



Università di Pisa
Dipartimento di Energetica *Lorenzo Poggi*

Sul controllo termico di dispositivi miniaturizzati mediante circuiti bifase a circolazione naturale

Dott. Ing. Giacomo Salvadori

Tesi di dottorato in Energetica Elettrica e Termica

Curriculum: sistemi ed apparati termici

Ciclo di dottorato: 2004-2006

Tutore:

Prof. Ing. Enrico Latrofa

Pres. corso di Dottorato:

Prof. Ing. Claudio Casarosa

... a Debora
ed al mio amico Ale,
che ci guarda da Lassù

Indice

Sommario	4
Nomenclatura	7
<u>1. Introduzione</u>	9
1.1 Motivazioni del presente lavoro	9
1.2 Termosifoni bifase a funzionamento periodico	17
1.3 Conclusioni	23
Parte A: analisi numerica	24
<u>2. Modelli matematici per circuiti bifase operanti con pulsazioni stabilizzate del fluido vettore: stato dell'arte</u>	25
2.1 Modelli matematici con analisi esclusivamente cinematica	26
2.2 Modelli matematici con analisi semi-empirica	32
2.3 Modelli matematici con analisi tramite equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia	36
2.4 Conclusioni	50
<u>3. Un modello matematico per l'interpretazione del comportamento di un PTPT</u>	52
3.1 Caratteristiche generali del modello matematico	54
3.2 Descrizione della fase di trasporto	55
3.3 Descrizione della fase di ritorno	63

3.4 Validazione del modello matematico	66
3.5 Caratteristiche dell'indagine numerica	70
3.6 Risultati ottenuti	71
3.7 Conclusioni	78
Parte B: analisi sperimentale	80
4. <u>L'apparato utilizzato per rilievi sperimentali</u>	81
4.1 Il prototipo di PTPT	83
4.1.a L'evaporatore	85
4.1.b Il condensatore	89
4.1.c L'accumulatore	90
4.1.d Le linee di collegamento tra gli organi principali	92
4.2 La strumentazione per rilievi sperimentali	93
4.2.a Il sistema di alimentazione	94
4.2.b Il sistema di misura ed acquisizione dati	95
4.2.c Lo strumento per rilievi termografici nell'infrarosso	97
4.3 Conclusioni	99
5. <u>Caratterizzazione del funzionamento di un PTPT di piccola scala</u>	100
5.1 Caratterizzazione del ciclo a regime periodico stabilizzato	102
5.2 Caratterizzazione del funzionamento al variare del flusso termico specifico dissipato	108
5.3 Confronto operativo con un prototipo del tipo "a decremento di pressione"	117
5.4 Caratterizzazione del funzionamento al variare della quota relativa tra le sorgenti di scambio termico	119
5.5 Confronto operativo con un prototipo di termosifone bifase a funzionamento stazionario	124
5.6 Caratterizzazione del funzionamento al variare della quantità di fluido vettore circolante	128
5.7 Confronto prestazionale tra il prototipo di PTPT ed alcuni dispositivi di tipo commerciale	131
5.8 Conclusioni	139

6. <u>Analisi dello scambio termico in regime periodico all'interno dell'evaporatore</u>	141
6.1 Analisi teorica delle prestazioni di scambio termico di evaporatori operanti in regime periodico	144
6.2 Analisi qualitativa delle prestazioni di scambio termico, sperimentalmente osservate per l'evaporatore di un PTPT	149
6.3 Determinazione del coefficiente di scambio termico variabile periodicamente nel tempo	152
6.4 Impiego della termografia nella stima del coefficiente di scambio termico variabile periodicamente nel tempo	158
6.5 Interpretazione dei risultati ottenuti	164
6.6 Conclusioni	168
7. <u>Considerazioni conclusive</u>	170
7.1 Considerazioni sull'attività numerica	171
7.2 Considerazioni sull'attività sperimentale	172
Appendici	175
I. Principali proprietà termofisiche dei fluidi vettori utilizzati nel lavoro	175
II. Principali caratteristiche costruttive dei dissipatori termici commerciali testati	180
III. Apparato sperimentale per lo studio dell'ebollizione stazionaria in evaporatori di ridotte dimensioni	182
Lista delle figure e tabelle	186
Riferimenti bibliografici	193
Ringraziamenti	201

Sommario

L'attività di ricerca illustrata in questo lavoro è stata svolta dall'autore presso il Dipartimento di Energetica *Lorenzo Poggi* dell'Università di Pisa, nell'ambito del corso di Dottorato in Energetica Elettrica e Termica.

Tale attività riguarda la tematica generale dell'impiego di circuiti bifase a circolazione naturale come sistemi di controllo termico per apparati di piccola scala. I settori applicativi principalmente indicati per l'impiego di questi dispositivi, come dimostrato dalla letteratura tecnico-scientifica, risultano essere il settore delle telecomunicazioni e quello della componentistica elettronica.

In questi settori, la riduzione delle dimensioni dei dispositivi di raffreddamento presenta problemi non ancora risolti, quali ad esempio: il notevole incremento delle perdite di carico nei condotti dei tradizionali circuiti bifase, la necessità di ricorrere a complessi e costosi promotori di effetto capillare per la circolazione del fluido vettore ed infine l'incremento delle resistenze termiche fortemente dipendente dalla disposizione delle sorgenti di scambio rispetto al campo gravitazionale.

L'impiego delle matrici porose nei circuiti bifase, in taluni casi può costituire un limite fisico per i diametri da utilizzare nella realizzazione dei circuiti stessi, ed in ogni caso presenta costi elevati di fabbricazione.

Le tecniche di raffreddamento sfruttanti dispositivi privi di esse, quali ad esempio i termosifoni a circuito chiuso operanti in regime stazionario oppure in regime periodico, presentano importanti prospettive di utilizzo in alternativa ai tradizionali tubi di calore.

L'utilizzo di termosifoni per raffreddare apparecchiature con ingombri contenuti tuttavia può presentare problemi di circolazione del fluido vettore, in particolare nei

casi in cui si operi con dislivelli minimi tra le sorgenti di scambio termico, oppure nei casi in cui le perdite di carico del circuito risultino particolarmente elevate.

In queste specifiche condizioni i circuiti bifase a circolazione non stazionaria del fluido vettore, quali i pulsating heat pipes oppure i termosifoni a funzionamento periodico, possono presentare vantaggi di impiego. Infatti essi risultano in grado di generare la circolazione del fluido vettore senza vincolare la disposizione spaziale delle sorgenti di scambio termico. Tale circolazione viene garantita anche in presenza di circuiti con elevate perdite di carico.

La caratterizzazione del funzionamento di pulsating heat pipes di piccola scala è stata oggetto di analisi da parte di vari gruppi di ricerca. Al contrario, gli studi condotti sui termosifoni bifase a funzionamento periodico risultano effettuati esclusivamente su apparati di notevoli dimensioni e con elevati valori delle potenze termiche smaltite.

Questo lavoro si pone dunque come obiettivo generale quello di verificare la reale attitudine dei termosifoni bifase a funzionamento periodico (indicati con l'acronimo PTPT) ad essere impiegati nel controllo termico di apparati di piccola scala.

Il lavoro si compone di due sezioni principali: una a carattere numerico ed una a carattere sperimentale. Le due sezioni sono precedute da una breve introduzione (capitolo 1) riguardante i principi di funzionamento del PTPT e sono seguite dalle considerazioni conclusive sull'attività svolta (capitolo 7).

Nella sezione numerica viene approfondita la conoscenza del comportamento del PTPT, attraverso la realizzazione di un modello di calcolo per l'interpretazione e la previsione delle sue prestazioni. Per realizzare tale modello è stata effettuata una ricerca bibliografica che ha permesso di esaminare e classificare le principali tecniche di modellizzazione dei dispositivi bifase operanti con pulsazioni stabilizzate del fluido vettore. I risultati di tale ricerca sono illustrati nel capitolo 2.

Il modello matematico realizzato si fonda sulla scrittura e risoluzione delle equazioni di bilancio applicate ad opportuni volumi di controllo, esso viene descritto nel capitolo 3. Il modello in questione è stato validato attraverso il confronto con una serie di dati sperimentali disponibili presso il Dipartimento di Energetica *Lorenzo Poggi* ed ottenuti per un PTPT di grandi dimensioni. Successivamente è stata condotta un'indagine numerica volta a caratterizzare le prestazioni di un PTPT al variare dei principali parametri operativi, in particolare: potenza termica dissipata e temperature delle sorgenti di scambio. Essa è riportata ancora nel capitolo 3.

Nella sezione sperimentale viene invece effettuata una caratterizzazione teorico-sperimentale di un prototipo di PTPT di piccola scala, progettato e realizzato durante

la presente attività di ricerca. Nel capitolo 4 viene descritto il prototipo di PTPT e l'apparato completo, utilizzato per i rilievi sperimentali. Nel capitolo 5 viene invece effettuata la caratterizzazione delle prestazioni del prototipo al variare dei seguenti parametri operativi: flusso termico specifico dissipato, quota relativa tra le sorgenti di scambio termico, quantità di fluido vettore circolante. Inoltre è stato svolto un confronto di prestazioni tra il prototipo di PTPT ed alcuni dispositivi di controllo termico di impiego commerciale. Un ulteriore confronto prestazionale è stato condotto tra il PTPT ed altri due prototipi di termosifone bifase, uno a circolazione stazionaria ed uno a circolazione non stazionaria ottenuta con una differente tecnica rispetto al prototipo di PTPT oggetto della caratterizzazione.

Infine sono state evidenziate le principali differenze di funzionamento legate alla forte riduzione di scala, operata sul prototipo, rispetto ai PTPT testati prima del presente lavoro.

Al fine di fornire criteri riguardo all'ottimizzazione delle dimensioni e della forma dell'evaporatore di un PTPT (organo a diretto contatto con il componente da raffreddare), nel capitolo 6 sono state analizzate le condizioni di scambio termico all'interno dell'evaporatore del prototipo testato. Tali condizioni risultano variabili periodicamente nel tempo, di conseguenza è stata messa a punto una tecnica per la stima indiretta del coefficiente di scambio termico variabile nel tempo. Le tendenze osservate per il coefficiente di scambio sono state interpretate e commentate. Per fornire tale interpretazione si è resa necessaria: una serie di prove sperimentali, condotte con un apparato opportunamente realizzato per lo studio dell'ebollizione di massa in pozze liquide di piccolo volume, ed una serie di confronti con le prestazioni di scambio termico osservate da altri ricercatori per l'ebollizione di massa, in condizioni stazionarie, in condizioni transitorie ed in presenza di effetti di confinamento.

Nomenclatura

Di seguito viene riportata la lista dei principali simboli impiegati nel lavoro. A meno di differente esplicita indicazione, le grandezze che compaiono nella lista si intendono valutate nel sistema di misura SI.

ACRONIMI

CHF	flusso di calore specifico critico
COP	coefficiente di effetto utile
CPL	capillary pumped loop
HP	tubo di calore
LHP	loop heat pipe
LTPT	termosifone bifase a circuito chiuso
PHP	pulsating heat pipe
PTPT	termosifone bifase a funzionamento periodico
TPT	classico termosifone bifase

SIMBOLI

A	superficie
C	capacità termica

c_p	calore specifico a pressione costante
c_v	calore specifico a volume costante
D	diametro
d	diametro
f	coefficiente d'attrito
g	accelerazione gravitazionale
H	quota
h	coefficiente di scambio termico
h_{fg}	calore latente di evaporazione
i	entalpia specifica
L	lunghezza
m	massa
m'	portata massica
P	pressione
Q'	potenza termica
q'	potenza termica specifica

R	resistenza termica	S	saturazione
\bar{R}	rapporto tra costante universale dei gas e peso molecolare	tot	totale
S	superficie	v	vapore
T	temperatura	W	parete
t	tempo		
U	coefficiente di scambio termico globale		
V	velocità		
Vol	volume		
V_T	volume di liquido trasferito		

NUMERI ADIMENSIONALI

Bi	numero di Biot
Bo	numero di Bond
Ka	numero di Karman
Re	numero di Reynolds
Pr	numero di Prandtl
Ja	numero di Jakob
Ku	numero di Kutateladze
Nu	numero di Nusselt

SIMBOLI dell'alfabeto greco

λ	conducibilità termica
λ_T	lunghezza libera di Taylor
μ	viscosità dinamica
ρ	densità
σ	tensione superficiale
τ_c	tempo di ciclo
τ_t	tempo di trasporto
τ	tempo adimensionalizzato
Φ	coefficiente di riempimento

PEDICI

A	accumulatore
C	condensatore
E	evaporatore
env	ambiente
f	sorgente fredda
l	liquido
LC	linea di collegamento
m	sorgente intermedia
r	ritorno