



Ricerca di Sistema elettrico

Stato dell'arte, selezione e caratterizzazione di materiali a cambiamento di fase (PCM). Analisi in ciclo termico e studio preliminare della conducibilità termica tramite hot-wire method.

Alessandra Adrover

STATO DELL'ARTE, SELEZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM).
ANALISI IN CICLO TERMICO E STUDIO PRELIMINARE DELLA CONDUCIBILITA' TERMICA TRAMITE TECNICA
HOT-WIRE METHOD.

Alessandra Adrover (Sapienza Università di Roma)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: : Energia elettrica da fonte solare

Obiettivo: Studio di configurazioni impiantistiche alternative

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio e sviluppo di un mezzo di accumulo termico a calore latente a bassa ed alta temperatura basato sull'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM)"

Responsabile scientifico ENEA: Elisabetta Veca

Responsabile scientifico Università di Roma : Alessandra Adrover

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 CARATTERIZZAZIONE DI MISCELE DI SALI FUSI	6
2.1.1 <i>Proprietà termofisiche di Sali solari</i>	6
2.1.2 <i>Temperature di fusione di Sali singoli e miscele di Sali.</i>	7
2.1.3 <i>Analisi della stabilità termica di Sali solari</i>	8
2.2 DETERMINAZIONE DELLA CONDUCEBILITÀ TERMICA TRAMITE HOT-WIRE METHOD	13
3 CONCLUSIONI.....	19
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20

Sommario

Nella presente relazione si riportano alcuni rilevanti dati di letteratura in merito a Sali solari, nello specifico densità, calori specifici, diffusività e conducibilità. Si riportano anche dati di stabilità termica ottenuti tramite diverse tecniche sperimentali.

Nella presente relazione si analizzano i dati forniti dall'ENEA in merito alla determinazione della conducibilità termica tramite una apparecchiatura che fa uso del principio del filo riscaldato (hot-wire method). L'analisi dei primi dati forniti, per quanto incompleti e limitati ad un fluido (glicerina), con caratteristiche molto diverse dai Sali fusi, risultano incoraggianti.

1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente allegato tecnico si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2012, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", tematica di ricerca "Studi e sperimentazioni sui potenziali sviluppi delle energie rinnovabili"; nello specifico, si riferisce all'obiettivo "Solare termodinamico - Obiettivo B - Studio di configurazioni impiantistiche alternative" del progetto "Energia elettrica da fonte solare".

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università di Roma "La Sapienza" riguardano lo studio di sistemi innovativi di accumulo termico per impianti solari termodinamici che utilizzino come mezzo di accumulo a calore latente un materiale a cambiamento di fase (PCM).

Oggetto del contratto è lo sviluppo e la caratterizzazione di nuovi mezzi di accumulo termico, per medio-basse (180-250°C) e alte (450-600°C) temperature, che utilizzino una miscela di materiali a cambiamento di fase (PCM).

Le attività prevedono (1) lo studio della possibilità di utilizzare miscele ternarie di sali con possibili aggiunte di carbonati che siano in grado di operare a medio-basse ed alte temperature e (2) lo sviluppo di un metodo tipo Hot-Wire per la determinazione della conducibilità termica dei PCM e valutarne la dipendenza dalla temperatura stessa.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Caratterizzazione di miscele di Sali fusi

2.1.1 Proprietà termofisiche di Sali solari

Proprietà termofisiche affidabili sono importanti per la modellazione e il dimensionamento di sistemi di storage a Sali fusi.

Si riportano i valori riportati in letteratura relativi a densità, calore specifico, diffusività e conducibilità termica di Sali Solari con le relative correlazioni, così come sinteticamente riportati da Bauer et al. [1].

I dati riportati in figura 2.1.1 mostrano che queste proprietà differiscono in termini di incertezza.

I valori di densità mostrano la dispersione minima. Dati di capacità termica variano poco più del $\pm 5\%$ rispetto al valore medio.

Diffusività termica e conducibilità termica hanno mostrato le variazioni più forti ($\pm 15\%$).

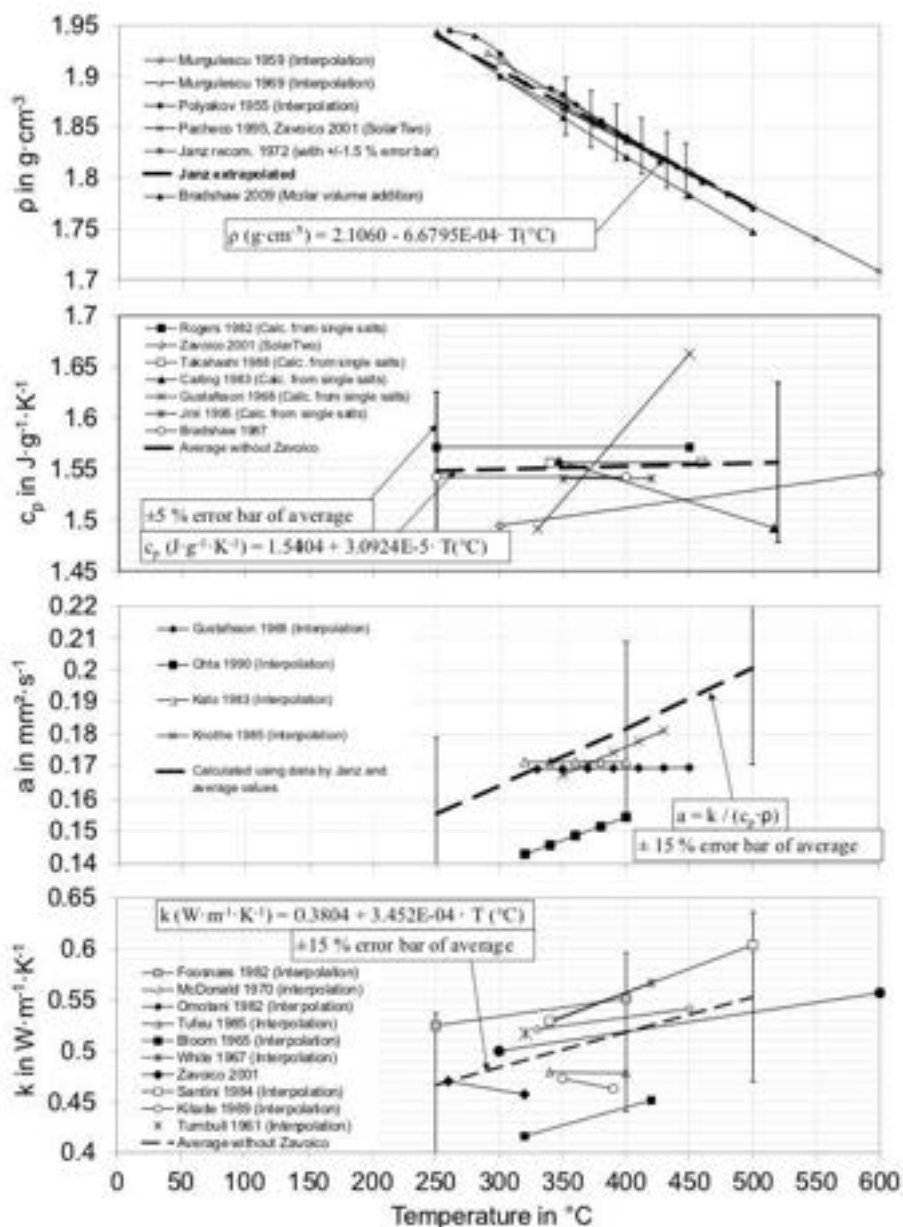


Figura 2.1.1 Sintesi di dati di letteratura relativi a Sali solari. Densità, calori specifici, conducibilità termiche e diffusività termiche in un ampio campo di temperatura.

2.1.2 Temperature di fusione di Sali singoli e miscele di Sali.

La Tabella 1 presenta un elenco sistematico delle temperature di fusione di Sali singoli e la temperatura minima di fusione dei sistemi salini con i cationi di calcio (Ca), potassio (K), Litio (Li) e Sodio (Na) (Tabella 1 verticale) e anioni nitrato (NO_3) e nitrito (NO_2) (Tabella 2 orizzontale) utilizzando varie fonti di letteratura [1-5].

Le temperature di fusione dei Sali singoli varia in un ampio intervallo : da 220 °C (LiNO_2) a 561 °C ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$).

Miscele di Sali, piuttosto che Sali singoli, hanno il vantaggio di una minore temperatura di fusione. Queste miscele possono avere simili limiti di stabilità termica come i Sali singoli. Quindi, miscele di Sali, come gli eutettici, possono avere un intervallo di temperatura in cui operare più ampio rispetto ai Sali singoli.

La Tabella 1 riporta dati relativi ai Sali solari più comunemente utilizzati.

La Tabella 1 mostra chiaramente la tendenza della temperatura di fusione a diminuire muovendosi da sinistra verso destra così come dall'alto verso il basso della tabella.

Quindi, può essere previsto che i sistemi con una temperatura di liquidus inferiore a 80 ° C siano effettivamente realizzabili.

	NO_2	NO_3	NO_2, NO_3
Single salts and binary systems with common cation			
Ca	398 °C [#]	561 °C [#]	393 °C
K	440 °C	334 °C	316-323 °C
Li	220 °C	254 °C	196 °C
Na	275 °C	306 °C	226-233 °C
Binary systems with common anion and ternary reciprocal			
Ca,K	185 °C	145-174 °C	130 °C
Ca,Li	205-235 °C	235 °C	178 °C
Ca,Na	200-223 °C	226-230 °C	154 °C
K,Li	98 °C	126 °C	94 °C
K,Na	225 °C	222 °C	142 °C
Li,Na	151 °C	196 °C	126 °C
Ternary additive common anion and quaternary reciprocal			
Ca,K,Li	N/A	117 °C	N/A
Ca,K,Na	N/A	130 °C	N/A
Ca,Li,Na	N/A	170 °C	N/A
K,Li,Na	N/A	119 °C	75 °C
Quaternary additive common anion and quinary reciprocal			
Ca,K,Li,Na	N/A	109 °C	N/A

Tabella 1 : Temperature di fusione di Sali solari.

In effetti Bradshaw et al. [3] hanno pubblicato dati sul sistema quaternario K, Li, Na// NO_2, NO_3 con una temperatura minima di fusione di circa 75 °C con la composizione 33,5% molare Li^+ , 47,9 mol% K^+ , 18,6% in moli di Na^+ e un rapporto di 0,56 nitrato/nitrito.

La figura 2.1.2 mostra il diagramma di fase ottenuto utilizzando un calorimetro differenziale a scansione (DSC) e un apparato di punto di fusione (MPA) per il sistema K,Li,Na/ NO_2, NO_3 con un rapporto fisso di NO_3/NO_2 di circa 0.56. I punti di misura sono contrassegnati da un simbolo asterisco. La miscela con i liquidus più bassi presenta la composizione: Li^+ 33% molare, K^+ 48 mol% e Na^+ 19 moli% con un rapporto di NO_3/NO_2 pari a 0.56.

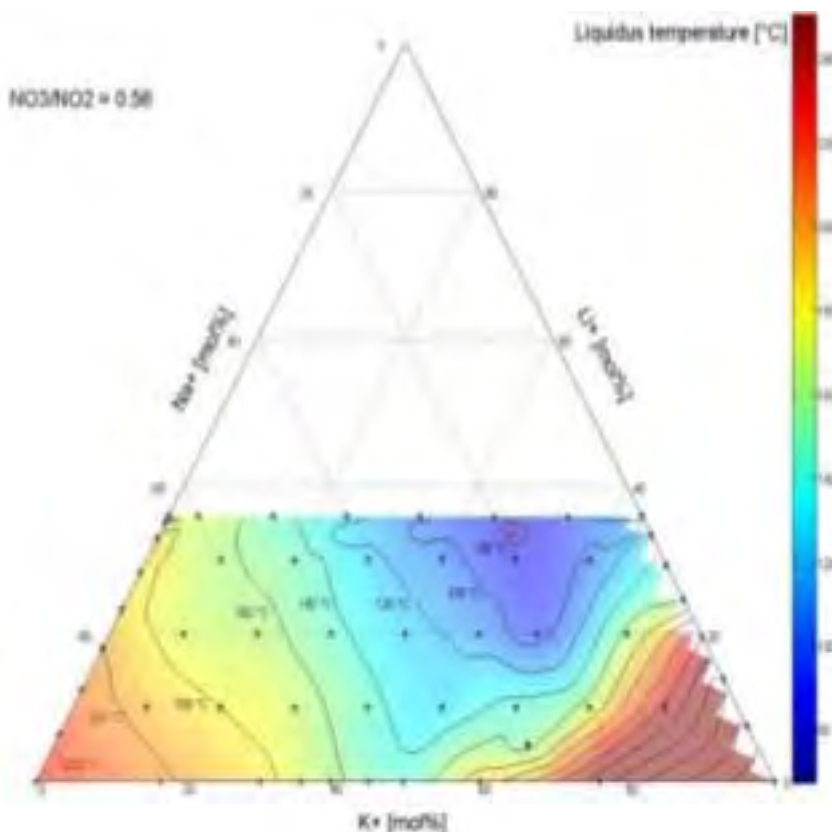


Figura 2.1.2 diagramma di fase ottenuto utilizzando un calorimetro differenziale a scansione (DSC) e un apparato di punto di fusione (MPA) per il sistema K,Li,Na/ /NO₂,NO₃ con un rapporto fisso di NO₃/NO₂ di circa 0.56.

2.1.3 Analisi della stabilità termica di Sali solari

Si riportano i dati termogravimetrici (TGA) per diversi Sali solari, fra cui quattro miscele a bassa temperatura di fusione [1].

Stern [6] riporta le costanti di equilibrio in ordine crescente come segue $KNO_3 < NaNO_3 < Ca(NO_3)_2 < LiNO_3$ (massima stabilità per KNO_3). I nitriti sono considerati meno stabili dei nitrati [4].

Le misurazioni in TGA (figura 2.1.3) confermano che si verificano perdite di massa prevalentemente in un intervallo di temperature da 500 °C a 600 °C. Risultano meno stabili i sali $LiNO_3$ e $Ca(NO_3)_2$, nonché la miscela Ca, K, Na // NO_3 . La stabilità delle miscele di Sali K, Na // NO_3 (eutettico) e K, Li, Na // NO_2, NO_3 (80 °C) sono risultate simili al singolo sale $NaNO_3$. Quindi, la miscela di sali K, Li, Na // NO_2, NO_3 é un promettente candidato come HTF (heat transfer fluid) grazie alla suo ampio intervallo operativo.

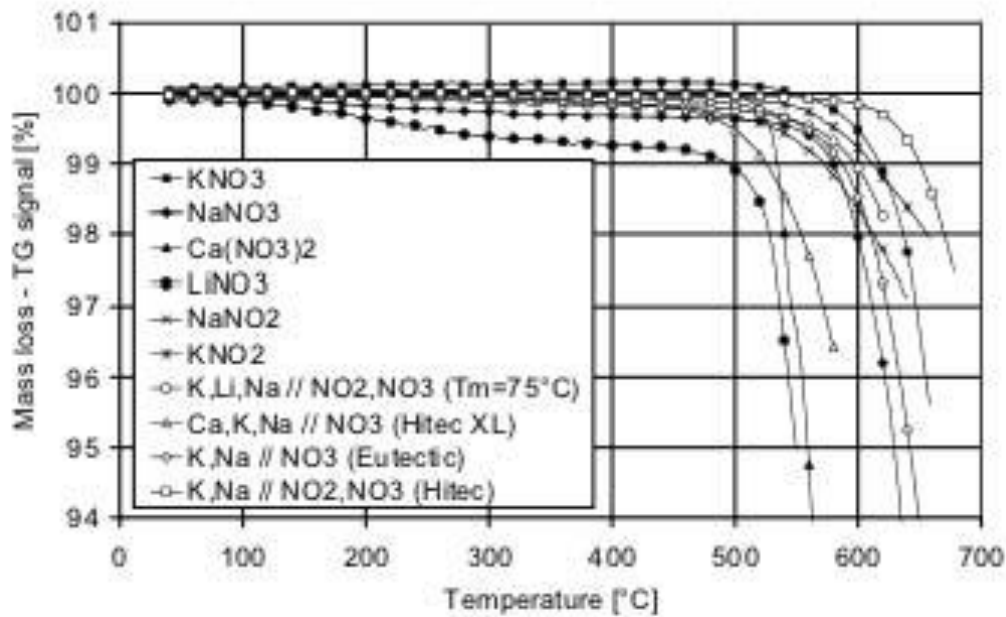


Figura 2.1.3 : Analisi termogravimetrica (TGS) di diversi Sali solari

Una analisi più dettagliata su NaNO_3 e su sali solari analizza la stabilità termica di questi sali mediante due tecniche, ossia una analisi di stabilità statica (in condizioni isoterme) ed una dinamica (in rampa di temperatura) in un sistema aperto in atmosfera di aria sintetica a pressione ambiente.

In particolare, l'analisi statica si focalizza sulla cinetica di formazione di nitriti nel campo di temperatura 450-550 gradi centigradi. Si fa uso di aria sintetica con portate variabili fra i 100 e i 600 ml/minuto.

La figura 2.1.4 mostra l'andamento del rapporto $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ in funzione del tempo per tre diversi valori della temperatura. Un semplice modello di crescita esponenziale può essere adottato in tutto il campo di temperatura e di portate di aria. Lo studio evidenzia che la temperatura influenza non solo il valore del rapporto $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ all'equilibrio, ma anche i tempi caratteristici di raggiungimento dell'equilibrio stesso. L'equilibrio a 550 gradi centigradi viene raggiunto rapidamente dopo alcune decine di ore mentre il raggiungimento dell'equilibrio a 450 gradi richiede diverse centinaia di ore.

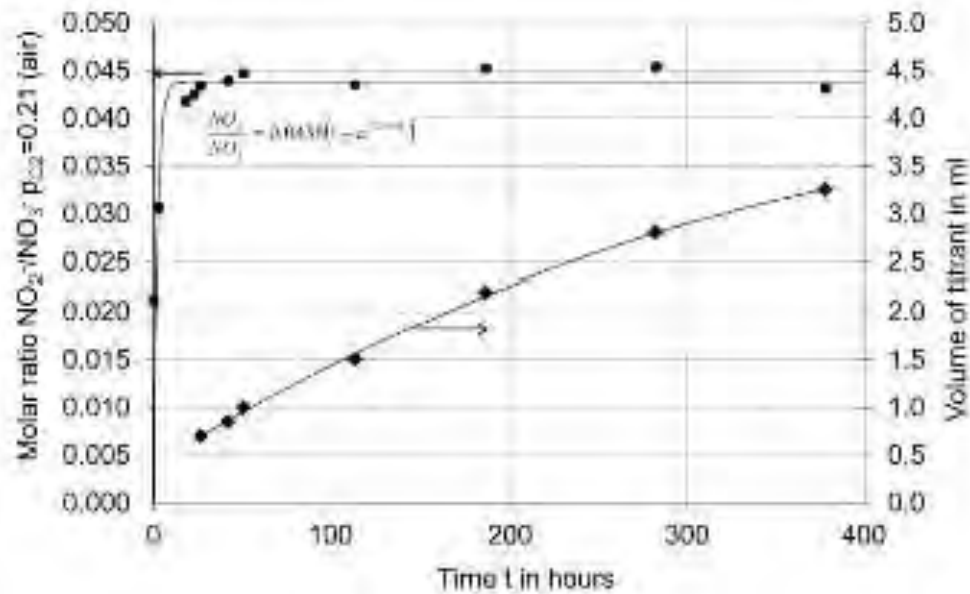


Figura 2.1.5 : analisi statica (in isoterma) della reazione primaria e secondaria di decomposizione del sale solare.

Oltre le misure statiche in isoterma sono state effettuate misure termogravimetriche dinamiche, ossia in rampa di temperatura. I principali parametri sono composizione del sale, pressione parziale di ossigeno e velocità di riscaldamento. Le atmosfere gassose utilizzate sono azoto puro o miscele ossigeno/azoto in diverse percentuali e con una portata pari a 100 ml/min. La velocità di riscaldamento varia fra 0.5 K/min a 10 K/min.

Le figure 2.1.6 e 2.1.7 mostrano l'andamento della temperatura di decomposizione per sali NaNO_3 e sale solare per diversi valori della pressione parziale di ossigeno e per diverse velocità di riscaldamento.

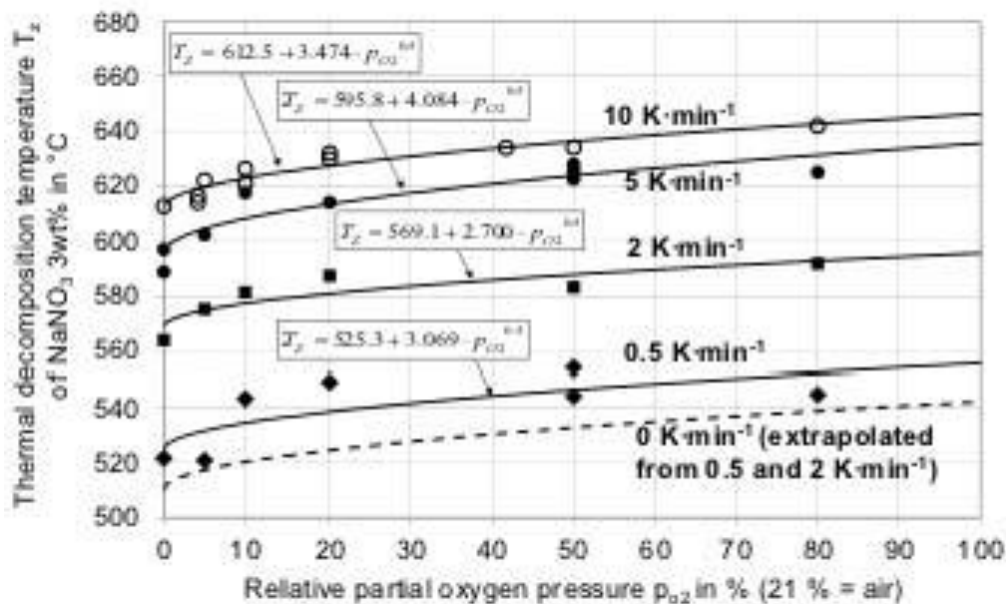


Figura 2.1.6 : temperatura di decomposizione per NaNO_3 in funzione della pressione parziale dell'ossigeno e per diversi valori della velocità di riscaldamento. Analisi dinamica in rampa di temperatura.

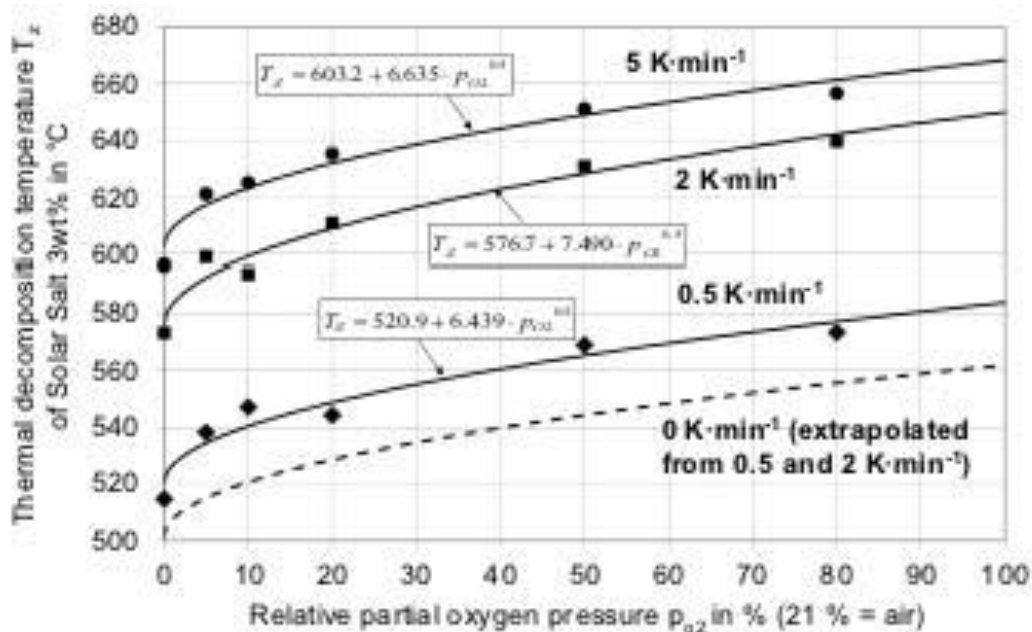


Figura 2.1.7 : temperatura di decomposizione per sale solare in funzione della pressione parziale dell'ossigeno e per diversi valori della velocità di riscaldamento. Analisi dinamica in rampa di temperatura.

La temperatura di decomposizione viene calcolata come la temperatura corrispondente ad una perdita in peso pari al 3% in peso. Si osserva che la temperatura di decomposizione misurata dipende dalla velocità di riscaldamento. Alte velocità di riscaldamento determinano temperature di decomposizione più elevate. Tutte le misure sperimentali mostrano che alte pressioni parziali di ossigeno portano ad alte temperature di decomposizione. In altre parole, la stabilità di NaNO₃ e del sale solare migliora con l'aumento della pressione parziale di ossigeno.

Dai dati in rampa di temperatura si sono estrapolati i valori all'equilibrio (ossia statici, 0 K/min come velocità di riscaldamento). Per NaNO₃ in condizioni di equilibrio, i risultati estrapolati forniscono una temperatura di decomposizione di 525 °C in aria sintetica e 542 °C in presenza di ossigeno a pressioni atmosferiche.

Per il sale solare all'equilibrio, i valori estrapolati sono 529 °C (aria sintetica) e 562 °C (ossigeno). Questo valore è inferiore rispetto al valore riportato in precedenza di 565 °C [8]. Le misurazioni effettuate si riferiscono a una perdita di massa di 3 wt%.

Si deve tenere in considerazione che la temperatura individuata come temperatura di decomposizione è fortemente sensibile al valore di percentuale di perdita in massa adottata. Inoltre, prove statiche e dinamiche comportano necessariamente diverse temperature di decomposizione.

In ogni caso i dati sperimentali riportati mostrano che la stabilità termica del sale solare è più elevata rispetto al NaNO₃. Si può anche vedere che la stabilità del sale solare dipende più significativamente dalla la pressione parziale dell'ossigeno. Per NaNO₃ la differenza di stabilità tra aria sintetica e l'ossigeno è di 17 K (542 °C meno 525 °C), mentre per il sale solare è pari a 33 K.

2.2 Determinazione della conducibilità termica tramite Hot-Wire method

Il metodo del filo scaldante (hot-wire method) è una tecnica standard per la misura delle proprietà termiche dei materiali, in cui una sorgente lineare (una resistenza elettrica) si trova completamente immersa nella sostanza da analizzare [7,8].

Inizialmente, la sorgente di potenza è spenta e la temperatura è uniforme. Al tempo $t=0$, si inizia a sviluppare calore per effetto Joule attraverso il filo scaldante percorso da corrente.

La temperatura del mezzo fluido in cui il filo scaldante è immerso crescerà con una legge temporale nota, variabile con la distanza dal filo, e dipendente da λ (conduttività termica).

Misurando la variazione nel tempo della temperatura ad una certa distanza r dal filo scaldante si può costruire sperimentalmente questa curva e ricavare λ .

In alternativa, quando non sia possibile misurare la temperatura a distanza r dal filo, la misura di temperatura può essere condotta direttamente sul filo scaldante.

Le prove preliminari sono state condotte in una apparecchiatura realizzata dall'ENEA costituita da un cilindro (cestello) in cui alloggiare il materiale di cui vuole determinarsi la conducibilità termica. Le dimensioni del cestello cilindrico sono diametro $d=12$ cm e altezza $H=20$ cm.

Il filo scaldante di lunghezza complessiva pari a $L=23.5$ cm è alloggiato sull'asse del cilindro e collegato a un generatore di tensione DV_1 . Sul circuito elettrico è inserita una resistenza nota R e pari a 1 Ohm. Si misura sperimentalmente la differenza di potenziale DV_2 a monte e valle della resistenza al fine di individuare l'intensità di corrente $I=DV_2/R$ che, a meno di dispersioni ulteriori, percorre il filo scaldante.

Il filo scaldante di diametro $R_f=0.7$ mm è realizzato in una lega Nickel-Cromo 80/20 (resistività pari a 1.002 Ohm mm^2/m a 25 gradi centigradi), ricoperto di un isolante (ossido di magnesio) e il tutto racchiuso in una guaina di AISI 304 con diametro esterno pari a 3.4 mm (vedi figura 2.2.1).

Construction:

Sheath material: one of the following:

- Copper,
- Cupronickel 70/30,
- Stainless steels of AISI 300x range,
- Alloys 600, and 825

Other materials on request.

No. of conductors: 1 or 2

Conductor material: one of the following:

- Nichrome 80/20,
- Constantan,
- Copper,
- Copper-Nickel alloys

Insulation material: Magnesium Oxide (MgO)

Electrical Parameters:

Supply voltage up to 500Vac (assembled units)

Supply voltage up to 750Vac (cable)



Figura 2.2.1 Struttura e caratteristiche del filo scaldante

Sperimentalmente viene misurata la temperatura T_{c3} all'esterno della guaina, e in due altri punti a distanza R_1 e R_2 dall'asse del cilindro (vedi figura 2.2.2)

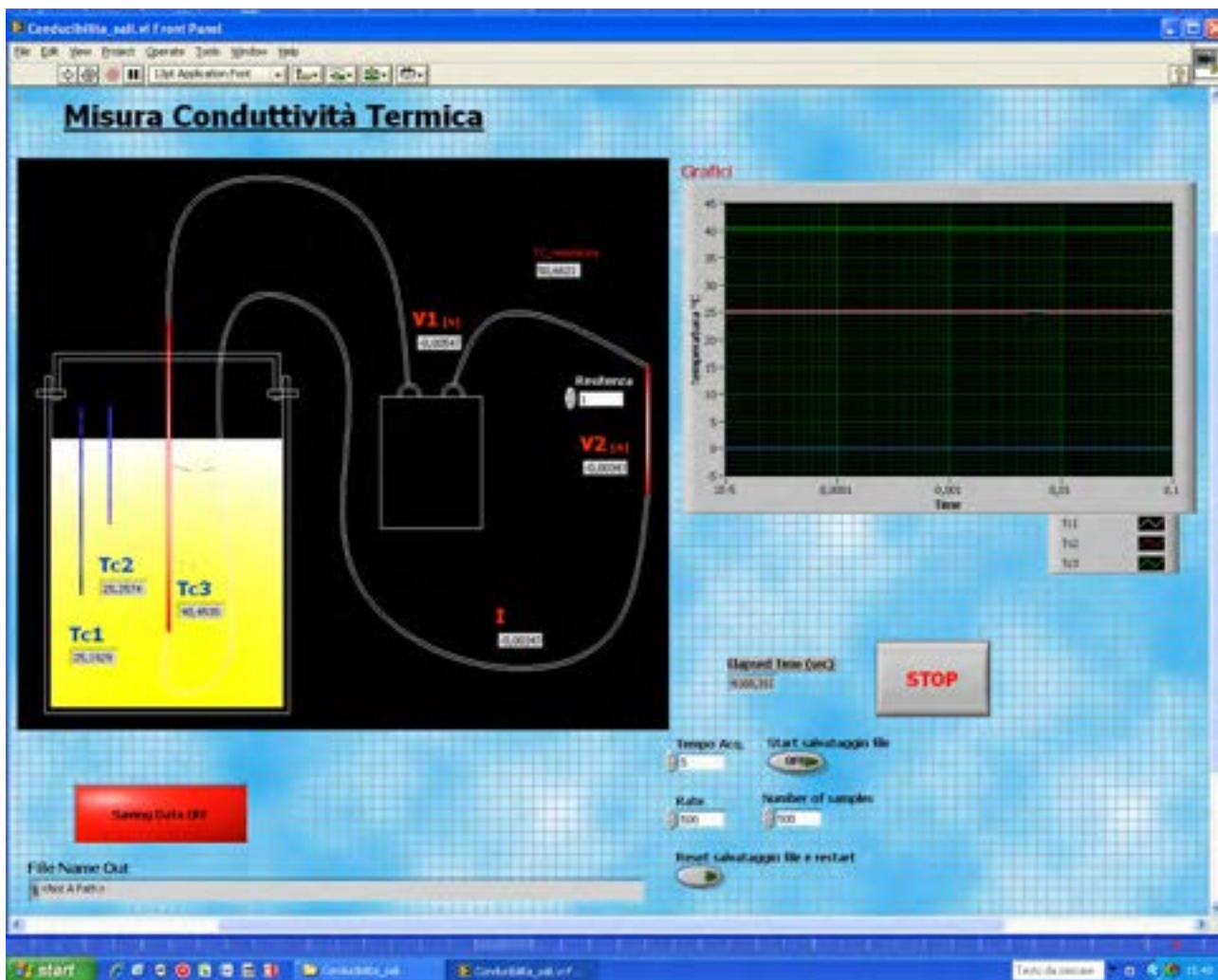


Figura 2.2.2 : Schema dell'apparato sperimentale per la misurazione della conducibilità termica.

La presenza dell'isolante e della guaina sono fattori importanti di cui tenere conto qualora si voglia prevedere correttamente il profilo (radiale) di temperatura all'interno del fluido. Ma ai fini della determinazione della conducibilità termica del fluido sulla base dell'evoluzione temporale della temperatura Tc3 non risulta necessario tenerne conto dal momento che la presenza dell'isolante e della guaina vanno ad influenzare solo il prefattore (costante) della legge di evoluzione temporale Tc3 vs t

$$Tc3 = \frac{q}{4 \pi \lambda} \log(t) + C$$

I dati sperimentali forniti dall'ENEA consistono in una serie di misurazioni della temperatura Tc3 vs t per diversi e crescenti valori della tensione applicata al circuito DV₁ come da figura 2.2.3 in cui la temperatura Tc3 è riportata in funzione del log(t). Il fluido di riferimento utilizzato ai fini della verifica del funzionamento e della taratura dell'apparecchiatura è glicerina.

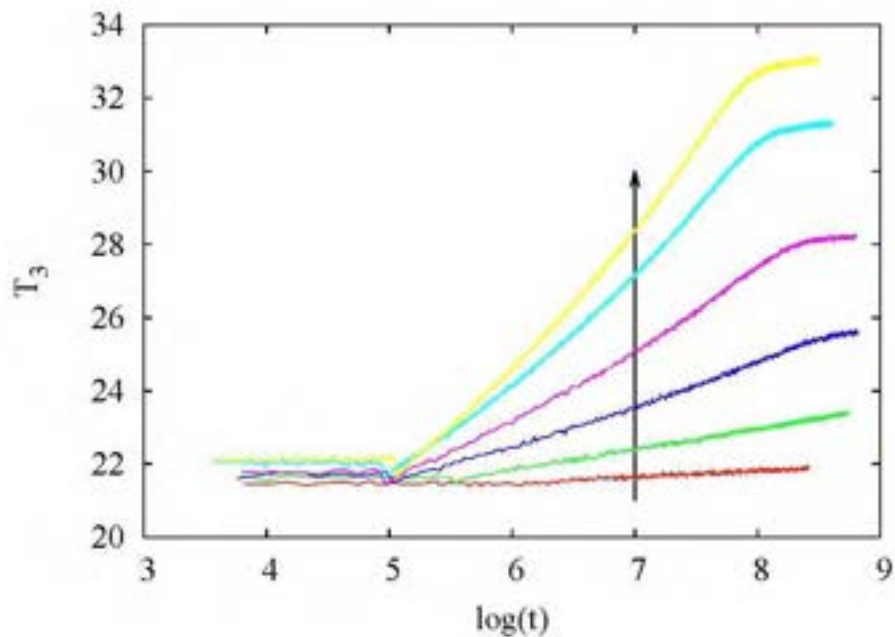


Figura 2.2.3 : Temperatura della guaina T₃ vs log(t) per valori crescenti della tensione applicata al circuito DV₁

L'apparato sperimentale misura in realtà anche le temperature T_{c1} e T_{c2} a distanza finita dal filo scaldante ma la sperimentazione non è stata portata avanti per un tempo sufficiente (molto superiore ai 6000 secondi pari al tempo massimo della rilevazione) si da permettere al fronte termico di propagarsi e determinare un incremento significativo delle temperature T_{c1} e T_{c2}. Quindi i dati di temperatura T_{c1} e T_{c2} non sono in alcun modo utilizzabili ai fini di una stima più accurata della conducibilità termica del fluido.

Dalla figura 2.2.3 si osserva chiaramente che per bassi valore di tensione la crescita della temperatura con il log(t) è effettivamente lineare e caratterizzata da una sola pendenza s (vedi figura 2.2.4)

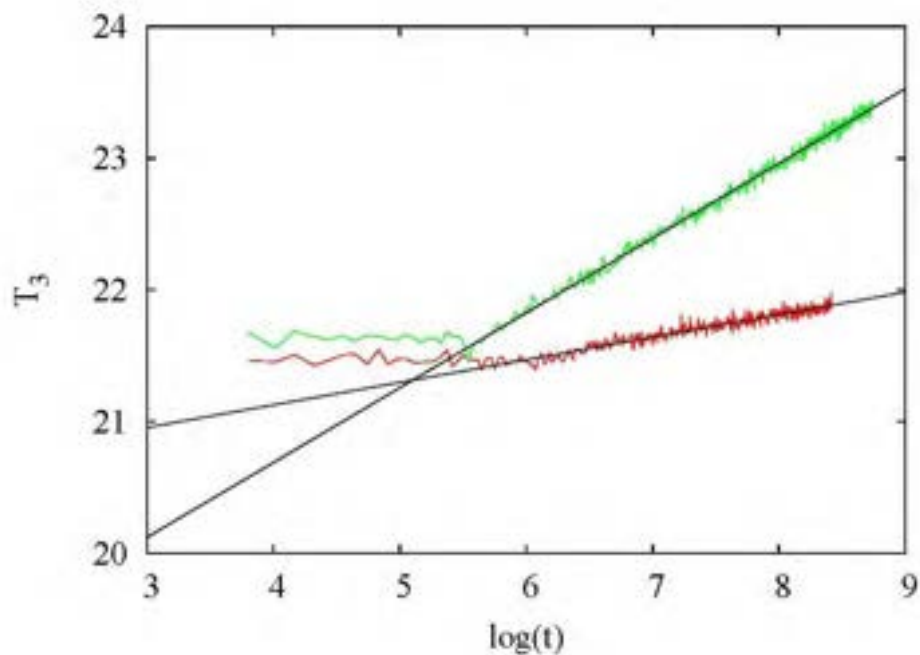


Figura 2.2.4 : Temperatura della guaina Tc3 vs log(t) per bassi valori della tensione DV_1

Per più alti valori di DV_1 si osserva la presenza di due comportamenti diversi, entrambi lineari, ma caratterizzati da pendenze diverse a corte e lunghe scale di tempi, come apprezzabile dalla figura 2.2.5.

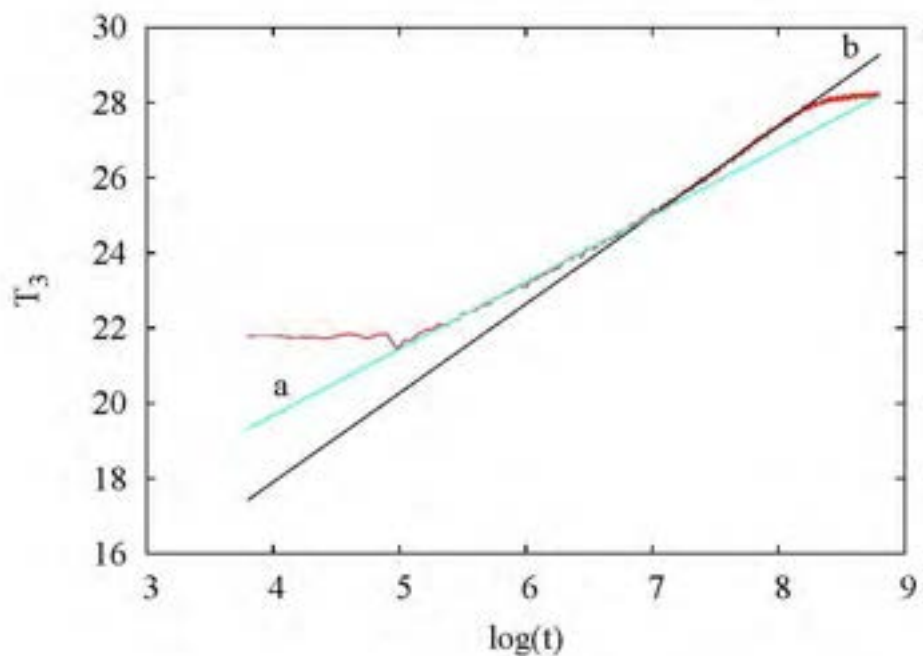


Figura 2.2.5 : Temperatura della guaina Tc3 vs log(t) per valori più elevati della tensione applicata DV_1

Per tutte le prove sperimentali sono state stimate entrambe le pendenze (a corte e lunghe scale di tempi) e graficate in funzione dell'energia q W/m dissipata per effetto Joule e calcolata come

$$q = (DV_1 - DV_2) I / L_f$$

essendo $(DV_1 - DV_2)$ la tensione effettivamente applicata ai capi del filo scaldante e I l'intensità di corrente che percorre il circuito.

La figura 2.2.6 riporta l'andamento di entrambe le pendenze in funzione di q .

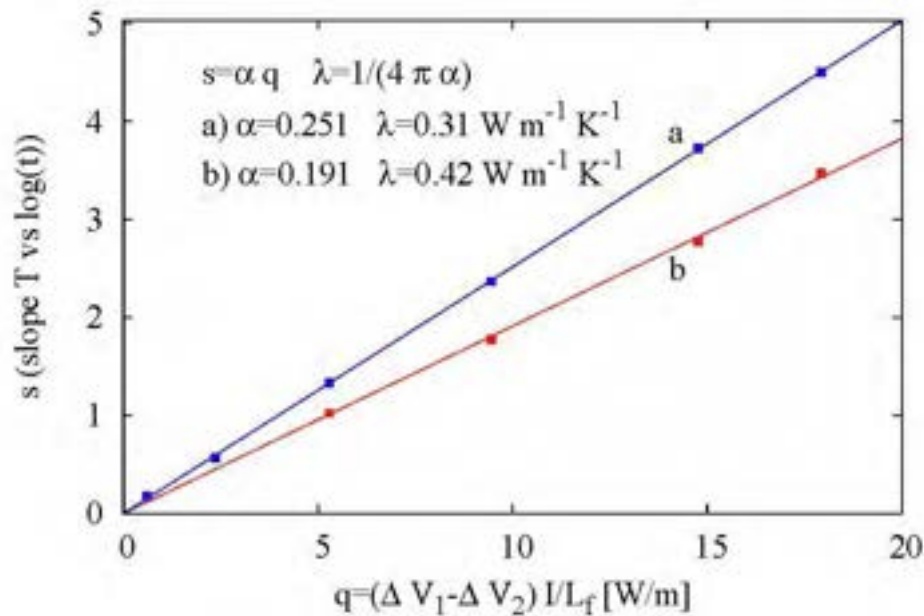


Figura 2.2.6 : Andamento delle pendenze valutate su lunghe (a) e su corte (b) scale di tempi in funzione della potenza sviluppata dal filo scaldante.

Per entrambe le pendenze si osserva un andamento lineare di s vs q a conferma di una conducibilità termica costante del fluido (glicerina) nel campo di temperature in cui si sta operando (21-30 gradi centigradi).

Si può pertanto effettuare una stima della conducibilità termica a partire dall'andamento delle pendenze in funzione della tensione applicata e quindi dell'energia fornita dal filo scaldante essendo

$$s = \alpha q \quad \lambda = 1 / (4 \pi \alpha)$$

La pendenza valutata dall'andamento a lunghe scale di tempi fornisce un valore di conducibilità decisamente più prossimo ai valori di letteratura e pari a $0.31 \text{ W}/(\text{m K})$ mentre il valore fornito dalla pendenza a corte scale di tempi fornisce un valore pari a $0.42 \text{ W}/(\text{m K})$ decisamente superiore a quelli riportata in letteratura (vedi figura 2.2.7, riferimento [9] J.S. Powell Meas. Sci. Technol. 2 (1991)).

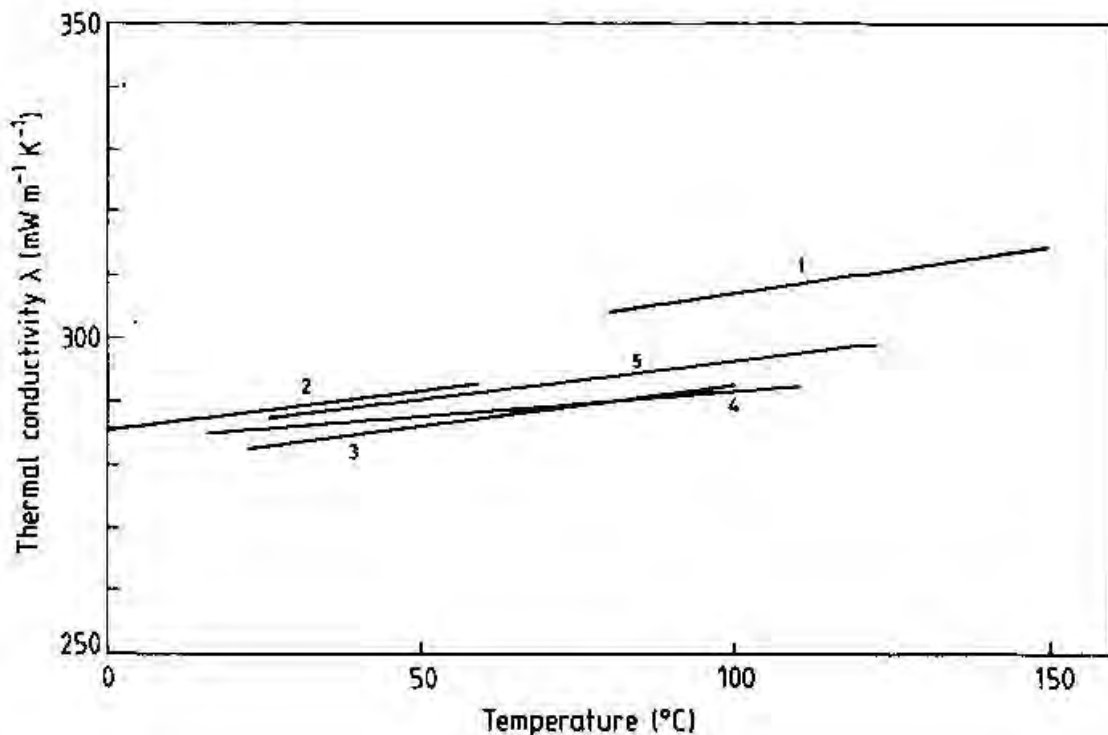


Figura 2.2.7 : Conducibilità termica della glicerina in funzione della temperatura. Sintesi di dati di letteratura J.S. Powell Meas. Sci. Technol. 2 (1991).

In ogni caso, bisogna tener presente che l'utilizzo dell'apparecchiatura ai fini della determinazione della conducibilità di PCM non è così immediato. Si tenga infatti presente che i Sali fusi sono conduttori elettrici e questo può determinare una dispersione elettrica (electrical leakage) attraverso il sale fuso. Per questo i dati riportati in letteratura sulla conducibilità di sali fusi presentano variazioni significative fortemente dipendenti dall'apparecchiatura utilizzata e dalle condizioni operative. La figura 2.2.8 riporta una sintesi di dati di letteratura di conducibilità termica del sale fuso KNO_3 da cui si apprezza l'ampio intervallo di variabilità del dato [9].

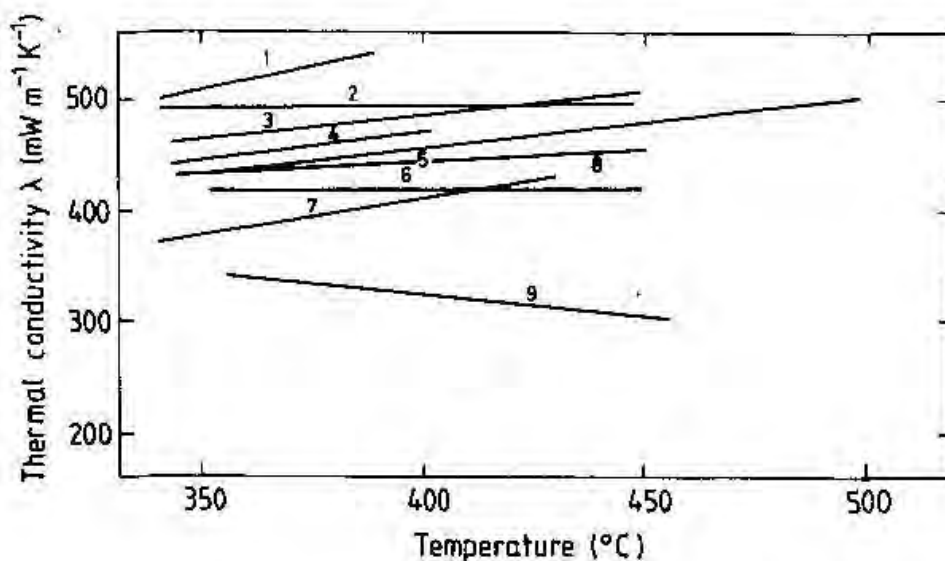


Figura 2.2.8 Conducibilità termica del sale fuso KNO_3 in funzione della temperatura. Sintesi di dati di letteratura J.S. Powell Meas. Sci. Technol. 2 (1991).

3 Conclusioni

I dati sperimentali di letteratura evidenziano la possibilità di utilizzare miscele di Sali solari in grado di operare in un ampio range di temperatura. In particolare si suggerisce l'utilizzo di una sistema quaternario K, Li, Na//NO₂,NO₃ con una temperatura minima di fusione di circa 75 °C con la composizione 33,5% molare Li+, 47,9 mol% K+, 18,6% in moli di Na+ e un rapporto di 0,56 nitrato/nitrito.

La letteratura evidenzia che la caratterizzazione e lo studio della stabilità termica di sali solari richiede, accanto a classici studi termogravimetrici, studi statici (in isoterma) e dinamici (in rampa di temperatura) in sistemi aperti in atmosfere a composizione azoto/ossigeno controllate.

Questo al fine dell'individuazione e della caratterizzazione delle cinetiche delle reazione primarie (formazione di nitriti) e secondarie (formazione di ossidi), quest'ultime importanti per la stabilità delle miscele su lunghe scale di tempi.

In merito alla misure effettuate dall'ENEA per la stima della conducibilità termica di Sali fusi tramite il metodo hot-wire, si evidenzia che l'apparecchiatura attualmente sviluppata è in grado di prevedere la conducibilità termica della glicerina, utilizzata come sostanza di prova, con sufficiente accuratezza, ma l'applicazione a miscele di Sali fusi richiederà ulteriori studi ed una analisi più accurata dei dati che faccia uso anche delle temperature misurate a diverse distanze radiali dal filo scaldante.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Bauer, T. and Breidenbach, N., Overview of Molten Salt Storage Systems and Material Development for Solar Thermal Power Plant, Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain, 2012.
- [2] Breidenbach, N., Bauer, T., Laing, D. and Tamme, R., Assessment and development of molten salt storage and heat transfer fluids for solar thermal power plants and industrial processes, World Engineers' Convention, Geneva, Italy, 2011.
- [3] Bauer, T., Laing, D. and Tamme, R., Characterization of Sodium Nitrate as Phase Change Material, International Journal of Thermophysics 33, pp. 91-104, 2012 .
- [4] Bauer, T., Pflieger, N., Breidenbach, N., Eck, M., Laing, D. and Kaesche, S., Material Aspects of Solar Salt for Sensible Heat Storage, Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain, 2012.
- [5] Bauer, T., Laing, D. and Tamme, R., Recent Progress in Alkali Nitrate/Nitrite Developments for Solar Thermal Power Applications, Molten Salts Chemistry and Technology, MS9, Trondheim, Norway, 2011.
- [6] Stern, H.K., High Temperature Properties and Thermal Decomposition of Inorganic Salts with Oxyanions, CRC-Press, 2001.
- [7] G. Labudová and V. Vozárová, Uncertainty of the thermal conductivity measurements using the transient hot wire method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 67 (2002) 257–265
- [8] C A Nieto de Castrot, J C G Caladot, W A Wakehami and M Dix, An apparatus to measure the thermal conductivity of liquids, Journal of Physics E: Scientific Instruments 1976 Volume 9, 1072
- [9] J.S. Powell, An instrument for the measurement of the thermal conductivity of liquids at high temperatures, Meas. Sci. Technol. 2 (1991)111-117.

**Curriculum scientifico del gruppo di lavoro
del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente dell'Università "La Sapienza" di Roma**

Prof. Alessandra Adrover

Alessandra Adrover is Associate Professor of Chemical Engineering at the Department of Chemical Engineering of Sapienza University of Rome, since 2000. She graduated in Chemical Engineering at Sapienza U. in 1994. She took the PhD in Chemical Process Engineering from Sapienza U. in 1997. She is a member of the committee for the PhD program in Chemical Process Engineering of La Sapienza University of Rome. Three PhD theses completed as advisor, and one in progress. She teaches undergraduate and graduate courses in Chemical Engineering at the Faculty of Civil and Industrial Engineering, Sapienza University of Rome. She is a member of the International Center for Chaos and Fractals in Chemical Engineering. She organized several national and international conferences CFIC 96, Roma, September 1996; Fractals in Engineering V, June 2005, Tours, Francia; Workshop on Model Reduction in Reacting Flow, september 2007, Roma. She has chaired or co-chaired a number of international workshops or mini-symposia. He gave seminars and invited lectures at Rutgers University, University of North Dakota, Purdue University, New Jersey Institute of Technology, INRIA Rocquencourt. She is referee for several international journals such as Industrial & Engineering Chemistry, Langmuir, Chemical Engineering Journal, Physica D, Journal of Membrane Science, International Journal of Hydrogen Energy, Chemical Engineering Science. In the last 20 years she has published 100 research papers in international journals of chemical engineering, fluid mechanics, applied mathematics, computational physics. Citation record : 740 citations, h-factor 15. Research interests : Stochastic approach to transport in liquid-solid systems. Lattice methods for transport phenomena in heterogeneous systems Modelling and optimization of bioseparation processes. Renormalization methods for rigorous analysis of transport phenomena in graph systems and fractal structures. Reduction methods for PDEs Reacting flows, simplification and reduction of complex kinetics. Fluid-solid non-catalytic reactions. Modeling of hydrogen transport in palladium membranes. Laminar Mixing theory. Transport processes in microflows. Laminar boundary layer theory.