

PROJETO TÉRMICO DAS BATERIAS Ni-Cd
DO SATÉLITE SINO-BRASILEIRO



ISSAMU MURAOKA
JOSE LUIS F. BASTOS
ROSANGELA M.G. LEITE
Instituto de Pesquisas Espaciais
Av. dos Astronautas, 1758 - 12210-S.J.Campos, SP - Brasil



SUMÁRIO

Este trabalho apresenta uma análise térmica da bateria do Satélite Sino-Brasileiro (CBERS). O objetivo é verificar os gradientes internos na bateria para aprovar o seu projeto de "empacotamento". São averiguados dois fatores que podem causar gradientes de temperatura na bateria, que são o ambiente térmico e a dissipação interna. Dois modelos matemáticos foram desenvolvidos, através dos quais, calculam-se os gradientes térmicos previstos na bateria, impondo-se situações críticas de funcionamento. Finalmente, realizou-se uma simulação, em regime transitório, de uma situação real prevista em voo. O modelamento térmico baseia-se no "Método Nodal" e foi realizado com o auxílio do pacote de análise térmica PCTER.

INTRODUÇÃO

Este estudo faz parte de um contrato vinculado ao programa conjunto entre o Brasil e a China de desenvolvimento de um satélite de sensoriamento remoto (CBERS - China Brazil Earth Resource Satellite).

O satélite CBERS tem massa de aproximadamente 1480 Kg e será colocado em órbita polar, circular de 778 Km de altitude, com período de 100 minutos. Uma de suas faces, na qual estão instaladas duas câmeras de sensoriamento remoto, estará sempre voltada para a Terra.

Quatro baterias fornecem energia elétrica para os equipamentos eletrônicos durante o tempo de eclipse. Elas são recarregadas durante o período de insolação.

As flutuações de temperatura na bateria são provocadas por fatores externos como as variações sazonais da constante e posição solar e por fatores internos como a degradação da bateria durante a sua vida útil (a diminuição da eficiência provoca aumento na dissipação interna da bateria). Ocorrem também flutuações menores durante o período de uma órbita devido a alternância entre as fases insolarada e de eclipse e carga e descarga (a bateria dissipa somente quando está em regime de descarga).

As características funcionais de uma bateria, tais como voltagem, eficiência e tempo de vida, são fortemente dependentes das suas condições térmicas. Para satisfazer os requisitos de funcionamento, impõem-se, para a bateria, limites de temperatura mais rígidos que a maioria dos demais componentes do satélite. Isto exige a utilização de técnicas ativas de controle térmico, normalmente através de aquecedores e radiadores.

Deve-se lembrar que as trocas de calor no espaço são por condução e radiação exclusivamente. O resfriamento de um componente de satélite faz-se através de radiadores voltados para o espaço e o aquecimento através de resistências elétricas. A energia de aquecimento deve ser minimizada visto a limitação na captação de energia solar.

Para se projetar o controle térmico de uma bateria de satélite, são necessárias análises em dois níveis diferentes.

A primeira, de caráter global, estuda o comportamento térmico de todo um compartimento, consiedando-se as radiações externas incidentes e trocas de calor com outros compartimentos do satélite. A bateria é tratada como um corpo isotérmico. Nesta análise, dimensiona-se o radiador e o aquecedor em função dos limites de temperatura especificados para a bateria.

A segunda análise aborda a bateria a nível de seus componentes e utiliza os resultados da primeira

análise como condição de contorno. Esta análise preocupa-se principalmente com o gradiente interno de temperatura, que é fator determinante no projeto de empacotamento de uma bateria (empacotamento significa a forma como as diversas células serão reagrupadas para a composição da bateria).

Os gradientes internos podem ser provocados pelas condições ambientais e pela dissipação interna.

Os gradientes podem ser minimizados determinando-se uma disposição apropriada para as células e aquecedores, e através de colocação de placas intercalares entre as células. Estas placas, geralmente de alumínio, têm a função de facilitar a condução das dissipações térmicas das células para regiões mais frias ou para os radiadores.

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade, do ponto de vista térmico, de uma configuração pré-estabelecida de empacotamento, em função dos gradientes máximos permitidos no interior da bateria. Serão sugeridas modificações, caso necessárias.

Foram analisados dois fatores que podem provocar gradientes térmicos na bateria:

- assimetria nas condições de contorno (temperaturas do painel de montagem);
- dissipação interna das células.

Desenvolveu-se um modelo para cada uma das análises acima, baseado no método nodal. No primeiro caso, implementou-se um modelo completo abrangendo todo o corpo de uma bateria e parte do painel de montagem, com discretização suficiente para identificar uma temperatura para cada célula.

Na segunda análise, o modelo desenvolvido abrange somente um quarto do modelo completo (em função da simetria) mas com uma discretização mais refinada, suficiente para verificar gradientes internos de uma célula (modelo detalhado).

Para determinar os gradientes máximos, simulou-se uma condição crítica em regime permanente, tanto no modelo completo como no detalhado.

Simulou-se, também, a condição de regime transitório, com o perfil de potência previsto para uma situação de voo, durante uma órbita.

PRINCÍPIOS DO MÉTODO NODAL

A técnica de modelamento utilizada neste estudo é conhecida pelo nome de "Método Nodal" e é baseada no princípio dos volumes de controle.

Simular o comportamento térmico de um modelo através desta técnica significa subdividir o objeto em estudo em um número finito de volumes elementares denominados nós. Estes nós estão interligados através de condutâncias térmicas cuja expressão varia segundo o

tipo de troca considerada. A cada nó do sistema estão ainda associados uma capacitância térmica, representando a variação da energia interna do nó, e eventualmente um termo de fluxo.

Esta técnica de modelamento leva, em última instância, a um sistema de equações álgebro-diferenciais fortemente não lineares devido a presença de termos radiativos. A resolução deste sistema de equações será feito através do programa de análise térmica ANATER: o regime permanente é obtido com o auxílio de um método iterativo de Gauss-Seidel enquanto que o regime transitório utiliza um algoritmo semi-implícito (Crank-Nicholson).

A geração de uma malha tridimensional assim como o cálculo das condutâncias térmicas entre os diferentes nós do modelo necessitou a criação de um programa de pré-processamento geométrico. Para a verificação da malha gerada e para a análise dos resultados na fase de pós-processamento desenvolveu-se um programa de visualização gráfica baseado na biblioteca gráfica GKS.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Configuração proposta da bateria. Cada bateria é composta por 18 células Ni-Cd hermeticamente seladas. As células estão dispostas em duas filas de 9 células e comprimidas entre si através de tirantes. As células são envoltas em fitas auto-adesivas de poliamida (kapton) para isolamento elétrica. Entre as células estão colocadas placas intercalares de alumínio, com espessura de 0,5 mm. A placa de base tem espessura de 6 mm com rebaixamento de 1 mm na face colada ao painel. Esta placa tem por objetivo transmitir o calor gerado nas células para o painel do satélite. Todos os espaços vazios são preenchidos com borracha de silicone. A bateria é toda recoberta por superisolante (MLI - multilayer insulator) no intuito de isolá-la do compartimento onde se encontra. Ver Figura 1.

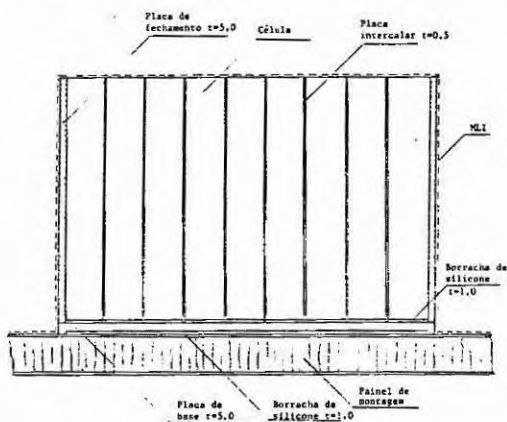


Fig. 1 Configuração da bateria.

As 4 baterias do satélite CBERS estão fixadas na face interna de um painel "honeycomb" conforme a disposição apresentada na Figura 2. Na face oposta do painel, que está voltada para o espaço, estão localizadas as janelas de rejeição de calor (radiadores). Estas janelas são superfícies do próprio painel revestido com material de alta emissividade (0,87), por onde é irradiado o calor dissipado na bateria. As demais superfícies do painel são recobertas por MLI.

Descrição das células. A configuração esquemática de uma célula é mostrada na Figura 3. A Tabela 1 apresenta os dados de cada componente indicado na Figura 3.

Os eletrodos positivos e negativos são intercalados, e isolados eletricamente por separadores de nylon de espessura de 0,3 mm. Tanto os eletrodos como os separadores são embebidos em solução de KOH.

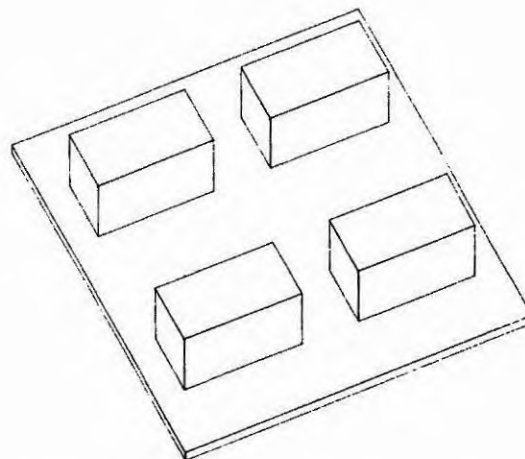


Fig. 2 Disposição das baterias sobre o painel.

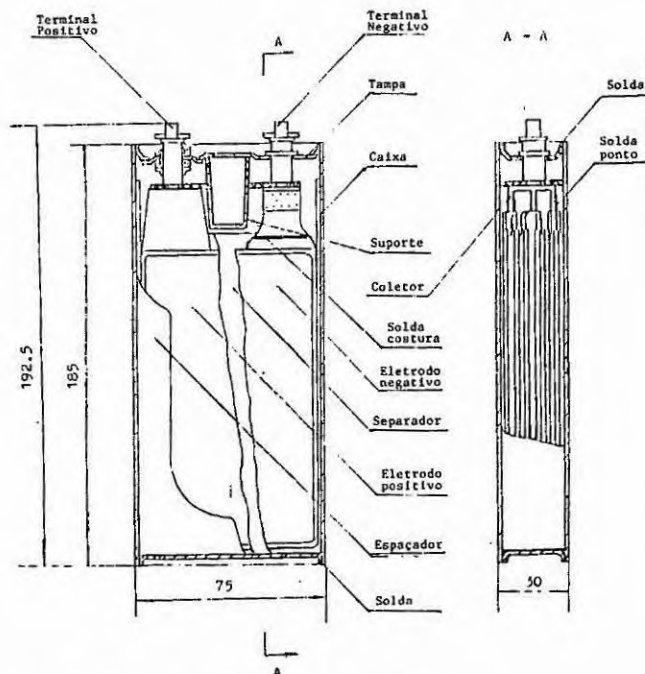


Fig. 3 Estrutura interna das células.

Tabela 1 - Descrição dos componentes das células

! componente	! qde !	! material !	! dimensões mm !			! massa !
! !	! !	! !	! L !	! t !	! h !	! (g) !
! caixa	! 1 !	! aço inox !	! 75 !	! 30 !	! 185 !	! 145 !
! tampa	! 1 !	! aço inox !	! 74 !	! 0,5 !	! 29 !	! 9,2 !
! eletrodo neg	! 12 !	! cádmio !	! 70 !	! 0,9 !	! 144 !	! 34 !
! eletrodo pos	! 11 !	! níquel !	! 70 !	! 0,9 !	! 144 !	! 33 !
! separador	! 1 !	! nylon !	! 1830 !	! 0,3 !	! 310 !	! 23 !
! terminal neg	! 1 !	! aço inox !	! diam 8 !	! !	! 15 !	! 7,3 !
! terminal pos	! 1 !	! aço inox !	! diam 8 !	! !	! 15 !	! 7,3 !
! coletor	! 2 !	! aço inox !	! 15 !	! 20 !	! 10 !	! 6,5 !
! espaçador	! 1 !	! policloro !	! 74 !	! 28 !	! 175 !	! 6,9 !
! !	! !	! etileno !	! !	! !	! !	! !
! suporte	! 1 !	! poliacri !	! 65 !	! 27 !	! !	! 7 !
! !	! !	! leno !	! !	! !	! !	! !
! eletrólito	! !	! KOH 30% !	! !	! !	! !	! 145 !
! total	! !	! !	! !	! !	! !	! 1424,2 !

Parâmetros de projeto. As baterias têm as seguintes restrições térmicas:

- a) temperatura de operação: 0 a 15 C;
- b) máxima diferença de temperatura entre duas células: 2 C (entre pontos homólogos);
- c) máxima diferença de temperatura entre dois pontos de uma célula: 2 C.

A restrição a) não será considerada neste trabalho uma vez que o nível de temperatura depende dos fatores externos a bateria. Esta análise já foi realizada e seus resultados serão utilizados como condição de contorno para o presente estudo.

Hipóteses adotadas. As seguintes hipóteses foram utilizadas no modelamento matemático da bateria:

- a) Não há trocas de calor por radiação através das superfícies da bateria, ou seja, considera-se que o MLI é um isolante perfeito;
- b) A temperatura do painel, na região que contorna o radiador, é fixa (condição de contorno);
- c) A carga externa de albedo e radiação terrestre incidentes sobre o radiador não é considerada;
- d) Para cada célula foram calculadas as condutividades térmicas equivalentes nas direções perpendiculares às faces [1].

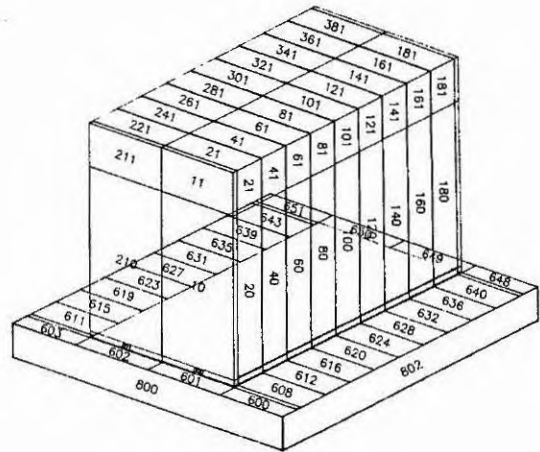


Fig. 5 Divisão nodal do modelo completo.

GRADIENTES DE TEMPERATURA DEVIDO A FATORES EXTERNOS

Objetivo. Este estudo visa determinar a diferença de temperatura entre as células da bateria, provocada por uma assimetria térmica no painel de montagem. Esta assimetria foi detectada no estudo térmico do compartimento da bateria cujos resultados são mostrados na Figura 4. Verifica-se nesta figura que as temperaturas dos nós vizinhos às janelas não são simétricas.

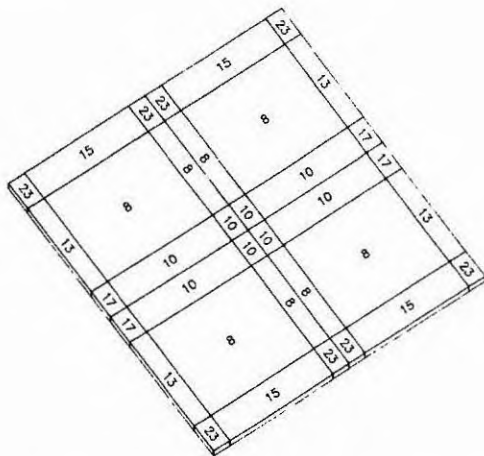


Fig. 4 Temperatura do painel de montagem da baterias.

Descrição do modelo completo. O domínio do modelo completo abrange uma bateria e uma parte do painel correspondente à janela. A divisão nodal é apresentada na Figura 5. O modelo é composto por 247 nós, sendo que 5 deles são nós de contorno: um representando o espaço e um nó em cada borda da janela, através dos quais introduz-se a assimetria térmica do painel. A Tabela 2 apresenta o número de nós para cada componente do sistema.

As trocas de calor consideradas são:

- a) condução entre os vários nós da bateria e do painel;
- b) radiação entre os nós de superfície do painel e o espaço.

A dissipação interna das células foram simuladas impondo-se uma geração de calor homogeneamente distribuída na região dos eletrodos de cada célula.

Tabela 2 Distribuição de nós para os componentes do sistema.

! item	! qde	! nós/	! total
! item	! item	! item	! nós
!células	! 18	! 2	! 36
!placas de fechamento!	! 2	! 4	! 8
!placas intercalares!	! 8	! 4	! 32
!gap base da célula!	! 18	! 1	! 18
!placa de base	! 1	! 22	! 22
!gap na placa de base!	! 1	! 22	! 22
!painel	! 1	! 52	! 52
!superf. ext. painel!	! 1	! 52	! 52
!contorno do painel!	! 4	! 1	! 4
!espaço	! 1	! 1	! 1
!total de nós sistema!			! 247

Resultados. Para este caso a dissipação interna considera é 0,53 W (valor médio dissipado na órbita) e as condições de contorno são aquelas apresentadas na Figura 4.

As temperaturas resultantes, em regime permanente, estão apresentadas nas Figuras 6 e 7.

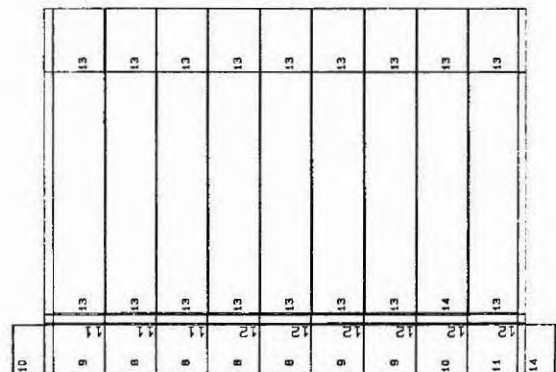


Fig. 6 temperaturas das células e do painel.

13	14	13	13	13	13	13	13	13	13
13	14	13	13	13	13	13	13	13	13

Fig. 7 temperaturas das células.

Conclusão. Os resultados mostram que a assimetria nas temperaturas do painel não afetam de forma considerável os gradientes de temperatura entre as células. Deve-se notar que o gradiente devido a assimetria nas temperaturas do painel é a diferença entre as temperaturas das células das extremidades. A maior temperatura é observada nas células centrais devido a dificuldade de escoamento do fluxo para as regiões frias do painel.

GRADIENTES DE TEMPERATURA PROVOCADOS PELA DISSIPACÃO INTERNA

Objetivo. Com o modelo anterior concluiu-se que a assimetria térmica no painel não provoca distorções consideráveis na distribuição de temperatura da bateria.

Neste estudo, o objetivo é determinar com maiores detalhes, os gradientes internos da bateria, provocados pela própria dissipação térmica das células. Para tanto desenvolveu-se um modelo mais detalhado no sentido de se poder conhecer os gradientes dentro de uma célula.

Descrição do modelo detalhado. O modelo detalhado abrange somente um quarto do domínio considerado no modelo completo. Isto é possível em função da simetria tanto geométrica como das condições de contorno, uma vez que a assimetria nas temperaturas dos painéis tem pouca influência nos gradientes internos da bateria.

A divisão nodal é apresentada na Figura 8. Cada célula foi dividida em 5 nós, uma para a região dos terminais e 4 para a região dos eletrodos. A tabela 3 apresenta o número de nós de cada componente do sistema.

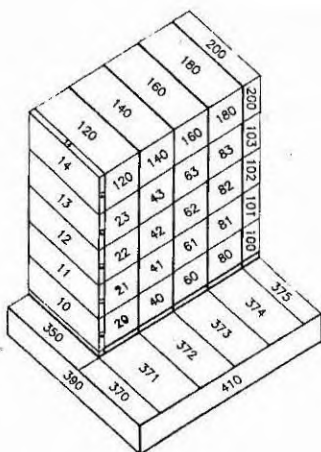


Fig. 8 Divisão nodal no modelo detalhado.

Tabela 3 - Distribuição de nós para cada componente do sistema.

item	qde item	nós/ item	total nós
!células	4	5	20
!meia célula	1	5	5
!placas de fechamento	1	5	5
!placas intercalares	4	5	20
!gap base da célula	5	1	5
!placa de base	1	10	10
!gap na placa de base	1	10	10
!painel	1	13	13
!superf. ext. painel	1	13	13
!contorno do painel	2	1	2
!espaço	1	1	1
!total de nós sistema!			104

Resultados. Simulou-se, neste caso, a condição crítica correspondente a uma dissipação de pico de 1,50 W por célula em regime permanente. As temperaturas de contorno no painel utilizadas foram de 13 e 15 C. As temperaturas resultantes são apresentadas na Figura 9.

15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13
15	13	15	13	15	13	15	13	15	13

Fig. 9 temperaturas do modelo detalhado.

Conclusão. Os resultados mostram que os gradientes, provocados pelas dissipações internas, não ultrapassam o limite permitido que é de 2 C. O nível de temperatura obtido não deve ser considerado uma vez que se utilizou potência de pico, em regime permanente. Na situação real, esta potência só é dissipada durante 35% do tempo total de uma órbita.

ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO

Objetivo. Numa situação real, a bateria dissipa calor quando está em regime de descarga, ou seja, durante o período em que o satélite está na sombra da terra. Durante o período de insolação, a bateria é recarregada e não dissipa calor. Desta forma, a bateria dissipa 1,50 W (por célula) durante 35 minutos e permanece sem dissipação durante o restante da órbita (65 minutos). O objetivo aqui é de simular o comportamento térmico da bateria considerando a sua dissipação real durante a órbita.

Resultados. Utilizou-se o modelo detalhado para esta análise. O perfil de temperatura obtido após várias órbitas de simulação, ou seja, em regime transiente, são apresentados na Figura 10.

thermal gradient, are analysed: thermal environment and internal heat dissipation. Two mathematical models are developed and the thermal gradients are calculated using critical cases. A transient analysis is performed to simulate the flight condition. The thermal modelization is based on the nodal method and is performed using the PCTER thermal analysis software.

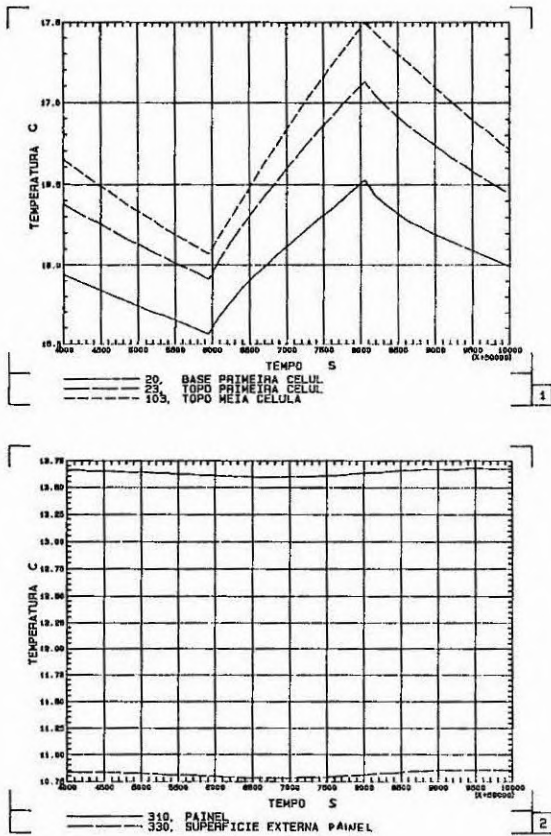


Fig. 10 Temperaturas em regime transiente.

Conclusão. O maior gradiente entre células ocorre no final da fase de dissipação, e está consideravelmente abaixo do limite especificado de 2 C.

Verifica-se uma variação, durante a órbita, de aproximadamente 1,5 C na temperatura da parte superior da célula e de 1,0 C na parte inferior.

A influência da dissipação cíclica da bateria na temperatura do painel é pequena, conforme mostra o Gráfico 2 da Figura 10.

CONCLUSÃO FINAL

Para os níveis de potência analisados, o projeto de empacotamento satisfaz os requisitos térmicos.

Nota-se uma diferença de temperatura considerável (5 C) entre a base da bateria e o painel de montagem. Isto é consequência de uma alta resistência térmica entre eles. Uma maneira de diminuir esta resistência é aumentar a área da placa de base. Esta alternativa pode ser utilizada caso se verifique uma maior dissipação de potência na bateria, ou haja necessidade de diminuir a sua temperatura.

Os modelos desenvolvidos devem ser ajustados a partir de testes experimentais a serem realizados. A maior incerteza do modelo está relacionada com as condutâncias térmicas de contato, que foram obtidos de literatura.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Scott, W. R., Rusta, D. W., "Sealed-Cell Nickel-Cadmium Battery Applications Manual", 1979. (NASA Reference Publication 1052).

ABSTRACT

The present report presents the thermal analysis of the CBERS battery package. The objective is to determine the internal thermal gradients and to verify the battery package design. Two factors, that can cause