



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
MECCANICA E MECCATRONICA**

TESI DI LAUREA

**ESTENSIONE DEL RANGE DI MISURA DI
UNO SPETTRO RADIOMETRO NELL' IR
MEDIANTE ESTRAPOLAZIONE**

Relatore: Ch.mo Prof./Ing. DIEGO DAINESE

Correlatore: Ing. GIULIANO ROSATI

Laureando: ALESSIO ANNESI

Matricola: 1045988-IMM

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

Sommario

Il suddetto documento ha come scopo quello di ampliare il range di misura di uno spettro radiometro per eseguire una più accurata analisi dal punto di vista della sicurezza sia del macchinario, sia dell'operatore.

Questi strumenti sono attualmente in grado effettuare misurazioni di radianza e irradianza all'interno di un certo spettro che va da 250nm a 1000nm, tuttavia in alcuni casi è necessario estendere il range di misura anche nella parte infrarossa definita da IRA (700-1400) nm e IRB (1400-3000) nm.

Per le sorgenti che sono assimilabili al corpo nero, sappiamo che vale la legge di Stefan-Boltzmann secondo cui l'irradianza è proporzionale alla temperatura del corpo nero stesso e che lo spettro generato ha la tipica caratteristica forma a campana con il massimo che dipende unicamente dalla sua temperatura, come dimostrato dalla legge di Wien.

Il problema è stato risolto eseguendo una simulazione del comportamento dello spettro di una sorgente a partire da una serie di misurazioni precedentemente raccolte in ambienti reali, mediante un foglio di calcolo.

Indice

	PAGINA
1 INTRODUZIONE	7
1.1 Radiazioni ottiche	7
1.2 Effetti delle ROA sull'uomo.....	8
1.3 Definizioni e concetti importanti	9
1.4 Applicazione direttiva macchine 2006/25/CE	11
1.4.1 Protezione del macchinario.....	15
1.4.2 Criteri di scelta dei DPI per la protezione di occhi e viso.....	16
2 SIMULAZIONE	19
2.1 Premesse e caso preso in esame: il colatore	19
2.2 Sviluppo del foglio di calcolo.....	21
2.3 Considerazioni finali.....	26
3 ANALISI DEL RISCHIO.....	27
3.1 Premesse	27
3.2 Piano di lavoro.....	28
3.3 Condizioni per la valutazione	29
3.4 Fonti utilizzabili per la misurazione	32
3.5 Esempio applicativo: il colatore	34
3.6 Soluzione e considerazioni finali.....	39
4 CONCLUSIONE	41
BIBLIOGRAFIA	43

1.Introduzione

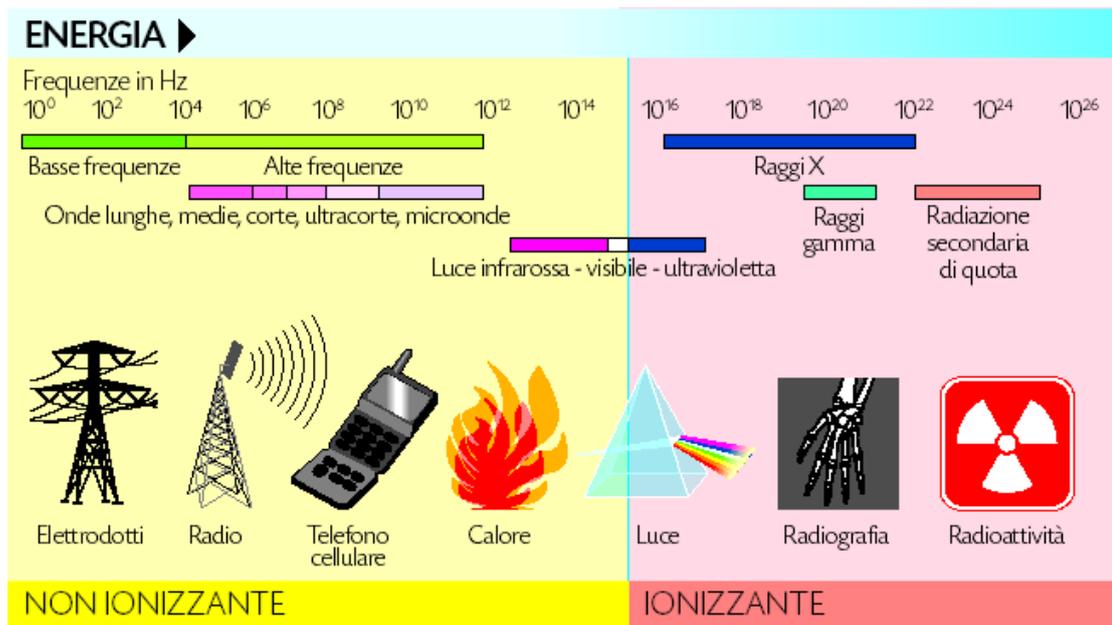
1.1 Radiazioni ottiche

La direttiva 2006/25/CE del parlamento europeo e del consiglio definisce radiazioni ottiche, tutte le radiazioni elettromagnetiche nella gamma di lunghezza d'onda compresa tra 100 nm e 1 mm. Si dicono radiazioni *ionizzanti* quelle aventi un'energia tale da strappare gli elettroni dal nucleo di un atomo di un certo elemento, mentre chiameremo *non ionizzanti* quelle che non mutano la struttura atomica del materiale che irradiano. Queste, ai fini protezionistici, sono a loro volta suddivise in:

-**Radiazioni ultraviolette:** radiazioni ottiche di lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nm. La banda degli ultravioletti è suddivisa in UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) e UVC (100-280 nm);

-**Radiazioni visibili:** radiazioni ottiche di lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nm;

-**Radiazioni infrarosse:** radiazioni ottiche di lunghezza d'onda compresa tra 780 nm e 1 mm. La regione degli infrarossi è suddivisa in IRA (780-1400 nm), IRB (1400-3000 nm) e IRC (3000 nm – 1 mm).



Le sorgenti di radiazioni ottiche possono inoltre essere classificate in coerenti e non coerenti.

Le prime emettono radiazioni in fase fra di loro (i minimi e i massimi delle radiazioni coincidono), e sono generate da LASER, mentre le seconde emettono radiazioni sfasate e sono generate da tutte le altre sorgenti non LASER e dal Sole, come ad esempio tutto ciò che viene emesso da lampadine alogene, metalli fusi e da processi di saldatura.

Tutte le radiazioni ottiche non generate dal Sole sono di origine artificiale, cioè sono generate artificialmente da apparati e non dal Sole e in letteratura prendono il nome di *radiazioni ottiche artificiali (ROA)*.

1.2 Effetti delle ROA sull'uomo

I principali effetti dovuti all'esposizione alle radiazioni ottiche artificiali, riguardano localmente pelle e occhio. Una particolare combinazione di tipo di radiazione e tempo di esposizione può portare all'ustione della cute e alla perdita della vista.

Uno degli obiettivi principali di questo documento è proprio quello di prevedere la presenza di radiazioni e di determinare il comportamento dell'irradianza in funzione della lunghezza d'onda per poi arrivare a prescrivere i *dispositivi di protezione individuale* e a determinare se i *requisiti essenziali di sicurezza* del macchinario sono rispettati.

Il D.lgs 81/2008, o Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro, al Capo V evidenzia che l'operatore deve essere protetto da eventuali danni alla salute che possono essere determinate dall'esposizione a radiazioni ottiche, in particolare:

“Il presente capo stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la salute e la sicurezza che possono derivare, dall'esposizione alle radiazioni ottiche artificiali durante il lavoro con particolare riguardo ai rischi dovuti agli effetti nocivi sugli occhi e sulla cute.”

Di seguito viene esposta una tabella in grado di riassumere tutti i principali effetti su occhio e cute, in base alla lunghezza d'onda del raggio incidente (Fig. 1.2).

Lunghezza d'onda (nm)	Tipo	Occhio	Pelle	
100 - 280	UV C	fotokeratite foto congiuntivite	Eritema (scottatura della pelle)	Tumori cutanei Processo accelerato di invecchiamento della pelle
280 - 315	UV B			
315 - 400	UV A	cataratta fotochimica	Reazione di foto sensibilità	
400 - 780	Visibile	lesione fotochimica e termica della retina		Bruciatura della pelle
780 - 1400	IR A	cataratta bruciatura della retina		
1400 - 3000	IR B	cataratta, bruciatura della cornea		
3000 - 10600	IR C	bruciatura della cornea		

Fig.1.2 Effetti delle ROA sull'uomo.

Ci sono, tuttavia, dei casi da specificare e che richiedono un approfondimento ulteriore per non incorrere eventuali errori che potrebbero rendere errata la valutazione del rischio.

Come riporta il testo unico di sicurezza, è necessario conoscere perfettamente la planimetria dell'azienda in cui si andrà ad applicare tutte le misure di protezione, in particolar modo occorre sapere la posizione precisa delle sorgenti.

Nella maggior parte dei casi, ci troveremo a discutere la nostra relazione in un luogo di lavoro che presenta molti macchinari, dunque è da valutare che l'operatore sarà esposto, almeno, anche alle radiazioni emesse dalle sorgenti subito in prossimità.

All'atto pratico, se un macchinario, da solo, potrebbe risultare conforme e quindi entro i limiti prescritti dalla legge, spostandoci in un ambiente aziendale, ove risultano presenti molti macchinari con cui l'operaio si troverà ad interagire contemporaneamente, si dovrà tener conto di eventuali sovrapposizioni per cui la postazione lavorativa potrebbe non essere più sicura.

A tal proposito, per potere valutare i lavoratori a rischio e la loro effettiva esposizione è importante acquisire anche i tempi, le distanze e le modalità di esposizione per le sorgenti non coerenti, per poi procedere al confronto con i valori limite di esposizione.

1.3 Definizioni e concetti importanti

Tutte le considerazioni che faremo di seguito, sono valide solo grazie ad un'approssimazione molto importante che riguarda la sorgente. Questa, infatti, viene considerata un *corpo nero*, ovvero un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente, senza rifletterla.

Lo spettro di un corpo nero si può rappresentare in un grafico che fornisce la densità della radiazione emessa in funzione della lunghezza d'onda. Si possono notare delle curve a campana che presentano un picco di radianza spettrale, per una certa lunghezza d'onda, che si sposta verso sinistra e verso l'alto tanto più elevata è la temperatura della sorgente (Fig. 1.3).

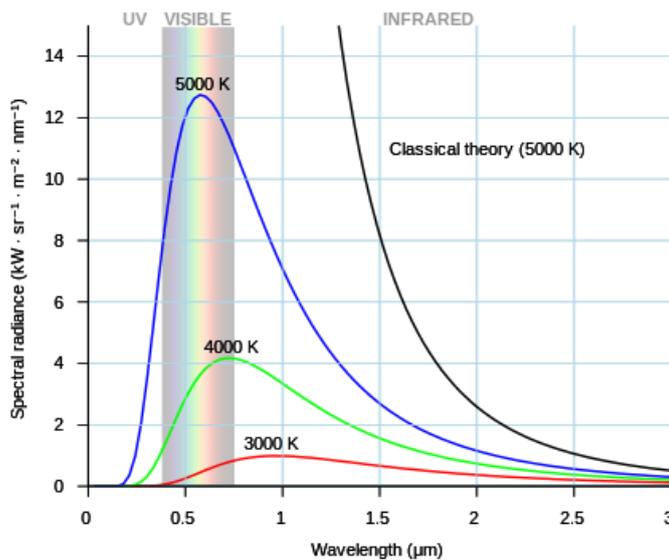


Fig 1.3 Andamento delle curve di Planck per il corpo nero. In ascissa la lunghezza d'onda, in ordinata l'intensità della radiazione.

Proprio questo picco può essere determinato dalla **legge di Wien**, più precisamente ci consente di trovare la lunghezza d'onda λ_{max} per la quale è massima l'emissione radiante di un corpo nero ad una certa temperatura T.

$$T \cdot \lambda_{max} = b$$

$$b = \frac{h \cdot c}{k_B \cdot [5 + W \cdot (-5e^{-5})]}$$

- T temperatura assoluta in K;
- λ_{\max} lunghezza d'onda espressa in metri per la quale è massima la radiazione emessa dal corpo;
- h costante di Plank;
- c la velocità della luce nel vuoto;
- k_B la costante di Boltzmann;
- $W(x)$ la funzione di Lambert.

Da questa legge fondamentale si riesce a dedurre il colore della radiazione emessa dalla nostra sorgente al variare della temperatura a cui si trova, il problema è proprio che non tutte le radiazioni emesse sono visibili e quindi ci sarà la necessità di studiarne lo spettro mediante simulazione.

Un'altra relazione che ci aiuta proprio da questo punto di vista è la **legge di Stefan-Boltzmann** che stabilisce che l'emittanza di un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura.

$$q = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = \frac{\pi^2 \cdot k^4}{60 \cdot \hbar^3 \cdot c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

- q emittanza termica;
- T temperatura assoluta;
- σ costante di Stefan-Boltzmann;

Mentre in questa formula compare l'emittanza termica o potenza emessa dal corpo nero per unità di superficie; noi andremo a studiare invece la **radianza** (L) che corrisponde alla quantità di energia emessa dalla sorgente per unità di superficie e di angolo solido. Si dice **irradianza** (E), invece, la quantità di energia che arriva all'oggetto irradiato per unità di superficie.

L'esposizione è funzione sia dell'energia che parte dalla sorgente, sia dalla distanza a cui ci troviamo da essa, ma mentre l'energia emessa è sempre la stessa, quella che arriva al nostro occhio dipende dalla distanza. Si introduce quindi un'altra grandezza che prende il nome di **esposizione radiante** (H) da cui dipende tutto lo studio sulla sicurezza sia per quanto riguarda il macchinario su cui deve lavorare il soggetto, sia sull'osservatore.

1.4 Applicazione direttiva macchine 2006/25/CE

Una volta descritti con precisione tutti i rischi che queste radiazioni ottiche possono provocare sull'uomo in funzione della distanza dalla sorgente e del tempo di esposizione, in termini quindi di irradianza ed esposizione radiante, si deve procedere alla *valutazione del rischio*.

Con il D.lgs 17/2010 la direttiva macchine viene recepita e diventa legge con conseguenti obblighi da parte del datore di lavoro che deve adoperarsi per proteggere i propri operai e, se necessario, ha il dovere di effettuare misurazioni delle radiazioni ottiche a cui si può essere esposti in modo da identificare e mettere in pratica le misure richieste per ridurre l'esposizione ai limiti applicabili. Per quanto concerne le grandezze da tenere in considerazione durante la valutazione del rischio, la direttiva macchine rimanda all'articolo 6, paragrafo 3 della direttiva 89/391/CEE.

- a) il livello, la gamma di lunghezze d'onda e la durata dell'esposizione a sorgenti artificiali di radiazioni ottiche;
- b) i valori limite di esposizione di cui all'articolo 3 della presente direttiva;
- c) qualsiasi effetto sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori appartenenti a gruppi a rischio particolarmente esposti;
- d) qualsiasi eventuale effetto sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori risultante dalle interazioni sul posto di lavoro tra le radiazioni ottiche e le sostanze chimiche foto-sensibilizzanti;
- e) qualsiasi effetto indiretto come l'accecamento temporaneo, le esplosioni o il fuoco;
- f) l'esistenza di attrezzature di lavoro alternative progettate per ridurre i livelli di esposizione alle radiazioni ottiche artificiali;
- g) per quanto possibile, informazioni adeguate raccolte nel corso della sorveglianza sanitaria, comprese le informazioni pubblicate;
- h) sorgenti multiple di esposizione alle radiazioni ottiche artificiali;
- i) una classificazione dei laser stabilita conformemente alla pertinente norma IEC e, in relazione a tutte le sorgenti artificiali che possono arrecare danni simili a quelli di un laser della classe 3B o 4, tutte le classificazioni analoghe;
- j) le informazioni fornite dai fabbricanti delle sorgenti di radiazioni ottiche e delle relative attrezzature di lavoro in conformità delle pertinenti direttive comunitarie.

Di seguito si riportano le formule per calcolare tutte queste grandezze fondamentali con i relativi limiti ricavati direttamente dalla direttiva.

$$H_{\text{eff}} = \int_0^t \int_{\lambda = 180 \text{ nm}}^{\lambda = 400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{eff}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 180 a 400 nm})$$

$$H_{\text{UVA}} = \int_0^t \int_{\lambda = 315 \text{ nm}}^{\lambda = 400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{UVA}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 315 a 400 nm})$$

$$L_B = \int_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{\lambda = 700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (L_B \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm})$$

$$E_B = \int_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{\lambda = 700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (E_B \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm})$$

$$L_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$E_{\text{IR}} = \int_{\lambda = 780 \text{ nm}}^{\lambda = 3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (E_{\text{IR}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 780 a 3 000 nm})$$

$$H_{\text{skin}} = \int_0^t \int_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{\lambda = 3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{skin}} \text{ è pertinente solo nell'intervallo da 380 a 3 000 nm})$$

Fig. 1.4-1 Grandezze principali per l'analisi del rischio

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (J/m ²)
Fotocheratite Congiuntivite Catarattogenesi Eritema Elastosi Tumore cute	180-400	S	H _{eff} = 30 valore giornaliero 8h
Catarattogenesi	315-400	-	H _{UVA} = 10 ⁴ valore giornaliero 8h
Ustione cute	380-3000	-	H _{skin} = 2*10 ⁴ *t ^{0,25} Per t < 10s H _{skin} = 35566 Per t > 10s

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (W/m ²)
Fotoretinite	300-700	B	E _B = 100/t per t < 10 ⁴ s E _B = 0,01 per t > 10 ⁴

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (W/m ² *SR)	Limite irradianza (W / m ²)
Ustione della retina	380 - 1400	R (C _α = 11)	L _R = 2,8*10 ⁷ / C _α Per t > 10s L _R = 5*10 ⁷ /(C _α *t ^{0,25}) Per 10μs < t < 10s L _R = 8,89*10 ⁸ / C _α Per t < 10μs	10,879 @3m dalla sorgente
Ustione della retina	780 - 1400	R (C _α = 11)	L _R = 6*10 ⁶ / C _α Per t > 10s L _R = 5*10 ⁷ /(C _α *t ^{0,25}) Per 10μs < t < 10s L _R = 8,89*10 ⁸ / C _α Per t < 10μs	2,33 @3m dalla sorgente

Fig. 1.4-2 Limiti delle grandezze fondamentali per la valutazione del rischio

Significato delle grandezze in gioco.

- H_{eff} esposizione radiante efficace ponderata spettralmente con S (λ), espressa in J/m²;
- S (λ) fattore di peso spettrale: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda degli effetti sulla salute delle radiazioni UV sull'occhio e sulla cute (adimensionale);
- B (λ) ponderazione spettrale: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda della lesione fotochimica provocata all'occhio dalla radiazione di luce blu (adimensionale);
- R (λ) fattore di peso spettrale: tiene conto della dipendenza dalla lunghezza d'onda delle lesioni termiche provocate sull'occhio dalle radiazioni visibili e IRA (adimensionale);

- H_{UVA} esposizione radiante determinata dall'integrale o la somma nel tempo e nella lunghezza d'onda dell'irradianza nell'intervallo di lunghezza d'onda UVA da 315 a 400 nm, espressa in J/m^2 ;

- H_{skin} esposizione radiante determinata dall'integrale o la somma nel tempo e nella lunghezza d'onda dell'irradianza nell'intervallo di lunghezza d'onda visibile e dell'infrarosso da 380 nm a 3000 nm, espressa in J/m^2 ;

- E_B irradianza efficace (luce blu): irradianza calcolata ponderata spettralmente con $B(\lambda)$ espressa in W/m^2 ;

- L_R radianza efficace (lesione termica): radianza calcolata ponderata spettralmente con $R(\lambda)$, espressa in $W/m^2 \cdot SR$.

In caso i limiti stabiliti dalla suddetta direttiva dovessero essere superati, il datore di lavoro ha l'obbligo di attuare le misure necessaria a ridurre, almeno in parte, gli effetti delle ROA sui lavoratori. In particolare deve essere in grado di fornire gli adeguati *dispositivi di protezione individuale* e di far sì che i macchinari dell'azienda rispettino i *requisiti essenziali di sicurezza*.

Proprio l'allegato 1 del D.lgs 17/2010 parla dei R.E.S da applicare nel caso di radiazioni ottiche artificiali nel paragrafo 1.5.10.

“Le emissioni indesiderabili di radiazioni da parte della macchina devono essere eliminate o essere ridotte a livelli che non producono effetti negativi sulle persone. Ogni emissione di radiazioni ionizzanti funzionali deve essere ridotta al livello minimo sufficiente per il corretto funzionamento della macchina durante la regolazione, il funzionamento e la pulitura. Qualora sussistano rischi si devono prendere le necessarie misure di protezione. Ogni emissione di radiazioni non ionizzanti funzionali durante la regolazione, il funzionamento e la pulitura deve essere ridotta a livelli che non producono effetti negativi sulle persone.”

Da questo passo della direttiva macchine si evince che il datore di lavoro è obbligato ad adattare la macchina per ridurre al minimo tutti i rischi derivanti dall'emissione di radiazione nociva.

Ad esempio, l'applicazione di un vetro protettivo, può attenuare anche notevolmente, l'emissione radiante del nostro macchinario e quindi rendere tutto conforme dal punto di vista dei limiti visti in Fig. 1.4-2.

1.4.1 Protezione del macchinario

Il *testo unico di sicurezza* o D.lgs 81/2008 rimanda alla norma UNI EN 12198-1:2009 per quanto riguarda la valutazione e la riduzione dei rischi generati dalle radiazioni emesse dal macchinario. Si va dunque ad assegnare una categoria alla sorgente in funzione dell'irradianza E e, in base al risultato trovato, si dovranno applicare diverse misure di protezione, informazione e addestramento del personale.

Categoria	E (700nm-1mm) [Wm ⁻²]	Restrizioni e misure di protezione	Informazione e formazione
0	$E \leq 33$	Nessuna restrizione	Nessuna informazione necessaria
1	$33 < E \leq 100$	Restrizioni: accesso limitato, possono essere necessarie misure di protezione	Il fabbricante deve fornire informazioni sui pericoli, sui rischi e sugli effetti secondari
2	$E > 100$	Restrizioni speciali e misure di protezione sono indispensabili	Il fabbricante deve fornire informazioni sui pericoli, sui rischi e sugli effetti secondari. Formazione eventualmente necessaria

Tabella 1.4 Categoria delle sorgenti che emettono ROA.

Le macchine rientranti nelle categorie 1 e 2 devono riportare una marcatura specifica comprendente i seguenti elementi:

- il segnale di sicurezza rappresentante il tipo di emissione di radiazione come riportato in Fig. 1.4;
- il numero di categoria (categoria 1 o categoria 2);
- il riferimento alla norma UNI EN 12198:2009.



Fig. 1.4 Segnaletica da applicare ad un macchinario che dovrà essere seguita dal numero di categoria e dalla norma di riferimento

1.4.2 Criteri di scelta dei DPI per la protezione di occhi e viso

Innanzitutto occorre verificare, ai fini della valutazione del rischio, se la sorgente è *giustificabile* o meno. Si dicono *giustificabili* tutte quelle sorgenti che non provocano danni alla salute dell'operatore e possono dunque essere tralasciate ai fini della valutazione del rischio.

Queste sono tutte le sorgenti intrinsecamente sicure, di cui fanno parte tutte quelle che:

- nelle condizioni di normale utilizzo, emettono radiazioni ottiche che non danno luogo ad esposizioni tali da determinare rischi per la salute e per la sicurezza;
- danno luogo ad emissioni accessibili *insignificanti*.

Se l'esposizione determinata da una data sorgente è inferiore al 20% del pertinente limite di esposizione, è da considerarsi innocua o giustificabile; se invece sono presenti più sorgenti, il contributo di ciascuna dovrà essere inferiore allo stesso valore limite diviso il numero di sorgenti a cui si è esposti.

Secondo la norma UNI EN 12198:2009, si dicono giustificabili tutte le apparecchiature che emettono radiazione ottica non coerente classificate nella categoria 0.

Per quanto concerne la protezione degli operatori, una volta effettuate tutte le verifiche e applicate tutte le misure attuabili per l'eliminazione o la riduzione dei rischi, il datore di lavoro ha l'obbligo di adottare anche i dispositivi di protezione degli occhi e del viso più efficaci per contrastare i tipi di rischio presenti. Per la protezione di occhi e viso si utilizzano occhiali con oculare doppio o singolo, maschere munite di visiera e ripari facciali (per saldatura o altro uso).

I dispositivi di protezione individuale atti a proteggere l'operatore da tutti questi rischi sono ampiamente descritti dalle norme in tabella 1.4

Norme	Argomento
UNI EN 166: 2004	Protezione personale dagli occhi - Specifiche
UNI EN 167: 2003	Protezione personale degli occhi - Metodi di prova ottici
UNI EN 168: 2003	Protezione personale degli occhi - Metodi di prova non ottici
UNI EN 169: 2003	Protezione personale degli occhi – Filtri per saldatura e tecniche connesse – Requisiti di trasmissione e utilizzazioni raccomandate
UNI EN 170: 2003	Protezione personale degli occhi - Filtri ultravioletti - Requisiti di trasmissione e utilizzazioni raccomandate
UNI EN 171: 2003	Protezione personale degli occhi - Filtri infrarossi – Requisiti di trasmissione e utilizzazioni raccomandate
UNI EN 172: 2003	Protezione personale degli occhi - Filtri solari per uso industriale
UNI EN 175: 1999	Protezione personale degli occhi – Equipaggiamenti di protezione degli occhi e del viso durante la saldatura e i procedimenti connessi
UNI EN 379: 2004	Protezione personale degli occhi – Filtri automatici per saldatura

UNI 10912: 2000	Dispositivi di protezione individuale - Guida per la selezione, l'uso e la manutenzione dei dispositivi di protezione degli occhi e del viso per attività lavorative
UNI EN ISO 13688:2013	Indumenti di protezione - requisiti generali
UNI EN ISO 6942:2004	Indumenti di protezione - Protezione contro il calore e il fuoco - Metodo di prova: valutazione dei materiali e materiali assemblati quando esposti ad una sorgente di calore radiante
UNI EN ISO 9185:2008	Indumenti di protezione - Valutazione della resistenza dei materiali allo spruzzo di metallo fuso

Tabella 1.4 Norme di riferimento per la protezione da ROA

I DPI devono essere destinati a prevenire gli effetti dannosi sull'occhio e sulla cute di queste radiazioni ottiche artificiali, assorbendo la maggior parte dell'energia irradiata nelle lunghezze d'onda nocive. Non devono, tuttavia, alterare la percezione dei colori e dei contrasti, dove richiesto e le lenti non devono deteriorarsi o perdere le loro proprietà assorbenti nelle normali condizioni di utilizzo. Tutti questi dispositivi di protezione degli occhi e del viso da radiazioni, appartengono almeno alla categoria II del D.lgs.vo 475-92 sui dispositivi di protezione individuale, come si evince dall'articolo 4 e pertanto comportano l'obbligo di formazione specifica all'uso. I dispositivi di protezione degli occhi e del viso, oltre alla marcatura CE, devono avere obbligatoriamente la marcatura specifica sia dell'oculare che della montatura, entrambe rappresentate da una sequenza orizzontale di lettere e numeri che stanno ad indicare le capacità protettive e le caratteristiche delle due parti del dispositivo.

Occorre inoltre ricordare che si deve garantire la protezione totale dell'operatore, il quale si avvale di DPI che non riguardano solamente la protezione di occhi e volto. Per esempio, nelle lavorazioni che comportano l'esposizione dell'operatore a radiazioni emesse da archi elettrici o comunque con lunghezza d'onda tra radiazioni UV e infrarosse, la protezione si attua prescrivendo al lavoratore di utilizzare, oltre alle consuete visiere od occhiali, oppure elmetti, anche i guanti da saldatore e vestiario termico.

Il datore di lavoro ha l'obbligo di formare gli operatori proprio quando la valutazione del rischio non può concludersi con la cosiddetta giustificazione delle sorgenti e quindi di non dover attuare ulteriori verifiche in quanto i limiti prescritti dalla direttiva potrebbero essere superati.

Si deve principalmente informare sul tipo di ROA utilizzate nel lavoro in oggetto, quindi descrivere tutti i limiti di esposizione che tali radiazioni comportano e i conseguenti danni alla salute, prestando particolare attenzione ad occhio e cute. Si passa infine a formare i lavoratori sulle misure di protezione e di prevenzione da adottare per eliminare o ridurre al minimo i rischi derivanti dalle ROA, quali:

- uso corretto delle attrezzature;
- uso corretto dei dispositivi di prevenzione collettiva (es.: schermature);
- procedure di lavoro corrette;
- quando e come indossare correttamente i DPI e le relative indicazioni e controindicazioni sanitarie all'uso.

2. Simulazione

Il nostro studio consiste nel trovare un valido metodo di approssimazione della curva dell'emissione radiante oltre il range di misura di un tradizionale spettro radiometro, focalizzando la nostra attenzione sulle radiazioni infrarosse, ovvero quelle con lunghezza d'onda da 700nm a 3000nm. È molto importante svolgere considerazioni particolari in questo senso, dato che le IRA e le IRB sono le più dannose per l'operatore che interagisce con il macchinario, anche per molto tempo durante la giornata di lavoro. I principali effetti riscontrati riguardano la pelle, che può arrivare anche ad ustionarsi, e l'occhio di cui, nei casi più estremi, si può perdere ogni facoltà. Dunque è assolutamente necessaria un'accurata valutazione del rischio anche in questo campo di radiazioni.

2.1 Premesse e caso preso in esame: il colatore

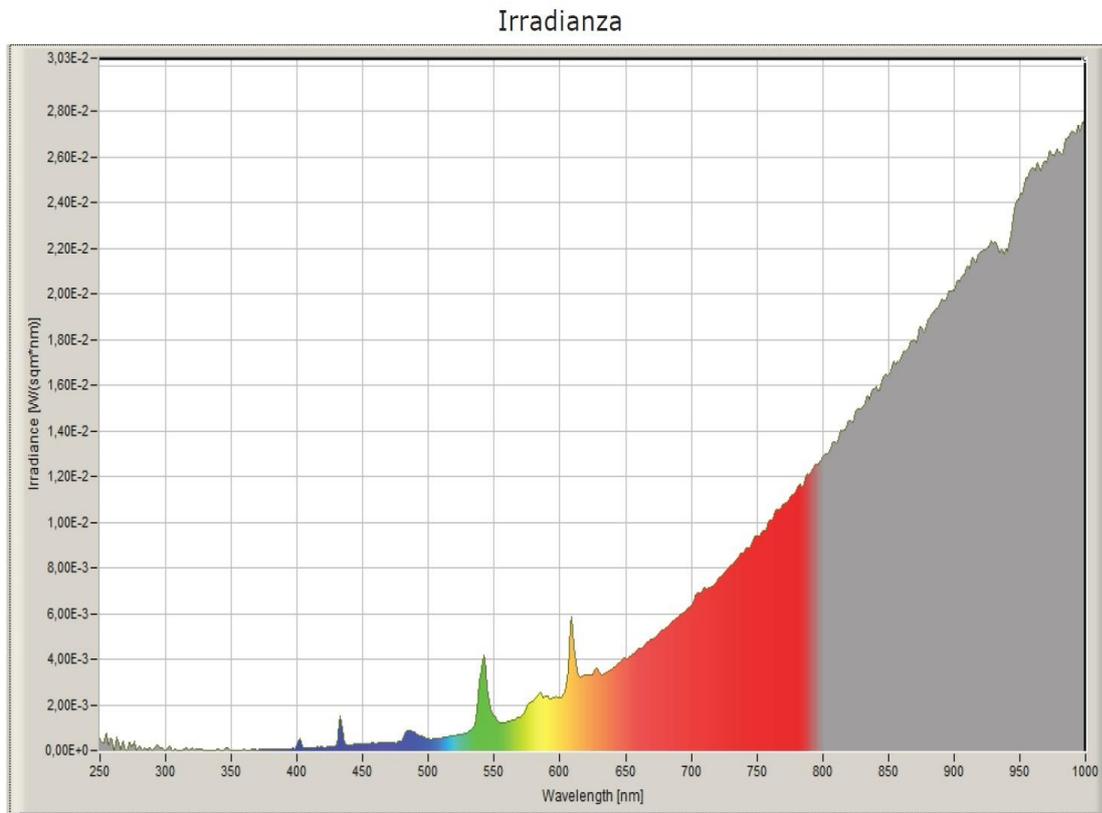
Il caso che andremo ad analizzare è un'applicazione di largo utilizzo, ampiamente vista nell'industria metalmeccanica, il *colatore*.



Tutte le misurazioni sono acquisite grazie ad uno *spettro radiometro* che, come riporta il datasheet, riesce a raccogliere tutte le emissioni radianti di lunghezza d'onda da 250 nm fino ad un massimo di 1000 nm. Come già ripetuto in precedenza, la *distanza della postazione* dell'operaio dalla sorgente è un parametro molto importante che va sicuramente ad influire pesantemente sulla quantità di radiazioni che vanno ad irradiare il soggetto. Ci poniamo ad una distanza di 3 metri dal nostro colatore ed effettuiamo ogni misura di irradianza in funzione della lunghezza d'onda della radiazione con angolo di osservazione α pari a 100 mrad:

$$E_e = \left[\frac{W}{m^2 * nm} \right]$$

Il grafico seguente è stato ottenuto in normali condizioni di lavoro della sorgente ad una temperatura di 1600 °C.



Dal suddetto risultato si evince come, prima di tutto, la curva non sia regolare, ma presenta dei massimi locali per determinate frequenze nel visibile quindi non possiamo dedurre a priori l'andamento della curva oltre i 1000 nm e quindi all'interno del range dell'infrarosso.

2.2 Sviluppo del foglio di calcolo

La procedura consiste nel creare uno strumento valido che consenta di prevedere, mediante estrapolazione, il comportamento dell'emissione radiante oltre le capacità di acquisizione di uno spettro radiometro.

L'extrapolazione è un metodo matematico di stima a partire da valori noti all'interno di un piano cartesiano. Esistono moltissime curve di approssimazione e l'obiettivo è proprio quello di trovare quella che più si adatta alla curva in nostro possesso, senza però andare in eccesso di complessità.

Per i nostri scopi, utilizzeremo un tradizionale foglio di calcolo Excel all'interno del quale introdurremo tutti i valori ricavati dalla misurazione con la relativa rappresentazione in un grafico che presenta in ascissa le lunghezze d'onda espresse in nanometri, mentre in ordinata l'irradianza in $W/(m^2 \cdot nm)$.

Importantissimo, inoltre, è il riscontro che ci fornisce la Legge di Wien precedentemente citata perché ci dice che per la temperatura di esercizio di $1600\text{ }^\circ\text{C}$, la lunghezza d'onda della radiazione che rende massima l'emissione radiante del colatore, per validità della legge approssimato ad un corpo nero che non riflette alcuna radiazione, è uguale alla costante b diviso la temperatura assoluta, in K con:

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad \text{e} \quad T = 1873 \text{ K}$$

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{1873} = 1,547 \mu\text{m} = 1547 \text{ nm}$$

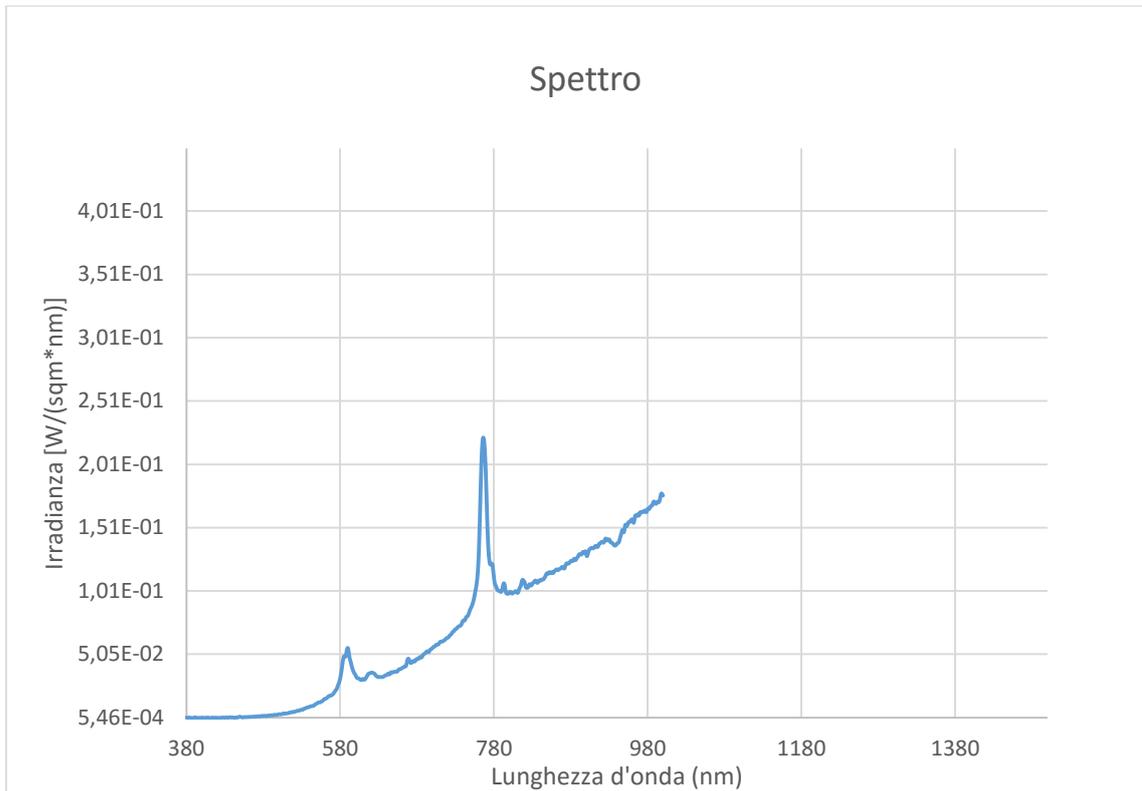
Questo risultato ci conferma quanto detto prima, cioè che ci sono proprio queste radiazioni nell'infrarosso che il nostro occhio non percepisce, le quali possono arrivare a creare danni irreversibili sul nostro corpo, dunque uno studio più approfondito si rivela necessario per stabilire di preciso se serviranno o meno dei dispositivi di protezione individuale da far indossare agli operatori o se si dovrà intervenire direttamente sulla macchina.

Avendo ipotizzato un comportamento della nostra sorgente assimilabile a quello di un corpo nero, per quanto concerne l'emissione radiante, attraverso la legge di Wien riusciamo a dimostrare che la radiazione a cui viene associata la massima energia si ha per una lunghezza d'onda pari a 1547 nm . Quindi l'irradianza crescerà proprio fino a questo punto ed è doveroso estendere lo studio, mediante approssimazione di queste onde per tutto il range espresso in Fig. 1.4-2, quindi da 380 a 1400 nm e da 780 a 1400 nm .

Vengono mostrate in una tabella del nostro foglio di calcolo, di seguito, alcune misurazioni nel dettaglio.

	MISURA		MISURA		MISURA
	SIMULAZIONE		SIMULAZIONE		SIMULAZIONE
Wavelength [nm]	Ee [W/(sqm*nm)]	Wavelength [nm]	Ee [W/(sqm*nm)]	Wavelength [nm]	Ee [W/(sqm*nm)]
380	5,46E-04	680	4,68E-02	980	1,65E-01
381	3,16E-04	681	4,68E-02	981	1,66E-01
382	4,16E-04	682	4,70E-02	982	1,65E-01
383	5,60E-04	683	4,80E-02	983	1,66E-01
384	5,53E-04	684	4,84E-02	984	1,67E-01
385	4,02E-04	685	4,79E-02	985	1,68E-01
386	2,87E-04	686	4,81E-02	986	1,68E-01
387	2,86E-04	687	4,91E-02	987	1,70E-01
388	2,24E-04	688	5,01E-02	988	1,71E-01
389	2,12E-04	689	5,07E-02	989	1,71E-01
390	4,76E-04	690	5,10E-02	990	1,70E-01
391	6,87E-04	691	5,15E-02	991	1,69E-01
392	6,02E-04	692	5,23E-02	992	1,70E-01
393	3,89E-04	693	5,29E-02	993	1,71E-01
394	2,47E-04	694	5,26E-02	994	1,71E-01
395	3,13E-04	695	5,22E-02	995	1,71E-01
396	3,70E-04	696	5,29E-02	996	1,73E-01
397	2,93E-04	697	5,40E-02	997	1,76E-01
398	2,34E-04	698	5,45E-02	998	1,78E-01
399	3,13E-04	699	5,49E-02	999	1,77E-01
400	5,32E-04	700	5,53E-02	1000	1,76E-01

Il prossimo passo è quello che ci consente di ottenere il comportamento reale dell'irradianza al variare della lunghezza d'onda. Tale grafico deve coincidere con quello ricavato dallo spettro radiometro, deve quindi essere coerente con i dati ricavati dalla misura. Non dobbiamo far altro che selezionare tutte le celle con le relative lunghezze d'onda e irradianze ed utilizzare la funzione Excel "Imposta grafico" ed infine selezionare il tipo di grafico che si preferisce.

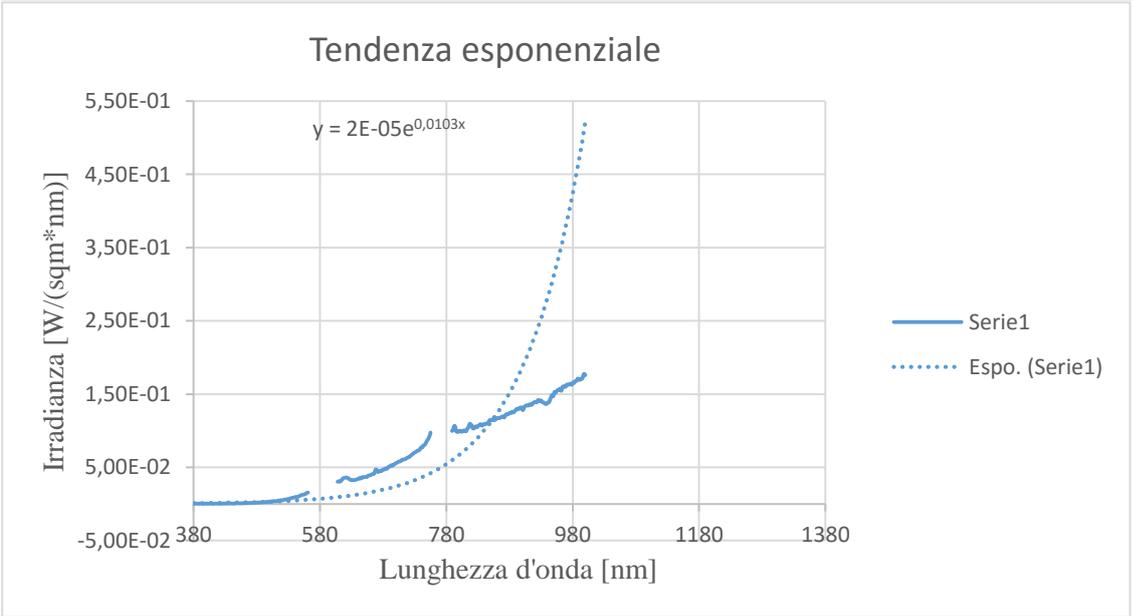
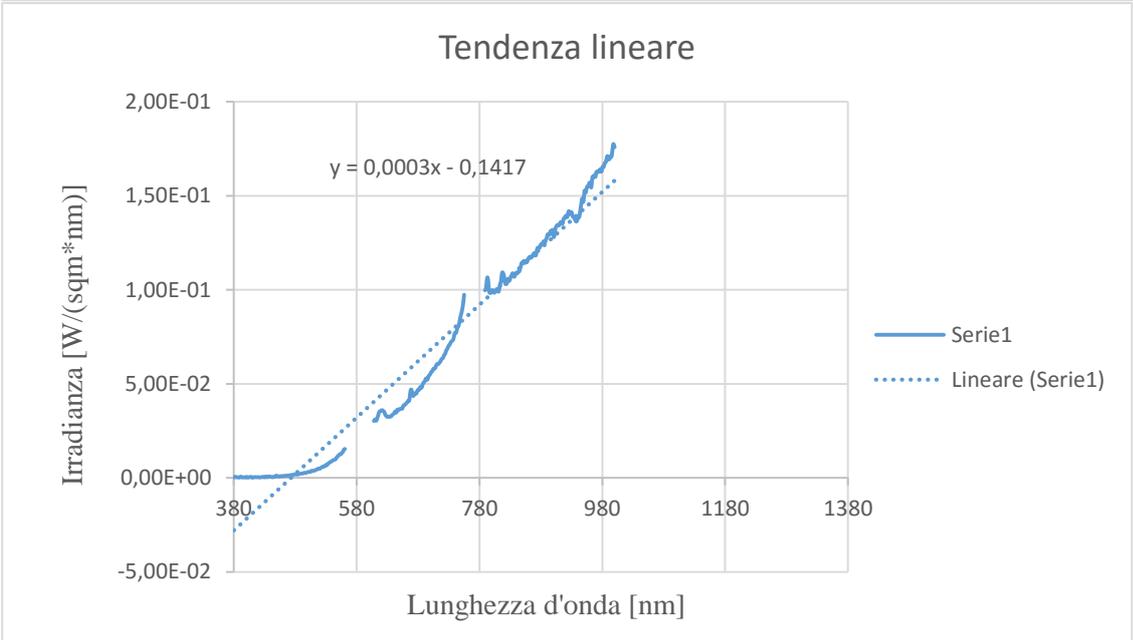
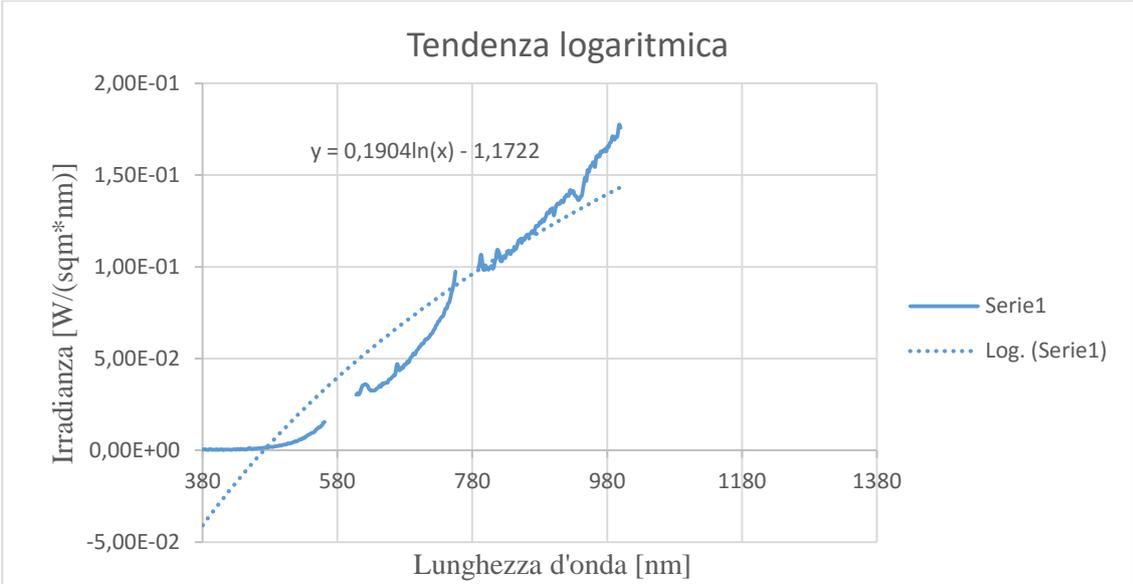


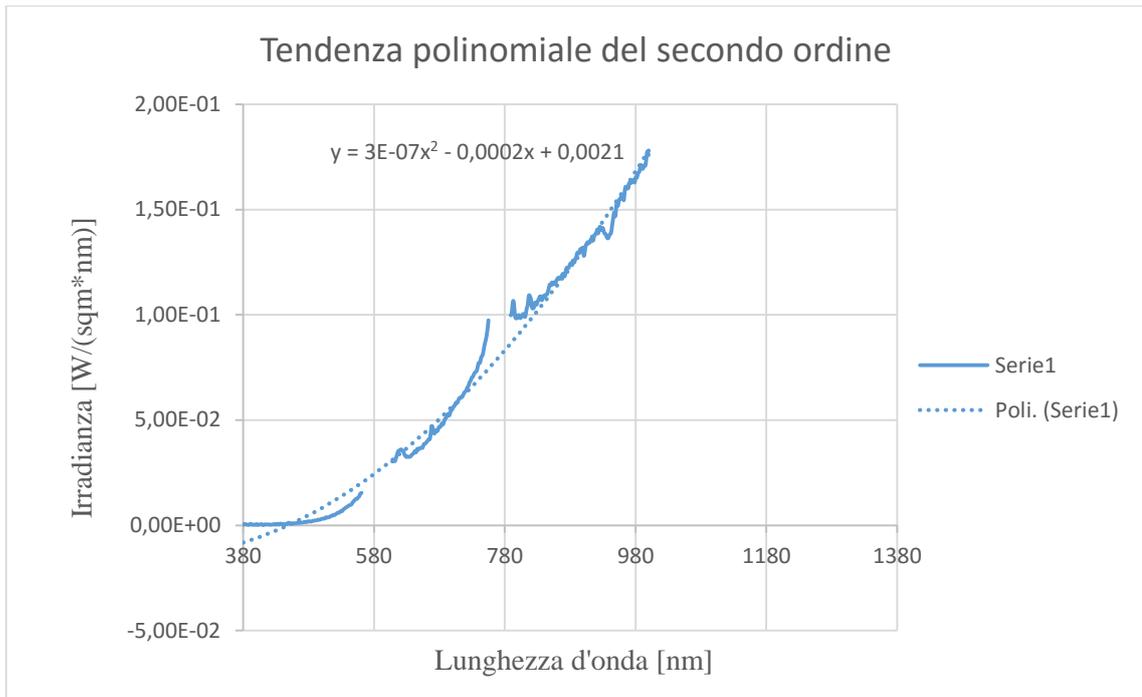
Una volta trovata questa curva, si nota l'estrema somiglianza con quella ricavata dal nostro strumento, tuttavia, dalla legge di Wien abbiamo ricavato che la massima emissione radiante si ha per una λ pari a 1547 nm e quindi se entro i limiti dello spettro appena trovato, l'operatore risulta al sicuro da qualunque danno a cute e occhio, oltre i 1000 nm potrebbe non esserlo più.

Per prevedere il comportamento dell'irradianza oltre questo range di misura dobbiamo, quindi, trovare una curva di equazione nota che meglio approssima quella già in nostro possesso, così poi da riuscire a dedurre l'andamento per lunghezze d'onda superiori.

Affinché la previsione contenga il minimo errore possibile, conviene trascurare la presenza dei picchi di emissione radiante negli intervalli di lunghezza d'onda 562-608 nm e 756-788 nm che, altrimenti, potrebbero alterare la stima di misura. Poniamo quindi nel foglio di calcolo, l'uguaglianza tra la tendenza e i dati raccolti durante la simulazione, per ogni lunghezza d'onda esclusi i suddetti intervalli.

Attraverso la funzione di Excel "Linea di tendenza", possiamo scegliere quella che più ci è congeniale andando per tentativi. Ecco di seguito alcuni esempi:





Tra tutte le opzioni di approssimazione appena analizzate, scegliamo la *tendenza polinomiale del secondo ordine* in quanto è quella che più si avvicina al comportamento dello spettro all'interno del range di misura. Risulta, ora, opportuna una valutazione più accurata di tutti i coefficienti in gioco per far sì che l'ultimo punto della curva ricavata dallo spettro radiometro coincida con il primo punto della curva simulata.

Per una lunghezza d'onda di 1000 nm si deve avere un'irradianza pari a 0,175899 W/(sqm*nm), mentre se andiamo a sostituire, all'interno dell'equazione, il dato in esame, otteniamo un'irradianza di 0,103 W/(sqm*nm), quindi leggermente diversa da quella che ci saremmo aspettati, con un errore del 58%, di certo non tollerabile; infatti si nota che, inserendo i dati coerenti, si ottiene uno scarto tra le due curve di 0,073799 W/(sqm*nm). A questo punto non ci resta che modificare il termine noto, incrementandolo dello scarto così da ottenere gli stessi limiti destro e sinistro della tendenza per λ uguale a 1000 nm.

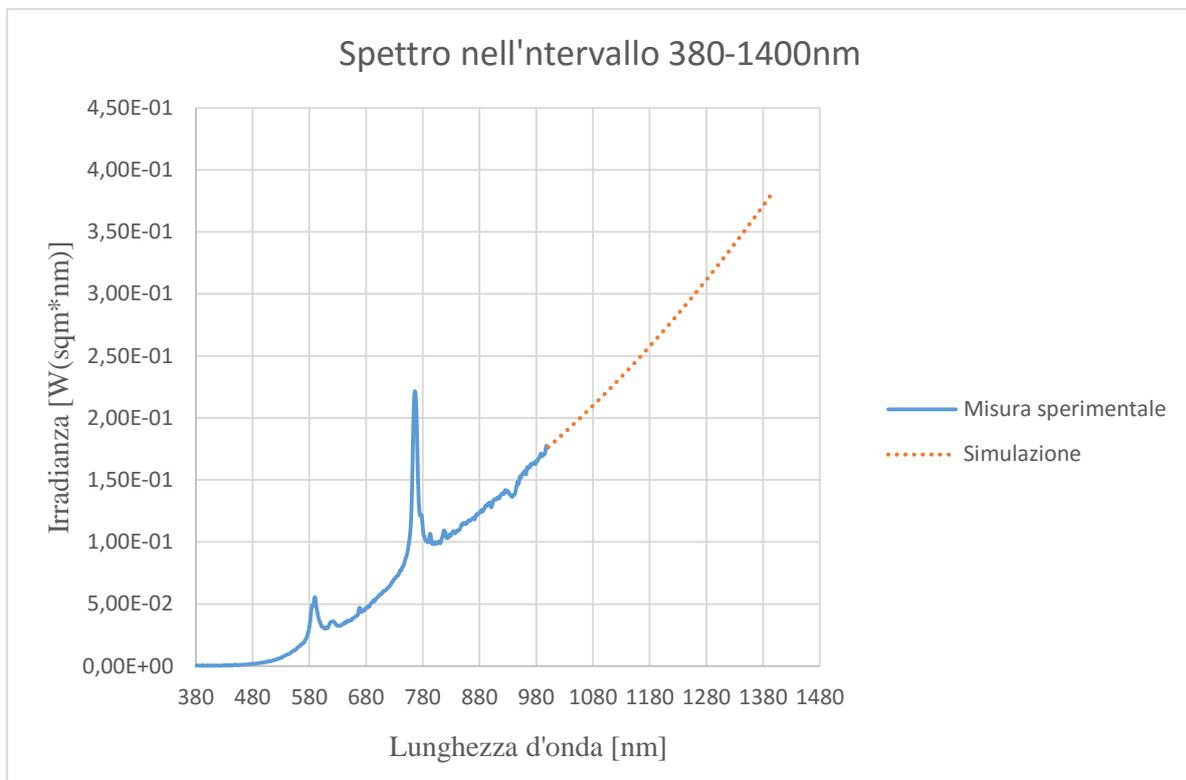
L'equazione della curva finale di simulazione sarà dunque:

$$y = 3 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 0,0002 \cdot x + 0,075899$$

Con y rappresentante l'irradianza in [W/(sqm*nm)] e x la lunghezza d'onda in [nm].

Un'altra considerazione molto importante da dover sottolineare è legata al fatto che, trattandosi di un'approssimazione e partendo da ipotesi ideali, avendo assimilato la sorgente ad un corpo nero, i dati ricavati mediante estrapolazione al di fuori delle capacità dello spettro radiometro saranno pur sempre delle previsioni possibilistiche. Andando però ad analizzare la legge di Stefan-Boltzmann dal punto di vista dell'oggetto irradiato, possiamo provare che la curva ricavata, è con ottima approssimazione proprio quella cercata. Infatti questa legge ci dice che l'energia emessa da un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura a cui si trova, tuttavia si nota che l'irradianza, ovvero la quantità di energia che arriva all'oggetto irradiato per unità di superficie, è inferiore di circa 4 ordini di grandezza, se ci troviamo, come da ipotesi,

a 2 m dalla sorgente. Ecco che sorge anche una dipendenza dalla distanza tale per cui più ci allontaniamo e minore sarà la quantità di radiazione elettromagnetica che giunge al nostro corpo.



2.3 Considerazioni finali

È stato appena mostrato un possibile metodo di previsione del comportamento spettrale di un colatore con lo strumento di misura posizionato a 3 m da tale sorgente. Grazie all'utilizzo di un foglio elettronico e a funzioni in esso contenute, abbiamo potuto ottenere l'estensione della curva originaria, data dalle misurazioni eseguite, per essere ora in grado di andare a studiare gli effetti negativi che le onde IR producono sulla cute e sull'occhio umano.

3. Analisi del rischio

3.1 Premesse

Una volta ottenuto l'andamento dell'irradianza per tutto il range di lunghezza d'onda che ci interessa, possiamo avviare l'analisi del rischio per capire se occorre o meno l'introduzione di dispositivi di protezione individuale da far indossare all'operatore.

Tale studio ha come fine quello di capire se in determinate circostanze, i limiti imposti dalla norma UNI EN 14255-2:2006, Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 2: Radiazioni visibili ed infrarosse emesse da sorgenti artificiali nei posti di lavoro, vengono rispettati, oppure richiedono una procedura di adeguamento dal punto di vista della protezione.

Il punto di partenza della valutazione del rischio è la relazione che lega la probabilità che, in determinate circostanze, si verifichi un danno in presenza di pericolo alla presenza del pericolo stesso e alla gravità del danno provocato.

$$\text{Rischio} = \text{Probabilità} \cdot \text{Gravità}$$

Da questa equazione si deduce subito il fatto che se anche dovesse esserci una quantità minima di probabilità che si verifichi l'evento dannoso, il rischio non potrà mai essere eliminato completamente e lo stesso si può dire per la gravità.

Nel caso del colatore sarà sempre presente un rischio perché ci sono sempre sia il pericolo, determinato dalla sorgente che emana sempre radiazioni dannose per il nostro corpo, sia la gravità non trascurabile del danno da cui si potrebbe essere afflitti, tra cui l'ustione della retina con conseguente perdita della vista e l'ustione della cute.

Dobbiamo però tenere in considerazione che solo alcune lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche risultano estremamente dannose, in particolare le IRA (700-1400) nm.

Di solito a *probabilità* e *gravità* si associano dei valori che vanno da 1 a 4 ed esprimono coefficienti che vanno da "poco" a "tanto"; a questo punto possiamo ricavare un particolare diagramma chiamato *matrice del rischio*.

		GRAVITÀ			
		4	3	2	1
PROBABILITÀ	4				
	3				
	2				
	1				

La zona rossa è quella a rischio più alto e non si può intervenire in modo alcuno perché la situazione non è tollerabile; nella zona gialla vi è un rischio non desiderabile, ma che non è possibile ridurre per via dei costi sproporzionati rispetto al miglioramento; nella zona verde il rischio è basso e tollerabile con i dispositivi di protezione individuale adeguati.

I livelli delle grandezze fondamentali contenute nella norma UNI EN 14255-2:2006 ci serviranno proprio per eseguire un'accurata valutazione del rischio e, grazie alla simulazione precedentemente svolta, riusciremo a studiare con particolare attenzione la parte nociva dello spettro.

3.2 Piano di lavoro

Per effettuare la valutazione del rischio di esposizione alle ROA lo schema di flusso consigliato è il seguente:

- **Conoscenza delle sorgenti:** è necessario preliminarmente censire le sorgenti ROA ed acquisirne i dati forniti dai fabbricanti o, in loro assenza, da documenti tecnici o lavori presenti in Letteratura che trattano sorgenti analoghe. Utilizzare, ove disponibile, la classificazione delle sorgenti secondo le norme tecniche specifiche o la conformità a standard tecnici, può consentire la “giustificazione” che permette di non effettuare una valutazione approfondita del rischio in quanto trascurabile, ovvero di stabilire direttamente il superamento o meno dei valori limite.

- **Conoscenza delle modalità espositive:** tutte le attività che comportano o possono comportare l'impiego di sorgenti ROA devono essere censite e conosciute a fondo; in particolare devono essere individuate le tipologie di sorgenti, le modalità di impiego ed i luoghi in cui sono operanti, acquisendo, se possibile, i “layout” o le planimetrie dove sono installate le sorgenti. Per potere valutare i lavoratori a rischio e la loro effettiva esposizione è importante acquisire anche i tempi, le distanze e le modalità di esposizione per le sorgenti non coerenti, mentre per quelle laser è importante verificare anche eventuali riflessioni.

- **Esecuzione di misure:** nel caso non siano disponibili i dati del fabbricante o non vi siano riferimenti a standard tecnici specifici, è necessario effettuare delle misure strumentali secondo le indicazioni fornite da norme tecniche specifiche. Le misure devono essere eseguite con strumentazione adeguatamente tarata, dotata di caratteristiche idonee ai parametri da rilevare

- **Esecuzione di calcoli:** partendo dai dati forniti dal fabbricante, dai dati di letteratura o dai valori misurati, mediante appositi calcoli si ottengono le grandezze necessarie al confronto con i valori limite (es.: dall'irradianza spettrale fornita dal costruttore o misurata, si stima l'irradianza efficace).

- **Confronto con i valori limite:** i risultati acquisiti dalle fasi precedenti (dai dati dei produttori, dai dati di bibliografia, da misure strumentali o da calcoli) devono essere confrontati con i valori limite previsti nell'Allegato XXXVII del DLgs.81/2008 per stabilire il possibile superamento o meno di tali valori. Per la consultazione dei valori limite, si rimanda alla Fig. 1.4-2.

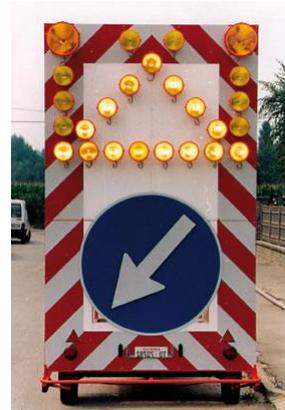
3.3 Condizioni per la valutazione

A volte, tuttavia, è possibile non eseguire l'analisi del rischio dato che le condizioni sono tali da determinare una "giustificazione" secondo cui la natura e l'entità dei rischi non rendono necessaria una valutazione più dettagliata.

Costituisce esperienza condivisa che talune sorgenti di radiazioni ottiche, nelle corrette condizioni d'impiego, non danno luogo ad esposizioni tali da presentare rischi per la salute e la sicurezza. In questi casi è giustificato non dover procedere ad una valutazione del rischio più dettagliata.

Richiamato che inizialmente occorre sempre individuare ogni sorgente di radiazione ottica artificiale, si riferisce a tutte quelle situazioni espositive per le quali non è necessario effettuare un approfondimento della valutazione. D'altra parte l'approfondimento della valutazione è necessario in tutti quei casi di esposizione a ROA i cui effetti negativi non possono essere ragionevolmente esclusi.

Sono giustificabili tutte le apparecchiature che emettono radiazione ottica non coerente classificate nella categoria 0 secondo lo standard UNI EN 12198:2009 (vedi Tabella 1.4) così come le lampade e i sistemi di lampade, anche a LED, classificate nel gruppo "Esente" dalla norma CEI EN 62471:2009. Esempio di sorgenti di gruppo "Esente" sono l'illuminazione standard per uso domestico e di ufficio, i monitor dei computer, i display, le fotocopiatrici, le lampade e i cartelli di segnalazione luminosa. Sorgenti analoghe, anche in assenza della suddetta classificazione, nelle corrette condizioni di impiego si possono "giustificare".



Ecco, di seguito, una serie di sorgenti che producono esposizioni insignificanti e che possono essere considerate “sicure”.

- Illuminazione fluorescente montata a soffitto con diffusori sopra le lampade
- Schermi di computer o simili
- Illuminazione fluorescente compatta montata a soffitto
- Proiettore fluorescente compatto
- Trappole per insetti UVA
- Proiettore alogeno al tungsteno montato a soffitto
- Illuminazione specifica per la zona di lavoro con lampada al tungsteno (incluse le lampadine a spettro solare)
- Lampade al tungsteno montate a soffitto
- Fotocopiatrici
- Attrezzatura di presentazione con lavagna interattiva
- Indicatori a LED
- Assistenti digitali personali
- Freccia, stop, retromarcia e antinebbia
- Lampade per flash fotografici
- Riscaldatori radianti sospesi a gas
- Illuminazione stradale.

Ci sono poi delle sorgenti, inserite in certe condizioni lavorative, che saranno sicuramente da valutare. La Tabella 3.1 riporta le principali sorgenti non coerenti di radiazione ottica che vanno valutate ai fini della prevenzione del rischio per i lavoratori.

Sorgente	Possibilità di sovraesposizione	Note
Arco elettrico (saldatura elettrica)	Molto elevata	Le saldature ad arco elettrico (tranne quelle a gas) a prescindere dal metallo, possono superare i valori limite previsti per la radiazione UV per tempi di esposizione dell'ordine delle decine di secondi a distanza di un metro dall'arco. I lavoratori, le persone presenti e di passaggio possono essere sovraesposti in assenza di adeguati precauzioni tecnico-organizzative
Lampade germicida per sterilizzazione e disinfezione	Elevata	Gli UVC emessi dalle lampade sono utilizzati per sterilizzare aree di lavoro e locali in ospedali, industrie alimentari e laboratori
Lampade per fotoindurimento di polimeri, fotoincisione, “curing”	Media	Le sorgenti UV sono usualmente posizionate all'interno di apparecchiature, ma l'eventuale radiazione che può fuoriuscire attraverso aperture o fessure è in grado di superare i limiti in poche decine di secondi
“Luce Nera” usata nei dispositivi di test e controllo non distruttivi (eccetto lampade classificate nel gruppo “Esente” secondo CEI EN 62471:2009)	Bassa – Media o Elevata in relazione all'applicazione	Il rischio è riconducibile all'emissione di UVA associata alla radiazione visibile Lampade UVA sono utilizzate in dispositivi quali quelli dedicati al controllo e all'ispezione dei materiali o per il controllo delle banconote. I sistemi impiegati in metallurgia, superano il limite per l'esposizione a UVA per tempi dell'ordine di 1 – 2 ore, rispetto ad attività che possono essere protratte per tutto il turno lavorativo.

Lampade/sistemi LED per fototerapia	Elevata	La radiazione UV è utilizzata per le terapie in dermatologia e la “luce blu” è utilizzata nell’ambito di attività sanitarie (es.: PUVA-terapia, fototerapia dell’ittero neonatale).
Lampade ad alogenuri metallici	Bassa (Elevata se visione diretta)	Sono utilizzate nei teatri, in ambienti vasti (es. supermercati) e aperti per l’illuminazione esterna e possono superare sia i limiti per gli UV che per la radiazione visibile e in particolare per la “luce blu” per visione diretta della sorgente
Fari di veicoli	Bassa (Elevata se visione diretta)	Possibile sovraesposizione da luce blu per visione diretta protratta per più di 5-10 minuti: potenzialmente esposti i lavoratori delle officine di riparazione auto
Lampade scialitiche da sala operatoria	Bassa (Elevata se visione Diretta)	Per talune lampade i valori limite di esposizione per luce blu possono essere superati in 30 minuti in condizioni di visione diretta della sorgente
Lampade abbronzanti	Media – Elevata	Le sorgenti utilizzate in ambito estetico per l’abbronzatura possono emettere sia UVA che UVB, i cui contributi relativi variano a seconda della loro tipologia. Queste sorgenti superano i limiti per i lavoratori per esposizioni dell’ordine dei minuti.
Lampade per usi particolari eccetto lampade classificate nel gruppo “Esente”	Media – Elevata	Si tratta di lampade fluorescenti non per illuminazione generale quali quelle utilizzate in acquari e terrari. Queste lampade presentano elevate irradianze UVB che possono portare a sovraesposizioni in pochi minuti, soprattutto a distanze ravvicinate.
Lampade per uso generale e lampade speciali classificate nei gruppi 1,2,3 ai sensi della norma CEI EN 62471:2009	Bassa-Media-Elevata in relazione alla classificazione	Inclusi sistemi LED
Corpi incandescenti quali metallo o vetro fuso, ad esempio nei crogiuoli dei forni di fusione con corpo incandescente a vista e loro lavorazione	Elevata–Molto elevata	Nel corso della colata e in prossimità dei crogiuoli le esposizioni a IRB-IRC possono superare i valori limite per tempi di esposizione dell’ordine di pochi secondi.
Riscaldatori radiativi a lampade	Medio-basso	Emissioni di radiazioni infrarosse potenzialmente superiori ai valori limite

Apparecchiature con sorgenti IPL per uso medico o estetico	Elevata-Molto elevata	Emissioni di radiazioni ottiche potenzialmente molto superiori ai valori limite anche per pochi secondi
--	-----------------------	---

Tabella 3.1 Principali sorgenti ROA non coerenti delle quali si dovrebbe approfondire la valutazione del rischio

3.4 Fonti utilizzabili per la misurazione

Il D.lgs 81/2008 stabilisce che “il datore di lavoro valuta e, quando necessario, misura e/o calcola i livelli delle radiazioni ottiche a cui possono essere sottoposte i lavoratori” seguendo le norme CIE (Commissione internazionale dell'Illuminazione) e CEN (Comitato europeo di normazione) per quanto riguarda le radiazioni ottiche artificiali non coerenti.

Allo stato attuale i riferimenti per le misurazioni delle radiazioni ottiche non coerenti sono:

- UNI EN 14255-1:2005 per gli UV;
- **UNI EN 14255-2:2006 per il visibile e l'infrarosso;**
- UNI EN 14255-4:2007 sulla terminologia e le grandezze da utilizzare per le misurazioni.

Come precedentemente enunciato, i valori limite (VLE) per le ROA non coerenti, sono contenute nell' Allegato XXXVII-Parte I del DLgs.81/2008.

Per quanto concerne la strumentazione da utilizzare per la misura delle grandezze fondamentali precedentemente citate al paragrafo 1.4, deve essere in grado di acquisire la distribuzione spettrale della potenza irradiata da una sorgente oppure le corrispondenti grandezze integrate nell'intervallo spettrale pertinente alla grandezza efficace da misurare. Nel primo caso la strumentazione sarà costituita da uno spettro radiometro (Fig. 3.4-1); nel secondo, da un radiometro a banda larga (Fig. 3.4-2).



Fig. 3.4-1 Spettro radiometro

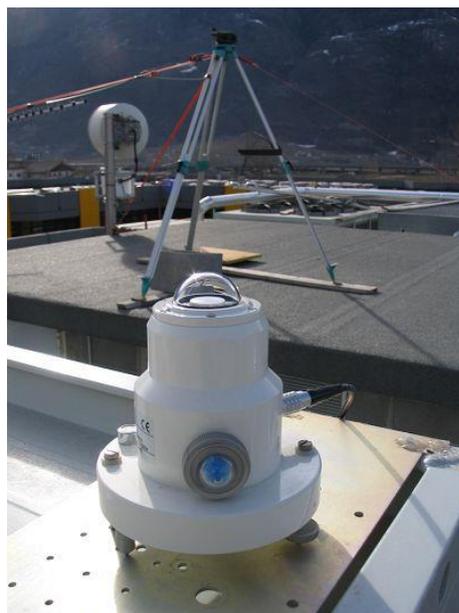


Fig. 3.4-2 Radiometro a banda larga

Tali strumenti dovranno essere dotati di un'opportuna ottica di raccolta delle radiazioni: nel caso dello spettro radiometro, deve essere presente una sfera integratrice, poiché si devono eseguire misure di irradianza un'ottica telescopica o un'ottica priva di lenti, ma dotata di diaframmi circolari che delimitino il campo di vista, nel caso si effettuino misure di radianza.

Le misure di esposizione radiante si otterranno integrando per la durata dell'esposizione il dato di irradianza efficace, oppure verranno fornite automaticamente dalla strumentazione.

La periodicità della taratura degli strumenti di misura non è dettata da una legge, ma si consiglia sempre di seguire quanto riportato nel manuale d'uso e manutenzione fornito dal costruttore. In assenza di istruzioni specifiche, è regola di buona norma recarsi presso gli istituti competenti per eseguire una taratura iniziale, subito dopo la fase di acquisto, per poi effettuare dei controlli al massimo biennali.

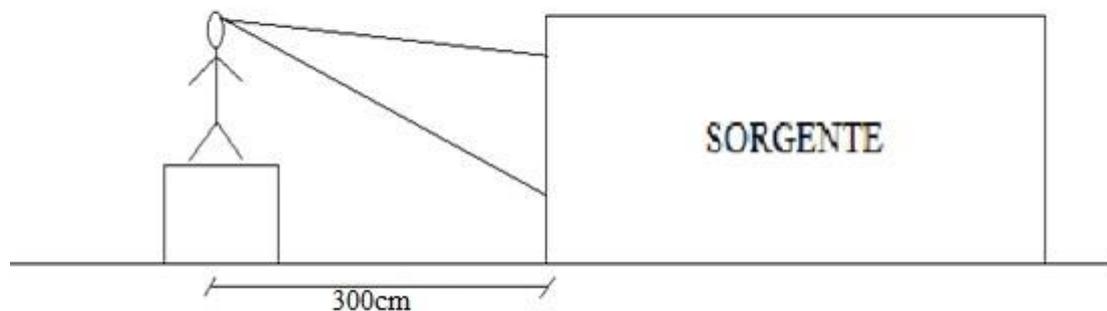
3.5 Esempio applicativo: il colatore

Il colatore industriale è sicuramente un caso di largo impiego e su cui è molto utile eseguire una valutazione del rischio in quanto la sorgente non risulta giustificabile, quindi l'operatore può essere sottoposto all'influenza di onde elettromagnetiche, soprattutto per quanto riguarda la banda dell'infrarosso, che possono provocare danni irreversibili a cute e occhio.

Dopo aver chiarito i doverosi riferimenti a tutte le norme e le direttive che stabiliscono i limiti delle grandezze radiometriche principali, irradianza (E), radianza (L) ed esposizione radiante (H) e tutti i metodi di misura e di applicazione dei dispositivi di protezione individuale, possiamo procedere ad analizzare il nostro caso particolare.

Grazie all'utilizzo di uno spettro radiometro, effettuiamo una raccolta di misure nell'intervallo di lunghezze d'onda che ci interessa, nel nostro caso sarà opportuno sfruttare lo strumento al massimo delle sue potenzialità, arrivando quindi fino a 1000 nm.

Possiamo affermare di aver già studiato il comportamento dell'irradianza in una parte dell'infrarosso, ma non è sufficiente in quanto, secondo il D.lgs 81/2008, testo unico di sicurezza, precisamente al titolo VIII – Agenti fisici, capo V – Radiazioni Ottiche Artificiali, tutte le radiazioni IRA (380-1400) nm e IRB (780-1400) nm possono provocare gravi effetti, anche irreversibili, sulla salute dell'operatore.



Ci poniamo a 3 metri dalla sorgente per eseguire il test e raccogliamo tutta una serie di misure che dovrà poi essere ampliata come già largamente trattato nel capitolo 2, mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo.

Una volta ottenuta la curva definitiva dell'irradianza, procediamo all'analisi di tutte le grandezze in gioco, confrontandole con i VLE espressi dal testo unico di sicurezza.

Nell'intervallo di lunghezze d'onda da 180 a 400 nm si va a valutare il coefficiente H_{eff} [J/m^2] che, come visto in precedenza, indica l'esposizione radiante efficace. Una volta valutate quindi tutti i valori efficaci, si procede alla ponderazione con la curva di ponderazione $S(\lambda)$ che fornisce il fattore di peso spettrale S in funzione della lunghezza d'onda della radiazione (Fig. 3.5-1).

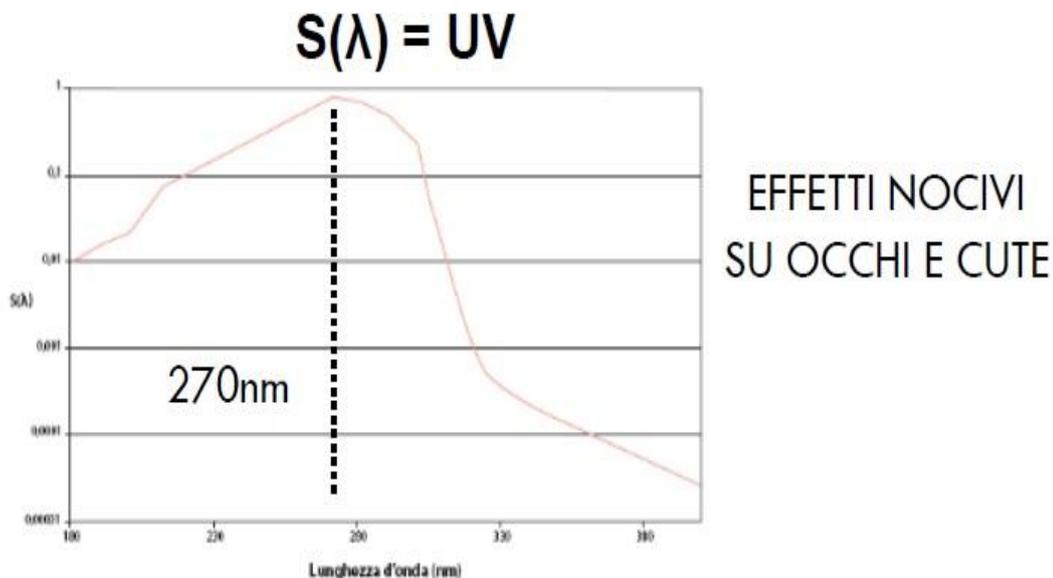


Fig. 3.5-1 Curva di ponderazione $S(\lambda)$

Il testo unico di sicurezza ci fornisce un valore limite H_{eff} pari a $30 \text{ J}/\text{m}^2$ per un'esposizione giornaliera di 8 ore. Dunque, dato che il valore di irradianza misurato a 10 metri dalla sorgente è di $0,001116 \text{ W}/\text{m}^2$ e il tempo di esposizione sarà circa di 3 ore al giorno, il rapporto tra il tempo di esposizione giornaliero e il tempo di esposizione massimo, sicuramente maggiore di 8 ore, sarà minore dell'1%. Possiamo concludere dicendo di essere abbondantemente entro i limiti.

Stesso discorso vale per H_{UVA} il cui limite per 8 ore al giorno è fissato a $10^4 \text{ J}/\text{m}^2$ e anche qui, calcolato un valore di irradianza pari a $0,001907 \text{ W}/\text{m}^2$ ed essendo il tempo di esposizione al giorno pari a 3 ore, siamo entro i limiti imposti dalla legge.

Particolare attenzione invece deve essere rivolta al coefficiente H_{skin} che incide maggiormente sulla pelle portandola, in casi estremi, all'ustione. Per questa grandezza vanno verificate tutte le lunghezze d'onda da 380 a 3000 nm. Sempre a 10 metri dalla sorgente, viene misurata un'irradianza di $24,26 \text{ W}/\text{m}^2$, però questa volta il tempo giornaliero di esposizione massima, scende a 24 minuti, mentre risulta che l'operatore rimanga esposto a tali radiazioni le consuete 3 ore al giorno, quindi il limite risulta superato. Schema riassuntivo in Tabella 3.5-2.

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (J/m ²)	Valore misurato @ 10m (W/m ²)	T _{max} espos.	T espos. (su 8h)	T _{espos.} / T _{max}
Fotocheratite Congiuntivite Catarattogenesi Eritema Elastosi Tumore cute	180 - 400	S	H _{eff} =30 valore giornaliero 8 h	0,001116	>8h	3h	<1%
Catarattogenesi	315 - 400	-	H _{UVA} =10 ⁴ valore giornaliero 8 h	0,001907	>8h	3h	<1%
Ustione cute	380 - 3000	-	H _{skin} =2·10 ⁴ ·t ^{0,25} per t<10s H _{skin} =35566 per t>10s	24,26	24 min	3h	LIMITE SUPERATO

Tabella 3.5-2 Effetti e limiti dell'esposizione radiante H

Passiamo ora all'irradianza efficace E_B che deve necessariamente essere calcolata tenendo conto della curva di ponderazione B(λ) con B ponderazione spettrale che tiene conto degli effetti della lunghezza d'onda sulla lesione fotochimica agli occhi (Fig. 3.5-3).

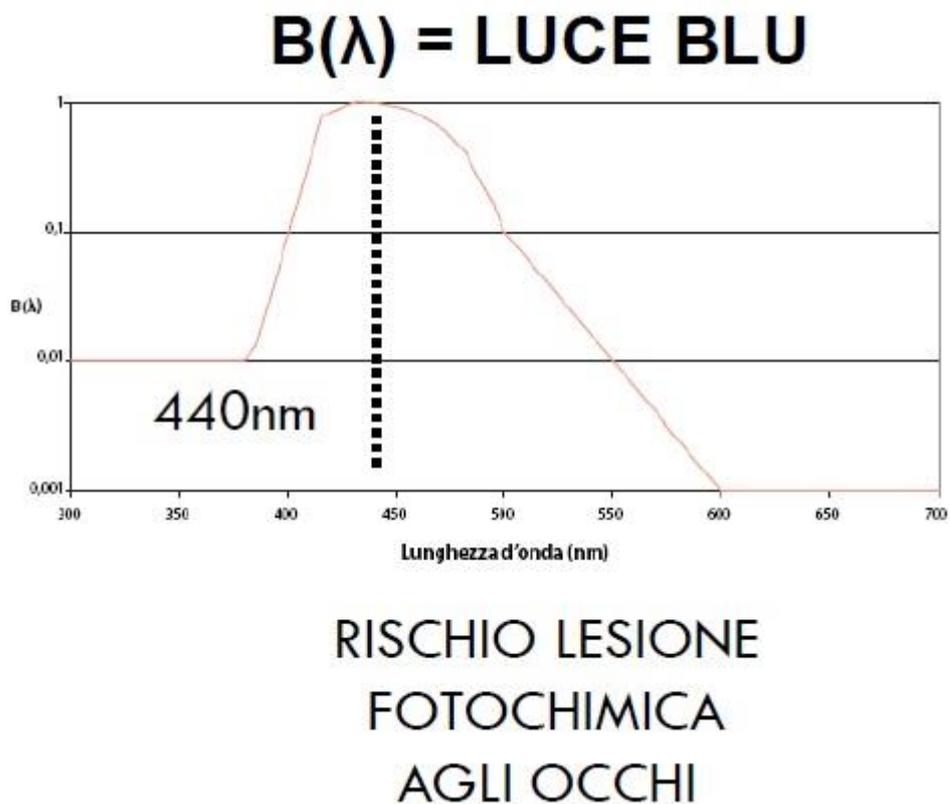


Fig. 3.5-3 Curva di ponderazione B(λ)

In questo caso vanno considerate tutte le radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra i 300 e i 700 nm; una volta misurato il valore di irradianza a 10m dalla sorgente pari a 0,004626 W/m² e moltiplicato per il fattore di peso B nel nostro caso pari all'unità, otteniamo un valore che è inferiore al valore limite $E_B = 0,01$ W/m². Essendo inoltre il tempo di esposizione massimo circa il doppio dell'esposizione a cui è sottoposto l'operatore, rimaniamo con una certa tranquillità entro i limiti imposti. Schema riassuntivo in Tabella 3.5-4.

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (W/m ²)	Valore misurato @ 10m (W/m ²)	T _{max} espos.	T espos. (su 8h)	T _{espos.} / T _{max}
Fotoretinite	300 - 700	B	$E_B = 100/t$ per $t < 10^4$ s $E_B = 0,01$ per $t > 10^4$ s	0,004626	6h	3h	50%

Tabella 3.5-4 Effetti e limiti di irradianza E_B

L'ultimo, ma non meno importante termine che la direttiva ci spinge ad esaminare è L_R o radianza efficace misurata in W/m²*SR. Ancora una volta, a partire dal valore di irradianza misurato però questa volta a 3m dalla sorgente, ottenuta sommando tutte le irradianze con il relativo peso $R(\lambda)$ all'interno del range di lunghezze d'onda interessato (Fig. 3.5-5), si ottengono valori di 3,16 W/m² per λ appartenente a [380-1400] nm e di 3,22 W/m² per λ appartenente a [780-1400] nm.

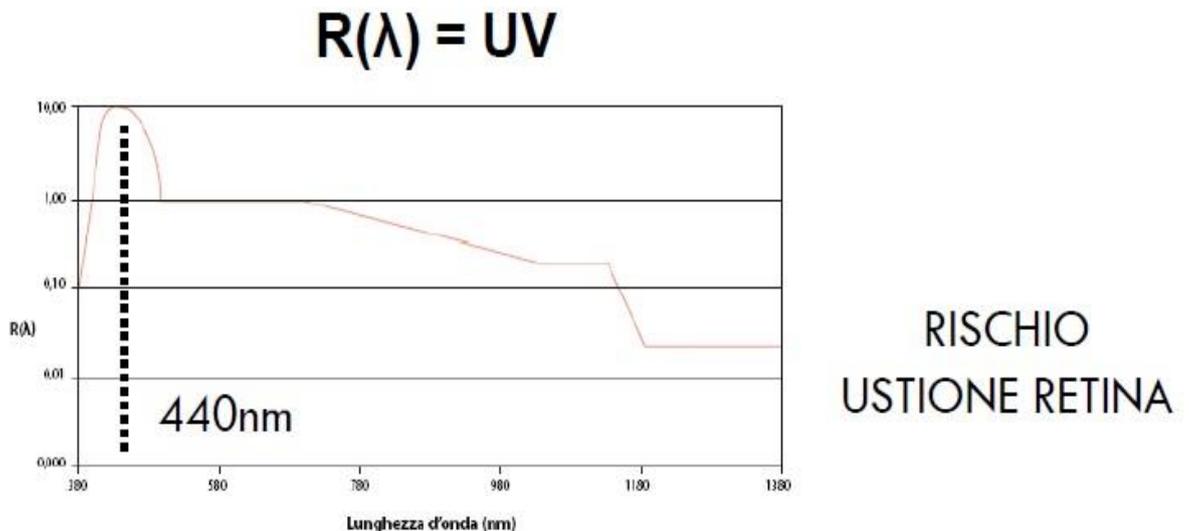


Figura 3.5-5 Curva di ponderazione $R(\lambda)$

Mentre per il primo intervallo di lunghezza d'onda il limite non viene superato:

$$\frac{VALORE\ MISURATO}{VALORE\ SOGLIA} = 30\%$$

con il valore soglia pari a 10,879 W/m², nel secondo caso, avendo un valore di irradianza massimo pari a 2,33 W/m², il limite risulta superato e occorre intervenire per garantire una protezione completa agli occhi dell'operatore. Si riporta di seguito, un risultato sintetico dell'operazione appena svolta in Tabella 3.5-6.

Rischio	Intervallo lunghezza d'onda (nm)	Curve di pond.	Limite (W/m ² ·SR)	Limite irradianza (W/m ²)	Valore misurato (W/m ²)	T espos. (su 8h)	Rapporto Misura/Soglia
Ustione della retina	380 - 1400	R (C _α =11)	$L_R = 2,8 \cdot 10^7 / C_\alpha$ per t > 10s $L_R = 5 \cdot 10^7 / (C_\alpha \cdot t^{0,25})$ per 10μs < t < 10s $L_R = 8,89 \cdot 10^8 / C_\alpha$ per t < 10μs	10,879 @3m dalla sorgente	3,16	3h	30%
Ustione della retina	780 - 1400	R (C _α =11)	$L_R = 6 \cdot 10^6 / C_\alpha$ per t > 10s $L_R = 5 \cdot 10^7 / (C_\alpha \cdot t^{0,25})$ per 10μs < t < 10s $L_R = 8,89 \cdot 10^8 / C_\alpha$ per t < 10μs	2,33 @3m dalla sorgente	3,22	3h	LIMITE SUPERATO

Tabella 3.5-6 Effetti e limiti di radianza L_R

3.6 Soluzione e considerazioni finali

È stato constatato che il tempo medio di carica e scarica del colatore dura mediamente 40/45 minuti, tuttavia il tempo di esposizione dell'operatore alla sorgente non supera mai i 30 minuti.

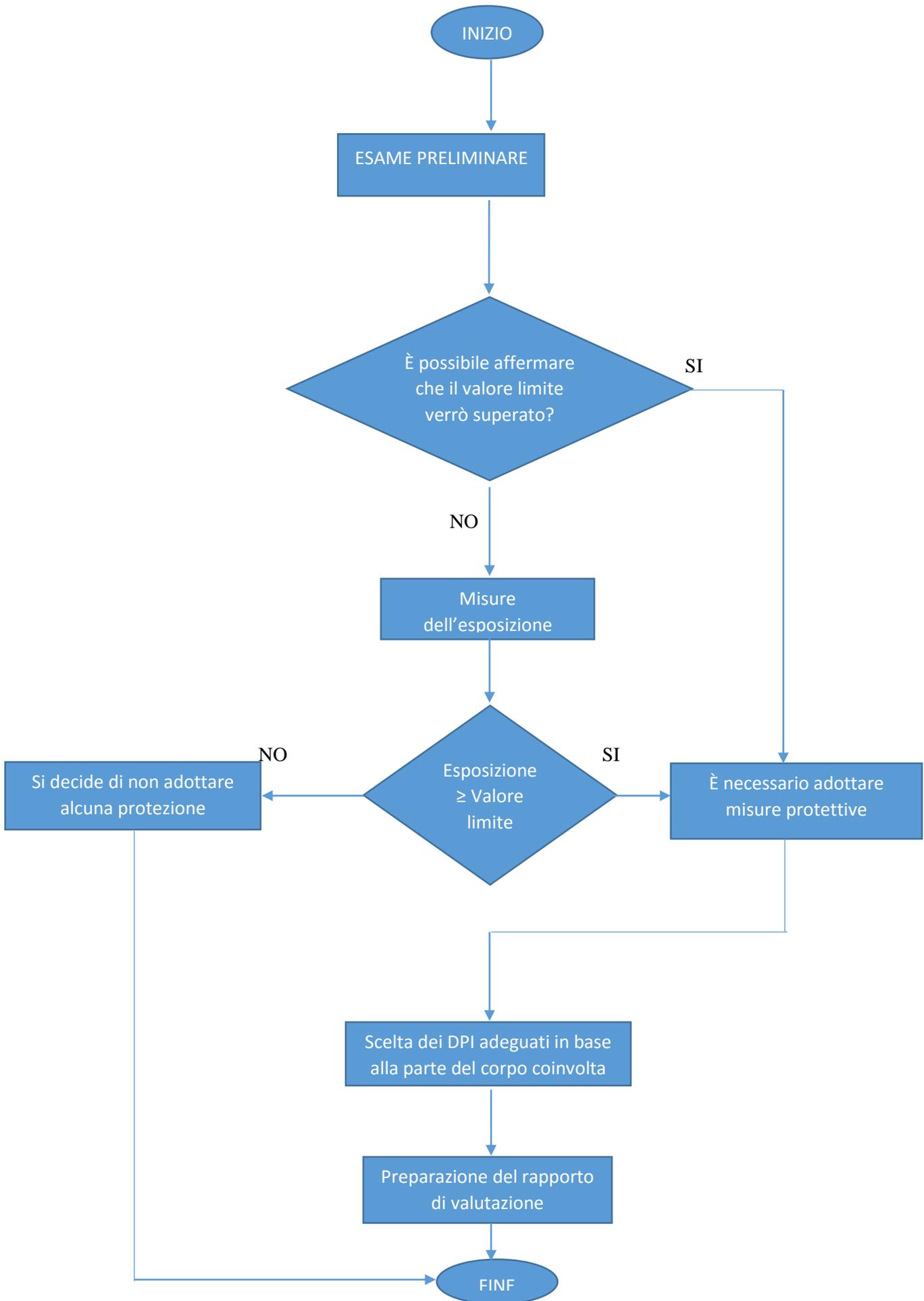
Dalla nostra valutazione del rischio si evince il fatto che alcuni **limiti prescritti dalla direttiva sono superati**, è pertanto opportuno procedere con l'attribuzione dei coerenti dispositivi di protezione individuale.

- **Protezione cute dalla radiazione:** si consiglia di utilizzare un **vestiario a manica lunga** rispondente ai criteri espressi dalle norme UNI EN ISO 13688:2013, UNI EN ISO 6942:2004 e UNI EN ISO 9185:2008 il cui contenuto è riportato nella tabella 1.4;
- **Protezione occhi dalla radiazione:** occhiali di protezione con filtro ad infrarosso UNI-EN171, numero di graduazione 4-4, con fattore di trasmissione luminosa massimo pari al 8,5%, con attenuazione del 1,2% nella banda da 780nm a 1400nm e del 15,9% nella banda da 780nm a 2000nm, con riduzione dell'abbagliamento causato da metallo fuso come riportato in tabella 3.6.

prospetto 1 **Requisiti del fattore di trasmissione**

N° di scala	Fattore di trasmissione luminosa τ_v		Massimo valore medio del fattore spettrale di trasmissione nel campo dell'infrarosso	
	max. %	min. %	τ_A da 780 nm a 1 400 nm %	τ_N da 780 nm a 2 000 nm %
4 - 1,2	100	74,4	5,5	52,9
4 - 1,4	74,4	58,1	4,8	47,2
4 - 1,7	58,1	43,2	4,1	42,2
4 - 2	43,2	29,1	3,6	37,9
4 - 2,5	29,1	17,8	2,9	32,3
4 - 3	17,8	8,5	1,9	22,9
4 - 4	8,5	3,2	1,2	15,9
4 - 5	3,2	1,2	0,71	10,6
4 - 6	1,2	0,44	0,43	7,1
4 - 7	0,44	0,16	0,23	4,4
4 - 8	0,16	0,061	0,14	2,9
4 - 9	0,061	0,023	0,075	1,8
4 - 10	0,023	0,008 5	0,050	1,3

Tabella 3.6. Scelta gradazione occhiali protettivi.



4. Conclusione

L'elaborato ha avuto come scopo principale, quello di creare uno strumento valido, da poter utilizzare con la massima versatilità nella maggior parte dei casi del campo di applicazione, soprattutto nel campo dell'industria metalmeccanica.

A colpire l'operatore, che deve interagire ogni giorno lavorativo con il macchinario, sono tutte quelle radiazioni elettromagnetiche che vanno dall'ultravioletto ai raggi infrarossi. Sono proprio questi ultimi a colpire maggiormente in termini di danni alla salute e si valutano maggiormente tutte le conseguenze critiche dell'esposizione all'occhio, che può determinare una perdita precoce della vista con l'ustione della retina, e alla pelle che può arrivare ad ustionarsi.

Ecco quindi che sorge il bisogno di andare a studiare tutte le onde, in particolar modo IRA e IRB che registrano sintomatologie rispettivamente tra 380-1400nm e 780-1400nm. Gli attuali spettro radiometri, tuttavia, consentono di misurare valori di irradianza, ovvero la quantità di energia che arriva all'operatore per unità di tempo e di superficie, fino a 1000nm. L'obiettivo è dunque quello di creare uno strumento efficace, nel nostro caso rappresentato da un semplice foglio di calcolo, che riesca a prevedere il comportamento di suddetta grandezza per tutto lo spettro di radiazione richiesto.

Grazie quindi al metodo di estrapolazione e sfruttando la funzione della "linea di tendenza" di Excel, siamo riusciti a stimare il comportamento dell'irradianza anche oltre il range di misura dello spettro radiometro utilizzato. Ci sono comunque delle precisazioni da fare, prima tra tutte il fatto che abbiamo eseguito tutte le nostre misure partendo da un caso particolare, il colatore che emette radiazioni in un certo modo e, proprio questo, ci consente di assimilare il suo comportamento, in termini di emissione radiante, a quello di un corpo nero. Dunque, abbiamo potuto a questo punto avvalerci delle relazioni di Wien e di Stefan-Boltzmann, in particolare per approvare la proporzionalità della radianza, quantità di energia emessa dalla sorgente per unità di superficie, di tempo e di angolo solido, con la quarta potenza della temperatura, così da poter determinare che, la lunghezza d'onda a cui ci sarebbe stata la massima irradianza, sarebbe stata al di fuori del range di interesse.

Solo a questo punto, dopo aver valutato tutte le grandezze chiamate in gioco dal D.lgs 81/2008 al Capo V, conosciuto anche come Testo Unico di Sicurezza, pesate con le proprie curve di ponderazione, abbiamo potuto procedere con la valutazione del rischio, dato che la sorgente non risultava "giustificabile". Si sono riscontrate carenze, in termini di sicurezza, per quanto riguarda l'effetto delle radiazioni IR, che avrebbero potuto provocare ustione della cute, in quanto il tempo di esposizione giornaliero dell'operatore ha superato il tempo massimo previsto dalla legge; mentre per quanto riguarda la fascia dell'infrarosso, abbiamo constatato che la misura di irradianza supera il valore limite e che quindi ci sarebbe stato il rischio di ustione della retina.

La scelta dei dispositivi di protezione individuale (DPI) si è basata proprio su questi risultati, facendo ricadere la scelta su un paio di occhiali protettivi, con indice 4-4 con determinati fattori di riduzione della radiazione entrante, per quanto riguarda la protezione dell'occhio dell'operatore, e su un vestiario a manica lunga per evitare eventuali danni alla cute.

BIBLIOGRAFIA

UNI EN 14255-2:2006 Misurazione e valutazione dell'esposizione personale a radiazioni ottiche incoerenti - Parte 2: Radiazioni visibili ed infrarosse emesse da sorgenti artificiali nei posti di lavoro

UNI EN 12198-1:2009 Sicurezza del macchinario - Valutazione e riduzione dei rischi generati dalle radiazioni emesse dal macchinario - Parte 1: Principi generali

UNI EN 12198-2:2009 Sicurezza del macchinario - Valutazione e riduzione dei rischi generati dalle radiazioni emesse dal macchinario - Parte 2: Procedura di misurazione dell'emissione di radiazione

UNI EN 171: 2003 Protezione personale degli occhi - Filtri infrarossi – Requisiti di trasmissione e utilizzazioni raccomandate

D.lgs 81/2008 Tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro

Tuttonormel, 2013, Equipaggiamento elettrico delle macchine, Torino: TNE.

www.portaleagentifisici.it, 1 ottobre 2015

Ing. Giuliano Rosati, VALUTAZIONE DEI RISCHI CORRELATI ALL'ESPOSIZIONE A RADIAZIONI OTTICHE ARTIFICIALI, 21 novembre 2014

<http://www.directindustry.it/>, 5 ottobre 2015

<http://www.uv-index.it/>, 5 ottobre 2015

https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Stefan-Boltzmann, 2 ottobre, 2015

https://it.wikipedia.org/wiki/Corpo_nero, 2 ottobre 2015

https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Wien, 2 ottobre 2015

<http://www.sistemaambiente.net>, 12 ottobre 2015