto a quelli appena presentati sull'assorbimento.

In definitiva i due processi, nei diversi cicli ripetuti di adsorbimento/rigenerazione, hanno fornito misure sostanzialmente coerenti, a meno di una leggera deriva degli estremi di *uptake*, probabilmente connessa alla progressiva alterazione del materiale utilizzato che notoriamente richiede processi di rigenerazione ad alta temperatura.

5.4 Analisi dei dati

In questo paragrafo viene presentata una breve analisi dei risultati esposti nei capitoli precedenti, focalizzando l'attenzione sul confronto dei dati misurati con quanto atteso per il materiale utilizzato.

Il valore totale della massima capacità di adsorbimento di acqua misurato durante la prova è dato dal contenuto d'acqua nel materiale all'inizio della prova sommato al valore dell'11.5% misurato nell'istante in cui la prova è stata interrotta. Preliminarmente alla prova il materiale era stato rigenerato in forno termostatico a 80°C per 10 ore in condizioni di umidità relativa dell'aria di circa 2.5%. Successivamente il campione era stato inserito nel sistema di prova e isolato dall'esterno mediante la chiusura delle valvole a monte e valle del letto. Si stima ragionevolmente che il contenuto di acqua nel materiale all'inizio della prova fosse molto minore del 2% in peso.

Assumendo che l'isoterma di adsorbimento del materiale granulare in bulk abbia lo stesso andamento di quella misurata per il materiale in polvere, si può ottenere una prima valutazione qualitativa sull'attendibilità del dato di *uptake* misurato (11÷13%) che risulta accettabile nelle condizioni di prova.

Il secondo confronto viene effettuato a partire dai dati presenti nel lavoro [18] in cui vengono presentati gli andamenti nel tempo dell'adsorbimento di acqua da parte di un analogo gel di silice mesoporoso. Il lavoro in particolare presenta un grafico, riportato in [Figura 44](#), che mostra l'andamento dell'*uptake* in una fase di adsorbimento condotta a 50 °C e 40% di umidità relativa (ovvero a pressione parziale del vapore pari a 60 mbar, come riportato dagli autori). I dati sono dunque confrontabili con quelli di [Figura 43](#), e il confronto viene presentato in [Figura 45](#), che mette in luce un sostanziale allineamento tra i due comportamenti, seppur ricavati in maniera differente e su tipologie di materiali solo in prima approssimazioni confrontabili.

In conclusione, l'impianto sperimentale è in grado di ricavare informazioni qualitative e quantitative sufficientemente affidabili in quanto confrontabili con i dati presenti in letteratura. L'apparato perciò è idoneo allo svolgimento delle attività per cui è stato progettato, fornendo risultati il cui grado di accuratezza è in linea con quello atteso, che è quello necessario e sufficiente alle finalità di studio.

L'apparato potrà pertanto essere utilizzato per la caratterizzazione dei MOF selezionati e del ciclo termodinamico proposto, nel prosieguo delle attività di ricerca.

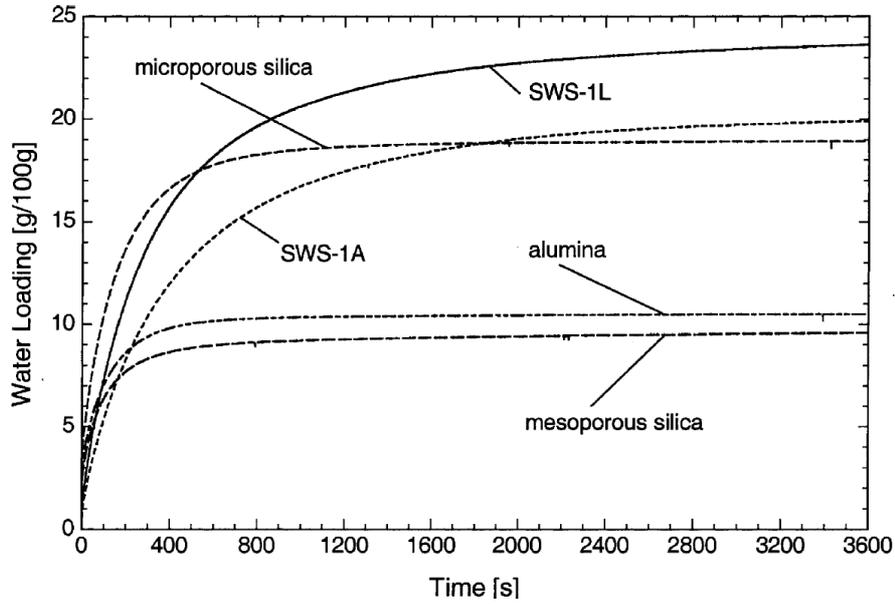


Figura 44. Confronto sull'adsorbimento di acqua nel tempo per materiali diversi. Test condotto a temperatura di adsorbimento pari a 50 °C e pressione parziale del vapore di 60 mbar.

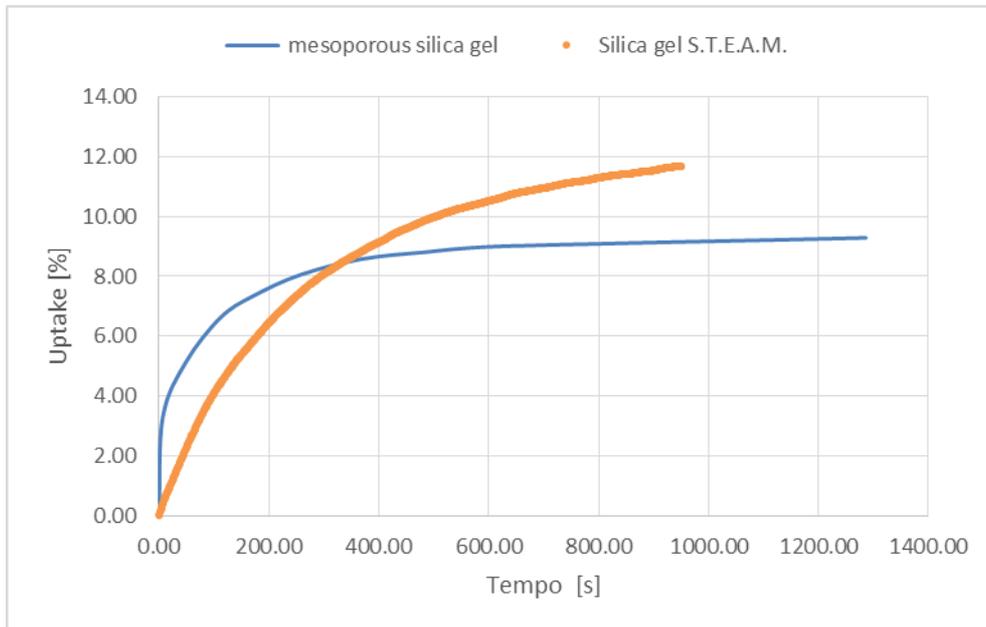


Figura 45. Confronto dell'andamento nel tempo dell'adsorbimento di acqua tra dato misurato (curva arancio) e dato ricavato da letteratura (curva blu).

6 Conclusioni

Le attività di ricerca svolte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UTV) nell'ambito della prima annualità (PAR2015) dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, che riguarda l'efficientamento di un processo industriale nel settore agroalimentare conseguibile mediante l'adozione di sistemi innovativi ad adsorbimento basati su materiali avanzati a elevata superficie specifica di tipo MOF, hanno portato alla completa *definizione teorica* di una metodologia innovativa per il recupero dei cascami termici ed idrici presenti nella fase di essiccazione del processo di produzione della pasta secca alimentare, potenzialmente applicabile alla maggior parte dei processi di essiccazione termicamente alimentati, sia in ambito agroalimentare che in altri settori.

Nello specifico il processo di recupero dei cascami richiede un leggero incremento dei consumi elettrici complessivi di impianto realizzando di fatto un parziale trasferimento dei consumi termici di un essiccatore, che generano cascami non recuperabili, verso quelli elettrici, che permettono il recupero completo internamente al processo di essiccazione di tutti i cascami termici generati, con significativa riduzione del consumo complessivo di energia primaria.

Nella *presente annualità (PAR2016)* dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, le attività condotte dal gruppo di ricerca dell'Università hanno riguardato l'avvio della fase di sviluppo sperimentale dell'iniziativa, con la progettazione, la realizzazione presso i propri laboratori e il test funzionale di un apparato sperimentale su scala banco, che *al termine delle attività stesse si è dimostrato idoneo alla caratterizzazione dei letti adsorbenti innovativi e del ciclo termodinamico connesso alla nuova tecnologia*, per il quale è stato realizzato.

Tutti i sottosistemi costituenti l'apparato sono stati realizzati ad hoc per l'applicazione: letto adsorbente, riscaldatore, umidificatore e condensatore.

Le prove funzionali dell'apparato sono state condotte utilizzando materiali adsorbenti tradizionali (silica gel) al fine di poter confrontare, come di fatto avvenuto, i risultati ottenuti sperimentalmente con quelli di letteratura.

In particolare le prove sperimentali eseguite hanno permesso di verificare che il sistema nel suo insieme è in grado di riprodurre condizioni di umidità e temperatura riconducibili a quelle di funzionamento di un futuro impianto di essiccazione della pasta con sistema di recupero.

L'attività di test ha inoltre permesso di validare i sistemi di controllo, la sensoristica e l'intero sistema di monitoraggio, acquisizione ed elaborazione dati sviluppato appositamente in ambiente LabView.

L'attività è stata svolta in stretta collaborazione con il gruppo di lavoro dell'ENEA che in parallelo, presso i propri laboratori, ha condotto un'attività sperimentale volta alla caratterizzazione chimico-fisica dei materiali selezionati nel corso della prima annualità, che ha permesso di individuare nei materiali Al-fumarato e CAU-10-H (Al) (entrambe fornite dalla MOF Technologies Ltd) quelli più promettenti per il prosieguo dello sviluppo della tecnologia.

Nella terza annualità si procederà quindi con la caratterizzazione sperimentale dei materiali adsorbenti in bulk e del ciclo termodinamico di efficientamento del processo di essiccazione della pasta. In particolare, utilizzando il sistema di prova scala banco saranno effettuati test sui letti di entrambi i MOF e tra i due verrà selezionato il materiale con caratteristiche ottimali per l'applicazione impiantistica. Utilizzando tale materiale verrà progressivamente implementato il sistema dimostrativo che sarà impiegato per testare, in collaborazione con ENEA, le più idonee metodologie di confinamento dei materiali sotto forma di letti adsorbenti. Saranno specificamente condotte prove sperimentali atte a rilevare eventuali criticità nell'utilizzo di tali materiali nelle modalità di supporto tradizionalmente utilizzate (e ormai collaudate) per i materiali adsorbenti, valutando le effettive perdite prestazionali che ne derivano rispetto all'attuale configurazione adottata.

Nel corso delle attività UTV apporterà quindi le necessarie e opportune modifiche al banco già realizzato per completare lo sviluppo del sistema dimostrativo finale.

L'attività verrà condotta con lo scopo di definire al meglio tutti gli elementi necessari per poter procedere, a valle di questa fase sperimentale di laboratorio e in tempi possibilmente rapidi, alla progettazione, realizzazione e sperimentazione in campo di un impianto pilota, da realizzare preferibilmente in collaborazione con uno o più soggetti industriali, quali produttori di essiccatori per pasta, produttori di pasta secca e possibilmente del produttore del materiale MOF selezionato, che ha già dimostrato un particolare interesse per l'iniziativa.

7 Riferimenti bibliografici

1. G.L. Guizzi, M. Manno, A. Zaccagnini, M. Salvatori, "Metodologie innovative per il recupero di cascami termici a bassa temperatura nel settore agroalimentare mediante materiali adsorbenti avanzati" Report RDS/PAR2015/058.
2. M. Pentimalli, C. Alvani, M. Bellusci, A. La Barbera, F. Padella, F. Varsano, "Materiali adsorbenti innovativi per l'efficientamento energetico di processi nell'industria agroalimentare" Report RDS/PAR2015/057.
3. Y.I. Aristov, "Challenging offers of material science for adsorption heat transformation: A review", *Applied Thermal Engineering* 50 (2013) 1610–1618.
4. L.G. Gordeeva, Y.I. Aristov, "Composites 'salt inside porous matrix' for adsorption heat transformation: a current state-of-the-art and new trends", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7 (2012), 288–302.
5. G.A. Longo, "Sviluppi nelle tecnologia ad assorbimento e adsorbimento", *Aicarr Journal*, ottobre (2013), 36-45.
6. G. Grossman, "Open cycle absorption and desiccant technology", *International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC11)*, 6-8 Aprile 2011 Padova, IIR/AICARR 2011, 3-12.
7. S.K. Henninger, F. Jeremias, J. Ehrenmann, C. Janiak, "Potential of PCPs/MOFs for the use in Adsorption heat pump processes", *International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC11)*, 6-8 Aprile 2011 Padova, IIR/AICARR 2011, 415-424.
8. L. Milatovich, G. Mondelli, "La Tecnologia della Pasta Alimentare" Chiriotti Editore, Pinerolo.
9. J. Anderson, L. Westerlund, "Improved energy efficiency in sawmill drying system" *Applied Energy* 113 (2014) 891–901.
10. B. Ye, J. Liu, X. Xu, G. Chen, J. Zheng, "A new open absorption heat pump for latent heat recovery from moist gas", *Energy Conversion and Management*, 94 (2015), 438–446.
11. S. Misha, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian, "Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods" *Renew Sustain Energy Rev*, 16 (2012), 4686–707.
12. M.F. de Lange, K.J. F. M. Verouden, T.J.H. Vlugt, J. Gascon, F. Kapteijn, "Adsorption-Driven Heat Pumps: The Potential of Metal–Organic Frameworks", *Chemical Reviews*, 115 (2015), 12205–12250.
13. S.P. Malysenko, S.V. Mitrokhin, I.A. Romanov, "Effects of scaling in metal hydride materials for hydrogen storage and compression", *Journal of Alloys and Compounds*, 645 (2015,) S84–S88.
14. X. Zheng, T.S. Ge, R.Z. Wang, "Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems", *Energy* 74 (2014) 280-294.
15. Giovanni Longo, "Stato dell'arte e sviluppi futuri della "Sorption Technology": i sistemi a sostanze assorbenti liquide (assorbimento) e solide (adsorbimento) sia a circuito chiuso che a circuito aperto" *Aicarr Journal* n.22.
16. Kai Wang, Edward A. Vineyard, "Adsorption refrigeration", *Ashrae Journal*, September 2011.
17. <https://www.silica-gel.it/it/content/14-guida-alla-rigenerazione>.
18. B. Dawoud, Y. Aristov, "Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (2003) 273–281.
19. Bellocchi, S., Guizzi, G.L., Manno, M., Pentimalli, M., Salvatori, M., Zaccagnini, A. *Adsorbent materials for low-grade waste heat recovery: Application to industrial pasta drying processes*. (2017) *Energy*, 140, pp. 729-745. DOI: [10.1016/j.energy.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.008).

CV breve del gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

Giuseppe Leo Guizzi

Professore Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", attualmente Coordinatore del Corso di Studi in Ingegneria Energetica (carica ricoperta fin dal 2000), già Presidente del Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica nel periodo 1986-1989. Membro della Giunta nazionale dei Professori di Macchine nel triennio 2002/2005.

Già membro della commissione istruttoria del Ministero dell'Industria per le iniziative di risparmio energetico, dei gruppi di lavoro del C.T.I. sulla "Combustione in Letto Fluido" e sugli "Impianti a ciclo combinato".

Consulente scientifico del MIUR per i progetti di ricerca applicata nel settore dell'Ingegneria meccanica. Esperto dell'Autorità dell'Energia e del CCSE per la verifica degli impianti incentivati ai sensi del CIP 6. Consulente di numerose Aziende per iniziative nel settore dell'energia.

Coordinatore di progetti di ricerca Europei sull'idrogeno. Autore di oltre 70 lavori scientifici riguardanti: macchine idrauliche, impianti di potenza, cogenerazione e "repowering", soluzioni innovative per cicli a vapore (rigeneratore barometrico) e cicli misti gas-vapore (*Gas Injection Steam Cycle*), monitoraggio e diagnostica di impianti termoelettrici.

Michele Manno

Laureato con lode in Ingegneria Meccanica nel 2000 presso il Politecnico di Torino, nello stesso Ateneo ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in Energetica nel 2004; attualmente in servizio come Ricercatore Confermato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", settore scientifico-disciplinare "Sistemi per l'Energia e l'Ambiente" (ING-IND/09).

Ha collaborato a numerosi progetti di ricerca nell'ambito del gruppo di lavoro coordinato dal prof. G.L. Guizzi (Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"), alcuni dei quali finanziati su bandi di ricerca nazionali o internazionali, aventi ad oggetto la modellazione e lo sviluppo di sistemi energetici avanzati finalizzati alla riduzione del consumo di energia primaria e di emissioni inquinanti e climalteranti.

Principali attività di ricerca:

- Progetto MECCANO: studio, sviluppo e sperimentazione di un sistema di climatizzazione a basso consumo per veicoli elettrici o ibridi. Progetto coordinato dal CRF (Centro Ricerche FIAT) e finanziato sul Bando Industria 2015 "Mobilità sostenibile" del Ministero per lo Sviluppo Economico.
- Progetto HP-ACS: studio, sviluppo e sperimentazione di un impianto frigorifero basato su pompa di calore a idruri metallici per veicolo adibito al trasporto di alimenti refrigerati. Il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" non figura tra i partecipanti al progetto (finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, ambito Capacities - Research for the benefit of SMEs) ma ha collaborato alle attività del progetto svolte da Labor srl, coordinatore del progetto.
- Progetto SEAKERS: studio, sviluppo e sperimentazione di un sistema di recupero di energia dai moti di sollevamento, beccheggio e rollio di imbarcazioni a vela. Progetto coordinato da Labor srl e finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, ambito Capacities - Research for the benefit of SMEs.
- Progetto ATHENA: collaborazione con Labor srl allo studio e sviluppo di un sistema di generazione portatile basato su celle a combustibile PEM e stoccaggio di idrogeno in idruri chimici (boridruro di sodio).
- Progetto FEMAG-C: studio e sviluppo di un sistema di propulsione ibrido per autotrazione con motore elettrico e celle a combustibile alimentate a idrogeno, per uso cittadino e affine. Progetto coordinato da Labor srl e finanziato dalla regione Lazio (L. 598/94).
- Progetto ECOCED: collaborazione con Metasystem spa per la valutazione dei consumi energetici derivanti dalla gestione di moderni Centri di Elaborazione Dati (CED) e studio di sistemi energetici (nell'ambito della generazione distribuita) volti alla riduzione di consumi, emissioni e costi derivanti dalla gestione dei CED.

- Progetti FEMAG, DEMAG, ENFUGEN, finanziati nell'ambito del 6° Programma Quadro EU, finalizzati allo studio di sistemi ibridi di generazione basati su celle a combustibile e supercondensatori, con stoccaggio di idrogeno in idruri metallici, per applicazioni sia mobili sia stazionarie.

Attività didattica: è titolare dall'A.A. 2011/12 del corso di Complementi di Macchine (6 CFU, insegnamento obbligatorio per il Corso di Laurea triennale in Ingegneria Energetica presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata") e dall'A.A. 2014/15 del corso di Energy Systems (6 CFU, corso di Laurea triennale in Engineering Sciences).

È inoltre coordinatore Erasmus per il Corso di Laurea triennale e Magistrale in Ingegneria Energetica.

Alessandro Zaccagnini

Attualmente assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", ha conseguito la Laurea triennale in Ingegneria Meccanica e la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso il medesimo Ateneo.

Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca finanziati a livello europeo, nazionale e regionale, aventi ad oggetto temi legati al risparmio energetico e allo sviluppo di sistemi energetici avanzati.

Autore di 8 articoli presentati a convegni (nazionali e internazionali) e di 1 brevetto.

Marco Salvatori

Laureato in Ingegneria Energetica, titolare di assegno di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" nel periodo 2013-2015, partecipando in particolare alle attività del progetto SEAKERS, finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, avente ad oggetto lo studio di un sistema di recupero di energia dai moti di sollevamento, beccheggio e rollio di imbarcazioni a vela, nonché al progetto MECCANO, coordinato dal CRF (Centro Ricerche FIAT) e finanziato sul Bando Industria 2015 "Mobilità sostenibile" del MiSE, riguardante lo studio di un sistema di climatizzazione a basso consumo per veicoli elettrici o ibridi. Progetto.

Nel periodo 2013/2015 presso la Labor srl ha partecipato al progetto UP-THERM, finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, sullo sviluppo di un micro-cogeneratore in ambito domestico.

Autore di 3 articoli scientifici su rivista di rilevanza internazionale e di 1 contributo a convegno internazionale.

Sara Bellocchi

Laureata in Ingegneria Energetica, titolare di assegno di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" nel periodo 2016-2017, svolge attualmente il Dottorato di ricerca presso il medesimo dipartimento occupandosi prevalentemente di modellazione e analisi di scenari per la mobilità sostenibile. Ha svolto attività di ricerca in ambito di efficienza energetica, accumulo di energia, "green infrastructure", analisi di sistemi energetici, modellazione e simulazione di sistemi integrati. Ha inoltre conseguito un diploma post-laurea in Ingegneria Mineraria presso Curtin University WASM, Australia, Perth.

Autrice di 2 articoli scientifici su rivista di rilevanza internazionale e di 1 contributo a convegno internazionale.