VARIAZIONI NEL DOMINIO SPAZIALE E TEMPORALE: REGIME VARIABILE ①

Costanza in τ e uniformità nello spazio.
Consideriamo l'equazione di bilancio termico:

$$\sum q + q_G = mc\,\frac{(t_f - t_i)}{\Delta\tau}$$

q_G: generazione interna

Si nota la non stazionarietà del sistema:

$$\sum q + q_G = mc\,\frac{dt}{d\tau}$$

$\frac{dt}{d\tau} \neq 0$ non come nel caso di regime stazionario

Bisogna tener conto di variazioni
→ nel dominio dello spazio
→ nel dominio del tempo.

Si affronta il problema con una discretizzazione nel tempo e nello spazio:

$$t = f(\text{spazio}, \text{tempo})$$

Vengono opportunamente scelti dei punti nello spazio e nel tempo. Utilizzando il metodo dei volumi di controllo si discretizza il sistema e si considera un elemento dove varrà:

$$\sum Q = mc\,(t_f - t_i)$$

In realtà:

$$\sum Q + Q_G = mc\,(t_f - t_i)$$

→ al tempo τ
→ al tempo $\tau + \Delta\tau$

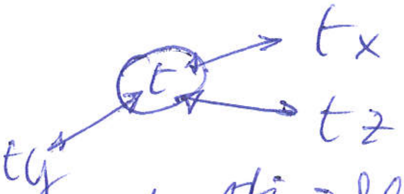
Dove Q → flussi termici vari
$\Delta\tau$ → intervallo di tempo considerato.

Possiamo scrivere:

$$\sum q \,\Delta\tau + q_G \,\Delta\tau = mc\left(t_{\tau+\Delta\tau} - t_\tau\right)$$

dove possiamo considerare la generazione interna q_G legata all'effetto Joule.

Consideriamo l'elemento scelto ad una temper. t e altri elementi con temper. diverse t_j:



Otteniamo tutti i flussi termici esprimibili ma al momento non calcolabili. Si ottiene un sistema lineare che, una volta risolto, fornisce il quadro termico nell'insieme. Si ottiene:

$$\sum f\left(t_{elemento},\, t_{\substack{elementi\\circostanti}}\right)\Delta\tau + q_G\,\Delta\tau = mc\left(t_{\tau+\Delta\tau} - t_\tau\right)$$

temperature elementi incogniti adiacenti

* temperature legate a elementi noti date dalle condit. al contorno.

Problema: avendo a che fare con scambi radianti abbiamo in gioco T^4 $\Rightarrow$ problema non lineare.

Potremmo considerare $t_{elemento} = \dfrac{t_{\tau+\Delta\tau} + t_\tau}{2}$.

Dovendo procedere per istanti successivi possiamo considerare intervalli infinitesimi $d\tau$ (simulazione tanto più accurata quanto più piccolo $d\tau$).

$T^4 \rightarrow$ linearizzazione non possibile in campo spaziale poichè ci sono alte ΔT.
Per ovviare a questo problema si precalcolano le T sulla base delle T precedenti. Di conseguenza la scelta di t_τ diventa fondamentale nel caso di T non lineari.
Consideriamo l'elemento a temperatura t e gli elementi vicini a temperatura t_j. Si vuole determinare queste temperature. Anche se matematicamente corretto non è possibile considerare $d\tau$ infinitesimi. Per calcolare t e t_j vi sono 2 metodi:

- METODO ESPLICITO (τ)
- METODO IMPLICITO ($\tau + \Delta\tau$)

METODO ESPLICITO:
Riferisce le temperature incognite al tempo τ:

$$(t - t_j)_\tau$$

Si ottiene come unica incognita la temperatura $t_{\tau+\Delta\tau}$. Ragionando elemento x elemento è un metodo semplice però si perde in stabilità del modello complessivo.

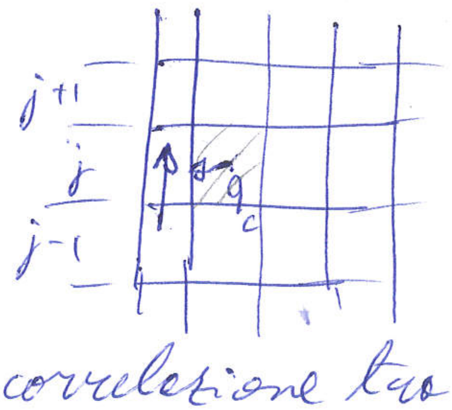
METODO IMPLICITO:
Riferisce la temperatura al tempo futuro $\tau + \Delta\tau$:

$$(t - t_j)_{\tau+\Delta\tau}$$

Le incognite diventano più numerose e non basta una sola equazione. Necessario un sistema di equazioni, tante quanti sono gli elementi considerati

n equazioni in n incognite.
In questo modo si tiene conto delle variazioni nel tempo della t dell'elemento considerato e di quello che gli sta intorno.
Problema di stabilità quando q_G è grande o m è piccola.
Questo metodo prevede input legati al tempo τ per precalcolare le temperature t e t_j.
Per evitare di avere sistemi non lineari si considera il metodo esplicito x calcolare delle temperature che poi vengono utilizzate nel metodo implicito.
∃ quindi METODI IBRIDI tra metodo implicito ed esplicito.

THERMAL LOOP IN REGIME VARIABILE
Occorre considerare termodinamica e teoria scambiatori di calore.
Metodo dell'efficienza.
Consideriamo una piastra e un fluido a contatto con essa. Il fluido entra in contatto con tutti gli elementi della piastra discretizzata.



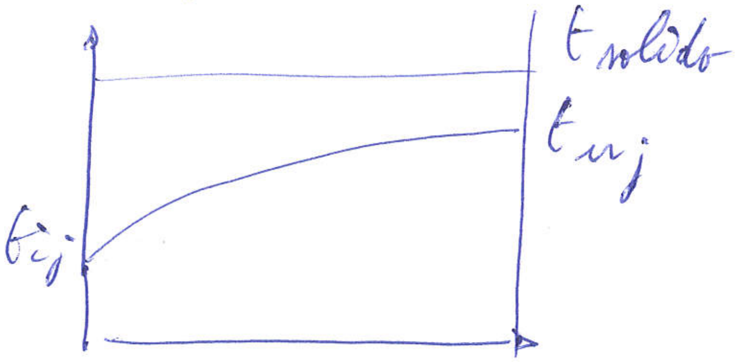
Si discretizza anche il fluido per ottenere una correlazione tra fluido ed elemento della piastra.

Discretizzazione spaziale è fondamentale: è necessario creare connessioni tra elementi della discretizzazione.

Si scrive l'equazione di bilancio termico del fluido di cui bisogna conoscere la portata; inoltre in regime transitorio avrà un termine legato all'energia interna:

$$q_C = m_f c_p (t_{uj} - t_{ij}) + \underbrace{M_j c_v \frac{(t_{\tau+\Delta\tau} - t_\tau)_j}{\Delta\tau}}_{\Delta U_i/\Delta\tau} \quad (A)$$

È una situazione del tipo:



Possiamo scrivere quindi il flusso termico come:

$$q_C = \varepsilon m_f c_p (t_{ij} - t_{SOLIDO}) \quad (B)$$

Possiamo scrivere anche per ε: $\varepsilon = 1 - e^{-\left(\frac{KA}{m_f c_p}\right)}$

La prima equazione è quella del solido:

$$(I) \quad \Sigma q + q_G = mc\,(t_{SOLIDO\,\tau+\Delta\tau} - t_{SOLIDO\,\tau})$$

La seconda equazione è quella tra fluido e solido

(A) = (B)

$$\varepsilon m_f c_p (t_{ij} - t_{SOLIDO}) = m_f c_p (t_{uj} - t_{ij}) + M_j c_v (t_{\tau+\Delta\tau} - t_\tau)_j / \Delta\tau$$

Questo schema vale a rigore x $\Delta\tau$ infinitesimi.

I termini $t_{\tau+\Delta\tau}$ e t_τ sono incognite.

Come prima ipotesi si può ritenere che t_τ sia la media tra t_i e t_u → $t_\tau = \frac{t_i + t_u}{2}$

Per ridurre il numero di incognite ipotizziamo che la temp. di uscita da un elemento diventi quella di ingresso dell'elemento successivo:

III $t_{i(j)} = t_{u(j-1)}$ EQUAZ. DI CONGRUENZA.

Abbiamo quindi 3 equazioni nelle 3 incognite t_{ij}, t_{uj} e t_{SOLIDO}.

I collegamenti che abbiamo nel thermal loop li consideriamo adiabatici, altrimenti il problema potrebbe essere complesso e non più lineare.

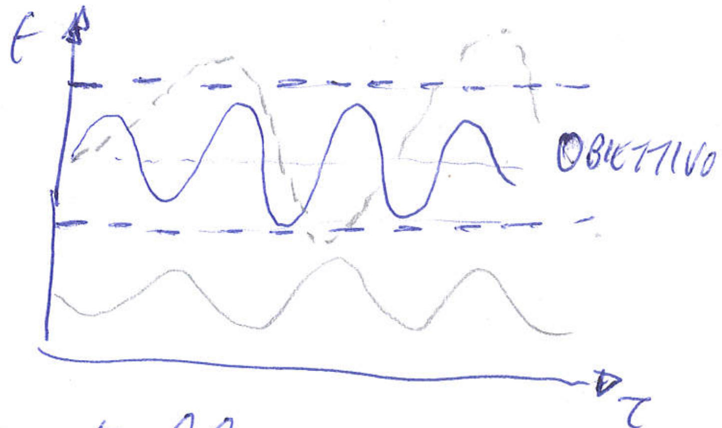
PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)

I modelli trattati vengono usati per fare diverse simulazioni: si parte da una condizione nota e ci si sposta nel tempo.
La condizione nota vera e propria è quella dello spacecraft sulla rampa di lancio.
Si esaminano poi le variazioni in relazione ai range considerati e si decide se e come intervenire.
La CORREZIONE è legata a due parametri (aspetti):

1- PARAMETRI PROGETTUALI: portata di fluido, dimensioni del radiatore, proprietà superficiali dei materiali, ecc.).

2- COMPORTAMENTO DEL SISTEMA: questo è più complesso.

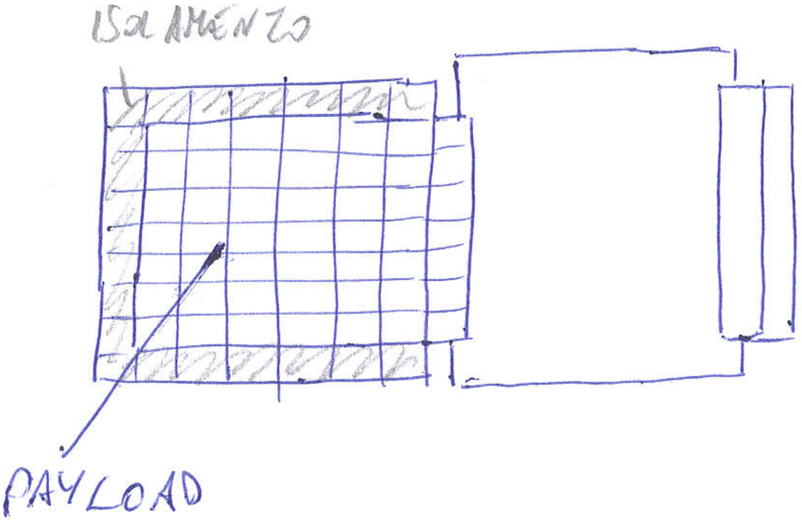
Ci possono essere diverse situazioni con diversi profili di temperatura



Comportamenti diversi. Possono essere accettabili o meno a seconda del range di temperatura considerato. Alcuni valori potrebbero uscire dal range occasionalmente.
E' importante allora considerare le oscillazioni di temperatura. Per stabilizzarle si potrebbe ricorrere all'inerzia termica.

Nello spazio è più utile lavorare con i PCM. → permettono il cambiamento di fase mantenendo nel frattempo la temperatura costante per la regola delle fasi con pressione costante.

Si prendono in considerazione le parti in cui si vuole controllare la temp. e regolarla x mantenerla costante e si colloca uno strato di PCM in buon contatto termico con il carico considerato.



(Si poteva anche considerare il caso con thermal finger)

Il modello adesso è più complesso e sarà necessario discretizzare anche il materiale aggiuntivo per poi scrivere le equazioni di bilancio per ogni elemento del PCM.

Scriviamo il 1° P.D.T. come segue:

$$\Sigma q + q_g = m \frac{(u_{i,\tau+\Delta\tau} - u_{i,\tau})}{\Delta\tau}$$

↳ ∄ flussi di generazione interna nei PCM

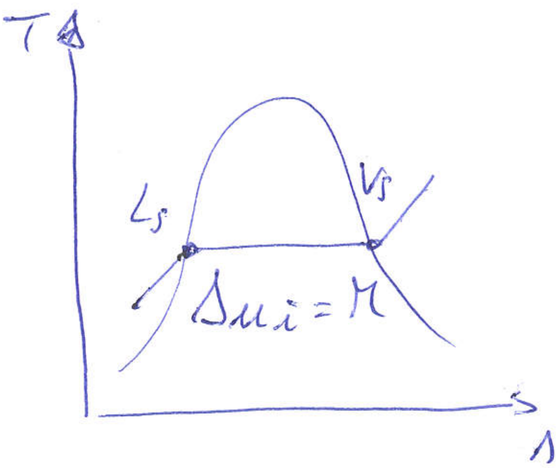
↳ Σf (t elemento, t elementi adiacenti)

Inoltre non ci sono normalmente né portate di massa né lavoro. Quindi:

$$\sum q = m \frac{(u_{i,\tau+\Delta\tau} - u_{i,\tau})}{\Delta\tau}$$

Abbiamo lasciato Δ energia interna poiché per i materiali con cambiamento di fase non si considera il calore specifico per la temperatura.

Consideriamo le variazioni di fase liquido - vapore:



La variazione di en. interna ΔU_i viene espressa considerando il calore latente r visto che la temperatura rimane costante durante il cambiamento di fase liquido - vapore (da Ls a Vs).

Dobbiamo anche vedere il titolo, dal momento che il calore scambiato sarà in generale una frazione del calore totalmente disponibile per passare da Ls a Vs (r): $x = \frac{m_v}{m_v + m_e}$

Distinzione tra materiali quindi:

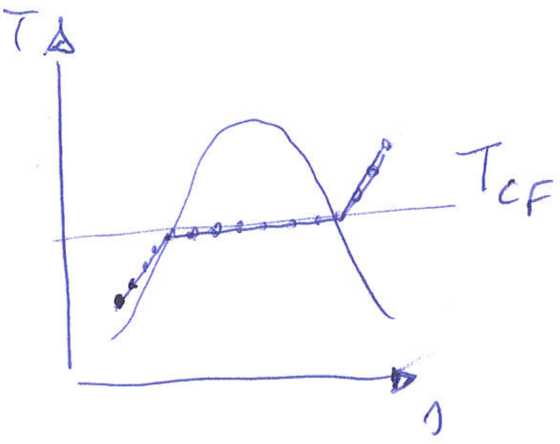
- Senza cambiamento di fase: ① $\sum q = mc \frac{(t_{\tau+\Delta\tau} - t_\tau)}{\Delta\tau}$
- Con cambiamento di fase: ② $\sum q = m r \frac{(x_{\tau+\Delta\tau} - x_\tau)}{\Delta\tau}$

Il PCM viene discretizzato per tenere conto dei cambiamenti nel tempo e nello spazio che si hanno.

Nei materiali a cambiamento di fase si può cambiare da solido a fluido o da fluido a fluido.

Consideriamo che all'interno degli elementi della discretizzazione il fluido non si muova e si ha quindi solo conduzione e non convezione.

Ipotizziamo dunque che il nostro payload si stia scaldando e consideriamo la curva di Andrews (L-V):



T_{CF} = temperatura di cambiamento di fase.

Supponiamo che il nostro materiale non abbia ancora cambiato fase $T < T_{CF}$.

In questo caso si considera l'equazione ① valida per scambio di calore monofase.

Quando si è in prossimità di T_{CF} occorre variare la scala temporale (e quindi $\Delta\tau$) nella equazione ①

NB: T_{CF} rappresenta la temperatura massima accettabile nel payload.

Ipotesi: modo x modo vi sia variazione lineare di temperatura.

Consideriamo quindi: $T_1 \longrightarrow T_{2\,errata}$

$$\underset{\Delta\tau}{\longleftrightarrow}$$

Cioè passiamo da una T a un'altra non accettabile nell'intervallo di tempo $\Delta\tau$. Se questo non va bene occorre considerare uno step $\Delta\tau'$ dato da:

$$\Delta\tau' = \Delta\tau \, \frac{T_{CF} - T_1}{T_{2\,errata} - T_1}$$

Otteniamo quindi: $T_1 \longrightarrow T_{2\,giusta} \ (\cong T_{CF})$

$$\underset{\Delta\tau'}{\longleftrightarrow}$$

La nuova temperatura che otteniamo è circa T_{CF}.
La base dei tempi è una scelta arbitraria e non serve che sia costante.
Nel momento in cui la temperatura raggiunge T_{CF} è necessario cambiare equazione $\Rightarrow$ iniziamo a considerare l'equazione ②.
Con l'andare del tempo il liquido diventerà sempre più vapore restando alla temperatura di cambiamento di fase T_{CF}.
Se la generazione di calore è concentrata in una zona il PCM cambierà di fase in tempi diversi e in punti diversi.

Lo step temporale che viene considerato serve per regolare il cambio di fase fra gli elementi che cambiano fase in tempi diversi.

Considerando il cambiamento di titolo si nota che la temperatura del materiale rimane stabile e frena l'aumento di temperatura del payload.
Se il payload continua a emettere calore, il fluido aumenterebbe il titolo fino ad arrivare alla condizione $x = 1$ sulla curva di Andrews per la T_{CF} considerata. Da qui in poi si torna a un problema di tipo monofase (equazione ① ma con c diverso).
Quindi la T tenderebbe di nuovo a salire.
In un problema 2-D potremmo avere zone con un tipo di fase (quelle più vicine al payload) ed altre con cambiamento di fase.
In ogni caso T_{CF} rappresenta la T di progetto e non vogliamo superarla, quindi dobbiamo lavorare con $x < 1$ (ossia $0 \leq x \leq 1$).
Se si considerano cambiamenti S-L si definisce un parametro con fusione analogo a x.

T_{CF} è scelta per essere vicina a $T_{OBIETTIVO}$.