

Seminário sobre Dissipadores

Relatório

Daniel de Oliveira Cunha

Data de apresentação: 24/04/01

1. Introdução

Os dispositivos semicondutores possuem um limite teórico para a sua temperatura interna máxima de funcionamento chamada de temperatura intrínseca, T_i , que é a temperatura na qual a densidade de portadores intrínsecos na região mais levemente dopada do dispositivo se iguala à densidade de portadores dopantes da região. Por exemplo em regiões levemente dopadas de um diodo de silício a temperatura intrínseca é em torno de 280°C. Se esta temperatura for excedida, as propriedades retificadoras da junção se perdem.

No entanto, as temperaturas máximas de funcionamento descritas nos manuais costumam ser bem menores do que este limite. Um dos motivos para isto é que a dissipação de potência nos semicondutores aumenta com a temperatura interna, e as perdas podem se tornar excessivamente altas mesmo para temperaturas de 200°C. Os fabricantes destes dispositivos normalmente garantem os parâmetros máximos de funcionamento como tensões de saída, tempo de chaveamento e perdas em chaveamentos para uma temperatura máxima especificada que varia de dispositivo para dispositivo mas geralmente é algo em torno de 125°C.

Se projetistas e fabricantes de equipamentos eletrônicos decidirem utilizar dispositivos semicondutores a temperaturas acima destas especificadas nos manuais eles terão de realizar um processo chamado de *screen* que é a medição das características em altas temperaturas de todos os dispositivos envolvidos para garantir que eles irão funcionar de forma adequada. A menos que todos os dispositivos envolvidos sejam testados, não se pode garantir que algum deles não terá parâmetros ruins para temperaturas elevadas, e que fará o equipamento do qual ele faz parte falhar. Algumas aplicações especiais requerem que o equipamento trabalhe realmente em altas temperaturas, e neste caso, o processo de *screen* é a única opção. Todo o equipamento envolvido deve passar por testes do tipo *burn-in* trabalhando a plena potência e a maior temperatura ambiente esperada por um período que pode ir de um dia a uma semana.

Como estes testes são demorados e muito custosos, devem ser evitados sempre que possível, e isto pode ser feito através de um bom design térmico do equipamento, que deve ser levado em conta logo no início do projeto. Um design inadequado deixará o equipamento menos confiável do que o desejável. Uma boa regra a se ter na cabeça é de que a taxa de erros para os dispositivos semicondutores dobra para cada 10-15°C que a temperatura sobe acima dos 50°C. Uma solução para manter a temperatura dos dispositivos semicondutores no nível desejado é a correta utilização de dissipadores de calor. Um dissipador é um dispositivo de baixa resistência térmica que deve ser colocado entre o encapsulamento e o ambiente. Na correta escolha do dissipador o compromisso volume x resistência térmica deverá ser levado em consideração para a escolha de um dissipador pequeno ou grande, resfriado por convecção natural, por um ventilador, ou mesmo através do uso de resfriamento através de líquidos.

2. Cálculo da resistência térmica desejada

Nos dispositivos semicondutores o calor decorrente do efeito Joule é produzido na pastilha semicondutora, fluindo daí para ambientes mais frios, como o encapsulamento do dispositivo e o ambiente. Este fluxo de calor depende de fatores como o gradiente de temperatura e as características térmicas dos meios e materiais envolvidos.

a) Comportamento em regime permanente: potência média

Define-se a grandeza “resistência térmica” como uma medida da dificuldade do fluxo de calor entre 2 meios:

$$R_t = \Delta T / P = 1 / (h.A)$$

ΔT : diferença de temperatura entre regiões de transferência de calor

P: potência média dissipada

h: coeficiente de transferência de calor

A: área envolvida na transferência de calor

Em geral se faz uma analogia com um circuito elétrico, figura 1, sendo a potência média representada por uma fonte de corrente. As temperaturas nos ambientes indicados (junção, cápsula, ambiente) são análogas às tensões nos respectivos nós, enquanto as resistências térmicas são as próprias resistências do modelo.

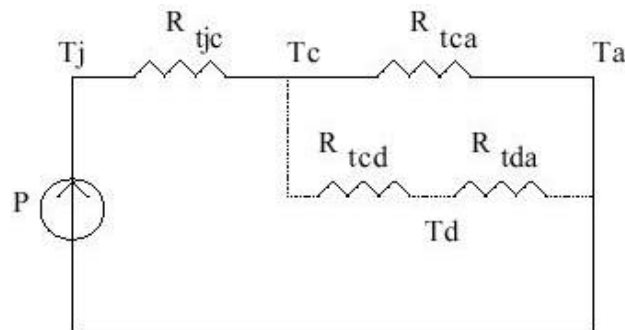


figura 1

A figura 1 mostra um equivalente elétrico para o circuito térmico em regime permanente (incluindo dissipador). Normalmente a temperatura ambiente (T_a) é considerada constante e o objetivo do dimensionamento é garantir que a temperatura da junção semicondutora (T_j) não ultrapasse um dado valor máximo. As resistências térmicas entre junção e cápsula (R_{tjc}) e entre cápsula e ambiente (R_{tca}) são dados do componente, podendo ser encontrados nos manuais. Eventualmente se omite o valor da resistência entre cápsula e ambiente caso seu valor seja elevado e seguramente seja utilizado algum dissipador de baixa resistência térmica.

A equação típica do modelo é:

$$T_j \text{ máx} = T_a + (R_{tjc} + R_{teq}) \cdot P$$

Desprezando inicialmente a resistência térmica entre a cápsula e o dissipador (R_{tcd}) teremos R_{teq} igual a:

$$R_{teq} = (R_{tca} \cdot R_{tda}) / (R_{tca} + R_{tda})$$

Se tivermos por exemplo:

$$P = 20 \text{ W}$$

$$R_{tjc} = 2^\circ\text{C/W}$$

$$R_{tca} = 10^\circ\text{C/W}$$

$$T_a = 40^\circ\text{C}$$

$$T_j \text{ máx} = 120^\circ\text{C}$$

$$R_{teq} = 2^\circ\text{C/W}$$

$$R_{tda} = 2,5^\circ\text{C/W}$$

b) Comportamento em regime permanente transitório: potência de pico

Quando a potência dissipada no semiconductor consiste de pulsos de potência é preciso verificar a proteção do componente não apenas em relação à potência média sobre ele mas também em relação aos picos de dissipação.

Durante a ocorrência do pico de potência ocorre a elevação da temperatura da junção, embora não ocorra variação nas temperaturas do encapsulamento e do dissipador (que dependem da potência média) devido à maior capacidade térmica da cápsula e especialmente do dissipador. Tal capacidade térmica relaciona-se com o tipo de material utilizado e seu volume. Na analogia elétrica utilizada anteriormente ela se comporta como uma capacitância. Este modelo mais completo é visto na figura 2.

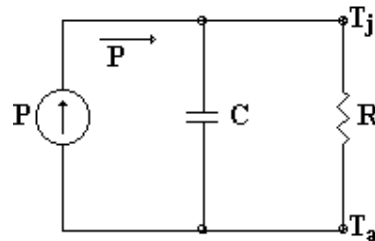


figura 2

O cálculo da temperatura da junção em tal regime transitório é feito utilizando uma grandeza chamada “impedância térmica” que leva em consideração a capacidade térmica da junção. O valor da impedância térmica, Z_{tjc} , é obtido de curvas normalizadas nos manuais de componentes semicondutores. A figura 3 mostra uma curva típica de impedância térmica normalizada em relação à resistência térmica entre junção e cápsula.

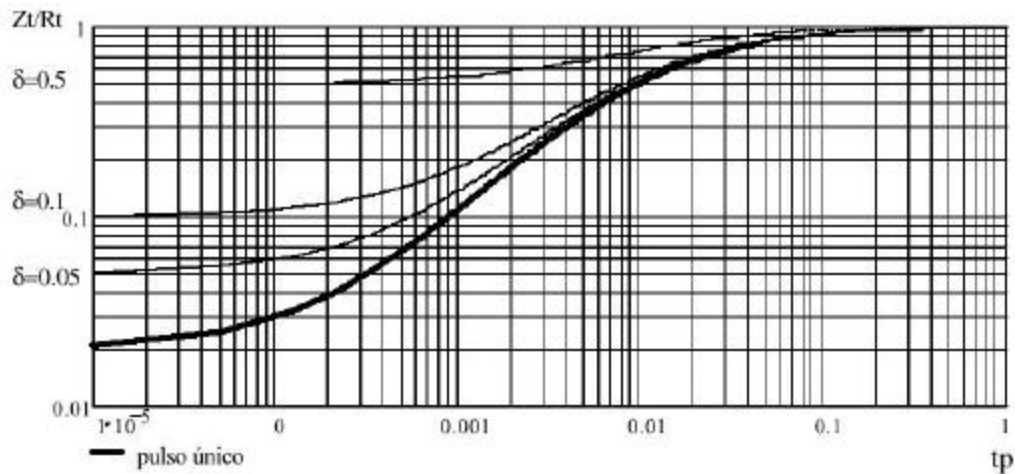


figura 3

Estas curvas tomam por base pulsos quadrados de potência que, via de regra, não ocorrem. Como se vê na figura 4, os pulsos reais devem ser normalizados de maneira a que o valor de pico e a energia (área sobo pulso) se mantenham. Com o ciclo de trabalho obtido pela divisão da largura do pico retangular pelo período de chaveamento seleciona-se a curva adequada e se obtém o valor de Z_{tjc} (normalizado ou não). Calculada a temperatura do encapsulamento (a partir da potência média) obtém-se o valor da temperatura da junção no instante do pulso de potência.

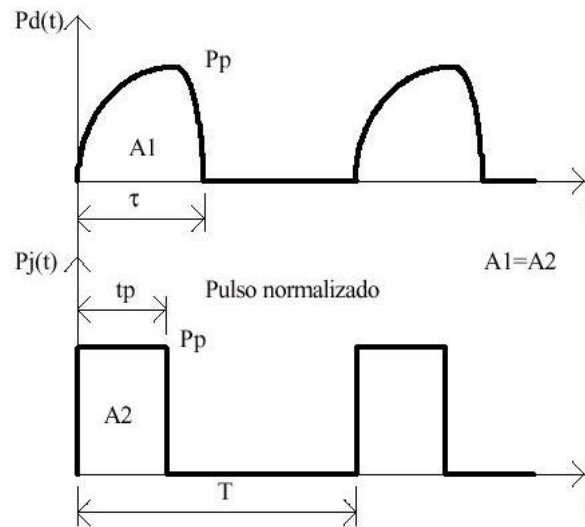


figura 4

$$t_p = \frac{1}{P_p} \cdot \int_0^{\tau} P_d(t) dt$$

$$\delta = \frac{t_p}{T}$$

$$T_{jp} = T_c + P_p \cdot Z_{jc}(t_p, \delta)$$

Uma vez determinada a temperatura relativa à potência média (teremos tb T_c) pode-se calcular a temperatura de pico que se tem na junção, caso esta temperatura seja maior do que a aceitável devemos calcular T_c máx e a partir daí uma nova R_{tda} que satisfaça a especificação de temperatura máxima da junção.

Alguns critérios práticos a serem adotados no dimensionamento de dissipadores.

- A temperatura de trabalho da junção deve ser 20% a 30% menor que seu valor máximo, para permitir a proteção do componente sem super-dimensionar o dissipador.
- Para ambientes nos quais não se faça um controle rígido da temperatura deve-se usar uma temperatura ambiente de 40°C (exceto se for possível a ocorrência de temperaturas ainda mais elevadas).
- Caso o dissipador fique dentro de algum bastidor ou caixa na qual a temperatura possa se elevar acima dos 40°C deve-se considerar sempre a máxima temperatura do ar com o qual o dissipador troca calor.
- Deve-se verificar a necessidade do uso de isolantes (mica, teflon ou mylar) e não desconsiderar suas resistências térmicas.
- O emprego de pastas térmicas é sempre recomendado e se deve considerar também sua resistência térmica.

3. Os diferentes tipos de Dissipadores

Os valores tipicamente usados para expressar a eficiência de um dissipador são a resistência térmica e a “queda de pressão”. A resistência térmica é expressa como o aumento da temperatura por watt (°C/W). Quanto menor o valor, melhor a performance térmica do dissipador. A queda de pressão é a resistência encontrada pelo ar se movendo através do dissipador expressa em unidades de mmH₂O, e deve ser idealmente a mais baixa possível. Em geral estes dispositivos são construídos em alumínio dada sua boa condutividade térmica (condição indispensável), baixo custo e peso. Alguns são construídos em cobre e alguns são uma mistura dos dois. O volume do dissipador se associa às características dinâmicas dos fenômenos térmicos.

A utilização de um grande número de aletas é para aumentar a área de troca de calor. A resistência térmica para uma placa plana quadrada pode ser aproximadamente dada por:

$$R_{tda} = \frac{3,3}{4\sqrt{\lambda W}} \cdot C_f + 650 \cdot \frac{C_f}{A}$$

λ : condutância térmica (a 77°C) [W/(°C.cm)]

W: espessura do dissipador [mm]

A: área do dissipador [cm]

Cf: fator de correção devido a posição e tipo de superfície

tabela 1 – Valores de condutância térmica para diferentes materiais

Material	(W/°C.cm)
Alumínio	2,08
Cobre	3,85
Latão	1,1
Aço	0,46
Mica	0,006
Óxido de Berílio	2,10

A tabela 1 mostra os valores de condutância térmica para diferentes materiais e estes valores podem ser melhor visualizados comparativamente na figura 5 abaixo

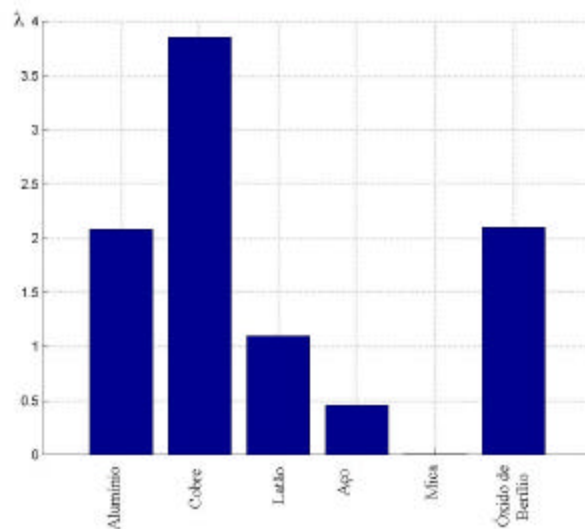


figura 5

O fator C_f varia com a posição do dissipador, sendo preferível uma montagem vertical à horizontal por criar um efeito “chaminé”. Dissipadores pretos são melhores irradiadores de calor que aqueles com superfície brilhante. A tabela 2 mostra os valores do coeficiente C_f em função da posição que o dissipador é colocado e do tipo de sua superfície.

Tabela 2 – valores para C_f

	Corpo brilhante	Corpo negro
Montagem vertical	0,85	0,43
Montagem horizontal	1,00	0,50

A superfície preta pode ser conseguida pela cobertura do dissipador com óxido preto, mas o preço pode aumentar na mesma proporção que a resistência térmica cai.

Os dissipadores podem ser divididos em três tipos: os resfriados por convecção natural, os resfriados or ventilação forçada e os refrigerados com líquido.

a) Dissipadores resfriados por convecção natural

Este é o tipo mais simples de dissipadores de calor e, embora alguns fabricantes tenham modelos mais sofisticados como será mostrado adiante, normalmente consiste apenas de um bloco com várias aletas. Esse tipo de dissipadores deve normalmente ter suas aletas espaçadas de 10 – 15 mm, um menor espaçamento das aletas reduz significativamente o efeito de refrigeração convectiva natural. Esta redução pode ser vista na figura 6.

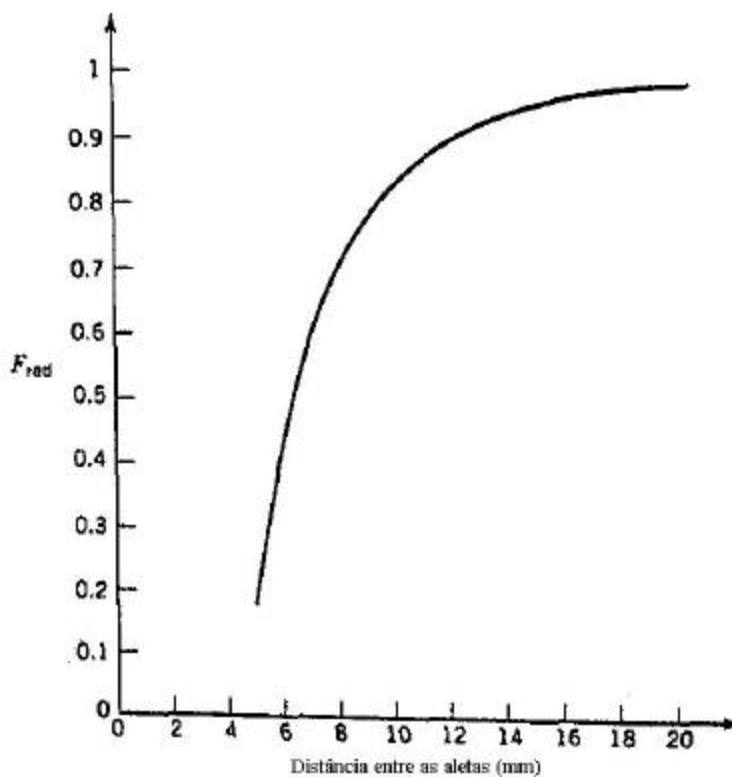


figura 6

Sua constante térmica de tempo, que está associada ao modelo térmico mais completo com um “capacitor” costuma variar de 4 a 15 min. Alguns perfis típicos para dissipadores por convecção natural podem ser vistos na figura 7, todos dissipadores Semikron.

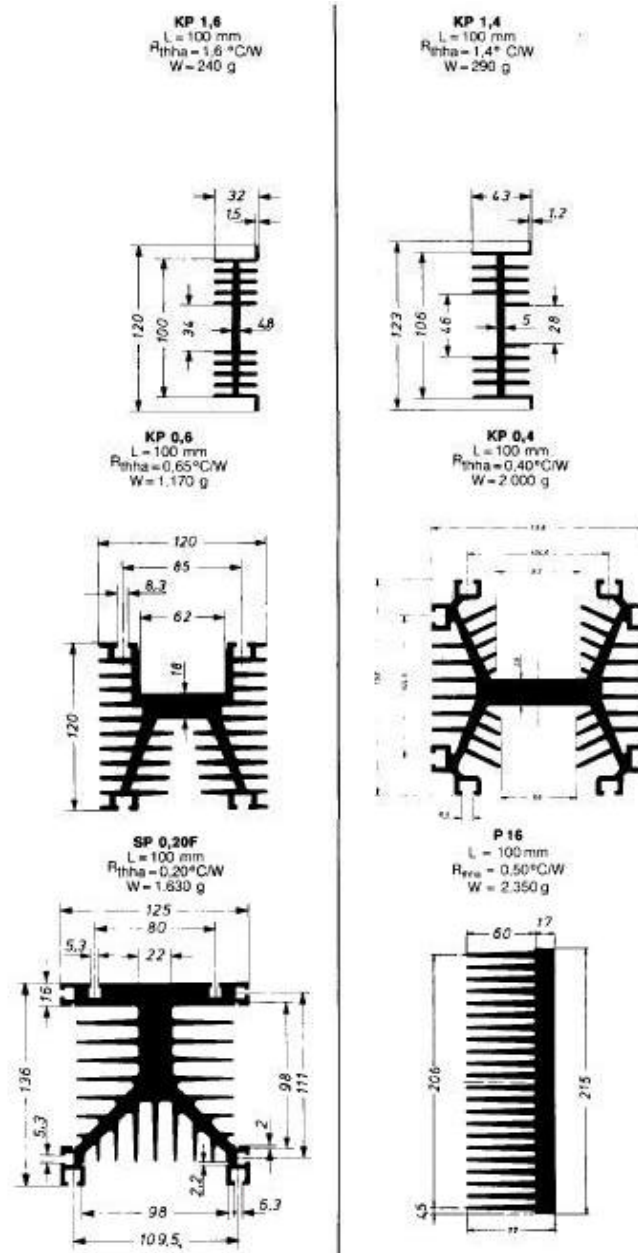


figura 7

A tabela 3 a seguir é feita a partir de dados extraídos desta figura.

Tabela 3 – Comparação peso x Resistência térmica para diversos modelos

Peso	240g	290g	1.170g	2.000g	1.630g	2.350g
R term	1,6°C/W	1,4°C/W	0,65°C/W	0,40°C/W	0,20°C/W	0,50°C/W

Observando a tabela e comparando com os designs dos dissipadores da figura 7, podemos perceber que os designs mais simples têm uma relação peso/ R_{term} pior do que os que apresentam um design mais sofisticado, ocupando um volume maior.

Alguns fabricantes oferecem modelos mais sofisticados como os das figuras 8 e 9.

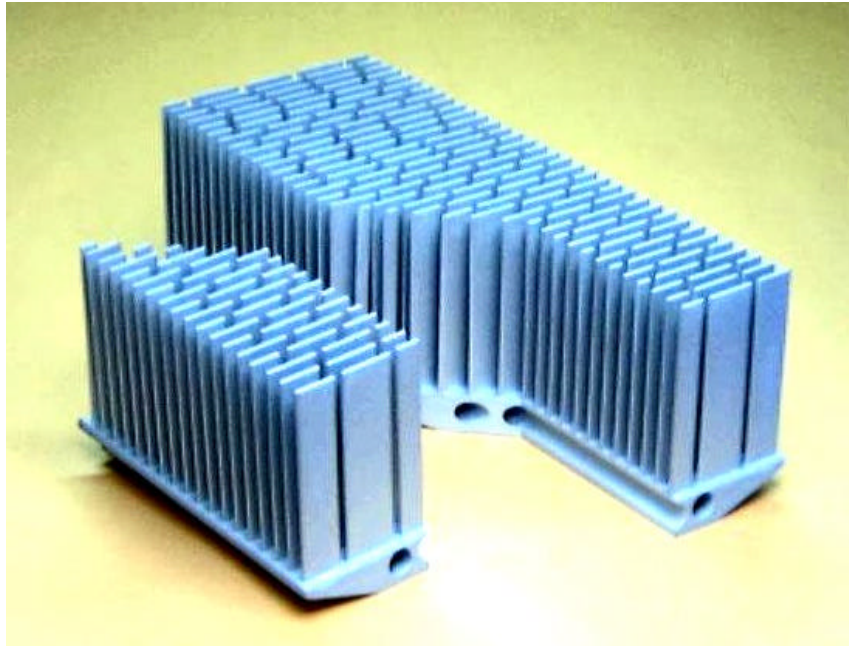


figura 8

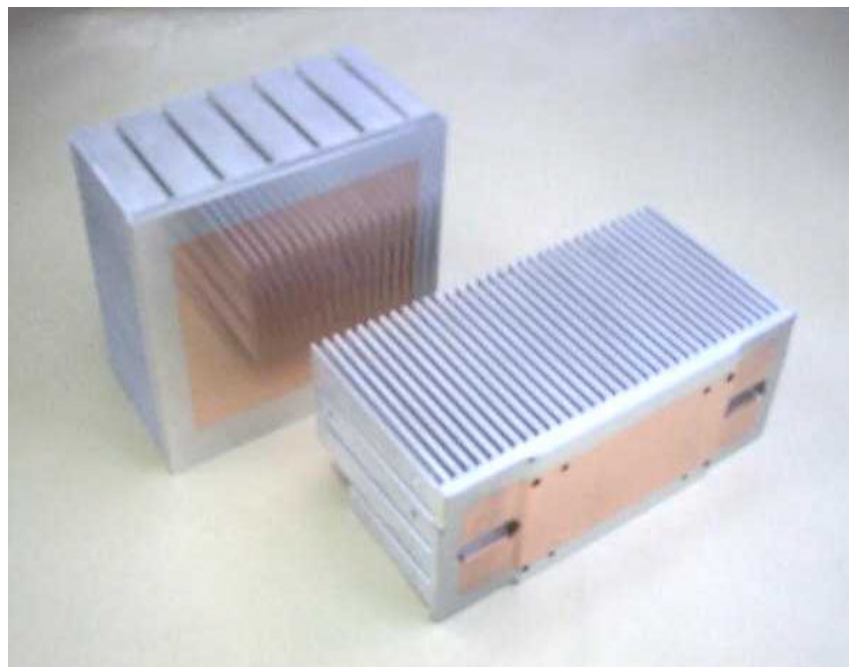


figura 9

O dissipador da figura 8 possui furos na sua base similares a canos que melhoram a transferência de calor e aumentam a sua dissipação, enquanto que o dissipador da figura 9 possui uma base de cobre que atua como espalhador de calor melhorando a performance térmica. É importante ressaltar que as partes de alumínio e de cobre do dissipador mostrado na figura 9 devem ser bem unidas com alta pressão para garantir o contato entre os metais e

minimizar a resistência térmica. Pode-se encontrar ainda que em menor quantidade e variedade dissipadores inteiramente de cobre como os mostrados na figura 10 a seguir.

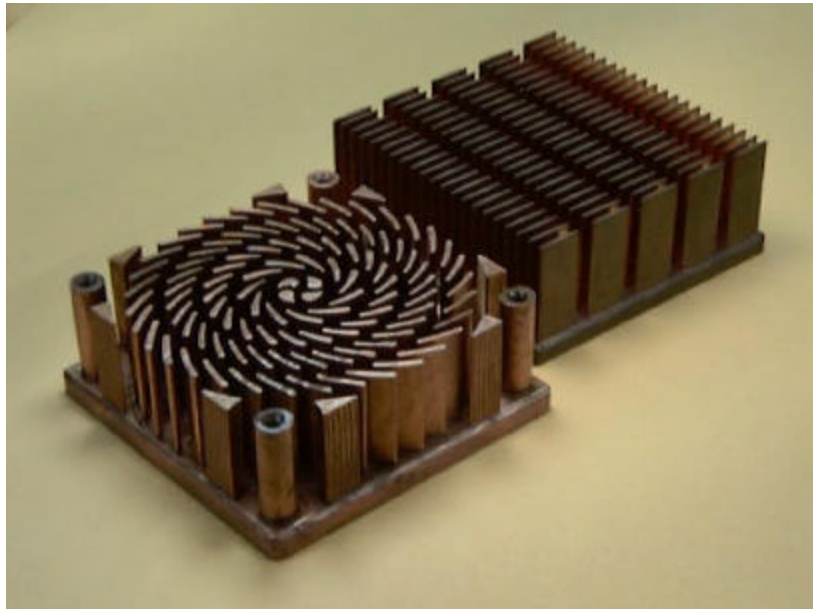


figura 10

b) Dissipadores resfriados por ventilação forçada

Os dissipadores que utilizam ventilação forçada devem ter um espaçamento pequeno entre as aletas, não ultrapassando poucos milímetros. A circulação forçada de ar reduz significativamente o valor efetivo da resistência térmica do dissipador. Isto pode ser visto na figura 11. Onde o eixo das abscissas é o fator multiplicativo da resistência e o eixo das ordenadas a velocidade de deslocamento do ar em m/s.

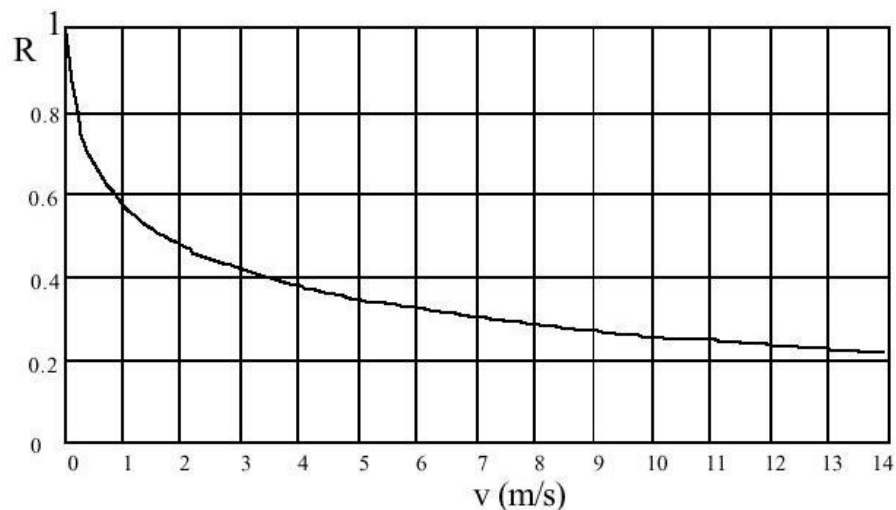


figura 11

Esta redução na resistência térmica permite que se obtenha o mesmo valor efetivo de resistência térmica com dissipadores menores, o que faz com eles tenham constantes térmicas de tempo tipicamente menores que 1 min. Os representantes mais conhecidos deste tipo de dissipadores são os “coolers” para processadores de computadores pessoais, onde é necessária

uma baixa resistência térmica num pequeno volume e peso, o que seria impossível com dissipadores por convecção natural. Nas figuras 12 e 13, a seguir, podemos ver dissipadores com resfriamento por ventilação forçada para o processadores Athlon e Duron, que também servem para FPGA's. Todos estes dissipadores são da ALPHA.



figura 12



figura 13

Tanto os dissipadores da figura 12 (série PAL) quanto os dissipadores da figura 13 (série PEP) são feitos de alumínio, com o acabamento escuro (aplicação de óxido) e possuem uma placa de cobre na base que atua como espalhador de calor. Essas características aumentam o custo do produto, mas são necessárias dada a finalidade do dissipador. Eles têm uma velocidade de rotação de seus ventiladores fixa, o que deixa sua resistência térmica bem definida, o PAL6030MUC, por exemplo, tem $R_t = 0,39^{\circ}\text{C/W}$ enquanto que o PEP66U tem $R_t=0,35^{\circ}\text{C/W}$.

É comum os fabricantes produzirem séries de dissipadores, que são dissipadores com as mesmas características e proporções mas com dimensões diferentes resultando em resistência térmica diferente. As figuras 14 e 15 mostram uma forma típica empregada pelos fabricantes para apresentar estas séries, neste caso a série FH da ALPHA..

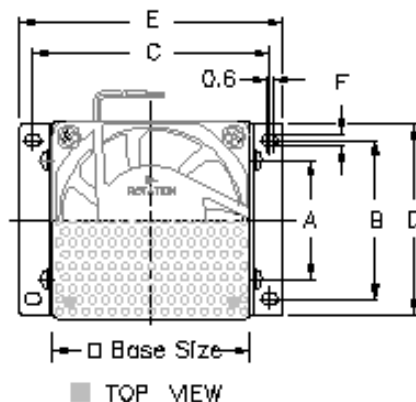


figura 14

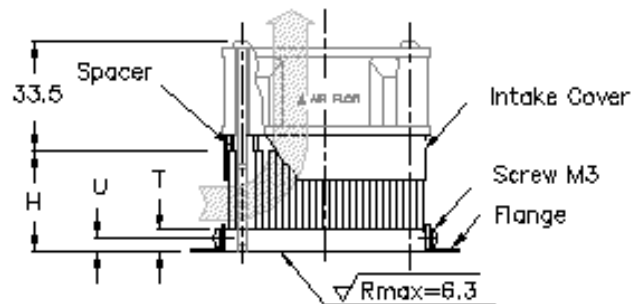


figura 15

No caso desta série mostrada nas figuras 14 e 15 os vários modelos são caracterizados pelas dimensões nelas destacadas (A, B, C, D ...). Todos os modelos são de Alumínio com acabamento brilhante e a figura 16 nos mostra como a resistência térmica dos diversos modelos pode variar.

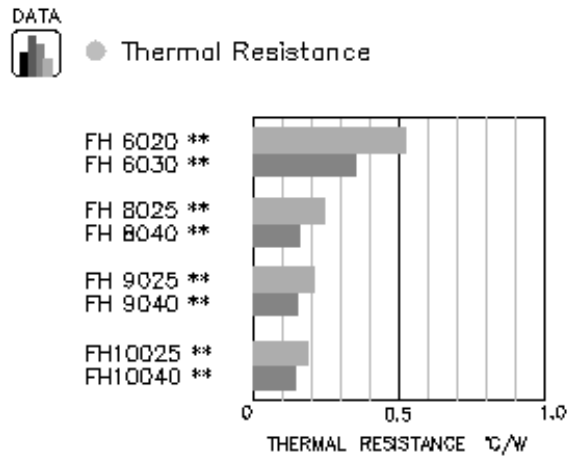


figura 16

Para efeito de comparação, o modelo FH 6020, que apresenta a maior resistência térmica da série em torno de $0,52^{\circ}\text{C/W}$, tem base quadrada com lado de 60mm, altura de 20mm e pesa 96g enquanto que o modelo FH 10040, que apresenta a menor resistência térmica da série por volta de $0,15^{\circ}\text{C/W}$, tem base quadrada com lado 100mm, altura 40mm e pesa 426g.

c) Dissipadores refrigerados com líquido

Sistemas eletrônicos de alta potência frequentemente utilizam refrigeração com circulação forçada de líquidos. Em geral os componentes são montados em placas metálicas de cobre ou alumínio, através da qual circula o líquido refrigerante, normalmente por condutores ocultos soldados à placa.

Água é provavelmente o melhor líquido para resfriamento em termos de densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico. Para operação de longa duração deve-se prever uso de água destilada e deionizada o que previne a corrosão e sedimentação ao longo dos dutos. Se a temperatura esperada puder cair abaixo do ponto de solidificação ou chegar acima do ponto de ebulição deve-se adicionar outro líquido à água como o “ethylene glycol” o que também previne a corrosão do cobre ou alumínio usado nos dutos.

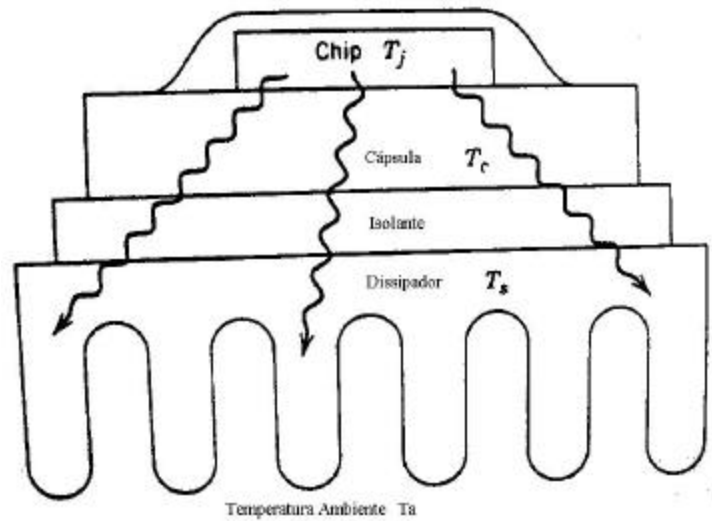
A série WK da Semikron é feita para resfriamento através de circulação de água e os modelos WK40/ 180, WK40/240 e WK40/ 300 apresentam peso e resistência térmica de respectivamente 6,4Kg / $0,017^{\circ}\text{C/W}$, 2,32Kg/ $0,016^{\circ}\text{C/W}$ e 4,64Kg/ $0,0115^{\circ}\text{C/W}$. É importante ressaltar que estas baixas resistências térmicas são especificadas para um fluxo de 8l/ min de H_2O .

Alguns processadores mais novos, que trabalham na casa de GHz, possuem refrigeração por circulação forçada de líquido.

4. A Montagem

Na montagem do componente semiconductor sobre o dissipador existe uma resistência térmica entre o encapsulamento e o corpo do dissipador determinada, principalmente, pelo ar contido entre os corpos, devido às rugosidades e não alinhamento das superfícies. Este fato pode ser minimizado pelo uso de pastas de silicone ou outro tipo de material que seja bom condutor térmico e isolante elétrico. Caso seja necessário isolar eletricamente o corpo do componente do dissipador utiliza-se, em geral, isoladores de mica ou de teflon, que apresentam

uma resistência térmica adicional entre cápsula e dissipador. O modelo para esta montagem pode ser visto na figura 17.



É importante que se entenda que a pasta térmica deve ser usada apenas para retirar o ar contido nas saliências microscópicas das superfícies em contato (isolante-dissipador e isolante-componente) e assim utilizar efetivamente toda a área da superfície para a condução de calor. Se for usada pasta térmica em demasia, a camada ficará excessivamente grossa o que irá aumentar a resistência térmica.

Tabela 4 – Valores típicos de resistência térmica entre cápsula e dissipador

Tipo de Cápsula	Tipo de isolador	Rtcd(° C/W)	
		Com pasta	Sem pasta
TO – 3	Sem isolante	0,1	0,3
	Teflon	0,7 a 0,8	1,25 a 1,45
TO – 66	Mica	0,5 a 0,7	1,2 a 1,5
	Sem isolante	0,15 a 0,2	0,4 a 0,5
	Mica	0,6 a 0,8	1,5 a 2,0
TO – 220AB	Mylar	0,6 a 0,8	1,2 a 1,4
	Sem isolante	0,3 a 0,5	1,5 a 2,0
	Mica	2,0 a 2,5	4,0 a 6,0

Obs.: Mica e mylar com espessura de 50µm a 100µm.



figura 18

Existem muitos produtos diferentes no mercado capazes de oferecer um melhor contato entre as superfícies em questão, a maior parte de silicone puro, como a pasta mostrada na figura 18.

Estes produtos são normalmente vendidos neste tipo de embalagem mostrada na figura e a descrição de suas propriedades e características incluem tipicamente cor, temperatura de operação e condutividade térmica. No caso do modelo mostrado, YG6260-5, a cor é branca, a temperatura de operação é de -50°C a 150°C e a condutividade térmica é de 0.84W/mK .

Alguns fabricantes incluem também a densidade, constante dielétrica, tensão de breakdown e breakdown dielétrico.

5. Medições das características dos dissipadores

Os cálculos teóricos para resistência térmica e outras características dos dissipadores tendem a ser muito simplificados e por isso imprecisos, é comum a determinação destes parâmetros através de testes práticos em laboratório visando encontrar valores mais próximos da realidade. Alguns testes interessantes são os testes de resistência térmica e queda de pressão em função da velocidade de deslocamento do ar.

a) Testes de Queda de Pressão

Estes testes de queda de pressão podem ser feitos através de esquemas semelhantes ao mostrado na figura 19.

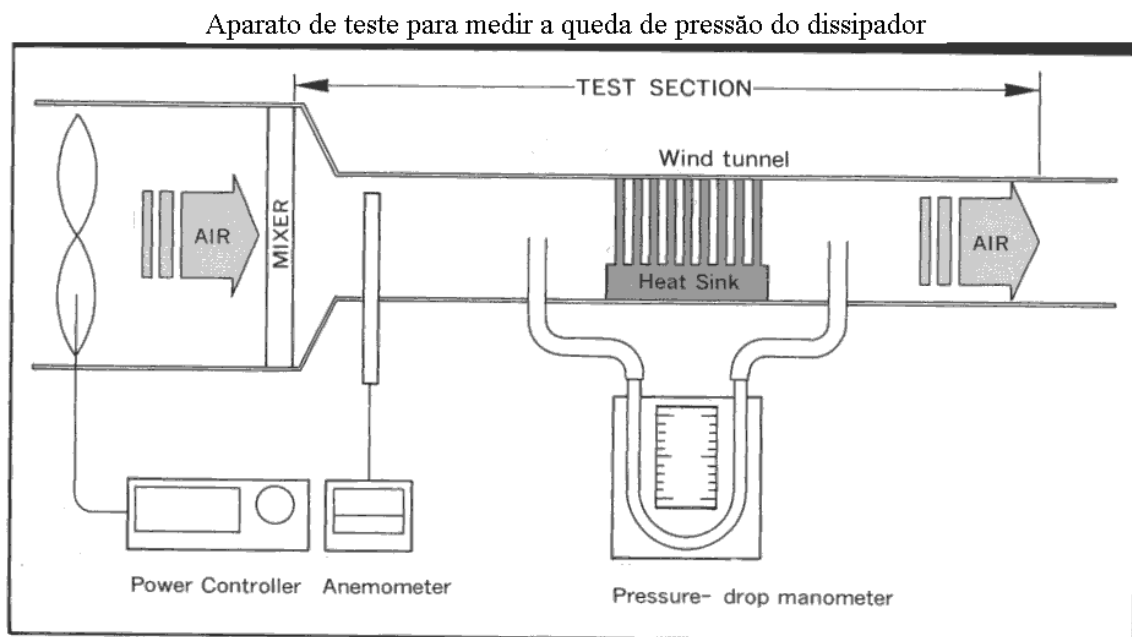


figura 19

Este teste é na verdade bem simples, o dissipador é colocado num túnel de vento e um ventilador com velocidade variável acionado por um controlador de potência é colocado numa extremidade do túnel. Dois outros aparelhos são necessários para realizar a medição. Um anemômetro em frente ao ventilador para medir a velocidade de deslocamento do ar antes de chegar ao dissipador e um manômetro para

medir a queda de pressão entre a frente e a parte de trás do dissipador. Os resultados deste teste são expressos em mmH₂O e resultam num gráfico velocidade de deslocamento do ar (normalmente em m/s) x queda de pressão.

b) Testes de Resistência Térmica

Os testes para medição da resistência térmica do dissipador são um pouco mais complicados do que o de medição de queda de pressão. Estes testes envolvem, além do controle de uma variável do dissipador, neste caso a temperatura, e da velocidade de deslocamento do ar no túnel, o controle da potência irradiada pela fonte de calor ligada ao dissipador e da temperatura do ar ventilado para o dissipador, que servirá como temperatura ambiente para cálculos. Alguns possíveis esquemas para a realização destes testes podem ser vistos nas figuras 20 e 21.

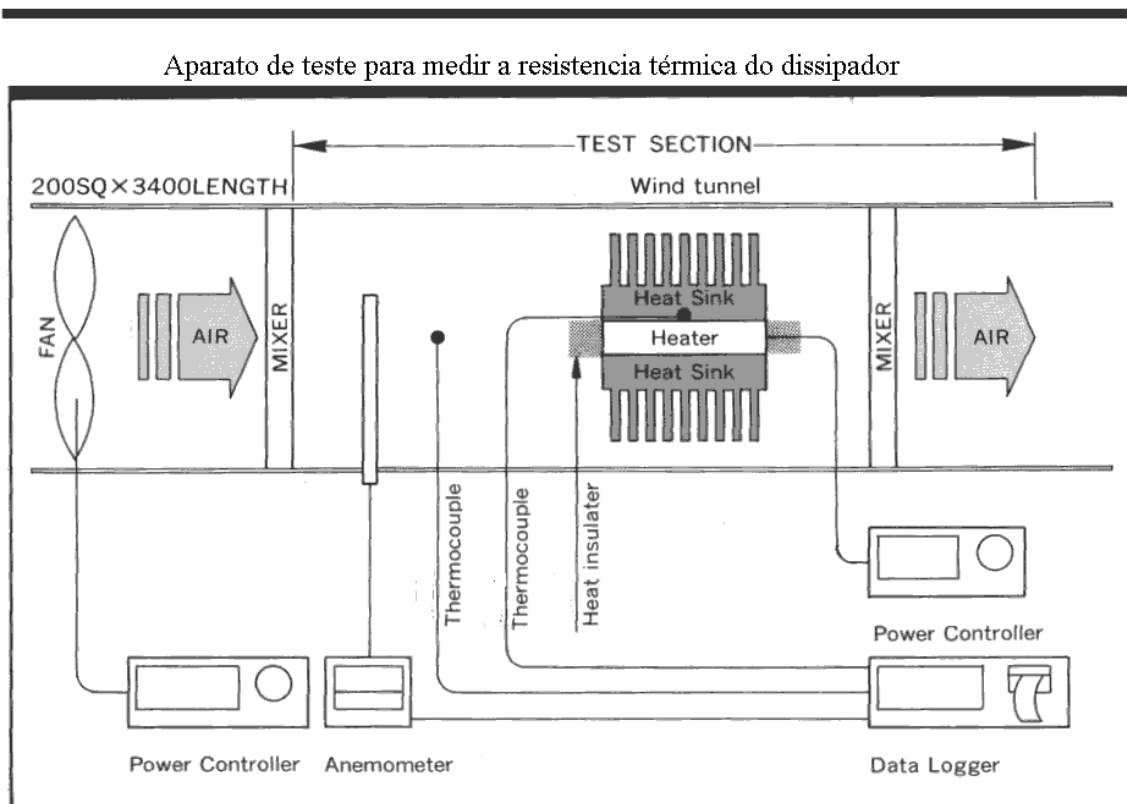


figura 20

Aparato de teste para medir a resistencia térmica do dissipador

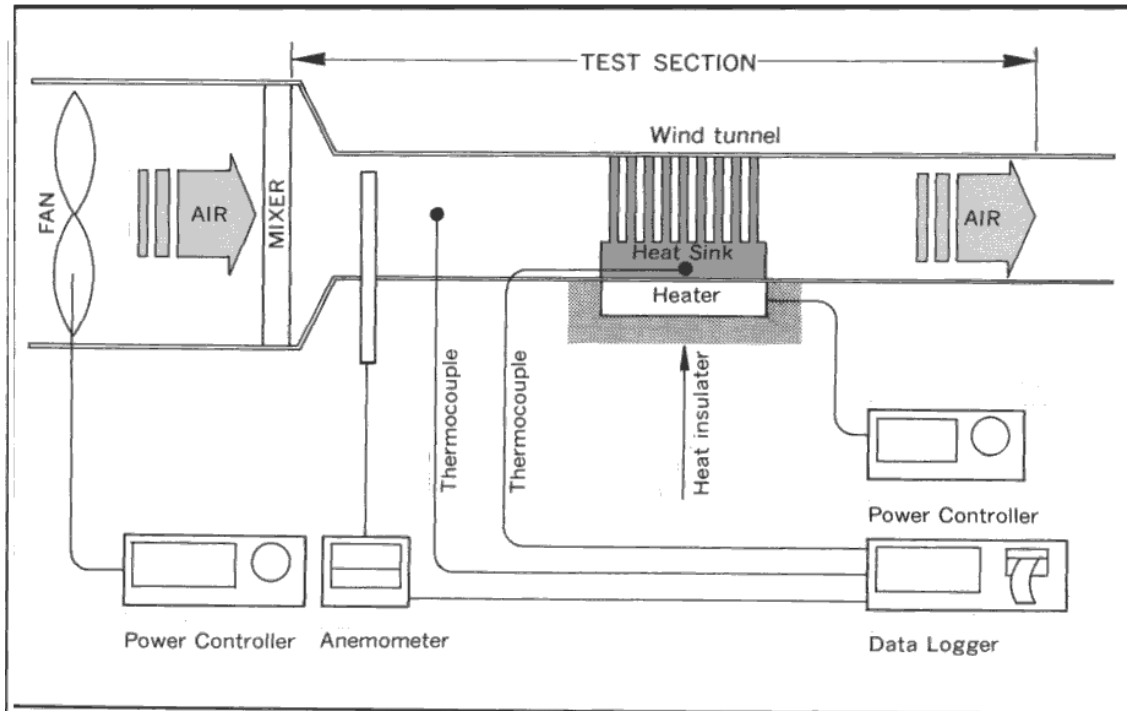


figura 21

Ambos os testes descritos nas figuras 20 e 21 são muito parecidos, a única diferença é a forma com que o dissipador (ou os dissipadores) é montado no túnel de vento, o que altera um pouco os cálculos feitos com os dados registrados. Como se pode ver nestas figuras, estes testes envolvem um número maior de aparelhos de medida trabalhando em conjunto para a obtenção de resultados satisfatórios do ponto de vista da precisão. Algumas partes são muito semelhantes ao teste de queda de pressão, temos o dissipador num túnel de vento em cuja extremidade está um ventilador com frequência de rotação controlável, além de termos também um anemômetro antes do dissipador para medir a velocidade de deslocamento do ar. Porém é necessário nestes testes a inclusão de uma fonte de calor que deverá ter sua potência controlada. Um ponto importante nesta montagem é o isolamento térmico entre fonte de calor e o túnel de vento de modo que todo o calor que chegue ao túnel de vento venha através do dissipador. Para a correta realização dos testes são necessárias, ainda, duas outras variáveis, a temperatura do ar antes do dissipador, T_a , e a temperatura do dissipador. Os resultados destes testes são expressos em $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e pode ser mostrado num gráfico de velocidade de deslocamento do ar (normalmente em m/s) x resistência térmica.

Os fabricantes costumam disponibilizar os resultados de testes similares para os seus dissipadores. Alguns exemplos são a série W da ALPHA, que é uma família de dissipadores de alta eficiência, isto é, um boa relação peso – resistência térmica e a série SB também da ALPHA, que é uma família de dissipadores com baixa queda de pressão e alta performance. Estes resultados podem ser vistos nas figuras 22 e 23 respectivamente.

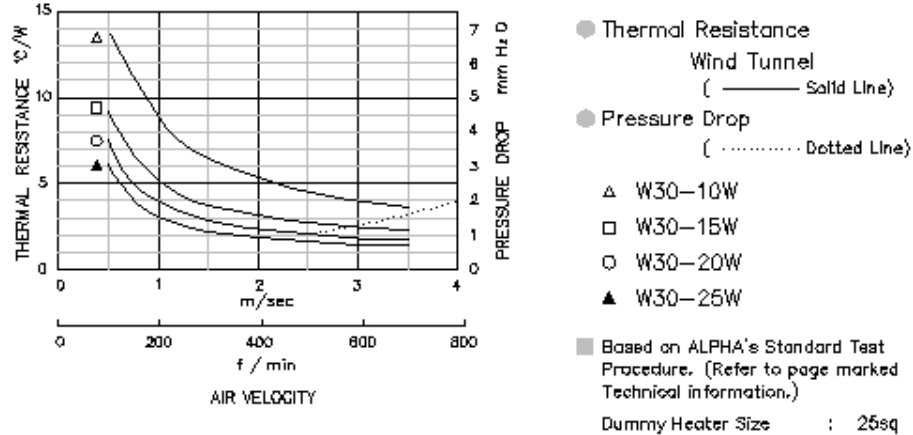


figura 22

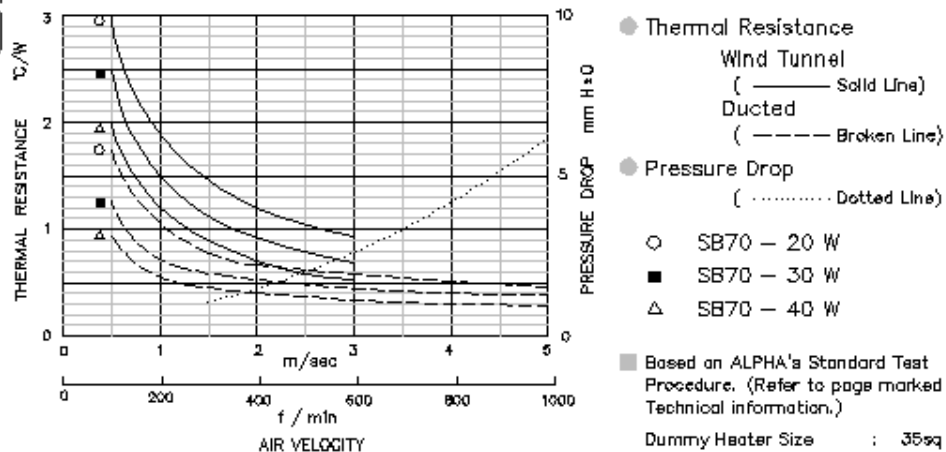


figura 23

A figura 22 nos mostra que os modelos W30 (ou seja cuja base quadrada tem 30mm de lado) apresentam resistencias térmicas entre 14 e 6°C/W com ventilação de 0,5m/s e de 4 a 1°C/W com ventilação de 3m/s. Estes valores podem parecer inicialmente altos mas devemos nos atentar ao fato de que estes dissipadores tem seu peso variando de 8,5 a 16,5g.

A figura 23 nos mostra que os modelos SB70 apresentam uma queda de pressão de aproximadamente 6mmH₂O quando a velocidade do ar é 5 m/s. Se compararmos os gráficos do modelo W30 e do modelo SB70 quando a velocidade do ar é 4m/s veremos que o primeiro apresenta aproximadamente a metade do valor da queda de pressão, o que não deve ser considerado como melhor performance pois o primeiro modelo (W30) possui a base com área aproximadamente 5 vezes menor que a base do SB70.

6. Conclusão

Ao longo deste trabalho foi ficando cada vez mais clara a abrangência e importância do tópico dissipadores de calor. No atual ponto de desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos onde a velocidade se torna cada vez mais importante o controle da temperatura dos dispositivos semicondutores se torna cada vez mais crítico. O cálculo da resistência térmica máxima aceitável embora simples é apenas uma pequena parte de todo o processo de escolha do

modelo de dissipador a ser usado no projeto. Esta escolha passa por questões como posição do dissipador (vertical ou horizontal), a necessidade ou não de um isolador elétrico, o aproveitamento de toda a superfície de contato disponível isolador-dispositivo e isolador-dissipador, acabamento (brilhante ou opaco), volume e peso aceitável, disponibilidade de formas de alimentação para sistemas de refrigeração forçada, seja com ventilação ou através da circulação de líquidos etc. É papel do engenheiro projetista tomar a decisão com a melhor relação custo x benefício com base nos compromissos vistos como por exemplo volume e queda de pressão e peso e resistência elétrica.

Referências:

- ❖ J. A. Pomilio, “Eletrônica de Potência”, DSCE-FEEC-UNICAMP, 2000.
- ❖ “<http://www.semikron.com>”
- ❖ “<http://www.dee.feis.unesp.br/gradua/elepot/>”
- ❖ “<http://www.metalsgroup.com>”
- ❖ “<http://www.micforg.co.jp/>”
- ❖ “<http://www.mhw-thermal.com>”