POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi termica di un sistema multi-pannello trasparente in presenza di rivestimento attivabile per veicoli spaziali di nuova generazione

Relatore

Candidato

Prof. Paolo MAGGIORE

Adriano PALUMBIERI

Sommario

Negli ultimi anni il mercato spaziale è stato tra i settori con il più alto tasso di crescita globale. Tra le varie motivazioni, si riconosce alla base un aumento della consapevolezza generale di quanto questo settore sia determinante per il progresso tecnologico; e per le sue applicazioni trasversali in tutti gli altri settori. In questo contesto si colloca la doppia necessità ed esigenza di avere delle strutture che permettano l'osservazione all'esterno, che sia per attività extraveicolari (EVA) o per turismo, e che tale osservazione avvenga in totale sicurezza. In collaborazione con la divisione italiana di Thales Alenia Space, si è voluto quindi studiare il comportamento termico nello spazio di un sistema innovativo di multi-pannello trasparente in presenza di un rivestimento che andasse a schermare, quando richiesto, la luce incidente in ingresso. Il presente lavoro di tesi magistrale si propone quindi di analizzare le possibili configurazioni pannello-rivestimento e valutare quale sia la configurazione ottimale da realizzare. La trattazione inizia con il richiamare i concetti alla base della trasmissione del calore, i fenomeni radiativi in ambiente spaziale e le proprietà radiative valide per materiali trasparenti. Nel secondo capitolo si introducono i dati del materiale e le relative condizioni al contorno necessarie, per poi passare allo studio analitico di come i flussi e le temperature si distribuiscano all'interno del sistema analizzato, e a seconda della configurazione esaminata. Nel terzo capitolo si fornisce un'ulteriore analisi attraverso la realizzazione di un modello termico mediante software SIMSCAPE e linguaggio Matlab partendo dal modello analitico esaminato in precedenza. Infine nell'ultimo capitolo si confrontano e discutono i risultati ottenuti che mostrano i valori dei flussi termici e delle temperature caratteristiche su ciascun pannello, in base a dove si è deciso di posizionare il rivestimento e relativamente alla condizione di esposizione studiata.

Ringraziamenti

Indice

El	enco	delle tabelle				VI
\mathbf{El}	enco	delle figure				VII
1	Noz	oni introduttive				1
	1.1	Trasferimento del calore				. 1
		1.1.1 Conduzione \ldots \ldots				. 1
		1.1.2 Convezione \ldots			•	. 2
		1.1.3 Irraggiamento				. 3
	1.2	Fenomeni radiativi nello spazio \ldots				. 6
		1.2.1 Radiazione solare				. 7
		1.2.2 Albedo			•	. 7
		1.2.3 Radiazione Planetaria			•	. 7
	1.3	Proprietà dei materiali trasparenti .			•	. 8
		1.3.1 Singolo pannello			•	. 9
		1.3.2 Pannello rivestito			•	. 10
		1.3.3 Pannelli multipli paralleli in s	erie	•••	•	. 12
2	Trat	tazione analitica del modello teri	mico			13
	2.1	Considerazioni sui materiali per l'ana	alisi			. 13
		2.1.1 Proprietà termo-ottiche dei pa	annelli			. 14
		2.1.2 Proprietà termo-ottiche del riv	vestimento			. 15
	2.2	Configurazioni possibili del sistema p	annello-rivestimento			. 20
		2.2.1 Configurazione test e condizio	oni al contorno			. 22
	2.3	Impostazione del bilancio termico .				. 23
		2.3.1 Caso multi-pannello non rives	stito			. 24
		2.3.2 Caso multi-pannello con rivest	timento attivo	• •	•	. 27
3	Ana	isi termica mediante Simscape				28
	3.1	Introduzione al software				. 28
		3.1.1 Definizione degli elementi, sen	nsori e sorgenti termiche		•	. 28

	3.2	Modello termico del sistema	31
		3.2.1 Heat Source Generator	32
		3.2.2 Primo pannello	33
		3.2.3 Secondo e Terzo Pannello	34
		3.2.4 Quarto Pannello	35
		3.2.5 Rivestimento	36
	3.3	Esportazione risultati	37
4	Ana	lisi dei risultati	39
	4.1	Validazione della configurazione ottimale prevista	39
	4.2	Sistema in presenza di rivestimento attivo	42
	4.3	Sistema in presenza di rivestimento non attivo	44
	4.4	Confronto ON/OFF dei rivestimenti	45
	4.5	Flussi assorbiti dal sistema e dal veicolo spaziale	47
5	Coc	lusione	50
A	Tab	elle	52
Bi	bliog	grafia	56

Elenco delle tabelle

1.1	Valori tipici del coefficiente di scambio convettivo	3
2.1	Proprietà termo-ottiche del Fused Silica	16
2.2	Proprietà termo-ottiche del PMMA	16
2.3	Proprietà termo-ottiche dello Scratch PC	17
2.4	Condizioni al contorno del sistema	23
4.1	Orbita di riferimento considerata [9]	43
A.1	Rivestimento12, temperature in K	52
A.2	Rivestimento23, temperature in K	52
A.3	Rivestimento34, temperature in K	53
A.4	Rivestimenti Attivi, temperature in K	53
A.5	Rivestimenti non attivi, temperature in K	54
A.6	Flussi assorbiti	54
A.7	Temperature in (k) in funzione di View Factor 0.6872	55
A.8	Valori assorbanza EC1, EC2 (I dati utilizzati per le analisi sono	
	coperti da NDA e non possono essere condivisi) $\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	55

Elenco delle figure

1.1	Sviluppo dello strato limite termico e della velocità su una lamina	
	$piana[2] \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	2
1.2	Energia emessa per irraggiamento da un corpo nero $[2]$	4
1.3	Assorbanza, Riflettanza e Trasmittanza su una piastra $[4]$	5
1.4	Sistema di resistenze al trasferimento di calore per irraggiamento di	
	due corpi grigi $[4]$	6
1.5	Irraggiamento nello spazio	6
1.6	Andamento Trasmittanza, Riflettanza in funzione della lunghezza	
	d'onda per diversi materiali trasparenti[4]	8
1.7	Riflettanza e trasmittanza in pannello sottile semitras parente $[4]$	9
1.8	Andamento riflettanza normale di una pellicola sottile con effetti di	
	interferenza [4]	11
1.9	Riflettanza e trasmittanza su pannelli multipli in parallelo: (a)	
	descrizione geometrica, (b) interazione del ray tracing tra l'ennesimo	
	pannello e i restanti $[4]$	12
2.1	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti	13
$2.1 \\ 2.2$	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda .	13 18
2.1 2.2 2.3	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda	13 18 18
 2.1 2.2 2.3 2.4 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda .	13 18 18 19
 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda	13 18 18 19 19
 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	13 18 18 19 19 20
 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Caso rivestimento iniziale	13 18 19 19 20 21
 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 19 20 21 22
 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda . Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 19 20 21 22 23
$\begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \\ 2.4 \\ 2.5 \\ 2.6 \\ 2.7 \\ 2.8 \\ 2.9 \\ 2.10 \end{array}$	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 19 20 21 22 23
$2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \\ 2.4 \\ 2.5 \\ 2.6 \\ 2.7 \\ 2.8 \\ 2.9 \\ 2.10$	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 19 20 21 22 23 24
2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 2.10 2.11	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 19 20 21 22 23 24 25
2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 2.10 2.11 2.12	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	$13 \\ 18 \\ 19 \\ 19 \\ 20 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \\ 24 \\ 25 \\ 26 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 10 \\ 1$
$\begin{array}{c} 2.1 \\ 2.2 \\ 2.3 \\ 2.4 \\ 2.5 \\ 2.6 \\ 2.7 \\ 2.8 \\ 2.9 \\ 2.10 \\ 2.11 \\ 2.12 \\ 2.13 \end{array}$	Disposizione in serie delle varie tipologie dei pannelli trasparenti Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda Caso rivestimento iniziale	 13 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27

3.1	Elementi, sensori e sorgenti termiche	29
3.2	Modello termico del sistema multi-pannello non rivestito	31
3.3	Heat Source Generator	32
3.4	Dettaglio primo pannello	33
3.5	Dettaglio secondo e terzo pannello	34
3.6	Dettaglio quarto pannello	35
3.7	Dettaglio rivestimento	36
3.8	Blocco Mux definito con 15 porte di ingresso e una di uscita per	
	esportazione dati	38
4.1	Configurazione rivestimento tra pannello 1 e 2: confronto in funzione	
	della tecnologia e del view factor	40
4.2	Configurazione rivestimento tra pannello 2 e 3: confronto in funzione	
	della tecnologia e del view factor	41
4.3	Configurazione rivestimento tra pannello 3 e 4: confronto in funzione	
	della tecnologia e del view factor	41
4.4	Andamento delle temperature nel sistema multi-pannello nel caso:	
	non rivestito, EC1 attivo e EC2 attivo	42
4.5	Andamento delle temperature nel sistema multi-pannello per EC1	
	in condizioni di View Factor $F = 1 e F = 0.6872 \dots \dots \dots$	44
4.6	Andamento di EC1 e EC2 non attivi in confronto a sistema non	
	rivestito	45
4.7	Confronto EC1 in modalità attiva e non attiva	46
4.8	Confronto EC2 in modalità attiva e non attiva	46
4.9	Flussi assorbiti dal sistema e dal veicolo spaziale	47
4.10	Flussi assorbiti da ciascun pannello	48

Capitolo 1 Nozioni introduttive

In questo primo capitolo si richiamano le forme di trasferimento del calore esistenti in natura: *conduzione*, *convezione* e *irraggiamento*. Vengono quindi riportate le considerazioni che valgono in ambiente spaziale, dove l'irraggiamento è l'unica forma rilevante di trasferimento del calore e i relativi contributi sono dati dalla *radiazione solare*, l'*albedo*¹ e la *radiazione planetaria*². Infine si introduce il comportamento termo-ottico dei materiali trasparenti e come varia in base all'introduzione di un rivestimento o di una serie di pannelli in parallelo.

1.1 Trasferimento del calore

In natura, riconosciamo tre tipologie di propagazione e trasferimento del calore. Tipicamente definiamo per conduzione la propagazione attraverso i corpi solidi o fluidi in condizioni stazionarie, per convezione quella che avviene in presenza di fluidi in condizioni non stazionarie e infine per irraggiamento quella che ha per mezzo lo spazio, anche vuoto. Il trasferimento è possibile grazie alla presenza di una differenza di temperatura tra i corpi studiati.

1.1.1 Conduzione

A livello microscopico definiamo la conduzione come il risultato dell'interazione cinetica delle molecole, o degli elettroni liberi, che urtano tra di loro, a seconda che si parli di liquidi o solidi. Questo comportamento di trasmissione del calore per

 $^{^1\}mathrm{Radiazione}$ dovuta alla riflessione della radiazione solare sul pianeta in cui il veicolo spaziale orbita

 $^{^{2}}$ Caratteristica del pianeta, se per l'albedo si tratta di una *riflessione* del sole, in questo caso si parla di *emissione* ed è in funzione della temperatura media del pianeta

conduzione è definita dalla *legge di Fourier* che nel caso unidimensionale è definita come:

$$\dot{Q} = -KA\frac{\delta T}{\delta x} \tag{1.1}$$

dove \dot{Q} è la velocità del flusso di calore attraverso l'area A nella direzione x positiva, sempre normale alla sezione attraversata. La costante di proporzionalità k è chiamata conducibilità termica del materiale, è una quantità positiva e si misura come $\left[\frac{W}{mK}\right]$. Se la temperatura diminuisce nella direzione x positiva, allora dT/dx è negativo; motivo per cui si introduce il segno meno.[1]. La trasmissione del calore avviene nel senso del gradiente negativo della temperatura, ovvero dalla zona più calda a quella più fredda, in accordo con il secondo principio della termodinamica.

1.1.2 Convezione

La convezione è dovuta alla presenza di un fluido che lambisce una superficie solida ad una diversa temperatura. Lo scambio di calore in questo caso è dovuto grazie alla velocità relativa che sussiste tra fluido e superficie. Più precisamente, in prossimità della parete solida vengono generate due regioni, uno strato limite idrodinamico e uno strato limite termico. Il primo è dovuto ad una variazione del gradiente di velocità che in coincidenza della parete $\frac{\delta v}{\delta y} = 0$ la velocità si assume essere uguale a zero, e il secondo strato limite, quello termico, che ha un andamento opposto al campo della velocità, in particolare si può notare, in figura 1.1, come sulla parete si abbia una T massima.



Figura 1.1: Sviluppo dello strato limite termico e della velocità su una lamina piana[2]

Possiamo inoltre distinguere due tipologie di convezione, forzata e naturale. La prima prevede che il fluido sia appunto forzato a scorrere lungo la superficie per mezzo di un dispositivo esterno (pompa, vento atmosferico), mentre la seconda prevede che il moto del fluido sia causato esclusivamente da forze di galleggiamento indotte dalla diversa densità del fluido in base alle variazioni di temperatura, dall'accelerazione di gravità e dal coefficiente di dilatazione termica del fluido. L'equazione che governa il fenomeno e definisce il flusso di calore convettivo è dato dalla *legge del raffreddamento di Newton*:

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_\infty) \tag{1.2}$$

dove h è il coefficiente di scambio convettivo (Tabella 1.1), A è l'area della parete lambita dal fluido, T_w, T_∞ sono rispettivamente la temperatura della parete e quella all'infinito del fluido.

Processo	h
Convezione Libera	
Gas	2-25
Liquidi	50 - 1000
Convezione Forzata	
Gas	25 - 250
Liquidi	100-20000

 Tabella 1.1:
 Valori tipici del coefficiente di scambio convettivo

1.1.3 Irraggiamento

Tutti i corpi emettono energia, proporzionalmente alla loro temperatura. L'energia di radiazione emessa da un corpo viene trasmessa nello spazio sotto forma di onde elettromagnetiche secondo la teoria delle onde elettromagnetiche classiche di Maxwell o sotto forma di fotoni discreti secondo l'ipotesi di Planck[1]. Nel caso di ambienti con aria estremamente rarefatta, caso tipico nelle applicazioni spaziali, l'irraggiamento è la forma di trasmissione del calore più rilevante. Definiamo quindi l'energia termica emessa da un corpo, descritta dalla *Legge di Stephan-Boltzmann*:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma T_s^4 \tag{1.3}$$

dove $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ e rappresenta la costante di Stephan-Boltzmann, ε è l'emissività di un corpo, è adimensionale e varia tra 0 e 1 a seconda che si tratti di un corpo trasparente, grigio o nero. L'equazione è ottenuta dall'integrazione della distribuzione di Planck che descrive l'emissione valida per un corpo nero in tutte le direzioni, rispetto alla lunghezza d'onda λ (figura 1.2) Un corpo nero quindi ha emissività massima e, secondo la legge di Kirchhoff, per mantenere le ipotesi di equilibrio termodinamico, le pareti devono assorbire ed emettere la stessa



Figura 1.2: Energia emessa per irraggiamento da un corpo nero[2]

quantità di energia. Per questa ragione un corpo nero si definisce come un perfetto assorbitore ed emettitore per qualsiasi lunghezza d'onda e qualsiasi direzione. Per un corpo grigio la trattazione diventa più complessa, in quanto non tutta l'energia viene assorbita (e quindi emessa) ma solo una porzione, ciò che non viene assorbito, viene *riflesso* e *trasmesso* (figura 1.3). Definiamo tre quantità[3]:

• Assorbanza α , la percentuale della radiazione che viene assorbita ($\alpha = 1$ per corpo nero)

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{\alpha}}{\dot{Q}_{I}} \tag{1.4}$$

• Riflettanza ρ , la percentuale della radiazione che viene riflessa ($\rho = 1$ per specchio)

$$\rho = \frac{Q_{\rho}}{\dot{Q}_I} \tag{1.5}$$

• Trasmittanza τ , la percentuale della radiazione che viene trasmessa³ ($\tau = 1$

 $^{^{3}}$ La parte trasmessa si differenzia da quella emessa in quanto non è generata dal corpo che riceve la radiazione ma semplicemente viene fatta passare attraverso di esso

per trasparente)

$$\tau = \frac{\dot{Q}_{\tau}}{\dot{Q}_{I}} \tag{1.6}$$



Figura 1.3: Assorbanza, Riflettanza e Trasmittanza su una piastra^[4]

Poiché tutta la radiazione, per la conservazione dell'energia deve essere riflessa, assorbita e/o trasmessa, concludiamo che⁴:

$$\dot{Q}_{\rho} + \dot{Q}_{\alpha} + \dot{Q}_{\tau} = 0 \tag{1.7}$$

E quindi sostituendo nella (1.7) le (1.4), (1.5) e (1.6), otteniamo:

$$\rho + \alpha + \tau = 0 \tag{1.8}$$

Se il mezzo è sufficientemente spesso per essere opaco, allora $\tau = 0$ e $\rho + \alpha = 0$. Nel caso di irraggiamento tra due superfici grigie, una emittente e una ricevente, definiamo il calore scambiato come:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_{12}\psi_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$
(1.9)

dove al denominatore sono rappresentati i contributi delle resistenze al trasferimento di calore per irraggiamento dei due corpi grigi: il primo e terzo contributo sono relative ai due corpi grigi, mentre il secondo termine è dovuto allo spazio presente

 $^{{}^{4}}$ La considerazione è valida non solo per l'energia ma anche per i flussi se consideriamo il flusso stazionario e che quindi non varia la sua quantità nel tempo

tra i due (figura 1.4). In particolare il *Configuration Factor*, ψ_{12} , caratteristico dello spazio preso in esame per lo studio. Nel caso di pareti piane parallele di lunghezza infinita $A_1 = A_2 = A$ e $\psi_{12} = 1$, la formula si semplifica:

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A\sigma \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \tag{1.10}$$

$$\begin{array}{c|c} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1} & \frac{1}{A_1\varphi_{12}} \begin{pmatrix} \frac{1}{A_2\varphi_{21}} \end{pmatrix} & \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2} \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ E_{b1} & E_{R1} & E_{R2} & E_{b2} \end{array}$$

Figura 1.4: Sistema di resistenze al trasferimento di calore per irraggiamento di due corpi grigi[4]

1.2 Fenomeni radiativi nello spazio



Figura 1.5: Irraggiamento nello spazio

Come anticipato prima,i fenomeni di trasferimento del calore nello spazio si riducono al solo irraggiamento, in quanto l'aria nello spazio è estremamente rarefatta e non vi è quindi convezione nè conduzione. Risulta quindi utile andare a rilevare tutte le fonti che contribuiscono a definire quello che sarà il bilancio termico oggetto del nostro studio.

1.2.1 Radiazione solare

La radiazione solare rappresenta la forma di radiazione più rilevante per l'analisi termica di un sistema spaziale. Possiamo assumere costante la distribuzione spettrale del sole lungo tutto il sistema solare, mentre l'intensità della radiazione varia in funzione della lunghezza d'onda; si assume che il sole sia un corpo nero ad una temperatura di 5777K (figura 1.2). L'intensità della radiazione solare diminuisce con l'aumentare della distanza, ed è descritta dalla seguente equazione:

$$I_s = \frac{P}{4\pi d^2} \tag{1.11}$$

dove P è la potenza totale emessa dal sole e vale $3.856 \cdot 10^{26} W$ [5], d è la distanza dal sole rispetto al punto studiato che nel nostro caso è l'orbita terrestre, l'equazione (1.11) vale $1367 \pm 0.4\% [\frac{W}{m^2}]$. Possiamo quindi calcolare la radiazione solare assorbita da un superficie piana A:

$$Q_{sun} = \alpha I_s A F_{s/p} \tag{1.12}$$

dove α è l'assorbanza del materiale, $F_{s/p}$ è il view factor che varia nel tempo e secondo i parametri orbitali che definiscono la posizione del satellite rispetto alla Terra.

1.2.2 Albedo

La parte di radiazione solare riflessa dalla superficie o atmosfera di un pianeta prende il nome di Albedo. Questa radiazione dipende dalla composizione dell'atmosfera e della sua superficie, inoltre determina la temperatura superficiale a cui si troverà il pianeta stesso. La radiazione dovuto dall'albedo è così definita:

$$\dot{Q}_{albedo} = b \; \alpha I_s A F_{s/p} \tag{1.13}$$

dove b è il coefficiente relativo all'albedo e per la terra ha un valore medio compreso tra $0.31 \div 0.39$, questo perchè è fortemente influenzato da ciò che si trova sulla superficie: la neve fresca, per esempio, ha un albedo di circa 0,8-0,9, un deserto o una spiaggia di 0,25-0,30, un prato di 0,15[6].

1.2.3 Radiazione Planetaria

Come già detto nel paragrafo (1.1), ogni corpo, che non si trova ad una temperatura di zero gradi Kelvin, emette energia. Per la Terra si considera una temperatura di equilibrio planetaria di circa 255K. Questa temperatura è quella teorica che raggiungerebbe la Terra se fosse un corpo nero, riscaldata solamente dal sole. In questo modello si esclude l'azione di riscaldamento dovuto dall'atmosfera (effetto serra); in tal caso si raggiungerebbe una temperatura di 288K, il contributo termico dovuto dalla radiazione planetaria è descritto dalla seguente formula:

$$\dot{Q}_{IR} = \alpha_{IR} \, \varepsilon_{pl} A T_{eff}^4 F_{s/p} \tag{1.14}$$

dove ε_{pl} è l'emissività planetaria ed è compresa tra $0.6 \div 1.0$, σ è la costante di Stephan-Boltzmann. T_{eff}^4 è la temperatura ideale teorica e si calcola come:

$$T_{eff}^4 = \frac{P(1-b)}{16\pi\sigma d^2} = 253,7K \tag{1.15}$$

1.3 Proprietà dei materiali trasparenti

Abbiamo detto che il calore dovuto all'irraggiamento, per i corpi grigi, si divide in tre quantità: assorbanza, trasmittanza e riflettanza. Per i materiali trasparenti invece il raggio incidente viene quasi totalmente trasmesso e quindi assorbanza e riflettanza tendono ad essere molto bassi, quasi trascurabili. Questo nello spettro del visibile, ovvero per lunghezze d'onda $\lambda = 0.4 \div 0.7 \mu m$. Nel caso di lunghezze d'onda superiori, ovvero nel campo dell'infrarosso, i materiali, trasparenti nel visibile, iniziano a comportarsi come opachi e quindi ad assorbire il calore dato dall'irraggiamento⁵ (figura 1.6)



Figura 1.6: Andamento Trasmittanza, Riflettanza in funzione della lunghezza d'onda per diversi materiali trasparenti[4]

 $^{^5 {\}rm Questo}$ comportamento si verifica anche per l'aria nell'atmosfera, l'effetto serra, il cui risultato è quello di innalzare la temperatura media effettiva della terra

1.3.1 Singolo pannello



Figura 1.7: Riflettanza e trasmittanza in pannello sottile semitrasparente^[4]

Si considera un vetro otticamento liscio di spessore d, tale per cui rispetto alla lunghezza d'onda sia $d \gg \lambda$. Le proprietà radiative sono facilmente descrivibile dall'analisi del comportamento ottico e dal *ray tracing*. Prendiamo in esame quanto mostrato in figura (1.7), che presenta un pannello con *indice di rifrazione complesso* $m_2 = n_2 - ik_2$; con $k \ll 1$ di modo che la trasmissittanza sia apprezzabile:

$$\tau = e^{-\frac{K_2 d}{\cos\theta_2}} \tag{1.16}$$

dove $\kappa_2 = \frac{4\pi k_2}{\lambda_o}$ è il coefficiente di assorbimento, $\lambda_0 = \frac{1}{\eta_0} = \frac{c_0}{\nu}$ è la lunghezza d'onda incidente nel vuoto e $\frac{d}{\cos \theta_2}$ rappresenta la distanza che il raggio incidente deve percorrere per attraversare il mezzo in un singolo passaggio. Valutiamo ora come unitario il raggio incidente entrante nel pannello e definiamo, secondo la legge di Snell, con ρ_{12} la parte che viene riflessa e con $(1 - \rho_{12})$ la parte rifratta. Il raggio, una volta attraversato il mezzo e aver percorso una distanza di $\frac{d}{\cos \theta_2}$, si trova ad incidere nuovamente il pannello ma dall'interno e con un'intensità pari a $(1 - \rho_{12})\tau$. A questo punto la luce verrà di nuovo divisa in una parte riflessa $(1 - \rho_{12})\tau\rho_{23}$ che tornerà indietro nel pannello e una uscente $(1 - \rho_{12})(1 - \rho_{23})\tau$. La parte riflessa continuerà a rimbalzare internamente nel pannello (come mostrato in figura 1.7) fino a quando tutta l'energia non sarà stata trasmessa,riflessa e assorbita. Sommando i vari contributi descritti e trascurando i contributi più piccoli otteniamo quindi la riflettanza e trasmittanza per un singolo pannello semitrasparente⁶:

$$R_{pannello} = \rho_{12} + \frac{\rho_{23} \left(1 - \rho_{12}\right)^2 \tau^2}{1 - \rho_{12} \rho_{23} \tau^2}$$
(1.17)

$$T_{pannello} = \frac{(1 - \rho_{12}) (1 - \rho_{23}) \tau}{1 - \rho_{12} \rho_{23} \tau^2}$$
(1.18)

Dalla conservazione dell'energia, come descritto dalla equazione (1.8 otteniamo infine l'assorbanza:

$$A_{pannello} = \frac{(1 - \rho_{12}) (1 + \rho_{23}\tau) (1 - \tau)}{1 - \rho_{12}\rho_{23}\tau^2}$$
(1.19)

Se $n_1 = n_2$, allora $\rho_{12} = \rho_{23} = \rho$ e le formule si semplificano in questo modo:

$$R_{pannello} = \rho \left[1 + \frac{(1-\rho)^2 \tau^2}{1-\rho^2 \tau^2} \right]$$
(1.20)

$$T_{pannello} = \frac{(1-\rho)^2 \tau}{1-\rho^2 \tau^2}$$
(1.21)

$$A_{pannello} = \frac{(1-\rho)(1-\tau)}{1-\rho\tau}$$
(1.22)

1.3.2 Pannello rivestito

I pannelli rivestiti (coatings) sono sovente utilizzati per mitigare certi tipi di radiazione come la trasmissione dei raggi ultravioletti o anche per ridurre o incrementare la trasmissione in una certa zona spettrale (o in un certo intervallo della lunghezza d'onda). Distinguiamo rivestimenti spessi o a film sottile, a seconda che lo spessore d sia di molto maggiore della lunghezza d'onda incidente o dipenda da essa⁷ Nel caso di rivestimento spesso, definiamo la *riflettanza* attraverso la formula (1.17) definita in precedenza, dove ρ_{12} e ρ_{23} diventano:

$$\rho_{12} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \tag{1.23}$$

$$\rho_{23} = \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}\right)^2 \tag{1.24}$$

 $^{^6\}mathrm{Per}$ la trattazione completa si rimanda in Appendice A

 $^{^7 {\}rm In}$ quest'ultimo caso la lunghezza d'onda genera dei fenomeni di interferenza sul rivestimento a film sottile[4]

Sostituendo infine le equazioni (1.23) e (1.24) nella (1.17) otteniamo:

$$R_{coat} = \frac{\rho_{12} + \rho_{23} - 2\rho_{12}\rho_{23}}{1 - \rho_{12}\rho_{23}} = 1 - \frac{4n_1n_2n_3}{(n_2^2 + n_1n_3)(n_1 + n_3)}$$
(1.25)

Nel caso di un sottile rivestimento dielettrico su un substrato dielettrico, $d = O(\lambda)$, a causa degli effetti di interferenza, la riflettanza del pannello diventa:

$$R_{coat} = \frac{r_{12}^2 + 2r_{12}r_{23}\cos\zeta + r_{23}^2}{1 + 2r_{12}r_{23}\cos\zeta + r_{12}^2r_{23}^2}$$
(1.26)

dove,

$$r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \tag{1.27}$$

$$r_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \tag{1.28}$$

$$\zeta = \frac{4\pi n_2 d}{\lambda} \tag{1.29}$$

Nella figura (1.8) si può notare come il valore della riflettanza assuma un andamento periodico, passando da un valore massimo di $R \approx 0.59$ (per $\zeta = \pi, 3\pi, ...$), a R = 0 (per $\zeta = 2\pi, 4\pi, ...$), dove lo strato svanisce del tutto [4].



Figura 1.8: Andamento riflettanza normale di una pellicola sottile con effetti di interferenza [4]

1.3.3 Pannelli multipli paralleli in serie

Abbiamo finora visto nelle sezioni precedenti il comportamento ottico di un materiale trasparente e di come cambi in funzione di un rivestimento sottile o doppio. Definiamo ora come il comportamento cambi nel caso di più pannelli disposti in parallelo. Per ricavare la riflettanza e trasmittanza totale di n pannelli, dividiamo il sistema in due, da una parte l'ennesimo pannello e dall'altra i restanti (n-1)pannelli; come in figura (1.9). Similmente a quanto fatto in precedenza, otteniamo



Figura 1.9: Riflettanza e trasmittanza su pannelli multipli in parallelo: (a) descrizione geometrica, (b) interazione del ray tracing tra l'ennesimo pannello e i restanti [4]

la riflettenza e trasmittanza per pannelli multipli⁸:

$$R_n = R_1 + T_1^2 R_{n-1} \left[1 + R_1 R_{n-1} + (R_1 R_{n-1})^2 + \dots \right] = R_1 + \frac{T_1^2 R_{n-1}}{1 - R_1 R_{n-1}} \quad (1.30)$$

$$T_n = \frac{T_1 T_{n-1}}{1 - R_1 R_{n-1}} \tag{1.31}$$

dove R_{n-1} e T_{n-1} sono la riflettanza e trasmittanza netta data dagli (n-1) pannelli. L'assorbanza si può calcolare dalla conservazione dell'energia, come fatto in precedenza:

$$A_n = A_1 + \frac{T_1 \left(A_1 R_{n-1} + A_{n-1} \right)}{1 - R_1 R_{n-1}}$$
(1.32)

⁸la formulazione è stata ottenuta assumendo $\rho_{12} = \rho_{23} = \rho$. [4]

Capitolo 2

Trattazione analitica del modello termico

In questo capitolo verranno discusse le proprietà e caratteristiche dei materiali utilizzati per l'analisi. Verranno esposte le possibili configurazioni da adottare per assicurare che la distribuzione delle temperature sulle varie interfacce non superi i limiti termici dati dai pannelli. Si fornirà quindi una formulazione analitica del bilancio termico per il sistema multi-pannello in presenza di rivestimento e si valuteranno i caso che presentano rivestimento attivo e non attivo.

2.1 Considerazioni sui materiali per l'analisi





Il sistema, oggetto del nostro studio, prevede una configurazione di quattro pannelli trasparenti di diverso materiale in serie (figura 2.1):

- *Outer Debris Pane*, in silice (quarzo) fuso è il pannello più esterno del sistema e rappresenta il primo pannello che incontra le radiazioni provenienti dallo spazio. Il compito principale è quello di proteggere l'integrità strutturale del sistema da eventuali detriti spaziali che ne colpiscano la superficie2.1;
- Inner Debris Pane e Pressure Pane, sono i due pannelli interni al sistema considerato e sono realizzati in polimetilmetacrilato (PMMA). Le caratteristiche del materiale sono tali per cui risulta avere una trasmittanza superiore a quella del vetro comune (e di quello in silice fusa) per lunghezze d'onda del visibile; inoltre risulta essere trasparente anche nel campo dell'infrarosso. Di contro ci sono vincoli più stringenti per quanto riguarda il range di temperatura ammissibile2.2;
- *Scratch Pane*, è il pannello a contatto diretto con l'interno del veicolo spaziale, realizzato in PC (policarbonato) e serve per proteggere i pannelli più interni da eventuali danneggiamenti2.3.

Definita la disposizione iniziale dei pannelli trasparenti, è richiesto di valutare la posizione del rivestimento relativamente a quella dei pannelli. Il rivestimento è in materiale elettrocromico (EC) e cioè capace di oscurarsi attraverso un segnale elettrico¹. L'oscuramento è tale per cui il rivestimento si comporti come un corpo opaco per le lunghezze d'onda nel visibile e nell'infrarosso. Sarà quindi importante valutare il profilo termico del sistema a seconda di dove il rivestimento verrà posizionato. Per il rivestimento sono state analizzate due tipologie diverse di materiale²:

- Elettrocromico 1, (EC1), dispositivi elettrocromici tradizionali
- *Elettrocromico 2*, (EC2), dispositivi elettrocromici innovativi

2.1.1 Proprietà termo-ottiche dei pannelli

I dati utilizzati per le analisi sono coperti da NDA e non possono essere condivisi

Vengono qui riportati i valori di trasmittanza al variare della lunghezza d'onda dei

¹Con materiali elettrocromici si intendono dei materiali capaci di diminuire il valore della trasmittanza grazie all'applicazione di una tensione a basso voltaggio. Quest'ultima, infatti, causa una reazione chimica che dà origine alla colorazione grigia fino al completo oscuramento. In ogni caso l'elettricità viene sfruttata solamente nelle fasi di transizione. Si utilizza perciò nel passaggio dallo stato trasparente a quello oscurato e viceversa.

 $^{^2{\}rm I}$ nomi commerciali dei materiali sono protetti da NDA motivo per cui si farà riferimento ad essi definendoli genericamente elettrocromico1e elettrocromico2

materiale scelti. Come si può notare dalle tabelle (2.1), (2.2) e (2.3), i valori relativi alla trasmittanza non sono puntualmente variabili rispetto alla lunghezza d'onda ma mediati: sono stati dati dei valori medi di come si comporta la trasmittanza in un certo intervallo della lunghezza d'onda. Si assumono trascurabili i contributi dati dalla trasmittanza e dalla riflettanza per lunghezze d'onda inferiori o superiori a quelle qui riportate. Sono inoltre descritti i valori di assorbanza, emissività e conducibilità termica. Dai dati in tabella possiamo osservare che la trasmittanza risulta per le lunghezze d'onda nel range dei 220 – 320 nm, questo significa che i per le parte dei per sono per sono per già dai pannelli trasparenti di introdurre il rivestimento³. La schermatura

da parte **a** all'interno del veicolo spaziale è assimilabile alla schermatura da parte dell'aria rispetto alla superficie terrestre⁴. Relativamente all'emissività, **b** per valori di lunghezza d'onda superiore ai 2500 nm, l'intensità della radiazione è sufficientemente contributo termico per lunghezze d'onda **b** a considerare **b** and il contributo termico per lunghezze d'onda **b** a considerare **b** and il contributo termica andare a valutare per quali lunghezze d'onda il carico termico è maggiore. Infine la conducibilità risulta **b** per il PMMA e il PC, mentre ha valori

2.1.2 Proprietà termo-ottiche del rivestimento

I dati utilizzati per le analisi sono coperti da NDA e non possono essere condivisi

Come descritto nella sezione (2.1), per le analisi verranno considerate due tipologie di rivestimento: *Celle EC1* e *Celle EC2*. Sono di seguito riportate le osservazioni e gli andamenti della trasmittanza e assorbanza per i due materiali.

 Celle EC1, la curva blu descrive il comportamento del rivestimento per le varie lunghezze d'onda nel caso ON, ovvero quando la luce nel visibile viene schermata. Il fenomeno è evidente nel diagramma dell'assorbanza⁵, dove per lunghezze d'onda nel range di 550 – 700 Così come per l'anche nel campo di 550 – 700 È così come per l'anche nel campo di S50 – 800 è possibile vedere un altro invece la radiazione venga assorbita dal rivestimento, per altre

⁴Per uno studio nel campo **e con e con e**

 $^{^5\}mathrm{L}'$ assorbanza è stata calcolata normalizzando i valori rispetto al valore massimo

Fused Silica	
Trasmittanza	
T[220 - 280]nm	
T[280 - 320]nm	
T[425 - 700]nm	
T[850 - 1500]nm	
Riflettanza	
R[450 - 800]nm	
Assorbanza	
α fino a 2500 nm	
Emissività	
ε dopo 2500 nm	
Conducibilità termica	
K	

Tabella 2.1: Proprietà termo-ottiche del Fused Silica



Tabella 2.2: Proprietà termo-ottiche del PMMA

lunghezze d'onda si ha un comportamento inverso: è presente una trasmittanza



Tabella 2.3: Proprietà termo-ottiche dello Scratch PC

	nel	campo	del	visibile, ⁶	<u>e</u> ur	าย	assorbanza	in	quell'interva	ıllo
per poi					de	ella lungh	ezza d'onda			

 Celle EC2, anche qui la curva blu descrive la condizione ON del rivestimento.
 È possibile notare come l'andamento della trasmittanza e dell'assorbanza per lunghezze d'onda
 In particolare

vengono de le lunghezze d'onda appartenenti de la serie d'onda appartenenti de la serie d'onda appartenenti de la serie de la

Da questo primo confronto è chiaro che le due tecnologie presentano alcune differenze: nel caso delle celle EC2, si ha una qualità visiva mediamente superiore attraverso i pannelli, utile per l'osservazione celeste, a costo di una protezione (sia nel caso ON che OFF); risulta invece superiore sebbene questo possa sollecitare termicamente il sistema. Per avere dei valori puntuali da utilizzare per l'analisi termica è stato

 $^{^{6}}$ Il della radiazione incidente nel visibile passa attraverso il rivestimento all'aumentare della lunghezza d'onda



Wavelength λ / nm

Figura 2.2: Andamento trasmittanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda



Wavelength λ / nm

Figura 2.3: Andamento assorbanza EC1 in funzione della lunghezza d'onda

utilizzato un campionatore realizzato in codice Matlab e che ha permesso di estrapolare i dati relativi alla trasmittanza e assorbanza dei rivestimenti elettrocromici.



Figura 2.4: Andamento trasmittanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda



Figura 2.5: Andamento assorbanza EC2 in funzione della lunghezza d'onda

In particolare sono stati presi i valori alle stesse lunghezze d'onda dei pannelli trasparenti e sono state poi mediate per avere i valori in ciascun intervallo. Infine per ottenere un valore medio dell'assorbanza per lunghezze d'onda inferiori a 2500 nm, i valori ottenuti sono stati pesati sullo spettro di emissione del sole secondo l'ISO[7].

2.2 Configurazioni possibili del sistema pannellorivestimento

Si ipotizzano ora le possibili configurazione da adottare per definire il nostro sistema pannelli-rivestimento. La trattazione mira ad identificare il caso per cui la temperatura raggiunta sui pannelli trasparenti soddisfi quelli che sono i requisiti dati da progetto (illustrati in tabella 2.4) e di valutare inoltre la configurazione ottimale affinché la temperatura agente sia la minore possibile. L'impostazione è preliminare e serve per definire a livello intuitivo e teorico quello che potrebbe essere il comportamento termico del sistema che andremo poi a confrontare attraverso un'analisi mediante software simscape. Valgono le condizioni al contorno e le assunzioni fatte in precedenza.

Caso primo pannello rivestito



Figura 2.6: Caso rivestimento iniziale

Nel caso in esame, come è possibile vedere in figura (2.6), il sistema è composto da un rivestimento sul primo pannello, seguito da (n) pannelli trasparenti posti in serie. Il rivestimento ha la funzione di assorbire la radiazione proveniente dallo spazio e di proteggere i pannelli più interni, per cui nel visibile $A_{coat} >> A_{pannelli}$. Possiamo quindi assumere che dopo il pannello rivestito non vi sia più irraggiamento ma solo conduzione. La conduzione è data dal rivestimento stesso che si sarà scaldato per aver assorbito il calore dato dalla radiazione. La

configurazione considerata permetterebbe al calore e quindi alla temperatura raggiunta dai pannelli interni di non superare il limite imposto da progetto (rif) Sebbene questo caso intuitivamente possa sembrare il migliore, risulta di difficile applicazione in quanto il rivestimento si troverebbe a contatto diretto con lo spazio. Situazione non accettabile in quanto non verrebbe garantita una protezione da eventuali detriti spaziale; quest'ultimi infatti potrebbero impattare la superficie e quindi danneggiare il rivestimento che perderebbe dunque la funzione per cui è stato introdotto.

• Caso ultimo pannello rivestito



Figura 2.7: Caso rivestimento finale

Questa situazione vedrebbe gli n pannelli trasparenti schermare la radiazione infrarossa e far arrivare quindi al rivestimento solo la radiazione del visibile. Sebbene quindi la temperatura sul pannello rivestito in questo caso risulti inferiore a quella del caso precedente, la soluzione è da scartare in quanto la temperatura sull'ultimo pannello risulterebbe comunque eccessiva. L'ultimo pannello è a contatto diretto con l'interno del veicolo spaziale e quindi con il personale a bordo. A causa del contatto diretto e continuo delle radiazioni proveniente dallo spazio sui pannelli trasparenti, ci si aspetta un ulteriore svantaggio quale il deterioramento più marcato dei pannelli, questo significherebbe in caso di manutenzione dover sostituire tutto il sistema di pannelli piuttosto che solo quello rivestito.

• Caso rivestimento su pannello centrale

Questa è una configurazione ibrida, ottenuta dalla combinazione delle due analizzate prima. L'interno è separato dall'esterno attraverso una disposizione di n pannelli prima e dopo il rivestimento. I vantaggi sono gli stessi evidenziati per il primo caso e inoltre il rivestimento non risulta essere a contatto diretto nè con l'esterno (problema del primo caso), nè con l'interno (problema del



Figura 2.8: Caso rivestimento centrale

secondo caso) e la radiazione che arriva sul rivestimento è comunque ridotta dalla presenza dei pannelli anteposti verso l'esterno. Il problema principale del caso qui analizzato è che la struttura risulterebbe eccessivamente pesante oltre che economicamente dispendiosa per la sostituzione dei pannelli trasparenti a contatto diretto con il sole.

2.2.1 Configurazione test e condizioni al contorno

Abbiamo fin qui descritto i materiali del sistema e le possibili configurazioni per n pannelli. Definiamo ora la configurazione di prova iniziale in base a quelle che sono state le considerazioni fatte. Il sistema è definito da quattro pannelli di cui uno rivestito su di una superficie, il caso ottimale è dato dal rivestimento posizionato sul Fused Silica, a contatto con il primo PMMA. In questo modo non vi è contatto diretto con l'esterno, come nel primo caso analizzato, e data la lontananza dallo Scratch Pane a contatto con l'interno dello spacecraft, viene garantito che il contributo termico per conduzione dovuto dal rivestimento, sia il più basso possibile. Da valutare, invece, gli eventuali vantaggi collegati all'aver posizionato il rivestimento dopo un pannello trasparente, in quanto quest'ultimo in grado di assorbire buona parte delle radiazioni infrarosse. Prima di analizzare il sistema, definiamo le condizioni al contorno che lo regolano. Esse sono descritte, visibili in tabella (2.4), dalla temperatura presente all'interno e all'esterno del veicolo spaziale, dagli intervalli di temperature che i pannelli trasparenti riescono a sopportare, dai valori imposti per il configuration factor, view factor e dal vincolo a progetto della temperatura che il pannello più interno deve avere per la sicurezza del personale a bordo.



Figura 2.9: Configurazione di prova preliminare

Condizioni al contorno	
Intervallo limite T	
T_{FS}	-150/+150
T_{PMMA}	-40/+60
T_{PC}	$(+12 \div +17)/+45$
View Factor	
$F_{s/p}$	1
Configuration Factor	
$\psi_{n/air}$	1
Coeff. scambio convettivo	
h	2 - 3

Tabella 2.4: Condizioni al contorno del sistema

2.3 Impostazione del bilancio termico

Come descritto nel capitolo (1), più precisamente nella sezione (1.2); nello spazio, l'unica forma di trasferimento del calore possibile, è quella che avviene per irraggiamento. Identifichiamo tre contributi, la radiazione solare e l'albedo⁷, che irradiano per lunghezze d'onda appartenenti al visibile e all'ultravioletto, e la radiazione planetaria, che irradia invece nel FIR (Far Infra-Red)[8]. Il flusso termico dato dall'irraggiamento, lungo tutte le lunghezze d'onda è mostrato in figura (2.10) La trattazione seguente prevede di impostare le equazioni risolutive per la determinazione delle temperature alle varie interfacce del sistema. Inoltre si sottolinea che i

⁷Componente radiativa solare riflessa dalla terra



Figura 2.10: Valori separati della radiazione solare (shortwave) e della radiazione terrestre infrarossa (longwave) e normalizzati ai loro rispettivi massimi

flussi sono considerati stazionari, non sono quindi presenti variazioni di temperatura in funzione del tempo.

2.3.1 Caso multi-pannello non rivestito

Ogni pannello preleva una certa quantità di energia sotto forma di calore e la riemette nel campo dell'infrarosso⁸. Come descritto nella sezioni (1.3) e sottosezione (1.1.3) la quantità di calore radiativo assorbita da ciascun pannello, dipende dall'assorbanza caratteristica del pannello, che essa sia nel visibile per la radiazione solare e albedo o nell'infrarosso per quella planetaria. Come mostrato in figura (2.11) definiamo il nostro sistema come una sequenza di quattro pannelli ciascuno attraversato da un certo flusso di calore. Definiamo con \dot{Q}_1 il flusso di calore entrante nel primo pannello più esterno (il Fused Silica) e composto dalla somma del flusso solare, albedo e planetario:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{sun} + \dot{Q}_{albedo} + \dot{Q}_{IR} \tag{2.1}$$

Il flusso, una volta incontrato il pannello, si dividerà come descritto nella sezione (1.3) e una parte verrà assorbita dal primo pannello secondo la relazione:

$$\dot{Q}_{A_1} = \dot{Q}_1 \alpha_1 \tag{2.2}$$

dove α_1 è l'assorbanza del primo pannello trasparente (tabella 2.1). Per una trattazione semplificata ma comunque conservativa si è considerato nullo il flusso

 $^{^{8}}$ per lunghezze d'onda >2500 nm [8]



Figura 2.11: Bilancio termico sistema multi-pannello

riflesso dal pannello⁹. Il flusso uscente sarà dunque privato solo del flusso assorbito dal primo pannello. Possiamo quindi riscrivere il nuovo flusso entrante nel secondo pannello:

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_1 - \dot{Q}_{A_1} = (1 - \alpha_1)\dot{Q}_1 \tag{2.3}$$

Iterativamente determiniamo i flussi assorbiti e uscenti per i restanti pannelli:

$$\dot{Q}_{A_2} = \dot{Q}_2 \ \alpha_2 = \alpha_2 (1 - \alpha_1) \dot{Q}_1$$
(2.4)

$$\dot{Q}_3 = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_{A_2} = (1 - \alpha_1)\dot{Q}_1 - \alpha_2(1 - \alpha_1)\dot{Q}_1 = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)\dot{Q}_1 \qquad (2.5)$$

Generalizzando le espressioni otteniamo:

$$\dot{Q}_n = \prod_{n=1}^{n-1} (1 - \alpha_i) \dot{Q}_1 \tag{2.6}$$

$$\dot{Q}_{A_n} = \prod_{n=1}^{n-1} \alpha_n (1 - \alpha_i) \dot{Q}_1$$
(2.7)

Per quanto riguarda i flussi *emessi* \dot{Q}_{E_i} , sebbene dipendano dalle T_s (formula 1.3) raggiunte dal pannello, sono stati calcolati come valore percentuale dei flussi assorbiti per ciascun pannello \dot{Q}_{A_i} . La percentuale emessa dipenda dall' ε del materiale nel campo IR[8]. I valori di ε per ciascun pannello sono mostrati in tabella (2.1), (2.2) e (2.3). In condizioni stazionarie, definiamo il flusso netto

⁹Il flusso riflesso del primo pannello è pari al del flusso entrante \dot{Q}_1 ; tabella (2.1)



Figura 2.12: Bilancio termico singolo pannello

assorbito dal pannello, la quantità di flusso assorbita meno quella emessa. Questa quantità è uguale alla somma data dal trasferimento di calore conduttivo e radiativo presente all'interno del pannello, ed è descritta attraverso il seguente bilancio:

$$\dot{Q}_{A_i} - \dot{Q}_{E_i} = \dot{Q}_{cond_i} + \dot{Q}_{rad_i} \tag{2.8}$$

dove,

$$\dot{Q}_{cond_i} = K_k A_k \frac{T_{i_k} - T_{f_k}}{s_k}$$
 (2.9)

$$\dot{Q}_{rad_i} = \frac{\sigma(T_{i_k}^4 - T_{f_k}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{i_k}} + \frac{1}{\varepsilon_{f_k}} - 1}$$
(2.10)

Conoscendo \dot{Q}_{A_i} , che rappresenta l'input termico assorbito dal pannello, e \dot{Q}_{E_i} , l'output, è possibile determinare le temperature sulle superfici di ingresso e uscita di ciascun pannello (figura 2.12). Per il primo pannello, date le caratteristiche del materiale trasparente, il valore dell'assorbanza nel visibile è molto piccolo¹⁰, il contributo maggiore è dato dalla radiazione planetaria nel campo dell'infrarosso, in quanto $\alpha_{IR} = NDA$. Per i restanti pannelli le temperature saranno più alte, proporzionalmente ai rispettivi valori di assorbanza¹¹. Si lascia infine il bilancio termico completo del sistema studiato (figura 2.13). La risoluzione numerica segue nel capitolo successivo.

 $^{^{10}\}mathrm{Assorbanza}$ primo pannello in tabella 2.1

 $^{^{11}\}mbox{Assorbanza pannelli 2, 3 e 4 in tabelle (2.2) e (2.3)}$



Figura 2.13: Bilancio termico completo

2.3.2 Caso multi-pannello con rivestimento attivo

La trattazione termica per il caso con rivestimento attivo segue le stesse considerazioni fatte in precedenza ad eccezione del fatto che in questo caso viene posizionato tra due pannelli adiacenti il rivestimento (EC1 o EC2) che, quando attivo, ha come funzione quella di assorbire la radiazione e ridurre il flusso termico entrante nei restanti pannelli. Si ha quindi una \dot{Q}_i entrante nel rivestimento che si divide in una parte assorbita e una parte che viene ritrasmessa. La parte assorbita \dot{Q}_{A_i} è data in funzione dell'assorbanza caratteristica del materiale che viene attraversato. Il flusso emesso, \dot{Q}_{E_i} , è dato invece in funzione di $\alpha_{IR} = \varepsilon$. Dati gli alti valori di assorbanza per EC1 e EC2 ci si aspettano dei flussi e quindi delle temperature più alte in prossimità della superficie rivestita, da studiare e analizzare invece, il comportamento dei pannelli vicini in presenza del rivestimento.

Capitolo 3

Analisi termica mediante Simscape

3.1 Introduzione al software

SIMSCAPE nasce come add-on di SIMULINK e permette lo studio e l'analisi di modelli relativi a sistemi fisici e multi-fisici. La costruzione dei modelli avviene attraverso l'introduzione di diagrammi a blocchi e altri paradigmi di modellazione. I modelli SIMSCAPE sono intuitivi e facilmente interpretabili, perché ciascun modello corrisponde alla struttura fisica del sistema, ovvero è possibile visualizzare chiaramente tutti i componenti del modello e in che modo sono connessi tra di loro.

3.1.1 Definizione degli elementi, sensori e sorgenti termiche

Analizziamo nel dettaglio le librerie termiche di simscape che contengono blocchi per il dominio termico. Esse sono organizzate in elementi, sorgenti e sensori. Impostato il problema generale diventa possibile realizzare un modello avvalendosi di tali blocchi. I blocchi vanno collegati tra di loro.

- (a) Thermal Reference, è un riferimento termico definito a zero kelvin e rispetto al quale vengono determinate tutte le temperature del sistema. Per la modellazione del sistema in esame è servito per impostare la condizione iniziale rispetto a cui i flussi vengono calcolati e per determinare il valore delle temperature nelle varie stazioni considerate
- (b) Controlled Heat Flow Rate Source, rappresenta una sorgente ideale di flusso termico. Dove A rappresenta l'inlet del flusso, B l'outlet del flusso ed S è il segnale entrante. Grazie ad S definisco il modulo del flusso. La



Figura 3.1: Elementi, sensori e sorgenti termiche

direzione è definita positiva da A verso B. Inoltre è possibile definire, attraverso l'introduzione di script matlab e altre funzioni un segnale tempo-dipendente.

- (c) Controlled Temperature Source, stessa funzione del Controlled Heat Flow Rate Source. In questo caso si regola la temperatura invece che il flusso. Per il sistema in esame non è stato necessario utilizzarlo in quanto il legame termico tra i pannelli è assicurato automaticamente da Simscape.
- (d) Solver Configurator, tutte le reti fisiche rappresentate da un diagramma a blocchi Simscape richiedono informazioni sulle impostazioni del risolutore per la simulazione. Il blocco specifica i parametri del risolutore di cui il modello ha bisogno prima di poter iniziare la simulazione. Ogni diagramma a blocchi Simscape richiede un Solver Configurator da collegare ad esso.
- (e) Constant Volume Chamber (MA), modella l'accumulo di massa ed energia in un volume costante di aria umida. Possono esserci da uno a quattro ingressi. Pressione e temperatura interna possono evolversi nel tempo. La pressione e la temperatura evolvono in base alla comprimibilità e alla capacità termica del volume di aria umida. L'acqua liquida si condensa dal volume dell'aria umida quando raggiunge la saturazione.

- (f) Reservoir(G), rappresenta un serbatoio infinito a pressione e temperatura fisse. Il serbatoio e il suo ingresso possono essere a pressione atmosferica o ad una pressione specifica. Il flusso è assunto quasi stabile e il serbatoio funge da dissipatore di calore. Il gas uscente ha temperatura uguale a quella del serbatoio. Il serbatoio funge quindi da fonte di calore.
- (g) Radiative Heat Transfer, definisce che il flusso termico entrante venga valutato come un traferimento di calore per irraggiamento tra due corpi. Il trasferimento è regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann (equazione 1.3) È necessario dare in input l'area che il flusso attraversa e il coefficiente radiativo definito come:

$$k = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \tag{3.1}$$

dove $\varepsilon_1 e \varepsilon_2$ sono rispettivamente le emissività dell'emittente e ricevente.

- (h) Conductive Heat Transfer,. Il trasferimento è disciplinato dalla legge di Fourier: il trasferimento del calore viene modellato come un trasferimento di calore per conduzione tra due strati dello stesso materiale e governato dalla legge di Fourier (equazione 1.1). Devono per cui essere introdotti i valori di area, spessore e conducibilità termica del materiale che il flusso attraversa.
- (i) Temperature Sensor, è un sensore di temperatura ideale, ovvero un dispositivo che determina la differenza di temperatura presente tra due punti (non preleva calore). Le porte A e B si collegano nei punti in cui si vuole monitorare la temperatura. La porta T invia un segnale fisico che fornisce il valore relativo alla differenza di temperatura rilevata. La direzione positiva del blocco va da A a B mentre La temperatura misurata è determinata come $T = T_A - T_B$. Per conoscere la temperatura in un punto preciso basta collegare alla porta B una thermal reference che calcola la temperatura rispetto allo zero K così che $T_B = 0$ e $T = T_A$.
- (j) Heat Flow Rate Sensor, Simile al Temperature Sensor, misura la portata termica, converte il flusso di calore che passa attraverso il blocco in un segnale proporzionale a tale flusso. Affinchè il flusso di calore venga monitorato correttamente, il blocco deve essere collegato in serie con il componente. Il blocco è ideale e non si hanno perdite di energia termica. La porta H fornisce il segnale fisico e il relativo valore del flusso di calore.La direzione positiva è definita da A a B.
- (k) Convective Heat Transfer, il blocco modella il flusso come un trasferimento di calore per convezione tra due corpi. Il trasferimento è regolato dalla legge di Newton del raffreddamento (equazione 1.2. La direzione positiva è definita

da A verso B. Sono richiesti in input i valori di area e coefficiente convettivo $[W/(m^2 K)]$

 PS-Simulink Signal Convertor, blocco necessario per convertire il segnale fisico in un segnale di uscita Simulink. Viceversa per il Simulink-PS Signal Convertor. Sono necessari per introdurre gli input nel modello e leggere gli output, i risultati.

3.2 Modello termico del sistema



Figura 3.2: Modello termico del sistema multi-pannello non rivestito

Il modello termico è stato quindi realizzato tenendo conto di quanto impostato analiticamente nel precedente capitolo, nella sezione 2.3. Come già detto, il flusso radiativo entrante, dato dalla somma della radiazione solare, dell'albedo e della radiazione planetaria, si riduce quando attraversa un pannello, questo perchè una parte della radiazione viene assorbita dal pannello in funzione della sua assorbanza. Nel sistema mostrato in figura 3.2, il flusso assorbito che vede il pannello ricevere è stato introdotto definendo il blocco Heat Source Generator. In ciascun pannello, ad eccezione del primo dove è stato definito fuori, è presente un Heat Source Generator che ha quindi la funzione di riscaldare il pannello in base alla porzione di calore che viene assorbita dal flusso radiativo entrante. Il flusso radiativo perde dunque una parte del suo calore dopo aver attraversato ogni pannello, per questo motivo è stato necessario richiamare il valore del flusso assorbito nel pannello precedente in modo da sottrarlo al flusso radiativo e aggiornarlo per il pannello successivo che si troverà dunque un flusso energeticamente minore. Sempre in figura 3.2 è possibile vedere come l'Heat Source Generator passi il segnale al Controlled Heat Flow Rate Source grazie al Simulink-PS Signal Convertor che converte il segnale simulink nel dominio fisico. Il controlled Heat Flow Rate definisce che il dominio fisico studiato è di tipo termico, a cui viene aggiunta la thermal reference per dare il riferimento termico, definito dallo zero gradi kelvin e rispetto a cui il flusso viene calcolato. Il

verso positivo, come detto nella sezione precedente, è dato da A verso B, ovvero nel nostro caso dallo spazio verso il sistema multi-pannello. Sono quindi disposti in serie i blocchi dei quattro pannelli e infine l'interno del veicolo spaziale è stato rappresentato dal blocco Constant Volume Chamber (MA) attraverso cui è stato definito un volume di riferimento del modulo interno e si sono considerati valori di pressione e temperatura standard.

3.2.1 Heat Source Generator



Figura 3.3: Heat Source Generator

L'Heat Source Generator è stato definito tenendo conto delle formule (1.12), (1.13) e (1.14) che qui si riportano per un rapido confronto con quanto mostrato in figura 3.3:

$$\dot{Q}_{sun} = \alpha I_s A F_{s/p} \tag{3.2}$$

$$\dot{Q}_{albedo} = b \; \alpha I_s A F_{s/p} \tag{3.3}$$

$$\dot{Q}_{IR} = \alpha_{IR} \, \varepsilon_{pl} \, A \, T_{eff}^4 F_{s/p} \tag{3.4}$$

Esse rappresentano la radiazione solare, l'albedo e la radiazione planetaria che moltiplicate per l'assorbanza α determinano la quantità assorbita dal pannello. Come detto nella sezione preecedente, ogni pannello prevede un Heat Source Generator in cui varierà, oltre che il valore di assorbanza e area, anche I_s , l'intensità

solare, che verrà sottratta di un fattore pari alla quantità prodotta dall'Heat Source Generator precedente.



3.2.2 Primo pannello

Figura 3.4: Dettaglio primo pannello

La modellazione del primo pannello è stata realizzata tenendo conto del flusso dell'Heat Source Generator che rappresenta la quota assorbita dal primo pannello. Come descritto nella sezione 2.3, il pannello riscaldandosi, riemette una percentuale del calore assorbito. Questa percentuale è pari all'emissività del materiale nell'infrarosso (si considerano lunghezze d'onda $\lambda > 2500 nm$). La riemissione è stata introdotta con un blocco di Controlled Heat Flow Rate Source collegato alla linea da cui arriva il flusso assorbito (A) e che scarica alla thermal reference (B). Il segnale S passato invece definisce il modulo della quota che viene riemessa. I traferimenti di calore per conduzione e per irraggiamento sono stati invece modellati introducendo i blocchi Conductive Heat Transfer e Radiative Heat Transfer. Cliccando sui blocchi, è possibile definire i valori che definiscono il pannello come area, spessore e conducibilità termica per il blocco conduttivo e area e coefficiente radiativo per il blocco radiativo. Dato che il coefficiente radiativo si definisce in rapporto tra il pannello emittente e quello ricevente, il blocco radiativo introdotto tiene conto dello scambio radiativo che ci sarà in questo caso tra il primo pannello e quello successivo. Infine, per la determinazione delle temperature sulla superficie di ingresso, al nodo e all'interfaccia tra i due pannelli adiacenti, sono stati introdotti i

blocchi *Temperature Sensor* che calcolano la differenza tra il punto in cui si vuole determinare la temperatura e lo zero kelvin definito con il blocco *Thermal reference*. Si ricorda infine che il passaggio tra segnale simulink e segnale fisico (e viceversa) che permette quindi l'immissione dei parametri e la lettura dei risultati è garantita con l'introduzione del *Signal Convertor*.

3.2.3 Secondo e Terzo Pannello



Figura 3.5: Dettaglio secondo e terzo pannello

La modellazione dei pannelli intermedi è la stessa, motivo per cui nella corrente sezione sono stati trattati congiuntamente. Similmente a quanto visto per il primo, i pannelli intermedi mantengono la stessa modellazione con i relativi blocchi *Controlled Heat Flow Rate Source, Conductive Heat Transfer* e *Radiative Heat Transfer* ad eccezione di alcune differenze. I valori di area, spessore, conducibilità termica e coefficiente radiativo sono caratteristici e variano in base al pannello modellato. Inoltre, dal secondo pannello viene introdotto l'Heat Source Generator, che in input riceve un valore di I_s ridotto. La quantità di calore che viene sottratta passa in input dal blocco *Input Port* 1 (come mostrato in figura 3.5). Il valore uscente viene quindi utilizzato per definire il modulo del calore assorbito dal pannello, il modulo del calore emesso dal pannello (percentuale di quello assorbito in funzione dell'emissività specifica) e il valore da passare come output al blocco *Output Port* 1; questo valore è collegato all'*Input Port* 1 del pannello successivo in cui verrà ridotta ulteriormente l'intensità solare.



3.2.4 Quarto Pannello

Figura 3.6: Dettaglio quarto pannello

Il quarto ed ultimo pannello, in figura 3.6, presenta le stesse caratteristiche e lo stesso modello esposto per gli intermedi ma, essendo a contatto diretto con l'interno del veicolo spaziale, è stato introdotto il blocco *Convective Heat Transfer*. L'interno del veicolo spaziale presenta aria in condizioni di pressione e temperatura standard ed è stato assunto come una sorgente termica ideale a $T_{Air} = 293.15 K$. In realtà la temperatura all'interno della stazione spaziale è prossima ai 18 C ma per una trattazione conservativa è stato considerato un valore leggermente più alto. Sempre per questioni conservative è stato assunto un coefficiente convettivo per l'aria pari a h = 2, cioè si è considerata aria quasi ferma all'interno del veicolo. Il *Thermal Sensor* tra il blocco convettivo e quello radiativo rileva la temperatura sulla superficie direttamente a contatto con l'aria e sulla quale ci sono i vincoli più restrittivi dati da progetto che si vogliono valutare¹

 $^{^1\}mathrm{Si}$ rimanda alla tabella 2.4 per i vincoli progettuali relative alle temperature dei quattro pannelli



3.2.5 Rivestimento

Figura 3.7: Dettaglio rivestimento

Finora sono stati analizzati nel dettaglio i vari sottosistemi che compongono il modello termico generale (Figura 3.2). Questo modello non comprende però il sottosistema del rivestimento, qui invece rappresentato nel dettaglio (figura 3.7). Sebbene il modello a blocchi risulti uguale a quello dei pannelli intermedi, diventa qui necessario seguire una procedura prima di avviare la simulazione:

- 1. Posizionare il sottosistema del rivestimento tra i sottosistemi di due pannelli adiacenti (ex: 1-2, 2-3, 3-4).
- 2. Aggiornare il valore dell'area all'interno del sottosistema rivestimento e del suo *Heat Source Generator* che corrisponderà a quella del pannello su cui è montato.
- 3. Aggiornare il valore del coefficiente radiativo che tiene conto dell'emissività tra rivestimento e pannello successivo (ex: per 1-2, $\varepsilon_{riv} \in \varepsilon_2$). Nota bene: deve essere aggiornato anche il valore del coefficiente radiativo nel pannello precedente affinchè si tenga conto della nuova configurazione con il rivestimento.
- 4. Aggiornare valore assorbanza del rivestimento nell'Heat Source Generator.

3.3 Esportazione risultati

I risultati dell'analisi sono stati ottenuti grazie all'introduzione di blocchi specifici quali il Temperature Sensor e l'Heat Flow Rate Sensor. I blocchi che rilevano la temperatura sono stati posizionati in prossimità di quei punti che rappresentano la superficie di ingresso, quella di uscita e il nodo intermedio del pannello, per tutti e quattro i pannelli e, laddove studiato, il rivestimento. Per ogni simulazione e per ogni caso studiato sono state ricavate dalle 12 alle 15 temperature. Il processo di raccolta dei dati è stato ottimizzato introducendo un blocco Mux, al quale sono state definite 15 porte di ingresso, ciascuna associata ad una temperatura e una di uscita, che porta alla generazione di un file .mat (figura 3.8). Il file ottenuto viene quindi passato in ambiente Matlab e convertito in file .xls. A questo punto si sono realizzate delle tabelle complete di grafici per analizzare il comportamento delle temperature ottenute. I blocchi che rilevano i flussi di calore sono stati invece posizionati in prossimità degli *Heat Source Generator* per rilevare il calore assorbito da ciascun pannello e che sono stati utilizzati per determinare il valore del flusso uscente dal pannello. Sono infine stati utilizzati in prossimità di quei punti critici per verificare che la risultante dei flussi in quel punto seguisse la direzione prevista.



Figura 3.8: BloccoMux definito con 15 porte di ingresso e una di uscita per esportazione dati

Capitolo 4 Analisi dei risultati

Nel seguente capitolo sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con Simscape di cui al capitolo precedente è stato riportato il procedimento di modellazione del sistema in esame. Il capitolo parte con il validare numericamente la configurazione ideale che era stata valutata intuitivamente nel capitolo 2, per poi passare allo studio dettagliato della configurazione ottimale dove si osservano e confrontano le variazioni della temperatura e dei flussi in base al rivestimento scelto. Segue infine una valutazione del rivestimento migliore in base a quelle che sono le necessità progettuali di implementazione. Tutti i valori rappresentati nei grafici sono tabulati in appendice A

4.1 Validazione della configurazione ottimale prevista

Per lo studio della configurazione ideale sono stati adottati dei valori di riferimento con un certo intervallo di confidenza in quanto assenti i valori effettivi al momento della valutazione. Sebbene quindi i valori numerici riportati nella corrente sezione non siano significativi, è invece significativo il legame termico che li correla e quindi l'andamento descritto, in quanto la modellazione che lo governa è la stessa del sistema reale. Si precisa che le stazioni 1, 3, 5, 7, 9 e 11 sono le stazioni alle interfacce, con particolare interesse alla 11 che rappresenta la superficie a contatto diretto con il veicolo spaziale. La 2 e la 4 rappresentano il primo e ultimo pannello. Mentre quelle intermedie rappresentano i pannelli interni e il rivestimento in base alla configurazione esaminata. In nero è rappresentato il vincolo progettuale, precedentemente descritto in tabella 2.4.

• Rivestimento tra primo e secondo pannello Il nodo del rivestimento è posizionato nella stazione 4, mentre il suo ingresso è nella stazione 3. Come





Figura 4.1: Configurazione rivestimento tra pannello 1 e 2: confronto in funzione della tecnologia e del view factor

mostrato dalla figura 4.1, il valore massimo della temperatura è al rivestimento. Si può notare come dopo i valori delle temperature descrescano. Si osserva che i valori del rivestimento EC1 risultano maggiori di EC2, questo perchè Ec1 presenta un valore di assorbanza superiore. Sebbene i valori delle temprature dalla 6 in poi risultino superiori a quelli dati dal vincolo, è bene notare come con un view factor inferiore, le temperature scendano sotto la soglia.

- Rivestimento tra secondo e terzo pannello Il rivestimento ha ingresso nel punto 5 e finisce nel punto 6. Come ci si aspetta, il picco di temperatura si ha in corrispondenza del rivestimento. Le temperature risultano in generale superiori rispetto al vincolo progettuale. Anche il caso più conservativo dato da EC2 con un view Factor F = 0.8 risulta essere critico, in corrispondenza del rivestimento è di poco superiore al limite definito.
- Rivestimento tra terzo e quarto pannello L'ultima configurazione che prevede il posizionamento del rivestimento tra il terzo e ultimo pannello risulta quindi essere la più svantaggiosa. In confronto ai casi precedenti, le temperature registrate in questo caso sono le più alte.

Dai risultati ottenuti possiamo concludere che la configurazione ottimale del sistema è la prima analizzata che pone il rivestimento tra il primo e secondo pannello. Come

Analisi dei risultati



Figura 4.2: Configurazione rivestimento tra pannello 2 e 3: confronto in funzione della tecnologia e del view factor



Figura 4.3: Configurazione rivestimento tra pannello 3 e 4: confronto in funzione della tecnologia e del view factor

previsto, posizionare il rivestimento più vicino all'interno del veicolo spaziale causa un innalzamento delle temperature. Questo poichè i pannelli che precedono il rivestimento si troverebbero ad assorbire un flusso di calore superiore a quanto ne assorbirebbero se il rivestimento venisse posizionato prima di essi.

Confronto rivestimenti attivi -o -o- q 420,5 410,5 400,5 390,5 380,5 370,5 360,5 350,5 340,5 330,5 320,5 310,5 1 12 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 EC2 O- Vincolo Senza EC1

4.2 Sistema in presenza di rivestimento attivo

Figura 4.4: Andamento delle temperature nel sistema multi-pannello nel caso: non rivestito, EC1 attivo e EC2 attivo

Per la simulazione sono stati considerati i valori descritti in tabella A.8. Per quanto riguarda l'emissività dei due EC si è utilizzato un valore di riferimento $\varepsilon = 0.95$ in quanto i valori reali non sono ancora disponibili. Dalla figura 4.4 è possibile apprezzare come cambi l'andamento delle temperature in riferimento all'introduzione del rivestimento. In generale si può notare come la temperatura sul primo pannello si alzi in favore di una riduzione notevole di temperatura sul secondo pannello e in generale per tutto il sistema. Sebbene le temperature risultino superiori al vincolo progettuale anche con l'introduzione dei rivestimenti, è bene ricordare che il caso studiato è altamente conservativo in quanto sono state fatte le seguenti assunzioni:

• View Factor pari a 1, nella realtà il valore risulta più basso oltre che variabile nel tempo in quanto il sistema non riceve una radiazione sempre perpendicolare alla superficie esposta.

- Riflettanza dei pannelli trasparenti nulla, nonostante nella realtà ci sia un contributo della riflettanza (come descritto nelle tabelle 2.1, 2.2 e 2.3). Questo termine va a considerare un flusso di calore entrante (e quindi assorbito) superiore a quello che avremo nella realtà
- Nessun scarico termico alla struttura, nella realtà è presente una struttura che funge da sostegno al sistema considerato e su cui viene scaricato in parte il flusso termico
- Coefficiente di scambio termico convettivo per l'aria pari a 2, valore molto basso tipico per l'aria ferma e che non considera la presenza del sistema di ventilazione interno al

Le assunzioni fatte descrivono una situazione che prevede un flusso termico assorbito dai pannelli superiore a quello del caso reale e senza la possibilità di scaricarlo per conduzione attraverso la struttura o per convezione con l'interno del veicolo spaziale. Confrontando le due tecnologie in riferimento al caso senza rivestimento è possibile apprezzare come ci sia una riduzione delle temperatura sul secondo pannello pari a 17.77 gradi per EC1 (-4.77%) mentre di 27.49 gradi per EC2 (-7.44%)¹. Si vuole riportare, come mostrato in figura 4.5, una valutazione di quelle che sono le temperature in funzione di un View Factor inferiore. Il View Factor preso in considerazione è un valore mediato per tutto il suo periodo di rivoluzione attorno alla terra in riferimento ad un'orbita LEO[9]: Con un View Factor mediato, di

Orbita di riferimento	
Altitudine h	$500 \ km$
Inclinazione i	$51~^{\circ}$
Eccentricità e	prossima a 0
View Factor $F_{s/p}$	0.6872

Tabella 4.1: Orbita di riferimento considerata [9]

fatto inferiore a quello nominale utilizzato e che rappresenta un caso medio di quello che può essere il grado di esposizione del sistema alla radiazione solare, si può osservare come la sollecitazione termica sia molto più contenuta e rientri anzi perfettamente nei vincoli di progetto considerati. La valutazione è stata fatta in riferimento alla tecnologia EC1, la quale presentava i valori di temperatura più alti rispetto all'altra tecnologia esaminata (EC2).

 $^{^{1}}$ In Appendice le tabelle che riportano i valori di tutte le temperature considerate per EC1, EC2 e il caso non rivestito

Analisi dei risultati



Figura 4.5: Andamento delle temperature nel sistema multi-pannello per EC1 in condizioni di View Factor F = 1 e F = 0.6872

4.3 Sistema in presenza di rivestimento non attivo

Un'altra simulazione è stata fatta considerando come variassero le temperature del sistema con rivestimenti non attivi. Come mostrato in figura 4.6, l'introduzione dei rivestimenti presenta dei vantaggi anche quando questi non sono attivi. Infatti le temperature risultano essere comunque inferiori rispetto al caso senza rivestimento². I valori di assorbanza di EC1 e EC2 sono inferiori rispetto al pannello in PMMA, per questo motivo la temperatura sul primo pannello è inferiore al caso senza. Inoltre, come sarà possibile vedere in seguito nella sezione dedicata ai flussi, il rivestimento, che assorbe una certa quantità di flusso entrante, riduce proporzionalmente la quantità di flusso entrante nel secondo pannello. Questa situazione permette al secondo pannello di assorbire una quantità di flusso inferiore rispetto a quella che avrebbe assorbito in assenza del rivestimento. Risultano esserci dunque dei vantaggi nell'introduzione del rivestimento anche mantenendolo spento. L'introduzione di

²In Appendice i valori tabulati per l'EC1 e EC2 spenti

Analisi dei risultati



Figura 4.6: Andamento di EC1 e EC2 non attivi in confronto a sistema non rivestito

un rivestimento sottile ha quindi una funzione simile a quella che si potrebbe avere introducendo un pannello trasparente con le stesse caratteristiche termo-ottiche con il vantaggio però di avere un peso inferiore del sistema³

4.4 Confronto ON/OFF dei rivestimenti

Per una più chiara rappresentazione di come cambiano le temperature del sistema a seconda che il rivestimento sia attivo o meno, sono stati forniti di seguito gli andamenti delle due tecnologie studiate nei casi ON/OFF. Si possono apprezzare le variazioni di temperatura sul primo pannello a seguito dell'attivazione del rivestimento così come l'abbassamento delle temperature per i pannelli successivi al primo. Il motivo è sempre legato ai valori caratteristici di assorbanza del rivestimento, che sono più alti di quelli del PMMA quando accessi e più bassi quando spenti. Per il caso attivo, EC1 ha delle temperature superiori rispetto ad EC2, questo poichè l'assorbanza di EC1 è superiore a quella di EC2. EC1 assorbe quindi più calore di EC2, e per questo motivo il calore assorbito dai pannelli successivi

 $^{^{3}\}mathrm{I}$ rivestimenti considerati hanno uno spessore di molto inferiore rispetto allo spessore dei pannelli trasparenti che compongono il sistema





Figura 4.7: Confronto EC1 in modalità attiva e non attiva



Figura 4.8: Confronto EC2 in modalità attiva e non attiva

dovrebbe essere inferiore rispetto al caso EC2. In base a questa considerazione la temperatura dei pannelli successivi al primo per EC1 dovrebbe essere inferiore a

quella di EC2, invece dai grafici si può notare l'opposto. Plausibilmente questo comportamento è dovuto al contributo conduttivo del primo pannello sui più interni che nonostante assorbano meno calore per irraggiamento risultano avere una temperatura più alta se confrontati con EC2. Risulta quindi la configurazione EC2 quella più vantaggiosa in termini di distribuzione delle temperature perchè il mancato assorbimento del rivestimento che causa un assorbimento superiore per i pannelli successivi risulta essere meno preponderante rispetto ad un contributo conduttivo superiore (come nel caso di EC1).

4.5 Flussi assorbiti dal sistema e dal veicolo spaziale



Figura 4.9: Flussi assorbiti dal sistema e dal veicolo spaziale

Si riportano in figura 4.9, i valori dei flussi assorbiti da ciascun pannello e dal pannello rivestito (il primo) oltre che Q_5 , che rappresenta il valore del flusso uscente dal sistema e entrante nel veicolo spaziale. Tale valore sarà di output per il dimensionamento del sistema di ventilazione interno al veicolo spaziale affinchè

garantisca una temperatura di 293,5 K. La somma dei flussi rappresentati riconduce al valore dell'intensità solare nello spazio (a meno di un termine pari a 64 W che è il flusso termico assorbito dal Fused Silica e che non è stato rappresentato in quanto uguale per tutti i casi analizzati). Si può notare come i flussi assorbiti dal sistema rappresentino una piccola parte di quello che è invece il flusso che raggiunge l'interno del veicolo spaziale e che poi dovrà essere opportunamente gestito. In base a questa problematica potrebbe quindi risultare utile optare per EC1 come rivestimento da introdurre nel sistema esaminato in quanto garantisce una riduzione del flusso termico uscente dal sistema quasi del 21% a differenza del sistema EC2 che garantirebbe una riduzione del flusso entrante nel veicolo spaziale di circa il 16%. Di contro si ha che la configurazione con EC1 riscada di più di quella EC2. Infine in figura 4.10, si mostrano nel dettaglio solo i flussi assorbiti dai pannelli per



Figura 4.10: Flussi assorbiti da ciascun pannello

apprezzare meglio le differenze di un caso rispetto all'altro. Come preannunciato dall'andamento delle temperature, il rivestimento EC1 (acceso) rappresenta la soluzione che assorbe di più sul primo pannello. Per i pannelli successivi invece il flusso assorbito risulta essere quello più basso se confrontato rispetto agli altri casi. Questa riduzione di flusso assorbito è dovuta, come discusso in precedenza, al fatto che il flusso entrante nei pannelli successivi ha una quota ridotta data dalla sottrazione con il flusso precedentemente assorbito. Quindi sebbene non stupisca avere flussi inferiori per i pannelli successivi, risulta invece interessante notare come nonostante il calore assorbito sia inferiore, la temperatura risulti essere quella più alta. Questo perchè non è riportato nel grafico *come* il flusso assorbito nel primo pannello vada a distribuirsi nei successivi per conduzione e irraggiamento. Da un rapido confronto però si può affermare che la somma dei flussi assorbiti dai pannelli e dal pannello rivestito nel caso EC1 sia quella più alta. I valori più alti delle temperature per il caso EC1 risultano quindi giustificate⁴

 $^{^4\}mathrm{Per}$ determinare il flusso totale assorbito è possibile sottrarre al flusso entrante (1367 W) il valore Q_5 per il caso EC1

Capitolo 5 Coclusione

Con il presente lavoro di tesi magistrale è stata fornita una metodologia che permettesse come fine quello di analizzare termicamente un sistema multi-pannello trasparente in presenza di rivestimento attivabile. Inizialmente sono state richiamate le caratteristiche e proprietà termo-ottiche tipiche di materiali trasparenti e sono stati richiamati i fenomeni radiativi che governano gli scambi di calore in ambiente spaziale. Successivamente è stato teorizzato un modello termico che esprimesse il trasferimento di calore all'interno del sistema studiato e che tenesse conto di quelle che sono le caratteristiche dei materiali. Sono state quindi richieste dall'azienda con cui si è collaborati, Thales Alenia Space Italia, le informazioni termo-ottiche dei rivestimenti e dei pannelli trasparenti necessari per proseguire con l'analisi del modello. L'analisi numerica è stata effettuata servendosi di un software per l'analisi termica, Simscape, che attraverso la determinazione di una struttura a blocchi, ha permesso di ricostruire e modellare il sistema termico. I risultati ottenuti, in conformità con quanto ci si aspettava, hanno permesso di identificare come configurazione migliore il posizionamento del rivestimento tra il primo e secondo pannello. I valori delle temperature nelle varie stazioni, sono usciti mediamente superiori rispetto a quelli che sono i vincoli progettuali, questo però potrebbe essere legato alle assunzioni particolarmente stringenti e conservative che sono state imposte per la simulazione. La scelta del rivestimento da adottare è bene tenere in considerazione quelle che sono le temperature e i flussi generati dalle due tecnologie: se l'obiettivo è di avere delle temperature più contenute all'interno del sistema studiato, il rivestimento EC2 risulta essere la scelta migliore; altrimenti, se l'obiettivo è quello di ridurre il flusso entrante nel veicolo spaziale la configurazione EC1 è la più vantaggiosa.

Appendice A Tabelle

Rivestimento 12	EC1		EC2	Vincolo	
	F=1	F=0,8	F=1	F=0,8	
	376,7	361,3	351	339,8	423
Pane 1	377,4	362,1	351,8	340,7	423
	377,5	$_{362,5}$	351,9	340,7	423
Rivestimento	371,1	356,5	346,9	336, 6	378
	371,1	356,5	346,9	336, 6	378
Pane 2	365,7	351,8	342,7	333	333
	352,5	341,5	334,2	326,4	333
Pane 3	348	$337,\!6$	330,8	323,6	333
	339,4	330,7	325,1	319,2	325,5
Pane 4	332,4	324,7	319,8	$314,\! 6$	318
sup interna	$325,\!8$	319,4	315,3	311	318

Tabella A.1: Rivestimento12, temperature in]	ł	<
----------------------------------------------------	---	---	---

Rivestimento 23	EC1		EC2		Vincolo
	F=1	F=0,8	F=1	F=0,8	
	$371,\!6$	357	347,3	336,7	423
Pane 1	372,3	357,8	348,1	337,6	423
	372,4	357,9	348,2	337,7	378
Pane 2	372,9	358,4	348,7	338,3	333
	374	359,5	349,9	339,4	333
Rivestimento 23	367,2	353,5	344,5	334,9	333
	366,9	353,2	344,3	334,7	333
Pane 3	361,7	348,7	340,2	331,2	333
	350,6	339,9	332,9	325,5	325,5
Pane 4	$342,\!6$	332,9	326,7	320,1	318
sup interna	334,3	326,2	321	$315,\!6$	318

Tabella A.2: Rivestimento23, temperature in K

Rivestimento 34	EC1		EC2		Vincolo
	F=1	F=0,8	F=1	F=0,8	
	365,9	352,1	343,2	333,3	423
Pane 1	366,7	352,9	344,1	334,3	423
	366,7	353	344,2	334,4	378
Pane 2	367,2	353,5	344,8	334,9	333
	368,3	$354,\! 6$	345,9	336,1	333
Pane 3	368, 6	354,9	346,2	336,4	333
	369,1	355,4	346,7	336,9	333
Rivestimento 12	362,8	349,9	341,7	$332,\!6$	333
	362,5	$349,\!6$	341,5	332,5	325,5
Pane 4	$353,\!6$	341,7	334,3	326,3	318
sup interna	$343,\!4$	$333,\!5$	327,4	320,7	318

Tabella A.3: Rivestimento34, temperature in K

Attivi	Senza	EC1	EC2	Vincolo
	379,04	393,35	384,01	423
	$379,\!27$	$393,\!16$	383,78	423
	$379,\!29$	$393,\!14$	383,76	423
	$379,\!29$	$393,\!14$	383,76	423
	$379,\!29$	$393,\!11$	383,74	423
	$379,\!29$	389,09	$377,\!25$	423
	$379,\!29$	367,30	$353,\!95$	378
	372,04	356,20	$345,\!65$	333
	369,47	351,70	341,98	333
	369,47	351,70	$341,\!98$	333
	359,11	344, 16	336, 35	333
	$353,\!97$	$339,\!93$	332,97	333
	$353,\!97$	$339,\!93$	332,97	325,5
	345,70	$333,\!69$	327,72	318
	333,75	323,75	318, 91	318

Tabella A.4: Rivestimenti Attivi, temperature in K

Tabelle

Non attivi	Senza	EC1	EC2	Vincolo
	379,04	373,22	363,53	423
	379,27	373,83	363,38	423
	379,29	374,06	$363,\!61$	423
	379,29	374,06	$363,\!61$	423
	$379,\!29$	374,06	$363,\!61$	423
	$379,\!29$	$374,\!01$	364,73	423
	$379,\!29$	374,01	364,73	378
	$372,\!04$	$366,\!90$	$359,\!90$	333
	369,47	$364,\!28$	$358,\!01$	333
	369,47	364,28	358,01	333
	359,11	$354,\!60$	$349,\!64$	333
	$353,\!97$	$349,\!61$	$345,\!15$	333
	$353,\!97$	$349,\!61$	$345,\!15$	325,5
	345,70	$341,\!98$	$338,\!16$	318
	$333,\!75$	$330,\!61$	$327,\!42$	318

Tabella A.5: Rivestimenti non attivi, temperature in K

	EC1		EC2		Non rivestito
[W]	Acceso	Spento	Acceso	Spento	
Qariv	232,9	140,4	171,1	82,5	
Qa2	142,2	154,5	150,4	162,1	173
Qa3	145,3	157,8	$153,\! 6$	$165,\! 6$	176,8
Qa4	107,3	116,5	113,4	$122,\!3$	$98,\!68$
Q5	$675,\!8$	734,4	715	771	855,02

Tabella A.6: Flussi assorbiti

Tabelle

EC1		Vincolo
F=1	F=0.6872	
393,3593	346,9	423
393,1625	346,1	423
393,1422	346,5	423
393,1422	346,5	423
393,1102	346,5	423
389,0981	343	423
367,3018	$331,\!1$	378
356,2017	328,1	333
351,7009	326,7	333
351,7009	$327,\!8$	333
344,1638	326,1	333
339,9307	320,8	333
339,9307	319,5	$325,\!5$
333,6967	314,4	318
323,7505	308,5	318

Tabella A.7: Temperature in (k) in funzione di View Factor 0.6872

	Acceso	Spento
Valore Assorbanza EC1	NDA	NDA
Valore Assorbanza EC2	NDA	NDA

Tabella A.8: Valori assorbanza EC1, EC2 (I dati utilizzati per le analisi sono coperti da NDA e non possono essere condivisi)

Bibliografia

- M. Necati Özişik. *Heat Transfer*. Scientific International, 2018. ISBN: 978-93-87938-18-2. URL: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHT00002G/ heat-transfer/heat-transfer (cit. alle pp. 2, 3).
- [2] Frank P. Incropera e David P. DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th Edition. New York City, New York: John Wiley Sons, Inc., 1996 (cit. alle pp. 2, 4).
- [3] Zhang, Yanguo, Li, Qinghai, Zhou e Hui. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. Elsevier, 2016. ISBN: 978-0-12-800966-6. URL: https: //app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTCHTF004/theory-calculationheat/theory-calculation-heat (cit. a p. 4).
- [4] Modest, Michael F., Mazumder e Sandip. Radiative Heat Transfer (4th Edition). Elsevier, 2022. ISBN: 978-0-323-98406-5. URL: https://app.knovel.com/ hotlink/toc/id:kpRHTE001C/radiative-heat-transfer/radiativeheat-transfer (cit. alle pp. 5, 6, 8-12).
- P. Fortescue, G. Swinerd e J. Stark. Spacecraft Systems Engineering. Wiley, 2011. ISBN: 9781119978367. URL: https://books.google.it/books?id= cCYPOrVR%5C_IEC (cit. a p. 7).
- [6] Tom Markvart, Augustin McEvoy et al. *Practical handbook of photovoltaics:* fundamentals and applications. Elsevier, 2003 (cit. a p. 7).
- [7] R Goody e H Hu. Absorption and Thermal Emission. Elsevier, 2003. URL: https://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter3/Ency_ Atmos/Radiation_Solar (cit. a p. 20).
- [8] Lamb, Dennis, Verlinde e Johannes. Physics and Chemistry of Clouds. Cambridge University Press, 2011. ISBN: 978-0-521-89910-9. URL: https://app.knovel. com/hotlink/toc/id:kpPCC00012/physics-chemistry-clouds/physicschemistry-clouds (cit. alle pp. 23-25).

[9] Vincent L. Pisacane. Fundamentals of Space Systems (2nd Edition). Oxford University Press, 2005. ISBN: 978-0-19-516205-9. URL: https://app.knovel. com/hotlink/toc/id:kpFSSE0001/fundamentals-space-systems/fundam entals-space-systems (cit. a p. 43).