

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: L-9 - INGEGNERIA INDUSTRIALE

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Termofluidodinamica Applicata

Studio del raffreddamento forzato di lampada a scarica

in un proiettore a testa mobile

CANDIDATO

Gasperoni Samuele

RELATORE

Dott.Ing. Lorenzini Marco

Anno Accademico 2011-2012

Sessione III

A Giulio

Questo elaborato tratta lo studio del raffreddamento forzato ad aria, con gruppo ventola tangenziale soffiante, del gruppo lampada a scarica ad alta pressione e media potenza montato sul proiettore a testa mobile MAX di utilizzo televisivo / grandi eventi; questo è prodotto da D.T.S. srl, che ha commissionato la realizzazione del progetto.

L'obiettivo finale sarà la realizzazione e la programmazione di un'applicazione in grado di stimare la temperatura del corpo lampada in tutte le possibili condizioni di utilizzo selezionate dall'utente, applicabile ad un'ampia famiglia di proiettori che condividono caratteristiche strutturali simili, nonché adattabile, tramite modifiche limitate, all'utilizzo su un più ampio gruppo di macchine.

L'elaborato si articolerà in:

- 3 capitoli di carattere teorico (capp. 1, 2 e 3), che introducono le necessarie nozioni in campo di scambio termico per convezione e irraggiamento, oltre ad elementi di ottica geometrica e ad accenni su alcune soluzioni tecnologiche in campo ottico adottate sulla macchina in esame;
- il capitolo 4, che introdurrà le problematiche di raffreddamento studiate, evidenziando inoltre i requisiti imposti da D.T.S. sull'applicazione;
- il capitolo 5, nel quale si analizzeranno le variabili coinvolte e si delinea la struttura del progetto, con lo studio del bilancio di potenza sul gruppo lampada;
- il capitolo 6, nel quale si parametrizzerà la potenza termica prodotta sulla lampada in funzione di variabili di progetto e impostazioni selezionate da costruttore ed utente finale; in particolare, si analizzerà l'effetto dell'inserimento di filtri colore dicroici lineari sulla componente di potenza luminosa riflessa sul corpo lampada;
- il capitolo 7, che studierà nel dettaglio la componente di potenza dissipata a livello del riflettore ellittico della lampada, individuando la distribuzione di temperatura sul suo sviluppo;
- il capitolo 8, nel quale si analizzerà la componente di potenza dispersa a livello del bulbo lampada, con particolare attenzione alla componente di convezione forzata, legata a caratteristiche geometriche della ventola, oltre che alle perdite di carico sull'impianto di

raffreddamento; si individuerà inoltre, con l'ausilio della programmazione in MatLab, la relazione termodinamica che descrive questa componente;

- il capitolo 9, dedicato a conclusioni e considerazioni finali, con particolare interesse a possibili applicazioni ad altre macchine di diversa struttura, in fase di sviluppo;

- le appendici I, II e III, contenenti il listato, commentato passo per passo, dell'applicazione, realizzata in linguaggio MatLab, oltre alle interfacce grafiche sviluppate;

- l'appendice IV, comprendente una porzione dei valori di temperatura rilevati sperimentalmente in punti fissati di diverse lampade dello stesso modello, installate sulla macchina in esame; questi dati sono poi confrontati con i risultati forniti dall'applicazione;

- l'appendice V, contenente alcuni diagrammi spettrografici di potenza relativa, che descrivono il comportamento emissivo della lampada considerata e di riflessione dei filtri diecrici alle diverse lunghezze d'onda del visibile; si includono anche i dati relativi al campionamento delle curve da questi descritte.

Indice

Capitolo 1. Scambio termico per convezione	1
1.1. Regimi di moto	1
1.2. Strato limite dinamico	3
1.3. Strato limite termico	4
1.4. Flusso termico scambiato per convezione	5
1.5. Adimensionalizzazione delle equazioni convettive	6
1.6. Convezione forzata	9
1.7. Convezione naturale	9
Capitolo 2. Irraggiamento	11
2.1. Emissione di un corpo	12
2.2. Irradiazione di un corpo	13
2.3. Superfici irradiate	13
2.4. Radiosità	14
2.5. Studio del corpo nero	14
2.5.1. Legge di Planck	15
2.6. Emissione di un corpo reale	16
2.7. Legge di Kirchoff	17
2.8. Potenza termica scambiata tra superfici	18
Capitolo 3. Ottica geometrica	21
3.1. Legge di Snell della riflessione	21

3.2. Legge di Snell della rifrazione	21
3.3. Onde sferiche	22
3.4. Diottro sferico	22
3.5. Specchi sferici	24
3.6. Specchi ellittici	25
3.7. Riflessione di Fresnel	26
3.8. Interferenza e film sottili	27
Capitolo 4. Scopo e requisiti del progetto	29
Capitolo 5. Studio del bilancio termico	35
5.1. Equilibrio termico	36
5.1.1. Potenza termica prodotta	36
5.1.2. Potenza termica dissipata	37
Capitolo 6. Potenza termica generata	39
6.1. Potenza termica prodotta	39
6.2. Potenza luminosa riflessa	40
6.2.1 Filtri dicroici normali all'asse ottico	42
6.2.2 Filtri dicroici inclinati rispetto all'asse ottico	44
6.2.3 Potenza termica riflessa totale	48

Capitolo 7. Potenza termica dissipata a livello del riflettore	51
7.1. Distribuzione di temperatura	52
7.1.1. Bilancio di potenza	53
7.2 Potenza termica dissipata	55
Capitolo 8. Potenza termica dissipata a livello del bulbo	57
8.1. Convezione naturale	57
8.2. Convezione forzata	58
8.2.1. Cadute di carico sul sistema di ventilazione	58
8.2.2. Convergente	60
8.2.3. Correlazione termo fluidodinamica	61
8.2.4. Bilancio termico	62
Capitolo 9. Conclusioni e sviluppi futuri	65
Appendice I. Listato del programma in linguaggio MatLab	i
Appendice II. Interfaccia grafica MatLab	xxiii
Appendice III. Spreadsheets Excel	xxv
Appendice IV. Valori di temperatura rilevati	xxxi
Appendice V. Diagrammi spettrografici di potenza relativa	xliii

Capitolo 1. Scambio termico per convezione

La trasmissione del calore per convezione termica ha luogo quando almeno uno dei due corpi che si scambiano calore è un fluido. Condizione necessaria perché il fenomeno avvenga è che il fluido sia posto, o possa porsi, in moto relativo rispetto al corpo con cui scambia calore. In generale si può considerare che la convezione avvenga in seno al fluido in uno spazio limitato che ha inizio all'interfaccia tra il fluido e l'altro corpo. Il moto relativo del fluido può essere indotto da dispositivi meccanici o da fenomeni naturali che impongono al fluido una certa velocità (convezione forzata) o generato dallo scambio termico in corso, il quale, a seguito della modificazione delle caratteristiche termodinamiche del fluido, in particolare della sua densità, con il variare della sua temperatura, origina uno spostamento di massa (convezione naturale o libera); i volumi di fluido con più bassa densità tendono a salire richiamando al loro posto volumi di fluido con densità maggiore (moti convettivi). La distinzione tra i due tipi di convezione non è netta e spesso nelle situazioni reali essi coesistono. Si possono considerare i casi di convezione puramente forzata o naturale come situazioni estreme cui è utile ricondurre i fenomeni reali per ottenere semplificazioni analitiche.

Nella convezione le modalità microscopiche di trasmissione dell'energia sono le medesime che nel caso della conduzione, con la sostanziale differenza che, essendo il fluido in moto, al trasporto di energia dovuto alle interazioni molecolari si somma il moto di materia che veicola tale energia nello spazio e nel tempo. Se la velocità relativa fluido-oggetto risultasse nulla, il meccanismo di trasmissione del calore in seno al fluido sarebbe quello di conduzione e l'energia si trasmetterebbe tra le particelle senza moto macroscopico di materia.

1.1 Regimi di moto

Si possono identificare due differenti tipologie di regimi di flusso, regime laminare e regime turbolento. Nel regime di moto laminare, le linee di flusso (filetti fluidi), che corrispondono alle traiettorie delle sue particelle, sono parallele tra loro. Di conseguenza si può considerare separatamente i diversi elementi fluidi, con un limitatissimo mescolamento tra parti diverse del sistema fluido in moto. E' possibile cioè definire analiticamente per le diverse grandezze fisiche in ogni punto del fluido e per ogni istante di tempo un determinato valore. In genere l'ordine viene dettato da una superficie solida che forza nelle sue vicinanze il moto delle molecole fluide. Diversamente, nel caso di moto turbolento, le traiettorie del

fluidi sono tortuose e complesse, con continui processi di mescolamento in seno alla corrente tra masse di fluido di zone differenti. Le distorsioni nelle linee di flusso provocano il formarsi di un regime di moto caotico, nel quale le grandezze fisiche locali variano nel tempo e nello spazio senza seguire leggi determinabili, rendendo difficile lo studio analitico dei singoli elementi fluidi. Nel caso di moto turbolento il valore istantaneo in un punto di una proprietà fisica P in funzione del tempo potrebbe essere ottenuto come somma di un valore medio temporale $P = \int_0^T P dt$ e di una componente fluttuante $P'(T)$.

È possibile modellizzare il trasporto della quantità di moto, del calore e della massa in uno strato turbolento con la sovrapposizione al moto laminare del moto di vortici, che permette l'omogenizzazione delle condizioni della massa fluida, incrementando i fenomeni di trasporto

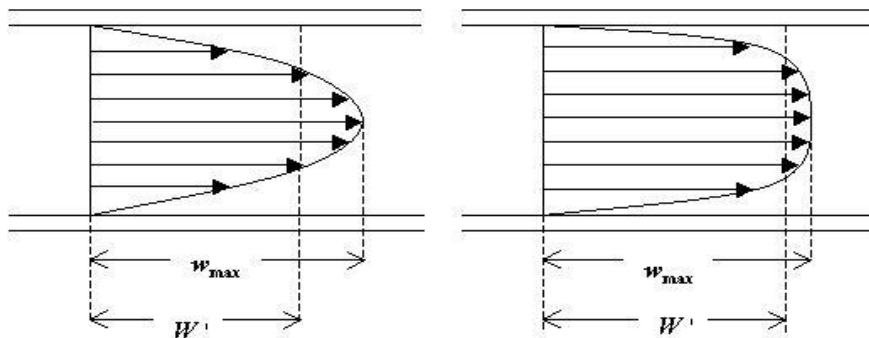


Fig. 1.1. Profili di velocità in regime laminare e in regime turbolento.

L'instaurarsi dell'uno o dell'altro regime è legato alla particolare condizione del sistema in esame, cioè alle proprietà del fluido (densità ρ , viscosità dinamica μ), al valore della velocità media U di scorrimento del fluido, alla rugosità R_d della superficie con cui il fluido è a contatto e alle caratteristiche geometriche del sistema definite da una dimensione caratteristica d . Questo legame può essere espresso tramite il raggruppamento adimensionale di Reynolds, con

$$Re = \frac{\rho d U}{\mu}$$

L'instaurarsi di fenomeni di turbolenza è quindi vincolato al rapporto tra forze di inerzia e forze viscose: se la componente inerziale risulta prevalente, cioè prevalgono i fenomeni di trascinamento, il regime di moto che si instaura è turbolento, se prevale la componente viscosa, cioè le tensioni tangenziali ostacolano il moto relativo degli elementi fluidi, si avrà l'instaurazione di un regime laminare.

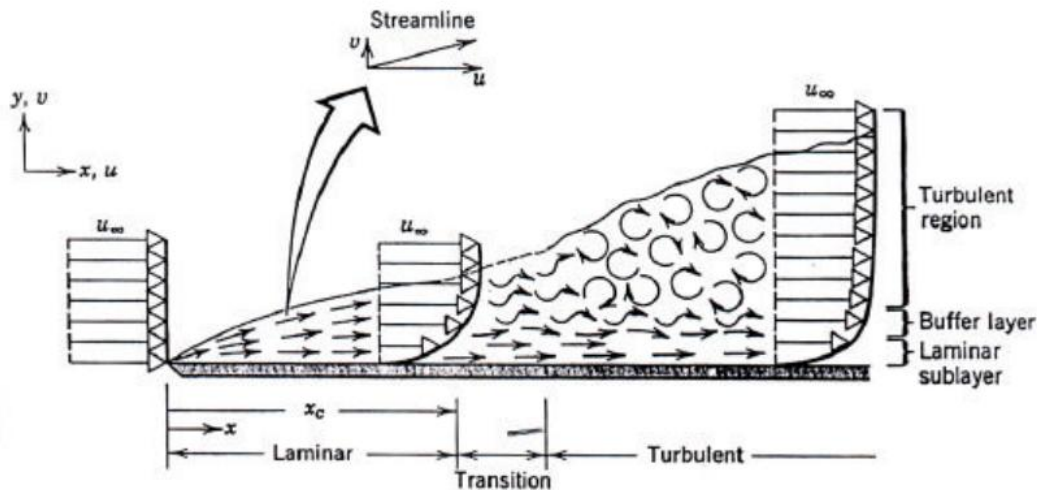


Fig. 1.2. Evoluzione dei regimi di moto per flusso su lastra piana.

I diversi regimi generalmente coesistono in una massa fluida; nel caso di moto su una lastra piana, dopo averne incontrato l'attacco, il fluido modifica il proprio regime di moto e si sviluppa il moto laminare. Lontano dalla lastra, se la velocità risulta sufficientemente elevata si avrà invece una regione di moto turbolento pienamente sviluppato. Analizzando lo strato limite si possono individuare nel suo spessore tre zone:

- a) un sottostrato laminare, in cui il fenomeno di trasporto è prevalentemente di tipo conduttivo e in cui i profili di velocità sono quasi lineari;
- b) una regione intermedia, nella quale i fenomeni di trasporto sono sia conduttivi che macroscopici;
- c) la zona turbolenta, in cui il trasporto di massa ed energia è prevalentemente di tipo macroscopico.

Per la lastra piana si ottiene sperimentalmente che la transizione tra i due regimi di moto si verifica per valori del numero di Reynolds compresi tra 10^5 e 3×10^6 . Per moto all'interno di condotte, il valore di Reynolds critico si riduce a 2300.

1.2. Strato limite dinamico

Nel caso più generale del moto di un fluido lungo una lastra piana, con direzione prevalente del moto in direzione parallela alla lastra ($u = u_x \cdot \hat{j}_x$), con $u = u(x, y)$, sufficientemente lontano dalla parete si potrà ritenere $u = u_\infty$ (corrente indisturbata) e in prossimità della parete $u(x, 0) = 0$ (condizioni di aderenza).

Gli elementi fluidi in condizioni di adesione, a causa della viscosità del fluido, tenderanno a ritardare il moto delle particelle adiacenti sino ad una distanza $y=\delta$ dalla superficie, distanza alla quale l'effetto descritto diviene trascurabile. Le diverse particelle di fluido risulteranno quindi in moto a velocità diverse, esercitando le une sulle altre uno sforzo tangenziale τ lungo piani paralleli alla piastra, con

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

per un fluido newtoniano.

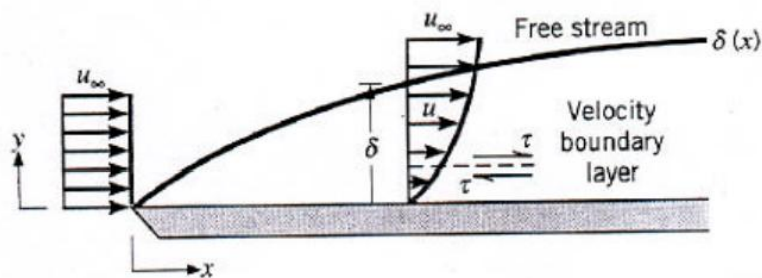


Fig. 1.3. Strato limite di velocità.

Al crescere della distanza dalla superficie la componente della velocità parallela alla superficie incrementerà sino al valore della corrente indisturbata u_∞ ; al crescere della distanza dal bordo di ingresso, cresce lo spessore δ dello strato limite (regione nella quale si manifesta un gradiente di velocità rilevante), aumentando l'influenza della viscosità nel flusso. Convenzionalmente, si considera lo spessore locale dello strato limite come δ tale che $u(\delta) = 0,99 u_\infty$.

1.3. Strato limite termico

In prossimità di una superficie lambita da un fluido si svilupperà uno strato limite termico nel caso vi sia differenza di temperatura tra parete e fluido.

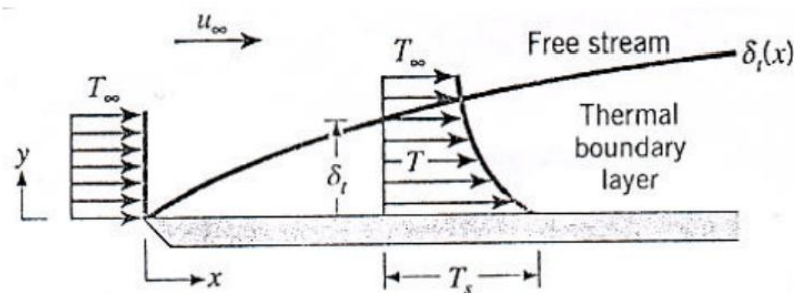


Fig. 1.4. Strato limite termico.

Nel caso più generale di una lastra piana isoterma a temperatura T_w , lambita da un fluido a temperatura $T_\infty < T_w$, si avrà all'imbocco un profilo termico uniforme con $T(y) = T_\infty$.

Gli elementi fluidi in prossimità della piastra tenderanno ad assumere temperatura pari a quella della piastra stessa, stabilendo con questa una condizione di equilibrio termico.

Lo scambio di energia tra gli elementi a contatto con la lastra e gli strati sovrastanti determinerà la formazione di un gradiente termico sino allo spessore δ_t , oltre il quale si avrà temperatura pari a quella del fluido indisturbato T_∞ .

Anche nel caso dello strato limite termico, lo spessore δ_t crescerà con la distanza dal bordo di attacco, considerandosi convenzionalmente uno spessore locale δ_t tale che

$$\frac{T_w - T(\delta)}{T_w - T_\infty} = 0,99.$$

Nel caso di un moto puramente laminare, nello strato limite termico, si può considerare lo scambio termico in direzione perpendicolare alla lastra come puramente conduttivo, con una potenza termica scambiata per unità di superficie della lastra

$$q = \lambda_{\text{fluido}} \frac{\partial T}{\partial y}$$

Nel caso, invece, di moto turbolento il fenomeno di conduzione del calore tra gli elementi fluidi è incrementato dall'instaurarsi di moti vorticosi che favoriscono lo scambio di energia interna tra i diversi volumi di fluido.

1.4. Flusso termico scambiato per convezione

Considerando il caso generico di un fluido a temperatura T_∞ che si muova a velocità V lungo una superficie di area A e forma arbitraria, con temperatura uniforme T_w diversa da T_∞ , il flusso termico q scambiato per convezione tra superficie e fluido per unità di superficie sarà esprimibile attraverso la relazione di Newton:

$$q = h(T_w - T_\infty)$$

con h coefficiente di scambio termico locale per convezione, misurata in $[W/(m^2 K)]$.

La potenza termica scambiata Q dall'intera superficie A , risulterà:

$$Q = \int_A q dA = (T_w - T_\infty) \int_A h dA$$

Definito il coefficiente di scambio termico per convezione medio h_m come:

$$h_m = \frac{1}{A} \int_A h dA$$

Si avrà:

$$Q = h_m(T_w - T_\infty)A$$

Il valore di h dipende sia dalle proprietà del fluido (viscosità, densità, conducibilità termica, calore specifico) sia dalla configurazione geometrica e dalle condizioni di moto. Uguagliando il flusso termico per unità di superficie trasferito per conduzione dalla lastra allo strato di fluido a contatto con essa a quello trasferito per conduzione agli strati sovrastanti, si avrà:

$$q = h(T_w - T_\infty) = \lambda_{\text{fluido}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$$

da cui

$$\frac{h}{\lambda} = (T_w - T_\infty) \left. \frac{\partial y}{\partial T} \right|_{y=0}$$

e, moltiplicando ambo i membri per una grandezza caratteristica L del sistema:

$$L \frac{h}{\lambda} = L(T_w - T_\infty) \left. \frac{\partial y}{\partial T} \right|_{y=0}$$

Si ottiene il raggruppamento adimensionale $Nu = L \frac{h}{\lambda}$

Numero di Nusselt, che rappresenta il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e quello che verrebbe scambiato per sola conduzione a fluido non in moto, cioè l'influenza del trasporto di massa nello scambio termico.

1.5. Adimensionalizzazione delle equazioni convettive

Considerato lo stretto legame tra fenomeni termici e fluidodinamici risulterebbe necessario lo studio del campo termofluidodinamico; questo risulta definito quando in ogni punto sono noti i valori di tutte le variabili che definiscono lo stato cinematico e termodinamico del fluido, generalmente univocamente definibili da 5 equazioni differenziali indipendenti scalari (2 per le variabili termodinamiche e 3 per le componenti della velocità), quali:

- equazione di continuità (bilancio di massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

- bilancio dell'energia;

- teorema della quantità di moto, proiettabile come equazioni scalari nelle tre componenti spaziali

$$\int_V \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \int_{S_{out}} \rho u dQ - \int_{S_{in}} \rho u dQ = \int_V \rho f dV \int_S F dS$$

Per ovviare alla complessità dell'individuazione di una soluzione generale analitica o numerica del sistema, si tende a studiare specifici risultati sperimentali, interpretandoli sulla base di coefficienti adimensionali che caratterizzano dal punto di vista geometrico e termofisico la configurazione studiata; questo permette di generalizzare i risultati sperimentali mediante dei numeri puri. I numeri puri coinvolti possono essere ricavati in base al teorema di Buckingham; considerato il coefficiente di scambio termico convettivo h :

$$h = h(L, u, \rho, \mu, \lambda, cp)$$

Essendo il sistema definibile in base alle grandezze fondamentali lunghezza (L), massa (M), tempo (T), temperatura (θ), il fenomeno può essere trattato in termini di $n-m$ gruppi adimensionali (con n numero di grandezze ed m numero di grandezze fondamentali coinvolte) legati tra loro da una relazione del tipo:

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) = 0$$

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m-1}) = 0$$

Il legame tra questi gruppi adimensionali sarà una relazione empirica ricavata sperimentalmente. Si svolgeranno quindi una serie di test, facendo variare separatamente i valori dei gruppi uno alla volta, indipendentemente gli uni dagli altri, per risalire ad una relazione analitica.

La relazione tra i gruppi adimensionali da cui è ricavabile h potrà quindi essere generalizzata in funzione di tali gruppi. I gruppi adimensionali generalmente considerati sono:

Numero di Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho D u}{\mu}$$

rappresentante il rapporto tra forze di inerzia e forze di attrito;

Numero di Nusselt:

$$\text{Nu} = L \frac{h}{\lambda_f}$$

rappresentante la reale incidenza dei meccanismi convettivi nello scambio termico;

Numero di Prandtl:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a}$$

rappresentante il rapporto tra la capacità del fluido di trasportare quantità di moto e la capacità di trasportare calore;

Numero di Grashof:

$$\text{Gr} = \frac{g \beta (T_w - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia di galleggiamento e le forze di attrito al quadrato; con ρ = densità del fluido (kg/m³), u = velocità media del fluido (m/s), μ = viscosità dinamica (kg/(m · s)), ν = viscosità cinematica (m²/s), a = diffusività termica (m²/s), λ_f = conducibilità termica del fluido (W/(m K)), L una grandezza geometrica caratteristica del sistema in metri e β = coefficiente di espansione termica, definito come

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \approx \frac{1}{T} \text{ (rigorosamente } = \frac{1}{T} \text{ per gas perfetti)}$$

Tutte i valori sono calcolati a $T = \frac{T_w + T_\infty}{2}$.

Si può quindi individuare una relazione

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr})$$

modellabile come:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Gr^b \cdot Pr^c$$

Determinati sperimentalmente il coefficiente C e gli esponenti a, b, c, risulta quindi possibile determinare il valore di h, essendo

$$h = \frac{Nu \lambda}{L}$$

Risulta quindi possibile estendere i risultati sperimentalmente ottenuti su modelli ad un qualsiasi caso reale fisicamente simile.

1.6. Convezione forzata

Nel caso di convezione forzata, si può considerare

$$Nu = f(Re, Pr)$$

essendo le forze di inerzia e le forze viscosse prevalenti sui fenomeni di galleggiamento, di cui tiene conto il numero di Grashof. Per una data geometria, si potrà in generale definire sperimentalmente una relazione del tipo

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^c$$

valida anche per diversi fluidi con diversi valori di u ed L; risulterà quindi possibile determinare dal valore di Nusselt quello di h e quindi il flusso termico scambiato per convezione localmente. Il tipo di funzione per uno stesso sistema varierà a seconda del tipo di regime di moto prevalente, individuabile attraverso il valore del numero di Reynolds.

1.7. Convezione naturale

Nella convezione naturale, il moto del fluido è legato alla presenza di forze di galleggiamento, cioè alla contemporanea presenza di un campo di forze di massa (campo gravitazionale nel caso di campo del geopotenziale) e al gradiente di densità del fluido. Le forze di inerzia e quelle viscosse risultano comunque notevoli, ma secondarie rispetto alle forze di galleggiamento.

Il numero di Nusselt risulterà quindi funzione dei numeri di Grashof e Prandtl

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

Definito il numero di Rayleigh (Ra) come:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu \alpha}$$

si avrà

$$Nu = f(Ra)$$

Anche per la convezione naturale per uno stesso sistema si avranno diverse relazioni per regimi di moto laminare o moto turbolento, che risultano individuabili attraverso il valore del numero di Rayleigh, con valori critici per pareti verticali piane e cilindriche pari a 10^9 .

Il rapporto Gr/Re^2 rappresenta il rapporto tra l'entità delle forze di e quelle di inerzia (effetto convezione forzata); quindi, per $Gr \ll Re^2$ gli effetti della convezione naturale risultano trascurabili, mentre per $Gr \gg Re^2$ gli effetti della convezione forzata saranno trascurabili rispetto alle forze di galleggiamento; per Gr e Re^2 dello stesso ordine di grandezza si avrà un regime di convezione mista.

Bibliografia

A. Bejan, Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

F.P. Incropera, D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

H. Schlichting. Boundary Layer theory. Mc Graw Hill.

R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc.

Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del calore. CLEUP.

M.J. Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. De Witt. Elementi di Fisica Tecnica per L'ingegneria. Mc Graw Hill.

Capitolo 2. Irraggiamento

Il fenomeno dell'irraggiamento rappresenta l'unica modalità di trasmissione del calore che non necessita della presenza di un mezzo, essendo legata non a fenomeni cinetici di agitazione delle particelle, ma all'emissione ed assorbimento di radiazioni elettromagnetiche. Il legame tra le grandezze caratteristiche (λ, ν) delle radiazioni elettromagnetiche è ovviamente

$$\lambda = c/\nu$$

con velocità di propagazione dipendente dal mezzo di propagazione e pari a $c_0 = 2,9976 \cdot 10^8$ m/s nel vuoto.

Per un'onda elettromagnetica si può considerare la frequenza come dipendente solo dalla sorgente ed indipendente dal mezzo in cui l'onda si propaga.

L'energia trasportata dai fotoni di un fascio luminoso ad una determinata frequenza è definito dalla relazione di Planck-Einstein:

$$e = h \times \nu$$

con h (costante di Planck) = 6.625×10^{-34} J s.

L'emissione energetica sotto forma di radiazioni elettromagnetiche a diverse lunghezze d'onda, connessa ai campi elettromagnetici elementari, caratterizza la materia dotata di una agitazione termica non nulla, a temperatura cioè superiore a 0 K. Dove per i gas ed i solidi non opachi si può considerare l'emissione come un fenomeno che interessa l'intero volume, per solidi opachi e liquidi può essere considerata come un fenomeno superficiale, legato alle particelle disposte ad una profondità nell'ordine dei millimetri, a causa dell'assorbimento che caratterizza i materiali non trasparenti.

All'interno dello spettro elettromagnetico, la radiazione elettromagnetica legata alla trasmissione di calore (radiazione termica), dovuta ai moti vibratorii e rotatori delle particelle di una sostanza riguarda un range da 10^{-2} μm (UV) a 10^2 μm (IR). La radiazione emessa da corpi a temperatura ambiente si colloca nel campo dell'infrarosso, tra 0.76 e 100 μm ; per temperature che superano gli 800 K, si può osservare emissione nel campo di lunghezze del visibile.

2.1. Emissione di un corpo

Considerata l'emissione in una determinata direzione, specificata relativamente alla normale alla superficie in funzione degli angoli zenitale θ e azimuthale ϕ , di un elemento infinitesimo di area dA ; la porzione infinitesimale dA_n di una superficie sferica, normale alla direzione considerata, sottenderà un angolo solido $d\omega$

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2}$$

con r distanza tra dA e dA_n ; essendo, per una superficie sferica,

$$dA_n = r^2 d\theta d\phi \sin\theta$$

si avrà

$$d\omega = d\theta d\phi \sin\theta.$$

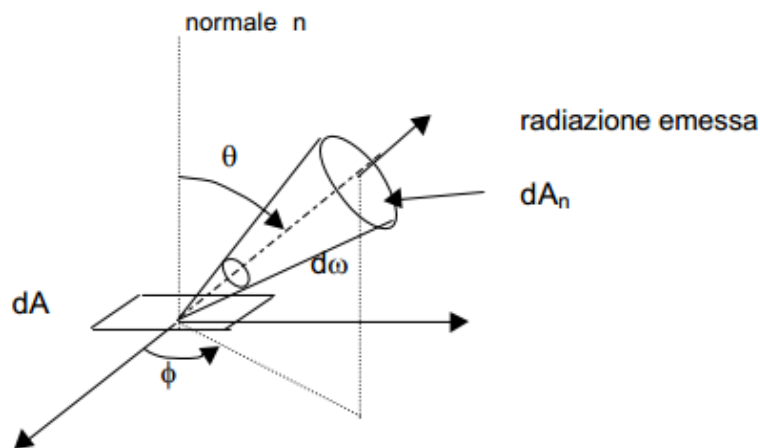


Fig. 2.1. Angolo solido.

Considerata la radiazione che, emessa in dA , attraversa dA_n nella direzione n , si definirà intensità di emissione monocromatica $i_{\lambda,\theta}$ la potenza radiante emessa alla lunghezza d'onda λ nella direzione (ϕ,θ) per unità di area emittente normale alla direzione considerata ($dA \cos\phi$), per unità di angolo solido $d\omega$ e per unità di intervallo $d\lambda$ di lunghezza d'onda intorno del valore λ considerato. La potenza dq irradiata dall'unità di superficie risulterà pertanto

$$dq = i_{\lambda,\theta} dA \cos\phi d\omega d\lambda$$

La potenza radiante globalmente emessa in tutte le direzioni del semispazio per una determinata λ , o emissione monocromatica emisferica e_λ , sarà

$$e_{\lambda} = \int_{2\pi} i_{\lambda,\theta} d\omega = \pi i_{\lambda}$$

se dq è indipendente dalla direzione spaziale.

L'emissione totale E per unità di area sull'intero spettro ed in ogni direzione sarà quindi

$$E = \int_0^{\infty} \int_{2\pi} i_{\lambda,\theta} d\omega d\lambda = \int_0^{\infty} \int_{2\pi} e_{\lambda} d\lambda$$

2.2. Irradiazione di un corpo.

Con un simile procedimento si può definire l'intensità di irradiazione monocromatica $g_{\lambda,\theta}$ come la potenza radiante alla lunghezza d'onda λ incidente nella direzione (θ, ϕ) per unità di area irradiata normale alla direzione considerata, per unità di angolo solido e per unità di intervallo $d\lambda$.

La potenza irradiata dq risulterà perciò

$$dq = g_{\lambda,\theta} dA \cos\phi d\omega d\lambda$$

L'irradiazione monocromatica emisferica g_{λ} , pari alla potenza termica incidente per unità di area per intervallo di $d\lambda$ risulterà

$$g_{\lambda} = \int_{2\pi} g_{\lambda,\theta} d\omega$$

Da cui, l'irradiazione totale G , cioè la potenza totale incidente per unità di superficie:

$$G = \int_0^{\infty} \int_{2\pi} g_{\lambda,\theta} d\omega d\lambda = \int_0^{\infty} \int_{2\pi} g_{\lambda} d\lambda$$

2.3. Superfici irradiate

Si potrà considerare che la potenza termica radiante G incidente (e tutte le grandezze specifiche ad essa connesse) su di una superficie sia in parte riflessa, in parte assorbita dal supporto e in parte trasmessa, in quote parametrizzabili come:

- coeff. di assorbimento $a = G_{\text{ass}} / G$

- coeff. di riflessione $r = G_{\text{rifl}} / G$

- coeff. di trasmissione $t = G_{\text{trasm}} / G$

quindi sarà

$$G_{\text{ass}} + G_{\text{rifl}} + G_{\text{trasm}} = G$$

da cui

$$a + r + t = 1$$

La componente riflessiva risulterà nulla per materiali opachi ($r=0$), mentre per materiali trasparenti si potrà considerare $a=r=0$.

La componente riflessa seguirà una riflessione di tipo speculare solo per materiali isotropi, essendo possibili fenomeni di riflessione irregolare e diffusione variabili a seconda del piano di incidenza dipendenti dalla struttura del materiale; nel caso più generale si potrà considerare sempre una riflessione diffusa.

2.4. Radiosità

Per radiosità si intende la totalità della potenza termica radiante che lascia una superficie, pari alla somma della radiazione emessa e di quella riflessa dalla superficie stessa. Essendo dq la potenza globale radiante, risulta possibile definire la radiosità monocromatica direzionale $b_{\lambda,\theta}$ come:

$$b_{\lambda,\theta} = \frac{dq}{dA \cos\phi \, d\omega \, d\lambda}$$

La radioradiosità monocromatica emisferica b_λ

$$b_\lambda = \int_{2\pi} b_{\lambda,\theta} \, d\omega$$

La radiosità totale B , cioè la potenza totale radiante per unità di superficie:

$$B = \int_0^\infty \int_{2\pi} b_{\lambda,\theta} \, d\omega \, d\lambda = \int_0^\infty \int_{2\pi} b_\lambda \, d\lambda$$

2.5. Studio del corpo nero

Definito come perfetto emettitore il modello ideale di corpo nero (idealmente capace di assorbire tutta la radiazione incidente e di irradiare il massimo livello possibile di energia per ogni temperatura e lunghezza d'onda in modo uniforme in ogni direzione), approssimabile come una cavità di forma irregolare dotata di un'apertura verso l'esterno di dimensioni medie

molto piccole rispetto al diametro medio della cavità stessa, si possono elaborare una serie di relazioni fondamentali per lo studio della trasmissione termica per irraggiamento.

2.5.1. Legge di Planck

La distribuzione spettrale della radiazione emessa dal corpo nero può essere definita secondo l'intensità di emissione monocromatica direzionale del corpo nero, come

$$i_{\lambda, \theta n} = \frac{2 h c_0^2}{\lambda^5 \cdot [e^{\frac{h c_0}{\lambda k T}} - 1]}$$

con h = costante di Planck = $6,656 \times 10^{-34}$ J s,

k = costante di Boltzmann = $1,3805 \times 10^{-23}$ J/ K

c_0 = velocità della luce nel vuoto = $2,9976 \times 10^8$

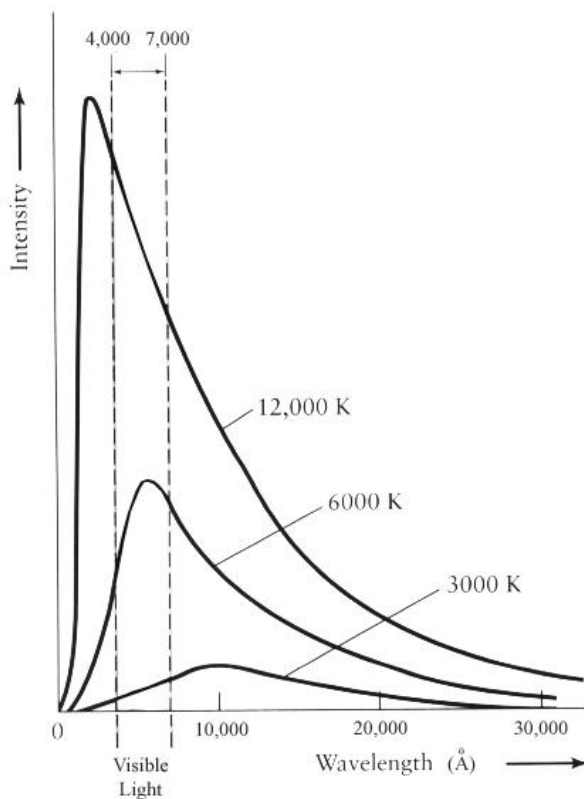


Fig. 2.2. Emissione di corpo nero.

Poiché il corpo nero è un emettitore diffuso, è possibile integrare $i_{\lambda, \theta}$ sul semispazio (emissione monocromatica emisferica) come

$$i_{\lambda n} = \frac{2 \pi h c_0^2}{\lambda^5 \cdot [e^{\frac{h c_0}{\lambda k T}} - 1]}$$

La radiazione emessa risulta variare in modo continuo con la lunghezza d'onda e, per una λ fissata, cresce con la temperatura.

La lunghezza d'onda per cui si ha il massimo di emissione risulta decrescente al crescere della temperatura, secondo la legge di Wien:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2897,8 \text{ mm K}$$

La legge di Stefan– Boltzmann descrive la potenza termica radiante globalmente emessa da un corpo nero:

$$E_n = \sigma \times T^4$$

Con σ (costante di Boltzmann) = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \text{ K}^4)$.

2.6. Emissione di un corpo reale

Risulta possibile ricondurre l'emissione di un corpo reale a quella del corpo nero attraverso l'emissività ε del corpo, definita come

$$\varepsilon = \frac{E}{E_n}$$

con E = emissione globale del corpo ed E_n = emissione globale del corpo nero alla stessa temperatura.

Allo stesso modo sarà possibile definire l'emissività monocromatica direzionale come:

$$\varepsilon_{\lambda, \theta} = \frac{e_{\lambda, \theta}}{e_{\lambda, \theta n}}$$

con $e_{\lambda, \theta}$ = emissione monocromatica direzionale del corpo ed $e_{\lambda, \theta n}$ = emissione monocromatica direzionale del corpo nero alla stessa temperatura.

Supponendo che le superfici comprese in un campo radiante emettano in maniera perfettamente diffusa (emissione perfettamente isotropa) e le proprietà dei materiali (coefficiente di assorbimento, riflessione e trasmissione) siano indipendenti dalla lunghezza d'onda (ε_{λ} , ε_{θ} = cost), si possono definire queste superfici come corpi grigi.

Per un corpo grigio quindi

$$a_\lambda = a,$$

$$e = e_\lambda$$

$$t = t_\lambda$$

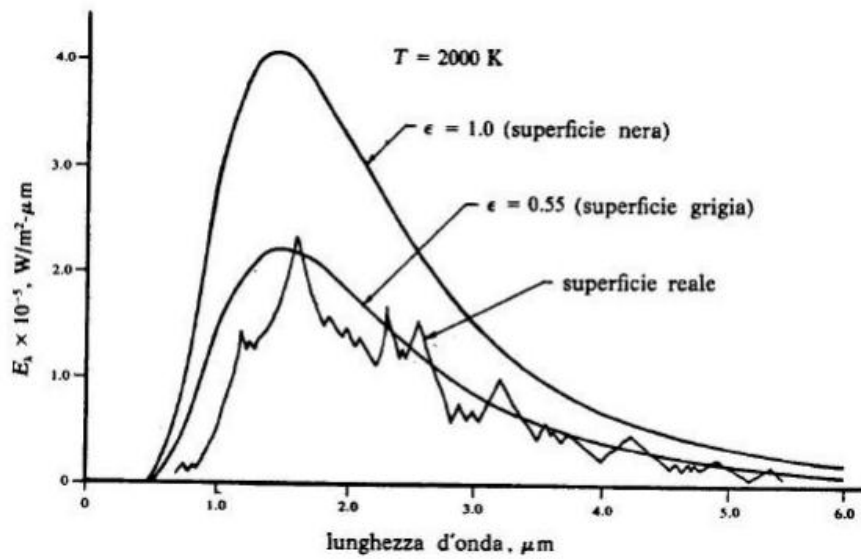


Fig. 2.3. Emissioni di corpi neri, grigi e reali.

Nel caso di una superficie reale $\epsilon_{\lambda,\theta} = f(\lambda, \theta)$.

2.7. Legge di Kirchoff

L'emissività di un corpo a una data temperatura è correlabile al coefficiente di assorbimento, calcolato alla stessa temperatura, secondo le relazioni di Kirchoff, risultando

$$a_{\lambda,\theta} = e_{\lambda,\theta}$$

$$a_\lambda = e_\lambda$$

$$a = e$$

(queste ultime due valide solo se la superficie considerata emette in modo diffuso).

2.8. Potenza termica scambiata tra superfici

L'entità della potenza termica q scambiata per irraggiamento tra un sistema di corpi dipende dalle proprietà radiative delle superfici, dalle loro temperature e dalla loro orientazione reciproca, considerata all'interno del fattore di vista o di forma.

Il fattore di vista tra due superfici i e j (F_{ij}) è definibile come la frazione di energia emessa da i che incide direttamente su j , dipendente solo dalla posizione reciproca delle superfici:

$$q_{ij} = A_i \cdot F_{ij} \cdot E_{n,i}$$

I fattori di vista relativi alle due pareti sono legati da reciprocità:

$$F_{ij} \times A_i = F_{ji} \times A_j$$

Valendo il principio di conservazione dell'energia, si ha per l' i -esima superficie di un sistema di N superfici:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$$

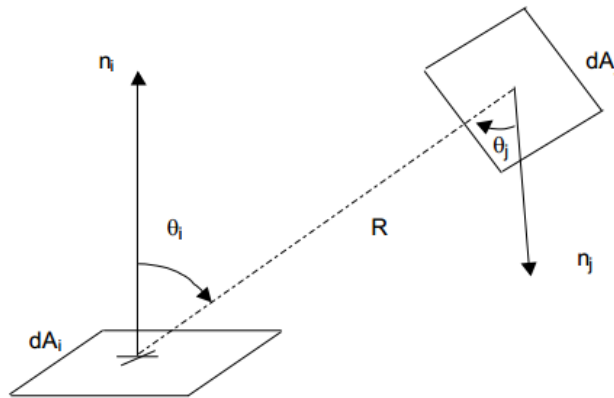


Fig. 2.4. Fattore di forma.

Il fattore di vista risulta analiticamente determinabile come:

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \cos\theta_i \cos\theta_j dA_i dA_j$$

Bibliografia:

F.P. Incropera, D. P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. J. Wiley & Sons;

Y.A. Cengel. Termodinamica e Trasmissione del Calore. Mc Graw-Hill;

C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del Calore. Ed. Cleup.

M.J. Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. De Witt. Elementi di Fisica Tecnica per L'ingegneria.
Mc Graw Hill.

Capitolo 3. Ottica geometrica

L'ottica geometrica è una metodologia di studio della propagazione luminosa approssimata, valida all'interno di definiti limiti di validità. I risultati forniti risultano buone approssimazioni di fenomeni reali, assumendo:

- Propagazione rettilinea della luce in un mezzo omogeneo, considerando trascurabili fenomeni diffrattivi;
- Assenza di fenomeni di interferenza;

Sotto queste assunzioni, risulteranno valide le leggi di Snell della riflessione e rifrazione.

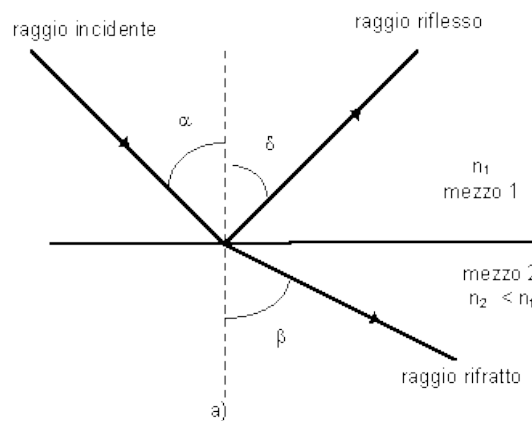


Fig. 3.1. Raggi luminosi riflessi e rifratti.

3.1. Legge di Snell della riflessione

Raggio incidente e raggio riflesso da una superficie, giacciono sullo stesso piano perpendicolare alla superficie; inoltre l'angolo formato dal raggio riflesso con la normale alla superficie risulta pari all'angolo formato dal raggio incidente con la normale alla superficie.

$$\theta_{rifl} = \theta_i$$

3.2. Legge di Snell della rifrazione

Al passaggio tra due mezzi trasparenti diversi, i raggi luminosi che vengono trasmessi dal primo al secondo mezzo subiscono un fenomeno di rifrazione, secondo

$$n_1 \text{ sen}\theta_i = n_2 \text{ sen}\theta_r$$

dove θ_i e θ_r sono gli angoli che il raggio incidente e quello rifratto formano con la normale alla superficie di interfaccia tra i due mezzi. Inoltre, il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi giacciono sullo stesso piano. Sia θ_i che θ_r sono compresi tra 0 e $\pi/2$.

n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione assoluti dei due mezzi, definiti come il rapporto c/v fra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità della luce nel mezzo v , ovviamente maggiore o uguale a 1. L'indice di rifrazione è una caratteristica del mezzo, definibile per ogni intervallo di lunghezza d'onda della luce incidente; sarà quindi considerabile come una costante del solo materiale nel caso di radiazioni monocromatiche.

Si definirà poi indice di rifrazione relativo il rapporto fra gli indici di rifrazione assoluti: $n_{21} = n_2/n_1$, da cui

$$\text{sen}\theta_i = n_{21} \text{sen}\theta_r$$

Nella trattazione dei sistemi ottici si assumerà generalmente l'approssimazione di Gauss, con angoli di incidenza e rifrazione sufficientemente piccoli da poter considerare $\tan\alpha \sim \text{sen}\alpha \sim \alpha$.

3.3. Onde sferiche

I raggi luminosi emessi da una sorgente puntiforme costituiscono un fascio omocentrico; se il mezzo in cui si propagano è omogeneo e isotropo, il fronte luminoso risulterà quindi una superficie sferica che si espande con la velocità di propagazione della luce in quel mezzo. I raggi associati al fronte d'onda generato dalla riflessione o rifrazione di un fronte d'onda sferico, prendono il nome di fascio astigmatico se costituiscono un fronte d'onda non sferico. Solo nel caso in cui l'onda rifratta (o riflessa) sia ancora sferica, si avrà un punto per il quale passano tutti i raggi rifratti (o riflessi), detto immagine della sorgente puntiforme; l'immagine risulta reale se per essa passano effettivamente i raggi rifratti (o riflessi), virtuale se per essa passano i loro prolungamenti.

3.4. Diottro sferico

Un diottro sferico è un sistema ottico costituito da due mezzi omogenei (di indice di rifrazione n_1 e n_2 diversi), trasparenti e isotropi, separati da una superficie sferica di

raggio R; la retta passante per la sorgente O e per il centro C della superficie sferica, detta asse ottico del diottro, interseca la superficie sferica nel punto V. Si considerano

- p (distanza dell'oggetto dal diottro): > 0 (oggetto reale) per oggetti che si trovano, rispetto alla superficie di separazione del diottro, dalla parte da cui arriva la luce (spazio di incidenza o spazio oggetti); < 0 (oggetto virtuale) per oggetti che si trovano, rispetto alla superficie di separazione del diottro, dalla parte opposta a quella da cui arriva la luce (spazio di trasmissione o spazio immagini)
- q (distanza dell'immagine dal diottro): > 0 (immagine reale) per immagini nello spazio di trasmissione ("dietro" la superficie di separazione); < 0 (immagine virtuale) per immagini nello spazio di incidenza ("davanti" alla superficie di separazione)
- raggio di curvatura R : > 0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di trasmissione (diottro convesso); < 0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di incidenza (diottro concavo).

Dall'applicazione della semplificazione di Gauss risulta

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

detta equazione di Cartesio.

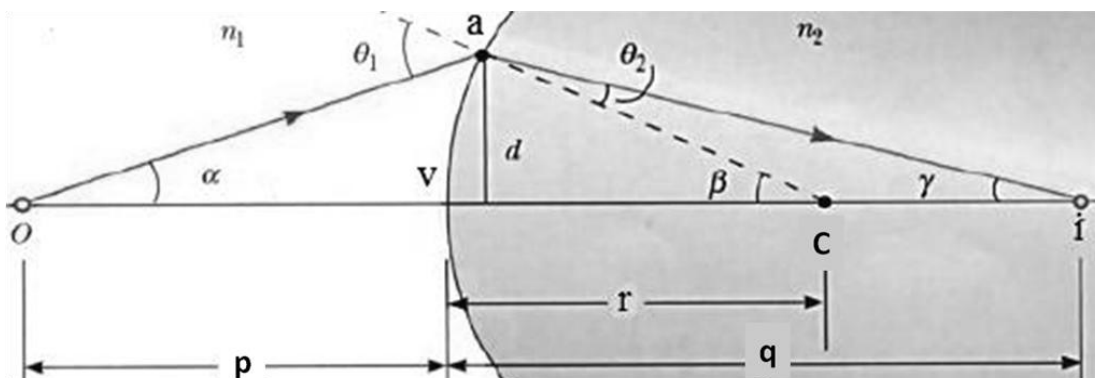


Fig. 3.2. Diottro sferico.

Se la posizione p della sorgente tende all'infinito, l'immagine si trova nel secondo fuoco, posto a distanza f_2 dal diottro, mentre se l'immagine si forma a distanza infinita, l'oggetto si troverà nel primo fuoco, a distanza f_1 dal diottro; i raggi uscenti da f_1 si rifrangeranno parallelamente all'asse ottico.

$$f_2 = \lim_{p \rightarrow \infty} q = R \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

$$f_1 = \lim_{q \rightarrow \infty} p = R \frac{n_1}{n_2 - n_1}$$

Da cui l'equazione di Cartesio diventa:

$$\frac{f_1}{p} + \frac{f_2}{q} = 1$$

3.5. Specchi sferici

La formazione di immagini da uno specchio sferico si può considerare in maniera analoga al caso del diottro sferico, con la formazione di immagini puntiformi, se la condizione di piccoli angoli per l'approssimazione di Gauss è rispettata. Considerato uno specchio perfettamente riflettente, per cui $n_1 = -n_2$, si ottiene:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{2}{R}$$

$$f_2 = \frac{R}{2}$$

$$f_1 = -\frac{R}{2}$$

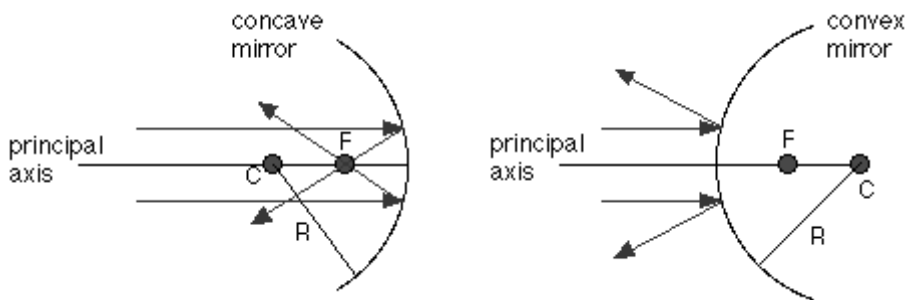


Fig. 3.3. Specchi sferici.

Nel caso di uno specchio convesso ($R > 0$) il primo fuoco è negativo: dato che non è possibile porre una sorgente reale al di là della superficie dello specchio, non è possibile avere un'immagine all'infinito di una sorgente puntiforme. Uno specchio convesso è divergente in quanto il secondo fuoco è positivo: l'immagine di un punto all'infinito si forma al di là dello specchio ed è pertanto virtuale (al contrario di quanto accade per un

diottero). Se lo specchio è concavo, il secondo fuoco è negativo, quindi i raggi provenienti dall'infinito vengono concentrati in un'immagine reale. Il primo fuoco è positivo e la sua posizione coincide fisicamente con quella del secondo fuoco: una sorgente posta nel fuoco dà origine a raggi riflessi paralleli all'asse ottico che formano un'immagine reale all'infinito.

3.6. Specchi ellittici

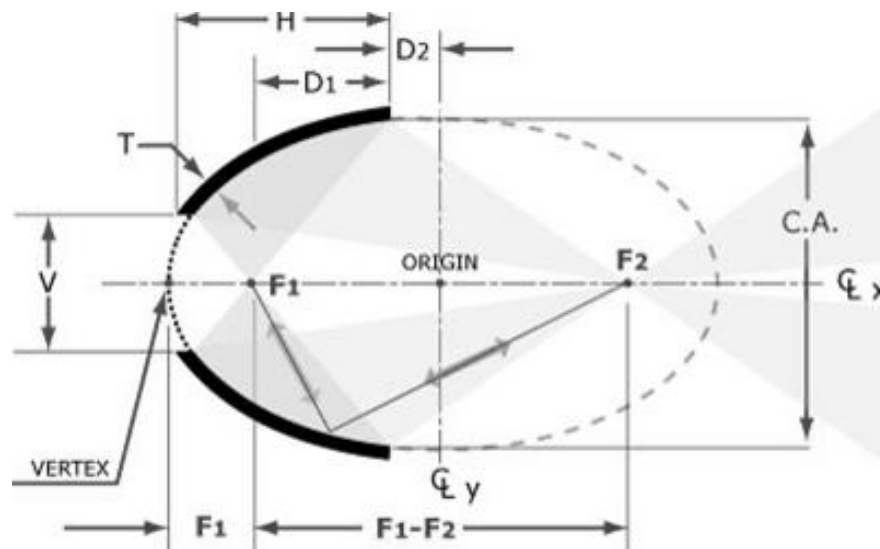


Fig 3.4. Specchio ellittico.

Essendo F_1 e F_2 i fuochi di uno specchio ellittico (cioè uno specchio avente la struttura di un tronco di ellissoide), si può tracciare una circonferenza di centro F_1 e raggio $2a$ (asse maggiore); definito A un punto generico di tale circonferenza e tracciato l'asse del segmento AF_2 , risulterà che il punto P , intersezione tra l'asse di AF_2 e il raggio AF_1 sarà un punto generico della superficie dell'ellisse al variare del raggio AF_1 . Infatti $PF_1 + PF_2 = PF_1 + PA = AF_1 = 2a$. Considerando l'asse di AF_2 come secante all'ellisse in P e P_1 , risulterebbe che $P_1F_1 + P_1F_2 = 2a$ e $P_1A = P_1F_2$ poichè appartiene all'asse di AF_2 . Da ciò si deduce che $AP_1 + P_1F_1 = P_1F_2 + P_1F_1 = 2a$; $AP_1 + PF_1$ risulta essere la somma di due lati del triangolo AP_1F_1 avente il terzo lato di lunghezza $2a$, il che è impossibile a seguito della disuguaglianza triangolare. Di conseguenza $P_1 \approx P$ e quindi l'asse di AF_2 è tangente all'ellisse in P .

Conseguentemente gli angoli in cui F_1PF_2 è diviso dalla normale alla tangente in P risultano essere congruenti, essendo uno alterno interno e l'altro corrispondente di angoli

alla base del triangolo isoscele F_2AP . Poiché l'asse di AF_2 risulta essere il piano di incidenza del raggio luminoso uscente da F_2 e passante per P , per la legge di Snell della riflessione, l'angolo formato dal raggio riflesso con la normale al piano di incidenza in P , risulta normale all'angolo di incidenza; di conseguenza il raggio riflesso non può che essere PF_2 . Risulterà quindi una proprietà caratteristica degli specchi ellittici quella di riflettere in uno dei due fuochi i raggi luminosi prodotti da una sorgente posta in corrispondenza dell'altro fuoco.

3.7. Riflessione di Fresnel

Ogniquale volta la luce passa da un mezzo ad un altro ad indice di rifrazione diverso, una parte dell'energia luminosa è trasmessa e una parte è riflessa dalla superficie di separazione ($a + r + t = 1$, v. Cap.3, con a assunta = 0 per le semplificazioni adottate). La percentuale di luce riflessa è governata dalle leggi di Fresnel e dipende dai due indici di rifrazione, dall'angolo di incidenza e, per incidenze non ortogonali, dallo stato di polarizzazione della radiazione. Le leggi di Fresnel forniscono le relazioni di ampiezza e di fase tra la luce incidente e riflessa dalla superficie di separazione tra due mezzi. Considerando separatamente le due componenti di polarizzazione, cioè la componente p parallela al piano di incidenza e la s ortogonale, le due riflettività si possono scrivere in questa forma:

$$r_s = \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_r)}{\sin(\theta_i + \theta_r)} \right]^2$$

$$r_p = \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_r)}{\tan(\theta_i + \theta_r)} \right]^2$$

ove θ_i ed θ_r sono gli angoli di incidenza e di rifrazione, legati tramite gli indici di rifrazione dalla seconda legge di Snell. Le riflettività sono intensità luminose, pari perciò al quadrato dell'ampiezza; dalla formula precedente si vede come la percentuale di luce riflessa all'interfaccia cresca con l'indice di rifrazione, variabile per una stessa interfaccia al variare di λ del raggio luminoso incidente.

3.8. Interferenza e film sottili

I trattamenti a film sottile si basano sul fenomeno dell'interferenza delle onde elettromagnetiche. Quando un raggio di luce è incidente su un film sottile a singolo strato, parte della luce sarà riflessa alla superficie anteriore, parte dalla posteriore e parte sarà trasmessa. I due fronti d'onda riflessi possono interferire tra loro in funzione del cammino ottico nel materiale costituente il film sottile, della lunghezza d'onda e degli indici di rifrazione.

Definito il cammino ottico D come la distanza equivalente nel vuoto che la luce può percorrere nello stesso intervallo di tempo, $D(\lambda)=d \cdot n(\lambda)$ con d percorso del raggio luminoso, si può osservare come il fronte d'onda riflesso dalla superficie posteriore percorra due volte il film sottile, con differenza di cammino ottico tra i due riflessi pari a $2D$.

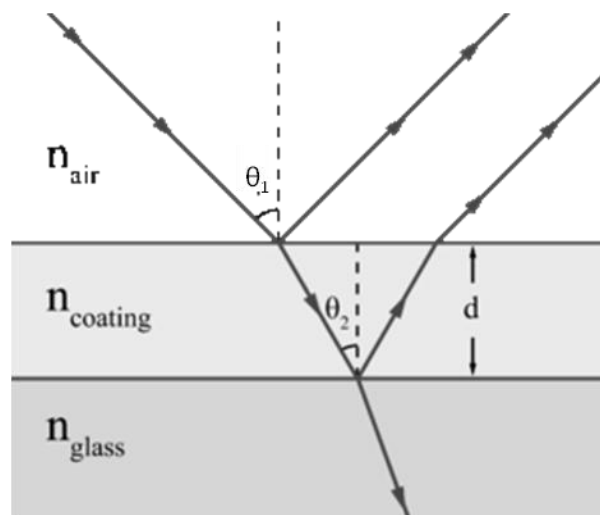


Fig. 3.5. Interferenza su film sottili.

Se le due riflessioni sono di ampiezza uguale e $2D$ è un numero intero di mezza lunghezze d'onda, i due riflessi si elidono e, per il principio di conservazione dell'energia, in assenza di assorbimento tutta la radiazione sarà trasmessa; questo fenomeno è sfruttato nelle coperture antiriflesso.

Allo stesso modo, selezionando un opportuno spessore e materiale del film sottile, risulterà possibile rafforzare (interferenze costruttiva) o elidere (interferenza distruttiva) radiazioni luminose a determinate lunghezze d'onda, riflesse o rifratte attraverso il film sottile, eliminando selettivamente singole bande di frequenza. Con l'applicazione film sottili

(generalmente strati di materiali dielettrici, applicati per deposizione sottovuoto), controllando lo spessore e l'indice di rifrazione di ciascuno strato, si potrà selezionare una determinata banda di radiazioni luminose di ampiezza e λ voluto, riflettendo le componenti non desiderate. Questo sistema permette la realizzazione di filtri ottici dielettrici, con il netto vantaggio rispetto ai più comuni filtri cromatici ad assorbimento di riflettere le componenti indesiderate, evitando il surriscaldamento del filtro; tuttavia, le radiazioni luminose filtrate possono essere riflesse nuovamente nel sistema ottico, con i problemi di surriscaldamento che ne conseguono.

Bibliografia

M. Alonso, E. J. Finn, Elementi di fisica per l'università Vol.2, Masson S.p.a.

P. Palladino, Manuale di illuminazione, Ed. Tecniche nuove

M. Young, "Optics and Lasers", Springer-Verlag

W.J. Smith, Modern Optical Engineering, McGraw-Hill

B. Rossi, "Optics", Addison-Wesley

Capitolo 4. Scopo e requisiti del progetto

A partire dall'anno 2011, D.T.S. srl, società tra i leader italiani nel campo dell'illuminazione civile, architettonica, teatrale, per lo spettacolo e per grandi eventi, ha iniziato la progettazione, ingegnerizzazione e produzione di una nuova serie di modelli di teste mobili, montanti lampade a scarica di media potenza (190 W) e caratterizzate da elevata luminosità, consumi ridotti, grande compattezza e peso contenuto, capaci di rendere disponibili in una sola macchina le tre funzioni base di un proiettore (funzionamento tipo "BEAM", funzionamento tipo "WASH" e funzionamento tipo "SPOT", ciascuno definito da una particolare apertura del fascio luminoso e dalla presenza di una serie di specifici effetti interni).

A seguito del successo di questa macchina, battezzata JACK, la rete di distribuzione ha richiesto la progettazione di una nuova serie di macchine, che ne condividano le caratteristiche di compattezza e utilizzo "tre in uno", ma dotate di luminosità superiore e di un pacco effetti più completo. Da questa richiesta è nata una serie di prodotti, il primo dei quali ad essere immesso sul mercato sarà MAX, un proiettore a testa mobile con lampada a scarica OSRAM SIRIUS HRI da 330W, controllato via DMX (cioè tramite canali a 256 livelli). MAX contiene, in ordine dalla lampada all'obiettivo, filtro abbati-calore, shutter a due palette, paletta strobo, 4 filtri colore dicroici ad inserimento lineare, ruota colore, ruota effetti, ruota gobo fissi, ruota gobo rotanti, zoom e focus.

La particolare compattezza della macchina ha comportato la necessità di relegare in uno spazio estremamente limitato una lampada di potenza considerevole ed i vari meccanismi ed effetti interni.



Fig. 4.1. Rendering di MAX

Questo ha introdotto un nuovo problema, che sul prodotto JACK (e su altre teste mobili a scarica di maggior potenza ma con dimensioni molto superiori) si era rivelato di impatto marginale: la necessità di dissipare un'elevata potenza termica, al fine di mantenere la temperatura del bulbo lampada all'interno di un range di utilizzo consigliato fissato dal costruttore a livelli relativamente ridotti, con un massimo di 350°C.

Uno dei compiti assegnatomi, durante il mio periodo di tirocinio presso D.T.S., è stato quello di studiare un sistema di raffreddamento adeguato, tenendo conto della necessità di ingombri minimi e delle limitazioni imposte da ridotta potenza disponibile per l'alimentazione delle ventole, semplicità costruttiva, costi e limiti di emissioni acustiche.

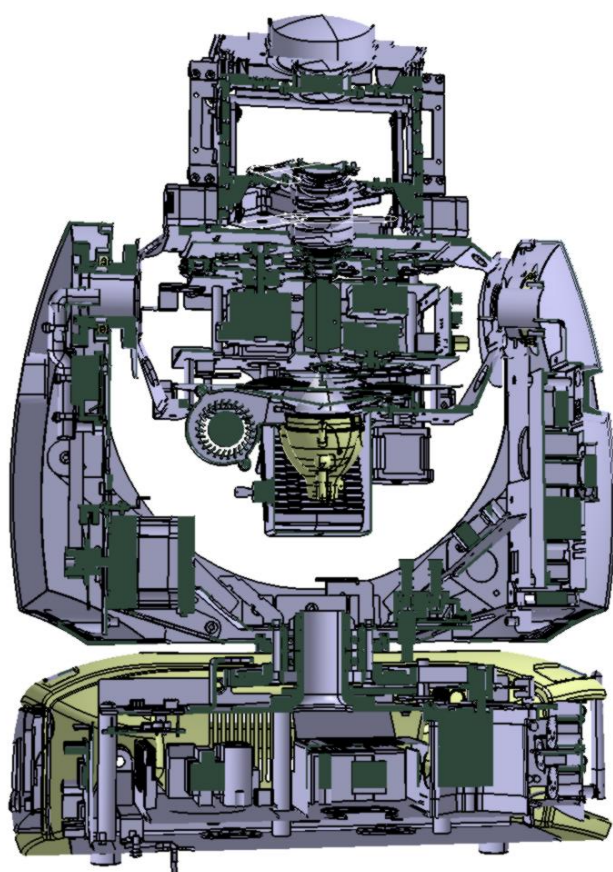


Fig. 4.2. Sezione di MAX.

Lo studio si è risolto con la progettazione di un sistema di raffreddamento ad aria, costituito da una singola ventola tangenziale soffiante con il relativo sistema di canalizzazioni, dotata di un convergente specificamente studiato per incrementare la velocità dell'aria in mandata.

Considerato l'elevato numero di test di temperatura necessari alla realizzazione del sistema e la conseguente quantità di ore lavoro spese sullo studio, ho proposto a D.T.S. la realizzazione di un programma di calcolo capace di stimare le temperature di regime della lampada in tutte le possibili condizioni di utilizzo, allo scopo di velocizzare la progettazione termica di eventuali varianti di MAX e di nuove macchine appartenenti alla stessa famiglia.

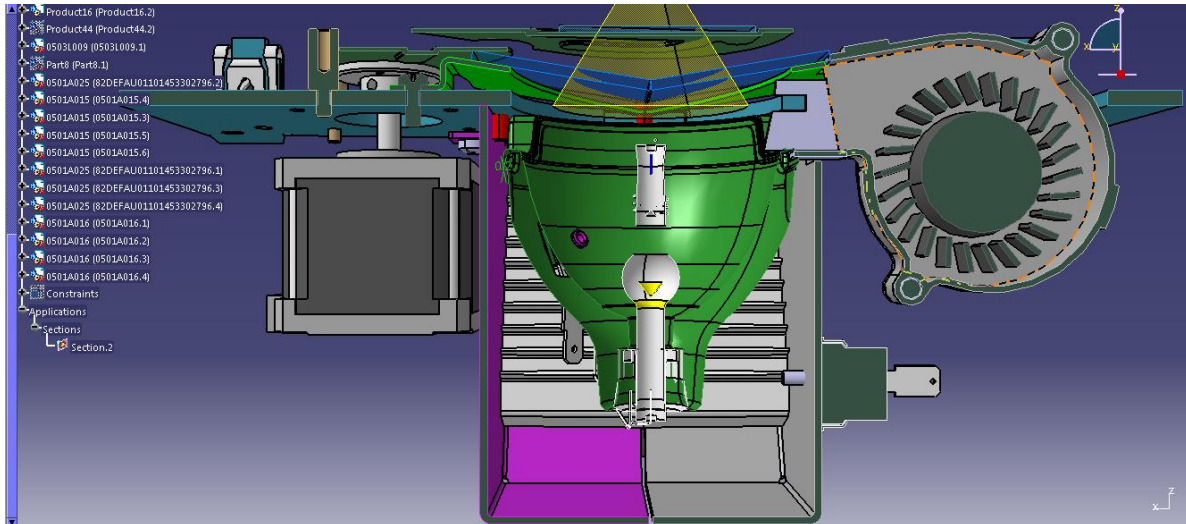


Fig. 4.3. Gruppo lampada di MAX; visibile sulla destra la ventola tangenziale soffiante e sulla sinistra i servomotori movimentanti le palette shutter.

I requisiti e i vincoli posti da D.T.S. sulla realizzazione del programma sono stati:

- **buona precisione:** il programma deve essere in grado di stimare le temperature con un errore massimo di $\pm 10^{\circ}\text{C}$ in tutte le condizioni di utilizzo.
- **ampia applicabilità:** il programma deve fornire risposte tenendo conto tanto di parametri di progetto (tipo lampada, geometria e caratteristiche dell'impianto di raffreddamento, geometria e tipologia pacco filtri...), di tarature (limitazioni potenza di alimentazione lampada e ventola all'inserimento di filtri o in fase di dimmerazione lampada), dipendenti da scelte svolte dall'ufficio tecnico e dall'ufficio assistenza, e di funzionamento (livello di inserimento filtri lineari, inserimento effetti, livello di dimmerazione lampada, voltaggio di alimentazione ventole, temperatura esterna...), selezionabili dall'utente;

- **semplicità di utilizzo:** il programma deve risultare comodo e perfettamente utilizzabile anche ad un utente privo di conoscenze nel campo della programmazione; dovrà quindi presentare all'utente un'interfaccia grafica o utilizzare come medium programmi appartenenti a suite di uso comune (Microsoft Office, Open Office, o similari per altri sistemi operativi).

- **doppio livello di accesso:** il programma dovrà presentare un'interfaccia semplificata all'utente finale (assistenza tecnica, distributori e clienti), che permetta l'inserimento dei parametri di funzionamento e il salvataggio dei risultati di temperatura, e un'interfaccia più ampia ad uso dell'ufficio tecnico, del reparto R&D e del reparto prototipazione per la modifica dei dati di progetto e delle tarature, in grado di mantenere dati di progetto in memoria per futuri utilizzi;

- **prontezza di risposta,** capacità di calcolo richiesta contenuta e indipendenza da programmi FEM specifici (generalmente non disponibili all'utente) per lo studio termico: è stato quindi necessario escludere un approccio numerico basato su uno studio a volumi finiti, adottando una risoluzione il più possibile basata su una modellizzazione di tipo analitico o, ove non applicabile, quantitativo-statistico.

- **ampia flessibilità:** i risultati forniti devono essere applicabili, senza bisogno di apportare modifiche al listato del programma, a macchine della stessa famiglia; si dovrà quindi lavorare su variabili in forma parametrica, inseribili tramite l'interfaccia riservata ad uso dell'azienda. Si dovrà altresì considerare la possibilità di adattare il programma, tramite minime modifiche al listato, a macchine di altre famiglie (quali le più potenti e voluminose serie di teste mobili a scarica XR o proiettori architettonici e teatrali); pertanto si dovrà ricorrere ad una programmazione che scorpori il listato in singoli segmenti racchiusi in file di programma separati, ciascuno dedicato all'esecuzione di una ben definita fase del calcolo, garantendo la possibilità di apportare modifiche sulle singole sezioni interessate con il minimo sforzo e senza modificare l'architettura globale del listato.

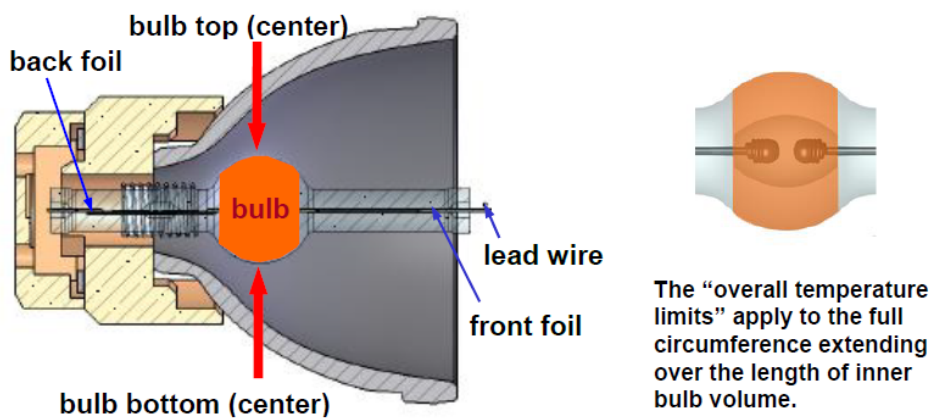
Tenendo conto dei requisiti imposti da D.T.S., ho scelto di operare tramite un programma realizzato in linguaggio MatLab, che presenti all'utente finale un'interfaccia grafica sviluppata con lo stesso linguaggio; l'interfaccia per l'utilizzo riservato ai vari settori

dell'azienda è invece realizzata nella forma di una serie di spreadsheets realizzati con il programma Microsoft Excel, di uso comune.

Capitolo 5. Studio del bilancio termico

Il gruppo lampada, come accennato nel Capitolo 4, è composto da una lampada a scarica OSRAM SIRIUS HRI da 330 W, alimentata in tensione continua (380 V – 1 A) attraverso un lamp driver PT VIP 01 MEGA, unitamente ad un sistema di accenditore e riscaldatore del bulbo per ottenere la tensione di picco iniziale. Il bulbo è costituito da un'ampolla sferica in quarzo nella quale è contenuta la miscela di gas di alogenuri metallici, che funge da medium per l'instaurarsi dell'arco voltaico. In questo si innestano due tubuli in vetro Pirex ad alta trasparenza, aventi la funzione di contenere e proteggere gli elettrodi di scarica. Il bulbo è montato su un riflettore ellittico, realizzato in materiale ceramico refrattario e trattato a specchio sulla faccia interna.

Secondo le specifiche fornite dal costruttore, risulta necessario mantenere una temperatura massima di 350° C sulle componenti elettriche della lampada inserite nel bulbo. È inoltre richiesto che si mantengano valori di temperatura il più possibile uniformi sulla lunghezza dei tubuli in vetro, mantenendo un gradiente termico contenuto per ridurre il rischio di stress termici all'accensione e la possibilità di formazione di cricche.



Note: Example TC/IR lamp picture, practical appearance may vary.

Operating power	Recommended temperature at top(hot spot)/bottom(cold spot)	Temperature limits for overall bulb surface	Foil / lead wire temperatures
330W	hot spot ⁵ : 860°C ± 20°C	740°C < T < 910°C	Lead wire: T < 350°C Front foil: T < 350°C Back foil: T < 350°C
	cold spot ⁵ : > 760°C		
280W	hot spot: 870°C ± 20°C	750°C < T < 920°C	
	cold spot: > 770°C		

Fig. 5.1. Requisiti di temperatura richiesti; da System Specifications, SIRIUS HRI 330. Tutti i diritti sono riservati a OSRAM.

Per svolgere i relativi test, il costruttore rende disponibili una serie di lampade di prova, dotate di un sistema di 5 termocoppie, inserite a livello di:

- porzione superiore del bulbo, in corrispondenza dell'innesto dell'elettrodo d'innescio;
- porzione centrale del bulbo, in corrispondenza della porzione mediana dell'elettrodo d'innescio;
- porzione posteriore del bulbo, in corrispondenza dell'elettrodo posteriore e della giunzione tra il riflettore ellittico e lo zoccolo d'appoggio posteriore, in materiale refrattario ceramico;
- su due punti diametralmente opposti della superficie dell'ampolla di scarica sferica.

Il sistema di raffreddamento, come verrà meglio illustrato nei capitoli seguenti, è costituito da una ventola tangenziale soffiante con flusso radiale, che investe la porzione superiore del bulbo (senza lambire l'ampolla per evitare eccessivi stress termici).

5.1. Equilibrio termico

Come risulta ovvio, la temperatura finale del bulbo sarà il risultato del raggiungimento di un equilibrio termico sul bulbo stesso; si avrà, cioè, che la sommatoria totale della potenza termica prodotta dal bulbo, unita alla componente di potenza luminosa riflessa all'interno della lampada dall'insieme dei filtri dicroici inseriti, dovrà eguagliare la sommatoria del calore dissipato dalle varie componenti alla temperatura di esercizio.

5.1.1. Potenza termica prodotta

La componente di potenza termica prodotta dal bulbo, legata all'inverso del rendimento di conversione in energia luminosa, risulta relativamente contenuta rispetto tanto agli standard delle tradizionali lampade ad incandescenza, quanto alle lampade a scarica di media potenza più comunemente utilizzate. Questa quota risulterà proporzionale alla potenza di alimentazione elettrica della lampada (legata alla percentuale di dimmerazione della lampada stessa), e all'inverso del rendimento luminoso della lampada.

La componente di potenza riflessa sul bulbo ad opera dei filtri dicroici inseriti (v. Cap. 3), potrà invece essere considerata legata alle percentuali di inserimento dei diversi filtri dicroici lineari e del filtro abbatti-calore fisso (*heat filter*), alla loro posizione relativa rispetto ai fuochi del riflettore ellittico, alla loro inclinazione rispetto all'asse ottico del fascio

luminoso e alla loro caratteristica ottica (diagramma spettrografico relativo). La caratteristica ottica è un'indicazione della percentuale di potenza luminosa che ogni filtro lascia transitare su ciascuna banda di frequenza del visibile. Risulterà inoltre coinvolta la geometria del riflettore ellittico. Questo legame verrà illustrato in maniera più approfondita nel Capitolo 7.

5.1.2. Potenza termica dissipata

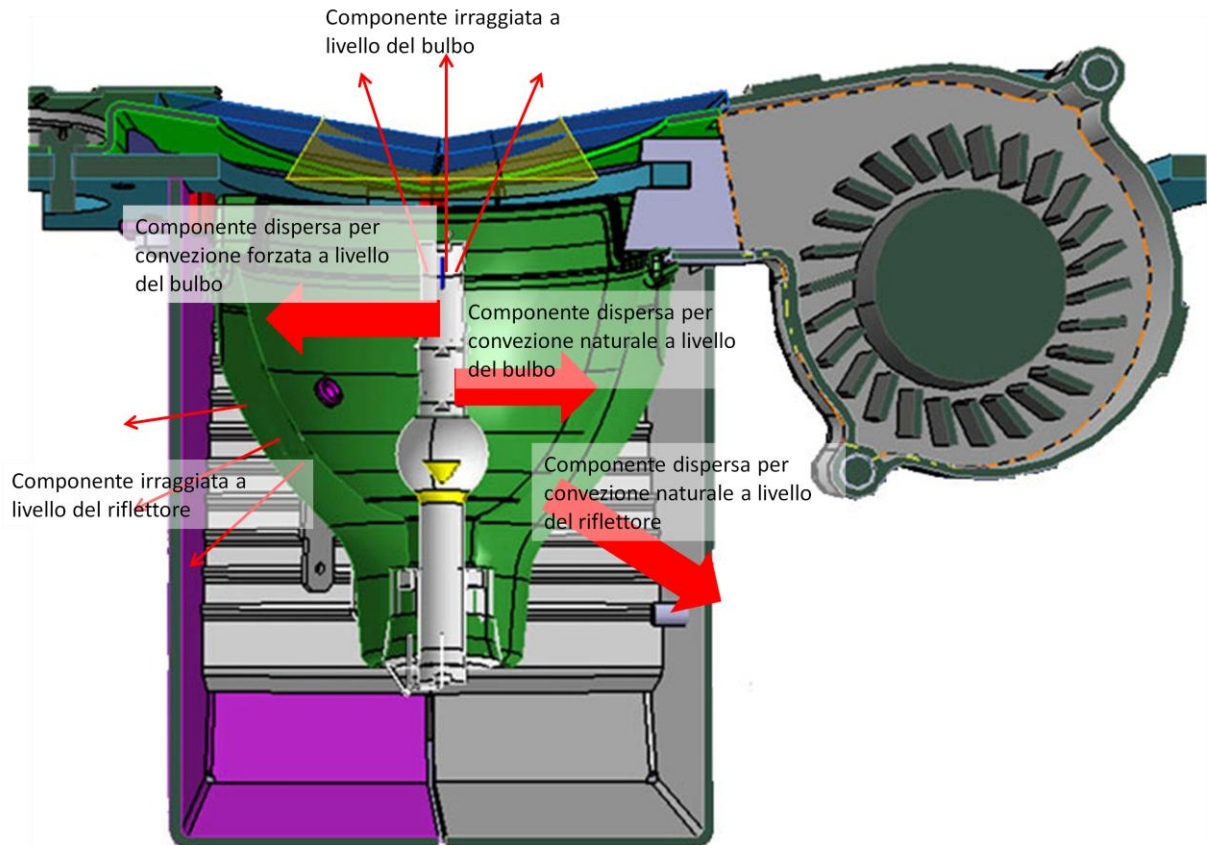


Fig. 5.2. Quote di calore dissipato

La potenza termica dissipata a livello della lampada potrà essere considerata composta da una quota parte, dissipata a livello del bulbo e da una quota parte dissipata attraverso il riflettore. Nel particolare, avremo:

- *Componente dissipata per irraggiamento a livello del bulbo.* Questa quota, radiata nei campi dell'IR, del visibile e dell'UV (A e B), non è facilmente determinabile; infatti la potenza luminosa emessa dalla lampada a scarica non è direttamente rapportabile alla temperatura di funzionamento, come nel caso di una comune lampada ad incandescenza, ma è legata all'evoluzione e al percorso dell'arco voltaico, nonché alla composizione e allo stato fisico

degli alogenuri metallici presenti nel bulbo. Sarà quindi necessario, in proposito, fare riferimento ai dati tecnici forniti dal costruttore.

- *Componente dissipata per convezione naturale a livello del bulbo.* Questa quota risulterà legata, secondo la formula di Newton, al salto termico tra la superficie del bulbo e l'aria contenuta tra il bulbo e il riflettore; questa relazione sarà legata ad una serie di parametri fisici riferiti all'aria e al vetro che compone il bulbo, nonché alla superficie di scambio disponibile.

- *Componente dissipata per convezione forzata a livello del bulbo.* Questa quota risulterà proporzionale, oltre che ai parametri legati allo stato dell'aria e della superficie del bulbo, anche all'estensione della superficie del bulbo lambita dal getto d'aria, alle cadute di carico sull'intero impianto di ventilazione (legate alla sua geometria e ai materiali utilizzati), alla geometria del convogliatore adottato in mandata, e alle caratteristiche tecniche e della ventola utilizzata (potenza di alimentazione controllabile dall'utente entro i limiti fissati dalle calibrizioni, diagramma Q-P, geometria di aspirazione e mandata..).

- *Componente dissipata per convezione naturale a livello del riflettore.* Questa quota risulterà legata alle caratteristiche fisiche dell'aria e della superficie del riflettore, al gradiente termico presente sulla superficie del riflettore e alla sua geometria.

- *Componente dissipata per irraggiamento a livello del riflettore,* anch'essa proporzionale al salto termico e alla geometria del riflettore stesso.

Queste quote parti risulteranno di entità alquanto differente; nel particolare, come si analizzerà meglio nel Capitolo 8, la componente dissipata per convezione forzata sul bulbo risulterà di gran lunga prevalente, tanto da impedire l'utilizzo della lampada in assenza di ventilazione forzata.

Capitolo 6. Potenza termica generata

La potenza che deve essere dissipata per mantenere l'equilibrio termodinamico a livello della lampada, come anticipato nel precedente capitolo, è costituita dalla potenza termica legata al rendimento non unitario della lampada, unito ad una porzione di energia luminosa, irradiata dal bulbo, che viene riflessa, per azione dei filtri dicroici, all'interno del corpo lampada stesso.

6.1. Potenza termica prodotta

La componente di potenza termica prodotta dalla lampada può essere indicata come

$$P_{\text{diss}} = P_{\text{el}} (1 - \eta_l)$$

con P_{el} pari alla potenza elettrica di alimentazione lampada (330 W nel caso considerato) e η_l rendimento della lampada.

Alternativamente, si potranno utilizzare i dati forniti dal costruttore sulla scheda tecnica della lampada in materia di potenza luminosa P_l emessa (90 W nel caso considerato), con

$$P_{\text{diss}} = P_{\text{el}} - P_l$$

Sarà poi necessario tenere in considerazione la possibilità da parte dell'utente di dimmerare la lampada, in un range di potenza compreso tra la potenza nominale e un valore limite minimo; questo valore minimo sarà legato innanzitutto alle limitazioni imposte dal costruttore: se la tensione di alimentazione e di conseguenza la temperatura interna del bulbo, scende sotto certi limiti, si possono verificare problemi di accensione dal momento che tensioni troppo basse sono insufficienti a ionizzare i gas contenuti; inoltre, a temperature inferiori a quelle ottimali di utilizzo, possono verificarsi condensazioni o sublimazioni selettive di alcuni componenti della miscela di gas, con il viraggio della temperatura colore della lampada.

Secondariamente saranno imposti, attraverso tarature selezionabili da menù nascosto, dei limiti alla tensione minima di dimmerazione nelle varie modalità di funzionamento della macchina (con filtri colore CMY-CTO inseriti, con ruota colore inserita, con shutter inserito e con tilt fuori dall'orizzontale). Potremo quindi scrivere, ricordando che i comandi sono impartiti via DMX a 8 bit (256 livelli):

$$P_{\text{minj}} = P_{\text{min}} + \frac{P_n - P_{\text{min}}}{100} \cdot x_j$$

Dove P_{minj} è la potenza minima alla quale può essere dimmerata la lampada a seguito dell'inserimento del j -esimo filtro, P_n è la potenza nominale di alimentazione lampada, P_{min} è la potenza minima di dimmerazione lampada imposta dal costruttore e x_j è la massima percentuale di dimmerazione lampada legata all'inserimento del j -esimo filtro fornita come calibrazione.

Da qui, chiamata y_j il livello DMX di inserimento del j -esimo filtro:

$$P_{el} = P_{minj} + \frac{P_n - P_{minj}}{256} \cdot (256 - y_j)$$

Da cui

$$P_{el} = (P_{min} + \frac{P_n - P_{min}}{100} \cdot x_j) + \frac{P_n - (P_{min} + \frac{P_n - P_{min}}{100} \cdot x_j)}{256} \cdot (256 - y_j)$$

E

$$P_l = P_{ln} \cdot \frac{P_{el}}{P_n}$$

6.2. Potenza luminosa riflessa

Per quanto riguarda la potenza luminosa riflessa all'interno del corpo lampada dai filtri dicroici, è possibile individuare una serie di relazioni analitiche che ne descrivono il valore al variare dei diversi parametri.

A questo proposito, possiamo fare riferimento alle curve spettrografiche di potenza relativa dei singoli filtri; queste ci indicano la percentuale di potenza luminosa che attraversa il filtro dicroico rispetto alla totalità della luce incidente, per ogni banda di lunghezza d'onda.

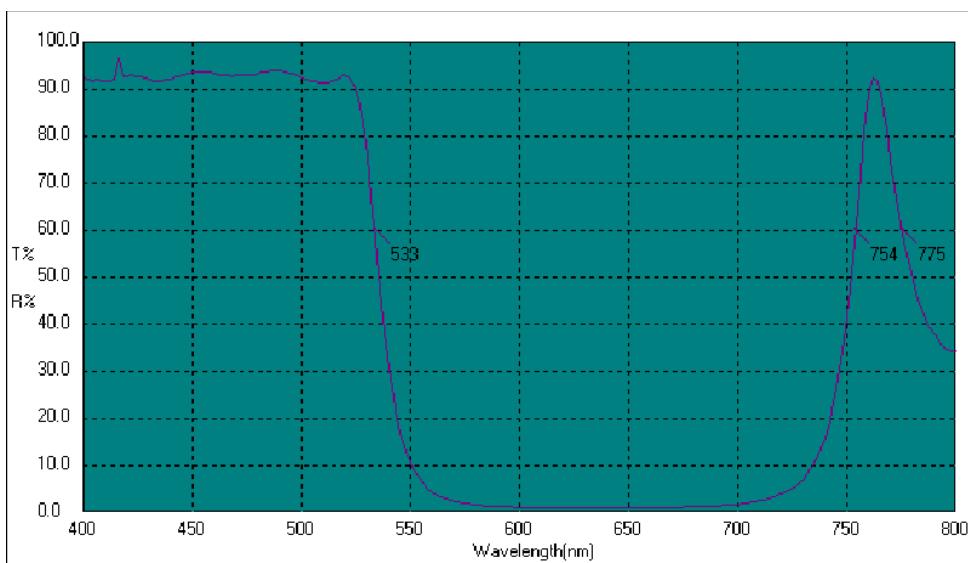


Fig. 6.1. Diagramma spettrografico di potenza relativa; filtro cambia colore CYAN.

Nota quindi la curva spettrografica relativa alla luce emessa dalla lampada in condizioni nominali, sarà possibile individuare la potenza luminosa passante attraverso ciascuno dei filtri per ciascuna banda di lunghezza d'onda. Per fare questo, si procederà a campionare le curve relative alla luce emessa dalla lampada e ai vari filtri, con precisione tanto maggiore quanto più ristretti gli intervalli di lunghezza d'onda selezionati; in particolare si sono adottati intervalli di ampiezza 10 nm. Per ciascuno degli n intervalli di lunghezza d'onda e per ciascuno degli m filtri, si potrà scrivere la percentuale di potenza luminosa transitante come

$$P_{\text{lout } i j} = P_{\text{lout } i j-1} \cdot [1 - (1 - k_{ij}) \cdot \frac{y_j}{256}]$$

Dove $P_{\text{lout } i j-1}$ è la potenza relativa transitante attraverso il filtro precedente (o la potenza relativa emessa dalla lampada nel caso del primo filtro) nell' i -esima banda di lunghezza d'onda; k_{ij} è il valore sul diagramma spettrografico del j -esimo filtro, corrispondente alla i -esima banda di lunghezza d'onda; y_j è il livello di inserimento del j -esimo filtro.

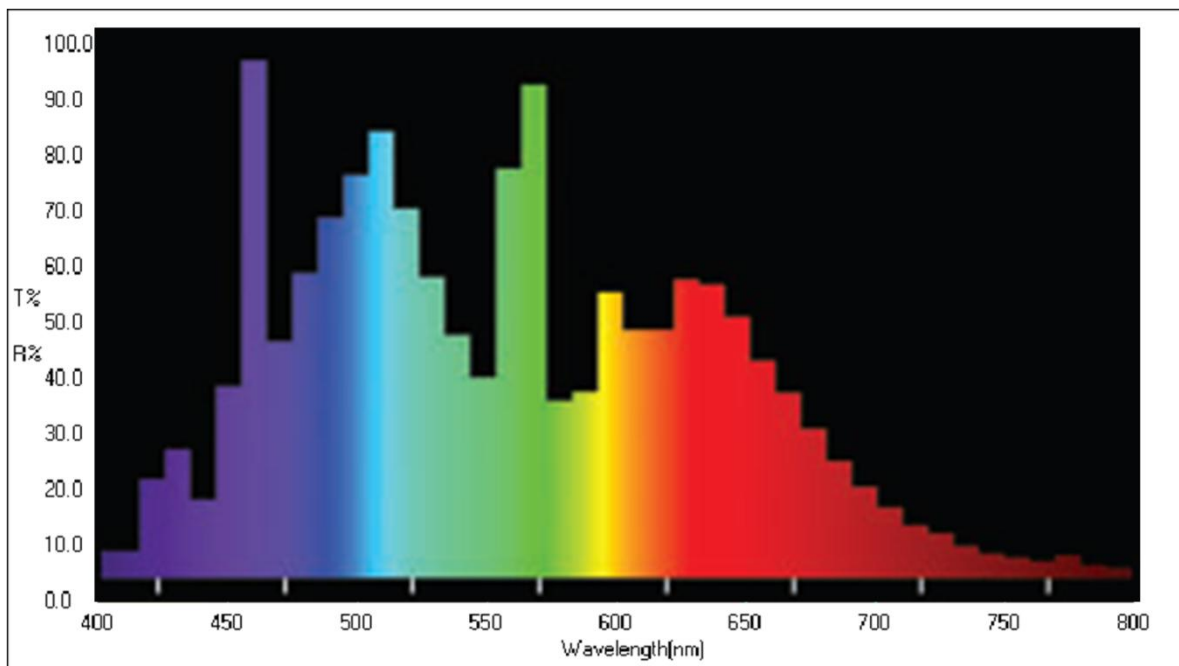


Fig.6.2. Diagramma spettrografico relativo di emissione; lampada a scarica OSRAM SIRIUS HRI 330W.

La componente riflessa risulterà invece

$$P_{\text{rifl } i j} = P_{\text{lout } i j-1} \cdot (1 - k_{ij}) \cdot \frac{y_j}{256}$$

Potendosi considerare per un filtro dicroico (v. Cap. 3):

$$a = 0$$

e quindi

$$r + t = 1$$

6.2.1 Filtri diecrici normali all'asse ottico

Sarà tuttavia necessario considerare che non tutta la componente riflessa ricadrà all'interno del corpo lampada; in particolare, si può iniziare considerando il caso più semplice di un filtro disposto perpendicolarmente all'asse ottico del riflettore parabolico. Considerata una generica sezione del gruppo lampada e del pacco effetti, parallelo all'asse ottico, si indichino con P il generico punto di incidenza della luce emessa dalla lampada, con D_1 il diametro della lampada a livello della battuta, con h_{fj} la distanza del j -esimo filtro dalla battuta, con h_b la distanza tra fondello lampada e battuta, con h_{F1} la distanza tra $F1$ e fondello lampada, con θ l'angolo compreso tra il raggio incidente e la perpendicolare al piano di incidenza in P , con α l'angolo compreso tra il raggio incidente e l'asse ottico e con γ l'angolo compreso tra la congiungente $F1$ e la battuta della lampada.

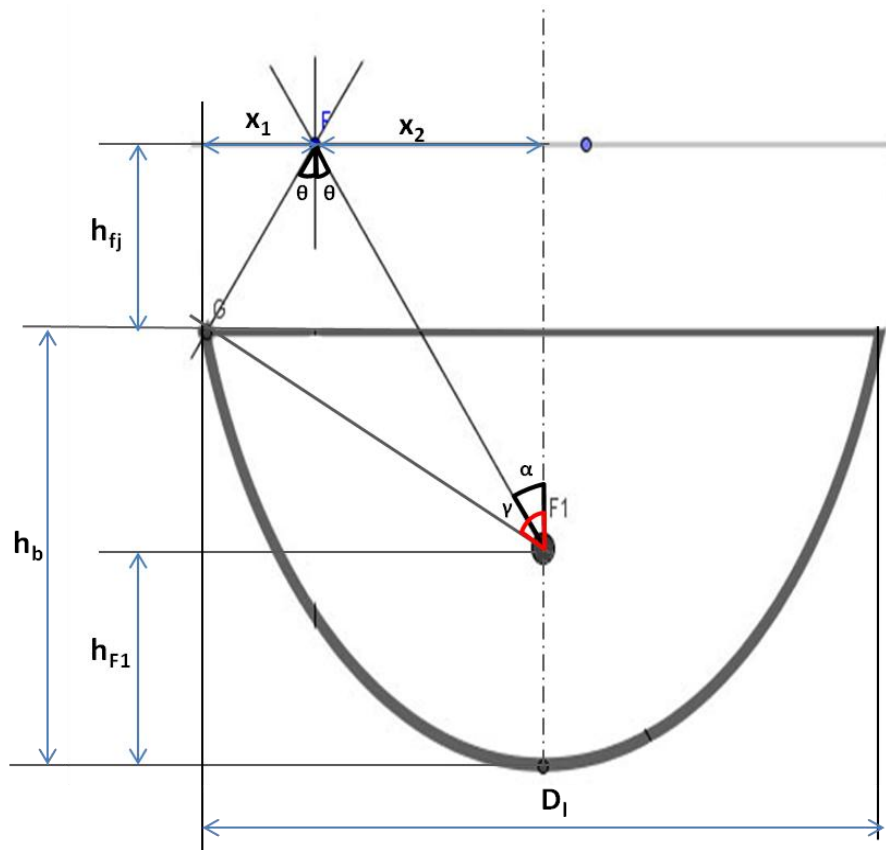


Fig.6.3. Sezione del gruppo lampada e del pacco effetti su piano parallelo all'asse ottico; filtro disposto perpendicolarmente all'asse ottico.

Definiti x_1 la distanza (su un piano perpendicolare all'asse ottico) tra il bordo lampada e il punto di incidenza P e x_2 la distanza, sullo stesso piano, tra l'asse ottico e il punto di incidenza della P, si avrà:

$$x_2 = (h_b - h_{F1} + h_{fj}) \cdot \tan(\alpha)$$

$$x_1 = h_{fj} \cdot \tan(\theta)$$

con $\alpha \approx \theta$ (alterni interni)

inoltre avremo

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\frac{D_l}{2}}{h_b - h_{F1}}\right)$$

Considerato il caso in cui un raggio riflesso cada sul bordo della battuta, avremo:

$$x_1 + x_2 = \frac{D_l}{2}$$

cioè:

$$(h_b - h_{F1} + h_{fj}) \cdot \tan(\alpha) + h_{fj} \cdot \tan(\alpha) = \frac{D_l}{2}$$

Da cui, raccogliendo $\tan(\alpha)$:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\frac{D_l}{2}}{h_b - h_{F1} + 2h_{fj}}\right)$$

risulterà evidente che i raggi luminosi emessi ad un angolo, rispetto all'asse ottico, compreso tra α e γ , cadranno al di fuori del riflettore, non contribuendo al riscaldamento dell'asse ottico.

Integrando l'area sottesa su 2π , il volume compreso tra i due settori sferici corrispondenti risulterà:

$$V_{\text{setts}} = \frac{2}{3} \pi r^3 (1 - \cos(\gamma)) - \frac{2}{3} \pi r^3 (1 - \cos(\alpha)) = \frac{2}{3} \pi r^3 (\cos(\alpha) - \cos(\gamma))$$

Considerata quindi l'ampolla come una sorgente luminosa puntiforme e con emissione uniforme in tutte le direzioni dello spazio, la quota di potenza luminosa riflessa dal j -esimo filtro che ricadrà sul gruppo ottico risulterà:

$$X_{\text{rgoj}} = \frac{V_{\text{sfera}} - V_{\text{setts}}}{V_{\text{sfera}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 - \frac{2}{3}\pi r^3(\cos(\alpha) - \cos(\gamma))}{\frac{4}{3}\pi r^3} =$$

$$= \frac{\frac{4}{3} - \frac{2}{3}(\cos(\alpha) - \cos(\gamma))}{\frac{4}{3}} = 1 - \frac{1}{2}(\cos(\alpha) - \cos(\gamma))$$

6.2.2 Filtri dicroici inclinati rispetto all'asse ottico

Consideriamo ora il caso, più generale, di un raggio incidente su un j-esimo filtro a doppia inclinazione (verso l'interno), formante un angolo β_j con un piano normale all'asse ottico. Si consideri una sezione del gruppo lampada e del pacco effetti, eseguita su un piano parallelo all'asse ottico e normale allo spigolo formato dagli spioventi del filtro.

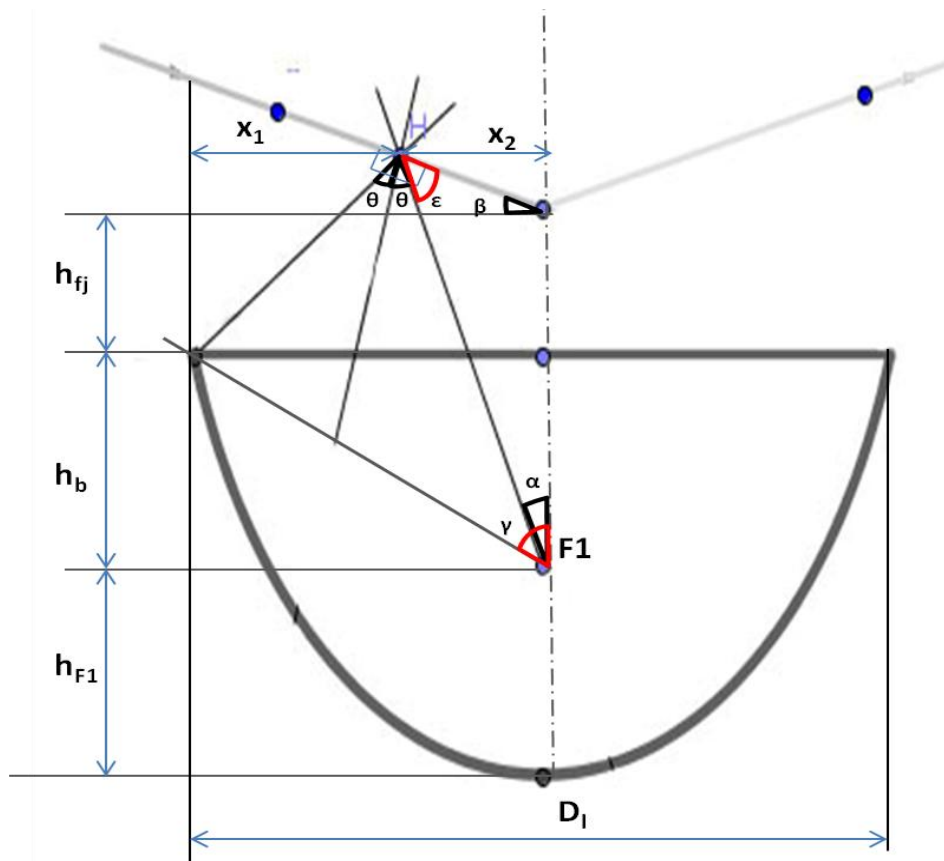


Fig.6.4. Sezione del gruppo lampada e del pacco effetti su piano parallelo all'asse ottico e perpendicolare allo spigolo degli spioventi; filtro disposto a doppio spiovente verso l'interno, con inclinazione β rispetto all'asse ottico.

Si indichino con H il generico punto di incidenza della luce emessa dalla lampada, con D_1 il diametro della lampada a livello della battuta, con h_{fj} la distanza dello spigolo dello spiovente del j -esimo filtro dalla battuta, con h_b la distanza tra fondello lampada e battuta, con h_{F1} la distanza tra F1 e fondello lampada, con θ l'angolo compreso tra il raggio incidente e la perpendicolare al piano di incidenza in P, con α l'angolo compreso tra il raggio incidente e l'asse ottico, con γ l'angolo compreso tra la congiungente F1 e la battuta della lampada e con β l'angolo di inclinazione degli spioventi del filtro.

Definiti anche in questo caso x_1 la distanza (su un piano perpendicolare all'asse ottico) tra il bordo lampada e il punto di incidenza P e x_2 la distanza, sullo stesso piano, tra l'asse ottico e il punto di incidenza della P, si avrà:

$$x_2 = [h_b - h_{F1} + h_{fj} + x_2 \cdot \tan(\beta)] \cdot \tan(\alpha)$$

raccogliendo x_2 :

$$x_2(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha)) = h_b - h_{F1} + h_{fj}$$

$$x_2 = \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))}$$

si avrà invece:

$$x_1 = [h_{fj} + x_2 \cdot \tan(\beta)] \cdot \tan(2\theta - \alpha) = [h_{fj} + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} \cdot \tan(\beta)] \cdot \tan(2\theta - \alpha)$$

ed essendo

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta$$

da cui

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varepsilon = \alpha + \beta$$

e quindi

$$x_1 = [h_{fj} + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} \cdot \tan(\beta)] \cdot \tan(\alpha + 2\beta)$$

considerando nuovamente il caso in cui il raggio riflesso cada sul bordo del riflettore, si avrà:

$$x_1 + x_2 = \frac{D_l}{2}$$

$$\left[h_{fj} + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} \cdot \tan(\beta) \right] \cdot \tan(\alpha + 2\beta) + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} = \frac{D_l}{2}$$

Essendo

$$\tan(a + b) = \frac{\tan(a) + \tan(b)}{1 + \tan(a) \cdot \tan(b)}$$

si avrà

$$\left[h_{fj} + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} \cdot \tan(\beta) \right] \cdot \frac{\tan(\alpha) + \tan(2\beta)}{1 + \tan(\alpha) \cdot \tan(2\beta)} + \frac{h_b - h_{F1} + h_{fj}}{(1 - \tan(\beta) \cdot \tan(\alpha))} = \frac{D_l}{2}$$

Si noti che, per ragioni di ingombri, necessariamente si adotteranno inclinazioni β massime dei filtri contenute ($< 10^\circ$); si potranno pertanto adottare le semplificazioni:

$$\sin(\beta) \approx \tan(\beta) \approx \beta \quad \text{e} \quad \cos(\beta) \approx 1; \quad \text{da cui} \quad \tan(2\beta) \approx 2\beta$$

Posti $\tan(\alpha) = x$; $(h_b - h_{F1} + h_{fj}) = a$; $\tan(\beta) = b$; $h_{fj} = d$; $\frac{D_l}{2} = e$, si potrà scrivere:

$$\left(d + \frac{a}{1 - bx} x \right) \frac{x + 2b}{1 + 2bx} + \frac{a}{1 - bx} = e$$

$$(d - bdx + ax)(x + 2b) + a + 2abx - (e - bex)(1 + 2bx) = 0$$

$$dx - bdx^2 + ax^2 + d - bdx + ax + a + 2abx - e + bex - 2bex + 2b^2ex^2 = 0$$

Che, ordinato in x, fornisce:

$$2b^2ex^2 - bdx^2 + ax^2 + dx - bdx + ax + bex - 2bex + 2abx + d + a - e = 0$$

$$x^2(2b^2e - bd + a) + x(d - bd + a + be + 2ab) + (d + a - e) = 0$$

Da cui

$$\alpha_n = \arctan \left(\frac{-(d - bd + a + be - 2be + 2ab) \pm \sqrt{(d - bd + a + be + 2ab)^2 - 4(2b^2e - bd + a)(d + a - e)}}{2(2b^2e - bd + a)} \right)$$

analiticamente determinata e di facile solvibilità numerica.

Selezionando un piano di sezione Π_k non normale allo spigolo formato dagli spioventi, essendo la proiezione β_k dell'angolo β sul piano minore di β stesso, si otterrà un angolo

$\alpha_k < \alpha_n$; nel particolare, scelto un piano contenente lo spigolo degli spioventi, si avrà $\beta_t = 0$ e quindi si otterrà un angolo α_t :

$$\alpha_t = \text{artan} \left(\frac{\frac{D_l}{2}}{h_b - h_{F1} + 2h_{fj}} \right)$$

Si potrà considerare α variabile linearmente da α_n ad α_t in un arco di $\frac{\pi}{2}$, da cui il volume del settore circolare descritto da α potrà scriversi:

$$V_s = \frac{4}{3} \pi r^3 \int_0^{2\pi} \left[1 - \cos \left(\alpha_t + \frac{\theta}{\pi/2} \alpha_n \right) \right] d\theta$$

Essendo, anche in questo caso:

$$\gamma = \text{artan} \left(\frac{\frac{D_l}{2}}{h_b - h_{F1}} \right)$$

il volume compreso tra i settori sferici di semiangoli α e γ sarà quindi:

$$V_{\text{setts}} = \frac{2}{3} \pi r^3 (1 - \cos(\gamma)) - \frac{4}{3} \pi r^3 \int_0^{2\pi} \left[1 - \cos \left(\alpha_t + \frac{\theta}{\pi/2} \alpha_n \right) \right] d\theta$$

Con le stesse considerazioni assunte nel caso di cui al precedente paragrafo, la quota di potenza luminosa riflessa dal j -esimo filtro che ricadrà sul gruppo ottico risulterà:

$$\begin{aligned} X_{\text{rgoj}} &= \frac{V_{\text{sfera}} - V_{\text{setts}}}{V_{\text{sfera}}} = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 - \frac{2}{3} \pi r^3 (1 - \cos(\gamma)) + \frac{4}{3} \pi r^3 \int_0^{2\pi} \left[1 - \cos \left(\alpha_t + \frac{\theta}{\pi/2} \alpha_n \right) \right] d\theta}{\frac{4}{3} \pi r^3} = \\ &= 1 - \frac{1}{2} (1 - \cos(\gamma)) + \int_0^{2\pi} \left[1 - \cos \left(\alpha_t + \frac{\theta}{\pi/2} \alpha_n \right) \right] d\theta \end{aligned}$$

6.2.3 Potenza termica riflessa totale

Risulterà quindi possibile calcolare la potenza radiante totale riflessa all'interno del riflettore parabolico come:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Rrifl}} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (X_{\text{rgoj}} \cdot P_{\text{riflij}}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (X_{\text{rgoj}} \cdot P_{\text{loutij-1}} \cdot (1 - k_{ij}) \cdot \frac{y_j}{256}) = \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ X_{\text{rgoj}} \cdot P_l \cdot \prod_{k=1}^{j-1} \left[(1 - k_{ik}) \cdot \frac{y_k}{256} \right] \right\} = \\
 &= P_l \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ X_{\text{rgoj}} \cdot \prod_{k=1}^{j-1} \left[(1 - k_{ik}) \cdot \frac{y_k}{256} \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Da cui, la potenza termica totale da smaltire risulterà:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{el}} (1 - \eta_l) + P_{\text{Rrifl}} = P_{\text{el}} \left\{ (1 - \eta_l) + \eta_l \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ X_{\text{rgoj}} \cdot \prod_{k=1}^{j-1} \left[(1 - k_{ik}) \cdot \frac{y_k}{256} \right] \right\} \right\}$$

ed essendo

$$P_{\text{el}} = \left(P_{\text{min}} + \frac{P_n - P_{\text{min}}}{100} \cdot x_j \right) + \frac{P_n - \left(P_{\text{min}} + \frac{P_n - P_{\text{min}}}{100} \cdot x_j \right)}{256} \cdot (256 - y_j)$$

Si potrà concludere :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{tot}} &= \left[\left(P_{\text{min}} + \frac{P_n - P_{\text{min}j}}{100} \cdot x_j \right) + \frac{P_n - \left(P_{\text{min}} + \frac{P_n - P_{\text{min}j}}{100} \cdot x_j \right)}{256} \cdot (256 - y_j) \right] \cdot \left\{ (1 - \eta_l) + \eta_l \cdot \right. \\
 &\left. \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ X_{\text{rgoj}} \cdot \prod_{k=1}^{j-1} \left[(1 - k_{ik}) \cdot \frac{y_k}{256} \right] \right\} \right\}
 \end{aligned}$$

Dove $P_{\text{min}j}$ è la potenza minima alla quale può essere dimmerata la lampada a seguito dell'inserimento del j -esimo filtro, P_n è la potenza nominale di alimentazione lampada, P_{min} è la potenza minima di dimmerazione lampada imposta dal costruttore, x_j è la massima percentuale di dimmerazione lampada legata all'inserimento del j -esimo filtro fornita come calibrazione, y_j è il livello DMX di inserimento del j -esimo tra gli m filtri, η_l il rendimento luminoso della lampada, k_{ij} è il valore sul diagramma spettrografico del j -esimo filtro, corrispondente alla i -esima tra le n bande di lunghezza d'onda nelle quale è stato suddiviso lo spettro e X_{rgoj} la percentuale di potenza luminosa riflessa che ricade sul corpo lampada.

La buona approssimazione garantita dai risultati ottenuti può essere confermata dal confronto con i valori di temperatura misurati; in particolare, fissati tutti i livelli di potenza minima in dimmerazione al minimo ($x_j=0, \forall j$), possiamo inserire separatamente i diversi filtri colore, facendo variare separatamente distanza filtro-battuta e percentuale di inserimento filtro.

	β (°)	h_{fj} (mm)	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	Risultato Fornito	e%
W/out heat filter	n/a	n/a	209	210	205	208	204	1,92
Heat Filter	0	2	217	215	213	215	220	2,33
Heat Filter	5	2	218	219	219	219	218	0,46
Heat Filter	7	2	215	216	215	215	216	0,47
Heat Filter	0	5	218	213	213	215	217	0,93
Heat Filter	5	5	212	213	212	212	215	1,42
Heat Filter	7	5	223	218	218	220	213	3,18
Heat Filter	0	7	215	215	211	214	215	0,47
Heat Filter	5	7	213	214	211	213	212	0,47
Heat Filter	7	7	216	211	209	212	210	0,94
CTO 33%	0	15	225	220	217	221	219	0,9
CTO 66%	0	15	231	230	231	231	236	2,16
CTO 100%	0	15	242	241	241	241	243	0,83
CTO 33%	0	20	226	226	224	225	225	0
CTO 66%	0	20	235	234	234	234	233	0,43
CTO 100%	0	20	244	240	240	241	239	0,83
CTO 33%	0	30	229	224	219	224	221	1,34
CTO 66%	0	30	235	233	232	233	230	1,29
CTO 100%	0	30	236	232	230	233	235	0,86
M 33%	0	15	238	238	234	237	237	0
M 66%	0	15	251	249	249	250	248	0,8
M 100%	0	15	277	278	279	278	279	0,36
M 33%	0	20	235	236	233	235	234	0,43
M 66%	0	20	260	256	257	258	251	2,71
M 100%	0	20	282	279	276	279	273	2,15
M 33%	0	30	225	225	222	224	230	2,68
M 66%	0	30	246	244	245	245	247	0,82
M 100%	0	30	269	265	261	265	265	0
Y 33%	0	15	216	216	212	215	220	2,33
Y 66%	0	15	224	225	226	225	228	1,33
Y 100%	0	15	236	233	233	234	239	2,14
Y 33%	0	20	218	217	213	216	217	0,46
Y 66%	0	20	228	223	223	225	225	0
Y 100%	0	20	234	230	228	231	234	1,3

Y 33%	0	30	220	217	216	218	214	1,83
Y 66%	0	30	221	222	221	221	220	0,45
Y 100%	0	30	237	234	231	234	229	2,14
C 33%	0	15	230	231	229	230	232	0,87
C 66%	0	15	239	237	233	236	238	0,85
C 100%	0	15	239	235	234	236	241	2,12
C 33%	0	20	237	238	237	237	237	0
C 66%	0	20	241	239	237	239	240	0,42
C 100%	0	20	248	244	244	245	245	0
C 33%	0	30	230	228	224	227	233	2,64
C 66%	0	30	241	237	236	238	236	0,84
C 100%	0	30	251	246	247	248	241	2,82
Y+CTO	0	n/a	260	258	255	258	256	0,78
C+CTO	0	n/a	283	281	277	280	284	1,43
M+CTO	0	n/a	278	278	273	276	276	0
C+M	0	n/a	290	290	286	289	290	0,35
C+Y	0	n/a	295	291	286	291	287	1,37
M+Y	0	n/a	280	277	277	278	279	0,36
C+Y+CTO	0	n/a	290	287	286	288	293	1,74
C+M+CTO	0	n/a	302	301	297	300	295	1,67
M+Y+CTO	0	n/a	277	275	271	274	277	1,09

Fig.6.5. Confronto tra valori di temperatura rilevati su 3 lampade di prova e valori stimati dal programma. Tensione alimentazione ventole 24V – $T_{\text{ext}}^{\circ} 20^{\circ}\text{C}$.

Bibliografia

A. Bejan, Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

F.P. Incropera, D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del calore. CLEUP.

M.J. Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. De Witt. Elementi di Fisica Tecnica per L'ingegneria. Mc Graw Hill.

Y.A. Cengel. Termodinamica e Trasmissione del Calore. Mc Graw-Hill.

J. R. Howell, A catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors.

S.Tominaga, S.Ebisui, B.E.Wandell. Color Temperature Estimation of Scene Illumination.

Capitolo 7. Potenza termica dissipata a livello del riflettore

Come evidenziato nel Capitolo 5, la potenza termica dissipata dal corpo lampada può essere considerata composta da due quote: una quota parte dispersa a livello del bulbo lampada e una quota parte dispersa a livello del riflettore ellittico. La componente dissipata a livello del riflettore può essere considerata come formata da una componente dissipata per convezione naturale e una componente dissipata per irraggiamento.

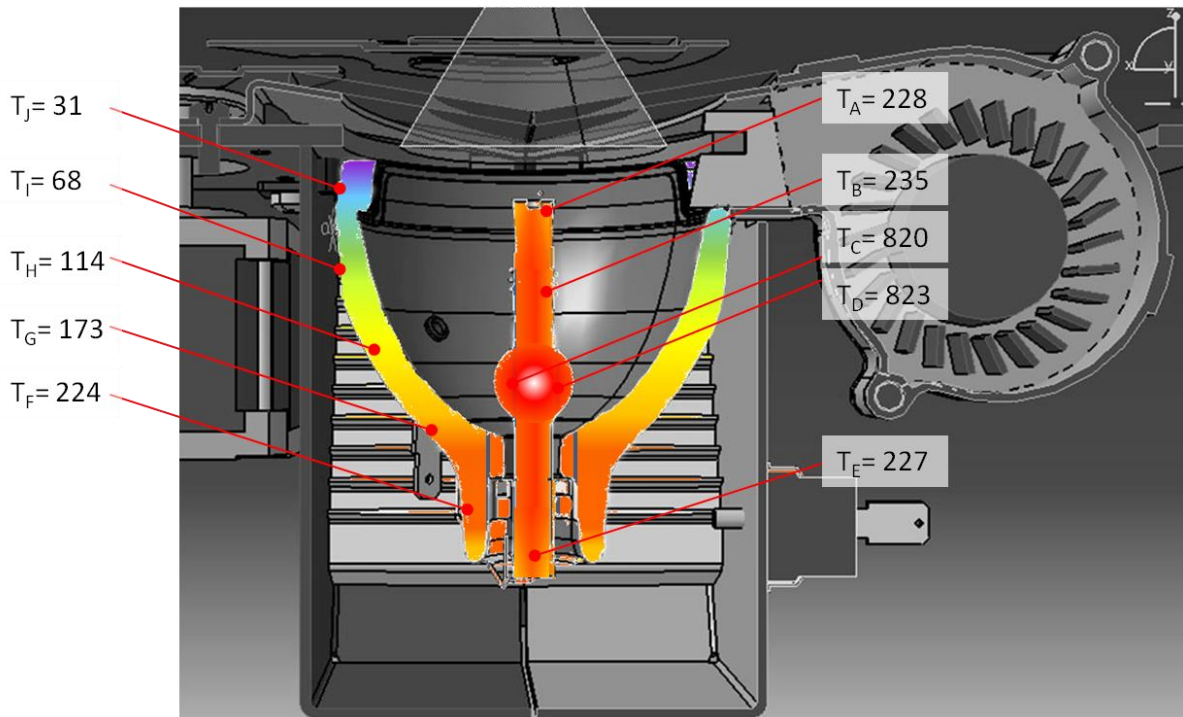


Fig. 7.1. Gradiente termico sul corpo lampada, rilevato con l'ausilio di 5 termocoppie (punti A, B, C, D, E) e di pirometro IR (punti F, G, H, I, J).

In particolare risulterà:

$$Q_{\text{dissipato}} = \int_{S_{\text{rifl}}} \{h_{\text{conv}} \cdot [T(y) - T_{\text{ext}}] + F_{ij} \cdot \sigma(T(y)^4 - T_{\text{ext}}^4)\} dS$$

Cioè entrambe le componenti risulteranno funzione della distribuzione di temperatura presente sul riflettore.

Come evidente dalla Fig. 7.1., mentre la temperatura esterna del bulbo risulta approssimativamente costante sull'intera lunghezza (a seguito della ridotta resistenza termica di conduzione per elevati flussi di calore su distanza molto ridotte), la temperatura sulla faccia esterna del riflettore risulterà variare secondo una legge che possiamo prevedere essere

esponenziale; si passerà quindi da una temperatura prossima a quella del bulbo sulla base del riflettore, ad una temperatura prossima a quella esterna avvicinandosi alla battuta del corpo lampada.

7.1. Distribuzione di temperatura

Sarà quindi necessario individuare una relazione che descriva la distribuzione di temperatura sul riflettore.

Consideriamo una porzione infinitesimale della superficie del riflettore, disposta su un piano normale all'asse ottico di altezza dy ; sarà possibile considerare su questa porzione una distanza uniforme dei punti mediani della sezione dall'asse ottico pari a x , dove x è descritto dalla parametrizzazione di una sezione del riflettore, eseguita su un piano contenente l'asse ottico, come un'ellisse con vertice nell'origine e asse maggiore giacente sull'asse delle ordinate. Potremo cioè scrivere:

$$Ax^2 + Cy^2 + Ey + F = 0$$

dove

$$A = 16 a^2$$

$$C = 16a^2 - 4(y_{F1} - y_{F2})^2$$

$$E = 4(y_{F1} - y_{F2})(y_{F1}^2 - y_{F2}^2) - 16a^2(y_{F1} + y_{F2})$$

$$F = y_{F1}^2 y_{F2}^2 - (y_{F1}^2 + y_{F2}^2 - 4a^2)^2$$

con y_{F1} distanza tra il fuoco $F1$ e il fondello della lampada, y_{F2} distanza tra il fuoco $F2$ e il fondello della lampada e $a = \sqrt{b^2 - c^2}$, con $b = \sqrt{\text{semiasse maggiore}}$ e $c =$ distanza focale.

Da cui

$$x(y) = \sqrt{\frac{-Cy^2 - Ey - F}{A}}$$

Si potrà scrivere la superficie offerta all'esterno dall'elemento infinitesimo di altezza dy , come $dS = 2\pi \cdot x(y) \cdot dy \cdot 2$.

Si potrà inoltre scrivere l'area intercettata dalla sezione normale all'asse ottico mediana a dy , sul riflettore ellittico come $dA = 2\pi \cdot x(y) \cdot l$, dove l è lo spessore del riflettore.

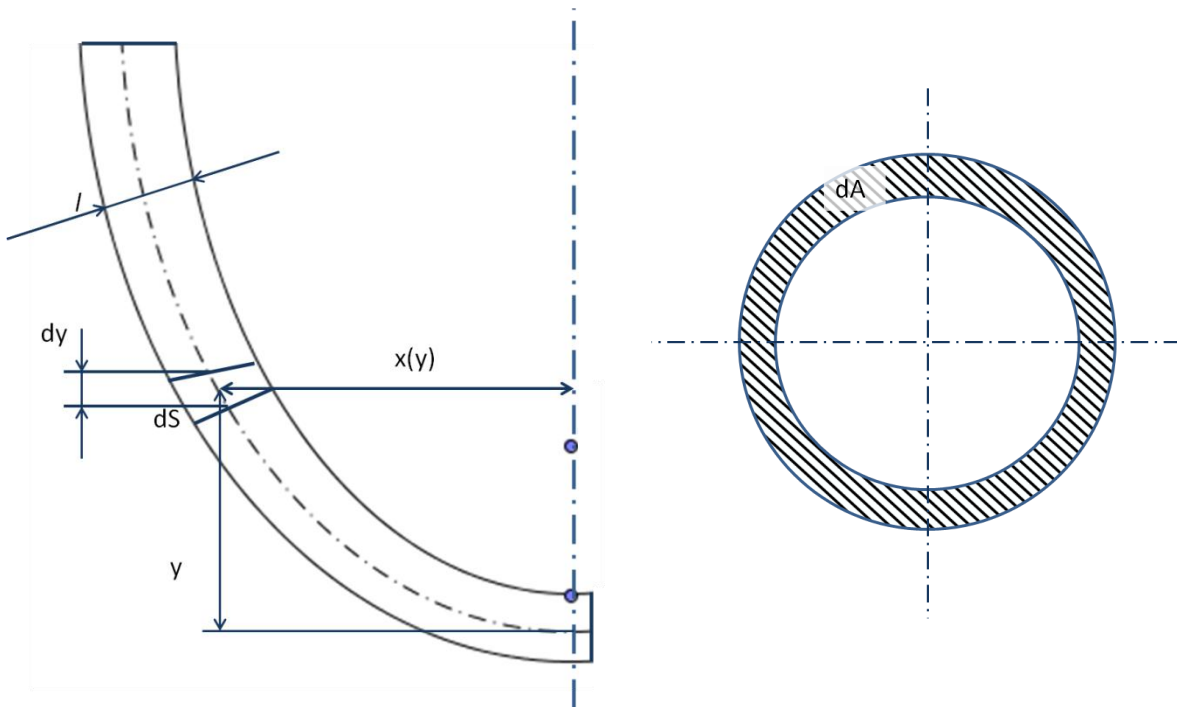


Fig. 7.2. Parametri geometrici di integrazione

7.1.1. Bilancio di potenza

Considerato ancora l'elemento infinitesimo di altezza dy , per il principio di conservazione dell'energia, risulterà ovvio che $dQ_c + dQ_i = Q_y - Q_{y+dy}$ cioè il calore disperso per convezione e irraggiamento verso l'esterno dovrà essere pari alla differenza tra il calore entrante per conduzione nell'elemento e quello uscente. Tuttavia, come si dimostrerà, risulta $dQ_i = \sigma dQ_c$, quindi $dQ \approx dQ_c$.

Sarà possibile assumere nullo il gradiente di temperatura $\frac{\partial T}{\partial x}$ su ogni elemento, essendo il numero di Biot, che rappresenta il rapporto tra la potenza termica scambiata per convezione e quella scambiata per conduzione all'interno dell'elemento:

$$Bi = \frac{h_{conv} \cdot L}{\lambda_{conds}} = 0.0013 < 0.1$$

Dove h_{conv} è calcolato considerando Nu per convezione naturale su una superficie cilindrica (l'elemento infinitesimo) e λ_{conds} è relativo al materiale ceramico del riflettore; i parametri termofluidodinamici sono calcolati alla temperatura massima T_b (assunta pari a 350°C), a vantaggio di sicurezza; L sarà pari a V/S dell'elemento, cioè $L \approx (2\pi \cdot l \cdot dy) / (2\pi \cdot dy) = l$.

Potremo quindi scrivere il calore disperso per convezione come

$$dQ = ds \cdot h_{conv} \cdot [T(y) - T_{ext}] = 4\pi \cdot x(y) \cdot dy \cdot h_{conv} \cdot [T(y) - T_{ext}]$$

mentre

$$Q_y = -\lambda_{cond} \int_A \frac{dT}{dy} dA = -\lambda_{cond} \frac{dT}{dy} \Big|_y \cdot x(y) \cdot 2\pi \cdot l$$

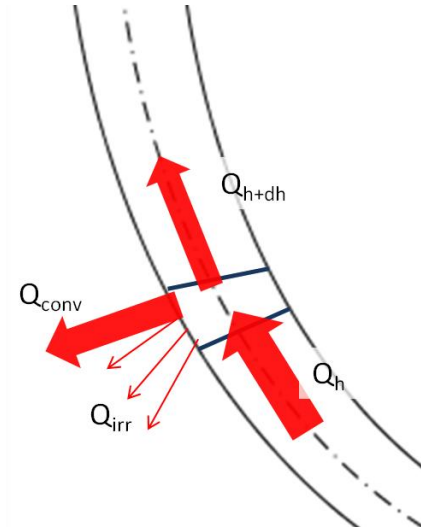


Fig. 7.3. Bilancio di potenza termica

$$Q_{y+dy} = -\lambda_{cond} \frac{dT}{dy} \Big|_{y+dy} \cdot x(y) \cdot 2\pi \cdot l$$

Da cui

$$Q_y - Q_{y+dy} = \lambda_{cond} \left(\frac{dT}{dy} \Big|_{y+dy} - \frac{dT}{dy} \Big|_y \right) \cdot x(y) \cdot 2\pi \cdot l = \lambda_{cond} dy \frac{d^2T}{dy^2} \cdot x(y) \cdot 2\pi \cdot l$$

quindi, essendo $dQ = Q_y - Q_{y+dy}$:

$$4\pi \cdot x(y) \cdot dy \cdot h_{conv} \cdot [T(y) - T_{ext}] = \lambda_{cond} dy \frac{d^2T}{dy^2} \cdot x(y) \cdot 2\pi \cdot l$$

$$2h_{conv} \cdot [T(y) - T_{ext}] = \lambda_{cond} \cdot \frac{d^2T}{dy^2} \cdot l$$

E definito $T(y) - T_{ext}$ come θ e $m = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{conv}}{l \cdot \lambda_{cond}}}$

$$\frac{d^2\theta}{\theta} = m^2 \cdot dy^2$$

Risolubile come

$$T(y) - T_{ext} = Ae^{my} + Be^{-my}$$

e, potendosi considerare dalle misurazioni di temperatura eseguite, quali condizioni al contorno, T sul fondello della lampada ($y=0$) $\approx T_{bulbo}$ e T sulla battuta della lampada ($y=h_b$) $\approx T_{ext}$, avremo

$$\begin{cases} A + B = T_B - T_{ext} \\ Ae^{mh_b} + Be^{-mh_b} = 0 \end{cases}$$

Da cui

$$\begin{cases} A = \frac{(T_B - T_{ext}) \cdot e^{-mh_b}}{e^{-mh_b} - e^{mh_b}} \\ B = \frac{(T_{ext} - T_B) \cdot e^{mh_b}}{e^{-mh_b} - e^{mh_b}} \end{cases}$$

Perciò

$$T(y) = \frac{(T_B - T_{ext}) \cdot e^{-mh_b}}{e^{-mh_b} - e^{mh_b}} \cdot e^{my} + \frac{(T_{ext} - T_B) \cdot e^{mh_b}}{e^{-mh_b} - e^{mh_b}} \cdot e^{-my} + T_{ext}$$

7.2 Potenza termica dissipata

Di conseguenza, sarà possibile scrivere il calore dissipato complessivamente dal riflettore come

$$Q_{dissipato} = \int_{S_{rifl}} \{h_{cond} \cdot [T(y) - T_{ext}] + F_{ij} \cdot \sigma(T(y)^4 - T_{ext}^4)\} dS$$

Come visto nel Capitolo 1, h_{conv} risulterà

$h_{conv} = \frac{Nu_m \cdot \lambda_{cond}}{\delta}$ con le grandezza coinvolte calcolate a T_{bulk} medio tra $T(y)$ e T_{ext} e la grandezza caratteristica δ pari a $\frac{\pi}{2} D_l$.

La correlazione tra Nu e i numeri di Prandtl e Rayleigh risulta di difficile determinazione empirica, essendo impossibile eseguire misurazioni di temperatura sulla lampada in condizioni di convezione non forzata; infatti il flusso termico dissipato per convezione naturale, risulta insufficiente a mantenere la temperatura del corpo lampada entro valori accettabili, tali da non compromettere il funzionamento della macchina stessa.

Si farà quindi uso della relazione da bibliografia relativa alla convezione forzata su una superficie sferica:

$$Nu = 2 + \frac{0,589 Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}}$$

Per quanto riguarda il fattore di forma da utilizzare nella componente radiata, impiegheremo i valori descritti da bibliografia per il caso di un'emisfera affacciata su 5 superfici disposte a scatola:

$$F_{12} = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{h^2} \quad \text{con} \quad h = \frac{H}{x(y)}, \quad \text{dove } H \text{ è la distanza tra l'asse ottico e le superfici del coprilampada.}$$

Sulla base di queste considerazioni, sarà possibile integrare numericamente l'espressione del flusso termico dissipato.

Dall'integrazione delle due parti, relative a convezione ed irraggiamento, risultano, per una temperatura del bulbo di 250° C, delle componenti di potenza dissipata pari a 22 W per convezione naturale sul riflettore e 1,7 W irradiati dal riflettore; la potenza irradiata dal riflettore risulta cioè pari a circa il 7% della potenza totale irradiata dal riflettore, giustificando la scelta di considerarla poco rilevante per la determinazione del gradiente termico.

Bibliografia

A. Bejan, Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

F.P. Incropera, D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

H. Schlichting. Boundary Layer theory. Mc Graw Hill.

R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc.

Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del calore. CLEUP.

M.J. Moran, H.N. Shapiro, B.R. Munson, D.P. De Witt. Elementi di Fisica Tecnica per L'ingegneria. Mc Graw Hill.

Y.A. Cengel. Termodinamica e Trasmissione del Calore. Mc Graw-Hill;

Capitolo 8. Potenza termica dissipata a livello del bulbo

La quota di potenza termica dissipata a livello del bulbo può essere considerata composta da tre componenti: una componente radiativa (già esaminata in dettaglio nel Capitolo 6), una di dissipazione per convezione forzata ed una di dissipazione per convezione naturale. Come si dimostrerà a fine capitolo, la componente forzata risulta di gran lunga prevalente, permettendo esclusivamente un funzionamento della macchina con ventola inserita.

Come si è visto nel Capitolo 7, si può notare attraverso misurazioni sperimentali che la temperatura superficiale del bulbo può essere considerata approssimativamente uniforme su tutta la sua lunghezza; si potranno quindi sempre calcolare le grandezze termodinamiche coinvolte a T_{film} media tra T_{bulbo} e T_{air} .

8.1. Convezione naturale

Il flusso termico trasmesso dal bulbo per convezione naturale si potrà esprimere secondo la formula di Newton come

$$Q_{\text{cn}} = \int_{S_{\text{bulbo}}} h_{\text{convn}} \cdot [T_b - T_{\text{ext}}] dS = h_{\text{convn}} \cdot [T_b - T_{\text{ext}}] \cdot \pi D_{\text{bulbo}} \cdot L_{\text{bulbo}}$$

h_{convn} risulterà

$$h_{\text{convn}} = \frac{Nu_{\text{mn}} \cdot \lambda_{\text{cond}}}{\delta}$$

con la grandezza caratteristica δ pari a D_{bulbo} .

La correlazione tra Nu e i numeri di Prandtl e Rayleigh risulta di difficile determinazione empirica, essendo impossibile eseguire misurazioni di temperatura sulla lampada in condizioni di convezione non forzata; infatti il flusso termico dissipato per convezione naturale, risulta insufficiente a mantenere la temperatura del corpo lampada entro valori accettabili, tali da non compromettere il funzionamento della macchina stessa.

Si adotterà quindi la correlazione da bibliografia per la convezione naturale su cilindro; tuttavia sarà necessario considerare la posizione dell'asse del bulbo rispetto all'orizzontale (tilt); nel caso di una posizione perfettamente verticale (correlazione di Churchill-Chu) si avrà:

$$Nu_{mn} = 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1+(0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}$$

in caso invece di una disposizione orizzontale, si potrà adottare la correlazione semplificata di Mc Adams

$$Nu_{mn} = 0,54 Ra_D^{1/4}$$

Per i casi intermedi (tilt diverso da 0-90-180°) dovremo utilizzare una correlazione intermedia, con un risultato dato dalla proporzione tra i risultati delle due correlazioni e l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale.

8.2. Convezione forzata

Per calcolare l'entità della componente di convezione forzata, essendo questa legata al numero di Reynolds e quindi alla velocità del flusso d'aria che investe il bulbo, sarà necessario determinare il valore di quest'ultima.

8.2.1. Cadute di carico sul sistema di ventilazione

Potremo individuare la velocità in funzione della portata, studiando il grafico Q-P fornito dal costruttore, relativo alla ventola tangenziale soffiante impiegata.

■ P & Q CURVE (AT RATED VOLTAGE)

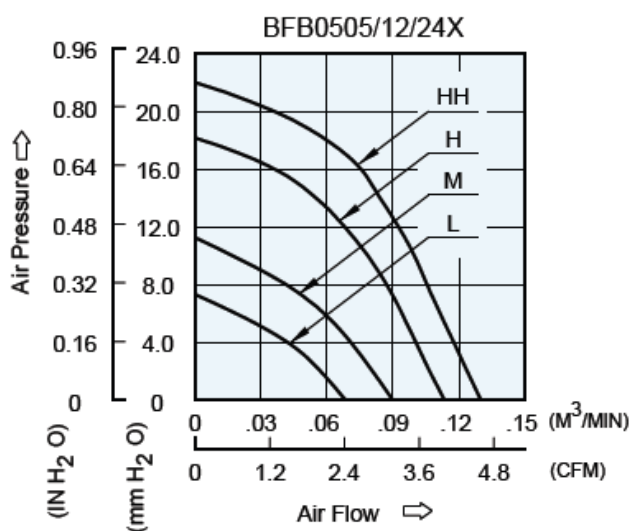


Fig. 8.1. Curva P-Q della ventola tangenziale soffiante BFB 51x51x15 – 24V/0.11° impiegata.

Risulterà possibile esprimere la curva Q-P della ventola per punti, approssimando poi con una curva cubica; potremo poi rappresentare la possibilità di variare la tensione di alimentazione della ventola, correlando i valori della portata Q alla tensione di alimentazione e i valori della prevalenza fornita P al quadrato della tensione di alimentazione. Individuata quindi la curva Q-P della pompa, potremo trovare il punto di funzionamento, e quindi la portata Q_v in uscita dalla ventola, incrociandola con la curva delle cadute di carico sull'intero impianto. Di conseguenza, sarà necessario individuare un'espressione approssimata che rappresenti numericamente l'andamento della curva delle cadute di carico.

La caduta di pressione complessiva sull'impianto potrà essere espressa come una funzione di Q del tipo:

$$\Delta P = K_1 \cdot \frac{Q^2}{\Omega_{asp}^2} \cdot \frac{L_{asp}}{D_{asp}} + K_2 \cdot \frac{Q^2}{\Omega_{conv}^2} \cdot \frac{L_{conv}}{D_{mconv}} + K_3 \cdot \frac{Q^2}{\Omega_{asp}^2}$$

dove la prima parte riguarda le cadute di carico distribuite sul condotto di aspirazione, la seconda parte le perdite di carico distribuite sul convergente di mandata e la terza parte le perdite di carico concentrate sulle accidentalità dell'impianto.

K_1 e K_2 potranno essere espresse come:

$$K = \frac{\lambda \cdot \rho}{2}$$

λ sarà legata alla portata, come descritto dalla formula di Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{R}{3,71 D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$$

Eventualmente nella sua forma semplificata

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \cdot \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}$$

vista la scarsa incidenza delle componenti di rugosità, dato l'utilizzo di canalizzazioni in MDF estruso e lamiera sottile di alluminio con taglio laser e piegatura automatica.

Fan voltage (V)	L1 (mm)	L2 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Q (m ³ /s)	ΔP (Pa)	K1	K2	K3
12	150	25	51	14	0,001	26	0,0227	0,008	0,085
16	150	25	51	14	0,0014	32	0,021	0,007	0,083
20	150	25	51	14	0,0018	71	0,018	0,006	0,084
24	150	25	51	14	0,0022	140	0,013	0,005	0,085
12	50	25	51	14	0,0008	28	0,022	0,007	0,086
16	50	25	51	14	0,0012	35	0,018	0,006	0,083
20	50	25	51	14	0,0016	79	0,016	0,004	0,085
24	50	25	51	14	0,002	160	0,011	0,003	0,084

Fig. 8.2. Costanti di caduta di carico nelle diverse situazioni di impiego; si noti K3 indipendente da portata e lunghezza tubazioni.

Misurando la velocità di uscita del flusso dal sistema di ventilazione, e incrociando questo valore con la curva Q-P, sarà possibile individuare la caduta di carico, e da questa la costante K₃ relativa alle perdite concentrate; sarà così possibile ottenere un'espressione analitica delle cadute di carico sull'impianto.

8.2.2. Convergente

Data la necessità di incrementare la velocità del flusso che investe il bulbo, si è deciso in fase di progetto, come evidenziato nel Capitolo 4, di adottare un convergente in mandata, realizzato in lamiera di alluminio tagliata e piegata. Considerata la variazione di pressione tra imbocco e sbocco del convergente trascurabile ($P \approx P_{atm}$), una trasformazione adiabatica e variazioni di temperatura legate alla compressione del fluido conseguentemente irrilevanti, risulta possibile trattare l'aria come fluido incomprimibile ($\partial\rho/\partial x \approx 0$) e quindi

$$Q = U_1 \cdot \Omega_1 \approx U_2 \cdot \Omega_2$$

Da qui, nota la geometria del convergente, risulta semplice calcolare U₂, da questa U_{2n} (la componente di U₂ normale all'asse ottico, pari a $U_2 \cdot \cos \alpha$) e conseguentemente Re:

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu}$$

con tutte le grandezze calcolate a T_{bulk}.

8.2.3. Correlazione termofluidodinamica

Trovandosi nel caso di convezione forzata, risulterà

$$Nu = f(Re, Gr, Pr)$$

modellabile come:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b$$

Da qui, si sono calcolati il coefficiente C e gli esponenti a e b; si è fatta variare inizialmente la tensione di alimentazione della ventola, e quindi la velocità del flusso in uscita e di conseguenza il numero di Reynolds, mantenendo la temperatura di ingresso dell'aria (e quindi il numero di Prandtl) costante.

Fan voltage (V)	Q (m ³ /s)	T _{lamp} (°C)	Re
12	0,001	230	3746
16	0,0014	230	5246
20	0,0018	230	6745
24	0,0022	230	8248

Fig.8.3. Valori di Re al variare della portata; da qui si ricava, nel caso studiato, a=1,02

Si è quindi potuto parametrizzare $Nu_m = C_1 \cdot Re^a$

da qui, ho utilizzato la funzione di curve fitting POLYFIT di MatLab, come :

$$\text{polyfit}(\log(x), \log(y), 1)$$

con y vettore contenente Nu, calcolato sulla base delle temperature rilevate e della potenza termica da dissipare nei diversi casi e x contenente Re corrispondente, calcolato sulla base della tensione di alimentazione della ventola, per determinare numericamente le costanti a e C₁.

Si potranno quindi considerare i diversi livelli di temperatura rilevati al variare della potenza termica da smaltire; essendo le diverse grandezze termofluidodinamiche considerate a T_{bulk} media tra T_{bulbo} e T_{air}, si avranno conseguentemente valori diversi di Re e Pr; si potrà quindi scrivere:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b = C_2 \cdot Pr^b$$

Con Re^a noto; applicando nuovamente la funzione POLYFIT, utilizzando ora risulterà quindi possibile determinare le costanti C_2 (da cui $C = \frac{C_2}{Re^a}$) e b , rendendo la correlazione completamente determinata.

fan voltage (V)	Q (m ³ /s)	T _{lamp} (°C)	Re	Pr
24	0,0022	210	8014	0,69
24	0,0022	250	6841	0,685
24	0,0022	300	5844	0,68
24	0,0022	350	5100	0,675

Fig.8.4. Valori di Re al variare della portata; da qui si ricava, nel caso studiato, $b=0,28$ e $C=0,08$

La componente Q_{cf} risulterà quindi:

$$Q_{cn} = h_{convf} \cdot [T_b - T_{ext}] \cdot \pi D_{bulbo} \cdot L_{bulbo\ lambita}$$

$$\text{con } h_{convf} = \frac{Nu_{mf} \cdot \lambda_{cond}}{\delta}$$

$$\text{e } L_{bulbo\ lambita} = H_{convergente} \cdot \cos \alpha \cdot K_v$$

dove $H_{convergente}$ è l'altezza della sezione finale del convergente, α è l'inclinazione dell'asse del convergente (tangenziale rispetto alle palettature della ventola) rispetto ad un piano normale all'asse ottico della lampada e K_v è un eventuale coefficiente di riduzione della velocità.

8.2.4. Bilancio termico

Si potrà quindi concludere scrivendo il bilancio della potenza termica come:

$$P_{prod} - P_{irrbulbo} = Q_{cnbulbo}(T_{bulbo}) + Q_{cnbulbo}(T_{bulbo}) + Q_{cnrifl}(T_{bulbo}) + Q_{irrifl}(T_{bulbo})$$

Al fine di individuare la temperatura effettiva di funzionamento del corpo lampada, si procederà ipotizzando una temperatura, interpolando, sulla base di valori tabulati, il valore nelle condizioni considerate delle diverse grandezze termofluidodinamiche che figurano nell'espressione della potenza dispersa e valutando la relativa temperatura di bulbo. Confrontando la temperatura di bulbo calcolata con il valore ipotizzando inizialmente, si procederà poi a selezionare la temperatura di bulbo calcolata quale nuovo valore sulla base del quale (alle conseguenti $T(y)$ per le componenti disperse sul riflettore e a T_{bulk} per le

componenti disperse sul bulbo) interpolare nuovamente i valori delle grandezze termofluidodinamiche; si itererà il procedimento, confrontando ogni volta i risultati di temperatura ottenuti su due iterazioni successive, fino ad ottenere su due cicli successivi differenze di temperature stimate inferiori ad un certo limite di sensibilità imposto.

Come preannunciato nei capitoli precedenti, in condizioni normali di funzionamento, la componente di potenza termica dissipata per convezione forzata risulta prevalente; nel caso di funzionamento a shutter aperto, senza filtri inseriti, con tensione di alimentazione ventola di 20V, la potenza elettrica di 330W assorbita dalla lampada risulta così dissipata:

- 85 W radiati dal bulbo (26,5%)
- 205 W dissipati per convezione forzata sul bulbo (62,5%)
- 18 W dissipati per convezione naturale sul bulbo (5,5%)
- 15 W dissipati per convezione naturale sul riflettore (4,5%)
- 2 W radiati dal riflettore (< 1%)

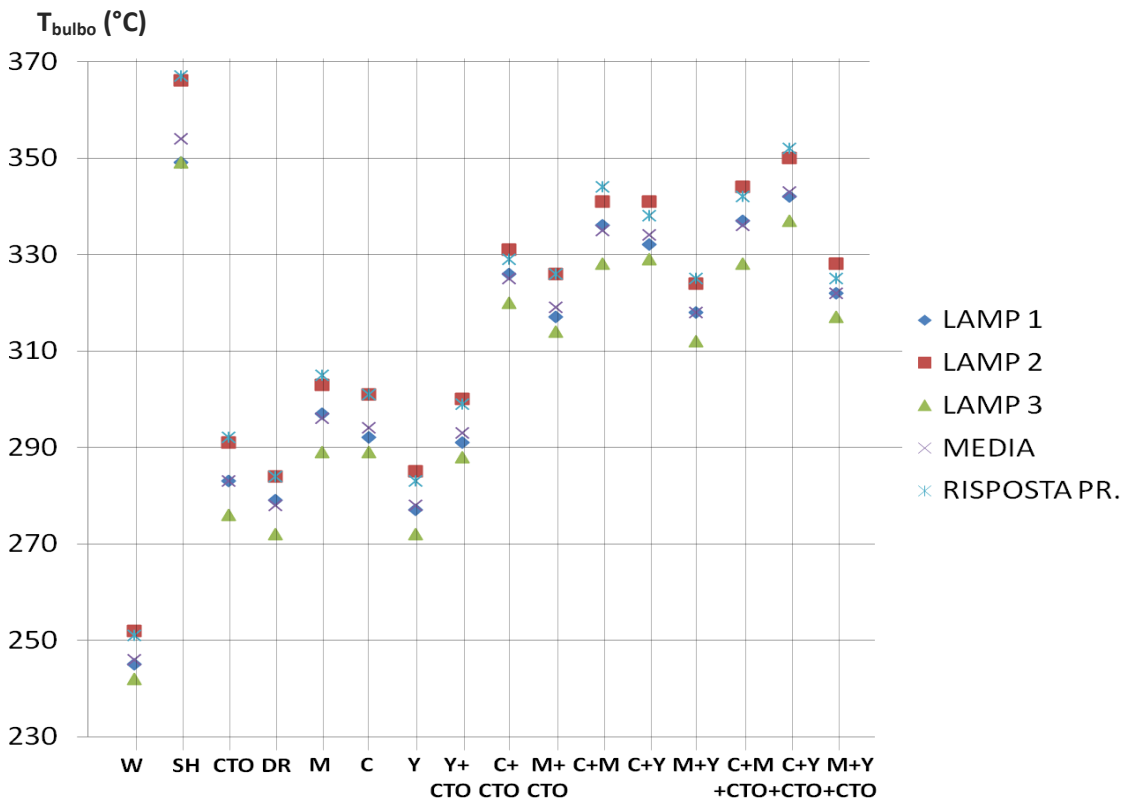


Fig. 8.5 Valori di temperatura rilevati e stimati dall'applicazione; macchina in posizione verticale, ventola alimentata a 24V, T_{ext} .

Per un più completo confronto tra i valori di temperatura rilevati sperimentalmente e i valori stimati dal programma, si rimanda all'appendice IV.

Bibliografia

F.P. Incropera, D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, Inc.

R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc.

Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. Trasmissione del calore. CLEUP.

Y.A. Cengel. Termodinamica e Trasmissione del Calore. Mc Graw-Hill;

E. Sertel, Regression and interpolation with MatLab.

Capitolo 9. Conclusioni e sviluppi futuri

Il programma che ho sviluppato nel corso del progetto di tesi permette la stima dei valori di temperatura sul corpo lampada con un'approssimazione sufficiente, come evidenziato dai dati di temperatura relativi al prototipo di MAX rilevati sperimentalmente (v. Appendice IV), a soddisfare i requisiti posti dal produttore. Con l'esclusione del tempo di attesa iniziale necessario per l'importazione dei dati di progetto da Excel, l'applicazione ha una buona prontezza di risposta, fornendo risultati numerici con approssimazioni dell'ordine di 10^{-3} ° C in un tempo di calcolo massimo inferiore al secondo.

Il programma utilizza solamente calcoli analitici e stime numeriche, senza richiedere programmi specifici di studio FEM. Inoltre il programma dà risultati in linea con i valori misurati sperimentalmente anche per altre macchine della stessa famiglia, quali JACK e RAPTOR, dotate di geometria del sistema di ventilazione simile ma di tipologie di corpo lampada e ventola diverse per modelli e potenza, oltre a geometria diversa del pacco filtri.

L'applicazione è facilmente utilizzabile, grazie all'interfaccia grafica sviluppata in MatLab, senza richiedere conoscenza del linguaggio di programmazione. Il programma si avvale di spreadsheets realizzati in Excel, destinati all'ufficio tecnico del produttore, per l'inserimento dei dati di progetto.

Come richiesto, il listato del programma ha struttura modulare, permettendo una facile modifica per l'adattamento a macchine appartenenti a famiglie diverse; i primi risultati legati alla stima della temperatura lampada di XR3000 BEAM (testa mobile di dimensioni più elevate, montante una lampada da 1200 W e dotata di un sistema di raffreddamento a 3 ventole tangenziali), stanno fornendo approssimazioni accettabili (dell'ordine di ± 15 ° C).

Appendice I. Listato programma in linguaggio MatLab

Si allega il listato completo dei sottoprogrammi che compongono l'applicazione di calcolo di temperatura, sviluppati in linguaggio MatLab.

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi alle caratteristiche del gruppo lampada:

```
function [pnominale,pluminosa,potmin,df2,dlamp,dbulbo,carlamp] =  
leggicarlampada  
pnominale=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'A4:A4');  
pluminosa=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'B4:B4');  
potmin=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'A6:A6');  
df2=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'E4:E4');  
df2=df2/1000;  
dlamp=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'F4:F4');  
dlamp=dlamp/1000;  
dbulbo=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'G4:G4');  
dbulbo=dbulbo/1000;  
potemessa=xlsread('Costanti e calibrizioni', 1, 'J4:J43');  
carlamp=potemessa';
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi alla geometria del pacco filtri:

```
function  
[distfiltro1,distfiltro2,distfiltro3,distfiltro4,distshutter,distfiltroac,i  
nclinfiltroac,distcw,inclincw] = leggiposfiltri  
distfiltro1=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'A4:A4');  
distfiltro1=distfiltro1/1000;  
distfiltro2=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'B4:B4');  
distfiltro2=distfiltro2/1000;  
distfiltro3=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'C4:C4');  
distfiltro3=distfiltro3/1000;  
distfiltro4=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'D4:D4');  
distfiltro4=distfiltro4/1000;  
distshutter=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'E4:E4');  
distshutter=distshutter/1000;  
distfiltroac=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'G4:G4');  
distfiltroac=distfiltroac/1000;  
inclinfiltroac=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'H4:H4');  
inclinfiltroac=(inclinfiltroac/180)*pi;  
distcw=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'G7:G7');  
distcw=distcw/1000;  
inclincw=xlsread('Costanti e calibrizioni', 2, 'H7:H7');  
inclincw=(inclincw/180)*pi;
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi ai diagrammi spettrografici dei diversi filtri:

```
function
[CYAN, MAGENTA, YELLOW, CTO, HEATFILTER, DARKRED, BLUE, DARKBLUE, RED, DARKGREEN, LIGHTGREEN, PURPLE, AMBER, ORANGE] = leggifiltri
CYAN=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'C4:C43');
CYAN=CYAN';
MAGENTA=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'D4:D43');
MAGENTA=MAGENTA';
YELLOW=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'E4:E43');
YELLOW=YELLOW';
CTO=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'F4:F43');
CTO=CTO';
HEATFILTER=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'B4:B43');
HEATFILTER=HEATFILTER';
DARKRED=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'G4:G43');
DARKRED=DARKRED';
BLUE=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'H4:H43');
BLUE=BLUE';
DARKBLUE=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'I4:I43');
DARKBLUE=DARKBLUE';
RED=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'M4:M43');
RED=RED';
DARKGREEN=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'N4:N43');
DARKGREEN=DARKGREEN';
LIGHTGREEN=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'O4:O43');
LIGHTGREEN=LIGHTGREEN';
PURPLE=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'P4:P43');
PURPLE=PURPLE';
AMBER=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'Q4:Q43');
AMBER=AMBER';
ORANGE=xlsread('Costanti e calibrazioni', 4, 'R4:R43');
ORANGE=ORANGE';
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi caratteristiche della ventola impiegata e ne campiona per punti la curva P-Q, convertendo i valori rilevati in unità del SI:

```
function
[Daspir, Dvent, hmand, lmand, Vnominalevent, inominaevent, inclin, Qvent, dPvent] = leggicarventola
Daspir=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'A4:A4');
Daspir=Daspir/1000;
Dvent=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'B4:B4');
Dvent=Dvent/1000;
Vnominalevent=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'D4:D4');
inominalevent=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'E4:E4');
inclin=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'G4:G4');
inclin=(inclin/180)*pi;
hmand=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'A7:A7');
hmand=hmand/1000;
lmand=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'B7:B7');
lmand=lmand/1000;
Qvent=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'D9:D14');
Qvent=Qvent';
Qvent=Qvent/60;
dPvent=xlsread('Costanti e calibrazioni', 3, 'E9:E14');
dPvent=dPvent';
dPvent=dPvent*9.81;
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi alla geometria del condotto di aspirazione:

```
function [lasp] = leggicaraspir
lasp=xlsread('Costanti e calibrazioni', 5, 'B3:B3');
lasp=lasp/1000;
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i dati di progetto relativi alla geometria del convergente in mandata:

```
function [hfinconv,lfinconv,lconv] = leggicarconv
hfinconv=xlsread('Costanti e calibrazioni', 6, 'A3:A3');
hfinconv=hfinconv/1000;
lfinconv=xlsread('Costanti e calibrazioni', 6, 'B3:B3');
lfinconv=lfinconv/1000;
lconv=xlsread('Costanti e calibrazioni', 6, 'C3:C3');
lconv=lconv/1000;
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel i coefficienti della correlazione termofluidodinamica, determinati sperimentalmente:

```
function [a,b,c] = leggicoeffftermofl
a=xlsread('Costanti e calibrazioni', 8, 'A3:A3');
b=xlsread('Costanti e calibrazioni', 8, 'B3:B3');
c=xlsread('Costanti e calibrazioni', 8, 'C3:C3');
```

- Acquisisce da spreadsheet Excel le calibrazioni, selezionabili da menù ad accesso riservato sulla macchina:

```
function [minlamppcmy,minlampcw,minlamppdimmer,minlamptilt,fanssmlp] =
leggicalibrazioni
minlamppcmy=xlsread('Costanti e calibrazioni', 7, 'D3:D3');
minlampcw=xlsread('Costanti e calibrazioni', 7, 'C3:C3');
minlamppdimmer=xlsread('Costanti e calibrazioni', 7, 'A3:A3');
minlamptilt=xlsread('Costanti e calibrazioni', 7, 'B3:B3');
fanssmlp=xlsread('Costanti e calibrazioni', 7, 'E3:E3');
```

- Implementa la lettura dei dati all'interno della sezione di programma che regola il funzionamento dell'interfaccia grafica, eseguendo un controllo di errori sui dati raccolti:

```
function
[lasp,minlamppcmy,minlampcw,minlamppdimmer,minlamptilt,fanssmlp,hfinconv,l
finconv,lconv,Dasp,Dvent,hmand,lmand,inclinvent,Qvent,dPvent,potnom,potvisi
va,potmin,df2,dlamp,Dbulbo,carlamp,a,b,c,distfcyan,distfmagenta,distfyellow
```

```
, distfcto, distshutter, distfac, angfac, distcw, angcw, cyan, magenta, yellow, cto, fac, DARKRED, BLUE, DARKBLUE, RED, DARKGREEN, LIGHTGREEN, PURPLE, AMBER, ORANGE, error]=lettura
[laspl] = leggicaraspir;
[minlamppcmy, minlampcw, minlamppdimmer, minlampptilt, fanssmlp] = leggicalibrazioni;
[hfinconv, lfinconv, lconv] = leggicarconv;
[Dasp, Dvent, hmand, lmand, ~, ~, inclinvent, Qvent, dPvent] = leggicarventola;
[potnom, potvisiva, potmin, df2, dlamp, Dbulbo, carlamp] = leggicarlampada;
[a, b, c] = leggicoefftermofl;
[distfcyan, distfmagenta, distfyellow, distfcto, distshutter, distfac, angfac, distcw, angcw] = leggiposfiltri;
[cyan, magenta, yellow, cto, fac, DARKRED, BLUE, DARKBLUE, RED, DARKGREEN, LIGHTGREEN, PURPLE, AMBER, ORANGE] = leggifiltri;
if
(isempty(lasp) || isempty(minlamppcmy) || isempty(minlampcw) || isempty(minlamppdimmer) || isempty(minlampptilt) || isempty(fanssmlp) || isempty(hfinconv) || isempty(lfinconv) || isempty(lconv) || isempty(Dasp) || isempty(Dvent) || isempty(hmand) || isempty(lmand) || isempty(inclinvent) || isempty(Qvent) || isempty(dPvent) || isempty(potnom) || isempty(potvisiva) || isempty(potmin) || isempty(df2) || isempty(dlamp) || isempty(Dbulbo) || isempty(carlamp) || isempty(a) || isempty(b) || isempty(c) || isempty(distfcyan) || isempty(distfmagenta) || isempty(distfyellow) || isempty(distfcto) || isempty(distshutter) || isempty(distfac) || isempty(angfac) || isempty(distcw) || isempty(angcw) || isempty(cyan) || isempty(magenta) || isempty(yellow) || isempty(cto) || isempty(fac) || isempty(DARKRED) || isempty(BLUE) || isempty(DARKBLUE) || isempty(RED) || isempty(DARKGREEN) || isempty(LIGHTGREEN) || isempty(PURPLE) || isempty(AMBER) || isempty(ORANGE))
    error = 1;
    return
else error=0;
end;
```

- Determina la reale tensione di alimentazione della ventola (essendo questa automaticamente limitata in condizioni di lampada dimmerata):

```
function [coeffvent]=coeffventola(percinsdimmer, fanssmlp, Vventola)
if percinsdimmer==256
    coeffvent=(0.5+fanssmlp/100);
else coeffvent=(0.5+Vventola/24);
end;
```

- Usa una funzione di curve fitting per interpretare la curva P-Q come una polinomiale cubica:

```
function [polvent] = polPQ(Q, dP)
polvent=polyfit(Q, dP, 3);
```

- Determina i coefficienti di perdita di carico concentrato e distribuito; comprende anche un passaggio opzionale per la determinazione del coefficiente di perdita concentrata da bibliografia:

```
function
[ka, kb]=perditacarico(Dasp,Dvent,Dmand,Dfinconv,dens,visccin,lasp,lconv)
kcondasp=0.314*((4/(pi*visccin*Dasp))^(-0.25))*8*dens*lasp/((pi^2)*Dasp^5);
Dmconv=(Dmand+Dfinconv)/2;
kcondmand=0.314*((4/(pi*visccin*Dmconv))^(-
0.25))*8*dens*lconv/((pi^2)*Dmconv^5);
kimbocco=0.5*8*dens/((pi^2)*(Dmand^4));
kvarsez=0.45*dens/((pi^2)*(Dvent^4));
ksbocco=dens/((pi^2)*(Dfinconv^4));
kcurva=2.16*dens/((pi^2)*(Dfinconv^4));
kconv=0.05*dens/((pi^2)*(Dmconv^4));
ka=(kcondasp+kcondmand);
kb=(kimbocco+kvarsez+ksbocco+kcurva+kconv);
```

- Individua, incrociando la curva P-Q della ventola con la curva caratteristica P-Q dell'impianto, il punto di funzionamento del sistema e i corrispondenti valori di Q e della caduta di pressione ΔP :

```
function [Qfunz,dPfunz]=puntofunz(Qmax,polvent,k74,k2,tilt)
if (tilt>108)&&(tilt<148)
    k2=k2+3800000;
end;
a=0;
b=Qmax;
funz=10;
while (abs(funz)>0.0001)
    d=(b+a)/2;
    funz=((polvent(1))*d^3)+(((polvent(2))-
k2)*d^2)+(((polvent(3)))*d)+((polvent(4)))-(k74*(d^(7/4))));
    if (funz>0)
        a=d;
    else
        b=d;
    end;
end;
Qfunz=d;
dPfunz=(k2*(Qfunz^2)+k74*(Qfunz^(7/4)));
```

- Individua la reale potenza elettrica di alimentazione della lampada, applicando il livello di dimmerazione determinato dal livello di inserimento di shutter, filtri dicroici e ruota colore:

```
function [kterm]=coeffpotlamp
(potnom,potmin,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,minlampptilt,percinscy
an,percinsmagenta,percinsyellow,percinscto,percinsdimmer,tilt,cw)
filtro=0;
incr=(potnom-potmin)/100;
if percinscyan>filtro
    filtro=percinscyan;
end;
if percinsyellow>filtro
    filtro=percinsyellow;
end;
if percinsmagenta>filtro
```



```
        filtro=percinsmagenta;
end;
if percinscto>filtro
    filtro=percinscto;
end;
kterm=(potmin+incr*minlamppcmy+(256-filtro)*((potnom-potmin-
incr*minlamppcmy)/256))/potnom;
ktdimm=(potmin+incr*minlamppdimmer+(256-percinsdimmer)*((potnom-potmin-
incr*minlamppdimmer)/256))/potnom;
a=strcmp(cw, 'na');
if a==1
    ktcw=1;
else
    ktcw=(potmin+incr*minlamppcw)/potnom;
end;
if (tilt>108) &&(tilt<148)
    kttilt=(potmin+incr*minlampptilt)/potnom;
else
    kttilt=1;
end;
kterm=kterm;
if ktdimm<kterm
    kterm=ktdimm;
end;
if ktcw<kterm
    kterm=ktcw;
end;
if kttilt<kterm
    kterm=kttilt;
end;
```

- Individua, di conseguenza, l'entità della potenza termica e luminosa realmente emesse dalla lampada:

```
function [potvis,potterm]=potcontr(kterm,potvisiva,pottermica)
potvis=potvisiva*kterm;
potterm=pottermica*kterm;
```

- Determina il diagramma spettrografico, relativo al filtro inserito tramite la ruota colore (ad inserimento on/off, al contrario dei filtri dicroici lineari):

```
function
[valcw]=colourwheel(cw,CYAN,MAGENTA,YELLOW,DARKRED,BLUE,DARKBLUE,RED,DARKGR
EEN,LIGHTGREEN,PURPLE,AMBER,ORANGE)
switch (cw)
    case 'cyan'
        valcw=CYAN;
    case 'magenta'
        valcw=MAGENTA;
    case 'yellow'
        valcw=YELLOW;
    case 'dark red'
        valcw=DARKRED;
    case 'blue'
        valcw=BLUE;
```

```
    valcw=BLUE;
case 'dark blue '
    valcw=DARKBLUE;
case 'red '
    valcw=RED;
case 'dark green '
    valcw=DARKGREEN;
case 'light green'
    valcw=LIGHTGREEN;
case 'purple '
    valcw=PURPLE;
case 'amber '
    valcw=AMBER;
case 'orange '
    valcw=ORANGE;
case 'na '
    valcw=ORANGE;
end;

valcw=[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,
1,1,1,1,1,1];
end;
```

- Determina la componente di potenza luminosa riflessa a seguito del livello di inserimento delle palette shutter:

```
function [potout,potrifl]=shutter(percins, potout)
potout2=potout*(1-(percins/256));
potrifl=potout-potout2;
potout=potout2;
```

- Determina la componente di potenza luminosa riflessa a seguito del livello di inserimento di un filtro colore:

```
function [potout,potrifl]=filtro(percins, potout, carfiltro)
potout2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0];
for i=1:40
potout2(i)=potout(i)*(1-((1-carfiltro(i))*(percins/256)));
end;
potrifl=potout-potout2;
potout=potout2;
```

- Determina la quota di potenza luminosa riflessa che ricade sul corpo lampada (nel caso di filtri normali all'asse ottico):

```
function [V] = sfera(df2, dlamp, distfiltro)
V=1+(1-cos(atan(df2*2/dlamp)))/2-(1-dlamp/(2*(df2+2*distfiltro)))/2;
```

- Determina la quota di potenza luminosa riflessa che ricade sul corpo lampada (nel caso di filtri normali all'asse ottico); in questo caso, su richiesta di DTS, si è adottata una relazione semplificata, dettata da osservazioni empiriche:

```
function [V] = sferafac(df2, dlamp, distfiltro, angfac)
V=1+(1-cos((atan(df2*2/dlamp))-angfac))/2-(1-
dlamp/(2*(df2+2*distfiltro)))/2;
```

- Calcola l'entità complessiva della potenza termica prodotto a livello del corpo lampada:

```
function [qdisp]=caldisp(potnom, potmin, minlamppcmy, minlamppcw, minlamppdimmer,
minlampptilt, percinsdimmer, tilt, cw, valcw, angcw, distcw, potvisiva, df2, dlamp,
carlamp, distshutter, cyan, distfcyan, percinscyan, magenta, distfmagenta, percins
magenta, yellow, distfyellow, percinsyellow, cto, distfcto, percinscto, fac, distfa
c, angfac)
pottermica=potnom-potvisiva;
kterm=coeffpotlamp
(potnom, potmin, minlamppcmy, minlamppcw, minlamppdimmer, minlampptilt, percinscy
an, percinsmagenta, percinsyellow, percinscto, percinsdimmer, tilt, cw);
[potvis, potterm]=potcontr(kterm, potvisiva, pottermica);
[potrifl]=potriflessa(df2, dlamp, carlamp, potvis, distshutter, percinsdimmer, cy
an, distfcyan, percinscyan, magenta, distfmagenta, percinsmagenta, yellow, distfy
ellow, percinsyellow, cto, distfcto, percinscto, fac, distfac, angfac, valcw, distcw,
angcw);
qdisp=potrifl+potterm;
```

- Determina la potenza luminosa totale riflessa all'interno del corpo lampada dall'intero pacco filtri:

```
function
[potrifl]=potrelout(df2, dlamp, carlamp, potvis, cyan, distfcyan, percinscyan, mag
enta, distfmagenta, percinsmagenta, yellow, distfyellow, percinsyellow, cto, distf
cto, percinscto, fac, distfac, angfac)
sferafac=0;
sfera=0;
[potout, potrifl1]=filtro(1, carlamp, fac);
sferafac=sferafac(df2, dlamp, distfac, angfac);
potrifl2=potrifl1.*sferafac;
[potout, potrifl1]=filtro(percinscyan, potout, cyan);
sfera=sfera(df2, dlamp, distfcyan);
potrifl2=potrifl2+(potrifl1.*sfera);
[potout, potrifl1]=filtro(percinsmagenta, potout, magenta);
sfera=sfera(df2, dlamp, distfmagenta);
potrifl2=potrifl2+(potrifl1.*sfera);
[potout, potrifl1]=filtro(percinsyellow, potout, yellow);
sfera=sfera(df2, dlamp, distfyellow);
potrifl2=potrifl2+(potrifl1.*sfera);
[~, potrifl1]=filtro(percinscto, potout, cto);
sfera=sfera(df2, dlamp, distfcto);
potrifl2=potrifl2+(potrifl1.*sfera);
potrifl=0;
potlum=0;
for i=1:40
```

```
potrifl=potrifl+potrifl2(i);
potlum=potlum+carlamp(i);
end;
potrifl=(potrifl/potlum)*potvis;
```

- Valuta la potenza totale prodotta sul gruppo lampada:

```
function[qdisp]=caldisp(potnom,potmin,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,
,minlampptilt,percinsdimmer,tilt,cw, valcw, angcw, distcw, potvisiva, df2, dlamp,
carlamp, distshutter, cyan, distfcyan, percinscyan, magenta, distfmagenta, percins
magenta, yellow, distfyellow, percinsyellow, cto, distfcto, percinscto, fac, distfa
c, angfac)
pottermica=potnom-potvisiva;
kterm=coeffpotlamp
(potnom,potmin,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,minlampptilt,percinscy
an,percinsmagenta,percinsyellow,percinscto,percinsdimmer,tilt,cw);
[potvis,potterm]=potcontr(kterm,potvisiva,pottermica);
[potrifl]=potriflessa(df2,dlamp,carlamp,potvis,distshutter,percinsdimmer,cy
an,distfcyan,percinscyan,magenta,distfmagenta,percinsmagenta,yellow,distfye
llow,percinsyellow,cto,distfcto,percinscto,fac,distfac,angfac, valcw, distcw,
angcw);
qdisp=potrifl+potterm;
```

- Interpolare le grandezze fluidodinamiche di interesse sulla base di dati forniti da bibliografia:

```
function [calspec, viscdin, condterm, visccin, dens]=grandfluidodin(Taria)
temp=[-150,-100,-
50,0,20,40,60,80,100,120,140,160,180,200,250,300,350,400,450,500,550];
csp=[1.026,1.009,1.005,1.005,1.005,1.005,1.009,1.009,1.009,1.013,1.013,1.01
7,1.022,1.026,1.034,1.047,1.055,1.068,1.075,1.086,1.097];
d=[2.793,1.980,1.534,1.293,1.205,1.127,1.067,1.000,0.946,0.898,0.854,0.815,
0.779,0.746,0.675,0.616,0.566,0.524,0.4875,0.4565,0.4234];
kterm=[0.0116,0.0160,0.0204,0.0243,0.0257,0.0271,0.0285,0.0299,0.0314,0.032
8,0.0343,0.0358,0.0372,0.0386,0.0421,0.0454,0.0585,0.0515,0.0541,0.0576,0.0
606];
viscc=[3.08,5.95,9.55,13.30,15.11,16.97,18.90,20.94,23.06,25.23,27.55,29.85
,32.29,34.63,41.17,47.85,55.05,62.53,67.25,73.91,83.29];
calspec=interp1(temp,csp,Taria);
dens=interp1(temp,d,Taria);
condterm=interp1(temp,kterm,Taria);
visccin2=interp1(temp,viscc,Taria);
visccin=visccin2*(10^(-6));
viscdin=visccin*dens;
calspec=calspec*1000;
```

- Valuta il valore di Re nelle condizioni di interesse:

```
function [Re]=reynolds(varia,Dbulbo,visccin)
Re=varia*Dbulbo/visccin;
```

- Valuta il valore di Pr nelle condizioni di interesse:

```
function [Num]=nusselt (Re,Pr,C,n,m)
Num=C*(Re^n)*(Pr^m);
```

- Valuta il valore di Nu della convezione forzata nelle condizioni di interesse:

```
function [Num]=nusselt (Re,Pr,C,n,m)
Num=C*(Re^n)*(Pr^m);
```

- Valuta il valore del coefficiente h di convezione forzata nelle condizioni di interesse:

```
function
[Vout,Tout]=coeffscterm(coeffvent,Qvent,dPvent,inclinvent,Taria,Dasp,Dvent,
hmand,lmand,hfinconv,lfinconv,dens,visccin,lasp,lconv,tilt)
Dmand=2*(hmand*lmand)/(hmand+lmand);
Dfinconv=2*(hfinconv*lfinconv)/(hfinconv+lfinconv);
polvent=polPQ(Qvent,dPvent);
polvent(4)=polvent(4)*coeffvent;
[ka,kb]=perditacarico(Dasp,Dvent,Dmand,Dfinconv,dens,visccin,lasp,lconv);
Qmax=Qvent(6);
[Qfunz,dPfunz]=puntofunz(Qmax,polvent,ka,kb,tilt);
Vvent=Qfunz/(hmand*lmand);
Vout=((hmand*lmand)/(hfinconv*lfinconv)*Vvent*((101000+(dPfunz))/101000)^(
1.4))*cos(inclinvent);
Tout=((Taria+273.16)*((101000+(dPfunz))/101000)^(2.4))-273.16;
```

- Stima la potenza termica dispersa per convezione naturale sul bulbo lampada:

```
function
[Pcnbulbo]=Pcnbulbo(Dbulbo,hbulbo,Tbulbo,Tout,tilt,calspec,viscdin,condterm)
Pr=calspec*viscdin/condterm;
Ra=Pr*9.81*(Dbulbo^3)/(viscdin^3);
Nu1=0.6+(0.387*Ra^(1/6))/(1+(0.559/Pr^(9/16)))^(8/27);
Nu2=0.54*Ra^(1/4);
if tilt>=128
    Nu=(Nu1*(256-tilt)+Nu2*(tilt-128))/128;
else Nu=(Nu1*(128-tilt)+Nu2*(tilt))/128;
end;
hcn=condterm*Nu/Dbulbo;
Pcnbulbo=hcn*pi*Dbulbo*hbulbo*(Tbulbo-Tout);
```

- Determina il valore della coordinata x dell'ellisse in funzione della distanza dal fondo lampada:

```
function [x]=ellisse(df1,df2,hrifl,y)
b=(hrifl-df2)+(df1+df2)/2;
c=(df1+df2)/2;
a=sqrt(b^2-c^2);
f1=hrifl-df2;
f2=hrifl+df1;
```

```
A=16*a^2;
C=16*a^2-4*(f1-f2)^2;
E=4*(f1-f2)*(f1^2-f2^2)-16*a^2*(f1+f2);
F=f1^2*f2^2-(f1^2+f2^2-4*a^2)^2;
x=sqrt((-C*y^2-E*y-F)/A);
```

- Stima la potenza termica dispersa a livello della superficie del riflettore:

```
function [Prifl]=Prifl(df1,df2,hrifl,Dlamp,spess,dist,Tbulbo,Tout)
lims=(hrifl/0.0001);
y=0;
Tliv=Tbulbo;
for i=1:lims
    Tbulk=(Tliv+Tout)/2;
    x=ellisse(df1,df2,hrifl,y);
    [calspec, viscdin,condterm,visccin,dens]=grandfluidodin(Tbulk);
    Pr=calspec*viscdin/condterm;
    Ra=Pr*9.81*(Dlamp^3)/(viscdin^3);
    Nu=2+((0.589*Ra^(1/4))/(1+(0.492/Pr)^(9/16)))^(4/9);
    hcn=condterm*Nu/(pi*x);
    m=sqrt(2*hcn/(spess*condterm));
    Tliv=((Tbulbo-Text)*e^(-m*hrifl)/(e^(-m*hrifl)-
e^(m*hrifl)))*e^(m*y)+((Text-Tbulbo)*e^(m*hrifl)/(e^(-m*hrifl)-
e^(m*hrifl)))*e^(-m*y)+Text;
    Pcbulbo=Pcbulbo+(hcn*0.0001*(Tliv-Tout)+(Tliv^4-
Text^4)*(5/2*(x/dist)^2))*pi*(2*x);
    y=y+0.001;
end;
```

- Valuta il valore della temperatura del bulbo:

```
function
[temp,error]=temperatura(lasp,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,minlampp
tilt,fanssmlp,hfinconv,lfinconv,lconv,Dasp,Dvent, hmand,
lmand,inclinvent,Qvent,dPvent,potnom,potvisiva,potmin,df2,
dlamp,Dbulbo,carlamp,a,b,c,distfcyan,distfmagenta,distfyellow,distfcto,dist
shutter,distfac,angfac,distcw,angcw,cyan,magenta,yellow,cto,fac,DARKRED,BLU
E,DARKBLUE,RED,DARKGREEN,LIGHTGREEN,PURPLE,AMBER,ORANGE,Taria,percinsdimmer
,percinscyan,percinsmagenta,percinsyellow,percinscto,tilt,Vventola,cw)
[valcw]=colourwheel(cw,cyan,magenta,yellow,DARKRED,BLUE,DARKBLUE,RED,DARKGR
EEN,LIGHTGREEN,PURPLE,AMBER,ORANGE);
[coeffvent]=coeffventola(percinsdimmer,fanssmlp,Vventola);
[~,~,~,visccin,dens]=grandfluidodin(Taria);
[Vout,Tout]=coeffscterm(coeffvent,Qvent,dPvent,inclinvent,Taria,Dasp,Dvent,
hmand,lmand,hfinconv,lfinconv,dens,visccin,lasp,lconv,tilt);
[qdisp]=caldisp(potnom,potmin,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,minlampp
tilt,percinsdimmer,tilt,cw,valcw,angcw,distcw,potvisiva,df2,dlamp,carlamp,d
istshutter,cyan,distfcyan,percinscyan,magenta,distfmagenta,percinsmagenta,y
ellow,distfyellow,percinsyellow,cto,distfcto,percinscto,fac,distfac,angfac)
;
Tbulbo=100;
Ta=50;
Ascambio=hfinconv/(cos(inclinvent))*Dbulbo*pi;
while (abs(Tbulbo-Ta))>1
    Ta=Tbulbo;
```

```
Tbulk=(Tout+Ta)/2;
if (Tbulk>550||Tbulk<-150)
    error=2;
    break;
else
error=1;
[calspec,viscdin,condterm,visccin,~]=grandfluidodin(Tbulk);
Pr=Prandtl(calspec,viscdin,condterm);
Re=reynolds(Vout,Dbulbo,visccin);
Nu=c*((Re^(a))*(Pr^(b)));
hm=Nu*condterm/Dbulbo;
Prifl=Prifl(Tbulbo,Tout);
Pcnbulbo=
Tbulbo=(qdisp/((hm*Ascambio)+Pcnbulbo+Prifl))+Tout;
end;
end;
temp=Tbulbo;
```

- Regola il funzionamento dell'interfaccia grafica:

```
function varargout = LampTemperature(varargin)
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @LampTemperature_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @LampTemperature_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before LampTemperature is made visible.
function LampTemperature_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
global contload contsave Taria percinsdimmer percinscyan percinsmagenta
percinsyellow percinscto tilt Vventola cw;
Taria=20;
percinsdimmer=0;
percinscyan=0;
percinsmagenta=0;
percinsyellow=0;
percinscto=0;
tilt=0;
Vventola=0;
cw='na';
contload=0;
contsave=0;
```

```

fid = fopen('Valori di Temperatura Rilevati.doc','a');
fprintf(fid, 'Valori di Temperatura Rilevata');
fclose(fid);
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = LampTemperature_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function slidercyan_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinscyan;
percinscyan=get(hObject, 'Value');
set(handles.editcyan, 'String', num2str(percinscyan));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slidercyan_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function editcyan_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinscyan;
percinscyan=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(percinscyan)|| (percinscyan<0)|| (percinscyan>256)
    set(handles.slidercyan, 'Value', 0);
    set(hObject, 'String', '0');
    percinscyan=0;
else
    set(handles.slidercyan, 'Value', percinscyan);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editcyan_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slidermagenta_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsmagenta;
percinsmagenta=get(hObject, 'Value');
set(handles.editmagenta, 'String', num2str(percinsmagenta));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slidermagenta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

```



```
function editmagenta_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsmagenta;
percinsmagenta=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(percinsmagenta)|| (percinsmagenta<0)|| (percinsmagenta>256))
    set(handles.slidermagenta,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    percinsmagenta=0;
else
    set(handles.slidermagenta,'Value',percinsmagenta);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editmagenta_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slideryellow_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsyellow;
percinsyellow=get(hObject,'Value');
set(handles.edityellow,'String',num2str(percinsyellow));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slideryellow_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function edityellow_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsyellow;
percinsyellow=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(percinsyellow)|| (percinsyellow<0)|| (percinsyellow>256))
    set(handles.slideryellow,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    percinsyellow=0;
else
    set(handles.slideryellow,'Value',percinsyellow);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edityellow_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

% --- Executes on slider movement.
function slidercto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinscto;
percinscto=get(hObject,'Value');
set(handles.editcto,'String',num2str(percinscto));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slidercto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function editcto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinscto;
percinscto=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(percinscto)) || (percinscto<0) || (percinscto>256)
    set(handles.slidercto,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    percinscto=0;
else
    set(handles.slidercto,'Value',percinscto);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editcto_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function sliderdimmer_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsddimmer;
percinsddimmer=get(hObject,'Value');
set(handles.editdimmer,'String',num2str(percinsddimmer));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sliderdimmer_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function editdimmer_Callback(hObject, eventdata, handles)
global percinsddimmer;

```

```
percinsdimmer=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(percinsdimmer)|| (percinsdimmer<0)|| (percinsdimmer>256)
    set(handles.sliderdimmer,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    dimmer=0;
else
    set(handles.sliderdimmer,'Value',percinsdimmer);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editdimmer_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slidertilt_Callback(hObject, eventdata, handles)
global tilt;
tilt=get(hObject,'Value');
set(handles.edittilt,'String',num2str(tilt));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slidertilt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function edittilt_Callback(hObject, eventdata, handles)
global tilt;
tilt=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(tilt)|| (tilt<0)|| (tilt>256)
    set(handles.slidertilt,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    tilt=0;
else
    set(handles.sliderdimmer,'Value',tilt);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edittilt_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function sliderfan_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

global Vventola;
Vventola=get(hObject,'Value');
set(handles.editfans,'String',num2str(Vventola));
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sliderfan_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function editfans_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Vventola;
Vventola=str2num(get(hObject,'String'));
if (isempty(Vventola)|| (Vventola<0)|| (Vventola>12))
    set(handles.sliderfans,'Value',0);
    set(hObject,'String','0');
    Vventola=0;
else
    set(handles.sliderfans,'Value',Vventola);
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editfans_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenucw.
function popupmenucw_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cw;
switch (get(hObject,'value'))
    case 1
        cw='na      ';
    case 2
        cw='cyan    ';
    case 3
        cw='magenta  ';
    case 4
        cw='yellow   ';
    case 5
        cw='dark red  ';
    case 6
        cw='red      ';
    case 7
        cw='dark green';
    case 8
        cw='light green';
    case 9
        cw='purple   ';

```

```

    case 10
        cw='amber      ';
    case 11
        cw='orange     ';
    case 12
        cw='blue       ';
    case 13
        cw='dark blue  ';
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenucw_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function editairexttemp_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Taria;
Taria=str2num(get(handles.editairexttemp,'String'));
if (isempty(Taria)) || (Taria<-50) || (Taria>250)
    set(handles.editairexttemp,'String',0);
    Taria=0;
end;
guidata(hObject,handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editairexttemp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbuttoncalcolo.
function pushbuttoncalcolo_Callback(hObject, eventdata, handles)
global lasp minlamppcmy minlamppcw minlamppdimmer minlampptilt fanssmlp
hfinconv lfinconv lconv Dasp Dvent hmand lmand inclinvent Qvent dPvent
potnom potvisiva potmin df2 dlamp Dbulbo carlamp a b c distfcyan
distfmagenta distfyellow distfcto distshutter distfac angfac distcw angcw
cyan magenta yellow cto fac DARKRED BLUE DARKBLUE RED DARKGREEN LIGHTGREEN
PURPLE AMBER ORANGE Taria percinsdimmer percinscyan percinsmagenta
percinsyellow percinscto tilt Vventola cw temp;
[temp,error]=temperatura(lasp,minlamppcmy,minlamppcw,minlamppdimmer,minlampp
tilt,fanssmlp,hfinconv,lfinconv,lconv,Dasp,Dvent, hmand,
lmand,inclinvent,Qvent,dPvent,potnom,potvisiva,potmin,df2,
dlamp,Dbulbo,carlamp,a,b,c,distfcyan,distfmagenta,distfyellow,distfcto,dist
shutter,distfac,angfac,angcw,cyan,magenta,yellow,cto,fac,DARKRED,BLU
E,DARKBLUE,RED,DARKGREEN,LIGHTGREEN,PURPLE,AMBER,ORANGE,Taria,percinsdimmer
,percinscyan,percinsmagenta,percinsyellow,percinscto,tilt,Vventola,cw);
if (error==2)
    set(handles.texttemperatura,'String','Temperature out of bonds');
else
    set(handles.texttemperatura,'String',num2str(temp));
    set(handles.pushbuttonSave,'enable','on');
end;
guidata(hObject,handles);

```

```

% --- Executes on button press in pushbuttonloaddata.
function pushbuttonloaddata_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.textloadingdata, 'String', 'Loading...');
set(handles.texttemperatura, 'String', 'Waiting');
set(handles.pushbuttonSave, 'Enable', 'off');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'off');
set(hObject, 'Enable', 'off');
set(handles.slidercyan, 'Enable', 'off');
set(handles.editcyan, 'Enable', 'off');
set(handles.slideryellow, 'Enable', 'off');
set(handles.edityellow, 'Enable', 'off');
set(handles.slidermagenta, 'Enable', 'off');
set(handles.editmagenta, 'Enable', 'off');
set(handles.slidercto, 'Enable', 'off');
set(handles.editcto, 'Enable', 'off');
set(handles.sliderdimmer, 'Enable', 'off');
set(handles.editdimmer, 'Enable', 'off');
set(handles.slidertilt, 'Enable', 'off');
set(handles.edittilt, 'Enable', 'off');
set(handles.sliderfan, 'Enable', 'off');
set(handles.editfans, 'Enable', 'off');
set(handles.popupmenucw, 'Enable', 'off');
set(handles.editairexttemp, 'Enable', 'off');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'off');
drawnow;
guidata(hObject, handles);
global lasp minlamppcmy minlamppcw minlamppdimmer minlampptilt fanssmlp
hfinconv lfinconv lconv Dasp Dvent hmand lmand inclinvent Qvent dPvent
potnom potvisiva potmin df2 dlamp Dbulbo carlamp a b c distfcyan
distfmagenta distfyellow distfcto distshutter distfac angfac distcw angcw
cyan magenta yellow cto fac DARKRED BLUE DARKBLUE RED DARKGREEN LIGHTGREEN
PURPLE AMBER ORANGE;
[lasp, minlamppcmy, minlamppcw, minlamppdimmer, minlampptilt, fanssmlp, hfinconv, l
finconv, lconv, Dasp, Dvent, hmand, lmand, inclinvent, Qvent, dPvent, potnom, potvisi
va, potmin, df2, dlamp, Dbulbo, carlamp, a, b, c, distfcyan, distfmagenta, distfyellow
, distfcto, distshutter, distfac, angfac, distcw, angcw, cyan, magenta, yellow, cto, f
ac, DARKRED, BLUE, DARKBLUE, RED, DARKGREEN, LIGHTGREEN, PURPLE, AMBER, ORANGE, error
]=lettura;
if (error==1)
    set(handles.textloadingdata, 'String', 'Data Missing');
else
set(handles.textloadingdata, 'String', 'Data Loaded');
set(handles.texttemperatura, 'String', 'Ready');
set(hObject, 'Enable', 'on');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'on');
set(handles.slidercyan, 'Enable', 'on');
set(handles.editcyan, 'Enable', 'on');
set(handles.slideryellow, 'Enable', 'on');
set(handles.edityellow, 'Enable', 'on');
set(handles.slidermagenta, 'Enable', 'on');
set(handles.editmagenta, 'Enable', 'on');
set(handles.slidercto, 'Enable', 'on');
set(handles.editcto, 'Enable', 'on');
set(handles.sliderdimmer, 'Enable', 'on');
set(handles.editdimmer, 'Enable', 'on');
set(handles.slidertilt, 'Enable', 'on');
set(handles.edittilt, 'Enable', 'on');
set(handles.sliderfan, 'Enable', 'on');

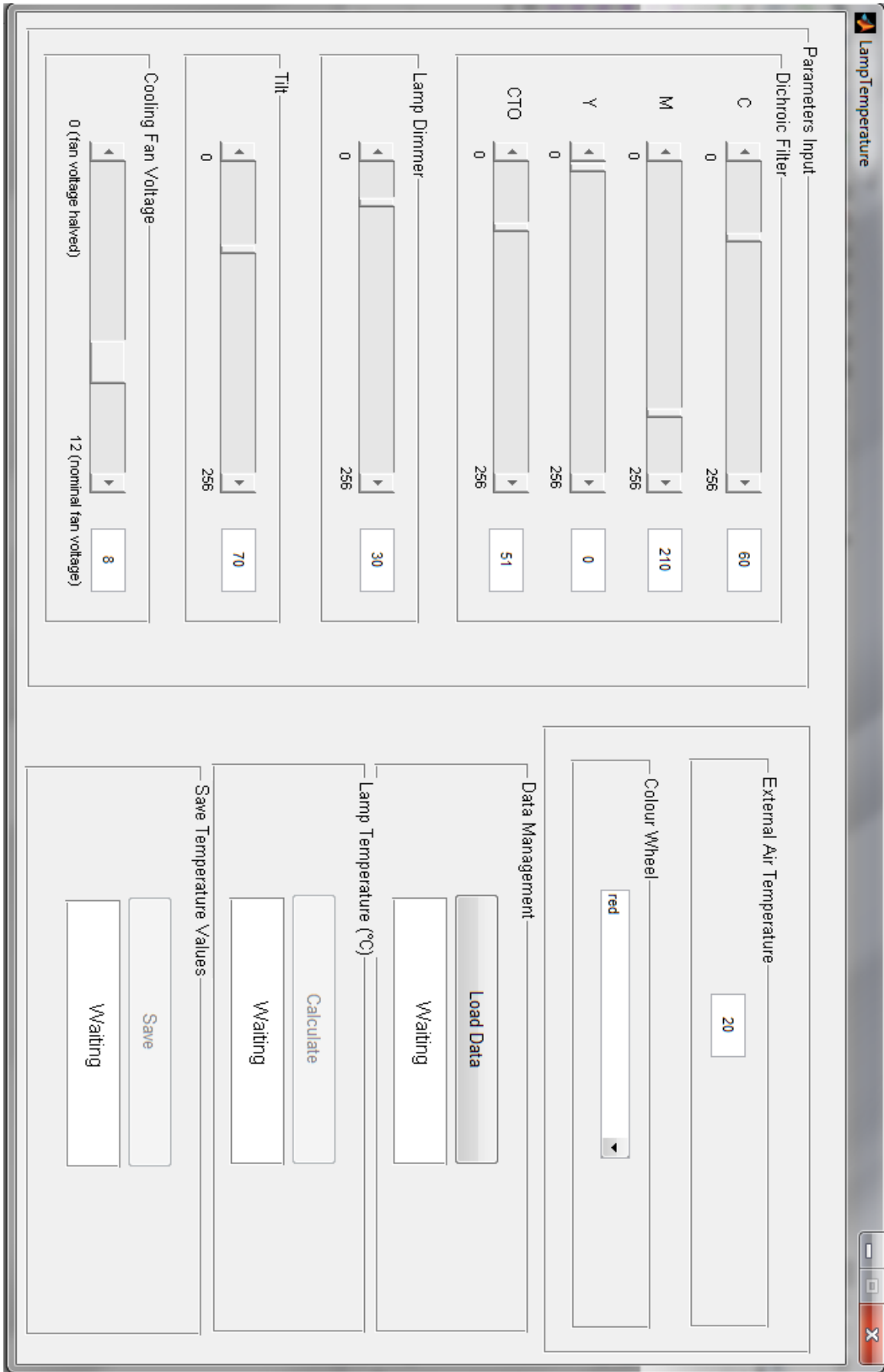
```

```
set(handles.editfans, 'Enable', 'on');
set(handles.popupmenucw, 'Enable', 'on');
set(handles.editairexttemp, 'Enable', 'on');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'on');
global contload;
formatoload='impostazioni n° %3d\n';
contload=contload+1;
fid = fopen('Valori di Temperatura Rilevati.doc', 'a');
fprintf(fid, formatoload, contload);
fclose(fid);
end;
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in pushbuttonSave.
function pushbuttonSave_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.textsave, 'String', 'Saving...');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'off');
set(handles.pushbuttonloaddata, 'Enable', 'off');
set(hObject, 'Enable', 'off');
set(handles.slidercyan, 'Enable', 'off');
set(handles.editcyan, 'Enable', 'off');
set(handles.slideryellow, 'Enable', 'off');
set(handles.edityellow, 'Enable', 'off');
set(handles.slidermagenta, 'Enable', 'off');
set(handles.editmagenta, 'Enable', 'off');
set(handles.slidercto, 'Enable', 'off');
set(handles.editcto, 'Enable', 'off');
set(handles.sliderdimmer, 'Enable', 'off');
set(handles.editdimmer, 'Enable', 'off');
set(handles.slidertilt, 'Enable', 'off');
set(handles.edittilt, 'Enable', 'off');
set(handles.sliderfan, 'Enable', 'off');
set(handles.editfans, 'Enable', 'off');
set(handles.popupmenucw, 'Enable', 'off');
set(handles.editairexttemp, 'Enable', 'off');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'off');
drawnow;
guidata(hObject, handles);
global Taria percinsdimmer percinscyan percinsmagenta percinsyellow
percinscto tilt Vventola cw contsave temp;
formatosave='%3.0d C %3.0d M %3.0d Y %3.0d CTO %3.0d DIMMER %3.0d
TILT %3.0d FanS %3.0d T°ext %4.1d CW %11s TLamp %4.1d\n';
contsave=contsave+1;
fid = fopen('Valori di Temperatura Rilevati.doc', 'a');
fprintf(fid, formatsave,
contsave, percinscyan, percinsmagenta, percinsyellow, percinscto, percinsdimmer,
tilt, Vventola, Taria, cw, temp);
fclose(fid);
set(handles.textsave, 'String', 'Data Saved');
set(handles.pushbuttonloaddata, 'Enable', 'on');
set(handles.pushbuttoncalcolo, 'Enable', 'on');
set(handles.slidercyan, 'Enable', 'on');
set(handles.editcyan, 'Enable', 'on');
set(handles.slideryellow, 'Enable', 'on');
set(handles.edityellow, 'Enable', 'on');
set(handles.slidermagenta, 'Enable', 'on');
set(handles.editmagenta, 'Enable', 'on');
set(handles.slidercto, 'Enable', 'on');
set(handles.editcto, 'Enable', 'on');
```

```
set(handles.sliderdimmer,'Enable','on');
set(handles.editdimmer,'Enable','on');
set(handles.slidertilt,'Enable','on');
set(handles.edittilt,'Enable','on');
set(handles.sliderfan,'Enable','on');
set(handles.editfans,'Enable','on');
set(handles.popupmenucw,'Enable','on');
set(handles.editairexttemp,'Enable','on');
set(handles.pushbuttoncalcolo,'Enable','on');
guidata(hObject,handles);
```


Appendice II. Interfaccia grafica in linguaggio MatLab



Appendice III. Spreadsheets Excel

Posizione filtri						
Distanza filtro-battuta (mm)						
CYAN	MAGENTA	YELLOW	CTO	SHUTTER	Distanza media battuta-filtro abbatti calore (mm)	Inclinazione filtro abbatti calore
25	27	23	21	10	5	7
					Distanza battuta-ruota colore (mm)	Inclinazione ruota colore (°)
					32,5	20

Caratteristiche ventola		Caratteristiche elettriche		Posizionamento	
Caratteristiche geometriche		Tensione nominale (V)		Inclinazione tg sull'orizzontale (°)	
Daspirazione (mm)	Dventola (mm)	24	0,11	10	
51	31				
hmandata (mm)		Caratteristiche idrauliche		Condotto di aspirazione	
18	12	portata (m3/min)	Pressione (mmH2O)	D (mm)	L (mm)
		0	22	51	150
		0,03	20	Convergente	
		0,06	18	lunghezza (mm)	
		0,09	12	18	
		0,12	3		
		0,13	0		

Calibrazioni				
MIN LAMP POWER (DIMMER) (/100)	MIN LAMP POWER (TILT) (/100)	MIN CW POWER (/100)	MIN CMY POWER (/100)	FANS SPEED (MIN LAMP POWER) (/12)
0	100	60	95	12

Coefficienti della corrispondenza termofluidodinamica di calcolo del numero di Nusselt		
a (esp Re)	b (esp Pr)	k (coeff. moltiplicativo)
1,1178	0,3932	0,12

Caratteristiche lampada								Caratteristiche ottiche	
Caratteristiche elettriche		Caratteristiche geometriche						λ (nm)	P rel emessa
P nom (W)	330	Distanza fz-battuta (mm)	30	Distanza f1-battuta (mm)	29	D interno lampada(mm)	51	410	0,06
P min (W)	280	Distanza fondello-battuta (mm)	36	Spessore medio riflettore (mm)	4,5	Distanza copril.-a. ottico (mm)	31	420	0,19
								430	0,24
								440	0,15
								450	0,36
								460	0,94
								470	0,44
								480	0,56
								490	0,66
								500	0,74
								510	0,83
								520	0,67
								530	0,55
								540	0,44
								550	0,37
								560	0,75
								570	0,9
								580	0,33

λ (nm)	Cambia colore lineari dicroici											RUOTA COLORE					
	Heat Filter	CYAN	MAGENTA	YELLOW	CTO	DARK RED	BLUE	DARK BLUE	CYAN	MAGENTA	YELLOW	RED	DARK GREEN	LIGHT GREEN	PURPLE	AMBER	ORANGE
410	0,94	0,92	0,94	0	0,12	0	0,66	0,17	0,92	0,94	0	0,35	0,63	0,6	0,43	0,95	0,75
420	0,96	0,96	0,94	0	0,22	0	0,34	0,46	0,96	0,94	0	0,55	0,39	0,15	0,39	0,33	0,47
430	0,94	0,92	0,93	0	0,35	0	0,73	0,89	0,92	0,93	0	0,61	0,33	0,78	0,16	0,55	0,59
440	0,95	0,93	0,84	0	0,36	0	0,38	0,21	0,93	0,84	0	0,95	0,96	0,68	0,04	0,16	0,26
450	0,95	0,94	0,36	0	0,32	0	0,42	0,54	0,94	0,36	0	0,5	0,34	0,44	0,5	0,4	0,36
460	0,96	0,93	0,02	0,01	0,27	0	0,1	0,18	0,93	0,02	0,01	0,15	0,35	0,56	0,03	0,82	0,03
470	0,95	0,93	0,01	0,01	0,26	0	0	0,46	0,93	0,01	0,01	0,43	0,21	0,24	0,25	0,3	0,51
480	0,96	0,94	0	0,02	0,27	0	0,01	0,41	0,94	0	0,02	0,73	0,77	0,31	0,7	0,51	0,19
490	0,96	0,94	0	0,04	0,29	0	0,59	0,79	0,94	0	0,04	0,12	0,29	0,58	0,35	0,27	0,48
500	0,95	0,92	0	0,15	0,32	0	0,97	0,5	0,92	0	0,15	0,41	0,22	0,67	0,48	0,47	0,04
510	0,96	0,92	0	0,38	0,37	0	0,91	0,44	0,92	0	0,38	0	0,17	0,98	0,29	0,63	0,95
520	0,95	0,94	0	0,83	0,43	0	0,86	0,18	0,94	0	0,83	0,5	0,23	0,49	0,47	0,68	0,24
530	0,96	0,75	0	0,95	0,5	0	0,94	0,4	0,75	0	0,95	0,87	0,74	0,94	0,27	0,42	0,45
540	0,97	0,28	0	0,94	0,56	0	0,84	0,65	0,28	0	0,94	0,29	0,71	0,94	0,88	0,58	0,25
550	0,96	0,1	0	0,95	0,62	0	0,34	0,78	0,1	0	0,95	0,04	0,09	0,86	0,08	0,46	0,74
560	0,96	0,04	0,01	0,96	0,69	0	0,44	0,29	0,04	0,01	0,96	0,71	0,61	0	0,74	0,55	0,44
570	0,96	0,02	0,02	0,95	0,74	0	0,14	0,25	0,02	0,02	0,95	0,95	0,16	0,46	0,83	0,53	0,43
580	0,96	0,1	0,02	0,94	0,8	0,01	0,21	0,95	0,1	0,02	0,94	0,37	0,04	0,53	0,09	0,18	0,71
590	0,96	0	0,02	0,94	0,86	0,01	0,17	0,73	0	0,02	0,94	0,82	0	0,93	0,03	0,05	0,03

600	0,96	0	0,04	0,94	0,89	0,02	0,37	0,82	0	0,04	0,94	0,29	0,52	0,44	0,21	0,44	0,7
610	0,96	0	0,09	0,95	0,92	0,1	0,03	0,25	0	0,09	0,95	0,09	0,62	0,8	0,22	0,12	0,17
620	0,96	0	0,29	0,95	0,94	0,35	0,84	0,98	0	0,29	0,95	0,3	0,07	0,8	0,13	0,58	0,22
630	0,96	0	0,72	0,95	0,96	0,84	0,4	0,74	0	0,72	0,95	0,65	0,15	0,93	0,25	0,95	0,82
640	0,96	0	0,96	0,94	0,96	0,96	0,4	0,39	0	0,96	0,94	0,76	0,3	0,62	0,64	0,21	0,09
650	0,96	0	0,93	0,94	0,96	0,94	0,71	0,01	0	0,93	0,94	0,84	0,74	0,3	0,03	0,14	0,4
660	0,96	0	0,94	0,94	0,96	0,96	0,12	0,76	0	0,94	0,94	0,74	0,93	0,35	0,11	0,18	0,31
670	0,96	0	0,95	0,94	0,96	0,96	0,91	0,89	0	0,95	0,94	0,59	0,51	0,61	0,39	0,07	0,27
680	0,96	0	0,95	0,94	0,96	0,94	0,23	0,59	0	0,95	0,94	0,93	0,89	0,15	0,05	0,06	0,65
690	0,96	0,01	0,94	0,94	0,96	0,95	0,73	0,82	0,01	0,94	0,94	0,12	0,75	0,22	0,6	0,89	0,53
700	0,64	0,01	0,96	0,94	0,96	0,96	0,77	0,72	0,01	0,96	0,94	0,71	0,46	0,49	0,54	0,79	0,75
710	0,26	0,02	0,96	0,94	0,95	0,96	0,18	0,99	0,02	0,96	0,94	0,58	0,53	0,16	0,55	0,7	0,64
720	0,1	0,04	0,96	0,94	0,94	0,95	0,51	0,39	0,04	0,96	0,94	0,1	0,03	0,71	0,32	0,48	0,26
730	0,05	0,06	0,96	0,94	0,94	0,96	0,8	0,97	0,06	0,96	0,94	0,09	0,37	0,02	0,8	0,95	0,84
740	0,03	0,15	0,96	0,93	0,93	0,97	0,8	0,51	0,15	0,96	0,93	0,66	0,77	0,63	0,8	0,59	0,39
750	0,02	0,4	0,95	0,92	0,92	0,96	0,14	0,02	0,4	0,95	0,92	0,63	0,15	0,42	0,96	0,88	0,68
760	0,02	0,9	0,94	0,92	0,91	0,95	0,23	0,18	0,9	0,94	0,92	0,02	0,92	0,99	0,22	0,2	0,36
770	0,01	0,74	0,93	0,92	0,9	0,95	0,63	0,7	0,74	0,93	0,92	0,94	0,97	0,18	0,61	0,05	0,91
780	0,01	0,5	0,92	0,92	0,88	0,96	0,72	0,7	0,5	0,92	0,92	0,45	0,42	0,56	0,47	0,66	0,45
790	0	0,38	0,92	0,92	0,86	0,94	0,8	0,65	0,38	0,92	0,92	0,93	0,19	0,72	0,62	0,6	0,65
800	0	0,34	0,9	0,92	0,83	0,94	0,24	0,39	0,34	0,9	0,92	0,32	0,74	0,98	0,12	0,08	0,14

Appendice IV. Valori di temperatura rilevati

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C						T stimata e%	
	POS ORIZZONTALE 0°						TIP							MEDIA
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	235	240	228	234	242	243	237	240	241	243	236	240	249	4,4
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	344	367	355	355	366	365	363	364	365	367	355	362	359	0,3
CW (DR)	274	288	276	279	286	286	283	285	287	288	276	283	281	0,4
CTO	270	284	274	276	285	285	283	284	286	284	274	281	289	2,9
M 100%	303	301	294	299	303	305	304	304	301	301	294	298	303	0,8
C 100%	284	301	284	289	304	307	303	304	302	301	284	295	305	2,9
Y 100%	271	283	271	275	282	285	283	283	283	283	271	279	283	1,4
Y+CTO	283	296	282	287	293	297	290	293	294	296	282	290	300	3,3
C+CTO	313	335	317	321	336	337	334	335	335	335	317	329	338	2,8
M+CTO	307	326	312	315	329	330	326	328	330	326	312	322	332	3,1
C+M	323	339	330	330	341	342	338	340	336	339	330	335	338	0,8
C+Y	316	337	326	326	334	334	332	333	329	337	326	330	340	3
M+Y	308	321	312	313	319	320	315	318	317	321	312	316	322	1,9
C+Y+CTO	325	341	328	331	344	347	342	344	338	341	328	335	346	2,6
C+M+CTO	329	349	339	339	348	349	349	348	343	349	339	343	353	2,7
M+Y+CTO	310	330	318	319	329	329	325	327	328	330	318	325	335	3,3

Appendice IV. Valori di temperatura rilevati

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V					TEMPERATURA ESTERNA 20°C					T stimata e%			
	POS VERTICALE					TIP								
	CENTER			TIP		REAR								
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	245	252	242	246	254	257	249	253	252	256	248	252	252	0,6
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	349	366	349	354	363	364	359	362	358	367	355	360	365	1,7
CW (DR)	283	291	276	283	292	297	287	292	290	288	276	284	284	4,8
CTO	279	284	272	278	282	281	279	280	282	284	274	280	276	1,2
M 100%	297	303	289	296	300	301	296	299	298	301	294	297	299	0,5
C 100%	292	301	289	294	300	304	295	299	301	301	284	295	298	0,6
Y 100%	277	285	272	278	282	282	283	282	278	283	271	277	281	0,7
Y+CTO	291	300	288	293	297	301	293	297	298	296	282	292	296	0,6
C+CTO	326	331	320	325	331	336	331	332	332	335	317	328	340	3,4
M+CTO	317	326	314	319	323	323	324	323	321	326	312	319	318	0,7
C+M	336	341	328	335	343	345	339	342	339	339	330	336	339	0,3
C+Y	332	341	329	334	342	347	339	342	336	337	326	333	351	4,1
M+Y	318	324	312	318	325	326	325	325	323	321	312	318	331	3,2
C+Y+CTO	337	344	328	336	347	348	347	347	342	341	328	337	343	0,8
C+M+CTO	342	350	337	343	351	350	352	351	349	349	339	345	349	0,7
M+Y+CTO	322	328	317	322	327	328	322	325	328	330	318	325	334	2,9

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C						T stimata e%	
	POS ORIZZONTALE 180°													
	CENTER			TIP			REAR							
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	237	242	229	236	239	241	240	240	234	239	230	234	238	0,5
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	345	367	355	355	370	370	366	368	363	367	355	361	370	2,3
CW (DR)	271	288	276	278	290	289	285	288	286	288	276	283	286	1
CTO	269	284	274	275	283	288	283	284	283	284	274	280	291	3,8
M 100%	300	301	294	298	298	298	299	298	292	301	294	295	300	1
C 100%	283	301	284	289	304	306	304	304	304	301	284	296	301	1,5
Y 100%	273	283	271	275	286	289	287	287	284	283	271	279	294	4,6
Y+CTO	284	296	282	287	294	296	293	294	290	296	282	289	290	0
C+CTO	317	335	317	323	334	339	335	336	327	335	317	326	336	2,2
M+CTO	302	326	312	313	324	326	325	325	318	326	312	318	330	3,4
C+M	321	339	330	330	339	343	339	340	337	339	330	335	342	2
C+Y	317	337	326	326	335	336	336	335	335	337	326	332	338	2
M+Y	307	321	312	313	321	325	320	322	314	321	312	315	320	1
C+Y+CTO	328	341	328	332	342	346	339	342	343	341	328	337	345	2,3
C+M+CTO	326	349	339	338	352	352	350	351	353	349	339	347	353	2,1
M+Y+CTO	314	330	318	320	329	331	326	328	322	330	318	323	326	0,7

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V						TEMPERATURA ESTERNA 25°C							
	POS VERTICALE													
	CENTER			TIP			REAR							
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata	e%
W - NO DIMMER	253	257	246	252	256	257	258	257	254	259	252	255	258	1,2
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	363	367	354	361	365	367	363	365	360	367	355	360	368	1,6
CW (DR)	291	297	283	290	298	302	293	297	296	288	276	286	304	4,2
CTO	288	297	279	288	296	299	292	295	297	284	274	285	294	1,5
M 100%	321	324	317	320	322	325	319	322	323	301	294	306	328	3,6
C 100%	303	309	294	302	306	308	305	306	299	301	284	294	305	1,4
Y 100%	286	293	281	286	290	291	286	289	290	283	271	281	294	2,9
Y+CTO	301	305	293	299	308	310	306	308	306	296	282	294	304	1,2
C+CTO	333	336	328	332	337	340	332	336	330	335	317	327	341	2,7
M+CTO	325	332	317	324	332	334	330	332	327	326	312	321	329	1
C+M	346	351	343	346	350	353	347	350	349	339	330	339	352	1,9
C+Y	339	342	336	339	345	346	344	345	344	337	326	335	343	0,9
M+Y	328	331	319	326	330	330	327	329	328	321	312	320	335	2,9
C+Y+CTO	345	351	341	345	349	354	345	349	345	341	328	338	352	2,2
C+M+CTO	349	353	345	349	356	357	353	355	354	349	339	347	361	2,9
M+Y+CTO	330	338	321	329	335	340	333	336	330	330	318	326	335	1,3

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V										TEMPERATURA ESTERNA 25°C																			
	POS ORIZZONTALE 0°										TIP										REAR									
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata	e%								
W - NO DIMMER	245	253	240	246	256	256	255	255	256	256	255	255	257	256	256	255	257	256	252	255	256	1,5								
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	355	367	355	359	365	366	366	365	364	364	366	365	358	367	367	360	355	367	355	360	363	0,4								
CW (DR)	281	288	276	281	288	293	287	289	293	287	289	289	284	288	288	282	284	288	276	282	299	5								
CTO	277	284	274	278	287	287	285	286	287	287	285	286	286	284	284	281	298	284	274	281	284	0,8								
M 100%	311	301	294	302	301	301	300	300	301	301	300	300	298	301	301	297	302	301	294	297	300	0,1								
C 100%	293	301	284	292	303	304	303	303	304	304	303	303	302	301	301	284	302	301	284	295	306	3								
Y 100%	277	283	271	277	285	290	284	286	290	284	284	286	286	283	283	271	286	283	271	280	284	1								
Y+CTO	290	296	282	289	297	301	296	298	301	296	296	298	296	296	296	282	296	296	282	291	300	2,4								
C+CTO	322	335	317	324	335	336	330	333	336	330	333	333	335	335	335	317	329	335	329	341	3,6									
M+CTO	316	326	312	318	325	328	324	325	328	324	324	325	319	326	312	319	326	312	319	324	1									
C+M	332	339	330	333	340	339	337	338	340	339	337	338	339	339	330	336	339	330	336	340	1,2									
C+Y	327	337	326	330	336	340	336	337	336	340	336	337	337	337	326	333	337	326	333	340	1,9									
M+Y	317	321	312	316	323	322	324	323	322	322	324	323	318	321	312	317	318	312	317	316	0,8									
C+Y+CTO	335	341	328	334	343	347	339	343	343	347	339	343	343	341	328	337	343	328	337	351	3,7									
C+M+CTO	337	349	339	341	351	354	351	352	351	354	351	352	345	349	339	344	345	339	344	352	1,7									
M+Y+CTO	319	330	318	322	330	329	329	329	329	329	329	329	323	330	318	323	323	318	323	333	2,5									

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 20 V				TEMPERATURA ESTERNA 25°C				T stimata e%					
	POS ORIZZONTALE 180°													
	CENTER				TIP					REAR				
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	248	255	245	249	256	261	257	258	255	260	253	256	266	4,3
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	356	367	355	359	367	368	368	367	363	367	367	361	372	2,5
CW (DR)	282	288	276	282	288	290	285	287	283	288	276	282	291	2,5
CTO	276	284	274	278	281	285	276	280	275	284	274	277	288	3,3
M 100%	311	301	294	302	301	303	298	300	296	301	294	297	300	0,1
C 100%	294	301	284	293	304	308	304	305	304	301	284	296	313	4,7
Y 100%	279	283	271	277	285	284	284	284	281	283	271	278	278	0,5
Y+CTO	292	296	282	290	295	299	291	295	294	296	282	290	293	0,4
C+CTO	323	335	317	325	337	337	333	335	331	335	317	327	341	3,5
M+CTO	318	326	312	318	328	331	324	327	322	326	312	320	327	1,6
C+M	335	339	330	334	336	335	337	336	334	339	330	334	340	1,5
C+Y	330	337	326	331	337	342	334	337	336	337	326	333	346	3,5
M+Y	319	321	312	317	324	323	319	322	321	321	312	318	329	3
C+Y+CTO	334	341	328	334	338	343	337	339	331	341	328	333	349	3,9
C+M+CTO	339	349	339	342	352	354	352	352	346	349	339	344	353	1,9
M+Y+CTO	322	330	318	323	330	332	325	329	326	330	318	324	331	1,7

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 16 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C						T stimata e%	
	POS VERTICALE			TIP			REAR			REAR				
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	289	294	280	287	292	291	290	291	291	296	289	292	291	0,3
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	351	358	342	350	358	358	357	357	351	367	355	357	354	0,1
CW (DR)	336	343	332	337	344	346	340	343	339	288	276	301	345	5,2
CTO 100%	332	336	323	330	339	342	338	339	335	284	274	297	340	5,2
M 100%	376	384	372	377	386	385	383	384	379	301	294	324	386	6,3
C 100%	354	357	348	353	357	357	355	356	350	301	284	311	360	5,5
Y 100%	332	339	323	331	336	335	335	335	330	283	271	294	332	3,6
Y+CTO	350	355	346	350	356	359	351	355	354	296	282	310	362	6,5
C+CTO	394	400	389	394	400	405	399	401	401	335	317	351	407	6,1
M+CTO	381	386	373	380	388	389	388	388	387	326	312	341	392	5,6
C+M	408	411	402	407	408	408	406	407	404	339	330	357	413	5,4
C+Y	383	388	378	383	390	393	390	391	389	337	326	350	399	6
M+Y	386	392	378	385	393	393	391	392	393	321	312	342	389	4,1
C+Y+CTO	409	417	406	410	418	420	414	417	412	341	328	360	424	6,6
C+M+CTO	413	421	410	414	423	426	423	424	421	349	339	369	429	6,2
M+Y+CTO	387	394	379	386	392	392	392	392	386	330	318	344	390	4,1

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 16 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C							
	POS ORIZZONTALE 0°													
	CENTER			TIP			REAR			T stimata e%				
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata e%	
W - NO DIMMER	279	298	285	287	300	300	298	299	296	298	291	295	295	0,4
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	345	357	342	348	355	357	354	355	356	367	355	359	353	0,2
CW (DR)	326	343	327	332	341	345	338	341	341	288	276	301	349	6,9
CTO	322	337	327	328	339	338	337	338	337	284	274	298	337	4,6
M 100%	362	365	357	361	362	362	358	360	360	301	294	318	365	5,1
C 100%	341	350	334	341	352	352	353	352	347	301	284	310	355	5,8
Y 100%	321	324	316	320	327	329	324	326	322	283	271	292	323	3,1
Y+CTO	335	344	332	337	347	348	345	346	341	296	282	306	352	6,3
C+CTO	379	384	370	377	387	392	386	388	388	335	317	346	394	6
M+CTO	368	375	365	369	374	373	371	372	368	326	312	335	372	3,5
C+M	394	400	390	394	398	398	396	397	391	339	330	353	400	4,6
C+Y	383	392	375	383	395	399	394	396	390	337	326	351	398	5,3
M+Y	370	375	366	370	374	374	369	372	375	321	312	336	368	2,3
C+Y+CTO	390	395	383	389	395	398	392	395	393	341	328	354	396	4,2
C+M+CTO	399	403	391	397	406	405	405	405	402	349	339	363	408	4,8
M+Y+CTO	389	398	383	390	395	398	395	396	393	330	318	347	397	4,8

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 16 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C						T stimata e%	
	POS ORIZZONTALE 180°						REAR							
	CENTER		TIP		REAR		TIP		REAR		REAR			
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata	e%
W - NO DIMMER	281	293	286	286	292	292	291	291	289	289	286	288	295	2,2
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	343	367	355	355	367	372	364	367	362	367	355	361	378	4,4
CW (DR)	328	288	276	297	287	287	287	287	287	288	276	283	284	1,7
CTO	320	284	274	292	284	289	279	284	280	284	274	279	287	0,6
M 100%	363	301	294	319	301	305	300	302	302	301	294	299	310	1
C 100%	344	301	284	309	303	305	299	302	298	301	284	294	299	0,8
Y 100%	319	283	271	291	282	282	282	282	278	283	271	277	286	0,9
Y+CTO	336	296	282	304	294	294	292	293	293	296	282	290	298	0,7
C+CTO	381	335	317	344	335	337	332	334	334	335	317	328	336	0,1
M+CTO	365	326	312	334	325	324	322	323	322	326	312	320	319	2
C+M	394	339	330	354	339	339	335	337	334	339	330	334	341	0,1
C+Y	385	337	326	349	337	337	336	336	337	337	326	333	333	1,9
M+Y	369	321	312	334	318	318	313	316	318	321	312	317	314	2,6
C+Y+CTO	390	341	328	353	341	342	341	341	337	341	328	335	339	1,1
C+M+CTO	401	349	339	363	351	351	347	349	350	349	339	346	353	0
M+Y+CTO	392	330	318	346	327	329	323	326	325	330	318	324	333	0,3

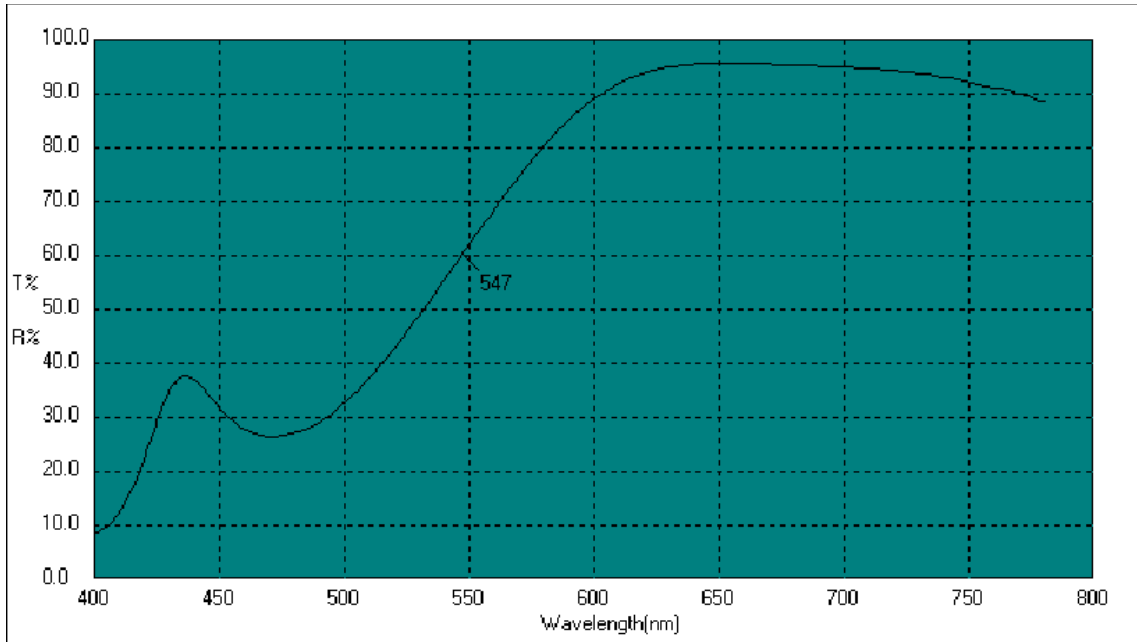
Appendice IV. Valori di temperatura rilevati

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 24 V					TEMPERATURA ESTERNA 20°C								
	POS VERTICALE					TIP								
	CENTER	REAR			T stimata e%	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata e%
W - NO DIMMER	214	217	205	212	220	224	217	220	219	222	217	219	220	1,3
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	357	362	349	356	363	363	358	361	358	367	355	360	367	2,1
CW (DR)	247	251	238	245	253	252	251	252	247	288	276	270	249	2,6
CTO	243	249	239	243	252	257	252	253	252	284	274	270	251	1,7
M 100%	273	279	267	273	279	281	280	280	275	301	294	290	287	2
C 100%	258	263	252	257	260	263	257	260	255	301	284	280	269	1,2
Y 100%	241	248	238	242	246	251	247	248	245	283	271	266	256	1,5
Y+CTO	256	261	251	256	259	259	255	257	252	296	282	276	265	0,7
C+CTO	284	288	279	283	286	285	286	285	279	335	317	310	290	0,9
M+CTO	276	282	269	275	283	286	279	282	279	326	312	305	286	0,4
C+M	290	296	281	289	293	294	294	293	292	339	330	320	290	3,6
C+Y	287	292	278	285	291	295	291	292	284	337	326	315	296	0,4
M+Y	279	283	273	278	281	281	282	281	279	321	312	304	282	2
C+Y+CTO	293	298	285	292	296	301	292	296	289	341	328	319	302	0,1
C+M+CTO	295	301	291	295	299	300	298	299	300	349	339	329	306	0,5
M+Y+CTO	277	283	268	276	283	282	284	283	280	330	318	309	278	4

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 24 V						TEMPERATURA ESTERNA 20°C							
	POS ORIZZONTALE 0°			TIP			REAR			T stimata e%				
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	T stimata	e%
W - NO DIMMER	210	217	205	210	217	218	214	216	217	216	215	216	216	0,9
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	347	367	355	356	370	369	371	370	365	367	355	362	369	1,7
CW (DR)	240	288	276	268	290	289	291	290	289	288	276	284	284	1,1
CTO	236	284	274	264	283	288	280	283	284	284	274	280	282	2,2
M 100%	264	301	294	286	302	303	303	302	301	301	294	298	302	2,2
C 100%	250	301	284	278	303	308	298	303	298	301	284	294	304	4
Y 100%	235	283	271	263	281	280	280	280	282	283	271	278	276	0,8
Y+CTO	248	296	282	275	297	298	293	296	293	296	282	290	296	3
C+CTO	275	335	317	309	336	339	336	337	335	335	317	329	336	3,2
M+CTO	268	326	312	302	326	329	326	327	319	326	312	319	330	4,2
C+M	282	339	330	317	340	341	335	338	335	339	330	334	342	3,6
C+Y	277	337	326	313	334	337	332	334	334	337	326	332	343	4,8
M+Y	270	321	312	301	322	322	317	320	315	321	312	316	316	1,1
C+Y+CTO	283	341	328	317	341	340	338	339	335	341	328	334	340	2,9
C+M+CTO	284	349	339	324	348	351	343	347	342	349	339	343	350	3,4
M+Y+CTO	272	330	318	306	333	337	332	334	334	330	318	327	333	3,2

	TENSIONE ALIMENTAZIONE VENTOLE - 24 V POS ORIZZONTALE 180°					TEMPERATURA ESTERNA 20°C					T stimata e%			
	CENTER			TIP		REAR								
	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA	LAMP 1	LAMP 2	LAMP 3	MEDIA		
W - NO DIMMER	210	217	203	210	214	219	214	215	215	216	210	213	221	3,7
W - SHUTTER CLOSED - LAMP DIMMED	345	367	355	355	366	370	363	366	364	367	355	362	376	3,9
CW (DR)	239	288	276	267	290	295	290	291	284	288	276	282	291	3,7
CTO	236	284	274	264	285	289	282	285	280	284	274	279	286	3,4
M 100%	263	301	294	286	304	308	302	304	301	301	294	298	309	4,2
C 100%	250	301	284	278	301	300	301	300	302	301	284	295	303	3,9
Y 100%	233	283	271	262	285	284	285	284	279	283	271	277	280	2
Y+CTO	249	296	282	275	298	303	295	298	299	296	282	292	302	4,5
C+CTO	276	335	317	309	337	337	333	335	331	335	317	327	339	4,5
M+CTO	266	326	312	301	326	327	324	325	320	326	312	319	331	4,8
C+M	280	339	330	316	337	337	335	336	338	339	330	335	333	1,2
C+Y	278	337	326	313	335	336	333	334	330	337	326	331	339	3,8
M+Y	270	321	312	301	319	323	319	320	318	321	312	317	321	2,5
C+Y+CTO	281	341	328	316	339	344	336	339	340	341	328	336	338	2,2
C+M+CTO	285	349	339	324	351	356	352	353	352	349	339	346	352	3,1
M+Y+CTO	274	330	318	307	329	330	324	327	328	330	318	325	324	1,3

Appendice V. Diagrammi spettrografici di potenza relativa

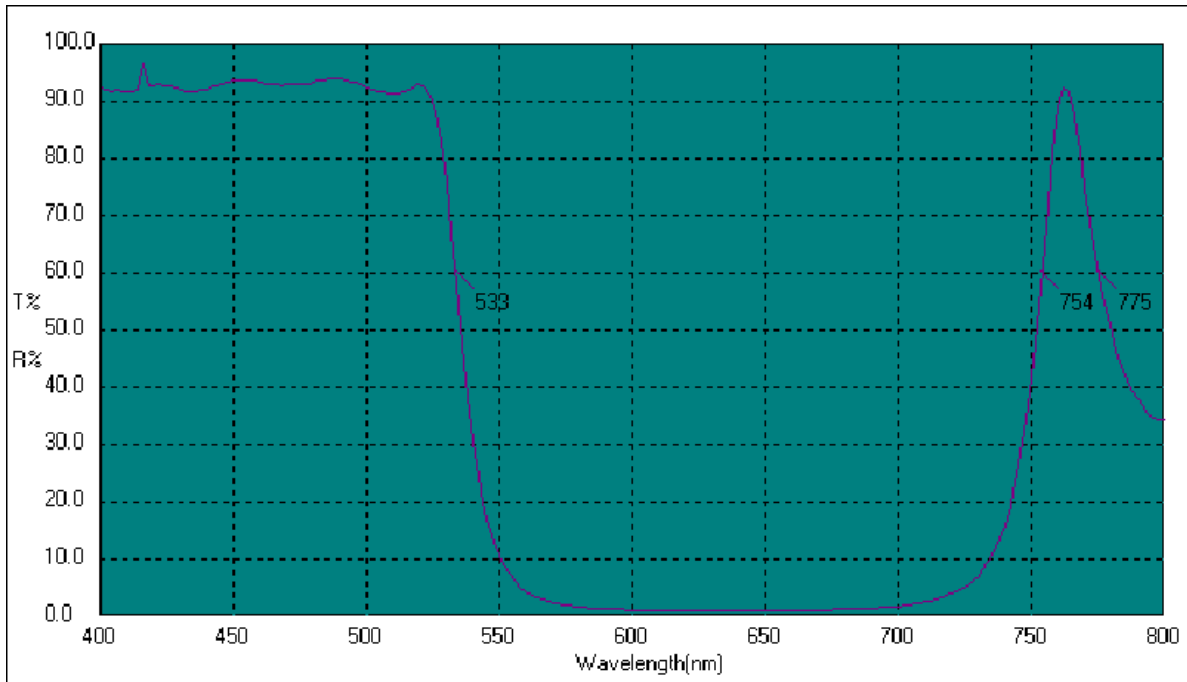


CTO

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0,12	0,22	0,35	0,36	0,32	0,27	0,26	0,27	0,29	0,32	0,37	0,43	0,5	0,56

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0,62	0,69	0,74	0,8	0,86	0,89	0,92	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,88	0,86	0,83

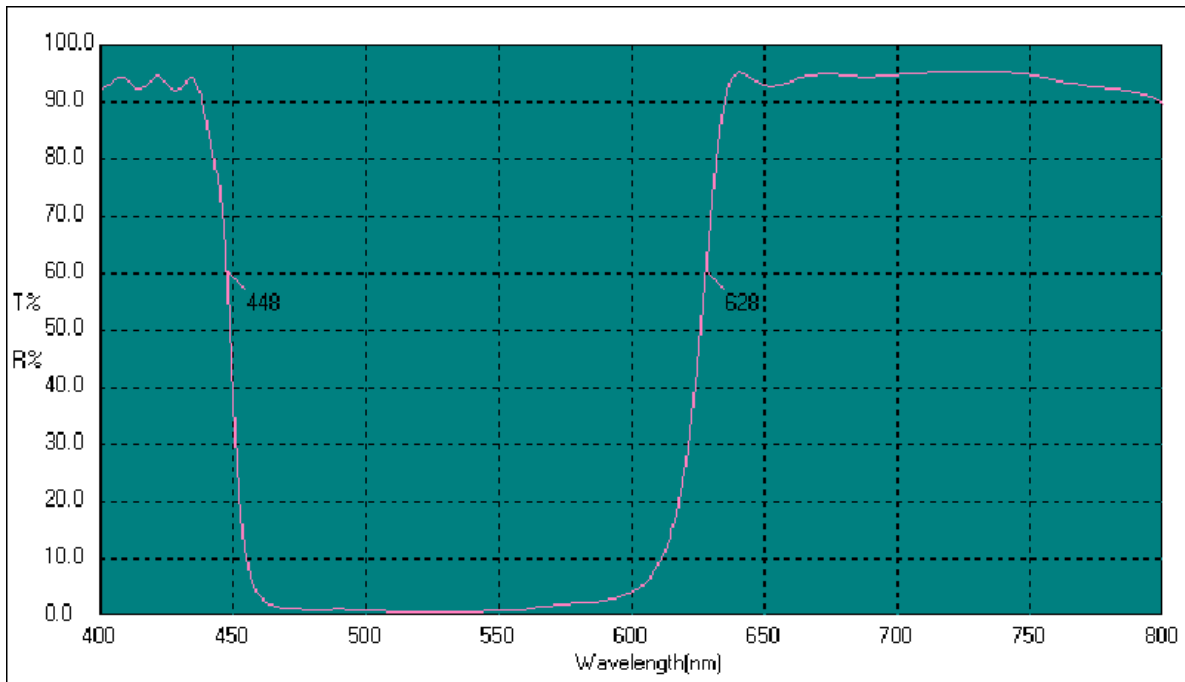


CYAN

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0,94	0,94	0,93	0,84	0,36	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,09	0,29	0,72	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,9

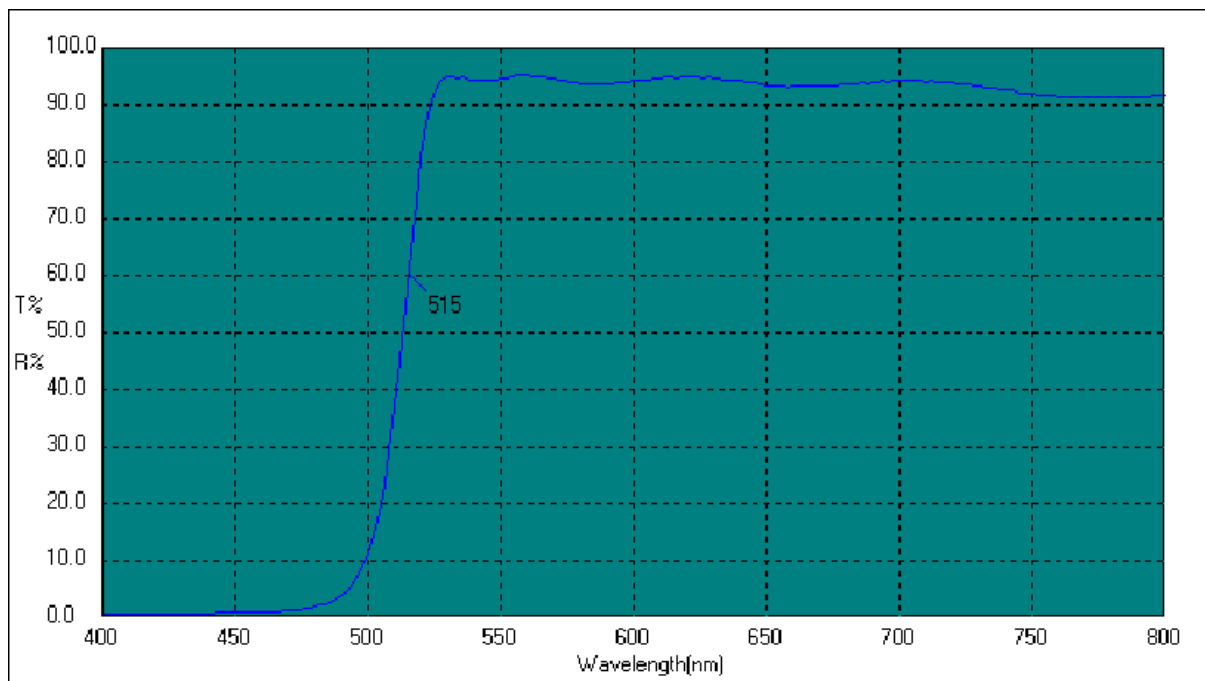


MAGENTA

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0,94	0,94	0,93	0,84	0,36	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,09	0,29	0,72	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,9

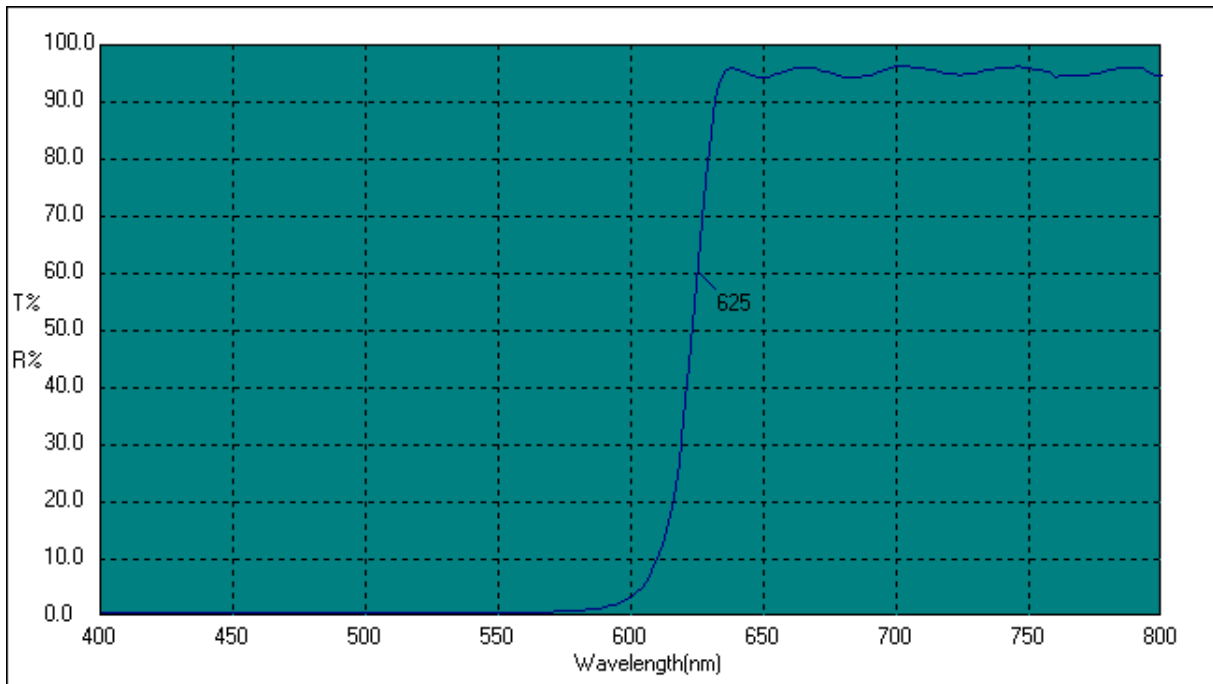


YELLOW

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,04	0,15	0,38	0,83	0,95	0,94

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0,95	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

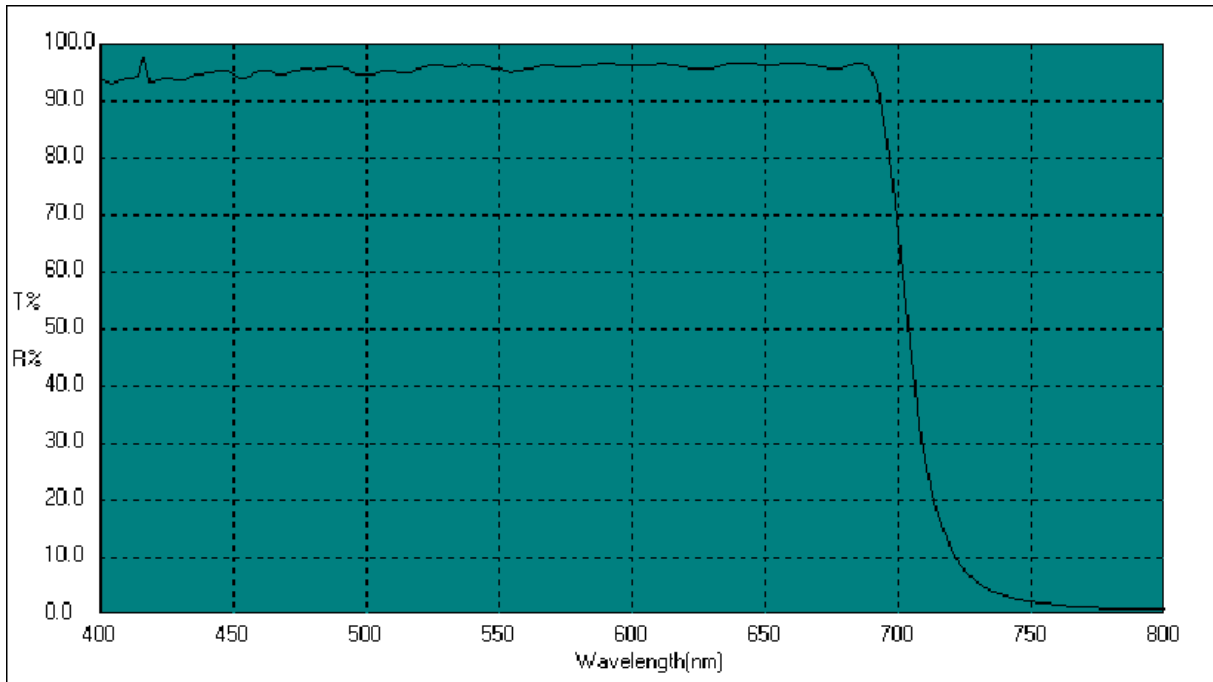


DARK RED

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,1	0,35	0,84	0,96	0,94	0,96	0,96	0,94	0,95

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,96	0,96	0,95	0,96	0,97	0,96	0,95	0,95	0,96	0,94	0,94

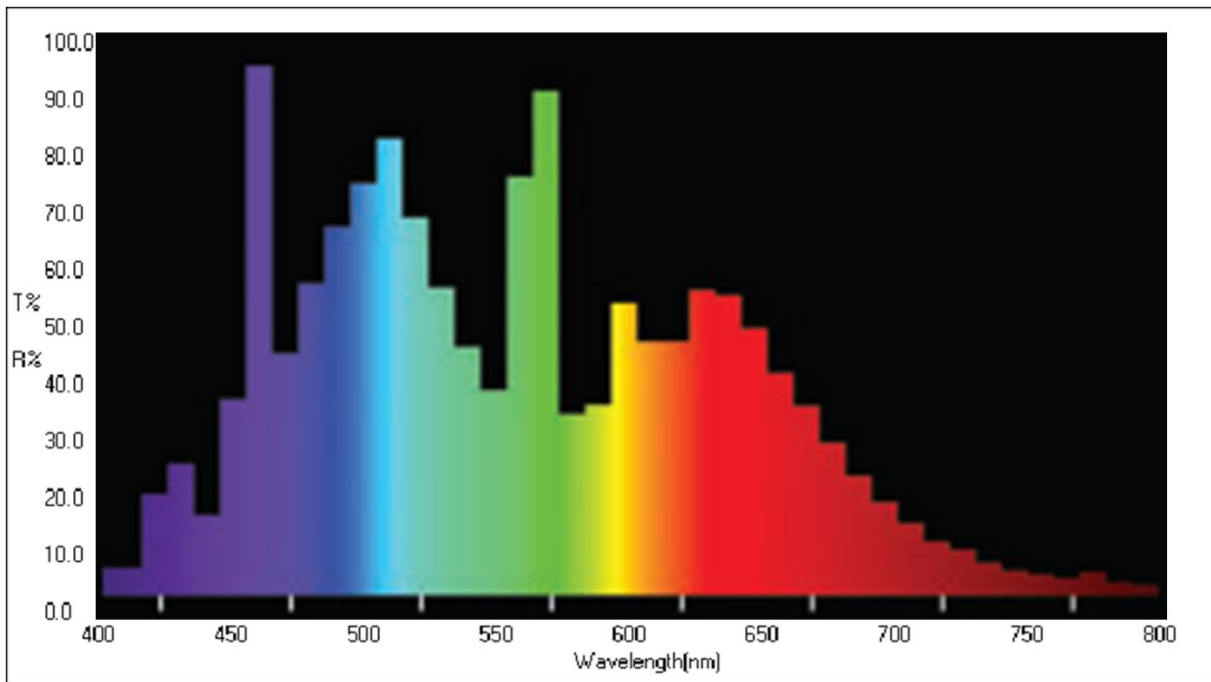


HEAT FILTER

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pt%	0,94	0,96	0,94	0,95	0,95	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,97

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,26	0,1	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0	0



OSRAM SIRIUS HRI 330W

λ (nm)	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520	530	540
Pe%	0,06	0,19	0,24	0,15	0,36	0,94	0,44	0,56	0,66	0,74	0,83	0,67	0,55	0,44

550	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690
0,37	0,75	0,9	0,33	0,35	0,52	0,46	0,46	0,54	0,53	0,48	0,4	0,34	0,28	0,22

700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	800
0,14	0,1	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02

