

PROTOTIPO DI UN DISPOSITIVO PER IL CONTROLLO DELL'ALBEDO TERRESTRE FINALIZZATO AL CONTENIMENTO DEL RISCALDAMENTO GLOBALE

F. Rossi, F. Cotana, M. Amantini

CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica,
Via G. Duranti 67, 06125, Perugia

SOMMARIO

L'incremento delle immissioni nell'atmosfera di gas serra ed in particolare di CO₂ derivanti dalle attività antropiche, concorre all'aumento della temperatura media del nostro pianeta. Secondo il quarto rapporto presentato a Febbraio 2007 a Parigi dall'IPCC infatti la crescita probabile della temperatura del globo da ora alla fine del 2100 sarà tra 1.8 e 4 gradi. La comunità internazionale, avendo preso atto già da tempo della situazione che si andava delineando, ha risposto al problema con una serie di direttive (protocollo di Kyoto) aventi lo scopo di limitare l'immissione di gas climalteranti nell'ambiente e con uno sviluppo tecnologico diretto alla captazione e allo stivaggio della CO₂ e dei gas serra stessi. Recentemente è stata brevettata una nuova tecnologia per il controllo della temperatura media della Terra e conseguente mitigazione dell'effetto serra basata sulla modifica dell'albedo terrestre ossia sull'incremento del coefficiente di riflessione alla luce solare e sull'incremento dell'emissività per temperatura della superficie terrestre stessa. Nel presente lavoro ci si propone di realizzare un prototipo sperimentale che riproducendo il sistema Terra-Universo-Sole e permetta di valutare le variazioni di temperatura sulla superficie terrestre al variare del suo coefficiente di riflessione medio.

INTRODUZIONE

Negli ultimi 50 anni l'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera ha prodotto un aumento della temperatura globale media di circa $0,6 \pm 0,2$ °C. La comunità scientifica, come riportato nel Pannello Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (IPCC) delle Nazioni Unite [1], ritiene che tale aumento di concentrazione sia attribuibile prevalentemente a cause antropiche poiché avvenuto in tempi brevi rispetto ai tempi geologici della Terra. Secondo il quarto rapporto presentato a Febbraio 2007 a Parigi [2] sempre dall'IPCC la crescita probabile della temperatura del globo da ora alla fine del 2100 sarà tra 1.8 e 4 gradi.

Alla luce del rapido e continuo aumento della concentrazione di gas serra e della mancanza di efficaci strumenti sia di carattere tecnico che programmatico in grado di contrastare suddetto fenomeno, risulta ineluttabile la necessità di soluzioni che ostacolino l'incremento della temperatura globale mediante metodi ambientalmente compatibili. Un'alternativa economica e di facile attuazione rispetto alle soluzioni che prevedono la cattura o la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e gas serra direttamente sugli impianti tecnologici responsabili di dette emissioni è rappresentata da sistemi e soluzioni tecnologiche che consentano il contenimento del riscaldamento globale mediante l'incremento dell'albedo della terra.

A tale proposito sono stati recentemente depositati due nuovi brevetti n. PG 2006 A 0086 [3] e n. PG 2007 A 0009 [4] riguardanti le suddette tecnologie, di cui si dà una breve illustrazione nel paragrafo che segue, che propongono tra l'altro un metodo matematico per valutare l'effetto del coefficiente di riflessione medio della terra sulla temperatura globale.

Nel presente studio si propone di realizzare un prototipo

sperimentale descrivendone anche un modello di calcolo che riproducendo il sistema **Sole-Universo-Terra** consenta di verificare sperimentalmente le relazioni proposte nei brevetti di cui sopra.

Descrizione dei brevetti

La temperatura globale media dell'atmosfera terrestre è strettamente collegata alle caratteristiche radiative della superficie della Terra. La porzione di radiazione solare assorbita dalla superficie ed il conseguente riscaldamento prodotto da tale assorbimento costituisce infatti, insieme all'effetto serra indotto dall'atmosfera, il meccanismo alla base del mantenimento della temperatura sulla superficie terrestre su valori idonei all'esistenza della vita animale e vegetale.

In generale, circa il 26% della radiazione solare è riflessa o diffusa di nuovo nello spazio dalle nubi e da altre particelle presenti nell'atmosfera terrestre, il 19% è assorbito dalle nubi, dai gas e dalle particelle presenti nell'atmosfera terrestre, il restante 55% passa attraverso l'atmosfera terrestre raggiungendo la superficie terrestre, e di questa porzione circa il 4% è riflesso dalla superficie terrestre di nuovo nello spazio. In media quindi, circa il 51% della radiazione solare raggiunge la superficie terrestre e qui viene in gran parte assorbita dal terreno producendo il riscaldamento della superficie terrestre e dello strato di atmosfera terrestre più basso. La radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre viene riemessa come radiazione con lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura della superficie terrestre stessa; poiché tale temperatura è mediamente di 288 K, la radiazione riemessa cade nel campo delle lunghezze d'onda delle radiazioni infrarosse, tra circa 7 e 14 μm (Legge di Wien). Tale radiazione è diretta generalmente verso lo spazio: una parte di

questa energia esce dall'atmosfera, mentre un'altra parte viene assorbita o riflessa di nuovo verso la terra dai gas serra presenti nell'atmosfera terrestre.

L'incremento della concentrazione in atmosfera dei gas serra genera un riscaldamento addizionale dell'atmosfera stessa. La presenza dei gas serra è un fenomeno del tutto naturale senza il quale la temperatura globale media della terra sarebbe di circa $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, invece che $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nei brevetti in oggetto si propone come soluzione al problema del riscaldamento globale del pianeta l'incremento dell'albedo della Terra mediante la posa in opera di materiali riflettenti con coefficiente di riflessione maggiore rispetto a quello medio della superficie terrestre nelle lunghezze d'onda dello spettro solare ed eventualmente coefficiente di emissività maggiore rispetto a quello della superficie terrestre nell'infrarosso, con conseguente riduzione della porzione di radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre e conseguente riduzione della temperatura media dell'atmosfera, senza modificare o alterare la termofluidodinamica e la cinetica dei fenomeni atmosferici. Tale fenomeno può essere conseguito attraverso la posa in opera od il rivestimento di superfici con materiali ad emissività selettiva caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione nelle lunghezze d'onda del visibile ed eventualmente eccellenti proprietà d'emissione nell'infrarosso per consentire un'efficace reirraggiamento del calore assorbito.

L'elemento più innovativo del brevetto n. PG 2006 A 0086 è l'individuazione una relazione matematica che determina il legame tra le caratteristiche radiative nello spettro solare e nell'infrarosso della superficie terrestre e la temperatura media globale. Tale relazione costituisce uno strumento versatile e di rapido impiego per valutare l'influenza delle variazioni delle proprietà di assorbimento della superficie della Terra sulla temperatura atmosferica e conseguentemente per quantificare l'estensione della superficie necessaria a compensare il riscaldamento indotto dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica e degli altri gas serra in atmosfera.

La temperatura della Terra può essere stimata con un modello basato su un bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre. A tale proposito si introduce la grandezza radiosità [5] che esprime la quantità d'energia radiante complessivamente uscente da ciascun corpo per unità di superficie in termini d'energia emessa, riflessa e trasmessa. I tre corpi hanno caratteristiche di emissività selettive ovvero che mostrano diversi valori delle proprietà fotometriche negli intervalli dello spettro solare e dell'infrarosso; in ciascuno di questi due intervalli talune proprietà si considerano costanti seppur diverse tra di loro. Introducendo pertanto le proprietà emissive medie dei corpi nello spettro solare e nell'infrarosso si determina il bilancio energetico in ciascuno degli intervalli di lunghezza d'onda suddetti: per ciascun corpo si introduce il coefficiente di assorbimento medio, il coefficiente di riflessione medio, il coefficiente di trasmissione medio e la radiosità nello spettro solare e nell'infrarosso. A tale proposito l'atmosfera viene considerata come un corpo condensato di spessore infinitesimo e di temperatura pari alla sua temperatura media radiante. In condizioni di regime stazionario, valgono le seguenti ipotesi operative:

- temperatura dei corpi costante;
- proprietà radiative dei corpi uniformi (radiosità uniforme);
- emissione dei corpi perfettamente diffusa;
- l'atmosfera vede per intero la volta celeste e la superficie terrestre;

- la superficie terrestre vede per intero l'atmosfera. Lo schema di riferimento è riportato nella figura seguente.

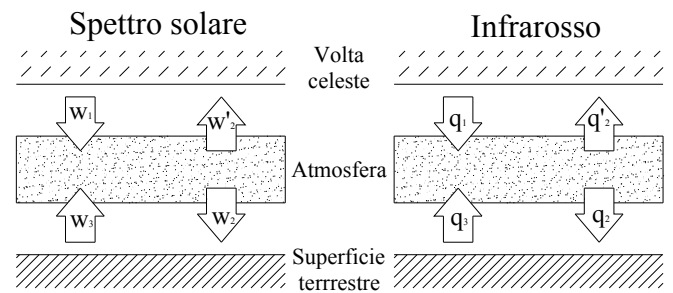


Figura 1: modello basato su un bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre.

Nello spettro solare l'atmosfera si comporta come un corpo trasparente alla radiazione, mentre la superficie terrestre come un corpo opaco. Il bilancio energetico può essere espresso mediante le relazioni di seguito riportate:

$$w'_2 = w_1 \cdot r_2 + w_3 \cdot t_2$$

$$w_2 = w_1 \cdot t_2 + w_3 \cdot r_2$$

$$w_3 = w_2 \cdot r_3$$

Nell'infrarosso, il flusso energetico emesso dalla volta celeste può essere considerato con buona approssimazione nullo. Il bilancio energetico diventa:

$$q'_2 = \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \tau_2$$

$$q_2 = \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \rho_2$$

$$q_3 = \sigma_0 \cdot \alpha_3 \cdot T_3^4 + q_2 \cdot \rho_3$$

I bilanci energetici complessivi per l'atmosfera e la superficie terrestre si ricavano considerando tutti i contributi energetici sia nello spettro solare che nell'infrarosso:

$$w_3 + w_1 + q_3 = w_2 + w'_2 + q'_2 + q_2$$

$$w_2 + q_2 = w_3 + q_3$$

Dalla risoluzione del sistema formato dalle otto relazioni precedenti in otto incognite, si ottiene il valore della temperatura della superficie terrestre T_3 ; tale valore dipende dalle caratteristiche fotometriche medie dei corpi che prendono parte allo scambio energetico nello spettro solare e nell'infrarosso.

L'installazione di superfici ad emissività selettiva produce una modifica delle proprietà d'assorbimento medio e d'emissione della superficie terrestre sia nello spettro solare che nell'infrarosso con conseguente variazione della temperatura della superficie terrestre stessa. Le relazioni che ci forniscono, nello spettro solare e nell'infrarosso, il coefficiente d'assorbimento medio in funzione della superficie terrestre ST e della superficie ad emissività selettiva SR sono:

$$a'_3 = [a_3 \cdot (S_T - S_R) + a_R \cdot S_R] / S_T$$

$$\alpha'_3 = [\alpha_3 \cdot (S_T - S_R) + \alpha_R \cdot S_R] / S_T$$

Applicando il sistema di cui sopra è stato quantificato che l'area di superficie ad emissività selettiva, con valore medio

dell'emissività nello spettro solare pari a 0.1 da disporre sulla superficie terrestre (vedi metodologie proposte nell'altro brevetto e descritte nel seguito) necessaria a compensare l'effetto dell'immissione in atmosfera di una tonnellata di CO₂ è pari a 26,5 m². Valore che dipende però dalla latitudine a cui si realizza l'intervento e che quindi, sfruttando zone equatoriali a più alto valore di irraggiamento solare, può essere ulteriormente ridotto.

Nell'altro brevetto (n. PG 2007 A 0009) vengono altresì individuate alcune soluzioni sostenibili per realizzare le superfici riflettenti necessarie ad attuare le proposte del brevetto precedentemente descritto:

- rivestimento con materiali riflettenti ad emissività selettiva dei tetti delle abitazioni, delle coperture degli impianti sportivi ed industriali e più in generale di tutte le superfici disponibili;
- disposizione sul manto stradale di strati di vernice o di qualsiasi altro tipo di materiale con coefficiente di riflessione della luce solare maggiori di quello della superficie terrestre ed eventualmente con un coefficiente di emissività molto più elevato rispetto a quello della superficie terrestre nell'infrarosso;
- coltivazione e l'impianto floreale di fiori, arbusti e alberi con idonee caratteristiche cromatiche. Tali specie dovranno presentare valori del coefficiente di riflessione nello spettro solare maggiori di quello della superficie terrestre;
- l'installazione sulle superfici marine ed oceaniche di isole artificiali piane. Le isole dovranno essere caratterizzate da superfici con valori del coefficiente di riflessione molto più elevato rispetto a quello della superficie marina;
- l'installazione sulle superfici marine ed oceaniche di isole artificiali piane in cui la superficie riflettente sarà realizzata mediante la deposizione di sale marino ottenuto dalla stessa evaporazione dell'acqua di mare (isole di sale);
- creazione di zone artificiali quali saline e vasche di colmata lungo le coste marine ove è minimo l'impatto ambientale o in aree non di pregio quali siti petrolchimici, porti industriali.

DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO

Come mostrato in figura 2 e figura 3, due cupole concentriche in vetro sono state alloggiare sopra un piano isolante in teflon.

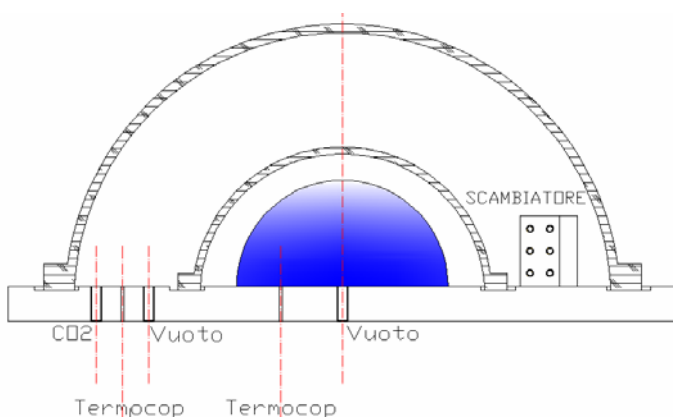


Figura 2: Sezione verticale del prototipo.

Nella cupola interna, è stata posizionata una calotta sferica (CS) in plastica che rappresenta la superficie terrestre isolata termicamente dal piano sopra il quale appoggia. Nella parte interna della calotta a contatto con la superficie sono posizionate delle termocopie al fine di controllare, tramite una scheda d'acquisizione collegata ad un PC la temperatura della CS. All'interno della cupola più piccola (C2) viene fatto il vuoto per garantire che la CS scambi con l'ambiente solo per irraggiamento.

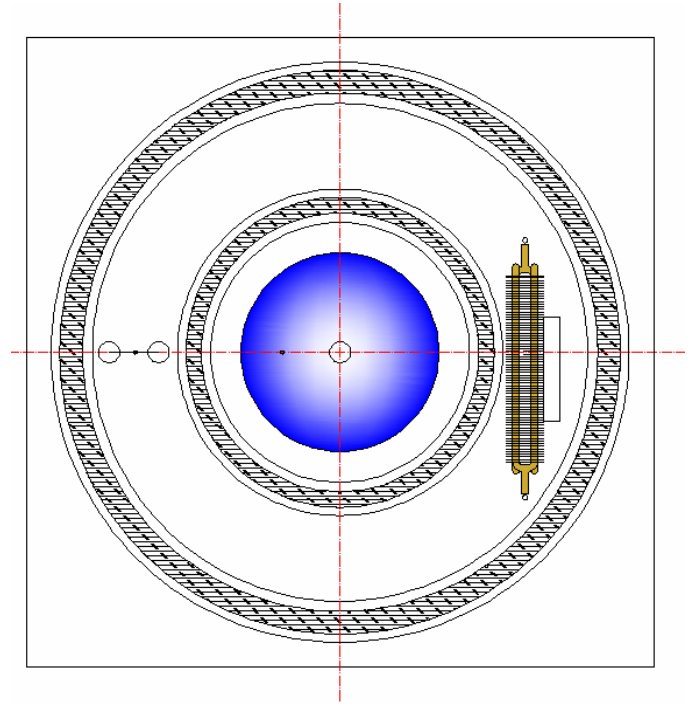


Figura 3: Visione del piano orizzontale del prototipo.

Nell'intercapedine tra le due cupole di vetro viene fatto il vuoto ed inserita anidride carbonica per garantire che all'interno dell'intercapedine non si formi brina o condensa.

Il vuoto all'interno di C2 e dell'intercapedine è realizzato mediante una pompa. Il circuito d'aspirazione della pompa è dotato di una valvola a tre vie che permette di fare il vuoto in tempi diversi in C2 e nell'intercapedine oltre che chiudere il circuito una volta ottenuto il vuoto. Quest'ultimo è garantito da due guarnizioni di gomma che poste nelle sedi ricavate sul basamento garantiscono un accoppiamento a tenuta tra C2 e C1 da un lato e il basamento di teflon dall'altro.

Nell'intercapedine si trova anche uno scambiatore alettato fluido-CO₂ collegato ad un chiller che assicura una temperatura del fluido termovettore fino a -40°C. Per produrre uno scambio maggiore tra il fluido e la CO₂ e per uniformare la temperatura del gas contenuto all'interno di tutta l'intercapedine allo scambiatore è accoppiata una ventola elettrica. L'intercapedine è mantenuta ad una temperatura pari a -35°C.

Una lampada allo xeno ad alta pressione fissata ad una distanza di circa 54 centimetri dalla calotta sferica irradia il sistema scaldando la CS interna.

Caratteristiche degli elementi del prototipo

Si riportano di seguito sotto forma di tabella le principali caratteristiche degli elementi che costituiscono il prototipo.

a) Base di teflon:

Tabella 1: Caratteristiche della base di teflon.

	Base di teflon
Dimensioni (11x12xH) cm	75x75x5
Profondità sede guarnizione cm	0,5
Conducibilità termica W/(m K)	0.23

b) Cupole di vetro:

Tabella 2: Caratteristiche delle due cupole di vetro.

	Cupola 1 (C1)	Cupola 2 (C2)
Diametro cm	60	40
Altezza cm	30	23
Spessore cm	0.8	0.4

Di cui sotto si riportano le curve di trasmissione al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente e dello spessore del vetro che costituisce la cupola stessa.

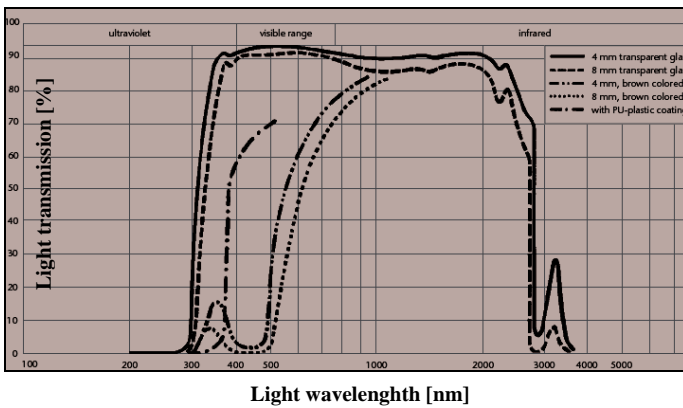


Figura 4: Curve di trasmissione al variare della lunghezza d'onda per cupole di spessore 8 mm e 4 mm.

c) Calotta sferica:

Tabella 3: Caratteristiche della calotta sferica.

	Calotta sferica (CS)
Diametro cm	28
Conducibilità termica W/(m K)	0,23

d) Scambiatore alettato:

Tabella 4: Caratteristiche dello scambiatore alettato.

	Scambiatore
Dimensioni alette (11x12) cm	4x8
Lunghezza cm	16
Diametro tubi refrigerante cm	0,8
Potenza frigorifera massima kW	1,5

e) Pompa da vuoto:

Tabella 5: Caratteristiche della pompa per il vuoto.

	Pompa da vuoto
Potenza W	550
Velocità d'aspirazione m ³ /h	16
Vuoto massimo realizzabile Pa	5

f) Chiller:

Tabella 6: Caratteristiche del chiller.

	Chiller
Potenza kW	4.1
Temperatura °C (minima del fluido termovettore)	-40

g) Lampada allo xeno:

Tabella 7: Caratteristiche della lampada allo xeno.

	Lampada xeno
Potenza assorbita dalla lampada W	1600
Potenza irradiata W/m ² (ad una distanza di 54 cm)	485

Di cui sotto si riporta il tipico spettro di emissione.

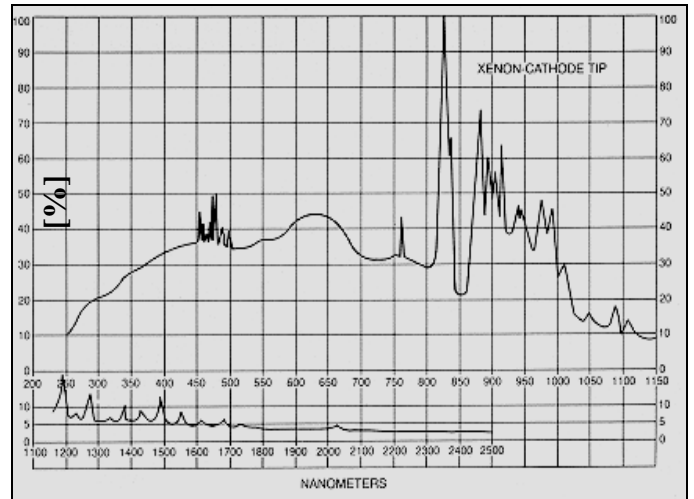


Figura 5: Spettro d'emissione di una lampada allo xeno ad alta pressione.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL PROTOTIPO

La radiazione emessa dalla lampada allo xeno, dopo aver attraversato la C1 e la C2 colpisce la superficie della calotta sferica. Le due campane si comportano come dei corpi trasparenti caratterizzati da specifici coefficienti di riflessione (r), assorbimento (a) e trasparenza (t) che in parte assorbono, riflettono e lasciano trasparire la radiazione incidente.

La calotta sferica si comporta invece come un corpo grigio con fissati valori di coefficiente di riflessione e di assorbimento. Quest'ultima si porta ad una temperatura di

equilibrio frutto della radiazione visibile incidente e della radiazione infrarossa uscente dovuta alla presenza della calotta a -35 C° . Variando l'albedo della CS, ossia variando il suo coefficiente di riflessione nel visibile, si può valutare come varia la temperatura a cui in condizioni stazionarie si porta il sistema Terra-Atmosfera rappresentato appunto da CS. La variazione dell'albedo si può facilmente realizzare applicando su CS delle superfici ad emissività selettiva costituite da materiale apposito.

STUDIO DELLE EQUAZIONI CHE REGOLANO IL FENOMENO

I tre corpi hanno caratteristiche di emissività selettive ovvero che mostrano diversi valori delle proprietà fotometriche negli intervalli dello spettro solare e dell'infrarosso; in ciascuno di questi due intervalli talune proprietà si considerano costanti seppur diverse tra di loro. Introducendo pertanto le proprietà emissive medie dei corpi nello spettro solare e nell'infrarosso si determina il bilancio energetico in ciascuno degli intervalli di lunghezza d'onda suddetti: per ciascun corpo si introduce il coefficiente di assorbimento medio, il coefficiente di riflessione medio, il coefficiente di trasmissione medio e la radiosità nello spettro solare e nell'infrarosso.

In condizioni di regime stazionario, valgono le seguenti ipotesi operative:

1. temperatura dei corpi costante;
2. proprietà radiative dei corpi uniforme (radiosità uniforme);
3. emissione dei corpi perfettamente diffusa;
4. lunghezza d'onda del visibile che comprende anche il vicino infrarosso $0.38\ \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2\ \mu\text{m}$;
5. lunghezza d'onda dell'infrarosso spinto $\lambda > 3\ \mu\text{m}$;
6. coefficienti di riflessione, assorbimento, trasparenza medi e costanti rispettivamente nel campo del visibile e dell'infrarosso;
7. trasmissione di calore per conduzione nullo nell'intercapedine e con l'ambiente esterno;
8. l'energia irradiata dalla cupola C2 colpisce totalmente la cupola C1;
9. l'energia irradiata dalla calotta sferica CS colpisce totalmente la cupola C2;
10. la temperatura della superficie interna della cupola C2 è costante alla temperatura di -30C° grazie ad un termostato che agisce sulla temperatura del gas contenuto fra la cupola C2 e C1.

Lo schema del fenomeno a cui si fa riferimento nei calcoli è quello rappresentato in figura 6.

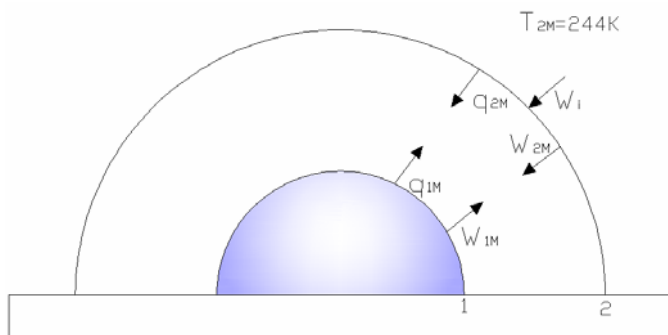


Figura 6: Schema dei flussi energetici scambiati dagli elementi del prototipo nel visibile e nell'infrarosso.

Visibile

$$A_1 \cdot W_{1M} = r_{1M} \cdot (F_{21} \cdot A_2 \cdot W_{2M})$$

$$A_2 \cdot W_{2M} = A_1 \cdot W_i \cdot t_{2M} + r_{2M} \cdot (A_1 \cdot W_{1M} + A_2 \cdot F_{22} \cdot W_{2M})$$

In virtù della geometria dei corpi che prendono parte al fenomeno si ha:

$$F_{12} = 1; F_{21} = \frac{A_1}{A_2}; F_{22} = 1 - \frac{A_1}{A_2}$$

Infrarosso

$$A_1 \cdot q_{1M} = \sigma_o \cdot A_1 \cdot \alpha_{1M} \cdot T_{1M}^4 + \rho_{1M} \cdot A_2 \cdot F_{21} \cdot q_{2M}$$

$$A_2 \cdot q_{2M} = \sigma_o \cdot A_2 \cdot \alpha_{2M} \cdot T_{2M}^4 + \rho_{2M} \cdot (A_1 \cdot F_{12} \cdot q_{1M} + A_2 \cdot F_{22} \cdot q_{2M})$$

Infine introducendo un bilancio complessivo di energia in corrispondenza del corpo 1 si ha:

$$A_1 \cdot (q_{1M} + W_{1M}) = A_2 \cdot F_{21} \cdot (q_{2M} + W_{2M})$$

Dalla soluzione del sistema formato da 5 equazioni in 5 incognite si ottiene il valore della temperatura sulla superficie del corpo 1.

CONCLUSIONI

Sulla base delle caratteristiche dei materiali che compongono gli elementi del sistema per una radiazione incidente sulla calotta esterna pari a 300 W/m^2 , i valori della temperatura di equilibrio della CS ottenuti al variare del proprio coefficiente di assorbimento nel visibile, sono riportati in tabella 8.

Tabella 8: Temperatura della CS al variare del proprio coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

a_M	T [°K]	Δa_M	ΔT	$\Delta T/\Delta a_M$
0,92	281,89	-	-	-
0,9	281,25	0,02	0,64	32
0,88	280,61	0,02	0,64	32
0,86	279,95	0,02	0,66	33
0,84	279,29	0,02	0,66	33
0,82	278,63	0,02	0,66	33

Si osserva che il parametro $\Delta T/\Delta a$ risulta con buona approssimazione costante nell'intervallo dei valori tipici del coefficiente di assorbimento nel visibile della CS; tale circostanza consente di affermare che la temperatura dipende in maniera lineare dallo stesso coefficiente di assorbimento. I risultati ottenuti verranno verificati mediante una campagna di misura sperimentale in corso di svolgimento.

Confrontiamo ora i valori di $\Delta T/\Delta a$ riportati in tabella 8 con quelli ottenibili dalla risoluzione del modello proposto nei brevetti oggetto di studio e riportati in tabella 9.

Tabella 9: Temperatura della Terra al variare del suo coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

a_T	T [°K]	Δa_T	ΔT	$\Delta T/\Delta a_T$
0,92	288,22	-	-	-
0,90	287,46	0,02	0,76	38
0,88	286,69	0,02	0,77	38,5
0,86	285,90	0,02	0,79	39,5
0,84	285,09	0,02	0,81	40,5
0,82	284,26	0,02	0,83	41,5

Si può vedere come i due modelli abbiano valori simili di sensibilità della temperatura alla variazione del coefficiente di assorbimento medio nel visibile.

ELENCO DEI SIMBOLI

w_1 = radiosità della volta celeste nello spettro solare [W/m^2];
 w_2 = radiosità dell'atmosfera nello spettro solare emessa verso la superficie terrestre [W/m^2];
 w'_2 = radiosità dell'atmosfera nello spettro solare emessa verso la volta celeste [W/m^2];
 w_3 = radiosità della superficie terrestre nello spettro solare [W/m^2];
 a_3 = coefficiente di assorbimento medio della Terra nello spettro solare;
 a_R = coefficiente di assorbimento medio della superficie riflettente nello spettro solare;
 a_3' = coefficiente di assorbimento medio terrestre nello spettro solare in funzione dell'area della superficie terrestre di quella ad emissività selettiva installata;
 r_2 = coefficiente di riflessione medio dell'atmosfera nello spettro solare;
 r_3 = coefficiente di riflessione medio della terra nello spettro solare;
 t_2 = coefficiente di trasparenza medio dell'atmosfera nello spettro solare;
 q_2 = radiosità dell'atmosfera nell'infrarosso emessa verso la superficie terrestre [W/m^2];
 q'_2 = radiosità dell'atmosfera nell'infrarosso emessa verso la volta celeste [W/m^2];
 q_3 = radiosità della superficie terrestre nell'infrarosso [W/m^2];
 ρ_2 = coefficiente di riflessione medio dell'atmosfera nell'infrarosso;
 ρ_3 = coefficiente di riflessione medio della terra nell'infrarosso;
 τ_2 = coefficiente di trasparenza medio dell'atmosfera nell'infrarosso;
 α_2 = coefficiente di assorbimento medio dell'atmosfera nell'infrarosso;
 α_3 = coefficiente di assorbimento medio della Terra nell'infrarosso;
 α_3' = coefficiente di assorbimento medio terrestre nell'infrarosso in funzione dell'area della superficie terrestre e di quella ad emissività selettiva installata;
 α_R = coefficiente di assorbimento medio della superficie riflettente nell'infrarosso;
 T_1 = temperatura della superficie terrestre [K];
 T_2 = temperatura media dell'atmosfera [K];
 S_T = area della superficie terrestre [m^2];
 S_R = area della superficie ad emissività selettiva [m^2];

w_{1M} = radiosità della calotta CS nello spettro solare emessa verso la cupola C2 [W/m^2];
 w_{2M} = radiosità cupola C2 nello spettro solare emessa verso la calotta CS [W/m^2];
 w_i = potenza luminosa emessa dalla lampada allo xeno che colpisce la cupola C2 [W/m^2];
 q_{1M} = radiosità della calotta CS nell'infrarosso emessa verso la cupola C2 [W/m^2];
 q_{2M} = radiosità della cupola C2 nell'infrarosso emessa verso la calotta CS [W/m^2];
 r_{1M} = coefficiente di riflessione medio della calotta CS nello spettro solare;
 r_{2M} = coefficiente di riflessione medio della cupola C2 nello spettro solare;
 t_{2M} = coefficiente di trasparenza medio della cupola C2 nello spettro solare;
 F_{12}, F_{22}, F_{21} = fattori di forma;
 A_1 = area della superficie della calotta CS [m^2];
 A_2 = area della superficie della cupola C2 [m^2];
 α_{1M} = coefficiente di assorbimento medio della calotta CS nell'infrarosso;
 α_{2M} = coefficiente di assorbimento medio della cupola C2 nell'infrarosso;
 ρ_{1M} = coefficiente di riflessione medio della calotta CS nell'infrarosso;
 ρ_{2M} = coefficiente di riflessione medio della cupola C2 nell'infrarosso;
 T_{1M} = temperatura della superficie della calotta CS [K];
 T_{2M} = temperatura della superficie della cupola C2 [K];
 σ_0 = costante di Stefan Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp;
2. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Richard Alley, Terje Berntsen, Nathaniel L. Bindoff, Zhenlin Chen, et al.] Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007;
3. Franco Cotana, Federico Rossi, Superfici riflettenti equivalenti a quantità di gas serra ai fini dei certificati di emissione e del commercio dei diritti di emissione, basate sul controllo dell'albedo terrestre e finalizzate al contenimento del riscaldamento globale in base alla relazione quantitativa tra la temperatura media della terra, la concentrazione di gas serra in atmosfera e le caratteristiche radiative della superficie terrestre stessa, Brevetto n. PG 2006 A 0086, Depositato presso l'Ufficio Provinciale Industria Commercio ed Artigianato di Perugia;
4. Franco Cotana, Federico Rossi, "Sistemi e dispositivi per il controllo dell'albedo terrestre finalizzati al contenimento del riscaldamento globale in base alla relazione quantitativa di cui al brevetto n. PG 2006 A 0086", Brevetto n. PG 2007 A 0009, Depositato presso l'Ufficio Provinciale Industria Commercio ed Artigianato di Perugia;
5. Mauro Felli, Lezioni di Fisica Tecnica 2, Trasmissione del calore, Acustica, Tecnica dell'illuminazione, Nuova edizione a Cura di Federico Rossi, Morlacchi ed., Cap.4.