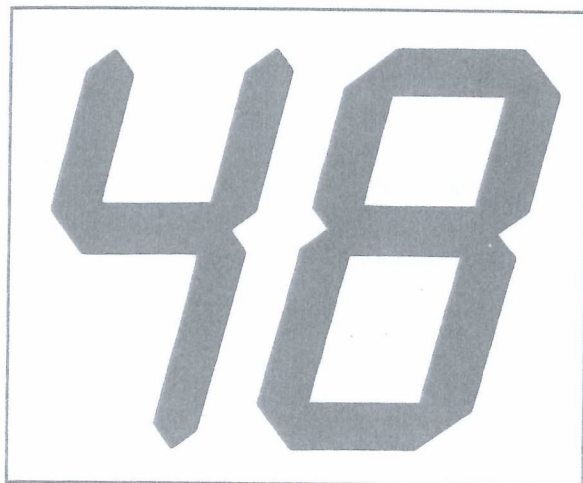


48° congresso nazionale ATI

taormina 28 settembre - 1 ottobre 1993



atti del congresso

estratto

vol. II

**associazione
termotecnica
italiana**

SGE DITORIALI
PADOVA

DISSIPAZIONE DEL CALORE IN UN AMPLIFICATORE DI POTENZA VHF

F. Cotana¹ - G. Moncada Lo Giudice² - F. Rossi¹

¹ Istituto di Energetica - Università degli Studi di Perugia - Perugia

² Dipartimento di Fisica Tecnica - Università di Roma "La Sapienza" - Roma

Riassunto: I segnali elettromagnetici per trasmissione radiotelevisive sono irradiati attraverso sistemi ai quali viene richiesto un eccezionale livello di affidabilità. Fra i componenti di tali sistemi, un posto delicato è occupato dagli amplificatori a radiofrequenza i quali, dal punto di vista dell' affidabilità, possono rappresentare un punto critico della catena di trasmissione. Assume, pertanto, un particolare rilievo lo studio delle modalità di dissipazione del calore attraverso i componenti elettronici: se si riesce a migliorare le condizioni di scambio termico, la temperatura di esercizio T si abbassa e migliora l' affidabilità del dispositivo. E' noto, infatti, che il legame fra temperatura di esercizio e il tempo di vita medio di un dispositivo elettronico è di tipo esponenziale; un decremento anche modesto di T conduce ad importanti incrementi del tempo di vita medio. In un precedente lavoro [1] si era analizzato il campo termico di un transistor di potenza TMOS-FET, pervenendo a conclusioni significative per l' ottimizzazione dell' architettura del transistor stesso. Nel presente lavoro si considera un' intero apparato che utilizza 8 transistors del tipo già studiato in [1] al fine di verificare se sia perseguibile un miglioramento delle condizioni di dissipazione del calore, attraverso modifiche della disposizione dei transistors. A tale scopo un programma di calcolo, basato sulla tecnica degli elementi finiti, consente di effettuare la simulazione del campo termico presente nel dispositivo. Un' indagine sperimentale effettuata con la tecnica della termovisione ha permesso, inoltre, di confrontare i risultati della simulazione con i risultati delle misure sull' apparato reale e verificare i modelli teorici. In fine, è stata modificata la disposizione dei transistor sulla piastra allo scopo di diminuire la loro temperatura di esercizio; le simulazioni del campo termico, in tal caso, mostrano un decremento di circa 4 K della temperatura delle flangie dei transistor che equivale ad un decremento di circa 3 K della temperatura delle giunzioni [1]. Ammettendo la validità della relazione di Arrhenius il tempo di vita medio dei componenti per tale configurazione risulta circa il 15 % superiore a quello dei transistors nella configurazione originaria.

1. Scopo del lavoro

I segnali elettromagnetici per trasmissione radiotelevisive sono irradiati attraverso sistemi ai quali viene richiesto un eccezionale livello di affidabilità. Fra i componenti di tali sistemi, un posto delicato è occupato dagli amplificatori finali a radiofrequenza i quali, dal punto di vista dell' affidabilità, possono rappresentare un punto critico della catena di trasmissione. Questi amplificatori sono oggi realizzati con dispositivi allo stato solido e devono dissipare potenze termiche specifiche assai elevate, alle quali corrispondono, in virtù delle limitate dimensioni del dispositivo, flussi termici ancor più elevati. Si può ritenere che, nelle piastri di Silicio con

le quali sono realizzati i transistor, si debbano raggiungere, per dissipare il calore prodotto, flussi termici dell' ordine di 10 Watt per millimetro quadrato di superficie della piastrina. Accade allora che, per poter smaltire tale flusso, la temperatura della piastrina si innalza fino a valori che incidono sulle caratteristiche di affidabilità dell' apparecchiatura. Si ricorda, infatti, che il tempo di vita medio di un dispositivo elettronico diminuisce all' aumentare della temperatura di lavoro delle giunzioni; indicativamente si può ipotizzare la validità del modello di Arrhenius, secondo il quale si ha un legame di tipo esponenziale fra il tempo di vita medio e la temperatura, espresso dalla relazione [2],[3]:

$$t_v = C e^{E_g/KT} \quad (1)$$

dove C è una costante indipendente dalla temperatura. Assume, pertanto, un particolare rilievo lo studio delle modalità di dissipazione del calore attraverso i componenti elettronici: se si riesce, in qualche modo, a migliorare le condizioni di scambio termico, la temperatura di lavoro T si abbassa e migliora l' affidabilità del dispositivo. Si osservi, inoltre, che essendo il legame di tipo esponenziale, è sufficiente un decremento anche modesto di T per ottenere importanti incrementi del tempo di vita medio. In un precedente lavoro [1] si era analizzato il campo termico del singolo transistor, pervenendo a conclusioni significative per l' ottimizzazione dell' architettura del transistor stesso. Nel presente lavoro si considera invece tutto l' amplificatore, al fine di verificare se sia perseguibile un miglioramento delle condizioni di dissipazione del calore attraverso modifiche della disposizione dei singoli componenti.

2. Descrizione dell' apparato

L' apparato è costituito da un amplificatore per segnali radio con frequenza compresa nella banda 150 - 300 MHz ed è impiegato principalmente in stazioni trasmettenti o in ponti radio ripetitori. Il funzionamento dell' amplificatore avviene in modo continuo, eccezion fatta per le normali operazioni di manutenzione. La potenza dissipata dipende dalle condizioni elettriche di polarizzazione dei transistor e dall' adattamento della linea d' antenna; può raggiungere in particolari condizioni il valore massimo di circa 2320 W. In figura 1 si riporta una fotografia dell' intero sistema, che risulta costituito dai seguenti componenti:

- a) multiplexer, dispositivo posto nello stadio d' ingresso dell' apparato;
- b) otto Singoli Stadi di Amplificazione (SSA). Ogni SSA è composto dai seguenti componenti:
 - b1) il transistor BLV33F, impiegato come preamplificatore, potenza massima dissipata 40W;
 - b2) il doppio transistor TMOS-FET, potenza massima dissipata 200 W [1];
 - b3) quattro resistenze con potenza massima dissipata di 0.25 W, 4 condensatori, 4 induttanze, 2 diodi;
 - b4) basetta in vetronite delle dimensioni 70x200 mm e dello spessore di 1.6 mm. Sulla basetta è stato ricavato un circuito stampato, costituito da conduttori in rame stagnato.
- c) circuito sommatore o "Mixer", collegato con l' uscita dell' amplificatore e con gli otto SSA;
- d) piastra di Alluminio, sulla quale sono ancorati i vari SSA; la piastra presenta nel suo interno una cavità entro cui viene fatta circolare acqua alla temperatura d' immissione di circa 23 °C.

2.1. Circuito elettrico.

Un unico componente elettronico allo stato solido non è in grado di erogare potenze superiori a 0.7-0.8 KW; l' amplificatore, a tal proposito, viene dotato di un particolare dispositivo (a), atto a suddividere il segnale in ingresso in otto componenti, che si diversificano fra loro in base alla fase. Le otto componenti costituiscono gli otto ingressi dei SSA (b); in ogni SSA i componenti (b1) e (b2) amplificano il segnale di ingresso generando, in uscita, segnali con potenza massima di circa 200 W; il funzionamento dei componenti (b1) e (b2) necessita di un circuito di polarizzazione e di uno di alimentazione costituiti dai componenti (b3). Le uscite degli otto SSA vengono ricombinate e sommate nel dispositivo (c) alla cui uscita è presente il segnale da inviare all' antenna del trasmettitore. In fig.2 si riporta uno schema a blocchi del circuito elettrico, che mette in evidenza il percorso fatto dal segnale e le amplificazioni a cui esso viene sottoposto.

2.2. Modalità di scambio termico

La generazione di potenza termica nell' amplificatore si verifica esclusivamente per effetto Joule e si manifesta in quei componenti percorsi da corrente elettrica: (b1), (b2) e (b3). I componenti (b3) sono disposti sulla basetta in vetronite (b4), sulla quale viene dissipato e trasmesso parte del calore che tali dispositivi generano. I componenti (b1) e (b2) sono collegati elettricamente al circuito stampato e presentano una superficie (flangia) a contatto termico e meccanico con la piastra in Alluminio. In fig.3 si riporta la posizione dei transistors sulla piastra. All' interno della lastra di alluminio acqua in circolazione forzata consente di smaltire il calore ceduto alla piastra dagli elementi dissipanti. Il costruttore dell' apparato ha fornito le condizioni di funzionamento di alcune parti dell' amplificatore:

- temperatura massima delle giunzioni nei semiconduttori dei transistors inferiore a 200 °C;
- temperatura massima delle piste del circuito stampato inferiore a 90 °C.
- portata massima del circuito di raffreddamento $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.
- portata media del circuito di raffreddamento $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

Detti vincoli debbono essere rispettati per ogni condizione di lavoro.

3. Metodo d' indagine

3.1 Ipotesi

Al fine di incrementare il calore smaltito dall' amplificatore, si studia il campo termico del dispositivo nelle normali condizioni di esercizio; a tal proposito il programma di calcolo ANSYS, basato sulla tecnica degli elementi finiti, costituisce un adeguato mezzo d' indagine [4]. Nel caso specifico il modello matematico è stato formulato in base alle seguenti ipotesi di lavoro:

- 1) il campo termico viene studiato in regime stazionario;
- 2) nella valutazione del campo termico le uniche sorgenti di calore sono gli elementi (b1) e (b2); il calore generato negli elementi (b3) è trascurabile;
- 3) le sorgenti di calore (b1) e (b2) si considerano uniformi; in ognuna di esse il flusso termico per unità di volume è esprimibile tramite la relazione:

$$\Phi = \frac{W}{V} \quad (2)$$

dove "W" è la potenza generata ed "V" il volume;

4) i coefficienti di adduzione K_f e K_e , relativi rispettivamente allo scambio termico fra piastra-acqua e piastra-aria esterna, si ritengono indipendenti dalla temperatura.

3.2 Discussione delle ipotesi

1) i valori della temperatura sono costanti dopo il transitorio termico una volta che sono fissate le condizioni di funzionamento (polarizzazione dei transistor e adattamento della linea d' antenna); si possono ritenere costanti sia i flussi termici generati nel dispositivo, sia le condizioni di circolazione dell' acqua;

2) le quattro resistenze dissipano complessivamente una potenza massima di 2 W, le quattro induttanze una potenza massima di 0.2 W stimata tramite la relazione:

$$W = I^2 \frac{\rho L}{s} \quad (3)$$

dove " ρ " la resistività del conduttore, "L" la sua lunghezza, "s" l' area della sezione e "I" la corrente che vi circola. I diodi hanno una potenza nominale massima di 0.1 W. La potenza termica complessivamente generata in ogni SSA dai componenti (b3) risulta inferiore a 3W, valore che rappresenta circa l' 1% della potenza massima dissipata nei componenti (b1) e (b2);

3) l' ipotesi è giustificata dai risultati di un precedente lavoro [1], che mostrano che il valore della temperatura sulla flangia di supporto del semiconduttore dei dispositivi (b1) e (b2) è praticamente uniforme;

4) il coefficiente di adduzione K_f è relativo ad un fenomeno di convezione forzata e quindi indipendente dalla temperatura del fluido; il coefficiente K_e contribuisce alla dispersione termica verso l' aria ambiente per valori compresi fra circa il 7 % ed il 20 % della potenza termica globalmente generata; tali valori sono stati stimati per le condizioni di dissipazione medie e massime. Un errore su K_e può considerarsi, in prima approssimazione, trascurabile.

3.3 Modello Matematico

Il modello tridimensionale si propone di valutare il campo termico sulla superficie esterna della piastra ed in particolare dove sono ancorati i transistor di potenza TMOS-FET. Una valutazione teorica della distribuzione delle temperature può essere fatta considerando il sistema di riferimento riportato in fig.3, in base al quale può essere formulata la seguente equazione differenziale [5],[6]:

$$\lambda \nabla^2 T = \sum_{i=1}^4 \frac{W_1}{a b c} \text{rect}_{a,b,c}(x-x_i, y-y_i, z-z_i) + \sum_{i=1}^4 \frac{W_2}{d e f} \text{rect}_{d,e,f}(x-x_j, y-y_j, z-z_j) \quad (4)$$

dove:

W_1 e W_2 sono le potenze generate rispettivamente nei componenti (b1) e (b2); a,b,c sono le dimensioni di (b1); λ è la conducibilità dell' alluminio; d,e,f sono le dimensioni di (b2);

$rect_{a,b,c}(x,y,z)$ una funzione di valore unitario definita nello spazio (x,y,z) avente per dominio un parallelepipedo di lati "a,b,c" e ortocentro nell' origine; (x_i,y_i,z_i) sono le coordinate dell' ortocentro del volume dell' i-esimo transistor (b1); (x_j,y_j,z_j) sono le coordinate dell' ortocentro del volume del j-esimo transistor (b2). L' equazione differenziale (4) è definita su tutto il volume dell'apparato; sulle superfici interna ed esterna della piastra valgono rispettivamente le seguenti condizioni al contorno:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = - K_f (T_{in}(x,y) - T_f) \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = - K_e (T_{out}(x,y) - T_e) \quad (6)$$

dove:

K_f , K_e sono i coefficienti di adduzione fra le superficie interna ed esterna della piastra e rispettivamente il fluido di raffreddamento e l' aria ambiente; T_f , T_e sono le temperature del fluido di raffreddamento e dell' aria esterna; $T_{in}(x,y)$, $T_{out}(x,y)$ sono le temperature delle superficie interna ed esterna della piastra; n è il versore normale alla superficie della piastra. L' equazione (4) può essere risolta in forma parametrica esprimendo l' andamento della temperatura in funzione di x_i , y_i , x_j , y_j [7]:

$$T = T(x_i, y_i, x_j, y_j) \quad \text{con } i = 1,2,3,4 \text{ e } j = 1,2,3,4 \quad (7)$$

Nell' espressione (7) non compare la dipendenza dalla variabile z in quanto la quota alla quale sono ancorati i transistor rimane inalterata.

Lo scopo dell' indagine si riduce alla ricerca del minimo della funzione (7), che fornisce le posizioni ottimali dei transistor. La (4) rappresenta l' equazione di Fourier in regime stazionario e descrive il fenomeno della conduzione in un sistema in cui vi sono 8 sorgenti di calore (4 W_i e 4 W_j). Il calore generato dai transistor, per la maggior parte, è trasmesso per conduzione attraverso la piastra di alluminio e dalla superficie interna di questa, per adduzione, al fluido refrigerante; una modesta quantità di calore è invece trasmessa per adduzione all' aria. In figura 4 si riporta il particolare dell' ancoraggio dei transistor.

3.4 Modello di calcolo

L' impiego del programma di calcolo ANSYS consente di determinare l' andamento di T per via numerica; a tal proposito, sulla base del modello matematico descritto dalle equazioni (4) e (5), è stato elaborato un modello di calcolo avente le seguenti caratteristiche:

- la piastra di alluminio viene suddivisa in "7430" elementi di egual volume; l' andamento della temperatura all' interno di un elemento è lineare rispetto a tutte le variabili spaziali:

$$T(x,y,z) = A x + B y + C z ; \quad (8)$$

- i transistor sono considerati sorgenti di calore uniformi ed inoltre dotati di temperatura uniforme sulla superficie di contatto con la piastra [1];

- ogni elemento in cui si verificano fenomeni di adduzione (fluido-piastra e piastra-aria) viene considerato come un elemento sulla cui superficie si genera calore negativo (pozzo termico): tale fatto non ha alcun riscontro fisico e costituisce solamente una modellizzazione matematica;

- per due elementi adiacenti valgono le seguenti condizioni al contorno: se S è la superficie di contatto fra l' elemento U_p e l' elemento U_{p+1} e T_p, T_{p+1} sono le funzioni (8) rispettivamente per U_p e U_{p+1} , allora valgono le seguenti relazioni:

$$T_p = T_{p+1} \quad \text{per } (x,y,z) \text{ su } S \quad (9)$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial n} = - \lambda_{p+1} \frac{\partial T_{p+1}}{\partial n} \quad \text{per } (x,y,z) \text{ su } S \quad (10)$$

con λ_p e λ_{p+1} rispettivamente i valori della conducibilità in U_p e U_{p+1} ;

- i valori medi di K_e e K_f sono stati fissati rispettivamente pari a " $1.03 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ ", " $0.96 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ " in base a [8].

Il programma di calcolo ANSYS risolve il sistema costituito dalle equazioni (8),(9) e (10) ripetute per ogni elemento. In tal modo si ricava l' andamento di $T(x,y,z)$ nell' intero sistema. Modificando la distribuzione dei transistor sulla piastra, si modifica la disposizione degli elementi, pervenendo ad una nuova distribuzione delle temperature; in tal senso si sceglie la distribuzione dei transistor che garantisce i valori più bassi della temperatura in corrispondenza dei transistor stessi.

4. Analisi dei risultati

4.1 Apparato sperimentale

Presso il laboratorio di Fisica Tecnica dell' Istituto di Energetica dell' Università di Perugia è disponibile un prototipo dell' amplificatore; il dispositivo, che è privo del necessario circuito di alimentazione, non consente di eseguire misure atte a verificare la validità delle simulazioni matematiche. Si è pensato, quindi, di allestire un modello fisico che abbia un comportamento termico simile a quello del sistema reale: le potenze dissipate nel modello sono nel campo 10-20 % di quella massima, di poco inferiori alle potenze di esercizio abituali. Ragioni termiche hanno impedito sperimentazioni a potenze più elevate, ma si ritiene tale circostanza irrilevante ai fini della verifica della validità del modello matematico [9]. Un sistema di termovisione consente di osservare la reale distribuzione delle temperature sulla superficie della piastra nelle diverse condizioni operative. Due termometri, posti rispettivamente all' ingresso e all' uscita del circuito idraulico di raffreddamento, misurano l' incremento di temperatura subito dall' acqua e quindi la quantità di calore ceduta dalla piastra.

4.2 Risultati sperimentali

I risultati sperimentali sono stati confrontati con i risultati della simulazione al calcolatore: in fig. 5 e fig. 6 sono riportati i campi termici simulati relativamente a un modello con potenza di 233 W e a un modello con potenza di 475 W; le fig.7 e 8 mostrano il campo termico reale misurato nelle due condizioni operative. La portata d'acqua del circuito idraulico di raffreddamento è stata posta pari a $7.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (portata media) [10].

Si noti come l' andamento qualitativo dei campi termici misurati sia molto simile a quello ottenuto dalle simulazioni; anche i valori delle temperature massime differiscono per meno di 2°C .

Nelle zone calde della piastra di colore bianco (fig.8), è difficile distinguere le variazioni e quindi

i valori massimi di temperatura a causa della saturazione del campo di misura; in fig.9, si riportano i valori e le posizioni delle temperature massime ottenuti variando opportunamente la sensibilità del sistema di termovisione. La notevole affinità fra i risultati teorici e quelli sperimentali per le due condizioni operative induce ad ammettere la validità del modello nel caso di potenze più elevate.

In tab.1 sono riportati i risultati delle prove sperimentali; in particolare vengono evidenziate le differenze tra la temperatura dell' acqua in ingresso e la temperatura dell' acqua in uscita al circuito di raffreddamento e la percentuale del flusso termico globalmente generato che viene asportato dall' acqua e dall' aria esterna.

4.3 Simulazioni del sistema alla massima potenza dissipata

In particolari condizioni di lavoro l' apparato può funzionare dissipando la massima potenza termica che è complessivamente pari a 2320 W. Tale situazione è quella che sollecita maggiormente i transistor e rappresenta la situazione più critica da studiare ai fini dell' affidabilità. Le simulazioni al calcolatore del campo termico sono state effettuate per le portate di acqua pari a $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (portata media consigliata dalla casa costruttrice per la potenza massima) ed a $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (portata massima). In fig.10a si riporta il campo termico simulato per la portata di $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, mentre in fig. 10b è rappresentato l' andamento della temperatura lungo l' asse "r" (vedi fig.3). Analogamente in fig.11a si riporta il campo termico simulato per la portata di $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; in tal caso l' andamento della temperatura lungo l' asse "r" è riportato in fig. 11b.

Dalle figure si può verificare che pur raddoppiando la portata di acqua le temperature massime in prossimità dei transistor non subiscono variazioni significative; tale fatto sembra suggerire che il valore $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ rappresenta la portata per la quale si verifica un fenomeno di saturazione nel processo di scambio termico fra piastra e acqua [11].

4.4 Proposte migliorative

Le figure 10a e 11a mostrano come i punti più "caldi" della piastra sono in corrispondenza della retta che unisce le posizioni dei transistor (b1); allo scopo di diminuire la temperatura in tali punti, si è pensato di distribuire in modo alternato i transistor (b1) e (b2), invertendo di 180° l' orientamento di due successivi SSA (vedi fig.12). La nuova disposizione dei transistor non comporta una riprogettazione elettronica dell' amplificatore infatti l' architettura di ogni SSA rimane inalterata. Tuttavia la vicinanza dello stadio di ingresso di un SSA con quello di uscita del successivo potrebbe causare accoppiamenti elettromagnetici indesiderati; tale inconveniente può essere evitato installando appositi schermi fra ogni SSA. Per tale configurazione, la distribuzione delle temperature sulla superficie della piastra è stata simulata per la portata media pari a $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. In fig.13 si riporta il campo termico simulato mentre in fig.14 è rappresentato l' andamento della temperatura lungo la retta "r" .

I risultati di tale simulazione mostrano una più uniforme distribuzione dei punti "caldi" della piastra e, parallelamente, una diminuzione della temperatura massima di circa 4°C rispetto alle temperature massime della originaria disposizione dei transistor.

5. Conclusioni

A seguito dell' analisi del campo termico svolta nei precedenti capitoli, si è riscontrato che, adottando una distribuzione dei transistori come in fig.12, in luogo della distribuzione attualmente adottata dalla casa costruttrice, si ottiene una diminuzione di circa $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ della temperatura massima della piastra che si verifica in corrispondenza delle flange dei transistori (b1). In un precedente lavoro [1] sono state trovate le relazioni che consentono di valutare la temperatura di giunzione al variare di quella della flangia del transistor; per un decremento di circa $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sulla flangia si ottiene un decremento di circa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ sulla giunzione [12]. Ammettendo la validità della relazione di Arrhenius ed in conseguenza della diminuzione delle temperature massime, il tempo di vita medio dei componenti disposti come in fig.12 risulta circa il 15 % superiore a quello dei transistori nella configurazione originaria.

6. Lista dei simboli

6.1 Lettere latine (in ordine di apparizione)

t_v = tempo di vita medio componente elettronico[ore];

E_a = energia di attivazione del processo chimico [eV];

k = costante di Boltzman [$8.617 \cdot 10^{-5}$ eV/K];

K = coefficiente di adduzione termica [$\text{W}/\text{K m}^2$];

T = temperatura [K];

W = potenza termica [Watt];

V = volume [m^3];

I = corrente elettrica [A];

L = lunghezza del conduttore [m];

s = sezione del conduttore [m^2];

a, b, c = dimensioni dei transistori (b1) [m];

c, d, e = dimensioni dei transistori (b2) [m];

x, y, z = doordinate del transistor [m];

A, B, C = costanti della legge di variazione della temperatura per un elemento;

U = elemento in cui è suddiviso il sistema;

S = superficie dell' elemento U ;

n = versore normale alla superficie.

6.2 Lettere Greche (in ordine di apparizione)

Φ = flusso termico per unità di volume [W/m^3];

ρ = resistività elettrica del conduttore [$\Omega \text{ m}$];

λ = conducibilità termica [W/mK].

6.3 Pedici (in ordine di apparizione)

1 = transistori (b1);

2 = transistors (b2);
i = i-esimo transistor (b1);
j = j-esimo transistor (b2);
f = fluido;
p = p-esimo elemento;
e = aria esterna;
in = superficie interna;
out = superficie esterna.

7. Bibliografia

- [1] F. Cotana, M. Felli, L. Santarpià, "Heat Transfer on TMOS-FET High power Transistor", ITEC-93, 6-10 giugno 1993, Marrakesh.
- [2] G. Soncini, "Prove Accelerate e relativi Modelli nei Componenti Elettronici", Modi e Meccanismi di Guasto nei Componenti Elettronici, Tecnopoli, 21-23 settembre 1987.
- [3] F. Cotana, A. De Lieto Vollaro, M. Felli, "Una nuova Apparecchiatura per le Prove PCT dei Circuiti Integrati", 43^o Congresso Nazionale ATI, Ancona, 20-23 settembre 1988.
- [4] Hsu T.R., "The finite Element Method in Thermomechanics", George Allen & Unwin Ltd, London 1986.
- [5] A. J. Laderman et Al. , "Parametric Study of Conduction in Cooling for High Power Density Electronics", Cooling Tecnology for Electronic Equipment, Win Aung, Washington DC, 1988.
- [6] Mazhar Unsal, "Cooling of multiple heat sources attached to a two dimensional rectangular fins", NATO Advanced study Institute on Cooling of Electronic System, June 21-July 2 1993, Izmir, Turkiye.
- [7] Wang, Kahavita, "Numerical intergration of partial differential Equation using cubic splines", International Computer math., Vol. 13, pp. 271-286, 1983.[5] R. H. Perry, "Perry' s Chemical Engineers Handbook", McGraw-Hill, 1984,VI Edition.
- [8] R. H. Perry, "Perry's Chemical Engineers Handbook", McGraw-Hill.1984,VI Edition.
- [9] K. Hijikata, K. Fuscino, T. Nagasaki, "Numerical and experimental studies for the conjugate direct cooling of a micro heat generating element", NATO Advanced study Institute on Cooling of Electronic System, June 21-July 2 1993, Izmir, Turkiye.
- [10] A. E. Bergles, A. Bar-Coen, "Direct Liquid Cooling of Microelectronic Components", NATO Advanced study Institute on Cooling of Electronic System, June 21-July 2 1993; Izmir, Turkiye.
- [11] G. Barozzi, E. Nobile, "Conjugate Heat Transfer in Forced Convection Cooling of Chips Arrays", Heat Transfer in Electronic and Microelectronic Equipment, A. Bergles, ed. Hemisphere, 1990.
- [12] Kraus, A.D., and Landis, "The Analysis of extended surfaces with a variable heat transfer coefficient", Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel, Vol. 4, p. 117.

Tab.1: Riepilogo dei risultati delle prove sperimentali

Potenza dissipata [W]	Portata acqua refrig. [m ³ /s]	ΔT acqua refrig. [K]	Potenza termica ceduta [W]		Percentuale potenza termica ceduta [%]	
			ad acqua	ad aria	ad acqua	ad aria
233	$7.5 \cdot 10^{-4}$	3.5	217	16	93.1	6.9
475	$7.5 \cdot 10^{-4}$	6.5	400	75	84.2	15.8

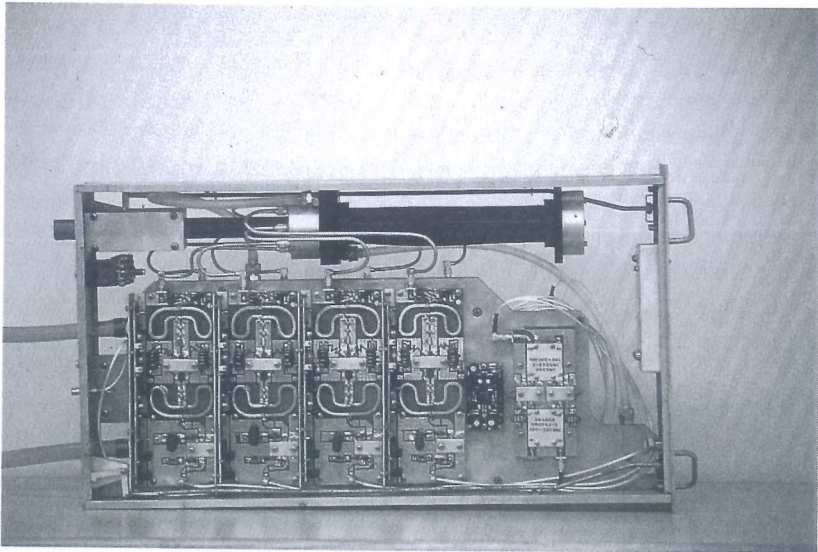


Fig.1: Fotografia dell' amplificatore.

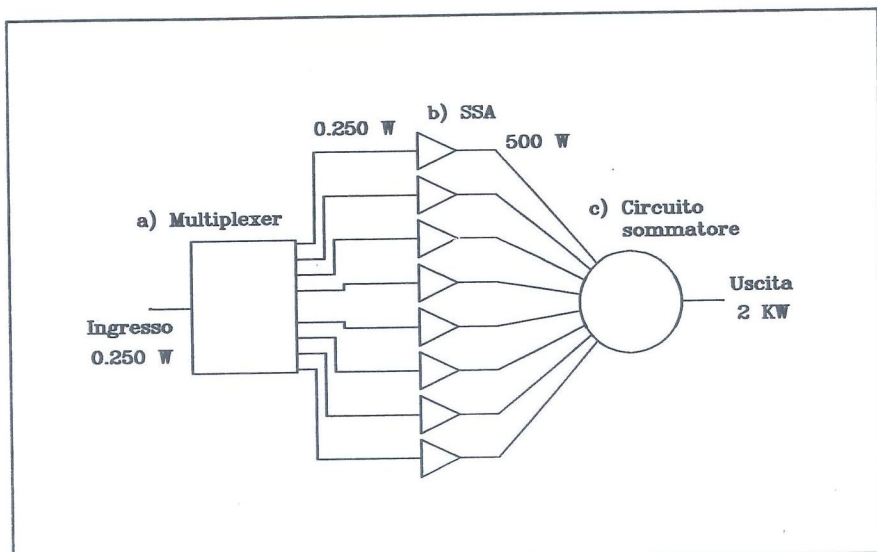


Fig.2: Schema a blocchi del circuito elettrico dell' amplificatore.

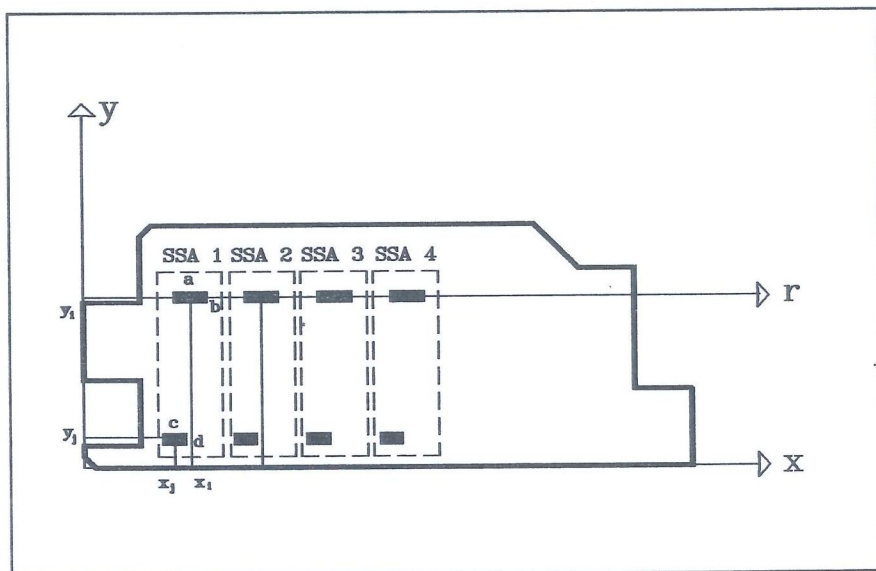


Fig.3: Disposizione dei transistor sulla piastra e sistema di riferimento

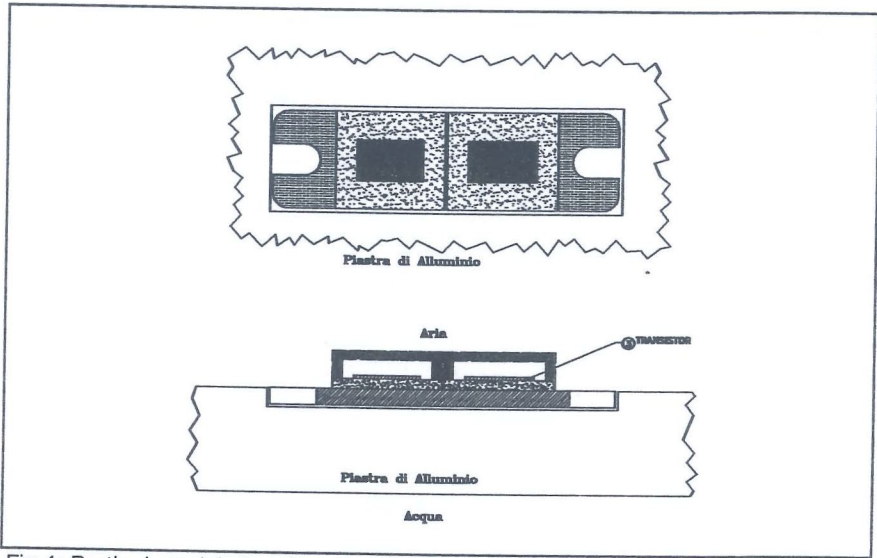


Fig.4: Particolare del singolo transistor e dell' ancoraggio alla piastra

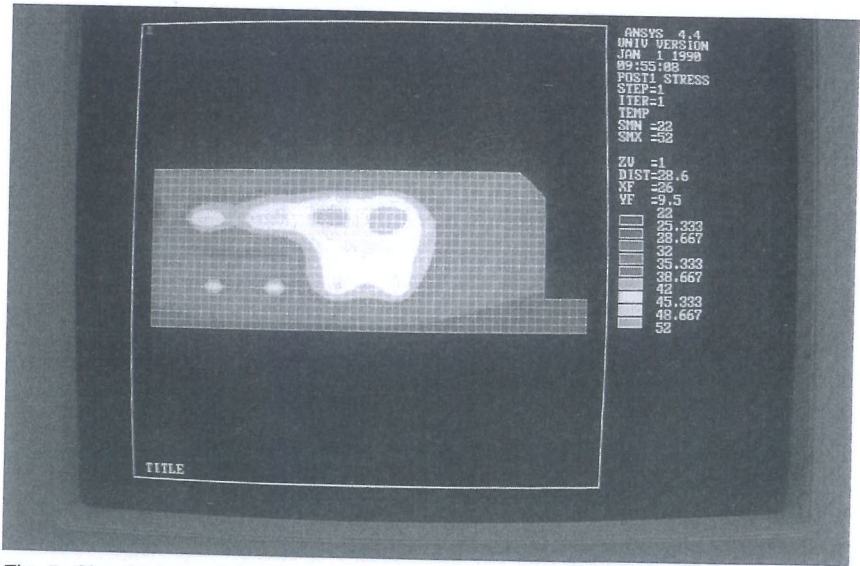


Fig. 5: Simulazione del campo termico; sistema con potenza di 233 W

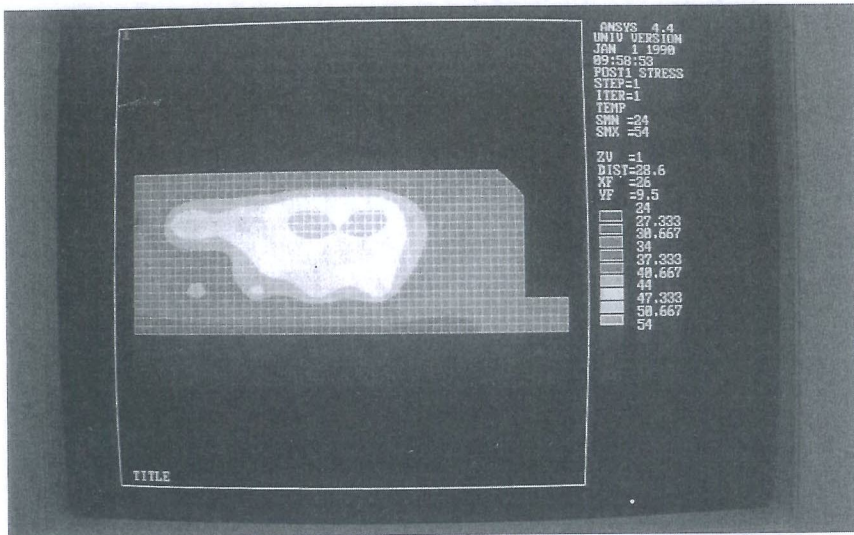


Fig. 6: Simulazione del campo termico; sistema con potenza di 475 W

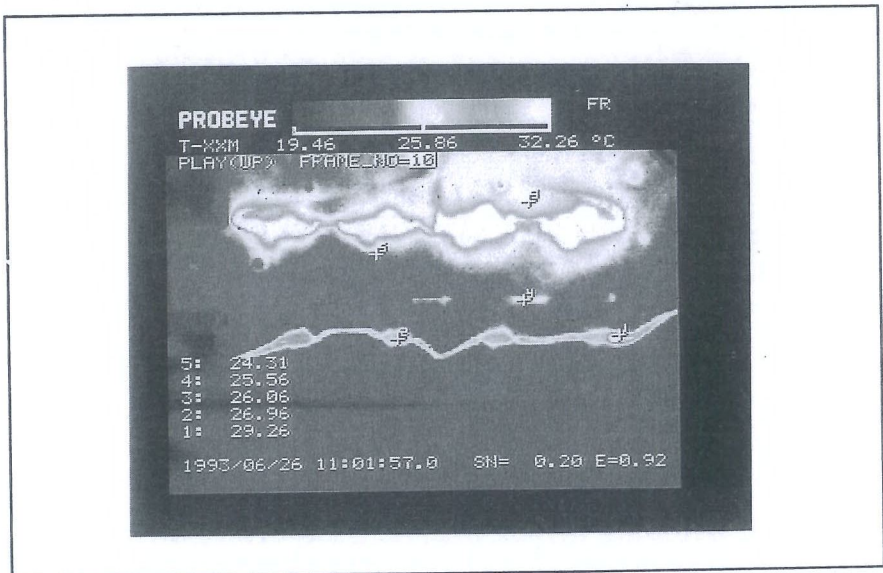


Fig. 7: Misura del campo termico; sistema con potenza di 233 W

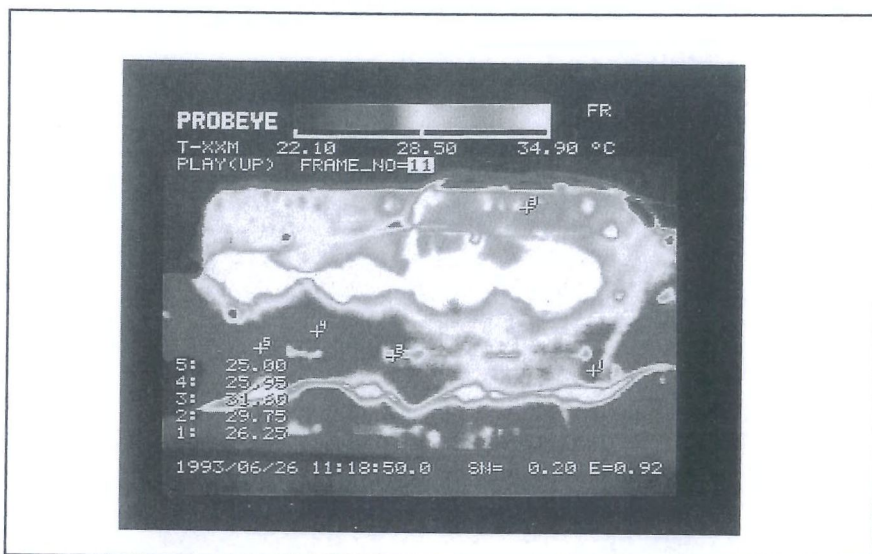


Fig. 8: Misura del campo termico; sistema con potenza di 475 W

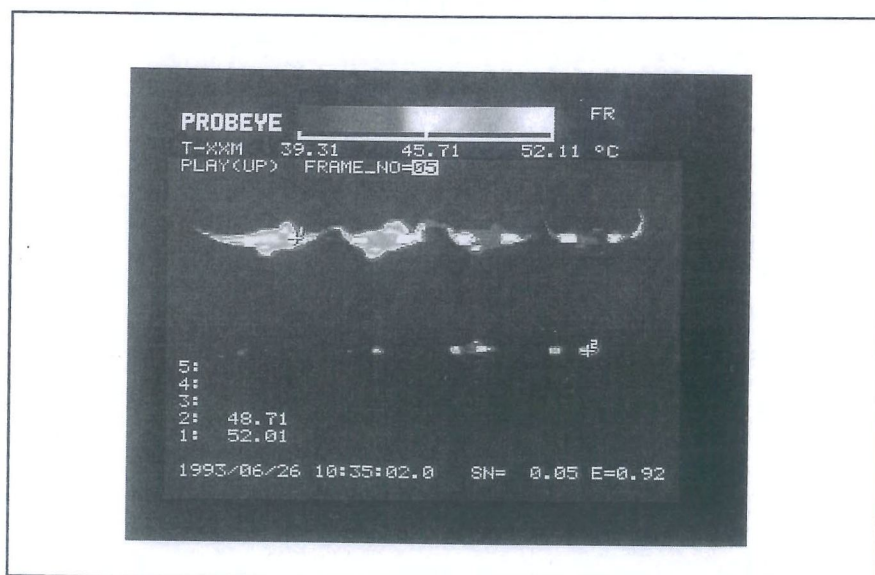


Fig. 9: Misura delle temperature massime dei punti più caldi della piastra; sistema con potenza di 475 W

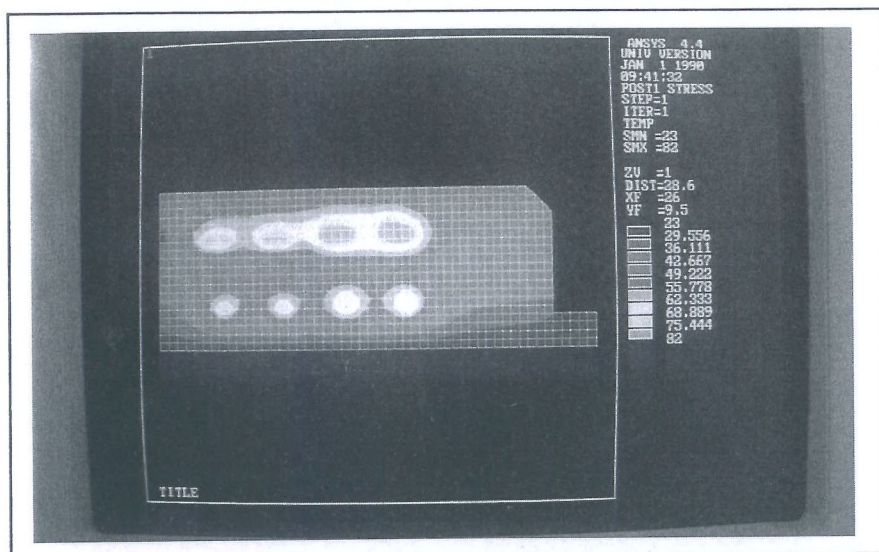


Fig. 10a: Simulazione del campo termico; sistema con potenza massima

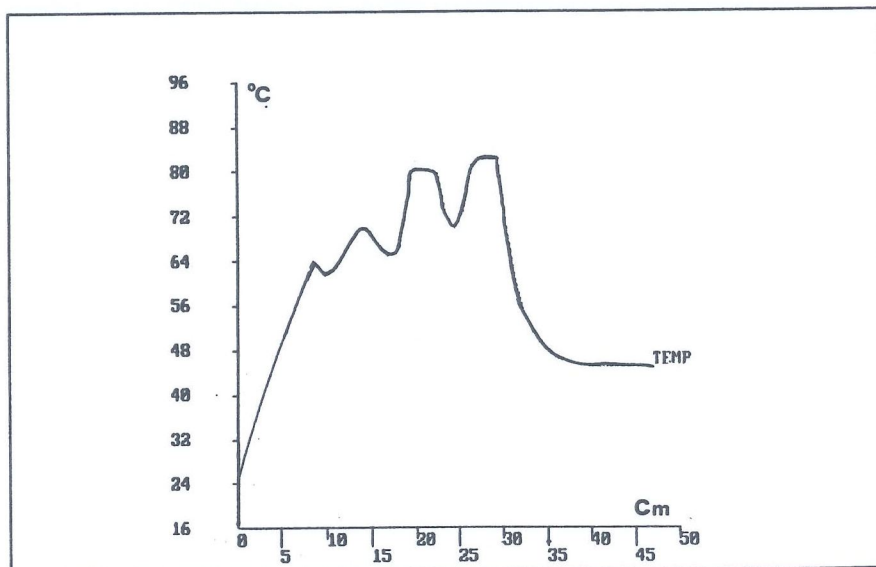


Fig. 10b: Andamento della temperatura della piastra valutata lungo la retta che congiunge i transistori (b1); sistema con potenza massima e portata d'acqua di $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

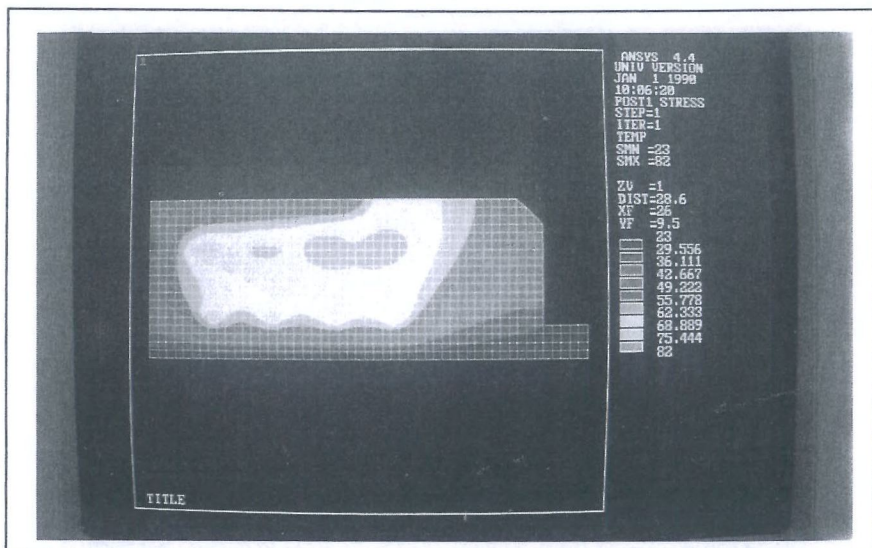


Fig. 11a: Simulazione del campo termico; sistema con potenza massima e portata d' acqua di $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

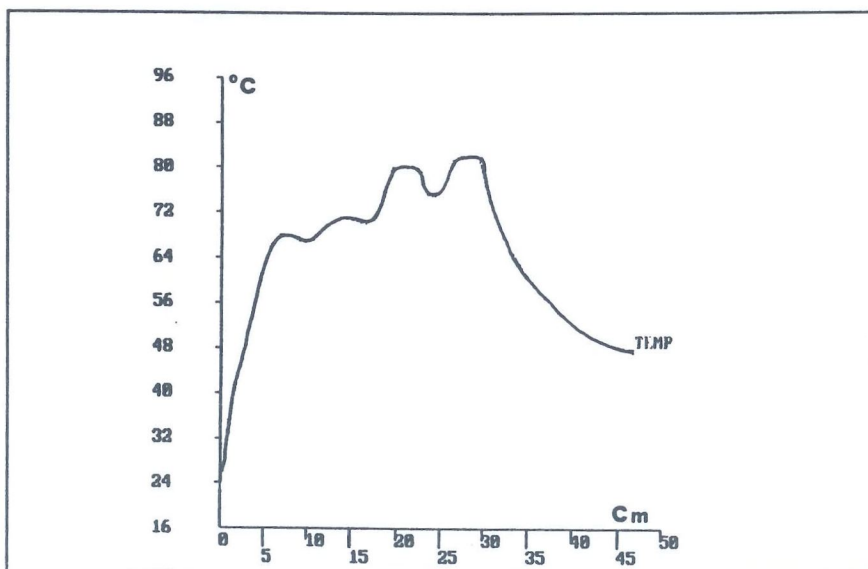


Fig. 11b: Andamento della temperatura della piastra valutata lungo la retta che congiunge i transistor (b1); sistema con potenza massima e portata d' acqua di $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

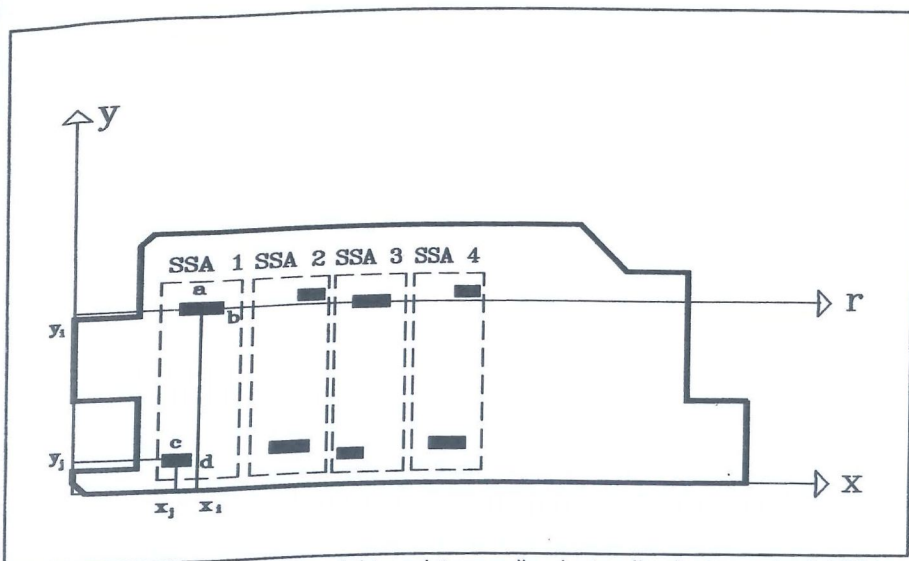


Fig. 12: Nuova disposizione dei transistor sulla piastra; l' orientamento dei SSA è stato invertito di 180° (proposta migliorativa)

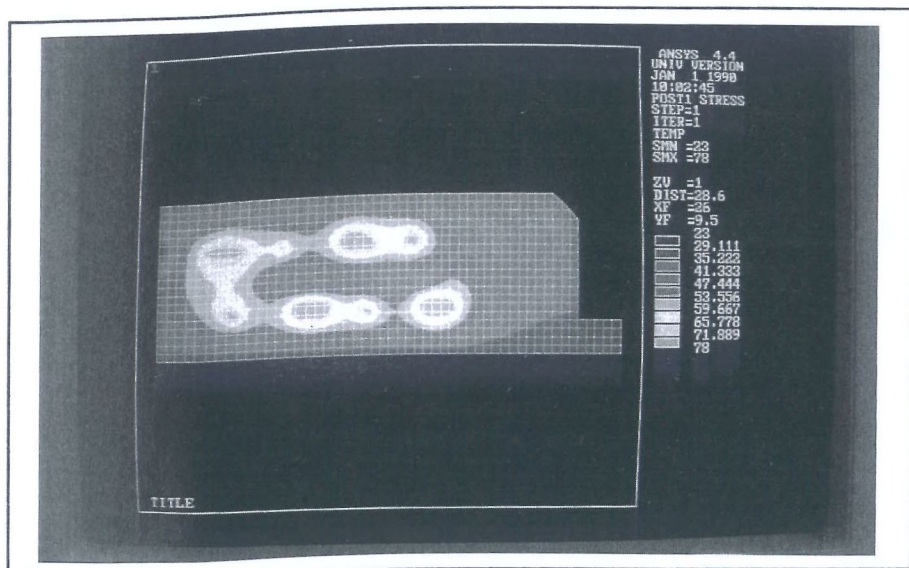


Fig. 13: Simulazione del campo termico; sistema avente i vari SSA disposti secondo la proposta migliorativa per una portata media di $7.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

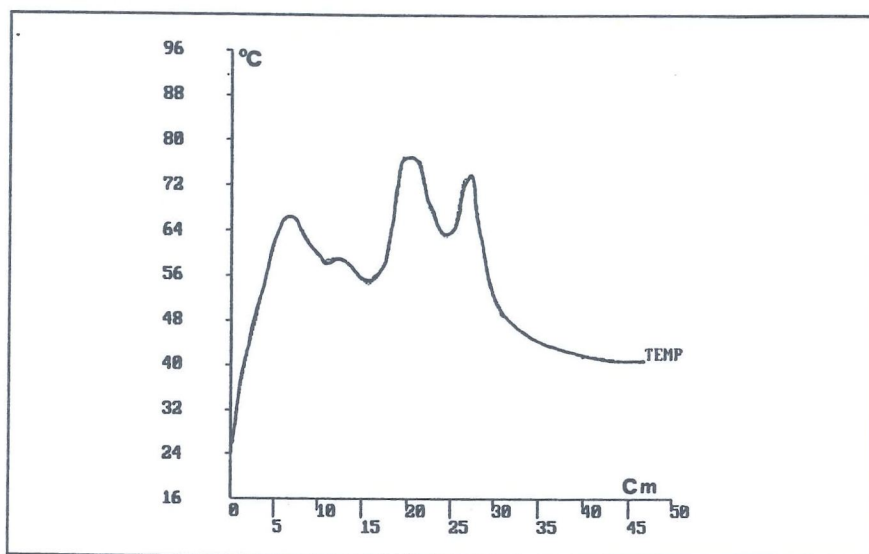


Fig.14: Andamento della temperatura della piastra valutata lungo la retta "r"; sistema avente i vari SSA disposti secondo la proposta migliorativa