

ILLUMINARE BENE LA SALA DI MUNGITURA SI PUÒ E SI DEVE. ECCO COME.

Indicazioni dal Progetto MungiLUX, realizzato da Università degli Studi di Milano e finanziato da Regione Lombardia.

Gruppo Operativo MungiLUX – Università degli Studi di Milano (F.M. Tangorra*, A. Calcante, M. Zucali, E. Ighina, A. Costa, L. Bava, A. Sandrucci, R. Oberti, A. Tamburini)

*Responsabile del Progetto

È noto a tutti che la sala di mungitura sia il centro nevralgico di un allevamento da latte. Rappresenta l'anello più vitale della catena che collega i campi, dove si producono i foraggi per alimentare le mandrie, al conto in banca, la cui prosperità dipende dalle vendite di latte (Figura 1). Nonostante ciò, molte sono le criticità ravvisabili in sala di mungitura e, tra queste, l'illuminazione è una delle più importanti.



Figura 1. L'anello vitale della catena (Lowe, 1981)

Studi recenti hanno evidenziato diffusi problemi di illuminazione nelle sale di mungitura a spina di pesce e parallele, con valori di illuminamento (E) e uniformità di illuminamento (U_0) non conformi alla norma di riferimento UNI EN 12464-1:2021. Celozzi et al. (2021), ad esempio, in uno studio finalizzato a valutare le prestazioni di mungitura, il comportamento delle vacche e le condizioni microclimatiche nelle diverse aree aziendali, hanno riscontrato che la sala di mungitura è l'area con la peggiore intensità luminosa durante l'intera giornata nelle diverse stagioni (inverno ed estate) e in tutti gli allevamenti analizzati. Tangorra e Costa (2022), in uno studio mirato a valutare l'impatto dell'operatore e degli animali sull'illuminazione degli stalli di mungitura durante una normale sessione di lavoro, hanno riscontrato che in tutte le sale di mungitura analizzate la densità di potenza luminosa risultava inferiore ai valori raccomandati di $6,0 \text{ W/m}^2$ (Sangiorgi, 2003), mentre soltanto il 20% delle sale presentava valori di illuminamento medio e uniformità di illuminamento (rapporto tra illuminamento minimo e illuminamento medio) compatibili con la norma tecnica di riferimento (UNI EN 12464-1: 2021), che prevede livelli minimi rispettivamente di 200 lux e 0,6.

Il rilascio nel 2011 della UNI EN 12464-1, cui ha fatto seguito l'aggiornamento del 2021, ha introdotto un approccio più mirato all'illuminazione degli ambienti di lavoro, ponendo particolare attenzione alle aree in cui si svolge un **compito visivo specifico**. Nel caso della sala di mungitura, questo si traduce nella necessità di garantire un adeguato livello di illuminazione per consentire all'operatore di distinguere chiaramente elementi come la mammella, i capezzoli, i getti di latte e i gruppi di mungitura. A tal fine, la norma stabilisce un valore minimo di illuminamento medio mantenuto (E_m) pari a 200 lux per la zona in cui si svolge il compito visivo. Attorno a questa zona principale si definiscono due ulteriori aree: una zona immediatamente circostante, che deve avere un livello di illuminazione correlato a quello della zona del compito visivo, e una zona di sfondo, che richiede un'illuminazione pari ad almeno un terzo di quella della zona circostante. Questa distribuzione graduale serve a prevenire affaticamento visivo e disagio.

Oltre al rispetto dei livelli illuminotecnici, è fondamentale garantire comfort visivo e sicurezza sul lavoro. Si distingue così un'**illuminazione fisiologica**, che riguarda il benessere dell'individuo, e un'**illuminazione di lavoro**, indispensabile per eseguire correttamente le operazioni e valutare le condizioni igienico-ambientali.

Diverse fonti tecniche indicano valori raccomandati compresi tra 200 e 250 lux per l'area di mungitura (Rajaniemi et al., 2015; Clarke e House, 2016), mentre l'American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE, 2014) suggerisce 500 lux nella fossa di mungitura, dove è cruciale garantire visibilità per il controllo igienico della mammella e l'attacco dei gruppi. Una buona illuminazione, inoltre, contribuisce alla fluidità dei movimenti degli animali, che possono essere ostacolati da ombre nette e contrasti di luce sul pavimento. Le bovine, infatti, tendono a fermarsi davanti a zone scure che percepiscono come barriere. Per questo motivo è consigliabile installare le luci in modo da minimizzare le ombre e sfruttare quanto più possibile la luce naturale, progettando ambienti con tetti alti e pareti aperte. L'apporto di luce naturale, oltre a ridurre i consumi energetici, ha effetti benefici anche sull'uomo svolgendo un effetto "caffaina", che migliora attenzione e umore nel breve termine, e un effetto "vitamina", che agisce positivamente sui ritmi circadiani e sul benessere psico-fisico nel lungo periodo (De Fraia, 2008).

Sebbene i tempi di permanenza delle vacche sugli stalli di mungitura siano limitati (8-10 minuti per mungitura, due o tre volte al giorno), l'illuminazione non va sottovalutata. Una luce adeguata può ridurre i tempi di mungitura anche del 12%, favorendo un miglior rilascio di ossitocina (Abrosimova, 1978; Macuhova e Bruckmaier, 2004) e facilitando l'esecuzione della routine di mungitura.

Dal punto di vista energetico, l'illuminazione della sala mungitura è spesso percepita come poco rilevante, ma può determinare consumi fino a 1 kWh per vacca alla settimana. Considerando un prezzo medio dell'energia di 0,20 €/kWh, questo si traduce in un costo annuo di circa 1.000 € ogni 100 vacche. Per contenere i consumi elettrici è utile adottare corpi illuminanti più efficienti come le lampade LED che consumano fino al 50% in meno e durano più a lungo (Upton et al., 2010; Winter e Wagner, 2002).

Come progettare l'illuminazione di una sala di mungitura e quali elementi considerare? A questa domanda hanno cercato di rispondere un gruppo di ricercatori dei Dipartimenti di Medicina Veterinaria e Scienze Animali (DIVAS) e di Scienze Agrarie e Ambientali (DISAA) dell'Università degli Studi di Milano, unitamente a due aziende lombarde di bovine da latte, sviluppando il Progetto MungiLUX "Uso efficiente dell'illuminazione artificiale e sfruttamento intensivo della luce naturale nelle sale di mungitura" sostenuto da Regione Lombardia nell'ambito del FEASR – Programma di Sviluppo Rurale 2014-2020, Misura 16 "Cooperazione", Sottomisura 16.1, che promuove la creazione e gestione di Gruppi Operativi del PEI dedicati alla produttività e sostenibilità dell'agricoltura.

Calcolo del rapporto finestratura/pavimentazione (WFR), fattore medio di luce diurna (ADF) e uniformità del fattore di luce diurna (UDF): la corretta illuminazione degli spazi interni richiede l'integrazione di due fonti di illuminazione: quella naturale e quella artificiale. Una buona progettazione dell'illuminazione artificiale, quindi, dovrebbe partire sempre dall'analisi della luce naturale. A questo scopo vanno calcolati il rapporto tra la superficie vetrata e la superficie del pavimento (WFR, Window-to-Floor Ratio), il fattore medio di luce diurna (ADF, Average Daylight Factor) e l'uniformità del fattore di luce diurna (UDF, Uniform Daylight Factor).

Il WFR va calcolato dividendo la superficie finestrata totale (W_A , m²) per la superficie calpestabile della sala di mungitura (F_A , m²), utilizzando la seguente equazione:

$$WFR = \frac{W_A}{F_A} \times 100 (\%)$$

Questo parametro indica quanta luce può teoricamente entrare in un ambiente, influenzando la potenza elettrica da installare. Un WFR elevato significa che l'ambiente riceve molta luce naturale, permettendo di ridurre la potenza e il numero di corpi illuminanti artificiali, al contrario un WFR basso richiede una maggiore integrazione con la luce artificiale. Il WFR dipende fortemente dal tipo di spazio e dalla destinazione d'uso. Il valore minimo raccomandato dalle linee guida unificate di Edilizia e Zootecnia della Regione Lombardia è del 10%.

L'ADF rappresenta la percentuale media di luce naturale presente all'interno di un ambiente rispetto all'illuminamento disponibile all'esterno, misurato su una superficie di riferimento con cielo completamente coperto. Va calcolato con la seguente equazione:

$$ADF = \frac{E_{a,i}}{E_{a,o}} \times 100 (\%)$$

dove:

$E_{a,i}$ = illuminamento medio interno (lx)

$E_{a,o}$ = illuminamento medio esterno (lx)

Per identificare i punti in cui misurare i valori di illuminamento all'interno della sala di mungitura è necessario creare una griglia di riferimento secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 12464:2021. Gli illuminamenti medi E_a vanno calcolati facendo la media aritmetica dei valori di illuminamento misurati al centro di ogni cella, utilizzando un luxmetro professionale con precisione almeno di classe C secondo la norma DIN 5032-7:2017.

L'UDF si ottiene dividendo il fattore di luce diurna minimo DF_{min} per ADF:

$$UDF = \frac{DF_{min}}{ADF}$$

Valori di ADF superiori al 2% garantiscono comfort visivo agli operatori, mentre valori inferiori all'1% sono considerati insufficienti. Relativamente all'UDF, quanto più si avvicina all'unità, tanto maggiore è l'uniformità luminosa di una superficie. Orientamento degli edifici, forma e posizione delle finestre, coefficiente di trasmissione del vetro, coefficiente di riflessione delle superfici, stato di manutenzione del vetro e delle superfici interne sono i principali fattori che influenzano i valori misurati di ADF. Secondo l'Associazione certificata degli ingegneri impiantisti (CISBE), un ADF superiore al 5% fa sì che uno spazio interno appaia sostanzialmente illuminato a giorno, mentre un ADF inferiore al 2% rende uno spazio monotono, ovvero con una distribuzione della luce priva di variazioni che rende difficoltosa la percezione delle forme, delle profondità e dei dettagli spaziali. Sebbene non ci sia un consenso generale sui requisiti minimi da adottare per l'illuminazione naturale degli edifici, un numero crescente di evidenze oggettive ed empiriche conferma che la luce naturale è fondamentale per la salute e la produttività delle persone (Mardaljevic, 2021).

Modellazione digitale della sala di mungitura: il calcolo illuminotecnico si basa su due tipologie di dati principali: fotometrici e ambientali. I dati fotometrici descrivono in maniera completa le caratteristiche luminose degli apparecchi, ovvero la distribuzione della luce nello spazio secondo coordinate sferiche. I dati ambientali, invece, riguardano la geometria degli ambienti e le proprietà fisiche delle superfici, determinando il modo in cui la luce interagisce con esse. Nell'ambito del progetto MungiLUX, i calcoli illuminotecnici sono stati realizzati con il software DIALux® Evo che permette di creare ambienti tridimensionali realistici ai fini della simulazione illuminotecnica. La modellazione digitale della sala di mungitura ha previsto le seguenti fasi:

- a) Acquisizione preliminare di dati geometrici accurati, mediante rilievi metrici degli edifici esistenti e delle aree immediatamente circostanti. Questa fase ha consentito di ottenere l'altezza dei solai, le dimensioni e la posizione di pareti, porte, finestre ed elementi impiantistici (gruppi di mungitura, lattodotto, vaso terminale, poste, cancelli di ingresso e uscita, culattiere, ecc.);
- b) Trasposizione in formato digitale, all'interno del software DIALux®, dei dati raccolti durante i rilievi metrici. Questo passaggio garantisce che la rappresentazione digitale della sala sia fedele alla realtà e possa essere utilizzata come base affidabile per successive analisi, progettazioni e simulazioni;
- c) Impostazione dei materiali e delle proprietà riflettenti delle superfici interne (pareti, pavimenti, soffitti) e delle proprietà ottiche dei vetri (trasparenza) per influenzare correttamente la distribuzione della luce all'interno dello spazio;

- d) Inserimento degli apparecchi illuminanti, selezionandoli da cataloghi digitali contenenti dati fotometrici reali forniti dai produttori;
- e) Configurazione dell'apporto di luce diurna, impostando orientamento, latitudine, data e ora, così da valutare l'incidenza della radiazione solare sulla sala di mungitura attraverso le superfici vetrate.

Nel software DIALux®, la gestione dei corpi illuminanti risulta intuitiva perché i produttori stessi forniscono plugin contenenti le informazioni necessarie (curva fotometrica, rappresentazione grafica della lampada) sui loro apparecchi. La fase più impegnativa è la modellazione degli ambienti, a causa dell'elevato numero di parametri da definire e della precisione richiesta per una resa fedele degli spazi. Particolare attenzione merita la definizione e l'interpretazione dei coefficienti di riflessione p delle pareti e di trasmissione luminosa τ_l dei vetri. DIALux® considera tutte le superfici come perfettamente diffondenti, per cui la riflessione non dipende dal materiale o dalla sua texture, ma esclusivamente dal colore. Il coefficiente τ_l indica quanta luce, tra quella incidente su un vetro, riesce ad attraversarlo e ad illuminare un ambiente interno.

Il risultato del processo di modellazione digitale di una delle sale di mungitura coinvolte nel progetto MungiLUX è rappresentata in Figura 2. Le strutture e gli impianti di mungitura sono stati riprodotti in modo semplificato sia per non perdere in generalità, sia perché piccole superfici, soprattutto se poste ai margini della sala, non influenzano sensibilmente i risultati nelle zone del compito visivo.



Figura 2. Le poste di mungitura reali (a sinistra) e digitalizzate con DIALux® (a destra) di una sala coinvolta nel progetto MungiLUX.

Per valutare il contributo della luce naturale all'illuminamento della sala di mungitura si è tenuto conto anche degli spazi esterni prospicienti e degli ostacoli ostruenti la luce: superfici libere di fronte alle finestre, infatti, aumentano per riflessione la quantità di luce entrante, mentre ostacoli come edifici e alberi la riducono. Di conseguenza sono stati digitalizzati in modo semplificato anche gli edifici del centro aziendale situati in prossimità della sala di mungitura. La valutazione preliminare del contributo della luce naturale è stata realizzata con l'applicativo web 3D Sun-Path, che consente di visualizzare il percorso solare in funzione della posizione geografica e dell'orientamento di un edificio (Figura 3).

Definizione delle aree dei compiti visivi del mungitore: in sala di mungitura è necessaria una buona illuminazione per riconoscere e distinguere gli elementi coinvolti nella mungitura (mammella, capezzoli, gruppo di mungitura, ecc.) e per eseguire correttamente le azioni indispensabili, come la preparazione della mammella prima della mungitura, il controllo di eventuali alterazioni dei capezzoli e del latte, la verifica, la manipolazione e l'attacco del gruppo di mungitura, nonché le operazioni post-mungitura. L'illuminazione deve inoltre garantire comfort visivo all'operatore, riducendo al minimo abbagliamenti e ombre, e favorire concentrazione e prontezza durante il lavoro. A tal fine, la norma UNI EN 12464-1:2021 definisce i requisiti minimi di illuminazione per i luoghi di lavoro interni. Secondo tale norma, l'illuminazione deve essere differenziata e concentrata laddove sia richiesto uno specifico compito visivo, inteso come l'insieme di elementi che l'osservatore deve distinguere in modo corretto e chiaro per svolgere il proprio lavoro.

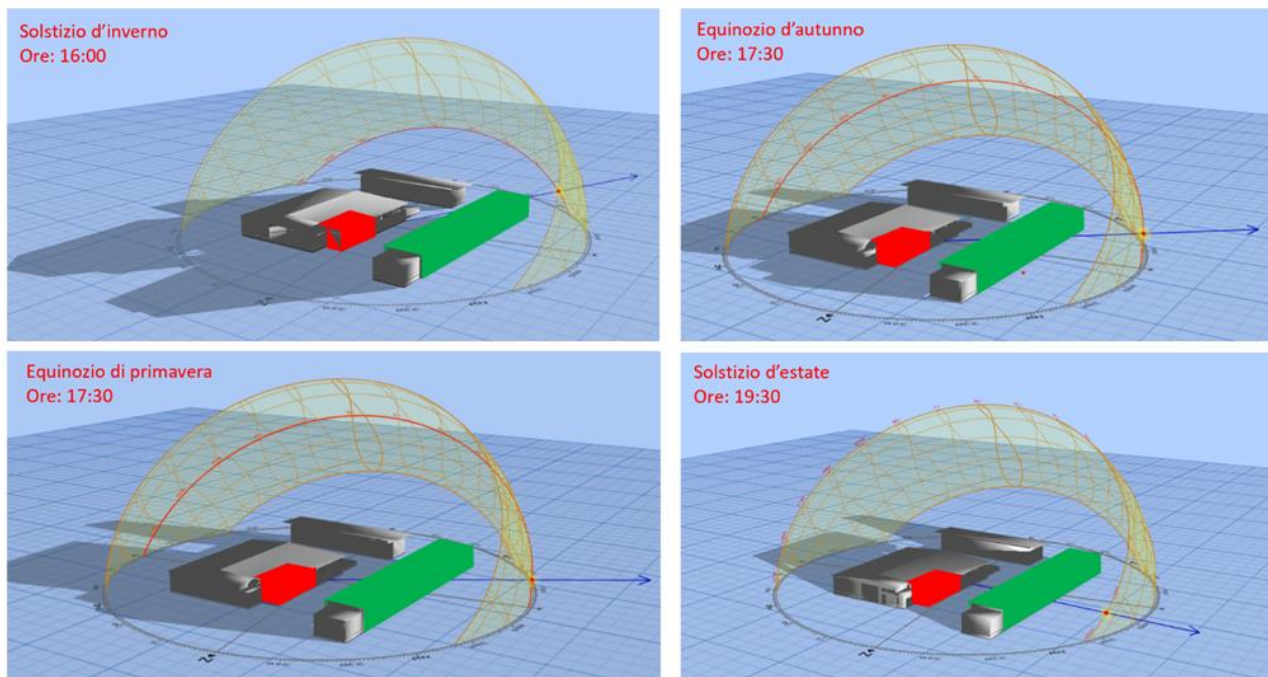


Figura 3. Modello digitale del centro aziendale in cui si trova una delle sale di mungitura coinvolte nel Progetto MungiLUX. Il tetto colorato in rosso permette di identificare la posizione della sala rispetto agli altri edifici del centro aziendale. Fienile ed officina (in verde) posti di fronte alle finestre rivolte ad O della sala di mungitura limitano l'ingresso della luce naturale, generando zone d'ombra persistenti nelle ore pomeridiane, a partire dalle 16:00 in corrispondenza del solstizio d'inverno, 17:30 durante gli equinozi di primavera e autunno, 19:30 al solstizio d'estate.

A questo scopo, vengono definiti l'illuminamento medio mantenuto (E_a), ovvero il valore di illuminamento richiesto nell'area in cui si svolge il compito visivo, e l'uniformità di illuminamento (U_0), cioè il rapporto tra l'illuminamento minimo e quello medio nell'area del compito visivo.

Per ciascun lato della sala di mungitura sono state definite tre aree principali del compito visivo (VTA - Visual Task Areas), come evidenziato in Figura 4. La prima (VTA_1), larga un metro e che si estende per tutta la lunghezza della fossa di mungitura, include l'area del pavimento della postazione sotto la mammella e la zona in cui sono posizionati i gruppi di mungitura. Questa area comporta compiti visivi orizzontali, come il riconoscimento di eventuali anomalie nel latte e le operazioni di spostamento e attacco del gruppo di mungitura alle mammelle. La seconda (VTA_2) e la terza (VTA_3) comprendono rispettivamente l'area davanti alla mammella e ai capezzoli, e le unità di controllo della mungitura. Queste aree comportano compiti visivi e operativi verticali, tra cui: controllo di anomalie e lesioni della mammella e dei capezzoli; esecuzione della routine di mungitura; impostazioni delle centraline di mungitura. Un'ulteriore area del compito visivo (VTA_4) corrisponde alla zona del filtro del latte e comporta compiti visivi e operativi legati all'installazione e al controllo del filtro, rispettivamente all'inizio e alla fine del processo di mungitura. La dimensione delle diverse aree dipende dalla configurazione dell'impianto di mungitura.

In conformità alla norma UNI EN 12464-1:2021, è stato creato un sistema a griglia per identificare i punti in cui misurare i valori di illuminamento per ciascuna di queste aree.

L'illuminamento medio (E_a) è stato calcolato come media aritmetica dei valori di illuminamento misurati al centro di ciascuna cella, utilizzando la seguente equazione:

$$E_a = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n}$$

dove:

E_a = illuminamento medio (lux)

$E_1 \div E_n$ = valori di illuminamento nei punti di misura (lux)

n = numero totale dei punti di misura

L'uniformità di illuminamento (U_0) è stata calcolata come segue:

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{E_a}$$

dove:

U_0 = uniformità di illuminamento

$E_{\min}$ = valore minimo di illuminamento misurato (lux)

E_a = illuminamento medio (lux)

In un sistema di illuminazione perfettamente uniforme U_0 può arrivare fino ad 1. Maggiore è il valore, più uniformemente distribuita è la luce sull'area illuminata.

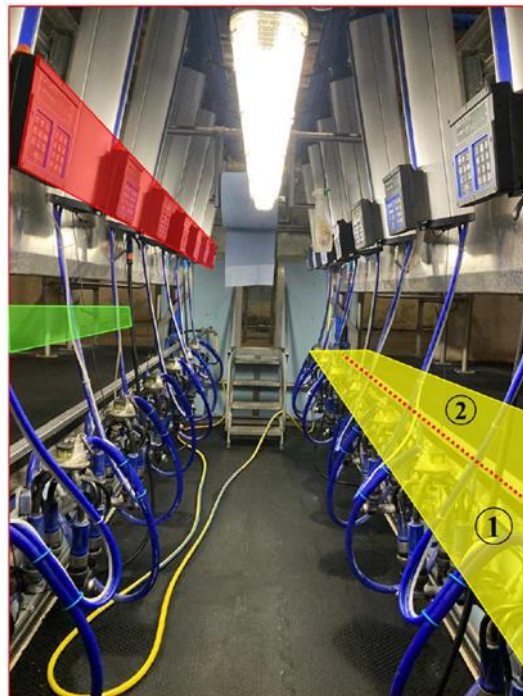


Figura 4. VTA₁ (gialla), VTA₂ (verde) e VTA₃ (rossa) in una delle sale di mungitura coinvolte nel Progetto MungiLUX. Nella VTA₁, la linea rossa tratteggiata segna il confine tra l'area in cui sono posizionati i gruppi di mungitura (1) e l'area sotto la mammella (2).

Simulazione scenari di illuminazione: realizzata con Dialux® Evo, ha previsto: i) inserimento dei corpi illuminanti, con il posizionamento e orientamento delle lampade, la definizione di flusso luminoso (lumen), curva fotometrica, temperatura colore (K), efficienza e potenza (W); ii) simulazione della luce naturale, con impostazione geografica del progetto, definizione di data, ora, condizioni atmosferiche (cielo sereno, coperto, ecc.); iii) calcolo illuminotecnico, ovvero calcolo di illuminamento medio (E_a), illuminamento minimo ($E_{\min}$), uniformità di illuminamento (U_0); abbagliamento (UGR); iv) visualizzazione grafica, con isolinee di illuminamento, mappe a falsi colori, rendering 3D realistico (Figura 5).

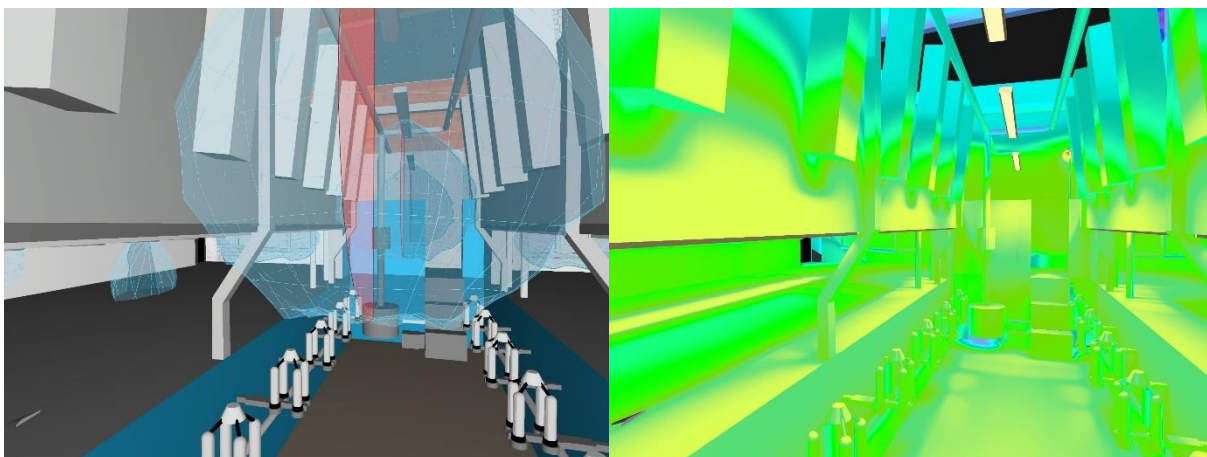


Figura 5. Rendering semplificato di una delle sale di mungitura coinvolte nel Progetto MungiLUX. A sinistra, le curve di diffusione luminosa descrivono come gli apparecchi luminosi diffondono la luce nello spazio, permettendo di progettare sistemi di illuminazione efficaci e coerenti con gli obiettivi visivi e normativi. A destra, i colori falsati consentono di visualizzare la distribuzione dell'illuminamento e di valutare se l'ambiente è illuminato in modo omogeneo e conforme alle normative.

Realizzazione del nuovo impianto: una volta completate le simulazioni, quella che meglio soddisfaceva i requisiti normativi è stata implementata ottenendo il nuovo impianto di illuminazione (Figura 6)



Figura 6. La progettazione illuminotecnica integrata con DIALux® Evo ha permesso di simulare e analizzare con precisione come la luce si comporta sulle poste di mungitura. In questo modo è stato possibile realizzare un impianto di illuminazione molto efficiente, conforme alla norma UNI EN 12464-1:2021, che garantisce una visione chiara di mammella, capezzoli, gruppi di mungitura e pavimentazione, migliorando la percezione spaziale e assicurando un comfort visivo ottimale. Ciò consente l'esecuzione efficace delle routine pre- e post-mungitura.