



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Studio di misure alternative per la misura dell'indice di resa cromatica e del contrasto percepito

*Alessandro Rizzi, Cristian Bonanomi, Saim Rasheed*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI INFORMATICA E COMUNICAZIONE  
VIA COMELICO 39 – 20135 MILANO – ITALIA

STUDIO DI MISURE ALTERNATIVE PER LA MISURA DELL'INDICE DI RESA CROMATICA E DEL CONTRASTO PERCEPITO

Alessandro Rizzi, Cristian Bonanomi, Saim Rasheed (Università degli Studi di Milano, Dipartimento Informatica e Comunicazione)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica

Responsabile Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Il rapporto comprende allegati



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**

**DIPARTIMENTO DI INFORMATICA E COMUNICAZIONE**

**VIA COMELICO 39 – 201 35 MILANO – ITALIA**

## **Studio di misure alternative per la misura dell'indice di resa cromatica e del contrasto percepito**

# Parte prima: Il Color Rendering Index

## 1. Le debolezze del CRI

Nel 1965 la CIE propose una procedura per specificare le proprietà di resa visiva di una sorgente di luce [1], in modo da misurare quanto una sorgente luminosa preserva l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa. Nel 1974 tale metodo, denominato color rendering index (CRI), venne aggiornato [2]. La versione attuale, sebbene criticata in varie pubblicazioni, è fondamentalmente basata sul metodo del 1974, corretta con aggiustamenti minori, ed è datata 1995 [3].

Tale indice è usato regolarmente, ma con l'avvento di nuovi tipi di illuminazione ha mostrato i suoi limiti. Molti studi hanno evidenziato come in diversi casi il CRI non restituisce una misura attendibile, vale a dire una misura in linea con la percezione del nostro sistema visivo [4, 5, 6, 7].

E' risultato chiaro che il metodo standard della CIE [3] per calcolare l'indice di resa cromatica fallisce nel predire la risposta visiva sotto sorgenti di luce a banda stretta, come ad esempio le lampade fluorescenti a tre bande o i LED bianchi [8, 9]. Tali sorgenti di luce infatti hanno un indice di resa cromatica piuttosto basso, ma un piacevole aspetto visivo (visual appeal) e una conservazione dell'apparenza cromatica superiore a quella indicata dal CRI.

La ragione principale di tale inadeguatezza è legata alla distribuzione spettrale di potenza poco uniforme che tali sorgenti di luce emettono.

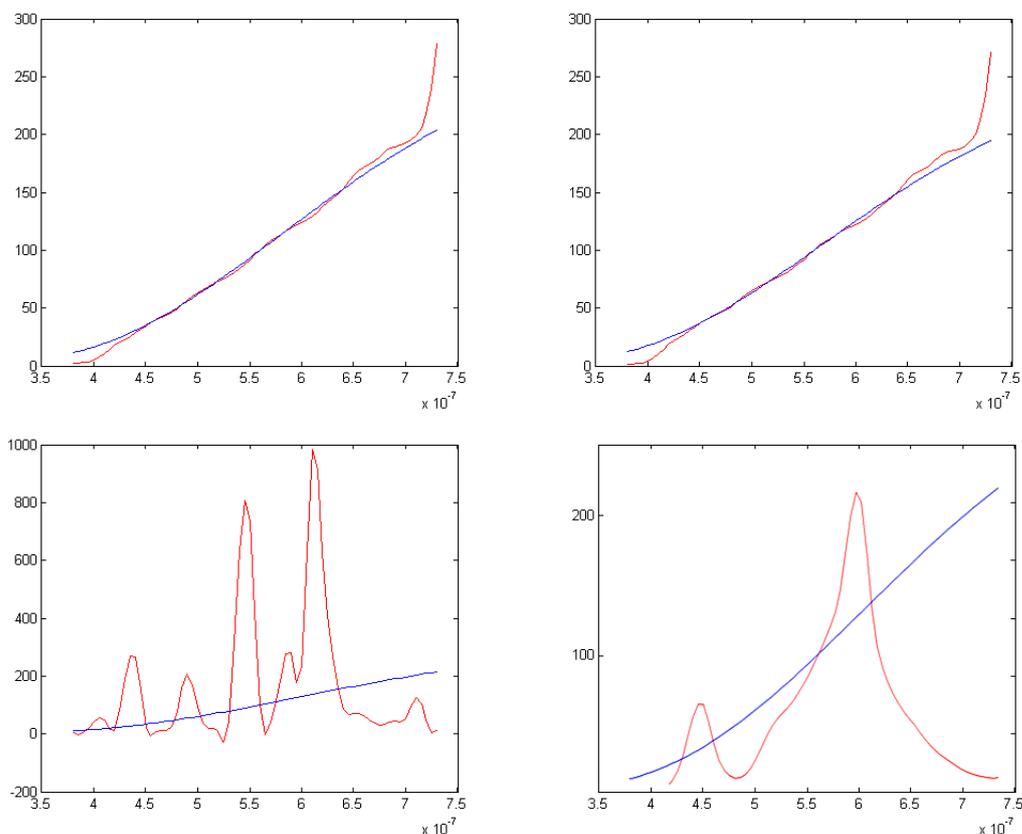


Fig. 1: spettri delle sorgenti usate nei test (dall'alto a sinistra, in senso orario: tungsteno 100W, alogena 70W, fluorescente, Led)

In figura 1 sono mostrati in rosso gli spettri delle sorgenti di luce usate nei test descritti nella relazione precedente (“test percettivi sull’indice di resa cromatica”). Il grafico blu rappresenta la sorgente di riferimento calcolata. Poiché in questo caso, la temperatura colore era intorno ai 2800 K, e quindi minore di 5000, la sorgente di riferimento è la radiazione del corpo nero, con la medesima temperatura della sorgente test.

Analizzandone l’aspetto computazionale, l’indice di resa cromatica è calcolato come singolo valore medio, a partire da un numero limitato di campioni di colore test. Questo aspetto e la metrica utilizzata per calcolare le differenze di colore potrebbero essere fattori da riconsiderare per la proposta di CRI dalle performance più elevate [9].

Nella precedente relazione (“test percettivi sull’indice di resa cromatica”), sono stati effettuati due test con lo scopo di ottenere una valutazione percettiva, compiuta da un certo numero di osservatori, sulla capacità dell’illuminante di mantenere il colore degli oggetti. Tali esperimenti forniscono una serie di valori utilizzabili per validare il CRI.

In particolare, per il primo esperimento sono state costruite due light booth, illuminate da due sorgenti di luce differente, sul cui fondo erano posizionati due Macbeth Color Checker. Agli osservatori è stato chiesto di valutare le differenze di colore di ogni patch del Color Checker, osservate sotto la sorgente di riferimento (sorgente di luce con un CRI prossimo a 100) e sotto la sorgente di test (fluorescente, alogena, LED) (si veda fig.1). Dai risultati dei test si nota che l’indice di resa cromatica concorda approssimativamente all’indice percettivo per quanto riguarda le sorgenti di luce fluorescente e alogena, mentre risulta decisamente più basso per quanto riguarda i LED.

I risultati ottenuti da tali test sono in linea con gli studi trovati in letteratura [4, 5, 6, 7, 8].

Considerando che i LED bianchi si stanno evolvendo per diventare la prossima generazione di sistemi di illuminazione grazie alle eccellenti proprietà di efficienza luminosa, basso consumo e lunga durata, con lo scopo di sostituire le attuali lampade ad incandescenza e fluorescenti, sviluppare metriche più performanti risulta necessario. Molti ricercatori stanno lavorando per risolvere questo problema, sviluppando nuovi approcci per stimare la qualità della luce, come il Color Quality Scale [10], l’indice R96a [11] e il CRI00 [12].

Questo documento intende analizzare i fattori di forza e di debolezza del CRI per analizzare possibili miglioramenti, già proposti e non in letteratura.

## **2. L’approccio e le componenti da variare**

L’approccio base della CIE nella formulazione del CRI è stato quello di misurare il comportamento “percettivo” di una serie di patch campione al variare della componente spettrale dell’illuminante. La parola “percettivo” è virgolettata perché nelle intenzioni degli autori del CRI vi è la modellizzazione della risposta del sistema visivo allo stimolo, ma quanto implementato nel calcolo dell’indice è una sua versione estremamente semplificata.

Volendo mantenere l'approccio adottato nel CRI base, vi sono una serie di punti che meritano discussione e approfondimento nel tentativo di migliorare la misura.

I punti principali sono i seguenti:

- Scelta delle patch da utilizzare come campioni test
- Spazio di colore dove effettuare i calcoli
- Tipo di adattamento cromatico

Vi è poi la possibilità di aggiungere dei fattori correttivi per migliorare la misura senza cambiare radicalmente l'idea base del calcolo. Infatti altri fattori, da aggiungere al CRI standard, potrebbero essere:

- La penalizzazione dell'indice di resa cromatica nel momento in cui si stanno testando sorgenti di luce che abbiano una temperatura colore *estrema*, cioè che si allontani considerevolmente da una temperatura colore di 4000 – 8000 K. Una temperatura colore che si trova nel range appena descritto è abbastanza tipica della luce naturale. Tre tipiche sorgenti daylight infatti sono: D50 (circa 5000 K), D65 (circa 6500 K), D75 (circa 7500 K).
- L'introduzione di fattori correttivi per i LED

## 2.1 Considerazioni sull'approccio base

L'ultimo tra i punti da approfondire del CRI base, relativo all'adattamento cromatico, è quello su cui potrebbe essere necessario intervenire maggiormente. La presenza dell'adattamento cromatico nel CRI ha lo scopo di scontare differenze di apparenza tra le patch da confrontare a seguito di una dominante cromatica nell'illuminante.

In questo approccio vi sono due punti importanti che meritano un commento.

Il primo è quello che la costanza cromatica del sistema visivo umano non è completa. Quando osserviamo un colore sotto una lampada non neutra, è vero che compensiamo il colore dell'illuminante rendendo le patch osservate sotto i due diversi illuminanti molto più simili, ma non uguali.

Parte dell'informazione sul colore dell'illuminante viene mantenuta, siamo cioè sempre in grado di valutare il colore dell'illuminante sotto la quale osserviamo le patch.

E' importante quindi che il tipo di adattamento implementato nel CRI tenga conto di questo aspetto.

Aspetto più importante è però il concetto stesso di adattamento. Vi sono nel sistema visivo dei meccanismi di adattamento ben conosciuti come l'adattamento al livello di luminosità della scena. Quest'ultimo è un meccanismo che ha luogo mediante cambiamenti fisiologici di natura elettrica e chimica caratterizzati da un loro tempo di attuazione che dipende dall'intensità luminosa a cui il sistema visivo si deve adattare. Meccanismo differente è invece la cosiddetta costanza istantanea di colore che avviene nel sistema visivo tramite un'elaborazione spaziale del contenuto della scena. Tale meccanismo sembra essere il responsabile della nostra compensazione rispetto al colore della luce. Se si vuole considerare questo meccanismo all'interno del CRI, risulta evidente come non sia possibile farlo attraverso l'informazione di colore puntuale, e quindi tramite alcuna trasformata del colore nel punto come quella di Bradford o Von Kries. Una computazione spaziale del contenuto della scena risulterebbe necessaria ed è per questa ragione che parallelamente allo studio del

CRI stiamo approfondendo anche la misura del contrasto percepito (parte seconda di questo documento).

Ne segue quindi che tenere conto di questo aspetto imporrebbe un radicale cambio dell'approccio base nel calcolo del CRI, cosa che in questa fase della ricerca preferiamo non fare. Riteniamo più utile per ora approfondire i molti aspetti migliorabili del calcolo del CRI base prima di proporre modifiche radicali.

## 2.2 Scelta delle patch test

Al fine di valutare una sorgente di luce, lo standard CRI prevede l'utilizzo di otto campioni di colore estratti dal libro di Munsell. Tali campioni sono di moderata saturazione. Altri sei campioni di colore ad elevata saturazione sono disponibili per eventuali test aggiuntivi [13].

Name	Appr. Munsell	Appearance under daylight	Swatch
TCS01	7,5 R 6/4	Light greyish red	
TCS02	5 Y 6/4	Dark greyish yellow	
TCS03	5 GY 6/8	Strong yellow green	
TCS04	2,5 G 6/6	Moderate yellowish green	
TCS05	10 BG 6/4	Light bluish green	
TCS06	5 PB 6/8	Light blue	
TCS07	2,5 P 6/8	Light violet	
TCS08	10 P 6/8	Light reddish purple	
TCS09	4,5 R 4/13	Strong red	
TCS10	5 Y 8/10	Strong yellow	
TCS11	4,5 G 5/8	Strong green	
TCS12	3 PB 3/11	Strong blue	
TCS13	5 YR 8/4	Light yellowish pink	
TCS14	5 GY 4/4	Moderate olive green (leaf)	

Fig 2: 8+6 campioni di colore per il calcolo del CRI

Nel 1999, la CIE pubblica R96a, un metodo alternativo, che avrebbe dovuto sostituire il vecchio indice di resa cromatica, ma che di fatto non è mai stato utilizzato [11].

In tale indice, i 14 campioni Munsell (8 standard + 6) vengono sostituiti da dieci campioni differenti, 8 tratti dal Macbeth Color Checker e 2 che mirano a riprodurre due diverse tonalità della pelle (fig. 3).

	TCS01*	TCS02*	TCS03*	TCS04*	TCS05*	TCS06*	TCS07*	TCS08*	TCS09*	TCS10*
L*	40.9	61.1	81.6	72.0	55.7	51.7	30.0	51.0	68.7	63.9
a*	51.0	28.8	-4.2	-29.4	-43.4	-26.4	23.2	47.3	14.2	11.7
b*	26.3	57.9	80.3	58.9	35.6	-24.6	-49.6	-13.8	17.4	17.3
										

Fig 3: 10 campioni di colore per il calcolo del R96a

Tra il 2005 e il 2006 Davis e Ohno [10], propongono un nuovo metodo per il calcolo della resa cromatica di una sorgente di luce, denominato Color Quality Scale (CQS).

Tra le differenze che si riscontrano rispetto al CRI c'è l'utilizzo di 15 campioni di colore Munsell ad elevata saturazione (fig. 4).



Fig 4: 15 campioni di colore per il calcolo del CQS

Recentemente, Brodogi et al. [14] hanno ridefinito l'indice di resa cromatica, scegliendo 17 campioni di colore, di cui 12 tratti dal Macbeth Color Checker e i restanti 5 dal catalogo NIST (fig. 5).



Fig 5: 20 campioni di colore per il calcolo dell'indice di resa cromatica di Brodogi. I campioni 13, 14 e 15 vennero in seguito scartati.

È interessante notare come nessuno dei metodi descritti in precedenza preveda l'utilizzo di test acromatiche. Soltanto Brodogi nel suo articolo descrive come inizialmente avesse deciso di inserire i campioni bianco, grigio e nero, campioni poi rimossi (senza che venga descritta la motivazione) nella formulazione finale. E' chiaro che se viene computata una qualche forma di adattamento, questa ha come effetto quello di annullare le differenze nelle patch acromatiche, che al contrario risulterebbero preziose se non si computasse alcuna normalizzazione.

Per la misura che intendiamo proporre stiamo analizzando come scelta di campioni di colore test tutta la chart del Macbeth Color Checker. Tale chart è costituita da 24 patch, composta dai tipici colori primari additivi, rosso, verde, blu, da quelli sottrattivi, ciano, magenta, giallo, che quindi sono ad elevata saturazione; sei campioni acromatici, dal bianco al nero e quattro grigi, e una serie di colori naturali, che vogliono riprodurre tonalità tipiche della natura, come il verde delle foglie, il blu del cielo, le tonalità della pelle (fig. 6).

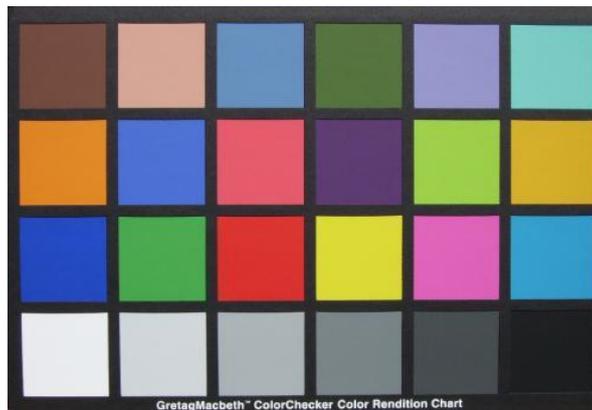


Fig 6: Macbeth Color Checker

La scelta di utilizzare questi campioni è giustificata dal fatto che nella vita di tutti i giorni le sorgenti di luce, sia di uso domestico che professionale, illuminano oggetti dai colori più svariati, che possono avere saturazione sia alta che moderata. Grazie alla potenza di calcolo attuale, è possibile utilizzare un numero maggiore di campioni, circostanza che era preclusa negli anni 70, quando il CRI realizzato dalla CIE è stato standardizzato.

Inoltre, il Macbeth Color Checker è di facile reperibilità ed è il target usato per ottenere la valutazione percettiva tramite osservatori presentata nel report precedente.

### 2.3 Spazio di colore

Un'altra caratteristica importante del CRI è lo spazio colore in cui vengono svolti i calcoli.

Nel CRI standard, si passa dapprima per lo spazio Yuv e si giunge nello spazio CIE 1964  $U^*V^*W^*$ . In questo spazio colore, la cui caratteristica dovrebbe essere l'uniformità percettiva, vengono calcolate le differenze di colore  $\Delta E$  per ogni colore test, visto sotto l'illuminante di riferimento e sotto la sorgente test. Anche a detta della CIE [13], tale spazio colore è obsoleto, ed infatti nel successivo R96a, esso è sostituito dal CIELAB.

Anche Geisler-Moroder e Dur, sviluppando il loro CRI00 [12], sostituiscono il vecchio CIE  $U^*V^*W^*$  (1964) con il più recente CIELAB (1976).

Lo spazio colore CIELAB viene detto spazio a dimensioni opponenti, in quanto le tre coordinate  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  si rifanno in qualche modo alla teoria dei colori opponenti di Hering. Secondo Hering infatti i colori fondamentali sono quattro: rosso, verde, blu e giallo, e il sistema visivo divide le informazioni che derivano dagli occhi in tre differenti canali: rosso-verde, giallo-blu, bianco-nero.

Nel CIELAB, la  $L^*$  corrisponde ad una scalatura secondo la radice cubica della luminanza, in linea con la percezione umana, mentre  $a^*$  e  $b^*$  corrispondono approssimativamente agli assi cromatici ( $a^*$ :rosso-verde,  $b^*$ :giallo-blu). L'intento di questo spazio colore è quello di essere percettivamente uniforme, in cui la distanza percepita tra due colori sia proporzionale alla distanza euclidea di tali colori. In tal

modo il calcolo della distanza percettiva tra due colori si riassume nel calcolare la loro distanza geometrica.

Tuttavia è importante sottolineare che nemmeno il CIELAB è uno spazio perfettamente uniforme e per compensare la sua non uniformità, sono state sviluppate misure alternative al  $\Delta E$  come per esempio la CIEDE2000 [15]. Questa ed altre misure potrebbero essere implementate per ottenere CRI più performanti, inoltre tra gli spazi che potrebbero essere presi in considerazione vi sono il CIELUV, nato contemporaneamente al CIELAB o lo spazio  $AC_1C_2$ . Quest'ultimo è un altro spazio a colori opposti,  $A$  rappresenta il canale acromatico, mentre  $C_1C_2$  rappresentano i canali cromatici opposti, calcolati però in modo da massimizzare la varianza di canale [16].

#### 2.4 Adattamento cromatico

Come anticipato, durante il calcolo del CRI è possibile decidere se calcolare l'adattamento cromatico o meno. Questo passaggio consente di correggere la cromaticità della sorgente test rispetto a quella della sorgente di riferimento. Il calcolo si svolge nelle fasi elencate nel seguito:

- Si trasforma il valore di tristimolo XYZ della sorgente test prima nello spazio u,v, poi in un sistema di riferimento fisiologico c,d proposto da Judd.
- Si effettua l'operazione di adattamento, in modo da far coincidere il neutro osservato sotto la sorgente test e l'illuminante di riferimento
- Si ritorna nello spazio u,v

Per ulteriori dettagli si faccia riferimento alla relazione precedente (report 1: Stato dell'arte sulle misure dell'indice di resa cromatica e del contrasto percepito, sezione 1.4.2).

Come discusso precedentemente, la stessa CIE ha ammesso l'inadeguatezza del CRI standard. Uno dei punti che occorrerebbe migliorare è proprio quello dell'adattamento cromatico. La commissione tecnica CIE-TC 1-33 stabilita nel 1991 e chiusa nel 1999, che ha pubblicato l'indice di resa cromatica R96a, non è stata in grado di trovare un modello di apparenza adatto allo scopo [11, 13]. Questo è in linea con le considerazioni riportate nella sezione 2.1.

Nel già citato Color Quality Scale [10], gli autori suggeriscono di usare una trasformazione diversa da quella basata sul metodo di von Kries, come per esempio CMC-CAT2000 o CIE CAT02. Si noti che la trasformazione CAT02 è quella utilizzata dal modello di apparenza colore CIECAM 02, il modello colore più recente pubblicato e raccomandato dalla CIE. Tale modello è un'apertura prudente al colore nel contesto del quale si utilizzano alcune informazioni come il background. Il passo successivo sarebbe quello di implementare i principi alla base dei modelli spaziali di apparenza del colore [17].

Nel CRI00, invece, viene utilizzata la trasformazione di Bradford linearizzata. Tale trasformazione, derivata da Lam [18], è in grado di modellare i cambiamenti di una illuminante, cioè fornisce un metodo per trasformare i valori di tristimolo  $XYZ_1$  da una prima illuminante ad una seconda illuminante ( $XYZ_2$ ), in modo che  $XYZ_1$  e  $XYZ_2$  producano la stessa sensazione di colore. La correzione del colore non ha luogo nello spazio dei coni, ma in uno spazio con bande più strette. Inoltre le sensibilità riguardanti le bande spettrali lunghe e medie (regioni del rosso e del verde rispettivamente) sono maggiormente decorrelate rispetto a quelle dei coni. Gli autori raccomandano inoltre di utilizzare la formula CIE DE2000 [15] per valutare la differenza di colore, piuttosto che la classica CIE DE(a,b). Come Von Kries la trasformata di Bradford non è in grado di considerare gli effetti locali del contesto.

Le soluzioni trovate e citate qui infatti, hanno la caratteristica di essere globali. Ciò significa che una certa operazione viene ripetuta in maniera identica su tutti gli stimoli che si stanno considerando, senza tenere conto del contesto in cui tali stimoli vengono osservati. Il nostro sistema visivo invece adotta meccanismi di aggiustamento locale nel percepire sia i colori che il contrasto. Tale approccio avviene tramite un meccanismo di comparazione spaziale, ed è grazie a questo meccanismo che il nostro sistema visivo rivela una proprietà chiamata costanza del colore [17]. In generale la tendenza a semplificare il problema considerandolo globale ha come scopo principale quello di mantenere il calcolo del CRI dipendente solo dal contenuto spettrale della lampada. Questo è indubbiamente un vantaggio in termini di costo computazionale della misura. In applicazioni reali però l'illuminazione di una superficie, in genere, non è uniforme e quindi è facile che il punto di analisi del CRI influenzi il risultato finale.

Se si comincia a considerare il comportamento locale del contrasto e della resa cromatica è necessario prendere in considerazione gli aspetti goniometrici sia dell'apparato illuminante sia delle superfici sotto analisi, vale a dire considerare il solido fotometrico di diffusione dell'illuminazione, la qualità diretta o diffusiva della luce e la BRDF delle superfici della scena. Questo se si vuole caratterizzare la scena in ogni dettaglio. Se invece, pur considerando gli aspetti locali, si vuole semplificare l'approccio, può risultare sufficiente lavorare su un'immagine ripresa dal punto di vista sotto analisi, calibrandone il più possibile la riproduzione della luminanza e dei colori.

Questo è l'approccio della misura di contrasto proposta nei report precedenti e di cui analizziamo possibili miglioramenti nella seconda parte del documento.

## 2.5 Ulteriori modifiche

Come accennato nella sezione 2 un'altra idea consiste nel penalizzare l'indice di resa cromatica nel momento in cui si stanno testando sorgenti di luce che abbiano una temperatura colore *estrema*, cioè che si allontanino considerevolmente da una temperatura colore di, come ad esempio, minore di 4000 o maggiore 8000 K, vale a dire che vari di molto da quella naturale che si può avere nell'arco della giornata. Tre tipiche sorgenti daylight infatti sono: D50 (circa 5000 K), D65 (circa 6500 K), D75 (circa 7500 K).

Questo potrebbe essere ottenuto moltiplicando il CRI per una funzione basata sulla temperatura colore, come quella mostrata in figura 6. Con una temperatura colore tra 4000 e 8000 K, la funzione restituisce 1, lasciando invariato quindi il CRI, per temperature superiori o inferiori il CRI viene moltiplicato per un numero inferiore a 1, quindi diminuendolo. Si noti che i valori  $a$  e  $b$  indicati vanno scelti con cura, come anche quale intervallo di temperature colore penalizzare. Si potrebbe anche pensare di utilizzare una funzione continua, più morbida.

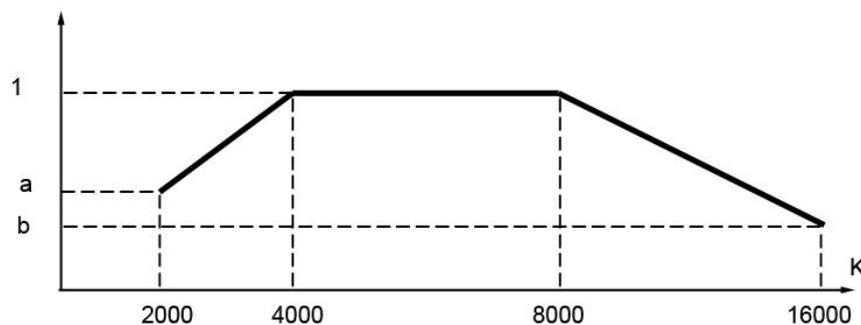


Fig 6: Esempio di funzione per la correzione del CRI in base alla temperature colore

La motivazione di tale modifica risiede nel fatto che per definizione il CRI viene calcolato comparando la luce da testare con una luce di riferimento. Il CRI originale è stato sviluppato per sorgenti a spettro continuo vicine a quella solare. Una illuminante che simula il corpo nero a 2000 K ha per definizione un CRI prossimo a 100, tuttavia la dominante rossastra viene percepita dall'osservatore umano, nonostante l'attenuazione dovuta alla costanza cromatica del sistema visivo.

Infine, un'altra modifica potrebbe essere quella di ricevere in input oltre allo spettro della sorgente test anche i lumen, e tenerne conto durante il calcolo. Infatti due lampade alogene di potenza differente, hanno uno spettro simile, ma la resa visiva in termini di contrasto è diversa. Per quanto il sistema visivo abbia alcuni meccanismi che gli permettono di adattarsi alla luce e al buio, la percezione visiva risulta comunque modificata dal livello assoluto di luminanza.

## **Parte seconda: la misura del contrasto percepito**

### **3. Alcune caratteristiche nella misura del contrasto**

La caratteristica principale che divide i vari metodi candidati alla misura del contrasto percepito è l'aspetto globale o locale della misura.

Dato che la località della percezione visiva è una sua caratteristica fondamentale, possiamo non considerare le misure esclusivamente globali.

Quando si comincia a considerare la località conta molto anche se si vuole adottare un approccio qualitativo o quantitativo. In un approccio quantitativo la misura mira a calcolare esattamente il contrasto percepito da un utente con un visus normale o opportunamente corretto. Per fare questo è necessario calibrare perfettamente l'immagine di input sia in termini geometrici (va riprodotta la prospettiva "naturale" del nostro sistema visivo), sia in termini di luminanza e colore. Ciò non è sempre possibile ed è di facilmente realizzabile solo in contesti controllati.

Anche se sembra contraddittorio rispetto al nome, il risultato di tale calcolo non può essere un numero o comunque una quantificazione, quanto piuttosto una immagine della scena che restituisce punto a punto ciò che si stima essere percepito e la sua intensità locale.

Quest'ultimo fatto, unito alle difficoltà di calibrazione delle immagini di una scena generica, porta, in questa fase sperimentale preliminare, a scegliere un approccio qualitativo della misura del contrasto percepito.

Tranne il metodo di Eli Peli, tutti gli approcci presentati nel report sullo stato dell'arte sono approcci qualitativi, incluso quello suggerito, e quasi tutti gli approcci presentati tentano di associare il contrasto percepito ad un indice o ad una serie di indici.

Abbiamo già discusso sull'opportunità o meno di riassumere un concetto così complesso come il contrasto percepito in un singolo numero. Va però ricordato che una tale misura non andrebbe utilizzata in senso assoluto, ma differenziale. Ciò che ci interessa valutare non è una quantificazione numerica più o meno arbitraria, ma quanto un indice associato alla percezione del contrasto vari al variare delle condizioni della scena, come per esempio la sua illuminazione.

Nei test preliminari del report precedente abbiamo verificato come la misura base proposta sia lineare a variazioni artificiali di contrasto.

Le misure preliminari effettuate su scene al variare dell'illuminante non sembravano presentare una variazione significativa della cifra di merito.

### **4. Verso una misura del contrasto percepito al cambio dell'illuminante**

A questo punto, è opportuno estendere la misura suggerita in modo da poterla applicare in contesti come questo descritto.

Per fare questo si possono testare modifiche essenzialmente nei seguenti aspetti:

- l'estensione della computazione all'informazione cromatica
- lo spazio colore scelto ed il peso relativo dei vari canali
- il peso dei vari livelli di sottocampionamento
- il tipo di kernel utilizzato per il calcolo del contrasto locale

#### *4.1 L'estensione della computazione all'informazione cromatica e lo spazio colore da utilizzare*

La sola informazione di luminanza non è sufficiente a valutare variazioni di contrasto percepito in condizioni in cui varia la composizione spettrale dell'illuminante. L'estensione necessaria è quella di estendere la computazione del contrasto ai tre canali cromatici dello spazio colore scelto. La modalità suggerita da diversi modelli di apparenza cromatica [17] è quella di computare i tre canali in modo indipendente, senza considerare alcuna correlazione tra i canali. Circa la scelta dello spazio colore valgono le considerazioni fatte per il CRI nella sezione 2.3 della prima parte di questo documento. CIE Lab è quindi il candidato iniziale più naturale, anche per il fatto che è già quello utilizzato per il calcolo di L nella versione acromatica.

#### *4.2 Il peso dei canali*

Scelto lo spazio colore, si pone il problema di come pesare il contributo relativo di luminanza e cromaticità. Le ricerche sulla fisiologia della visione suggeriscono un maggior peso della componente acromatica. Diversi esperimenti dimostrano come nella formazione del contrasto contribuisca di più la forma percepita rispetto al suo colore [19], anche se l'informazione cromatica è più veloce nel suo percorso verso la corteccia cerebrale [20].

#### *4.3 Il peso dei vari livelli di sottocampionamento*

Altri esperimenti suggeriscono una modellizzazione multilivello della percezione [21], ma allo stesso modo suggeriscono il contributo dei vari livelli non sia uniforme [22, 23].

Questo è uno degli aspetti più delicati nella misura del contrasto percepito. La difficoltà deriva dal fatto che i risultati di alcuni esperimenti suggeriscono che i pesi relativi dei livelli frequenziali non siano fissi ma dipendano dal contenuto della scena percepita. Si adattino quindi al contenuto visuale da percepire e quindi in ultima analisi al contrasto stesso [23].

#### *4.4 Il tipo di kernel utilizzato per il calcolo del contrasto locale*

Direttamente connesso al discorso sul contenuto frequenziale vi è la scelta del kernel base per la misura del contrasto locale. Nel modello base proposto il kernel è computato come differenza assoluta su un vicinato ad 8. Un'ipotesi alternativa è l'uso di kernel di tipo gaussiano o LoG per acquisire le differenze locali con pesi spaziali diversi. La verifica di tali ipotesi ha lo scopo di testare quali kernel, e quindi in ultima analisi che tipo di filtro frequenziale, si dimostra il più efficiente per l'estrazione dell'informazione di contrasto ad ogni livello della decomposizione piramidale.

## 5. Conclusioni

In questo report abbiamo presentato una discussione su possibili cambiamenti e migliorie per lo sviluppo di metodi alternativi per il calcolo del CRI e del contrasto percepito. Tali modifiche sono il frutto del lavoro sullo stato dell'arte sui due argomenti e delle sperimentazioni preliminari eseguite all'interno di questo progetto. Alcune modifiche sono già state applicate e testate da noi e/o da altri colleghi, altre sono innovative, altre ancora sono già state sperimentate in configurazioni diverse e quindi l'aspetto innovativo riguarda la loro implementazione.

Lo scopo che ci siamo prefissati nella redazione di questo documento è quello di investigare e discutere i meccanismi alla base dei problemi discussi e quello di verificare quanto il problema della conservazione del metamerismo e quello della variazione del contrasto percepito al cambio dell'illuminante siano connessi negli aspetti legati alla località della percezione.

## Bibliografia

- [1] CIE Technical Report (1965) Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, 1st ed., Publication CIE 13 (E-1.3.2).
- [2] CIE (1974) Publication CIE 13.2 (TC-3.2).
- [3] CIE (1995) Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, Publication CIE 13.3 (TC-3.2). CIE Central Bureau, Vienna.
- [4] N. Bo, P. Iacomussi, and G. Rossi, "On the LED Colour Rendering Evaluation for works of art lighting," Proceedings of 11th Lux Europa, Istanbul: 2009, pp. 405-410.
- [5] S. Jost-boissard, M. Fontoynt, and J. Blanc-gonnet, "COLOUR RENDERING OF LED SOURCES : VISUAL EXPERIMENT ON DIFFERENCE , FIDELITY AND PREFERENCE," CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting, Budapest, Hungary: 2009.
- [6] S. Brueckner, P. Bodrogi, and T.Q. Khanh, "Colour Rendering of new white LED light sources – visual tests," Proceedings of Lux Europa, Istanbul: 2009, pp. 397-404
- [7] N. Sándor and J. Schanda, "Visual Colour-rendering experiments," AIC Colour 05 - 10th Congress of the International Colour Association, Granada: 2005, pp. 511-514.
- [8] N. Narendran and L. Deng, "Color rendering properties of LED light sources," Solid State Lighting II : Proceedings of SPIE, SPIE, 2002, pp. 61-67.

- [9] P. Bodrogi, P. Csuti, F. Szabó, and J. Schanda, "Why does the Colour Rendering Index Fail for White RGB LED Light Sources?", CIE Expert Symposium on LED Light Sources, Tokyo: 2004, pp. 1-4.
- [10] W. Davis and Y. Ohno, "Development of a Color Quality Scale," Proceedings of Light and Color in Lighting Research Office Symposium, 2006.
- [11] Commission Internationale de l'Eclairage, Colour Rendering, TC 1-33 closing remarks, CIE Publ. No. 135/2, 1999.
- [12] D. Geisler-Moroder and A. Dür, "Color Rendering Indices in Global Illumination Methods," Journal of Electronic Imaging, vol. 18, 2009.
- [13] Shanda J., Colorimetry, Understanding the CIE System, Wiley, 2007.
- [14] P. Bodrogi, S. Brückner, and T.Q. Khanh, "Re-defining the colour rendering index," CIE Proceedings, 2009
- [15] M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000", Color Research & Application, Special Issue: Special Issue on Color Difference, Volume 26, Issue 5, pages 340–350, October 2001
- [16] G. Wyszecki, W.S. Stiles: Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae Wiley 1982 (II ed.)
- [17] A. Rizzi, J.J. McCann, "On the behavior of spatial models of color", IS&T/SPIE Electronic Imaging 2007, S.Jose (California, USA), 28 January, 1 February 2007.
- [18] K.M. Lam, "Metamerism and Color Constancy", Ph.D. Thesis, University of Bradford, 1985.
- [19] N W Daw, "Why After-Images are Not Seen in Normal Circumstances", Nature 196, 1143–1145, 1962.
- [20] S. Zeki, "Vision of the Brain", Blackwell Science Inc., Williston, Vermont, 1993
- [21] McCann J, Lessons Learned from Mondrians Applied to Real Images and Color Gamuts. Proc. IS&T/SID Seventh Color Imaging Conference, Scottsdale, Arizona, 1-8, (1999).
- [22] F.W. Campbell, J.G. Robson, "Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings", J. Physiol., 197, 551-566, (1966).
- [23] A. Rizzi, J.J. McCann "Contrast effects and local white distribution", ECVF03, European Conference on Visual Perception, Paris, 1-5 September 2003.