

B.2.3 Che cosa sono la Distanza Nominale di Rischio Oculare (DNRO) e la EMP di un Laser? come si calcolano?

L'esposizione massima permessa (EMP) è definita dalla norma CEI EN come il livello della radiazione LASER al quale, nelle normali condizioni, possono essere esposte le persone senza subire effetti dannosi. I livelli di EMP rappresentano il livello massimo al quale l'occhio o la pelle possono essere esposti senza subire un danno a breve o a lungo termine; questi livelli dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione LASER, dalla durata dell'impulso o dalla durata dell'esposizione, dal tipo di tessuto esposto.

Si fa presente che allo stato attuale esiste un disallineamento tra VLE prescritti dal D.Lgs. 81/08 e EMP indicati dalla norma CEI EN 60825-1. Di ciò dovrà essere tenuto conto in relazione alle finalità delle misurazioni.

La Distanza Nominale di Rischio Oculare (DNRO) è la distanza alla quale l'irradianza o l'esposizione radiante del fascio uguaglia il corrispondente Valore Limite di Esposizione (VLE) dell'Allegato XXXVII parte II del D.Lgs. 81/08, previsto per l'occhio non protetto. Ovvero è quella distanza oltre la quale la visione del fascio laser è da ritenersi non pericolosa per il tempo utilizzato per determinare il VLE.

La DNRO è pertanto uno strumento indispensabile ai fini della valutazione del rischio laser e per la determinazione delle misure di prevenzione e protezione (es. delimitazione Zona ad Accesso Controllato faq E.1).

Si ricorda che ai sensi della Norma CEI EN 60825-1, il fabbricante deve fornire il valore della DNRO per i Laser in classe 3B e 4 quando appropriato e rilevante, unitamente al valore dell'Esposizione Massima Permissa (EMP). Quando appropriato e rilevante, per gli apparecchi laser di classe 1M e 2M a fascio collimato, oltre all'EMP, il costruttore deve fornire la DNRO estesa, (DNRO comprensiva delle ottiche utilizzate dall'apparato). Essendo l'EMP non sempre uguale al VLE, a causa del disallineamento tra normazione tecnica e legislazione, ne segue che anche il valore della DNRO che usa l'EMP potrà essere diverso dal valore della DNRO che usa il VLE (D.Lgs. 81/08).

La formula generale da utilizzare per il calcolo della DNRO diretta² nel caso di un laser continuo è:

$$DNRO = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot P_0 \cdot e^{-\mu r}}{\pi \cdot E_{VLE}}} - \frac{d}{\Phi} \quad (1)$$

dove:

- P_0 è la potenza radiante che emerge dall'apertura laser (W)
- E_{VLE} è il Valore Limite di Esposizione (VLE, W/m²)
- $k = 1$ per un fascio gaussiano (es. laser a gas, laser in fibra con pochi moduli) e $k = 2,5$ per laser con struttura multimodale (la maggioranza dei laser a stato solido)
- d è il diametro iniziale del fascio, definito come il diametro del più piccolo cerchio che contiene il 63% della potenza (o dell'energia) totale del fascio

² Nella DNRO diretta sono da ricomprendersi tutte quelle situazioni per cui il fascio laser giunge all'occhio del recettore o per visione diretta o per effetto di una riflessione speculare.

stesso ed è spesso indicato con d_{63} . Nel caso di fasci con profilo gaussiano, il diametro d_{63} corrisponde ai punti in cui l'irradiazione (o l'esposizione energetica) scende a 1/e del suo valore centrale di picco. È espresso in m.

- Φ è la divergenza del fascio, definita come l'angolo piano del cono determinato dal diametro del fascio contenente il 63% della potenza (o dell'energia). Nel caso di fasci con profilo gaussiano, corrisponde ai punti in cui l'irradiazione (o l'esposizione energetica) scende a 1/e del suo valore centrale di picco. È espresso in rad (radianti).
- μ è il coefficiente di attenuazione atmosferica alla specifica lunghezza d'onda (m^{-1});

$$\mu = 10^3 \times \frac{3,91}{V} \times \left(\frac{550}{\lambda}\right)^A m^{-1}$$

dove:

- V è la visibilità in km
- $A = 0,585 V^{0,33}$
- λ è la lunghezza d'onda in nm compresa tra 400 nm e 2000 nm
- r è la distanza dell'osservatore dalla sorgente (m).

Dato che determinare l'effettivo valore di V è generalmente piuttosto difficile e impreciso, portando ad un errato calcolo di μ , per maggiore cautela ed evitare una sottostima del rischio, tranne che in casi eccezionali si consiglia di porre di $\mu = 0$.

Si osserva che la (1) non ha una soluzione semplice, essendo l'incognita DNRO uguale alla distanza r dell'osservatore dalla sorgente presente anche al secondo membro in quanto:

- a grande distanza dalla sorgente deve essere valutato il fattore $e^{-\mu r}$ che tiene conto delle perdite dovute all'attenuazione atmosferica;
- per una sorgente estesa, il VLE o l'EMP dipendono dalla distanza stessa, il caso di sorgente estesa nella visione diretta è tuttavia molto raro, come specificato in B9.

In linea di principio, la soluzione generale non può che essere cercata in modo iterativo.

Tuttavia, nella stragrande maggioranza dei casi riscontrabili negli ambienti di lavoro ordinari (industria, laboratori di ricerca, sanità, usi civili) questi contributi possono essere trascurati, eventualmente con una leggera sovrastima della DNRO in ogni caso a favore della sicurezza, come di seguito specificato.

VISIONE DIRETTA SENZA STRUMENTI OTTICI IN AMBIENTE INDOOR

Per gli ambienti indoor, considerate le ordinarie distanze e le condizioni di visibilità, il fattore $e^{-\mu r}$ può essere trascurato, ovvero posto uguale a 1.

Per quanto riguarda il VLE o l'EMP si ricorda che queste grandezze non dipendono dalla distanza posizione di vista - sorgente apparente quando quest'ultima viene vista sotto un angolo $< 1,5$ mrad come specificato in B9.

La formula per il calcolo diventa allora

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot P_0}{\pi \cdot E_{VLE}}}}{\Phi} - \frac{d}{\Phi} \quad (2)$$

LASER A IMPULSI

Importante ricordare che la DNRO deve essere in modo coerente a quanto disposto dal D.Lgs. 81/08 per i laser impulsati. In particolare, nel caso di laser ad impulsi, bisogna calcolare la DNRO applicando i seguenti tre criteri:

- criterio dell'impulso singolo;
- criterio dell'impulso nel treno di impulsi;
- criterio della potenza media nella durata t della durata di un qualsiasi gruppo di impulsi (se la frequenza di ripetizione degli impulsi è regolare, è sufficiente calcolare la potenza media nel tempo t corrispondente alla durata complessiva dell'esposizione). Questo criterio si applica solo per i limiti termici.

La formula della DNRO diretta per un laser impulsato (con impulsi tutti uguali tra loro), trascurando il fattore $e^{-\mu r}$, è simile a quella indicata nella (2), ma dipende dal criterio applicato.

Criterio dell'impulso singolo

La DNRO va calcolata usando l'energia o la potenza del singolo impulso a seconda di come è espresso il VLE, cioè se è espresso come E_{VLE} (cioè in W/m^2) o come H_{VLE} (cioè in J/m^2). Quindi, si applica una delle due formule, a seconda dei casi:

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot Q_0}{\pi \cdot H_{VLE}}}}{\Phi} - \frac{d}{\Phi}$$

dove

- Q_0 , energia del singolo impulso che emerge dall'apertura laser espressa in J
- H_{VLE} , Valore Limite di Esposizione in J/m^2
- k , d , Φ mantengono lo stesso significato di cui alla relazione (1)

Oppure

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot P_0}{\pi \cdot E_{VLE}}}}{\Phi} - \frac{d}{\Phi}$$

dove

- P_0 , potenza del singolo impulso che emerge dall'apertura laser espressa in W
- E_{VLE} , Valore Limite di Esposizione in W/m^2
- k , d , Φ mantengono lo stesso significato di cui alla relazione (1)

Criterio dell'impulso nel treno di impulsi

La DNRO si calcola con le stesse formule dell'impulso singolo, ma sostituendo H_{VLE} e E_{VLE} rispettivamente con $C_p H_{VLE}$ e $C_p E_{VLE}$, dove $C_p = N^{-0,25}$.

Criterio della potenza media

La DNRO si calcola con la formula (2).

Il caso più critico da considerare è quello in cui si ha il valore massimo del rapporto P/E_{VLE} o Q/H_{VLE} .

Impiego di ottiche di osservazione

Nel caso si utilizzino ottiche di osservazione per vedere una sorgente laser, deve essere determinata la Distanza Nominale di Rischio Oculare Estesa (DNROE).

Esempi di ottiche di osservazione che richiedono questo calcolo sono i telescopi, tipicamente quelli degli strumenti per topografia e rilevamento, i binocoli ma anche i mirini ottici delle macchine fotografiche professionali.

La formula per il calcolo diventa la seguente:

$$DNRO = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot G \cdot P_0}{\pi \cdot E_{VLE}}} - \frac{d}{\Phi} \quad (3)$$

Dove G rappresenta il fattore di guadagno dell'ottica e risulta:

400 nm $\leq \lambda < 1400$ nm Diametro del fascio in uscita > 7 mm	$G = \tau * M^2$
400 nm $\leq \lambda < 1400$ nm Diametro del fascio in uscita < 7 mm	$G = \tau * (D_0^2 / 49)$
320 nm $\leq \lambda < 400$ nm 1400 nm $\leq \lambda < 4500$ nm	$G = \tau * M^2$

dove:

- τ è il coefficiente di trasmissione dell'ottica (uguale a 1 se non conosciuto)
- M è la Magnificazione ottica
- D_0 è il diametro della lente dell'obiettivo (mm)

Analogamente, con le sostituzioni di cui sopra, per i laser a impulsi.

ESPOSIZIONE ALLA RADIAZIONE RIFLESSA E DIFFUSA

Nel caso si debba valutare la DNRO della radiazione laser che incide su un diffusore perfetto (ovvero lambertiano) si usa l'espressione:

$$DNRO = \sqrt{\frac{\rho \cdot P_0 \cdot \cos \vartheta}{\pi \cdot E_{VLE}}} \quad (4)$$

dove: