

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Ottimizzazione di un concentratore solare
per applicazioni germicide all'interno dei
moduli abitativi lunari

Relatore:
Prof. Matteo Lombini

Presentata da:
Emma Bellettini

Correlatrice:
Dott. Laura Schreiber

Abstract

I prossimi programmi di esplorazione spaziale prevedono di riportare l'umanità sulla Luna per missioni di maggior durata rispetto alle precedenti. Queste nuove missioni si ritiene potranno essere un trampolino di lancio verso la colonizzazione di Marte nel prossimo futuro.

Una permanenza più lunga nello spazio esporrà però gli astronauti e le astronaute a maggiori rischi per la salute. In questo studio si focalizzano i rischi legati alla contaminazione biologica dell'aria all'interno delle basi o delle stazioni spaziali. In particolare viene analizzato un metodo di riduzione della concentrazione dei patogeni nell'aria mediante l'uso della radiazione solare ultravioletta all'interno della banda C ($200\text{ nm} - 280\text{ nm}$).

L'obiettivo è quello di incanalare queste radiazioni germicide e di utilizzarle per disinfettare l'aria delle basi destinate ad ospitare gli astronauti e le astronaute. Più nello specifico, il progetto SAILOR Moon (Solar ultraviolet Light collector for germicidal irradiation on the Moon), proposto dai ricercatori INAF, si propone di concentrare i raggi UVC all'interno del condotto di aerazione previsto per il ricircolo dell'aria di queste basi, proprio attraverso dei concentratori solari posti sul tetto delle basi stesse.

Per una maggiore efficienza del sistema, si ipotizza di posizionare i concentratori, e quindi le basi stesse, in prossimità dei poli lunari che, data la scarsa inclinazione dell'asse della Luna rispetto al piano dell'eclittica (1.5°), sono maggiormente esposti alla radiazione solare. Questa tesi si propone di analizzare alcune modifiche apportate ad un componente del progetto, ovvero la finestra attraverso cui i raggi solari, convogliati dal concentratore, entrano nel condotto di aerazione. Queste modifiche andranno studiate poi con varie configurazioni fluidodinamiche per il ricircolo dell'aria all'interno dei condotti.

I risultati riportati in seguito mostrano che è possibile ed efficace usare gli UVC solari per sanificare l'aria.

Indice

Introduzione	2
1 Il progetto SAILOR Moon	5
1.1 Concentratori solari e CPC	5
1.2 SAILOR Moon design	7
1.3 Analisi germicida	10
1.3.1 Simulazioni fluidodinamiche	11
1.3.2 Simulazioni ottiche	12
2 Variazioni sull’anello di quarzo	15
2.1 Modifiche alla forma dell’anello di quarzo	15
2.2 Modifiche alla superficie dell’anello di quarzo	20
3 Risultati	21
3.1 Simulazioni ottiche	21
3.2 Simulazioni fluidodinamiche	25
3.3 Risultati della fluenza	25
Conclusioni	27
Bibliografia	29

Introduzione

Il prossimo obiettivo delle missioni spaziali è quello di riportare l'umanità sulla Luna, in particolare il programma Artemis della NASA ha l'intento di riportare gli/le astronauti/e sulla Luna nel 2024 per la prima missione a lungo termine.¹ L'idea è di colonizzare la Luna costruendo basi fisse,² anche in previsione di una futura colonizzazione umana di Marte.

Tra le varie sfide che bisogna superare c'è quella sanitaria, dato che gli/le astronauti/e saranno più lungamente esposti/e ai rischi dell'ambiente, in una situazione in cui, per curarsi, non potranno fruire di tutti i mezzi disponibili sulla Terra. Entrando nel merito, si è visto infatti, grazie a studi condotti sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS), che l'aria respirata all'interno di essa e le superfici stesse, sono biologicamente contaminate, al punto da poter rappresentare un rischio per la salute di chi vi lavora, potendo provocare allergie ma anche infezioni o intossicazioni.³ Per sanificare quindi l'ambiente e mantenere in salute gli/le astronauti/e sono attivi già diversi accorgimenti, come l'health check prima della partenza o il controllo di tutti i materiali inviati a bordo,^{4,5} vengono usati inoltre anche diversi metodi per la sanificazione dell'aria.^{6,7} Tra questi ultimi si è focalizzata l'attenzione su quelli che utilizzano gli UVC come fonte germicida: gli UltraViolet Germicidal Irradiation (UVGI).⁷⁻⁹ Gli UVC hanno infatti la capacità di inattivare virus e uccidere batteri, funghi, muffe, etc.¹⁰⁻¹⁴ Naturalmente l'efficienza di questi dispositivi dipende da vari fattori come la resistenza dei patogeni,^{15,16} la lunghezza d'onda della radiazione utilizzata,¹⁷ l'umidità dell'aria da sanificare,^{18,19} il filtraggio della polvere che, assorbendo anch'essa la radiazione diminuisce quella in arrivo ai patogeni,²⁰ etc.

Il punto a favore per questi dispositivi installati sulla Luna, invece che sulla Terra, è che si può usare direttamente la radiazione solare come sorgente di UVC, quando invece sul nostro pianeta questo range di lunghezza d'onda ($240\text{ nm} - 280\text{ nm}$) viene assorbito dall'atmosfera e si deve quindi ricorrere a fonti artificiali per produrla. Il progetto in esame è il Solar ultraviolet Light collector for germicidal irradiation on the Moon (SAILOR Moon), progetto INAF, nel quale i raggi UVC vengono

concentrati, tramite appositi concentratori solari, all'interno di un condotto di aerazione, diventando quindi la sorgente germicida per la disinfezione dell'aria. Per far sì che questa sorgente sia abbastanza potente da avere un effetto germicida sufficientemente elevato, si è aumentata la densità energetica nel condotto di aerazione tramite pareti altamente riflettenti per la lunghezza d'onda degli UVC.²¹⁻²⁵

Sempre in ottica di costruire basi lunari fisse, si è ipotizzato di collocare i concentratori in oggetto sulla sommità delle abitazioni per evitare eventuali ombre, e di costruirli in zone della Luna particolarmente illuminate, come lo sono i poli lunari. L'asse lunare infatti è inclinato di 1.5° rispetto al piano dell'eclittica, ciò vuol dire che la luce ai poli è quasi sempre all'orizzonte e che lo spostamento apparente del Sole è confinato in un angolo di $\pm 2^\circ$ rispetto all'orizzonte stesso.

Un altro fattore importante per decidere dove installare la basi lunari è l'interesse scientifico che questi siti possono avere. Si cercano zone in cui sia possibile trovare del ghiaccio, cosa certamente più probabile in ambienti perennemente in ombra, quindi ad esempio nei crateri vicini ai poli. Questi, non essendo illuminati all'interno, data l'altezza del Sole, potrebbero essere luoghi vicini ai quali costruire. Infatti, tra i vari siti presi in esame per la futura missione Artemis III, la NASA ha selezionato 13 punti situati nel polo sud lunare.²⁶

Solitamente gli UVGI lavorano in termini di Irradianza, definita come la potenza totale di radiazione che passa attraverso una superficie, fratto la superficie stessa, espressa nell'unità di misura del SI di mW/cm^2 . In Figura 1, vediamo i dati che abbiamo a disposizione sull'irradianza spettrale solare nelle lunghezze d'onda ultraviolette ($200\text{ nm} - 400\text{ nm}$); questi provengono dal SOLar SPEctrometer (SOLSPEC), uno strumento posizionato sulla ISS.²⁷ Dai dati vediamo che l'irradianza spettrale integrata, cioè l'irradianza, è di 0.5 mW/cm^2 nel range di lunghezza d'onda $240\text{ nm} - 280\text{ nm}$ e assumiamo che in questo range le lunghezze d'onda abbiano la stessa efficienza germicida.^{10,28} Anche tra 200 nm e 240 nm la radiazione ha effetti germicidi ma a queste landa, nell'aria si creerebbe dell'ozono, che è tossico, quindi le radiazioni in questo range non si utilizzano.²⁹ Come vediamo dal grafico, l'irradianza cresce con gli UVB e UVA ma sappiamo che l'effetto germicida cala, quindi lavorare con il completo spettro ultravioletto porterebbe un miglioramento del rate di inattivazione dei patogeni ma non tale da non poter lavorare solo con gli UVC, lasciando lo studio completo per il futuro.^{30,31} Siamo pronti ora per entrare nel dettaglio del progetto.

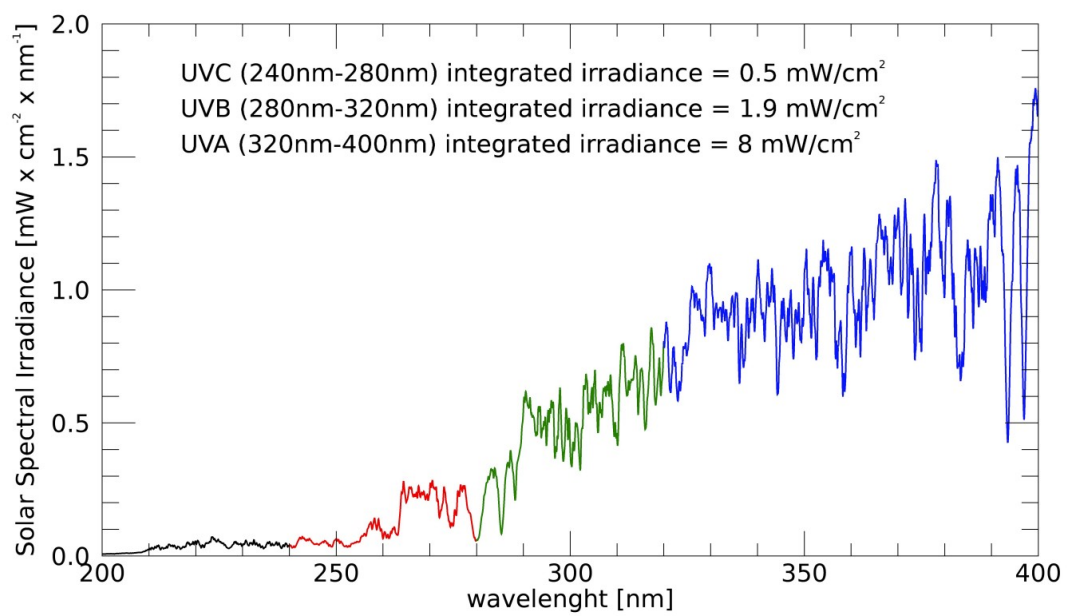


Figura 1: Spettro dell'irradianza spettrale solare nella banda ultravioletta misurata dallo spettrometro SOLSPEC sulla ISS .

Capitolo 1

Il progetto SAILOR Moon

In questo capitolo analizziamo la struttura del concentratore in oggetto, definendo prima le caratteristiche dei concentratori solari in generale.

1.1 Concentratori solari e CPC

Un concentratore solare, nella sua definizione più generale, è un collettore di energia solare usato per aumentare la densità energetica in un determinato punto o area. Le principali tipologie di concentratori solari si distinguono attraverso la modalità con cui convogliano i raggi: mediante singoli specchi parabolici - o array di specchi - come in Figura 1.1 o mediante coppie di riflettori di forma conica, spesso una parabola, simili ad un imbuto per i raggi, Figura 1.2.

A parità di concentrazione dei raggi, i concentratori singoli sono più vantaggiosi da un punto di vista costruttivo perché richiedono l'utilizzo di meno materiali ma hanno un ridotto angolo di accettazione rispetto ai concentratori con doppi specchi parabolici - Compound Parabolic Concentrator.³² In questa applicazione dei concentratori solari, si usa l'espressione "concentrazione dei raggi" perché è comodo modellizzare la luce della sorgente come raggi geometrici, ovviamente si tratta di densità di energia.

Negli anni sono state sviluppate varie versioni di concentratori per entrambe le tipologie; in questo caso ci interessa il funzionamento dei CPC, concentratori solari con due riflettori parabolici che seguono la progettazione flow-line per l'ottica non imaging,³³ cioè che hanno la caratteristica di non focalizzare la luce in un unico punto ma su una superficie estesa. Nel caso presente infatti sono la tecnologia migliore, dato che non ci interessa avere un'immagine finale precisa, per la quale invece servirebbe un fuoco il più possibile puntuale, come accade nei concentratori

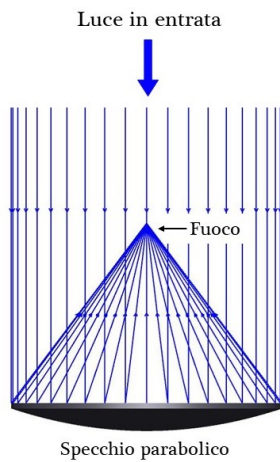


Figura 1.1: Schematizzazione del comportamento di un concentratore solare singolo. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

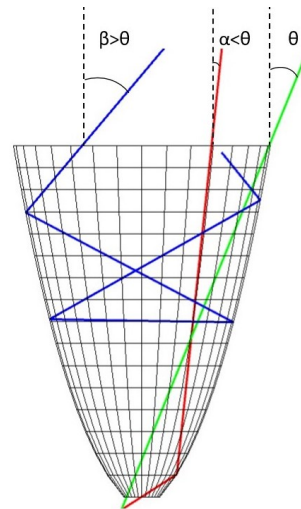


Figura 1.2: Schematizzazione del comportamento di un CPC con due diversi angoli di entrata dei raggi e θ angolo di accettazione. Si vede che con un angolo $\alpha < \theta$ i raggi arrivano alla base del concentratore mentre con un angolo $\beta > \theta$ vengono riflessi e fatti tornare indietro. θ aumenta al diminuire dell'altezza del concentratore.³⁶ Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

singoli. Visto che la radiazione entrante proviene dal Sole, questa può essere vista come una sorgente posta all'infinito, per la quale i CPC sono la geometria più efficace. I raggi entranti in questa situazione, arrivano all'apertura di uscita se l'angolo di ingresso non supera un certo angolo θ , detto angolo di accettazione, che si può vedere in Figura 1.2; entro quell'angolo un qualsiasi raggio arriva in un punto della superficie di uscita.

Genericamente quando si usano i CPC con il Sole come sorgente, dato che apparentemente il Sole si sposta durante la giornata, servirebbe un concentratore con un angolo di accettazione molto grande e questo non esiste. La soluzione è non usare un concentratore statico ma impostare il tracking della sorgente,³⁴ ovvero permettere al concentratore di muoversi seguendo la sorgente, per poter essere sempre in linea con la direzione di arrivo della radiazione.

I CPC possono essere composti da due specchi piani, separati e dal profilo parabolico, come in Figura 1.3, o conici, spesso ottenuti facendo ruotare la parabola attorno all'asse del concentratore (diverso da quello della parabola stessa).³⁵

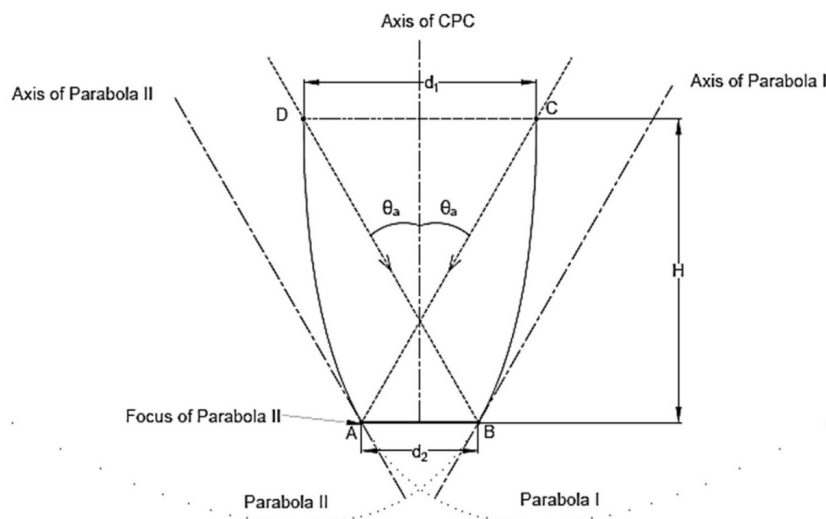


Figura 1.3: Design di un concentratore parabolico.³⁶ Si vedono i due profili parabolici con i rispettivi fuochi sull'apertura di uscita (AB), gli assi delle parabole, che sono le linee tangenti ai punti A (*Parabola I*) e B (*Parabola II*), e l'angolo di accettazione θ .

1.2 SAILOR Moon design

Vediamo ora la struttura del concentratore solare in questione preso da diverse prospettive: in Figura 1.4 a sinistra lo vediamo di profilo, a destra leggermente inclinato per capire meglio la sua forma. In rosso abbiamo il condotto di aerazione, che è un anello a sezione quadrata, in azzurro la finestra attraverso cui i raggi entrano nel condotto.

Più nello specifico lo vediamo in Figura 1.5 dove abbiamo gli specchi del concentratore parabolico (CPC) che convogliano tutti i raggi entranti con un angolo $\leq \theta$ (angolo di accettazione) verso una finestra di quarzo (in azzurro nel disegno) che permette la loro entrata nel condotto di aerazione. Si usa il quarzo perché per le lunghezze d'onda ultraviolette ha un'alta trasmissività e lo scopo è che la suddetta radiazione venga trasmessa il più possibile. Dato che ipotizziamo di essere ai poli lunari, l'asse del concentratore, che di norma è diretto verso la direzione di arrivo dei raggi, in questo caso sarà orizzontale.

Una volta entrati nel condotto, rivestito di materiale riflettente per gli ultravioletti nella banda $240 \text{ nm} - 280 \text{ nm}$, i raggi subiscono numerose riflessioni prima di essere totalmente assorbiti o trasmessi all'esterno, questo andamento si può apprezzare meglio in Figura 1.6 dove viene mostrato il concentratore dall'alto.

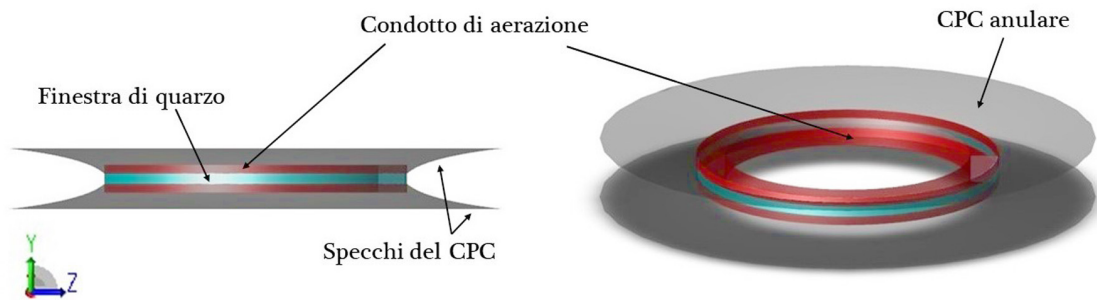


Figura 1.4: Struttura del concentratore dove in azzurro abbiamo la finestra di quarzo che permette l'entrata dei raggi e in rosso il condotto dove passa l'aria da disinfettare. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

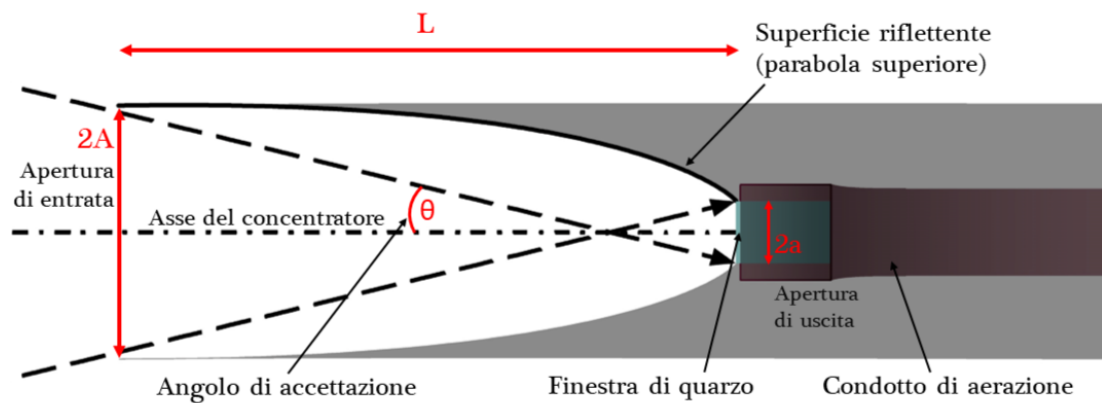


Figura 1.5: Concentratore parabolico e finestra di quarzo visti di profilo, dove si possono apprezzare alcuni parametri del progetto.

L'obiettivo è massimizzare l'effetto germicida delle radiazioni e questo si traduce nel massimizzare la Fluenza (mJ/cm^2), ovvero l'energia totale di radiazione, proveniente da tutte le direzioni, che passa attraverso una superficie sferica δA , divisa per la stessa δA . Sappiamo che la Fluenza (F) è pari all'Irradianza moltiplicata per il tempo di permanenza dei patogeni in un volume unitario. L'Irradianza è la potenza totale di radiazione che passa attraverso una superficie sferica δA , fratto la superficie stessa δA , espressa nell'unità di misura del SI di mW/cm^2 . Massimizzando quindi l'irradianza e il tempo di permanenza, si massimizza anche la fluenza.

Gli specchi del CPC sono riflettenti per le λ nel range degli UVC, il quarzo permette la trasmissione principalmente degli UVC - con una trasmittività quasi pari

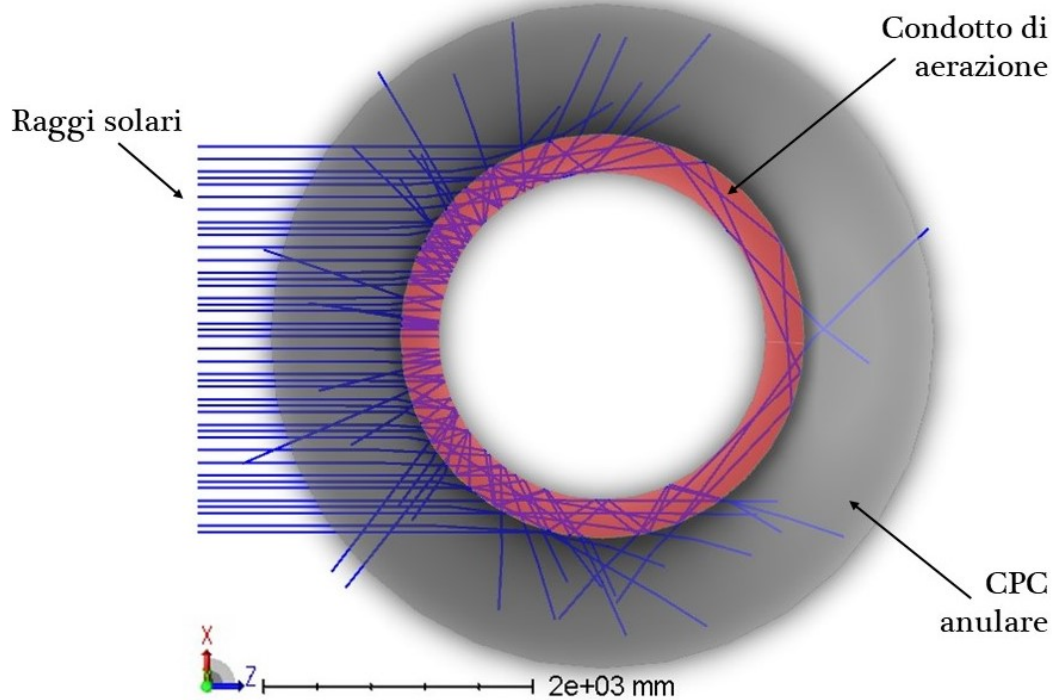


Figura 1.6: Concentratore visto dall'alto con l'andamento dei raggi. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

a ³⁷ - e il condotto di aerazione è rivestito di Polytetrafluoroethylene (PTFE)³⁸ materiale altamente riflettente sempre per gli UVC ($R = 0,95$ per $\lambda = 275\text{ nm}$), il tutto per aumentare l'irradianza. Inoltre, come si può vedere dalla Figura 1.6, i raggi non sono distribuiti in modo omogeneo all'interno del condotto di aerazione ma sono molto più concentrati nella zona di ingresso. Per migliorare questo comportamento, il rivestimento interno di PTFE è tale da permettere uno scattering Lambertiano, in questo modo si ottiene una diffusione più omogenea dei raggi riflessi e quindi una migliore distribuzione dell'effetto germicida all'interno del condotto.³⁹

Per aumentare invece il tempo di permanenza dei patogeni all'interno del condotto, si può diminuire la velocità dell'aria che passa nel condotto stesso rispetto alla velocità iniziale che ha nel canale di entrata. A questo scopo infatti la sezione del condotto è doppia rispetto alla sezione dei canali di ingresso e di uscita dell'aria.³⁹

In Tabella 1.1 vediamo alcuni parametri utilizzati nello studio, per il concentratore in esame. Il condotto di aerazione è stato pensato con forma ad anello,

di diametro esterno di 300 cm e con sezione quadrata di lato di 28 cm . La potenza totale della sorgente è 7.5 W ed è stata calcolata partendo dall'irradianza del Sole nella banda UVC, vista in Figura 1, moltiplicata per l'area investita dalla radiazione, ovvero un rettangolo dalla base lunga quanto il diametro esterno dell'anello e l'altezza pari all'apertura di entrata del concentratore ($2A$ in Figura 1.5).

Parametro	Valore	Unità di misura
Lato sezione condotto	28	cm
D diametro dell'anello	300	cm
θ angolo di accettazione	7	deg
$2A$ apertura di entrata CPC	50	cm
$2a$ apertura di uscita CPC	10	cm
L lunghezza CPC	150	cm
Potenza sorgente UVC	7.5	W
Trasmissione ottica del quarzo	0.9	
R riflettività interna PTFE	0.95	

Tabella 1.1: Parametri geometrici e ottici del design del SAILOR Moon. La relazione che lega A , a , θ è $A = a / \sin \theta$ ³⁶

1.3 Analisi germicida

La capacità della radiazione UVC di inattivare i patogeni dipende dall'energia totale che questi assorbono, la quale sappiamo essere legata all'irradianza (I) e al tempo di esposizione alla radiazione (t). Un modello semplificato⁷ di questa dipendenza è:

$$S = e^{-kF} = e^{-ktI} \quad (1.1)$$

dove S rappresenta la frazione di patogeni sopravvissuti all'esposizione degli UVC per un tempo t (tempo di esposizione), F è la fluena ($F = tI$) e k (cm^2/mJ) è una costante diversa per ogni microorganismo che indica quanto sia efficiente quella specifica radiazione nell'eliminazione di quello specifico patogeno. Maggiore è k , minore sarà la frazione di patogeni sopravvissuti. Ovviamente ci sono altri parametri da tenere in considerazione, come l'umidità dell'aria nel condotto o il filtraggio della polvere ma in questo studio ci focalizziamo sugli altri aspetti, ovvero irradianza e tempo di permanenza.

L'obiettivo è trovare dei valori della fluena, e quindi di S , che diano una buona

sanificazione dell'aria, per questo sono state simulate diverse configurazioni per il concentratore.

1.3.1 Simulazioni fluidodinamiche

Qui si studia il tempo di esposizione dei patogeni alla radiazione ultravioletta all'interno del condotto. Nell'analisi sono state ipotizzate condizioni adatte alla vita umana, quindi standard (temperatura di $25^{\circ}C$, pressione di 1 atm) e la gravità è stata impostata a quella lunare (1.62 m/s^2) anche se quest'ultima è stato visto essere ininfluente. Tutte le simulazioni riportate sono state fatte usando il software Ansys Fluent[®], considerando due condizioni diverse di flusso: $230\text{ m}^3/h$ e $460\text{ m}^3/h$, dove quest'ultimo valore si rifà al flusso presente sulla ISS nei condotti di aerazione.⁴⁰ Dato che la sezione del condotto è la stessa, i due flussi sono stati ottenuti modificando la velocità di passaggio dell'aria. Il flusso è stato ipotizzato come turbolento e le gocce di bioaerosol naturalmente contenute nell'aria della stazione, sono state viste come uniche portatrici dei patogeni e considerate composte da acqua liquida e di forma sferica, con un diametro compreso tra $0.5\text{ }\mu\text{m}$ e $25\text{ }\mu\text{m}$.^{41,42} Successivamente si è visto che i risultati sono indipendenti dalla dimensione delle stesse, a causa dell'alto flusso presente nel condotto.

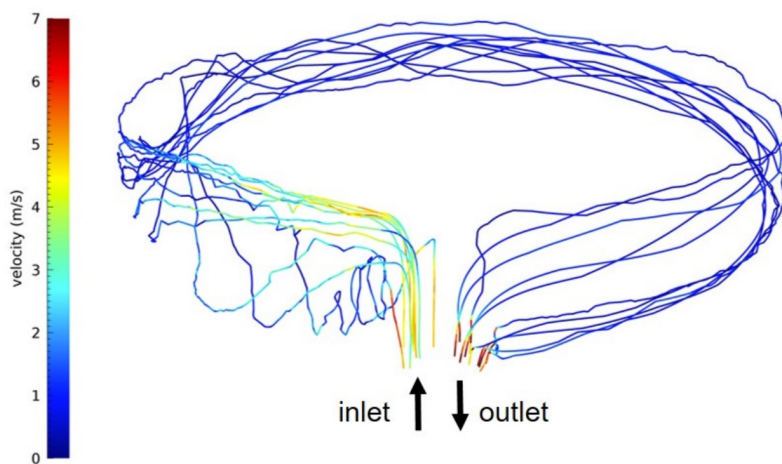


Figura 1.7: Traiettorie e velocità di alcune particelle nel condotto di aerazione in regime di flusso a $230\text{ m}^3/h$, si vede che la velocità diminuisce quando la sezione del condotto raddoppia.²⁵

1.3.2 Simulazioni ottiche

Le simulazioni ottiche sono state fatte tutte con Zemax OpticStudio[®] utilizzando per l'irradianza del Sole, la riflettività interna e le specifiche di costruzione del concentratore, i valori riportati in Tabella 1.1.

I raggi vengono riflessi e rifratti finché non escono dal sistema ottico o non raggiungono un limite inferiore di energia (10^{-6} per il valore iniziale) al di sotto del quale vengono considerati estinti. L'irradianza all'interno del condotto viene misurata tramite un detector volumetrico mobile suddiviso in voxels da 1 cm^3 l'uno, visibile in Figura 1.8. In Figura 1.9 sono riportati i risultati della simulazione ottica proprio in termini di Irradianza, dove il rosso indica il valore maggiore e il blu quello minore.

Sempre in Figura 1.8 si può vedere che nonostante lo scattering Lambertiano nelle pareti interne del condotto - che tende ad uniformare la distribuzione dei raggi - la densità dei raggi è maggiore nel punto di ingresso del fascio.²⁵

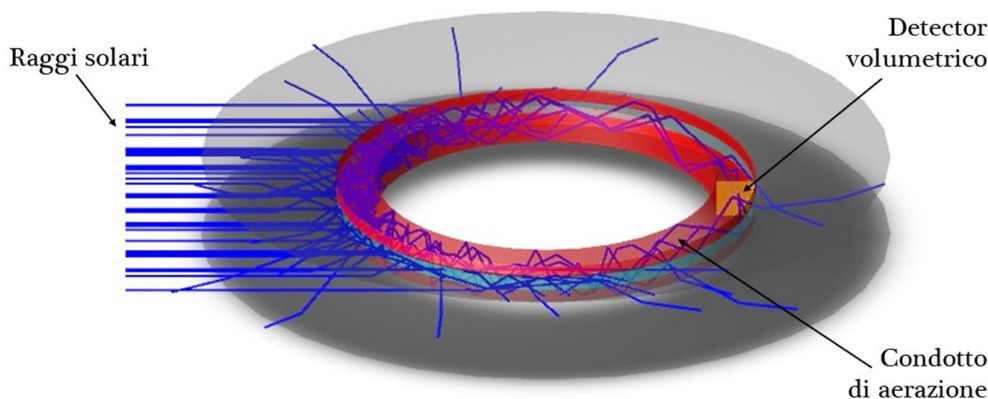


Figura 1.8: Andamento dei raggi all'interno del condotto. In arancione si ha il detector volumetrico. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio[®].

Queste due simulazioni, ottiche e fluidodinamiche, sono poi state combinate insieme per ottenere la Fluenza, cioè quindi l'efficienza del filtro UVC. L'analisi è stata eseguita considerando la traiettoria di ogni particella singolarmente e calcolando di ognuna di esse il tempo di permanenza in ogni voxel del condotto. Questo tempo è stato calcolato usando la velocità locale della singola particella in ogni voxel, ottenuta dalla simulazione fluidodinamica nelle due diverse configurazioni

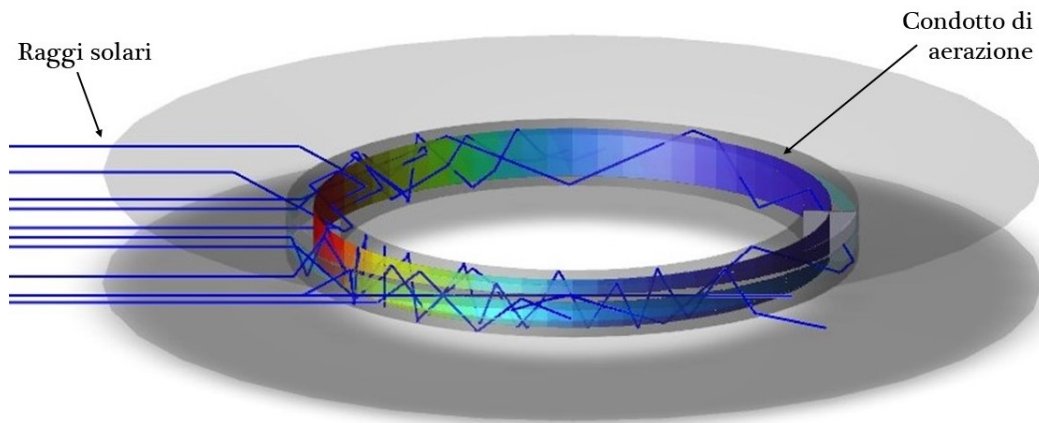


Figura 1.9: Andamento dell'irradianza all'interno del condotto. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

di flusso. Il tempo locale della particella nel voxel è stato poi moltiplicato per l'irradianza nello stesso voxel ottenuta dalla simulazione ottica, ricavando così la fluenza sulla singola particella nel singolo voxel. Successivamente si sono sommate le fluenze locali della stessa particella in tutti gli altri voxel, in modo da avere la fluenza totale sulla particella in esame. Questo procedimento è stato reiterato per ogni particella presente nel condotto (ne sono state ipotizzate circa 500) e alla fine si è fatta una media tra tutte le fluenze per ottenere la fluenza finale. Vediamo ora in Tabella 1.2 i risultati della Fluenza variando il flusso e lasciando inalterati i parametri in Tabella 1.1.

Flusso Aria (m^3/h)	Riflettività condotto	Fluenza (mJ/cm^2)
230	0.95	21.0
460		10.5

Tabella 1.2: Fluenza in funzione dei due diversi flussi dell'aria in entrata.

Confrontando i valori della fluenza ottenuti con i valori del D-value di ogni patogeno (ovvero l'energia necessaria per eliminarlo al 90 %) si vede che per i virus^{21,43,44} c'è un'alta efficacia, mentre alcuni batteri e funghi⁴⁴⁻⁵⁵ sono più resistenti a questo tipo di radiazione ma possono comunque essere inattivati grazie al ricircolo dell'aria che li espone ripetutamente a questo trattamento.

In questa tesi vengono modificati alcuni elementi costruttivi del condotto per cercare una maggiore fluenza e quindi efficienza.

Capitolo 2

Variazioni sull'anello di quarzo

Nella sezione precedente sono stati presentati alcuni parametri del concentratore e i risultati ottenuti in termini di inattivazione dei patogeni.

L'obiettivo di questa tesi è modificare alcuni parametri del progetto per valutare se queste variazioni hanno un effetto positivo o negativo sull'efficienza germicida del filtro a UVC.

2.1 Modifiche alla forma dell'anello di quarzo

Le prime modifiche sono state effettuate sulla forma della finestra di quarzo, che permette la trasmissione dei raggi ultravioletti all'interno del condotto di aerazione. La finestra di partenza è una superficie cilindrica di diametro 300 cm , altezza 10 cm e spessore 1 cm , Figura 2.1.



Figura 2.1: Anello di quarzo con diametro esterno di 300 cm e sezione rettangolare di altezza 10 cm e base 1 cm . Immagine realizzata con Zemax OpticStudio[®].

Come sappiamo da altri studi, integrare i CPC con lenti di forme diverse può aiutare ad aumentare la loro concentrazione di raggi; l'assorbitore più comune è un vetro piatto, come quello fino ad ora proposto, ma in base all'utilizzo del concentratore possono esserci lenti cilindriche, piane verticali, semisferiche, a forma di prisma etc.³⁶ In Figura 2.2 vediamo qualche esempio di CPC con lenti di diverse

sezioni.

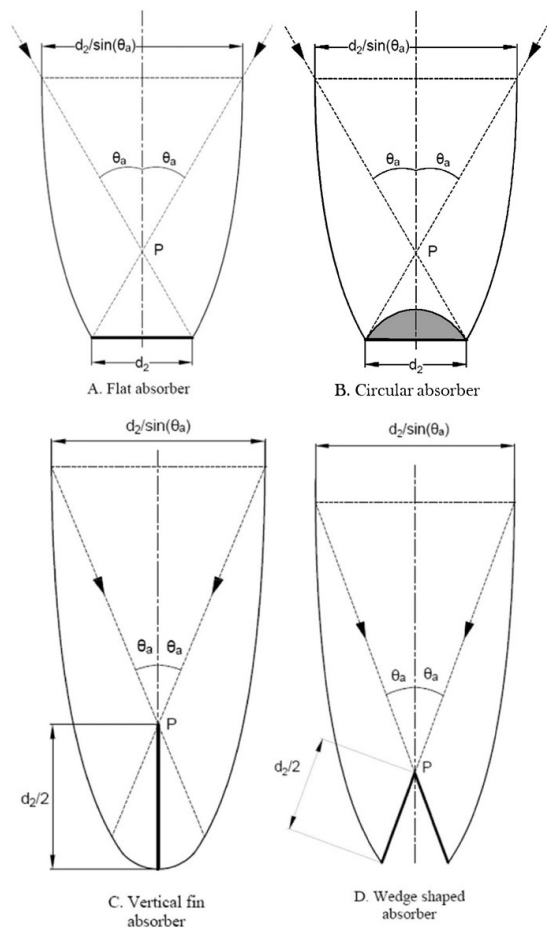


Figura 2.2: Lenti dal diverso profilo integrate nei CPC.⁵⁶

Data la struttura del concentratore in esame, in cui non abbiamo un CPC lineare ma ad anello, modificare ad esempio la finestra iniziale piatta, cioè a sezione rettangolare, sostituendola con una lente a sezione semicircolare, consiste nel modificare la forma della superficie esterna di tutto l'anello di quarzo.

In questo studio vengono prese in esame lenti dal profilo semicircolare³⁵ con diversi raggi di curvatura, lastre di quarzo modellate in modo da avere il profilo semicircolare, non sono propriamente lenti dato che non hanno potere ottico, e prismi, dal profilo quindi triangolare.⁵⁷ Tutte queste verranno poi confrontate in efficienza con la situazione di partenza. In Figura 2.3 possiamo vedere come cambia la su-

perficie esterna dell'anello di quarzo in base alla lente usata, successivamente nelle prossime figure verrà mostrato il profilo in modo più dettagliato.

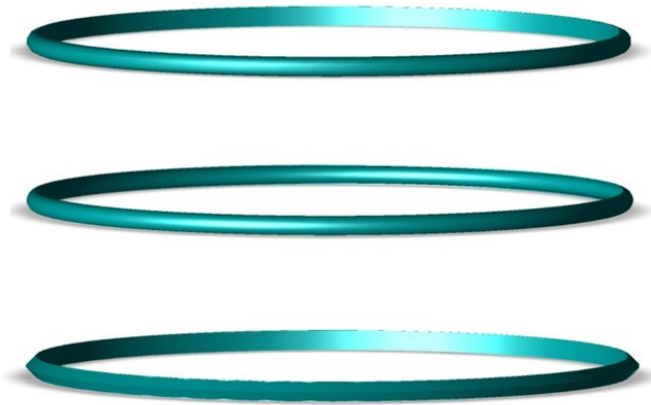


Figura 2.3:

Il **primo anello** è quello con la lente dal profilo semicircolare,

il **secondo anello** ha il profilo sempre semicircolare ma è cavo all'interno (nell'immagine si capisce guardando la differenza delle ombre),

il **terzo anello** è quello a forma di prisma con la sezione triangolare.

Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

Le prime lenti analizzate sono quelle dal profilo semicircolare, con i rispettivi raggi di curvatura $R_1 = 5\text{ cm}$ e $R_2 = 6\text{ cm}$. Abbiamo quindi un anello non più totalmente squadrato ma a sezione di semicerchio. In Figura 2.4 vediamo appunto il profilo con i due raggi di curvatura diversi.

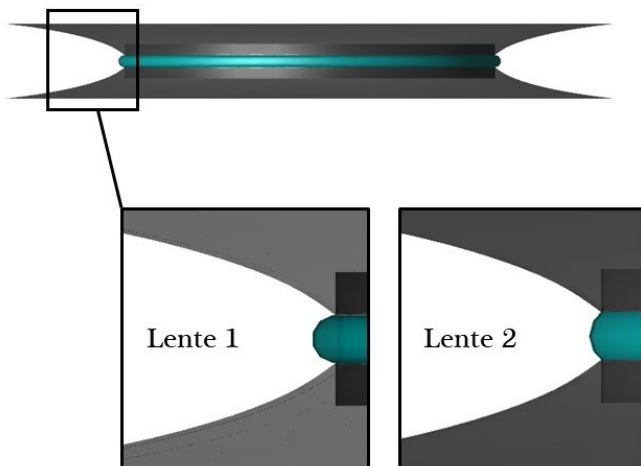


Figura 2.4: Zoom del profilo dell'anello di quarzo modificato con le lenti semicircolari.

Si può vedere che la finestra non è più piatta ma il suo profilo è semicircolare, nella prima il raggio di curvatura è di 5 cm e nella seconda 6 cm .

Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

Successivamente queste due lenti sono state modificate in modo da renderle cave, nelle Figure 2.5 e 2.6 vediamo la differenza tra le due versioni, mantenendo sempre i raggi di curvatura R_1 e R_2 , e con uno spessore della lastra di quarzo

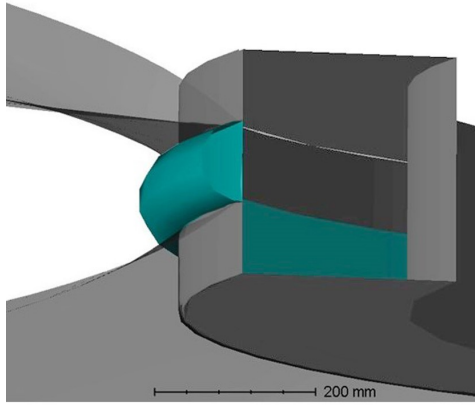


Figura 2.5: Dettaglio dell'anello di quarzo. In questo disegno vediamo la lente dal profilo semicircolare. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

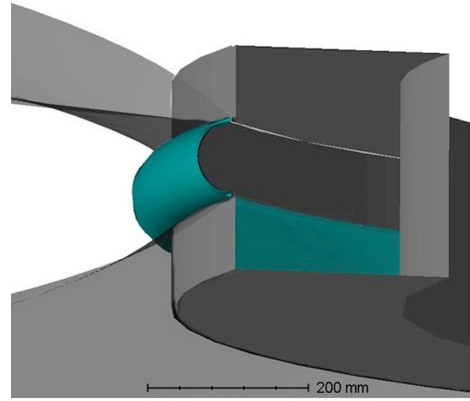


Figura 2.6: Dettaglio dell'anello di quarzo. In questo disegno vediamo la shell dal profilo semicircolare. Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

di 0.5 cm . Inoltre in Figura 2.7 vediamo le differenze di profilo delle due lastre incurvate, dette anche shell.

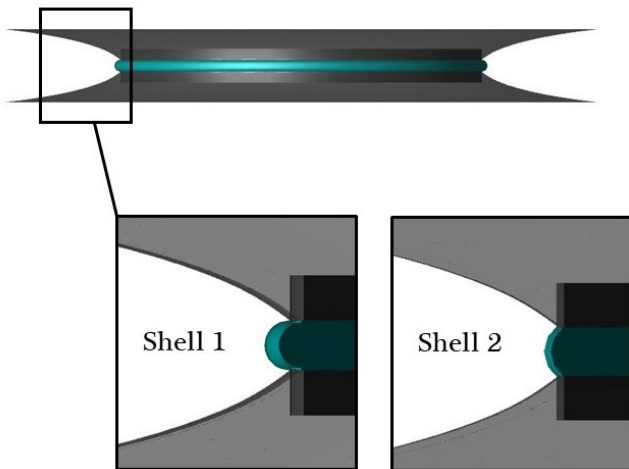


Figura 2.7: Zoom del profilo dell'anello di quarzo modificato.

Si può vedere che la finestra non è più piatta ma con profilo semicircolare, nella prima il raggio di curvatura è di 5 cm e nella seconda 6 cm .

Immagine realizzata con Zemax OpticStudio®.

L'ultima modifica all'anello di quarzo è stata quella di renderlo un prisma come si vede in Figura 2.8, anche qui con due diverse altezze: $h_1 = 4.5\text{ cm}$ e $h_2 = 2\text{ cm}$. Per poter sfruttare al meglio la forma di quest'ultima lente si dovrebbero apportare alcune modifiche al concentratore parabolico. Si tratta infatti di un caso particolare di concentratore, studiato da Edmonds⁵⁸ e successivamente da altri,^{36,57} che prevede l'utilizzo di un'unica parabola riflettente sul cui fuoco è posto l'apice del

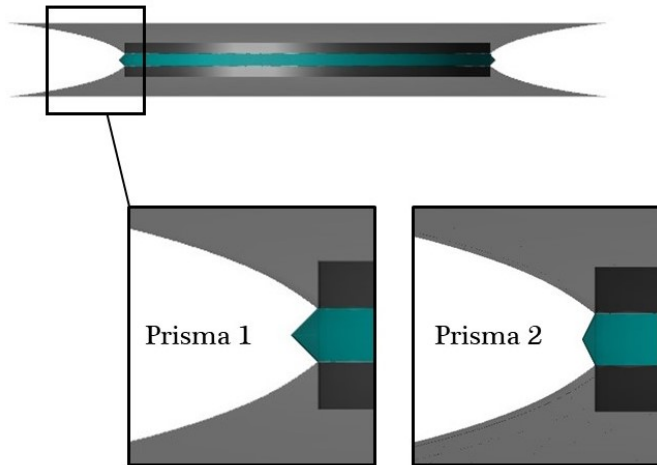


Figura 2.8: Zoom del profilo dell'anello di quarzo modificato.

Si può vedere che la finestra non è più piatta ma con profilo triangolare, con altezze h_1 e h_2 .

Immagine realizzata con Zemax OpticStudio[®].

prisma, come si vede in Figura 2.9. Parabola che viene poi rettificata nel tratto finale vicino alla lente. Per una migliore comprensione si esamini la Figura 2.9: il profilo dello specchio ha infatti due sezioni: una parabolica (tratto BD) e una rettilinea (tratto AB). Questo permette di avere un notevole aumento della concentrazione dei raggi rispetto ad un concentratore classico.

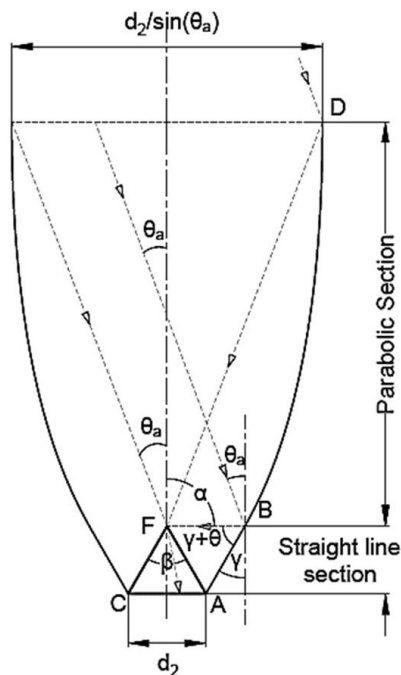


Figura 2.9: Dettagli di costruzione di un concentratore integrato con un prisma di materiale dielettrico come descritto da Edmonds (1986).⁵⁸ F è il fuoco della parabola su cui è posto l'apice del prisma, BD tratto parabolico, AB tratto lineare.

Nel nostro caso queste modifiche al concentratore non sono state effettuate, si testerà quindi solo l'efficienza del prisma con il CPC classico descritto precedentemente

per le altre tipologie di anelli di quarzo.

2.2 Modifiche alla superficie dell'anello di quarzo

Un'ulteriore modifica sull'anello di quarzo è stata quella di cambiare la rugosità della superficie esterna, ovvero la prima che i raggi in entrata incontrano se arrivano all'apertura di uscita del CPC. La modifica è stata quella renderla tale da provocare una diffusione lambertiana all'interno del condotto, Figura 2.10. Quindi non solo le pareti riflettenti del condotto rifletteranno i raggi in modo da rendere la loro concentrazione più omogenea, ma anche i raggi stessi in entrata avranno direzioni più diffuse.⁵⁹ Il tutto sempre con l'obiettivo di migliorare l'efficienza germicida del filtro UVC.

Questa modifica della texture della superficie esterna è stata studiata nel caso della finestra piatta.

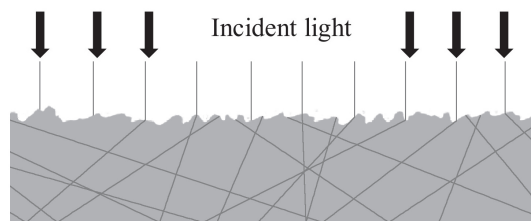


Figura 2.10: Luce entrante trasmessa con diffusione Lambertiana.

Capitolo 3

Risultati

Una volta impostate le nuove condizioni di costruzione, sono state eseguite le diverse simulazioni, sia ottiche sia fluidodinamiche. Per entrambe si sono usati sempre i software Zemax OpticStudio[®] e Ansys Fluent[®]. La simulazione fluidodinamica è stata effettuata da ricercatori INAF.

3.1 Simulazioni ottiche

I risultati in termini di potenza assorbita dal detector in funzione della sua posizione all'interno del condotto, ottenuti nelle simulazioni ottiche, si possono vedere nei seguenti grafici. Sull'asse delle ascisse sono riportati gli angoli, dove l'angolo zero corrisponde alla direzione di entrata dei raggi, Figura 3.1.

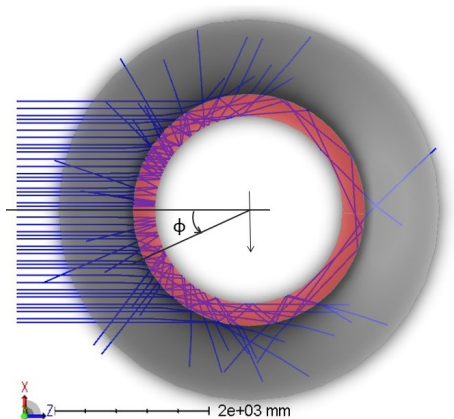


Figura 3.1: In figura si può notare l'angolo ϕ , misurato partendo dal centro del fascio entrante.

Inizialmente esaminiamo i risultati derivanti dalle modifiche di forma della finestra di quarzo e confrontiamo gli andamenti per coppie di profili, ovvero le due lenti dal profilo semicircolare, tra loro, le due shell con lo stesso profilo semicircolare, tra loro, e i due prismi con profili triangolari, tra loro.

In Figura 3.2 vediamo la coppia di lenti e la coppia di prismi. Relativamente alle lenti si nota che ad un raggio di curvatura maggiore (R_2), ovvero nel caso della lente meno incurvata, corrisponde una maggiore potenza (e quindi anche una maggiore irradianza) e viceversa. Per i prismi si nota che ad un'altezza minore corrisponde una potenza maggiore e viceversa. In entrambi i casi però la potenza assorbita resta minore rispetto alla situazione iniziale, cioè quella dell'anello con il profilo piatto.

Sappiamo dalla teoria che utilizzare lenti a forma di prisma può aiutare ad aumentare la concentrazione dei raggi nella situazione in cui il concentratore sia caratterizzato da determinati parametri di costruzione, come è stato descritto precedentemente.^{36,57,58} Nel caso preso in esame però, nel quale tali modifiche non vengono apportate, l'utilizzo di un prisma non solo non migliora i risultati ma li peggiora.

In Figura 3.3 si evidenzia invece l'andamento, sempre in termini di potenza assorbita dal detector, delle due shell a profilo semicircolare. Vediamo in questo caso che la differenza di raggi di curvatura non modifica visibilmente il risultato. Confrontando questo andamento con quello della finestra piatta, notiamo che il picco in corrispondenza dell'angolo $\phi = 0^\circ$ è più basso, mentre ad angoli maggiori e minori risulta maggiore la potenza ottenuta dalle shell. Sommando sui valori della potenza per ogni angolo in cui è stato posizionato il detector, si ottiene un valore di potenza assorbita totale di $1350 W$ per il caso iniziale, $1392 W$ per la shell 1 e $1390 W$ per la shell 2. Questi valori trovano infatti conferma nell'andamento del grafico descritto prima, dove per angoli maggiori e minori di $\phi = 0^\circ$ è maggiore la potenza ottenuta dalle due shell.

Dato che l'obiettivo dello studio è quello di ottenere le migliori prestazioni per la fluenza, le finestre con forma a shell possono diventare una soluzione da prendere in considerazione.

Come ultimo grafico abbiamo la Figura 3.4 dove possiamo confrontare gli andamenti di tutte le lenti di forma diversa rispetto a quella piatta iniziale.

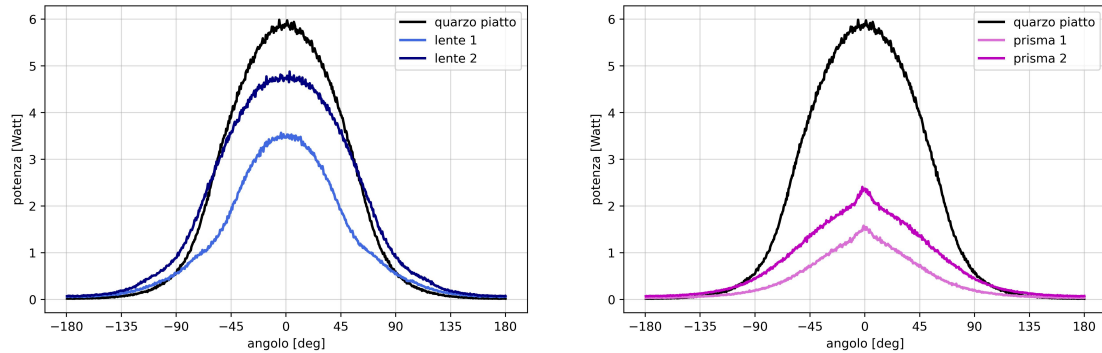


Figura 3.2: Andamento della potenza assorbita dal detector rispetto all'angolo, nel caso delle due lenti e dei due prismi. Il tutto confrontato con la potenza del quarzo piatto iniziale. La *lente1* ha raggio di curvatura $R_1 = 5 \text{ cm}$, la *lente2* ha $R_2 = 6 \text{ cm}$, il *prisma1* ha altezza $h_1 = 4.5 \text{ cm}$ e il *prisma2* ha $h_2 = 2 \text{ cm}$.

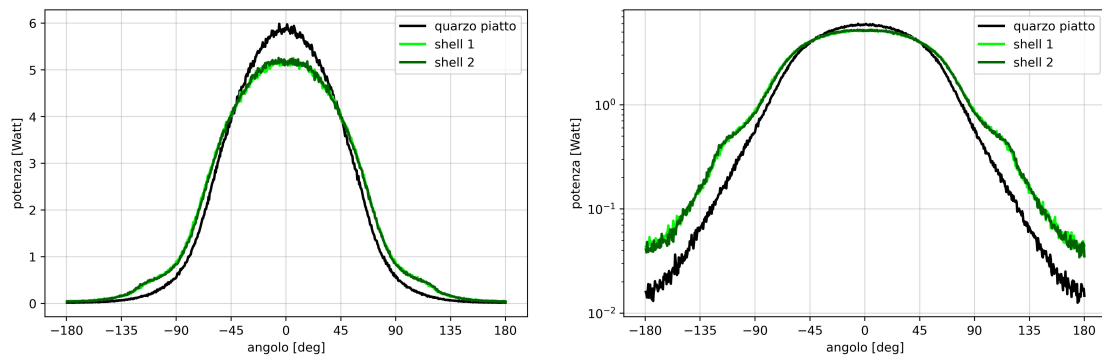


Figura 3.3: Andamento della potenza assorbita dal detector rispetto all'angolo, nel caso delle due shell. La *shell1* con raggio di curvatura $R_1 = 5 \text{ cm}$ e la *shell2* con $R_2 = 6 \text{ cm}$. A destra si può notare lo stesso grafico ma con la potenza in scala logaritmica.

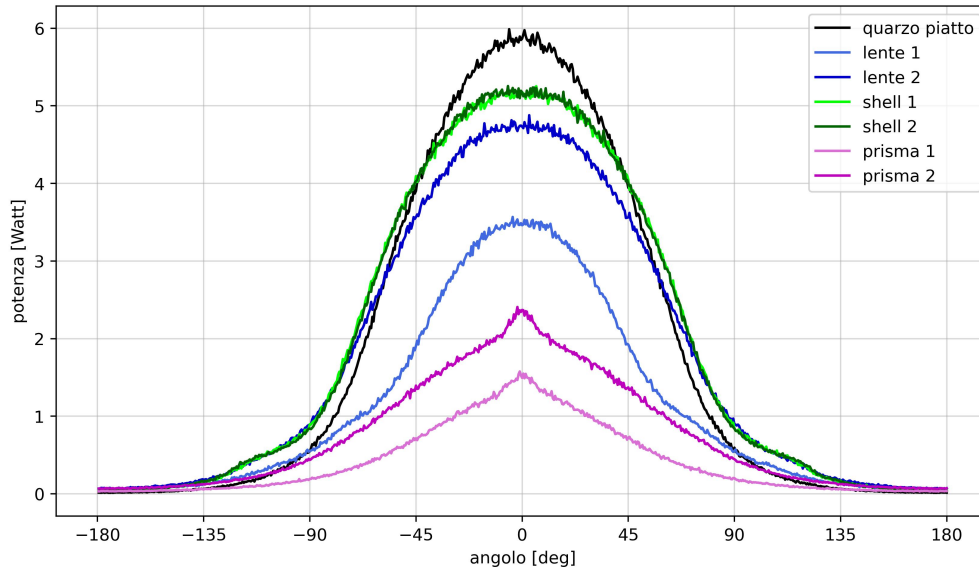


Figura 3.4: Andamento della potenza (W) assorbita dal detector rispetto all'angolo di tutte le lenti testate.

Vediamo ora il risultato della simulazione ottica per la modifica della superficie esterna dell'anello piatto di quarzo come riportato nella Sezione 2.2. L'obiettivo era rendere più omogenea la distribuzione dei raggi all'interno del condotto tramite una diffusione di tipo lambertiano. In Figura 3.5 vediamo i risultati in termini di potenza assorbita dal detector. Come possiamo vedere questa modifica non apporta grandi differenze dal punto di vista della redistribuzione dei raggi. La potenza totale assorbita, calcolata sommando sui valori della potenza per ogni angolo in cui è stato posizionato il detector, è infatti paragonabile, con $1350 W$ nel caso iniziale e $1347 W$ in condizioni lambertiane. Da queste curve sembra che gli andamenti siano praticamente uguali, in realtà si deve considerare che si hanno solo i dati sulla potenza totale sommata su tutti i voxel del detector, non si conosce l'andamento della potenza all'interno del detector. Si capisce quindi che dalla sola analisi ottica non si riesce a prevedere l'effettiva efficienza del caso esaminato.

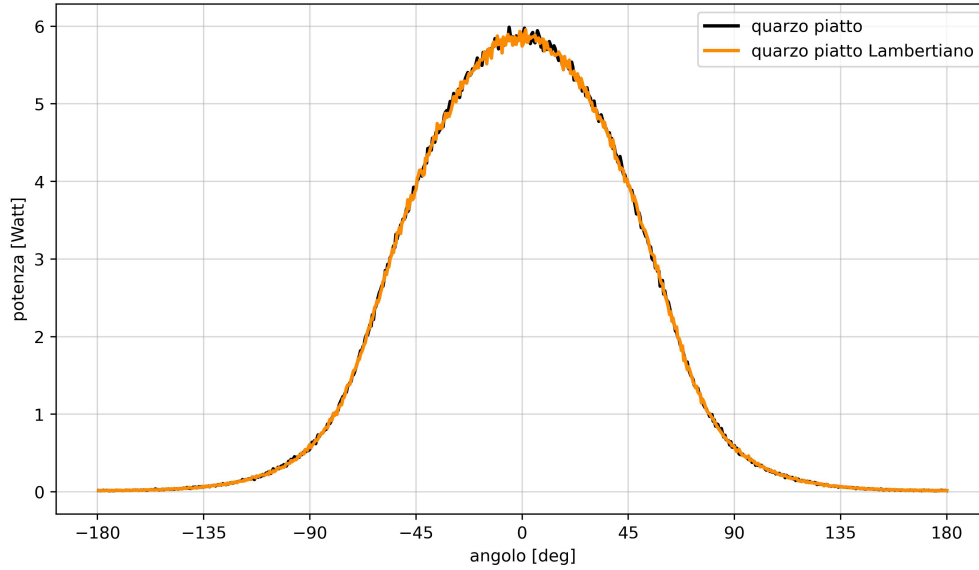


Figura 3.5: Andamento della potenza (W) assorbita dal detector rispetto all'angolo di posizionamento, nei casi classico e lambertiano.

3.2 Simulazioni fluidodinamiche

Nelle simulazioni fluidodinamiche, eseguite dall'INAF, il flusso è stato ipotizzato sempre come turbolento e le gocce d'acqua, portatrici dei patogeni, sono state approssimate a sfere con un diametro compreso tra $0.5 \mu\text{m}$ e $25 \mu\text{m}$.^{41,42} Nello specifico sono state fatte simulazioni per particelle di diametro $d_1 = 0.5 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$ e $d_3 = 25 \mu\text{m}$. Le simulazioni sono state eseguite rispetto ad un flusso di $460 \text{ m}^3/\text{h}$ e un flusso di $230 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3 Risultati della fluenza

Una volta ottenuti i risultati di entrambe le simulazioni si sono trovati i valori finali della Fluenza rispetto alle diverse lenti e ai due valori di flusso differenti. In Tabella 3.1 sono riportati i risultati della fluenza rispetto al flusso di $460 \text{ m}^3/\text{h}$ e in Tabella 3.2 rispetto al flusso di $230 \text{ m}^3/\text{h}$.

FLUSSO $460\text{ m}^3/h$	Fluenza con $d_1\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza con $d_2\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza con $d_3\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza media (mJ/cm^2)
Lente piatta	11.65	11.77	11.80	11.74
Lente 1	7.46	7.51	7.47	7.48
Lente 2	11.64	11.74	11.67	11.68
Shell 1	13.17	13.27	13.25	13.23
Shell 2	13.25	13.36	13.33	13.36
Prisma 1	2.95	2.98	2.97	2.97
Prisma 2	5.36	5.41	5.39	5.39
Lente piatta L	13.36	13.33	13.26	13.32

Tabella 3.1: Fluenza ottenuta per un flusso di $460\text{ m}^3/h$ rispetto alle diverse forme dell'anello di quarzo e ai diversi diametri $d_1 = 0.5\ \mu\text{m}$, $d_2 = 1\ \mu\text{m}$ e $d_3 = 25\ \mu\text{m}$. L'ultima riga riporta i valori nel caso della superficie esterna dell'anello con effetto lambertiano.

FLUSSO $230\text{ m}^3/h$	Fluenza con $d_1\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza con $d_2\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza con $d_3\text{ (mJ/cm}^2\text{)}$	Fluenza media (mJ/cm^2)
Lente piatta	23.50	23.22	23.45	23.39
Lente 1	14.96	14.89	14.93	14.93
Lente 2	23.39	23.24	23.36	23.33
Shell 1	26.54	26.30	26.40	26.41
Shell 2	26.70	26.49	26.59	26.41
Prisma 1	5.93	5.89	5.86	5.89
Prisma 2	10.77	10.71	10.70	10.73
Lente piatta L	26.66	26.46	26.51	26.54

Tabella 3.2: Fluenza ottenuta per un flusso di $230\text{ m}^3/h$ rispetto alle diverse forme dell'anello di quarzo e ai diversi diametri $d_1 = 0.5\ \mu\text{m}$, $d_2 = 1\ \mu\text{m}$ e $d_3 = 25\ \mu\text{m}$. L'ultima riga riporta i valori nel caso della superficie esterna dell'anello con effetto lambertiano.

Dai valori riportati nelle due tabelle, lasciando momentaneamente da parte i risultati delle variazioni lambertiane, possiamo trarre alcune considerazioni sulle efficienze delle diverse lenti, valide per entrambe le condizioni di flusso:

- nel caso delle due lenti, i diversi raggi di curvatura fanno la differenza, infatti in corrispondenza del raggio di curvatura minore R_1 si rileva un netto peggioramento dei risultati, mentre in corrispondenza di R_2 i valori della fluenza sono più vicini a quelli della finestra di partenza;
- per quanto riguarda le shell, cioè le finestre dal profilo semicircolare cave, invece, non si evidenzia una sostanziale differenza di valori a seguito della variazione dei raggi di curvatura, mentre si può notare un miglioramento del 13% circa rispetto al caso iniziale, cosa che può risultare utile nell'inattivazione di un maggior numero di batteri e funghi che, come abbiamo riportato alla fine della Sezione 1.3, hanno un D-value maggiore dei virus e necessitano quindi di una fluenza maggiore per essere inattivati al 90 %;
- infine, relativamente ai due prismi, i valori della fluenza sono molto più bassi rispetto alla lente di partenza.

Inoltre si può notare che le differenze di risultati in base al diametro delle particelle sono minime.

Confrontando invece i valori rispetto ai due flussi, si può notare come la fluenza di tutte le lenti aumenti in corrispondenza del flusso più basso, ovvero $230 m^3/h$. Questo perché, dal momento che la sezione del condotto è sempre la stessa per entrambe le simulazioni fluidodinamiche, a flussi minori corrispondono velocità minori e quindi un maggiore tempo di permanenza dell'aria all'interno del condotto. Ciò corrisponde ad una maggiore esposizione dei patogeni ai raggi ultravioletti e conseguentemente ad una maggiore probabilità che vengano inattivati.

Infine è stata calcolata la fluenza nel caso della modifica lambertiana alla superficie esterna della finestra di quarzo nel caso della lente piatta. I risultati sono riportati nell'ultima riga delle Tabelle 3.1 e 3.2. Si può notare che per entrambe le condizioni di flusso i valori della fluenza sono migliori per le superfici lambertiane, questo può essere dovuto ad una migliore distribuzione dei raggi all'interno del condotto. Come detto precedentemente, questo miglioramento può non essere visto dalle sole simulazioni ottiche, di cui sono stati fatti i grafici precedentemente, perché si utilizza un dato di potenza sommata su tutto il detector e non i valori singoli per ogni voxel.

Conclusioni

Lo studio sulla sanificazione dell'aria tramite raggi ultravioletti potrebbe essere molto utile man mano che le missioni spaziali aumenteranno di durata. Non è una novità l'utilizzo delle sorgenti ultraviolette per disinfettare aria, acqua e superfici, e l'ultravioletto non è l'unico modo per disinfettare le stazioni spaziali. Si è proposto questo metodo per la facilità di fruizione della sorgente in questione, essendo nello spazio e disponendo gratuitamente della radiazione solare che nel suo spettro ha anche la radiazione ultravioletta.

Nel progetto SAILOR Moon si propone un metodo per concentrare le radiazioni UVC attraverso specchi parabolici, il tutto posto sulla sommità di possibili basi costruite sulla Luna.

In questa tesi, dalla struttura di partenza, ovvero dal progetto portato avanti dall'INAF, si sono fatte alcune modifiche sulla finestra attraverso cui i raggi entrano nel condotto di aerazione. Si sono trovate alcune lenti più efficaci di altre nella trasmissione dei raggi, queste rendono quindi più efficiente il sistema germicida. In particolare si è trovato che shell dal profilo semicircolare migliorano di circa il 13 % l'efficienza del filtro a UVC. Un ulteriore studio su queste lenti potrebbe essere quello di utilizzarle modificando anche altri parametri di costruzione del concentratore, come accennato precedentemente, ma queste indagini vengono lasciate al futuro.

Altre modifiche sulla texture della superficie della finestra sono state testate nel caso dell'anello piatto iniziale ed hanno portato un leggero miglioramento della fluenza.

In conclusione il progetto SAILOR Moon è un sistema per convogliare la luce con una lunghezza d'onda definita all'interno di un condotto, questo può essere utilizzato come nel caso proposto per disinfettare l'aria delle abitazioni spaziali ma può essere utilizzato anche, cambiando la lunghezza d'onda e i rivestimenti riflettenti, per ottenere effetti diversi, come ad esempio il miglioramento di alcune colture idroponiche usando gli UVA e gli UVB.

Bibliografia

- [1] Marshall Smith et al. «The artemis program: An overview of nasa’s activities to return humans to the moon». In: *2020 IEEE Aerospace Conference*. IEEE. 2020, pp. 1–10.
- [2] Roberto Rugani et al. «Moon Village: main aspects and open issues in lunar habitat thermoenergetics design. A Review». In: *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE. 2021, pp. 1–6.
- [3] Gerda Horneck, David M Klaus e Rocco L Mancinelli. «Space microbiology». In: *Microbiology and molecular biology reviews* 74.1 (2010), pp. 121–156.
- [4] Duane L Pierson et al. «Microbial monitoring of the international space station». In: *8th International Workshop on Space Microbiology*. JSC-CN-28760. 2013.
- [5] Leonard A Mermel. «Infection prevention and control during prolonged human space travel». In: *Clinical infectious diseases* 56.1 (2013), pp. 123–130.
- [6] Nicholas G Reed. «The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection». In: *Public health reports* 125.1 (2010), pp. 15–27.
- [7] Wladyslaw Kowalski. *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Springer science & business media, 2010.
- [8] Arthur Downes e TP Blunt. «The influence of light upon the development of bacteria». In: *Nature* 16.402 (1877), p. 218.

- [9] Thomas P Coohill e Jose-Luis Sagripanti. «Overview of the inactivation by 254 nm ultraviolet radiation of bacteria with particular relevance to biodefense». In: *Photochemistry and photobiology* 84.5 (2008), pp. 1084–1090.
- [10] Sara E Beck et al. «Comparison of UV-induced inactivation and RNA damage in MS2 phage across the germicidal UV spectrum». In: *Applied and environmental microbiology* 82.5 (2016), pp. 1468–1474.
- [11] James R Bolton e Christine Anne Cotton. *The ultraviolet disinfection handbook*. American Water Works Association, 2011.
- [12] Philip W Brickner et al. «The application of ultraviolet germicidal irradiation to control transmission of airborne disease: bioterrorism countermeasure.» In: *Public Health Reports* 118.2 (2003), p. 99.
- [13] William J Waddell. «A simple ultraviolet spectrophotometric method for the determination of protein». In: *The Journal of laboratory and clinical medicine* 48.2 (1956), pp. 311–314.
- [14] Kouji Narita et al. «Ultraviolet C light with wavelength of 222 nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens». In: *Journal of Hospital Infection* 105.3 (2020), pp. 459–467.
- [15] Byung Uk Lee et al. «Life comes from the air: A short review on bioaerosol control». In: *Aerosol and Air Quality Research* 11.7 (2011), pp. 921–927.
- [16] Do-Kyun Kim e Dong-Hyun Kang. «UVC LED irradiation effectively inactivates aerosolized viruses, bacteria, and fungi in a chamber-type air disinfection system». In: *Applied and environmental microbiology* 84.17 (2018), e00944–18.
- [17] Yoram Gerchman et al. «UV-LED disinfection of Coronavirus: Wavelength effect». In: *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 212 (2020), p. 112044.
- [18] James J McDevitt, Stephen N Rudnick e Lewis J Radonovich. «Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light». In: *Applied and environmental microbiology* 78.6 (2012), pp. 1666–1669.

- [19] Chun-Chieh Tseng e Chih-Shan Li. «Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation». In: *Aerosol Science and Technology* 39.12 (2005), pp. 1136–1142.
- [20] Lisa Eisenlöffel et al. «Impact of UVC-sustained recirculating air filtration on airborne bacteria and dust in a pig facility». In: *PloS one* 14.11 (2019), e0225047.
- [21] Marcus M Jensen. «Inactivation of airborne viruses by ultraviolet irradiation». In: *Applied microbiology* 12.5 (1964), pp. 418–420.
- [22] Kevin Ryan et al. «Inactivation of airborne microorganisms using novel ultraviolet radiation sources in reflective flow-through control devices». In: *Aerosol Science and Technology* 44.7 (2010), pp. 541–550.
- [23] Huihui Zhang et al. «Disinfection by in-duct ultraviolet lamps under different environmental conditions in turbulent airflows». In: *Indoor Air* 30.3 (2020), pp. 500–511.
- [24] Cole H Thatcher e Bradley R Adams. «Impact of surface reflection on microbial inactivation in a uv led treatment duct». In: *Chemical Engineering Science* 230 (2021), p. 116204.
- [25] Matteo Lombini et al. «Solar Ultraviolet Light Collector for Germicidal Irradiation on the Moon». In: (2022).
- [26] Sean Potter. *NASA identifies candidate regions for landing next Americans on Moon*. Ago. 2022. URL: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon>.
- [27] Mustapha Meftah et al. «SOLAR-ISS: A new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations». In: *Astronomy & Astrophysics* 611 (2018), A1.
- [28] Mara Biasin et al. «UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication». In: *Scientific Reports* 11.1 (2021), p. 6260.
- [29] Kazuko Sugimoto, Junichiro Otomo e Seiichiro Koda. «Wavelength dependence of the primary ozone formation in high-pressure o₂ and o₂/co₂ mixtures under irradiation from 232 to 255 nm». In: *The Journal of Physical Chemistry A* 107.7 (2003), pp. 1010–1017.

- [30] A-C Chevremont et al. «Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters». In: *Science of the Total Environment* 426 (2012), pp. 304–310.
- [31] Kai Song, Fariborz Taghipour e Madjid Mohseni. «Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs)». In: *Science of the Total Environment* 665 (2019), pp. 1103–1110.
- [32] Derrick P Grimmer. «A comparison of compound parabolic and simple parabolic concentrating solar collectors». In: *Solar Energy* 22.1 (1979), pp. 21–25.
- [33] Roland Winston, Lun Jiang e Melissa Ricketts. «Nonimaging optics: a tutorial». In: *Advances in Optics and Photonics* 10.2 (2018), pp. 484–511.
- [34] Xinglong Ma, Hongfei Zheng e Shuli Liu. «A review on solar concentrators with multi-surface and multi-element combinations». In: *Journal of Daylighting* 6.2 (2019), pp. 80–96.
- [35] Meng Tian et al. «A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), pp. 1272–1296.
- [36] Srikanth Madala e Robert F Boehm. «A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017), pp. 309–322.
- [37] Corning. *Corning HPFS 7979, 7980, 8655 Fused Silica. Corning HPFS 7979, 7980, 8655 Fused Silica*, 2014. [Online].
- [38] T. Quill et al. «Ultraviolet Reflectance of Microporous PTFE». In: *Proceedings of Porex Corporation*. 2016. URL: www.porex.com/wp-content/uploads/2020/04/Ultraviolet-Reflectance-of-Microporous-PTFE.pdf.
- [39] Matteo Lombini et al. «Optical design applied to an effective inactivation of airborne pathogens». In: *Optical Instrument Science, Technology, and Applications II*. Vol. 11876. SPIE. 2021, pp. 37–49.
- [40] Erik Seedhouse e Erik Seedhouse. «International space station life support system». In: *Life Support Systems for Humans in Space* (2020), pp. 151–179.

- [41] Marcelo I Guzman. «An overview of the effect of bioaerosol size in coronavirus disease 2019 transmission». In: *The International journal of health planning and management* 36.2 (2021), pp. 257–266.
- [42] Michael Gormley, Thomas J Aspray e David A Kelly. «Aerosol and bioaerosol particle size and dynamics from defective sanitary plumbing systems». In: *Indoor air* 31.5 (2021), pp. 1427–1440.
- [43] Christopher M Walker e GwangPyo Ko. «Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols». In: *Environmental science & technology* 41.15 (2007), pp. 5460–5465.
- [44] Gary R Allen, Kevin J Benner e William P Bahnfleth. «Inactivation of pathogens in air using ultraviolet direct irradiation below exposure limits». In: *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 126 (2021), pp. 1–24.
- [45] J Bruce Harstad, Herbert M Decker e AG Wedum. «Use of ultraviolet irradiation in a room air conditioner for removal of bacteria». In: *Applied Microbiology* 2.3 (1954), pp. 148–151.
- [46] Harvey C Rentschler e Rudolph Nagy. «Bactericidal action of ultraviolet radiation on air-borne organisms». In: *Journal of Bacteriology* 44.1 (1942), pp. 85–94.
- [47] Matthew Luckiesh et al. «Inactivation of molds by germicidal ultraviolet energy». In: *Journal of the Franklin Institute* 248.4 (1949), pp. 311–325.
- [48] Hiroshi Nakamura. «Sterilization efficacy of ultraviolet irradiation on microbial». In: *Bull. Tokyo Med. Dent. Univ* 34 (1987), pp. 25–40.
- [49] Qing Sheng Ke et al. «Development of a protocol for the determination of the ultraviolet sensitivity of microorganisms suspended in air». In: *Aerosol Science and Technology* 43.4 (2009), pp. 284–289.
- [50] Louise A Fletcher. «The influence of relative humidity on the UV susceptibility of airborne gram negative bacteria». In: *IUVA News* 6.1 (2004), pp. 12–19.
- [51] LR Koller. «Bactericidal effects of ultraviolet radiation produced by low pressure mercury vapor lamps». In: *Journal of Applied Physics* 10.9 (1939), pp. 624–630.

- [52] James M Beebe. «Stability of disseminated aerosols of *Pasteurella tularensis* subjected to simulated solar radiations at various humidities». In: *Journal of Bacteriology* 78.1 (1959), pp. 18–24.
- [53] RL Riley, M Knight e G Middlebrook. «Ultraviolet susceptibility of BCG and virulent tubercle bacilli». In: *American review of respiratory disease* 113.4 (1976), pp. 413–418.
- [54] Douglas VanOsdell e Karin Foarde. *Defining the effectiveness of UV lamps installed in circulating air ductwork*. Rapp. tecn. Air-Conditioning e Refrigeration Technology Institute, Arlington, VA (US . . . , 2002.
- [55] D Gordon Sharp. «The effects of ultraviolet light on bacteria suspended in air». In: *Journal of Bacteriology* 39.5 (1940), pp. 535–547.
- [56] Joseph J O’Gallagher. «Nonimaging optics in solar energy». In: *Synthesis Lectures on Energy and the Environment: Technology, Science, and Society* 2.1 (2008), pp. 1–120.
- [57] Giorgio Grasso et al. «Competitiveness of stationary planar low concentration photovoltaic modules using silicon cells: A focus on concentrating optics». In: *Solar Energy* 86.6 (2012), pp. 1725–1732.
- [58] IR Edmonds. «Prism-coupled compound parabola: a new ideal and optimal solar concentrator». In: *Optics Letters* 11.8 (1986), pp. 490–492.
- [59] Jung Min Kim e Partha S Dutta. «Optical efficiency–concentration ratio trade-off for a flat panel photovoltaic system with diffuser type concentrator». In: *Solar energy materials and solar cells* 103 (2012), pp. 35–40.