



Ciclo de Palestras Sobre Controle Térmico de Satélites

Programas para Análise Térmica

Dr. Issamu Muraoka

Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Projeto Térmico de Satélites

Proposta de projeto \longleftrightarrow Análise

Proposta de projeto \Rightarrow Escolha dos dispositivos de controle térmico (tintas, aquecedores, MLI, tubos de calor, venezianas etc)

Análise \Rightarrow Verificação da performance térmica, da massa, da confiabilidade, da complexidade, do custo, etc.

Verificação da Performance Térmica

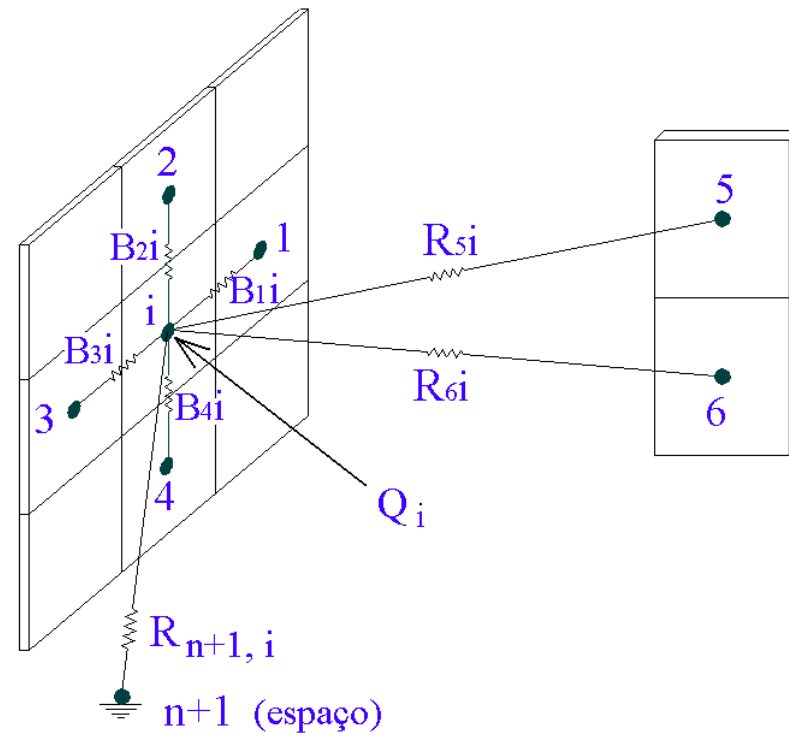
Modelo matemático

- Determinar comportamento térmico em vôo e em teste

Método de análise

- Método nodal (lumped parameter method)
- Analogia elétrica

Equacionamento



$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_{j=1}^n B_{ji} (T_j - T_i) + Q_i \quad i = 1, \dots, n$$

⏟

Variação da
Energia interna

⏟

Trocas por
radiação

⏟

Trocas por
condução

⏟

Fluxo
imposto

Etapas da Análise Térmica

Pré-processamento

Entrar com dados geométricos, de materiais e orbitais

Estabelecer a divisão nodal

Determinar dos coeficientes da equação

$m_i C_{p_i}$ - capacitância térmica

R_{ji} - condutâncias radiativas

B_{ji} - condutâncias condutivas

Q_i - cargas térmicas internas ou externas

Processamento

Resolver o Sistema de Equações

Pós- processamento

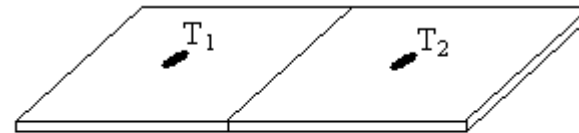
Apresentação das temperaturas ou fluxos
em forma de mapas ou gráficos

Divisão Nodal

Compromisso: Precisão **X** Esforço computacional

Precisão \Leftrightarrow Margens de projeto (usual ± 5 °C)

Regra prática:



$$|T_1 - T_2| < \text{Erro max}$$

Esforço computacional

Número de equações = n

Número de condutâncias radiativas $\sim n^2$

Número de condutâncias condutivas $\sim n$

Capacitância térmica

$$m_i C_{p_i} = \sum_j m_j C_{p_j}$$

Caixas eletrônicas

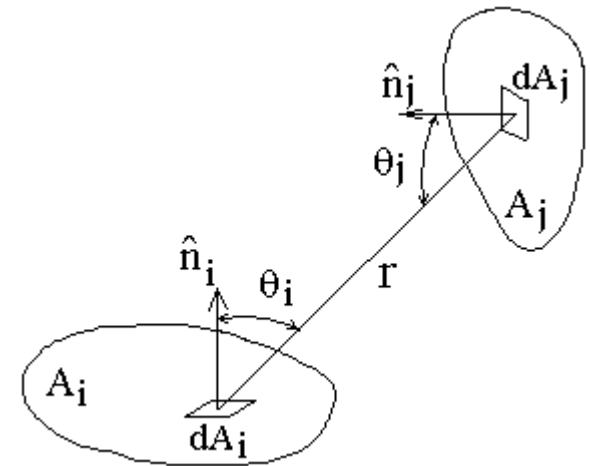
$m_i C_{p_i}$ = massa total X capacidade térmica do alumínio

Condutâncias radiativas

Método da radiosidade

$$B_{ji} = f \text{ (fatores de forma, } \epsilon_{IR} \text{)}$$

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_j \cos\theta_i}{\pi r^2} dA_i dA_j$$

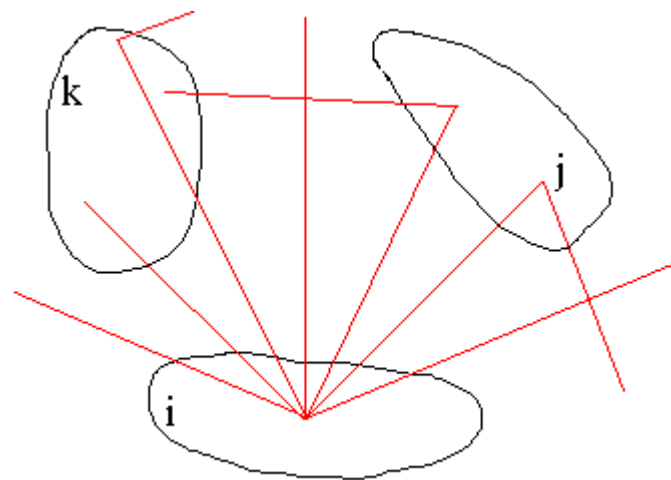


Hipóteses: superfícies opacas, difusas e cinzas

Condutâncias radiativas

Método “Ray tracing”

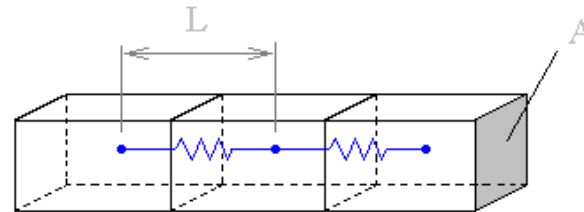
- método estatístico
- disparo de um número grande de raios
- B_{ji} é função dos raios disparados de j e absorvido por i
- aplicável em superfícies difusas, especulares, opacas, semi-transparentes, propriedades com dependência angular



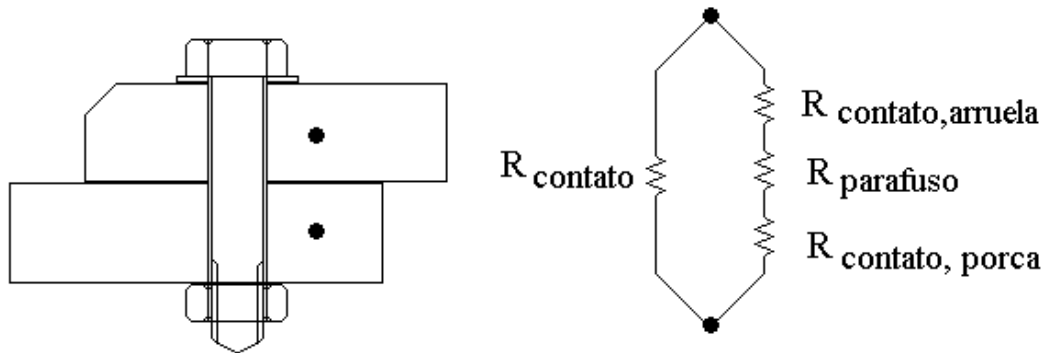
Condutâncias Condutivas

Material homogêneo e geometria regular

$$B_{ij} = \frac{k A}{L}$$



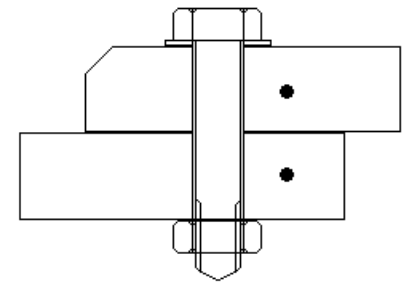
Juntas parafusadas (cálculo manual)



Juntas parafusadas (valores empíricos)

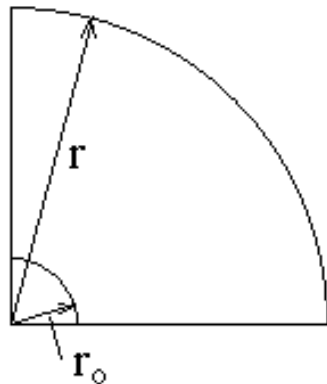
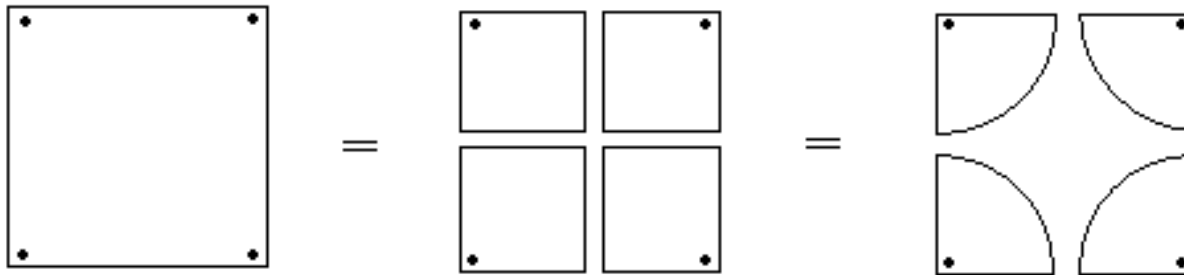
Resistência térmica de juntas com parafuso de aço e placas de alumínio (°C/W)

Parafuso	diâmetro (mm)	Espessura da placa					
		placas finas	0,60 mm	3,18 mm	6,35 mm	9,50 mm	placa rígida
2-56	2,2	9,48					4,74
NC 4-40	2,8	7,59	12,6				3,79
NC 6-32	3,5	5,69	6,61	2,2			2,37
NC 8-32	4,2	3,79	4,5	1,5	0,75		1,25
NF 10-32	4,8	1,9	3,0	1,0	0,5	0,333	0,76
NF 1/4-28	6,4	0,95	2,1	0,7	0,35	0,233	0,28
NF 5/16-24	7,9		1,5	0,5	0,25	0,167	
NF 3/8-24	9,5			0,39	0,194	0,128	
NF 7/16-20	11,1				0,16	0,106	
NF 1/2-20	12,7					0,089	



Referência [1]

Resistência de espalhamento

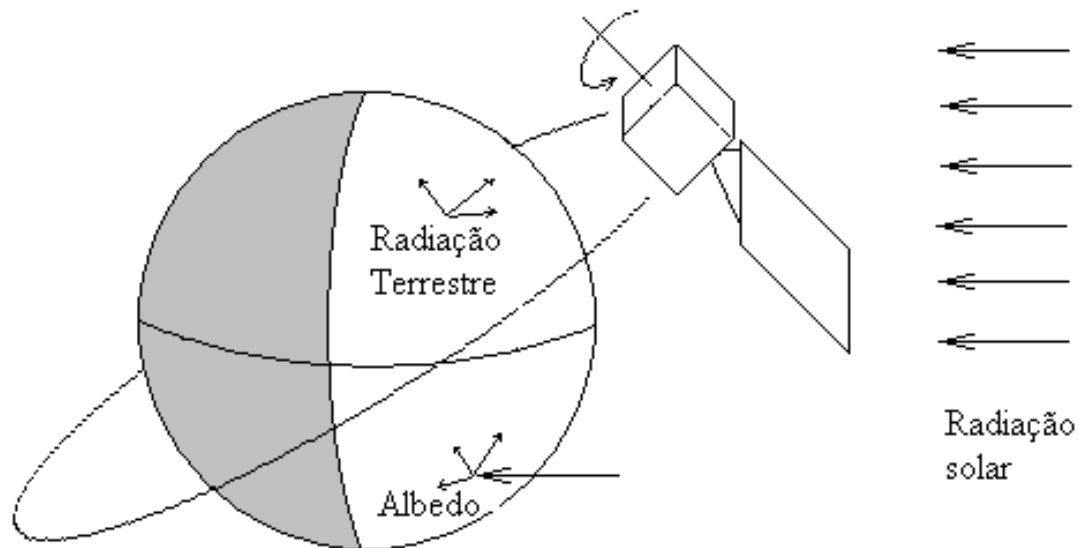


$$R_{\text{espalh}} = \frac{\ln(r / r_0)}{\frac{\pi}{2} k t}$$

$r_0 = 2$ diâmetro do parafuso

Radiações Orbitais

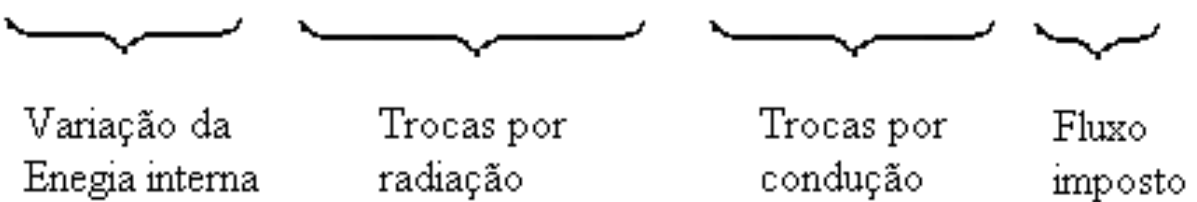
- Radiação solar (espectro solar)
- Albedo (espectro solar)
- Radiação terrestre (espectro infra-vermelho)



-método de cálculo: radiosidade ou “ray tracing”

Solução do Sistema de Equações Diferenciais

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) + \sum_{j=1}^n B_{ji} (T_j - T_i) + Q_i \quad i = 1, \dots, n$$



Varição da Energia interna Trocas por radiação Trocas por condução Fluxo imposto

Solução numérica com discretização no tempo

Regime permanente: sistema de equações algébricas

Programas para Análise Térmica

PCTER	(INPE)
SINDA/FLUINT	(EUA)
TMG/FEMAP	(CANADÁ)
ESATAN/ESARAD	(EUROPA)
SATER100	(BRASIL)

Tabela comparativa entre os programas

Características	PCTER	SINDA / FLUINT	ESATAN / ESARAD	TMG/FEMAP	SATER100
Fornecedor	não-comercial, desenvolvido no INPE	CR Technologies (EUA)	Alstom (Reino Unido)	Maya H. T. technologies (Canadá)	Equatorial (Brasil)
Preço aprox. (versão PC)	-	US\$ 17.000	US\$16.000/ano	US\$ 28.000	US\$ 8.500
Método de modelamento	lumped parameter	lumped parameter	lumped parameter	lumped parameter	volume de controle
Trocas por radiação calculadas por	Radiosidade	Ray tracing	Ray tracing	Ray tracing	Radiosidade
Entrada de dados geométricos	Digitação alfa numérica	Gráfica + digitação alfa numérica	Gráfica + digitação alfa numérica	Gráfica + digitação alfa numérica	Digitação alfa numérica
Visualização geométrica	Estática	Dinâmica	Dinâmica	Dinâmica	Dinâmica
Gerenciador de tarefas	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Partes articuladas	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Modulo de otimização	Sim	Sim	Não	Não	Não

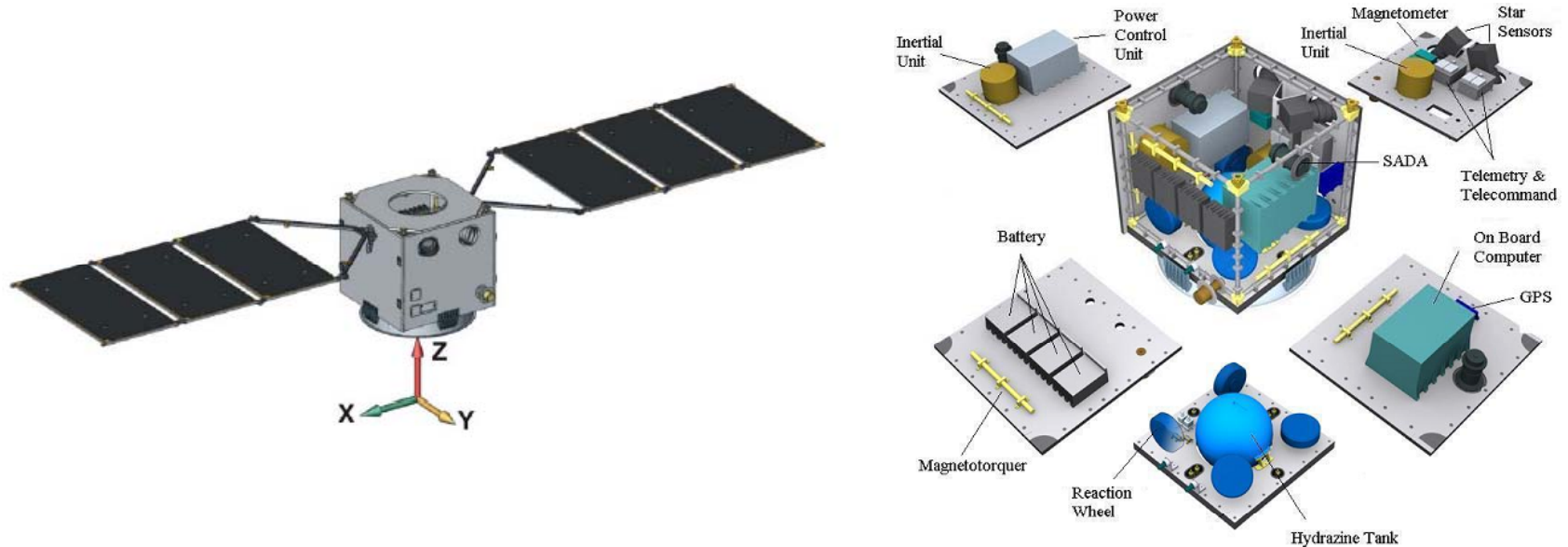
Referências [3,4,5]

Recursos comuns entre os programas

- Cálculo de temperatura, em regime permanente e transitório
- Trocas por condução, radiação e convecção
- Cálculo de radiações térmicas orbitais (radiação solar, albedo e terrestre)
- Propriedades óticas e térmicas variáveis
- Simulação de aquecedores controlados

Exemplo de Análise Térmica utilizando PCTER

Plataforma Multi-Missão (PMM)



Corpo principal: 1m x 1m x 1m, 250 kg

Orbita: equatorial ($i < 15^\circ$) ou polar, altitude 600 ~ 1200 km

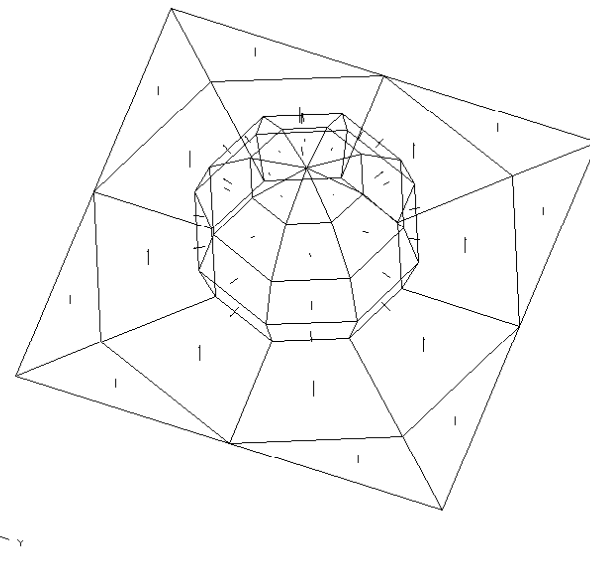
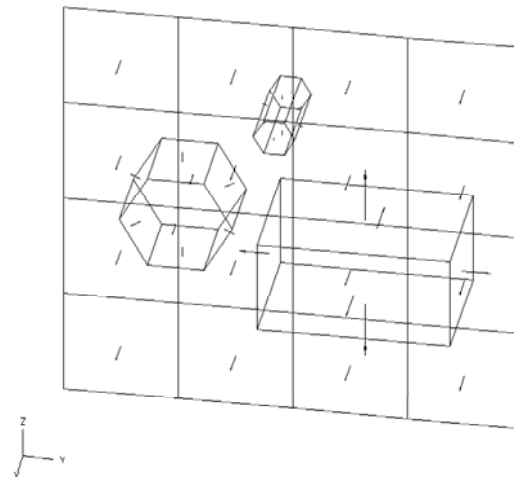
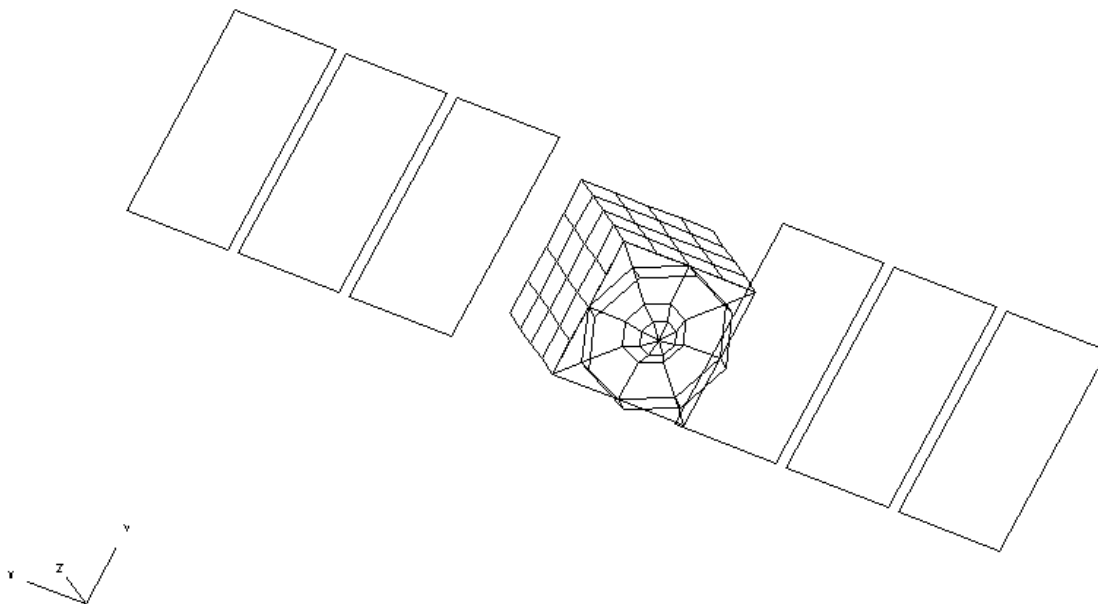
Atitude: orientação inercial ou para a terra

Divisão Nodal

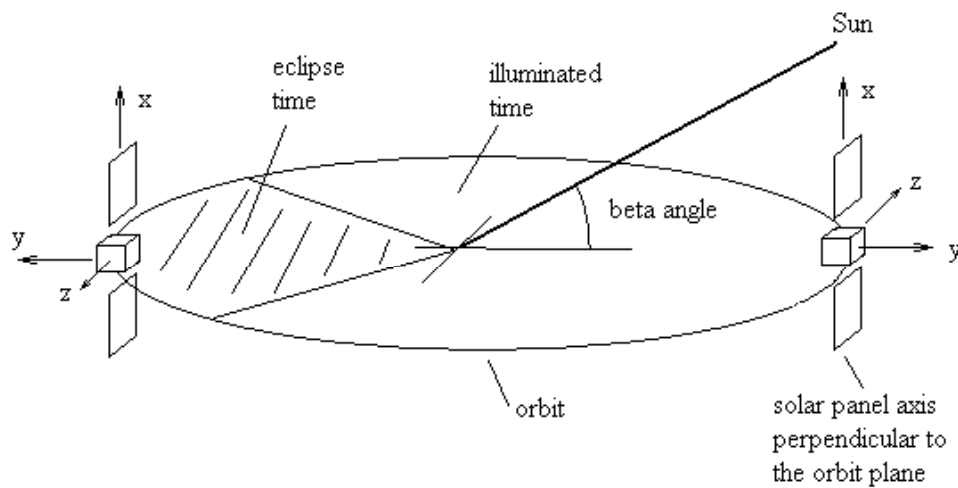
Número de nós: ~200

Condutâncias radiativas: ~3150

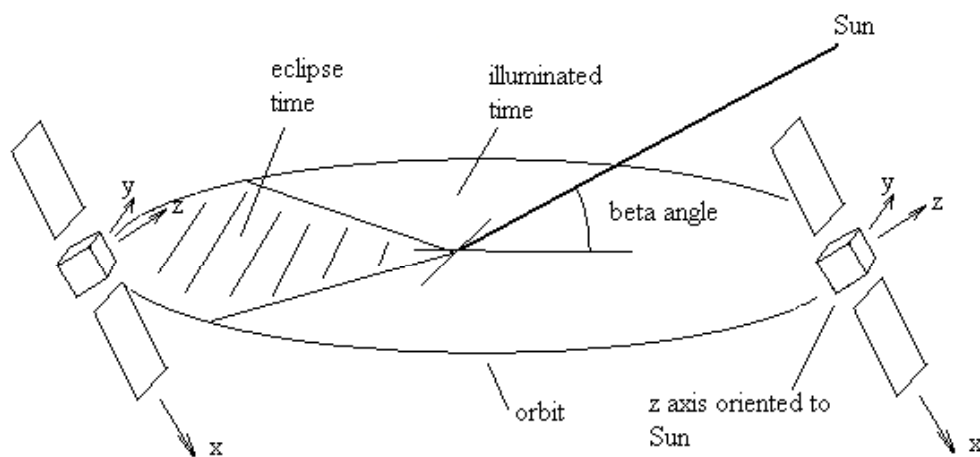
Condutância condutivas: ~400



14 Tipos de Órbitas Analisadas



Face -Y voltada para a terra



Face +Z voltada para o sol

Projeto Térmico

Superfícies externas

- Faces laterais: manta MLI e tinta branca
- Face inferior: manta MLI e alumínio polido
- Face superior: manta MLI

Superfícies internas

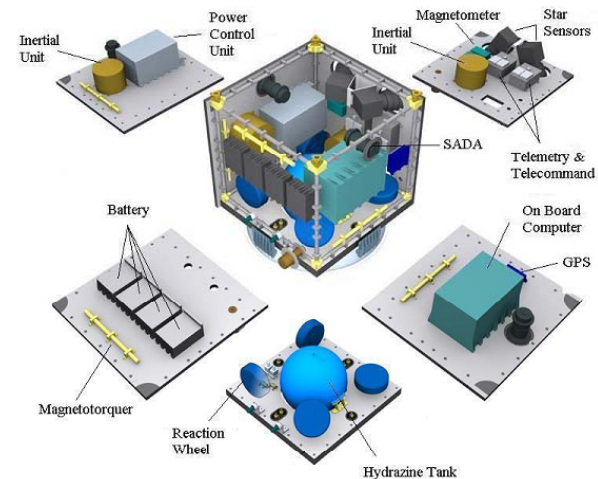
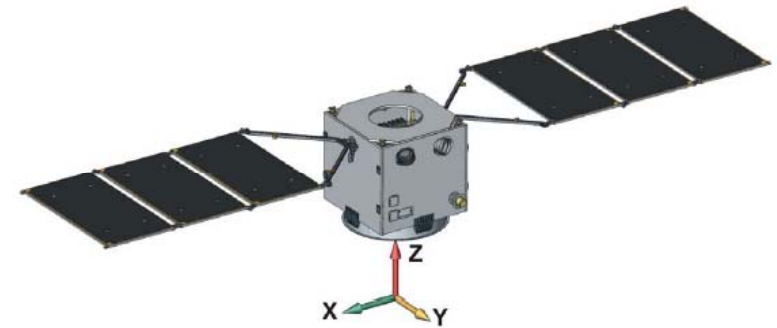
- Tinta negra
- Bateria e tanque: manta MLI

Arruelas isolantes

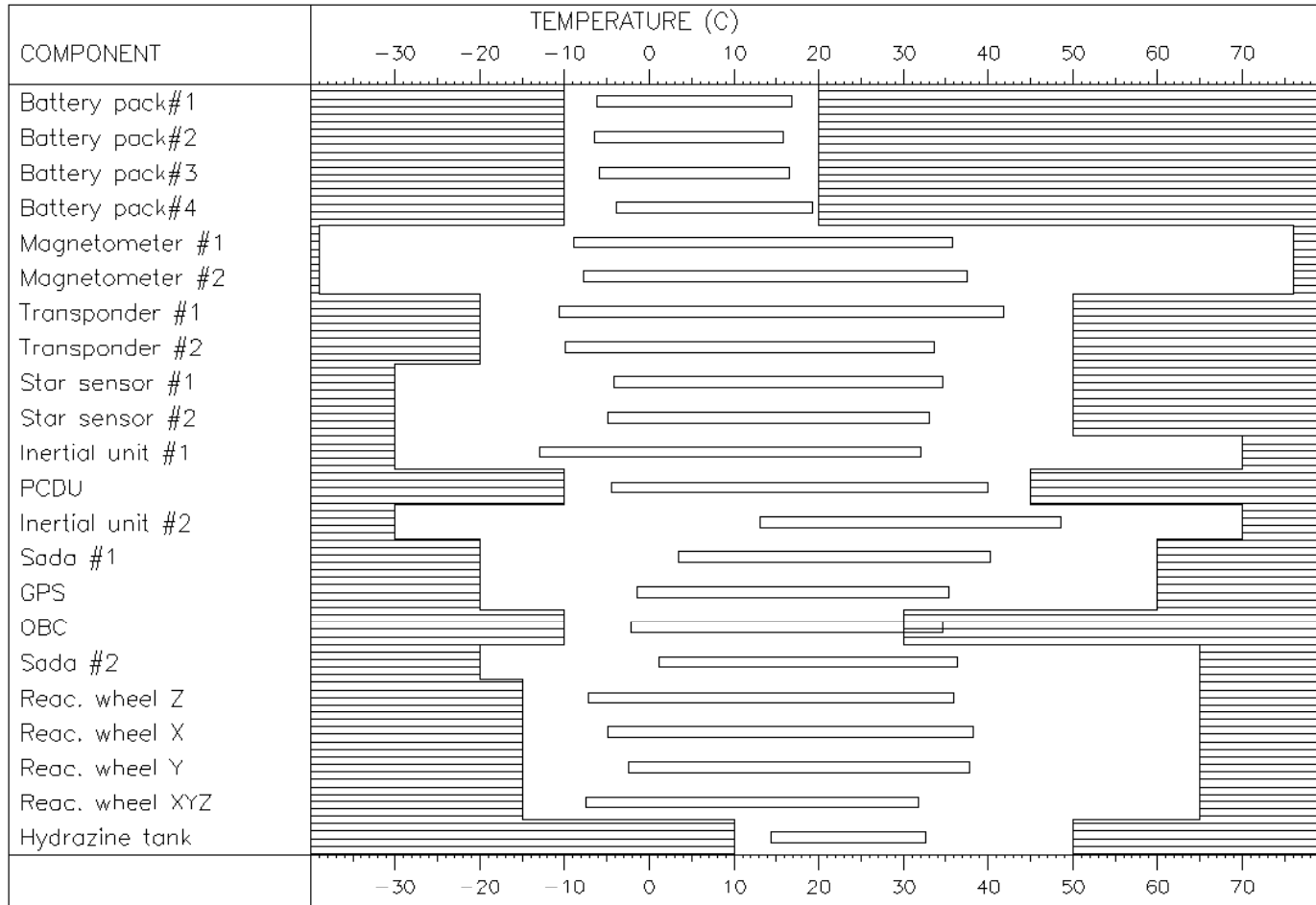
- Painel da bateria e tanque

Aquecedores

- Bateria e tanque

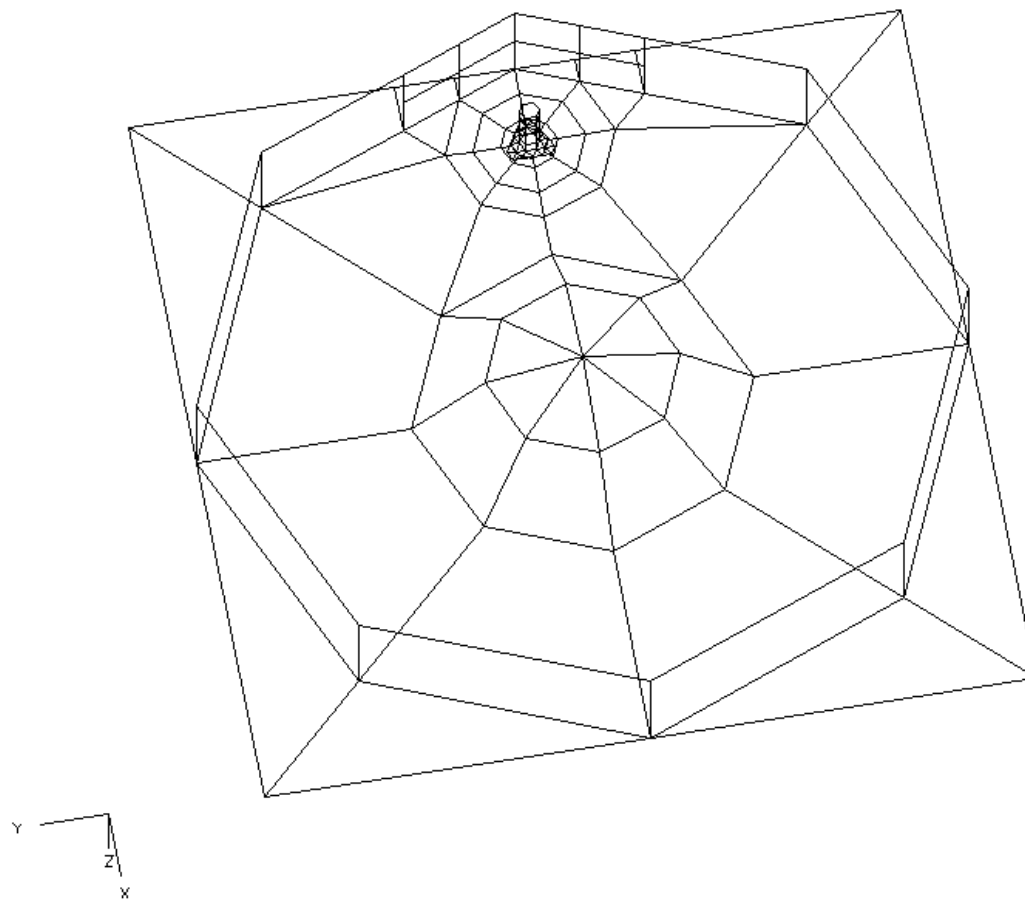


Temperaturas previstas x limites operacionais



Modelo Local

- Estudar comportamentos locais



Referências

1. Gilmore, D.G. "Satellite Thermal Control Handbook". El Segundo, CA, The Aerospace Corporation Press, 1994.
2. Karam, R.D. "Satellite Thermal Control for Systems Engineers", Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 181, 1998.
3. Site da C&R Technologies <http://www.crtech.com>
4. Site da Alston Power Turbo-Systems
<http://www.techcentreuk.power.alstom.com>
5. Site da Maya Heat Transfer Technologies Ltd.
<http://www.mayahtt.com>