



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE

Laurea Triennale in Informatica per la comunicazione digitale

Applicazioni di Image Quality per il restauro cinematografico

Relatore: Alessandro Rizzi

Correlatore: Alice Plutino

Tesi di Laurea di:

Alice Mirabella

Matr. 932136

Anno Accademico 2021-2022

Indice

Introduzione

Capitolo 1

- 1.1) Cenni sul restauro cinematografico
- 1.2) Le fasi del restauro
 - 1.2.1) Ricerca, studio e analisi dello stato di conservazione
 - 1.2.2) Restauro analogico
 - 1.2.3) Digitalizzazione e restauro digitale

Capitolo 2

- 2.1) *Image Quality*
- 2.2) Metodi per la valutazione dell'*Image Quality*
- 2.3) Le metriche di Qualità
- 2.4) Le principali metriche oggettive
- 2.5) Le principali metriche soggettive
- 2.6) Altre metriche
- 2.7) Attributi valutati dall'*Image Quality*

Capitolo 3

- 3.1) Software MRQA
- 3.2) Manuale d'uso del software MRQA

Capitolo 4

- 4.1) Cenni sui parametri soggettivi dell'*Image Quality*
- 4.2) Organizzazione dell'indagine soggettiva e presentazione dei video utilizzati
- 4.3) Raccolta e analisi dei dati emersi dall'indagine soggettiva
- 4.4) Confronto tra i dati soggettivi e quelli restituiti dal software MRQA

Conclusioni

Ringraziamenti

Bibliografia e sitografia

Introduzione

Il presente elaborato, dopo una generale trattazione sul restauro cinematografico analogico e digitale in ogni sua fase, introduce il concetto di *Image Quality* e sottolinea la sua utilità ai fini del restauro. Vengono analizzate alcune metriche oggettive dell'*Image Quality* anche attraverso lo studio e l'utilizzo del software MRQA realizzato dallo studente Fabien Corso durante lo stage nel Laboratorio MIPS dell'Università degli Studi di Milano. Di tale applicazione è stato da me sviluppato un manuale d'uso destinato ad utenti non esperti. Il manuale è corredato di alcuni esempi, tra cui la descrizione del comportamento del software applicato ai video "*Littoral de L'Herbe*", 1928, di Georges Carlu e "*La lunga calza verde*", 1961, di Roberto Gavioli. Il primo video è stato utilizzato per descrivere una delle funzionalità del software, ovvero l'analisi per slice verticali utile a individuare difetti temporali, quali ad esempio graffi. Del secondo video, invece, sono state analizzate due versioni, quella originale e quella restaurata. Queste sono servite da esempio per descrivere le differenze nelle metriche che risultano dall'analisi di entrambe le versioni per mezzo del software.

Alla precedente analisi oggettiva è stata successivamente affiancata un'indagine soggettiva. Questa è stata realizzata attraverso la somministrazione di un questionario ad un gruppo ristretto ed eterogeneo di utenti, che ha previsto domande a risposta multipla inerenti alla visione, in ambiente controllato, delle versioni originale e restaurata del video "*La lunga calza verde*" e di un video soprannominato "*Fiat*".

La trattazione si conclude con l'analisi del confronto tra i valori ottenuti dall'elaborazione dei video sopra indicati con il software MRQA e i risultati derivanti dalle risposte degli utenti al questionario.

Capitolo 1

1.1) Cenni sul restauro cinematografico

Agli inizi degli anni 2000, la FIAF, *Fédération Internationale des Archives du Film*, ha lanciato un allarme: “Buona parte dei film girati prima degli anni Cinquanta rischia di finire letteralmente in fumo”. Il pericolo è concreto, anche in considerazione del fatto che, fino a quarant’anni fa, le pellicole erano realizzate mediante l’utilizzo di nitrato di cellulosa, un materiale altamente infiammabile e facilmente soggetto all’autocombustione anche a temperature relativamente basse. Ad aggravare la situazione si aggiunge l’instabilità chimica della celluloidi, che favorisce il degrado dell’emulsione a base di gelatina animale, mentre l’azione combinata di muffe, funghi e umidità corrode con facilità la pellicola fino a ridurre tutto in polvere. Ma ad essere in pericolo non sono soltanto i film girati nella prima metà del secolo. Studi recenti hanno infatti dimostrato che il rischio ‘estinzione’ minaccia anche film a colori girati dopo il 1950. Infatti, il fenomeno di sbilanciamento dei colori, noto come *fading*, e la sindrome acetica sono degenerazioni tipiche delle pellicole in triacetato in uso fino agli anni Ottanta [1].

Il restauro cinematografico nasce, quindi, dall’esigenza di preservare e tutelare il patrimonio filmico. Si tratta di una disciplina piuttosto recente che implica la compenetrazione tra differenti settori di studio, sia di carattere umanistico che scientifico.

Il territorio su cui opera il restauro, tuttavia, è vasto e connotato da confini incerti. Esso è rimasto per lungo tempo privo di regole codificate e metodologie condivise, anche se più recentemente tale disciplina è stata dotata di istruzioni specifiche e linee guida sistematiche. Alcune associazioni, infatti, come la sopra menzionata FIAF, si sono impegnate ai fini della preservazione del patrimonio cinematografico mondiale con l’ulteriore scopo di offrire ad archivi e laboratori indicazioni ufficiali sulle procedure da seguire per la conservazione e il restauro dei film [2].

Esistono vari tipi di deterioramento dei film [3]:

Meccanico: deterioramento causato da strappi, graffi, rottura delle perforazioni delle pellicole durante la proiezione o il montaggio delle parti in rulli per ottenere le bobine di proiezione.

Muffe: la comparsa di muffe, causata da una cattiva conservazione, erode lo strato di emulsione, rendendolo prima gelatinoso e poi provocandone il distaccamento dalla pellicola.

Sindrome dell'aceto: riguarda solo i film a colori, questo spiega perché alcuni film ne risentono a differenza di altre pellicole che hanno avuto pari utilizzo e conservazione, ma ne sono praticamente immuni. Il film acquista una dominante rossa dopo un processo che inizia con la perdita delle componenti blu, celesti e verdi, per poi degradare lentamente in un rosso molto forte.

1.2) Le fasi del restauro

Prima di procedere al restauro vero e proprio, viene condotta un'indagine per reperire, fra gli archivi esistenti, tutte le copie (censimento) e tutte le documentazioni cartacee (extrafilmiche), in modo da avere più informazioni possibili e, quindi, ottenere un risultato più fedele al termine del processo di restauro. Non si può dunque parlare di "film originale", bensì di autenticità. Ogni versione è autentica perché testimone di un'intenzione o di una situazione. L'approccio maggiormente condiviso consiste nell'esecuzione di un completo *workflow* di restauro, che prevede le seguenti fasi di lavoro: ricerca storica, restauro analogico, digitalizzazione, restauro digitale e archiviazione. Occorre stabilire a priori le operazioni che si vogliono effettuare sulla pellicola, gli obiettivi e gli strumenti necessari. A tal fine, è importante redigere il progetto di restauro, ovvero una serie di linee guida indispensabili al restauratore durante il lavoro e necessarie al fine di rendere trasparente la procedura seguita.

1.2.1) Ricerca, studio e analisi dello stato di conservazione

Grazie allo studio delle fonti extrafilmiche è possibile individuare a quali versioni e/o edizioni appartengono le copie ritrovate. L'esame dettagliato di una serie d'informazioni contenute fisicamente sulla pellicola permetterà invece di capire se siamo in presenza di una copia di prima generazione o di successive ristampe, quale sia stato il metodo con cui è stata stampata e montata la pellicola, i vari tipi di

colorazioni, lo stock della pellicola oppure se siano stati eseguiti interventi, cambiamenti e interpolazioni nel corso degli anni. Successivamente è necessario analizzare lo stato di conservazione della pellicola (stato fisico e chimico).

1.2.2) Restauro analogico

Il restauro cinematografico tradizionale è di tipo analogico. Si tratta di un processo molto complesso, che può richiedere settimane, mesi o addirittura anni. La durata del restauro di una pellicola può dipendere da svariati fattori, tra cui le condizioni in cui è stato conservato il pezzo, il lavoro di riadattamento all'epoca in questione e altre situazioni specifiche. Il restauro analogico prevede di prassi la riparazione delle perforazioni e la sostituzione delle giunte, oltre alla pulizia dei materiali. Tale tipologia di restauro è oggi utilizzata in modo esclusivo soprattutto laddove le pellicole analizzate presentano danni importanti che impediscono lo scorrimento all'interno dello scanner [2]. Tuttavia, rimane acceso il dibattito sulla coerenza del restauro digitale in relazione alle scelte artistiche insite nelle vecchie pellicole [4].

1.2.3) Digitalizzazione e restauro digitale

I limiti del restauro analogico sono stati in parte superati dal restauro digitale, che si basa su un approccio numerico-computazionale e permette di rendere automatico il riconoscimento e la correzione di un gran numero di difetti presenti in un video, con un risparmio in termini di tempo e di costi. Il restauro digitale consente altresì di testare diverse soluzioni e di scegliere quella migliore.

La digitalizzazione, infatti, permette di ottenere una copia digitale della pellicola sulla quale vengono effettuate le operazioni di restauro senza intaccare il materiale originale. A tal fine, è necessario determinare i parametri di acquisizione più adeguati, in termini di affidabilità e specificità, nel rispetto di linee guida e protocolli stabiliti a livello nazionale e internazionale. E' necessario, inoltre, stabilire se la scansione avrà uno scopo conservativo, in tal caso si deve garantire la minor perdita di informazione possibile, oppure uno scopo di fruizione, in relazione al quale si possono effettuare scansioni che comportino una maggiore facilità d'uso, seppur perdendo informazione [2].

Gli attuali sistemi di elaborazione digitale si basano sulle seguenti operazioni, schematizzate in Fig. 1:

- A) Digitalizzazione del filmato
- B) Elaborazione del filmato digitalizzato
- C) Stoccaggio e restituzione alla pellicola



Fig.1: Schema generale del restauro digitale

La digitalizzazione di un video avviene per mezzo di uno scanner che effettua, tramite sensori, la conversione della serie di fotogrammi, che costituiscono la pellicola, in un insieme di "immagini numeriche". Queste ultime sono matrici bidimensionali di $N \times M$ pixel. Il pixel rappresenta il valore dell'intensità luminosa in un determinato punto dell'immagine. In caso di video in bianco e nero, ogni immagine è costituita da pixel i cui valori misurano l'intensità del grigio corrispondente ai punti che rappresentano. Qualora si abbia un video a colori, un solo valore per ogni pixel non è sufficiente. La più nota rappresentazione delle immagini a colori in formato digitale associa tre valori ad ogni pixel, basandosi sul fatto che tutti i colori possano essere ottenuti da una miscela di tre colori primari: rosso, verde e blu. Tale rappresentazione viene detta RGB (*Red, Green, Blue*) e fornisce il peso delle componenti per questi tre colori.

Quando un segnale analogico viene convertito in un segnale digitale, esso viene quantizzato. La quantizzazione è il processo mediante il quale un insieme di valori continuo viene associato in modo univoco ad un insieme finito di simboli. Per ogni pixel risulta, quindi, definita la quantità relativa alla profondità del pixel (*pixel depth*), ovvero il numero di bit d'informazione associati al pixel. Per un'immagine in bianco e nero, si usa generalmente una profondità di 8 bit, il che significa che i suoi pixel

possono assumere $2^8 = 256$ valori diversi, ossia 256 intensità diverse di grigio per ogni pixel. Nelle rappresentazioni a colori RGB si usa solitamente un byte per ogni componente e quindi 24 bit per ogni pixel.

Inoltre, per definire una sequenza, si utilizza il parametro *frame rate*, che indica il numero di fotogrammi visualizzati al secondo. Il valore di questo parametro è indicato in fps (fotogrammi al secondo). L'illusione di movimento si ottiene già con 12 fps, ma di solito si usano 24 fps per i formati analogici e 25/30 fps per i formati video VHS [5].

Una volta ottenuto il file scansionato, esso viene caricato nelle macchine e viene eseguita una pulizia digitale finalizzata alla rimozione di polvere e spuntature per mezzo di software dedicati. Questi ultimi utilizzano prevalentemente algoritmi temporali, che confrontano *frame* adiacenti tra loro identificando differenze e variazioni di luminosità che intercorrono tra essi. Questa fase richiede un lavoro molto lungo. Per pulire un film degli anni '30 ci vogliono circa 1800 ore di lavoro. Successivamente alla pulizia digitale, si passa a correggere i vari difetti presenti come strappi, bruciature o decadimenti. Si effettua la ricostruzione totale del *frame* danneggiato per mezzo di algoritmi temporali di interpolazione che consentono di creare un nuovo fotogramma a partire da quelli adiacenti. In caso di graffi o solchi che si propagano nella stessa zona e su più fotogrammi, si utilizzano algoritmi spaziali che permettono di sostituire solo i pixel danneggiati a partire dall'informazione presente sui pixel adiacenti all'abrasione [6].

Il passo successivo è rappresentato dalla *color correction*. Una procedura che consente di ottenere il bilanciamento del contrasto e del colore al fine di ripristinare l'omogeneità e la coerenza fotografica originaria. I colori, infatti, possono essere sbiaditi dal tempo o deteriorati a causa di condizioni di conservazione inappropriate. I software utilizzati non sono stati ideati specificamente per il restauro, ma si tratta di quelli usati nelle operazioni di *color grading* nella post-produzione cinematografica [2]. Il grande limite di questa operazione è rappresentato dalla soggettività. Si tratta anche del momento più delicato di un restauro. In questa fase esistono infinite possibilità, bisogna prendere decisioni sui colori, sulle ombre, sui contrasti. Tutto sarà filtrato dall'esperienza e dalla cultura. In questo passaggio esistono tre strade possibili

da percorrere: se si ha la fortuna di lavorare su film il cui regista o produttore sono ancora vivi, è possibile coinvolgerli. E' un'opportunità preziosa, ma anche rischiosa, perché la memoria umana è fallace e, soprattutto, spesso un regista può essere attratto dall'opportunità di stravolgere alcune scene che, in fase di produzione, non ha potuto modificare. Quando è possibile, in questa fase bisognerebbe coinvolgere anche il direttore della fotografia, il tecnico del mixer e l'assistente al montaggio, perché ognuno di loro si può ricordare qualche dettaglio fondamentale sulla versione originale. In alternativa, si può cercare di localizzare delle buone copie d'epoca per rispettare il più possibile il colore originale. La terza strada, laddove non sia possibile rintracciare la troupe, è quella di eseguire ricerche su altri film dello stesso regista o dello stesso direttore della fotografia, per farsi un'idea dello stile, oppure leggere le dichiarazioni rilasciate dal regista all'epoca dell'uscita del film.

Terminato il restauro, si raccolgono gli elementi di consegna all'interno del *Digital Cinema Package* (DCP), contenente un insieme di file digitali utilizzati per archiviare e trasmettere audio, immagini e flussi di dati del cinema digitale. Le tecnologie più utilizzate per la conservazione dei media digitali sono i dischi rigidi RAID (*Redundant Array of Independent Disks*) e i nastri magnetici LTO (*Linear Tape-Open*). Laddove sia possibile, si effettua anche il *File recording*, ossia il ritorno su pellicola, utile per la conservazione a lungo termine. Infatti, mentre la durata della pellicola è nota, non è possibile stabilire a priori quella del dato digitale, in quanto l'hard disk si può danneggiare. Inoltre, ad intervalli di tempo variabili, il dato digitale deve essere migrato e, in occasione di tale operazione, si possono commettere degli errori [6].

Il restauro si differenzia dalla riedizione, un processo più invasivo che può avvenire grazie alle potenzialità delle attuali tecnologie digitali, attraverso la produzione di una nuova copia del film che ha subito consistenti modifiche e sostituzioni, come ad esempio il miglioramento degli effetti speciali, la colorizzazione, il montaggio diverso dall'originale o l'aggiunta di nuove scene. Per il mondo archivistico un'operazione di questo genere non potrebbe mai essere definita un restauro, poiché aggiunge elementi che erano assenti nei materiali di partenza. Il carattere, più o meno invasivo, degli interventi tecnici eseguiti su una pellicola, pone, infatti, la domanda se tali operazioni siano eticamente accettabili per migliorare l'esperienza della visione cinematografica senza falsificare il valore storico del film. Infatti, il cinema è espressione non solo della

sensibilità e delle emozioni di una generazione e dei suoi artisti, ma anche testimonianza storica degli strumenti tecnici che si avevano a disposizione all'epoca della sua creazione [2].

Dopo aver accennato alle principali problematiche inerenti alla conservazione del patrimonio cinematografico e alla metodologia utilizzata ai fini delle operazioni di restauro, è possibile concludere che tali operazioni sono necessariamente collegate al concetto di valutazione della qualità dell'immagine. Idealmente, un sistema di valutazione della qualità dovrebbe percepire e misurare i difetti di immagini o video proprio come un essere umano [7].

Capitolo 2

2.1) *Image Quality*

Per qualità dell'immagine (*Image Quality*) si intende il livello di accuratezza con cui i diversi sistemi di *imaging* catturano, elaborano, archiviano, comprimono, trasmettono e visualizzano i segnali che formano un'immagine. Un'altra definizione si riferisce alla qualità dell'immagine come "*la combinazione ponderata di tutti gli attributi visivamente significativi di un'immagine*". Essa si concentra sulle valutazioni percettive che rendono un'immagine piacevole per gli spettatori umani [8].

Il processo per determinare il livello di accuratezza è chiamato *Image Quality Assessment* (IQA), ovvero la valutazione della qualità dell'immagine.

2.2) Metodi per la valutazione dell'*Image Quality*

La qualità dell'immagine può essere valutata utilizzando due metodi:[9]

I metodi oggettivi si basano su modelli computazionali in grado di prevedere la qualità dell'immagine. Applicare una metrica oggettiva vuol dire mettere in atto una computazione che, attraverso l'ausilio di formule matematiche, elabora e poi valuta in maniera automatica un'immagine, senza alcuna interazione col sistema visivo umano [10].

A seconda del grado di informazioni ricavabili dal video originale, se disponibile come riferimento nella valutazione della qualità, i metodi oggettivi sono ulteriormente suddivisi in tre categorie: metodi con riferimento completo (FR), il cui approccio prevede la disponibilità dell'immagine/video originale come riferimento. Di conseguenza, i metodi FR si basano sul confronto di immagini/video distorti con l'immagine/video originale; metodi senza riferimento (NR), che cercano di valutare la qualità di un'immagine di prova senza alcun riferimento a quella originale. I metodi oggettivi NR sono a loro volta strutturati in tre sottocategorie in base ai tipi di metodologie utilizzate: metodi basati su pixel (NR-P), metodi basati su *bitstream* (NR-B) e metodi ibridi.

I metodi NR-P sono quelli più indicati per misurare la qualità delle immagini, in quanto non prendono in considerazione fattori temporali o informazioni di codifica molto

importanti nella stima della qualità dei video. Tuttavia, questi metodi sono molto pesanti a livello computazionale, poiché consistono nell'esaminare pixel per pixel l'intera immagine/video (quindi poco adatti a funzionare in *real-time*). Il metodo consiste nel selezionare alcuni artefatti considerati i più importanti. L'effetto *blur*, il *blocking* e il rumore sono considerati gli artefatti più presenti nelle immagini/video dovuti alle compressioni *lossy* (compressioni con perdita d'informazione). Una volta trovati gli artefatti, questi possono essere combinati per ottenere la stima della qualità percepita.

I metodi NR-B prevedono che una stima della qualità di un video codificato possa essere fatta analizzando il flusso di bit codificato per avere facilmente a disposizione alcune *features* come parametri di codifica e qualità dei servizi di rete, tutti parametri relativi al *Quality of Service* (QoS). I metodi che adottano l'uso dei dati provenienti dal *bitstream* per la stima della qualità non hanno un'elevata complessità computazionale, in quanto non hanno bisogno dell'elaborazione dei video completi. In tal caso, non è richiesta una decodifica completa del video in *input*. Un altro vantaggio di tali metodi è l'uso di informazioni prontamente disponibili dal *bitstream* che sono rilevanti per la stima della qualità, ad esempio, i *motion vector*, la modalità di codifica e i valori dei parametri quantizzati. Tuttavia, questi metodi sono strettamente dipendenti dal tipo di codifica utilizzato, diversi tipi di codifica hanno un formato del *bitstream* differente. Esiste, però, una vasta gamma di caratteristiche rilevanti, ai fini della qualità, che possono essere estratte dalla parziale decodifica o da una prima analisi dei dati presenti nel *bitstream*. La prestazione di tali metodi dipende in modo significativo dal livello di accesso al *bitstream*. I metodi oggettivi NR-B vengono divisi in tre categorie, in base al livello di informazioni che utilizzano per il calcolo della qualità, in accordo con gli standard definiti dall'*International Telecommunication Union* (ITU-T). Questi tre livelli sono: il *parametric planning model*, il *parametric packet-layer model*, e il *bitstream layer model*. Nei primi due vengono estratte caratteristiche estrinseche del video che sono di natura parametrica come il *bit rate*, il *frame rate*, e la percentuale dei pacchetti persi. Nel *bitstream layer model* si ha un accesso dettagliato al *payload* e a caratteristiche intrinseche legate al video, come la modalità di codifica, i parametri di quantizzazione e i coefficienti DCT.

I metodi Ibridi sono metodi NR di stima di qualità visiva che hanno elementi in comune con entrambe le categorie precedenti. Questi tipi di metodi ereditano la semplicità computazionale degli approcci basati sul *bitstream* e la precisione della stima della qualità ottenuta aggiungendo in *input* gli approcci basati sui pixel. Ne è un esempio la fusione di artefatti visivi, come il *blur* e il *blocking*, con i parametri derivati dai *motion vectors* per la costruzione di un metodo di stima ibrido. Essenzialmente, la scelta delle caratteristiche da estrarre dal *bitstream* o dal dominio dei pixel dipende dal requisito di progettazione richiesto, dalla disponibilità di un certo tipo di dati per la stima della qualità e dallo schema di codifica. Questi metodi vengono divisi in due categorie, in base al tipo di analisi che effettuano. Esistono metodi che utilizzano caratteristiche o artefatti basati sui pixel e sul *bitstream*, e metodi che usano statistiche delle trasformazioni dei coefficienti [11].

Una terza categoria di metodi oggettivi è quella dei metodi con riferimento ridotto (RR). Questi valutano la qualità di un test e di un'immagine di riferimento in base a un confronto delle caratteristiche estratte da entrambe le versioni. E' una via di mezzo tra i precedenti due metodi.

I metodi soggettivi, invece, si basano sulla valutazione percettiva degli attributi di un'immagine o di un insieme di immagini da parte di un osservatore umano. Applicare una metrica soggettiva vuol dire effettuare una valutazione dell'immagine che tenga conto della percezione soggettiva del sistema visivo umano (HVS - *Human Visual System*) [10]. Tali metodi appartengono all'area più ampia della ricerca psicofisica, che studia la relazione tra stimolo fisico e percezioni umane. Un metodo IQA soggettivo consiste nell'applicare tecniche di punteggio medio dell'opinione, in cui un numero di spettatori fornisce opinioni in base alle proprie percezioni sulla qualità dell'immagine. Queste opinioni vengono successivamente mappate su valori numerici. Tali metodi sono classificati in due sottocategorie in base allo stimolo sottoposto all'utente che può essere singolo, ovvero l'utente osserva solo l'immagine di prova e non è a conoscenza dell'immagine sorgente, oppure doppio qualora l'utente sia invitato ad osservare sia l'immagine sorgente che quella di prova.

I metodi oggettivi e soggettivi non sono necessariamente coerenti tra loro: uno spettatore umano potrebbe percepire forti differenze di qualità in un insieme di

immagini laddove un algoritmo informatico potrebbe non farlo. Un algoritmo, infatti, potrebbe avere un valore simile per un'immagine e le sue versioni alterate o degradate, mentre un metodo soggettivo potrebbe percepire un netto contrasto di qualità per la stessa immagine e le sue versioni. Questo argomento sarà centrale nel presente elaborato [10]. Inoltre, l'approccio generale al restauro può essere influenzato anche dalle seguenti considerazioni. Ciò che si tenta di fare con il restauro è ridurre e/o eliminare i difetti cercando di rispettare il più possibile le caratteristiche del video originale. Tuttavia, a tal fine, è fondamentale stabilire cosa debba essere considerato "l'originale". Si possono formulare diverse ipotesi. L'originale può essere il film che è stato presentato la prima volta al pubblico, oppure il film come lo intendeva in prima persona il regista, o invece la versione della migliore qualità possibile per la tecnologia del suo tempo. Quest'ultimo punto è particolarmente rilevante, perché bisogna considerare che numerosi dispositivi, molto diversi da quello utilizzato al momento della produzione del film, sono attualmente disponibili per la fruizione digitale dei film, ognuno con le proprie caratteristiche di *gamut*, dinamiche e illuminanti [25].

Al riguardo, è anche utile distinguere il concetto di qualità assoluta da quello di qualità percepita [10]. La prima è un dato oggettivo, completamente descritto dall'immagine e caratterizzabile mediante un insieme di attributi dell'immagine stessa, alcuni semplici, altri composti da sotto-attributi, alcuni misurabili, altri non misurabili. Ad esempio, il contenuto informativo dell'immagine, comprendente i soggetti raffigurati e il contesto, non è matematicamente misurabile; mentre lo sono la luminosità, il colore con i suoi sotto-attributi (saturazione, naturalezza, omogeneità, scolorimento) o il contrasto. La qualità percepita è invece un parametro soggettivo, dipendente oltre che dalle caratteristiche dell'immagine, cioè dai suoi attributi descrittivi, anche da altri fattori quali, ad esempio, l'elaborazione dell'immagine, che potrebbe avere in qualche modo migliorato/alterato l'immagine stessa secondo il gusto dell'osservatore umano [10].

2.3) Le metriche di Qualità

Una metrica del IQ è un modo matematico oggettivo per calcolare la qualità di un'immagine senza l'intervento di osservatori umani [12]. Tuttavia, tale metodo è fortemente legato al modello di percezione del sistema visivo umano (HVS) [10].

In letteratura, la maggior parte delle metriche del IQ ha la stessa struttura, come mostrato in Fig. 2.

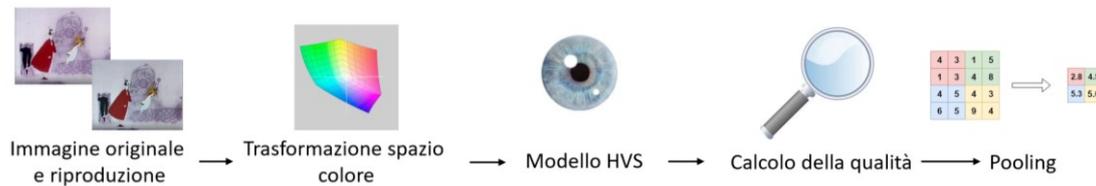


Fig. 2: Schema generale delle metriche IQ

Lo spazio colore dell'immagine originale e della sua riproduzione (o, per alcune metriche, solo della riproduzione) viene trasformato in un altro spazio colore, in particolare si passa da uno spazio colore standard, come RGB, ad uno spazio colore più adatto a simulare l'HVS. A tal fine, prima di procedere all'effettivo calcolo della qualità, le metriche IQ incorporano in tale spazio colore le caratteristiche del sistema HVS. Successivamente si effettua il calcolo della qualità, solitamente in termini di pixel. Dato che le metriche del IQ di solito calcolano la qualità localmente (in pixel o in una finestra locale), producendo un valore IQ per ogni pixel, si genera una quantità eccessiva di dati, che è difficile da analizzare ed elaborare. Per questo motivo, molte metriche utilizzano la tecnica del *pooling*, che consente di ridurre il numero di valori di qualità a un numero più gestibile, il più delle volte a un solo valore [12].

In letteratura [12] le metriche del IQ sono state suddivise in categorie sulla base della loro destinazione d'uso o costruzione. Diversi ricercatori hanno classificato le metriche in gruppi, anche se a volte risulta difficile trovare confini netti tra di essi.

Avcibas ha diviso le metriche del IQ in sei gruppi, in base alle informazioni che esse utilizzano:

- 1) Metriche *difference-based*, cioè basate sulla differenza di pixel, come la distorsione quadratica media.
- 2) Metriche *correlation-based*, cioè basate sulla correlazione dei valori dei pixel.
- 3) Metriche *edge-based*, cioè basate sulla misura dello spostamento delle posizioni dei bordi o della coerenza tra i livelli di risoluzione.
- 4) Metriche basate sulla distanza spettrale.
- 5) Metriche basate sul contesto.

- 6) Metriche basate su HVS, ovvero basate sullo spettro pesato HVS.

Callet e Barba hanno diviso le metriche del IQ in due gruppi distinti:

- 1) Metriche che utilizzano un modello HVS per la percezione di basso livello, ad esempio la scomposizione di sotto-banda e l'effetto mascherante.
- 2) Metriche che utilizzano poche informazioni sull'HVS per la rappresentazione degli errori e si concentrano sulle conoscenze pregresse in merito alla distorsione introdotta.

Wang e Bovik hanno classificato le metriche del IQ in base a tre criteri:

- 1) Metriche di riferimento completo (FR), senza riferimento (NR) e di riferimento ridotto (RR).
- 2) Metriche generiche e specifiche dell'applicazione.
- 3) Metriche *bottom-up* e *top-down*.

Chandler e Hemami hanno individuato tre gruppi di metriche del IQ:

- 1) Metriche matematicamente convenienti, che operano solo sull'intensità della distorsione.
- 2) Metriche basate sulla psicofisica vicino alla soglia, che tengono conto della rilevabilità visiva delle distorsioni.
- 3) Metriche basate su principi generali come l'estrazione di informazioni.

Thung e Raveendran hanno diviso le metriche del IQ di riferimento completo (FR) in due gruppi principali:

- 1) Metriche matematiche.
- 2) Metriche basate su HVS.

Recentemente, Seshadrinathan e Bovik hanno diviso le tecniche per la qualità dell'immagine e del video in tre categorie principali:

- 1) Approcci basati su HVS.
- 2) Approcci strutturali.
- 3) Approcci teorici dell'informazione.

In definitiva, secondo Pedersen, dopo aver analizzato le classificazioni elaborate dagli autori sopraindicati, si possono quindi dividere le metriche di qualità in quattro categorie principali:[12]

- 1) Metriche a base matematica, che operano solo sull'intensità delle distorsioni. Queste metriche sono generalmente semplici, come l'errore quadratico medio (MSE) e il picco rapporto segnale/rumore (PSNR).
- 2) Metriche di basso livello, che tengono conto della visibilità delle distorsioni utilizzando ad esempio le funzioni di sensibilità al contrasto (CSF), come *Spatial-CIELAB* (SCIELAB).
- 3) Metriche di alto livello, che quantificano la qualità in base a come il nostro HVS estrae informazioni o strutture dall'immagine, come *Structural SIMilarity* (SSIM), che si basa sul contenuto strutturale, o *Visual Image Fidelity* (VIF), che si basa su statistiche di scena.
- 4) Altre metriche, che si basano su diverse strategie o combinano due o più dei gruppi sopra indicati. Un esempio è il *Visual Signal-to-Noise Ratio* (VSNR), che tiene conto delle proprietà visive di livello medio e basso.

2.4) Le principali metriche oggettive

Le metriche oggettive valutano in modo automatico la qualità dell'immagine attraverso l'ausilio di formule matematiche. Di seguito si analizzano le principali metriche appartenenti a questa categoria.

MSE (*Mean Squared Error*) e PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \qquad PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE}$$

dove N è il numero di pixel presenti nell'immagine, cioè $N = n * m$ dove n ed m rappresentano rispettivamente l'altezza e la larghezza dell'immagine, e si riferiscono all' i -esimo pixel, rispettivamente, nell'immagine di riferimento e nell'immagine distorta; L è il range dinamico dei valori dei pixel, cioè, per un segnale che presenta n bits/pixel, L è uguale a $2^n - 1$.

Queste metriche sono molto usate perché sono semplici da calcolare, ma non sempre danno un risultato fedele a quello dato dal sistema visivo umano. Questo perché la

sensibilità del sistema HVS agli errori può essere diversa per diversi tipi di errori, e può variare anche in base al contesto visuale. Tale differenza non può essere colta adeguatamente dall'MSE. Inoltre, due immagini distorte possono presentare tipi molto differenti di errori, pur avendo lo stesso MSE. Infine, entrambe le metriche sono fortemente influenzate anche da “impercettibili” movimenti spaziali, come traslazioni o rotazioni [12].

$\Delta E^*_{a,b}$ CIELAB

La metrica $\Delta E^*_{a,b}$ CIELAB lavora sullo spazio colore CIELAB. Differentemente da altri spazi colore, questo spazio è percettivamente uniforme, ovvero la distanza tra due punti nello spazio corrisponde a quella rilevata percettivamente. I parametri che lo determinano sono: L^* , a^* , b^* , dove L^* rappresenta la luminanza, mentre a^* e b^* rappresentano la cromaticità. L^* , a^* e b^* sono le trasformazioni dei tre valori di tristimolo X , Y e Z dello spazio colore CIE XYZ.

Attraverso le seguenti formule, si può passare dallo spazio colore CIE XYZ allo spazio colore CIELAB, e viceversa:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$$

Dove X/X_n , Y/Y_n , e Z/Z_n sono maggiori di 0.01 e X_n , Y_n e Z_n definiscono il punto bianco. Lo spazio colore CIELAB, a differenza di CIE XYZ, rispetta maggiormente la risposta non lineare dell'occhio umano alle radiazioni elettromagnetiche.

La metrica CIELAB si ottiene dalla seguente formula:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

CIELAB misura la differenza percettiva tra due luci convertendo la distribuzione della potenza spettrale delle stesse in rappresentazioni XYZ, che riflettono le sensibilità

della potenza spettrale dei tre coni sulla retina umana. Quindi, i valori XYZ vengono trasformati in uno spazio CIELAB, in cui si suppone che uguale distanza corrisponda a una uguale differenza percettiva (uno spazio “percettivamente uniforme”). Quindi, la differenza percettiva tra due punti viene calcolata usando la distanza euclidea tra questi in questo spazio $L^*a^*b^*$. Tale differenza è espressa in unità “ ΔE ”, unità che rappresenta approssimativamente il livello di rilevamento della soglia della differenza di colore [12].

S-CIELAB (*Spatial-CIELAB*)

Come la metrica CIELAB ΔE , la metrica S-CIELAB è una metrica di “fedeltà cromatica percettiva”. Essa misura l’accuratezza della riproduzione di un colore rispetto all’originale se vista da un osservatore umano. La metrica S-CIELAB estende la metrica CIELAB ΔE alle immagini a colori. L’obiettivo della metrica S-CIELAB è quindi aggiungere una fase di preelaborazione spaziale alla metrica CIELAB ΔE standard per tenere conto della sensibilità spaziale del colore dell’occhio umano [13]. In Fig. 3 sono indicati i passaggi che portano, partendo dall’immagine originale, alla sua rappresentazione in S-CIELAB, attraverso una prima separazione nelle componenti $L^*a^*b^*$, un filtraggio spaziale che porta alla rappresentazione XYZ dell’immagine, a cui viene infine applicato un calcolo standard CIELAB.

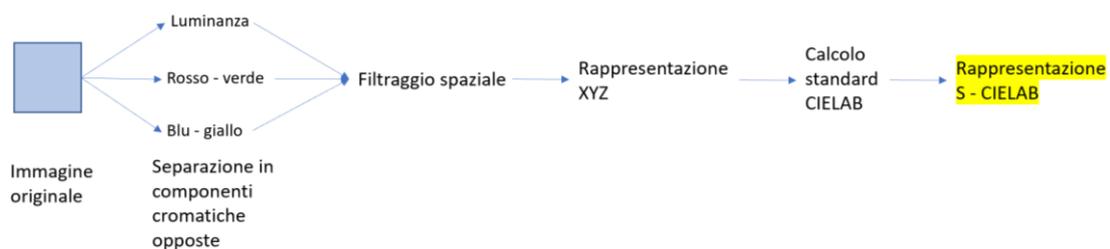


Fig. 3: passaggi che portano alla rappresentazione S-CIELAB

SSIM (*Structural SIMilarity*) [10]

SSIM è una metrica FR che misura la similarità tra due immagini. Si basa sul fatto che il sistema visivo umano è in grado di estrarre informazioni strutturali dal campo visivo. Pertanto, una misurazione della perdita di informazione strutturale può fornire una buona approssimazione alla distorsione dell’immagine percepita. La metrica considera, quindi, le informazioni strutturali di un’immagine come, ad esempio, quegli

attributi che riflettono la struttura degli oggetti sulla scena, indipendenti da luminanza e contrasto medio.

Si considerino x e y due segnali non negativi corrispondenti rispettivamente all'immagine campione e a quella distorta. Dati μ_x (media di x), μ_y (media di y), σ_x^2 (varianza di x), σ_y^2 (varianza di y), σ_{xy} (covarianza di x e y) si definisce SSIM(x , y):

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

Le costanti C_1 e C_2 servono per i casi limite (divisione per zero) e sono definite come $C_1 = (K_1 L)^2$ e $C_2 = (K_2 L)^2$, dove $L = 255$ per immagini a 8 bit, e $K_1 K_2 \ll 1$ sono due costanti molto piccole.

2.5) Le principali metriche soggettive

Il VQEG (*Video Quality Expert Group*) dal 1997 cerca di sviluppare, convalidare e standardizzare nuove metriche soggettive di qualità dell'immagine. I criteri di valutazione di una metrica tengono conto di:

- Accuratezza della previsione, ovvero la capacità di predire una valutazione soggettiva della qualità con basso errore.
- Esattezza con cui le previsioni concordano con le valutazioni soggettive della qualità.

VQEG fornisce un ampio database di video, a disposizione del pubblico, contenente valutazioni affidabili di tipo soggettivo [10].

SSCQE (*Single Stimulus Continuous Quality Evaluation*)

La metrica SSCQE prevede che l'immagine venga mostrata ai soggetti che la devono valutare ad intervalli di tempo successivi; essa, di volta in volta, presenta rumori diversi. I soggetti, ad ogni osservazione, esprimono le loro impressioni sulla qualità dell'immagine, utilizzando una scala articolata su cinque livelli di qualità (Brutta, Scarsa, Discreta, Buona, Ottima) [10].

DSCQS (*Double Stimulus Continuous Quality Scale*)

La metrica DSCQS prevede che l'immagine di riferimento e l'immagine distorta vengano presentate in sequenza l'una dopo l'altra ed il soggetto intervistato le valuti entrambe usando la stessa scala di livelli di qualità utilizzata nel metodo SSCQE.

MOS (*Mean Opinion Score*)

Tra le metriche soggettive, la metrica MOS è considerata la più affidabile. Essa consiste nella valutazione media dei giudizi espressi da diversi osservatori umani, relativi alla qualità di un'immagine. Questa metrica però presenta alcuni svantaggi: è molto lenta, costosa e non può essere applicata in tempo reale. Inoltre, non può essere utilizzata per applicazioni che necessitano metriche automatiche.

2.6) Altre metriche

Molte delle metriche del IQ esistenti pesano allo stesso modo il contenuto delle immagini, anche se è risaputo che gli osservatori concentrano maggiormente la loro attenzione su determinate regioni quando giudicano la qualità dell'immagine. È stato, infatti, dimostrato che è possibile utilizzare queste informazioni per aumentare le prestazioni delle metriche del IQ aumentando la compressione senza perdere qualità. Sulla base di questo, le metriche del IQ possono essere migliorate utilizzando una metrica che tiene conto delle regioni di interesse (ovvero non pesa tutti i pixel allo stesso modo). Tuttavia, le metriche del IQ dovrebbero anche simulare l'HVS. Pertanto, Hong e Luo hanno proposto una nuova metrica del IQ che tenga conto di questi due aspetti, ovvero *Spatial Hue Angle Metric* (SHAME). Tale metrica si basa sull'algoritmo dell'angolo di tonalità e due diversi metodi di filtraggio spaziale. La metrica SHAME si basa su alcune congetture: [12]

- Si possono identificare pixel o aree ad alto significato a cui assegnare pesi adeguati.
- Ai pixel in aree più grandi dello stesso colore dovrebbe essere assegnato un peso maggiore rispetto a quelli in aree più piccole.
- Una maggiore differenza di colore tra i pixel dovrebbe ottenere pesi maggiori.
- La tonalità è un'importante percezione del colore per distinguere i colori all'interno del contesto.

2.7) Attributi valutati dall'*Image Quality*

Diversi ricercatori hanno studiato l'importanza degli attributi di qualità (QA) che si sono rivelati utili per la formazione delle metriche del IQ [12].

Bartleson, nel 1982, propose una struttura utile a definire i modelli del IQ basata su tre passaggi:

1. Identificazione di importanti QA.
2. Determinazione dei rapporti tra valori di scala soggettivi e misure oggettive.
3. Combinazione dei valori della scala QA per prevedere il IQ complessivo.

Anche altri ricercatori hanno identificato numerosi QA che sono stati considerati importanti per quantificare il IQ. Tra questi, di seguito, si elencano i principali attributi [12].

La **nitidezza** rappresenta la quantità di dettagli che un'immagine può trasmettere. Essa è determinata da due fattori principali: acutanza e risoluzione. L'acutanza è la nitidezza dei bordi, ovvero i limiti di separazione tra due aree contigue nell'immagine che hanno una diversa luminosità e/o colore. La risoluzione è una valutazione oggettiva del dettaglio e quindi della capacità della fotocamera di distinguere due punti vicini. L'unità di misura della nitidezza è determinata dal numero di "coppie di linee per millimetro" visibili (lp/mm). La nitidezza può essere definita come la capacità dell'occhio umano di distinguere il numero di coppie di linee, adeguatamente contrastate, che si trovano in un millimetro [14].

Il **rumore** è una variazione casuale della densità dell'immagine, visibile come grana nella pellicola e variazioni del livello dei pixel nelle immagini digitali. Il tipico software di riduzione del rumore (NR – *Noise Reduction*) lo riduce, uniformando l'immagine, escludendo le aree vicine ai limiti di contrasto. Questa tecnica funziona bene, ma può oscurare dettagli fini e a basso contrasto.

La **gamma dinamica** è la gamma di livelli di luce che una fotocamera può catturare, solitamente misurata in *f-stop*, EV (valore di esposizione) o zone. Spesso i dispositivi digitali, quando codificano o decodificano segnali di immagini, introducono una correzione, chiamata correzione gamma, che altera i valori RGB. Per evitare tale alterazione è importante attribuire alle immagini un profilo colore che indichi lo spazio

colore e il valore tonale da utilizzare. Il gamma è l'errore di riproduzione dei toni del dispositivo [2]. È strettamente correlata al rumore, infatti un rumore elevato implica una gamma dinamica bassa.

La **riproduzione dei toni** può essere valutata per mezzo di un istogramma, ovvero un grafico che riporta la distribuzione dei toni dell'immagine, permettendo di valutare la distribuzione dei grigi. Tale controllo permette di verificare se l'immagine è sovraesposta o sottoesposta [2]. Una buona riproduzione dei toni consiste in una maggior somiglianza della luminanza dell'immagine a quella reale.

Il **contrasto** è generalmente dato dal rapporto tra il massimo punto di bianco e il massimo punto di nero di un'immagine [2]. Un alto contrasto di solito comporta la perdita della gamma dinamica, ovvero perdita di dettagli nelle alte luci o nelle ombre. Il contrasto si concentra su toni alti e bassi, eliminando quelli intermedi.

La **precisione del colore** è un fattore di qualità dell'immagine importante ma ambiguo. Molti spettatori preferiscono una maggiore saturazione del colore. Il colore più accurato non è necessariamente il più gradevole.

La **distorsione** è un'aberrazione che fa curvare le linee rette. Essa causa una contrazione irregolare (solo in alcuni punti) delle dimensioni dell'immagine. Spesso è causata dalla conservazione della pellicola in ambienti secchi. Se identificata nelle sue fasi iniziali, la distorsione può essere reversibile [2].

La **vignettatura**, in fotografia e nell'ottica in generale, indica la riduzione della luminosità dell'immagine nelle sue zone periferiche. Questo difetto può essere causato dall'utilizzo di obiettivi fotografici di bassa qualità, dall'uso di accessori non adatti alla lunghezza focale utilizzata sulla fotocamera o dal sensore digitale [15].

L' **aberrazione cromatica laterale** comporta un alone colorato lungo bordi che separano due zone con un'alta differenza di luminosità: nello specifico si tratta di una differente rifrazione dei fasci luminosi che compongono il colore che causa una dispersione sul piano focale [16].

Il **moiré di colore** è una banda di colore artificiale che può apparire in immagini con modelli ripetitivi di alte frequenze spaziali, come tessuti o staccionate. È influenzato anche dalla nitidezza dell'obiettivo e dal filtro *anti-aliasing* (passa-basso). L'“effetto

moiré” si forma in presenza di due righe identiche e sovrapposte con un angolo leggermente diverso oppure su una griglia parallela ma con le righe distanziate non in maniera regolare. In fotografia produce un effetto estremamente fastidioso, riducendo la qualità e la risoluzione dei dettagli [17].

Il software (soprattutto le operazioni eseguite durante la conversione RAW) può causare **artefatti** visivi significativi, tra cui compressione dei dati e perdite di trasmissione (ad es. JPEG di bassa qualità), “alone” eccessivo e perdita di dettagli fini e a basso contrasto.

Tuttavia, siccome alcuni di questi attributi non risultano semplici da comprendere da parte di osservatori inesperti, è possibile prendere come riferimento una serie ridotta di QA poiché molti di essi sono simili e hanno denominatori comuni. Al fine di ottenere un ragionevole compromesso tra accuratezza e complessità, i QA vengono raggruppati nei seguenti sei attributi generali:[12]

Il **colore** contiene aspetti come tonalità, saturazione e resa cromatica. Si tratta di una sensazione ed è il risultato della percezione della luce da parte dell’HVS.

La **luminanza** è considerata così percettivamente importante che è utile separarla dal colore. Può essere definita come la sensazione visiva secondo cui l’area in cui si trova lo stimolo visivo sembra emettere più o meno luce in proporzione a quella emessa da aree illuminate in modo simile, percepite come uno stimolo “bianco”.

Il **contrasto** può essere descritto come la grandezza percepita delle differenze visivamente significative, globali e locali, in termini di luminosità e cromaticità all’interno dell’immagine. Esistono diverse definizioni di contrasto. Michelson ha definito il contrasto come:

$$\frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

dove I_{max} e I_{min} rappresentano rispettivamente il valore massimo e minimo di luminanza. Il contrasto è correlato a cromaticità, saturazione e luminosità.

La **nitidezza** è correlata alla chiarezza dei dettagli e alla definizione dei bordi, alla sfocatura e alla risoluzione effettiva.

Gli **artefatti**, come il rumore o i contorni. Il rumore dell'immagine si può definire come variazioni casuali di luminosità o colore. Il contorno può essere definito come il cambiamento di colore percepito all'interno di una piccola regione che supera una soglia.

Capitolo 3

3.1) Software MRQA

A causa della natura dispendiosa, in termini di tempo, dell'esecuzione di esperimenti soggettivi, sono stati fatti grandi sforzi per sviluppare metodi (o metriche) di qualità oggettiva. Lo scopo di tali metodi è prevedere automaticamente il MOS (*Mean Opinion Score*) con elevata precisione. I metodi di qualità oggettiva possono essere classificati in approcci psicofisici e approcci ingegneristici. Le metriche psicofisiche mirano a modellare il sistema visivo umano (HVS) utilizzando aspetti come la sensibilità al contrasto, la selettività in frequenza, il modello spaziale e temporale, il mascheramento e la percezione del colore. Queste metriche possono essere utilizzate per un'ampia varietà di degradazioni video, ma il calcolo è generalmente impegnativo. L'approccio ingegneristico, invece, utilizza metriche semplificate basate sull'estrazione e l'analisi di determinate caratteristiche o artefatti in un video, ma non ignora necessariamente gli attributi dell'HVS poiché spesso tali metriche considerano anche gli effetti psicofisici [18].

La qualità del restauro è giudicata solo dal restauratore e dalla sua competenza. La mancanza di strumenti per valutare i vecchi film rende il processo di restauro più lungo e difficile. Spesso si danno indicazioni su quanto il film sia stato modificato prima/dopo il restauro senza, però, fornire indicazioni sulla qualità del restauro [19]. A. Plutino ha presentato studi [20] aventi ad oggetto gli strumenti esistenti per la valutazione della qualità del restauro dei film (MRQA, *Movies Restoration Quality Assessment*) e ha proposto un modo per analizzare un film attraverso la cabina di pilotaggio delle misure [21]. È comunque difficile con tale metodologia mettere in evidenza alcuni problemi temporali. Il lavoro svolto da F. Corso, per mezzo della creazione del software MRQA, mira a ricercare e sperimentare una tecnica MRQA per evidenziare problemi temporali, per esempio fornire indicazioni sullo stato del restauro di una sezione di video interessata da un graffio prima e dopo il ripristino. L'idea è dunque quella di proporre un metodo NR-MRQA, considerando i video come oggetti 3D e utilizzando la cabina di pilotaggio delle misure, con lo scopo di aiutare i restauratori a concentrarsi sull'analisi e sulla risoluzione dei problemi temporali.

Tramite il software MRQA è possibile estrarre dal video diverse sezioni:

- Sezioni verticali, lungo l'asse y di un frame normale, nel tempo t
- Sezioni orizzontali, lungo l'asse x di un frame normale, nel tempo t
- Sezioni identificate dai singoli frame che si susseguono nel tempo t

La scelta del tipo di analisi, ovvero quale categoria di fette elaborare, è lasciata all'utente finale. Su ciascuna delle precedenti sezioni è possibile effettuare una stessa elaborazione che fornisce un valore per ogni metrica e per ogni fetta. Al termine dell'elaborazione, il software è in grado di generare grafici basati su tali risultati. Le zone più interessanti di tali grafici sono le variazioni brutali. Inoltre, è stato implementato un altro tipo di grafico che rappresenta, per ogni metrica, la differenza tra il valore di una metrica per un frame e il valore della stessa metrica per il frame precedente. Perciò si può valutare i video sia con l'analisi "normale" (valori delle metriche per ogni frame) sia con l'analisi "differenziale" appena spiegata. Altri parametri a scelta dell'utente sono la durata dell'analisi (con un massimo di 30 secondi) e il tempo di inizio dell'analisi (in secondi).

Tra le metriche prese in esame, il software MRQA riporta quelle ritenute più significative per lo scopo proposto, ovvero luminanza media, contrasto multi-risoluzione, devianza dalla planarità dell'istogramma, coefficiente di varianza locale, differenza di colore, nitidezza, contrasto e deviazione standard. Tali metriche sono state implementate in C++, utilizzando la libreria *opencv*. Il progetto è composto da una libreria generale che propone tutte le funzionalità per estrarre le *slice* e calcolare il diverso valore delle metriche relative ai video esaminati e da interfacce utente o console che implementano la libreria. Su un AMD Ryzen 7 3750H l'elaborazione di un video di 30 secondi richiede circa 1,30 minuti e impiega circa 6 GB.

L'idea originale sottesa al progetto è quella di capire se esista la possibilità di estrarre generalità e soglie da tali metriche, ovvero se sia possibile ricavare parametri utilizzabili per qualsiasi filmato originale/restaurato al fine di valutare la presenza di problemi temporali e, successivamente, costruire uno strumento che possa effettuare uno studio automatico. Tuttavia, siccome ogni film/video implica scelte artistiche differenti, è difficile e rischioso estrarre i parametri di generalità. Risulta più adeguato ottenere quelli specifici per i singoli video.

Nella sua relazione “*Quality Assessment in Film Restoration*”, F. Corso [19] descrive anche i limiti del software. E’ abbastanza difficile cercare di estrarre parametri e risultati esaurienti in modo oggettivo per mezzo di tale applicazione. Per questo motivo, un *Quality Assessment* soggettivo sarebbe utile per approfondire i possibili valori delle metriche e delle loro rappresentazioni. Un altro limite è rappresentato dal fatto che il metodo implementato dipende dalla risoluzione del video: non si otterrà lo stesso risultato su un video di 144p rispetto a uno in full HD. Ciò è dovuto alla costruzione delle fette verticali: se ci sono più pixel, ci sono più sezioni e il risultato potrebbe differire. Ma in generale, saranno comunque visibili variazioni brutali dovute ad artefatti o difetti importanti. Infine, il modello MRQA è pensato per essere utilizzato su sequenze di piccola durata. La metrica fornisce un valore medio per un’intera immagine, perciò più grande è l’immagine, maggiore è la durata dell’analisi e meno accurato è il risultato. Per queste ragioni, per ora si tratta di uno strumento pensato per aiutare i restauratori e da usare prima e dopo il ripristino di un particolare difetto temporale. I risultati ottenuti con l’applicazione MRQA sono incoraggianti e invitano ad andare più in profondità, completando l’analisi con una valutazione soggettiva della qualità.

3.2) Manuale d’uso del software MRQA

In questo elaborato, riporto la prima parte del lavoro da me svolto durante il tirocinio avente ad oggetto la redazione del manuale d’uso del software MRQA sviluppato da F. Corso.

Il manuale si articola in quattro capitoli volti a spiegare il funzionamento dell’applicazione in modo comprensibile anche per utenti non esperti. Il primo capitolo riporta una breve introduzione sul restauro cinematografico. Il secondo capitolo illustra il software MRQA, il suo scopo, le sue caratteristiche, la sua applicabilità ai video nell’ambito del restauro cinematografico e descrive le metriche analizzate. Il terzo capitolo fornisce una dettagliata descrizione dell’interfaccia del software e dei passaggi che l’utente deve eseguire per analizzare un video. Il quarto capitolo analizza nel dettaglio i risultati dell’analisi di alcuni video per mezzo del software. A tale scopo, sono stati scelti tre video: “*Littoral de L’Herbe*” (1928, di Georges Carlou) e le due versioni, originale e restaurata, de “*La lunga calza verde*” (1961, di Roberto Gavioli).

La caratteristica principale del software MRQA è l'analisi temporale dei video, tramite ripartizione dei fotogrammi in *slice* verticali e orizzontali. E' stato scelto di fornire un esempio dell'analisi per *slice* verticali con il fine di spiegare meglio il suo funzionamento: nel manuale si riportano i risultati derivanti dall'analisi di un video statico, con durata di nove secondi, che raffigura delle bande verticali bianche e nere. L'output restituito dal software indica chiaramente la variazione, soprattutto nei grafici della luminanza e di ΔE .

Il video "*Littoral de L'Herbe*" mostra una panoramica, filmata da una barca, di una spiaggia a Le Villas de l'Herbe, nel comune di Lège-Cap-Ferret. Una veduta della villa moresca, nota come 'Villa Algérienne', e una lunga carrellata sugli edifici presenti lungo la riva. Si tratta di un filmato muto, in bianco e nero, su pellicola da 9,5 mm e di durata 02m 28s. Come primo esempio del funzionamento del software, il manuale descrive l'analisi per *frame*. Tuttavia, il video "*Littoral de L'Herbe*" è stato scelto poiché estremamente adatto all'analisi per *slice* verticali, in particolare nei primi due secondi. Infatti, il video presenta, tra gli altri difetti, un'importante bruciatura che si estende prevalentemente in verticale e interessa numerosi *frame* (Fig. 4).



Fig.4

Tale analisi, infatti, permette di isolare le *slice* interessate dal difetto, evitando di dover operare sugli interi *frame*. I risultati forniti da alcune delle metriche, come nitidezza (Fig. 5), varianza locale (Fig. 6) e contrasto multi-risoluzione (Fig. 7), sono più adeguati, in quanto indicano importanti alterazioni in corrispondenza di graffi e bruciature.

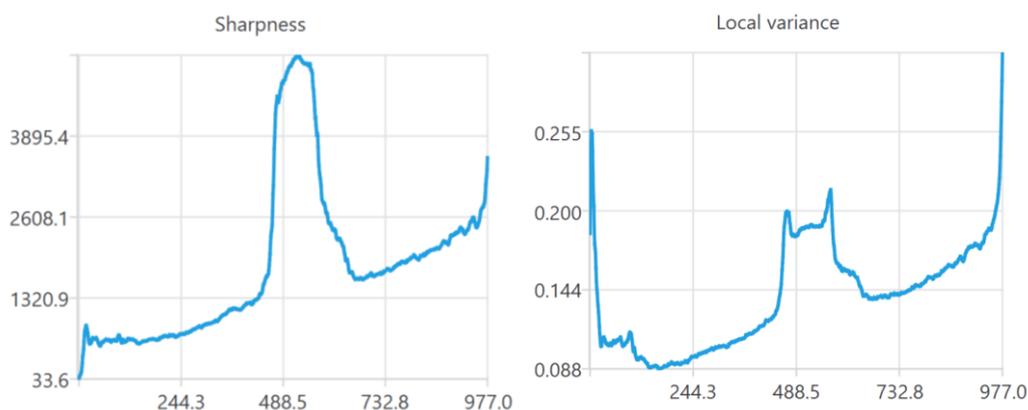


Fig.5

Fig.6

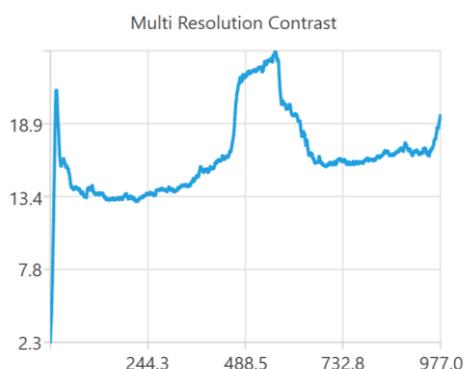


Fig.7

Il video *“La lunga calza verde”*, invece, è stato scelto come esempio per effettuare un confronto tra la versione originale e quella restaurata.

Come per tutte le tipologie di pellicole a colori, anche quella di questo video è stata alterata dall’invecchiamento dei coloranti organici contenuti nell'emulsione. E' un processo naturale che consiste in un disequilibrio dei valori cromatici e in una perdita del contrasto. Gli effetti percettivi del decadimento si traducono nella generazione di un colore predominante, una perdita di contrasto e una desaturazione delle tinte.

Per la ricostruzione dei valori dei colori vi sono numerose procedure, ma tutte prevedono la riproduzione dei colori solo per approssimazione e questo accade per l'impossibilità di ricreare i materiali d'epoca. Queste procedure di restauro implicano un intervento umano notevole e una costante supervisione del lavoro, il tutto ad un costo molto elevato. Il restauro digitale del colore si propone come una tecnica

alternativa e innovativa rispetto al restauro chimico. Le tecniche digitali consentono, con costi nettamente inferiori, di rimuovere la dominante cromatica, equalizzare l'istogramma, riequilibrare il range dinamico e ravvivare i colori desaturati di un'immagine, il tutto senza una costante supervisione da parte di personale qualificato [22].

Il cortometraggio “*La lunga calza verde*” è stato realizzato nel 1961 con regia di Roberto Gavioli, sceneggiatura di Cesare Zavattini e disegni di Paolo Piffarero. Il corto inizia con una panoramica su quello che l'Italia rappresentava all'epoca: una meta turistica, spesso poco rispettata dai suoi visitatori e una rivisitazione degli avvenimenti che portarono all'Unità. L'analisi iniziale del materiale ha evidenziato una notevole desaturazione del colore e la presenza di dominante cromatica su numerosi *frame*. Una parte consistente dei *frame* estratti, 28.944 per un frame rate di 24 fps, sono stati restaurati con il software *ACEforFilm*. Esso si basa sull'algoritmo ACE (*Automatic Color Equalization*), ispirato ad un modello del sistema visivo umano. Quello de “*La lunga calza verde*” è il primo restauro completo di un filmato di animazione mediante le tecniche percettive di ACE.

Il restauro è partito da un preliminare studio effettivo dell'opera da un punto di vista storico e da un'analisi tecnica per individuare le azioni necessarie per il recupero delle informazioni cromatiche e della dinamica. In un secondo momento, sono stati utilizzati *tools* digitali per il restauro vero e proprio. Le due macro-fasi si possono riassumere nei passaggi descritti di seguito.

Partendo da una suddivisione delle scene presenti nel cortometraggio, inizialmente effettuata manualmente, sono state valutate le singole scene e, su di esse, è stata fatta un'ulteriore suddivisione in base alla variazione di sfondo e dei soggetti presenti nella scena. Prima di procedere all'analisi di possibili soluzioni di restauro, è stato scelto un numero limitato di immagini campione (*key frame*) per ogni scena, sulle quali effettuare le prove di restauro e la taratura dei parametri dell'algoritmo. Dopo un'attenta valutazione dei *key frame* sui quali effettuare i filtraggi, è stato possibile procedere all'analisi tecnica e soggettiva delle azioni correttive da apportare. Per assumere maggiori informazioni sulla presenza di una dominante, sono stati utilizzati software di *graphic editing* come Photoshop, Jimp e ImageJ, con i quali ogni

fotogramma è stato analizzato attraverso l'istogramma colore. Sono stati individuati i punti più chiari e più scuri di ogni immagine e prelevate le loro coordinate, confrontandoli con i valori dei canali RGB dell'originale.

Durante il restauro digitale di una pellicola cinematografica a colori è facile riscontrare errori dovuti alla mancanza di informazione sull'ambientazione dei soggetti filmati, sia che si tratti di *live action* o animazione. Per questo motivo, quando si effettua un lavoro di restauro dell'apparenza del colore e della dinamica, si procede a priori con una ricerca e uno studio della pellicola e delle componenti della scena: collocazione spazio-temporale e soggetti. Nel caso de "La Lunga Calza Verde" è subentrata la necessità di consultare l'archivio storico della Fondazione Luigi Micheletti (proprietaria, insieme all'istituto Luce, della pellicola originale del cortometraggio) e, nello specifico, quella di visionare i rodovetri¹ originali. Purtroppo, anche i rodovetri hanno subito l'inesorabile degrado del tempo, ma è stato comunque fondamentale consultarli per stabilire il risultato a cui fare tendere il restauro.

La principale caratteristica dell'algoritmo ACE è la correzione colore *data driven*: essa è in grado di adattarsi a dominanti cromatiche non conosciute a priori e di eseguire un'estensione del *range* dinamico dell'immagine, anche di filmati in bianco e nero. Il *tool ACEforFilm* presenta una serie di funzioni che permettono di ottenere naturalezza nelle immagini restaurate e preservare la forma dell'istogramma originale in numerose situazioni di degrado avanzato [23].

Dato che il degrado nelle pellicole non è costante, non lo è nemmeno il decadimento dei coloranti organici. Nei casi di percentuale di alterazione elevata, è stato necessario intervenire con il fotoritocco sui singoli *frame* per recuperare le informazioni necessarie al fine di ottenere un risultato soddisfacente. Per raggiungere l'obiettivo prefissato sono stati utilizzati i *tools* di *color correction* presenti nei software di *graphic editing* Photoshop e *video editing* Premiere.

L'ultima fase di restauro, prima del montaggio dei *frame* restaurati, ha previsto un controllo della coerenza tra le scene di *frame* adiacenti. A tale scopo, è stata effettuata

¹ Rodovetro: foglio trasparente in acetato di cellulosa sul quale il disegno dell'animatore viene stampato e poi dipinto. Procedimento che si svolge per ogni fotogramma che compone una sequenza animata.

un'ulteriore revisione per creare una continuità nella luminosità, nel contrasto e nel colore tra le scene adiacenti, in particolare modo tra quelle scene dove non era presente una variazione spazio-temporale. Il risultato del restauro dimostra che i filtraggi scelti hanno restituito colori, percettivamente, più veritieri e una maggiore luminosità rispetto all'originale.

Molte delle metriche, restituite dal software MRQA, mostrano una variazione in corrispondenza di alcuni *frame*, ovvero quelli in cui un telo/mantello rosso occupa quasi interamente la scena, per qualche istante. In corrispondenza di tali *frame* calano multi-risoluzione, deviazione standard, varianza locale, nitidezza e luminanza, mentre aumentano ΔE e planarità dell'istogramma.

In alcuni casi è stato utile confrontare l'output del software MRQA con i risultati restituiti da Matlab. In questo modo è stata calcolata la differenza colore ΔE utilizzando un'immagine che la descrivesse visivamente, unitamente ad alcuni grafici dello spazio colore.

Capitolo 4

4.1) Cenni sui parametri soggettivi dell'*Image Quality*

L'indagine soggettiva è stata ritenuta indispensabile per affiancare e completare l'analisi oggettiva effettuata con il software MRQA.

Nell'ultimo decennio si è osservato un crescente uso di immagini e video digitali associato anche ad un veloce progresso nell'ambito dell'*image processing*. L'aumento dell'esposizione di immagini e video all'occhio umano incrementa l'interesse per la qualità dell'esperienza (QoE). La qualità dei media visivi, infatti, può peggiorare durante l'acquisizione, la compressione, la trasmissione, la riproduzione e la visualizzazione a causa delle distorsioni che potrebbero verificarsi in una qualsiasi di queste fasi. I legittimi giudici della qualità visiva sono gli esseri umani in quanto utenti finali, le cui opinioni possono essere ottenute mediante esperimenti soggettivi. Tali esperimenti coinvolgono un gruppo di partecipanti che di solito sono non esperti, indicati anche come soggetti di prova, e sono finalizzati a valutare la qualità percettiva di un dato materiale di test come, ad esempio, una sequenza di immagini o video. L'insieme dei dati ricavati dall'analisi soggettiva si traduce in caratteristiche o parametri relativi alla qualità di un'immagine o di un video, che vengono poi raggruppati per stabilire un metodo di qualità oggettivo, che può essere mappato per prevedere il punteggio medio dell'opinione (MOS).

Siccome la percezione può essere influenzata dalle condizioni ambientali e visive, l'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU) ha prodotto una serie di raccomandazioni per metodi di prova standardizzati per la valutazione soggettiva della qualità dell'immagine. Gli esperimenti soggettivi sono generalmente condotti in un ambiente di laboratorio controllato. Prima di effettuare un esperimento soggettivo, va effettuata un'attenta pianificazione e vanno stabiliti alcuni parametri, tra cui il metodo di valutazione, la selezione del materiale di prova, le condizioni di visualizzazione, la scala di valutazione e i tempi di presentazione. I risultati di un esperimento soggettivo sono i punteggi individuali dati dai soggetti del test, che vengono utilizzati per calcolare il punteggio medio di opinione (MOS) e altre statistiche. Il MOS ottenuto, in particolare, rappresenta quindi una verità fondamentale per lo sviluppo di metriche oggettive di qualità [18].

4.2) Organizzazione dell'indagine soggettiva e presentazione dei video utilizzati

La seconda fase del tirocinio da me svolto ha previsto l'affiancamento di un'indagine soggettiva alla redazione del manuale d'uso del software MRQA. A tale scopo, sono stati selezionati il video “*La lunga calza verde*” (di Roberto Gavioli, 1961) e il video denominato “*Fiat*”. Tali video sono stati oggetto di restauro ed entrambe le versioni, originale e restaurata, sono state mostrate agli utenti. È stato previsto il montaggio delle due versioni di ognuno dei due video in modo da poterle sottoporre agli utenti affiancate e identificate ognuna da una lettera di riferimento (A e B). All'utente è stato dichiarato che si trattava di un video nelle sue due versioni, ma non è stato specificato quali, tra A e B, fossero la versione originale e quella restaurata.

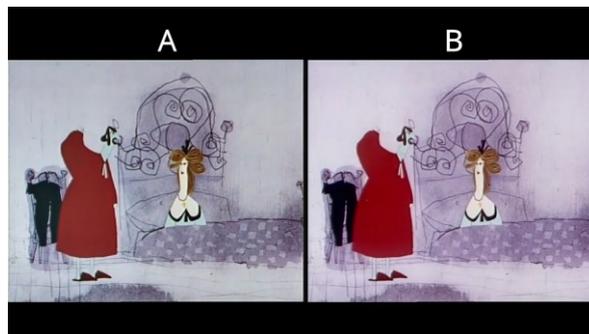
I video selezionati sono stati oggetto di operazioni di restauro che hanno previsto, per ogni fotogramma, una stima della scena in base all'aspetto del colore, invece che ai suoi colori originali. La conservazione dell'aspetto si ottiene per mezzo di algoritmi che simulano alcuni meccanismi di HVS, in particolare la costanza della luminanza e del colore. La prima consente una percezione della scena robusta ai cambiamenti dell'intensità media di luminanza, mentre la costanza del colore consente una percezione della scena robusta alle variazioni del colore dell'illuminante. Gli algoritmi usati fanno parte degli *Spatial Color Algorithms* (SCA). Le prestazioni di questi algoritmi possono dipendere fortemente dalla quantità e dalla qualità del degrado dell'input da ripristinare. In alcuni casi, l'applicazione degli SCA è l'unico passaggio necessario per un restauro soddisfacente, mentre in altri casi lo è il pre- e/o post-processing. L'evidenza visiva alla base degli SCA è che la sensazione del colore non dipende dal valore puntuale dello stimolo, ma dalla disposizione spaziale degli stimoli nella scena. Infatti, identici livelli di luminosità in un punto possono dare origine a sensazioni cromatiche completamente diverse a seconda dei valori nel resto dell'immagine. Per riprodurre questo comportamento, gli SCA eseguono confronti spaziali tra i pixel nell'immagine di input. Per questo motivo, questi algoritmi sono caratterizzati da un elevato costo di calcolo e un comportamento locale e globale. Negli ultimi anni sono stati implementati una serie di modelli SCA alternativi, come ad es. ACE, RSR, STRESS [25].

Per quanto riguarda i video selezionati, si specifica quanto segue:

“La lunga calza verde”

- *Frame rate*: 24 fps
- *Formato*: MOV
- *Aspect ratio*: 1920x1080
- *Durata*: 12 sec

Il cortometraggio animato *“La lunga calza verde”* è il primo video sottoposto all’analisi degli utenti. L’opera è stata realizzata nel 1961, con la regia di Roberto Gavioli, sceneggiatura di Cesare Zavattini, disegni di Paolo Piffarerio e produzione di Gamma Film e Istituto Luce.



Restaurato con STRESS

Originale

Per il restauro che ha portato dalla versione B (in figura sopra), ovvero la pura digitalizzazione del video, alla versione A (sempre in figura sopra), si è lavorato su una copia DVD (MPEG-2) in risoluzione standard PAL (720×576). Il materiale di partenza (B) ha mostrato una moderata perdita di contrasto, una de saturazione del colore e la presenza di dominanti cromatiche su più fotogrammi. I pixel originali sono stati usati come colore potenziale di riferimento, ma hanno subito un notevole degrado dovuto alla natura del supporto e dei coloranti.

Per questo restauro è stato applicato il modello STRESS, con 200 spray, ciascuno composto da 20 campioni punti. Tale approccio, per caratterizzare il contesto visivo locale, calcola per ogni pixel non solo il massimo locale (bianco di riferimento) come RSR, ma anche il minimo locale (nero di riferimento), per ogni canale cromatico. Per il ridimensionamento finale è poi stata applicata una mappatura lineare [21].

“*Fiat*”

- *Frame rate*: 24 fps
- Formato: MOV
- *Aspect ratio*: 1920x1080
- Durata: 29 sec

Della porzione del cortometraggio originale non si conosce alcuna informazione, né per quanto riguarda la regia, né per quanto concerne la denominazione originale o il fine ultimo per cui è stato girato. Sia nel presente elaborato, che nel corso dell'indagine, il video è stato soprannominato “*Fiat*”.

In sede di restauro si è ottenuto un primo leggero miglioramento con il software professionale Phoenix 2017.1 per quanto riguarda i seguenti aspetti: la riduzione di artefatti ben visibili durante i movimenti rapidi, l'instabilità dei frame dovuta al tremolio del film durante la scansione o alle vibrazioni della fotocamera durante la registrazione del filmato, i cambiamenti di luminosità, spuntature, piccoli graffi, polvere e sporco [24].

L'analisi soggettiva, tuttavia, non si è concentrata su tale prima fase del restauro, ma su quella successiva effettuata per mezzo di ACE. Perciò la versione somministrata agli utenti e indicata con la lettera A, è stata ritenuta quella “originale” (ma già elaborata con Phoenix), mentre la versione B è quella successivamente restaurata con ACE. Il confronto è avvenuto tra queste due versioni. Il software ACE applicato al video si è occupato esclusivamente del restauro colore e ha portato ad un notevole miglioramento del contrasto, a discapito tuttavia del *flickering*, che viene leggermente enfatizzato nonostante la precedente applicazione del *tool* automatico di Phoenix usato per ridurlo. Inoltre, l'elaborazione ha comportato una perdita di dettagli sul volto del personaggio di sinistra [24]. In Fig. 25 è raffigurato il confronto tra video “originale” e video restaurato rielaborato con ACE.



Fig.25 – Confronto tra video “originale” e video restaurato rielaborato con ACE

Il tipo di indagine ha previsto un numero ristretto di utenti, pari a 20, con le seguenti condizioni di visualizzazione controllate, specifiche e costanti per tutti i partecipanti:

- A) Stanza buia
- B) Distanza osservatore-monitor di circa 50 cm
- C) Luminosità monitor massima
- D) Dispositivo: computer portatile HP Pavilion Power Laptop 15-cb0xx.
Processore: Intel(R) Core (TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz 2.81 GHz. Tipo di sistema: Sistema operativo a 64 bit, processore basato su x64

È stato elaborato un questionario suddiviso in due sezioni: una prima parte avente ad oggetto domande sulle caratteristiche dell’osservatore, ritenute utili e significative ai fini dell’indagine. Di seguito sono riportate tali domande (Tabella 1):

L'osservatore indossa occhiali da vista o lenti a contatto?
Età
Sesso
Ha problemi nella visione dei colori? Se sì, quali?
Presenta difetti di vista? Se sì, quali?
Nell'ambito della sua attività/percorso di studi si è mai interessato/occupato di immagini e video (video editing, image editing, fotografia, cinema)?
Quanto si ritiene esperto di cinema da 1 a 5?
Quanto si ritiene esperto di elaborazione di immagini/video da 1 a 5?
E' interessato al cinema o al restauro cinematografico?
Ritiene che sia utile restaurare le opere cinematografiche?

Numeri in ordine di importanza le seguenti azioni che, secondo lei, corrispondono maggiormente al concetto di restauro cinematografico:
Ripristinare la funzionalità di un film
Sonorizzare film muti
Colorizzare film in bianco e nero
Conservare il patrimonio artistico e culturale
Conoscere meglio l'opera che si sta restaurando
Rimuovere/migliorare difetti dovuti all'usura
Migliorare/modificare la qualità dell'immagine in base alle aspettative contemporanee

Tabella 1

La seconda sezione (Tabella 2) riguarda domande volte ad acquisire dati sulla percezione degli utenti a seguito della visione dei video “*La lunga calza verde*” e “*Fiat*”. Le domande sono state scelte in relazione ad alcune caratteristiche significative poiché confrontabili con i risultati ottenuti in modo oggettivo dal software MRQA.

Quale dei due video è più luminoso?
In quale dei due video i particolari sono più nitidi/in quale video le immagini sono meno mosse/sfocate? (nitidezza)
In quale dei due video vi è maggior differenza tra toni chiari e toni scuri, facendo risaltare meglio i dettagli sullo sfondo? (contrasto)
Le sembra che uno dei due video sia più rovinato? Se sì, quale?
Quale video ha i colori più naturali?
Pensa che i due video siano poco fluidi? (frame rate)
Quale dei due video le sembra meno fluido?
Le sembra che il contenuto di uno o entrambi i video sia poco o per nulla leggibile a causa di difetti?
Quale dei due video le sembra più piacevole?
Trova che i due video siano molto diversi?
Quale video ha preferito?
Quale video, secondo lei, è l'originale?
Quale delle due versioni avrebbe migliorato?

Cosa avrebbe migliorato di tale video? (es. difetti (graffi), colore, nitidezza, luminosità, altro...)
Avendo osservato i due video, ha riscontrato un particolare affaticamento/disturbo della vista?
Se sì, in quale dei due video maggiormente?

Tabella 2

4.3) Raccolta e analisi dei dati emersi dall'indagine soggettiva

I 20 utenti coinvolti nell'esperimento, 9 di genere maschile e 11 di genere femminile, hanno un'età abbastanza eterogenea e compresa tra i 15 e gli 85 anni. Di questi, il 75% presenta uno o più difetti di vista, in particolare: 3/20 difetti di presbiopia, 7/20 difetti di astigmatismo, 10/20 difetti di miopia e, in 2/20 dei casi, patologie più rare. Si può quindi affermare che una buona parte dei casi esaminati non dispone di una vista perfetta. Tuttavia, il 66,6% degli utenti con difetti visivi indossava occhiali da vista o lenti a contatto al momento della visione dei filmati. Inoltre, nessun utente ha dichiarato problemi nella visione dei colori.

Il test è stato somministrato ad una maggioranza di utenti non esperti nel settore. Tuttavia, il 40% ha avuto a che fare con attività legate a immagini e/o video durante studi/attività/hobby. Anche per quanto riguarda il cinema, la maggioranza degli utenti non è esperta, solo il 5% ha dichiarato un elevato grado di conoscenza in questo settore. Ancora meno specifica è la conoscenza delle tecniche di elaborazione di immagini e/o video. Si può dire, però, che il 65% degli utenti intervistati è interessato al cinema e/o al restauro cinematografico, mentre una percentuale minore (35%) non è interessata.

Dal punto di vista soggettivo, si potrà osservare come le preferenze dei soggetti intervistati siano quindi indipendenti da valutazioni tecniche e non sempre riconducibili all'idea che essi hanno del concetto di restauro cinematografico. E' stato infatti chiesto ad ogni utente di esprimere in che cosa per lui consistesse il restauro. Di seguito le risposte fornite, in ordine di importanza:

Restauro cinematografico (primo posto)

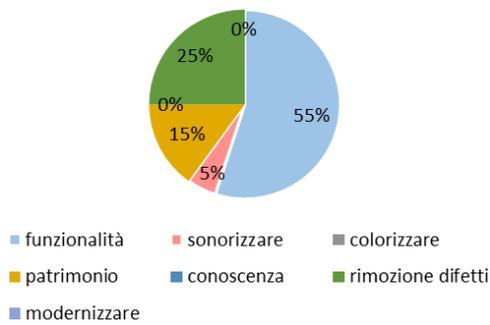


Fig.8

Restauro cinematografico (secondo posto)

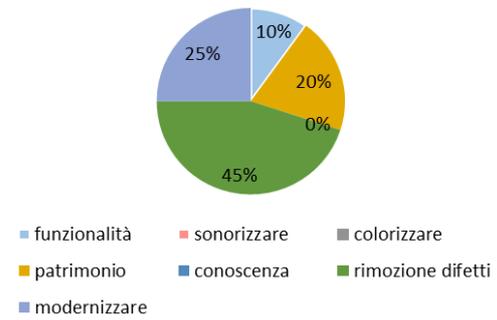


Fig.9

Restauro cinematografico (terzo posto)

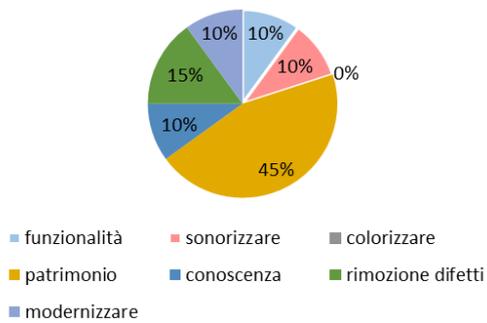


Fig.10

Restauro cinematografico (ultimo posto)

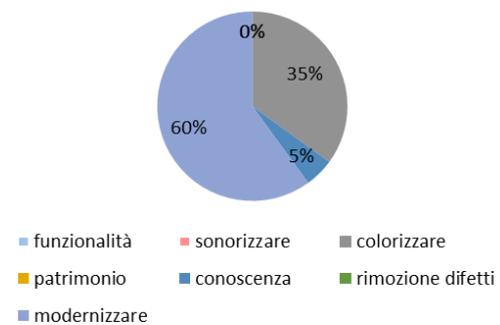


Fig.11

Utilità del restauro cinematografico

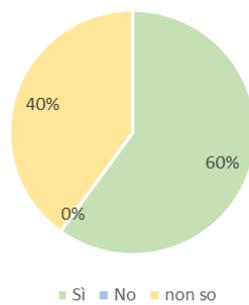


Fig.12

Nel grafico in fig.8 sono indicati gli scopi del restauro che gli utenti hanno indicato al primo posto. Per il 55% degli utenti il primo obiettivo da raggiungere con il restauro è

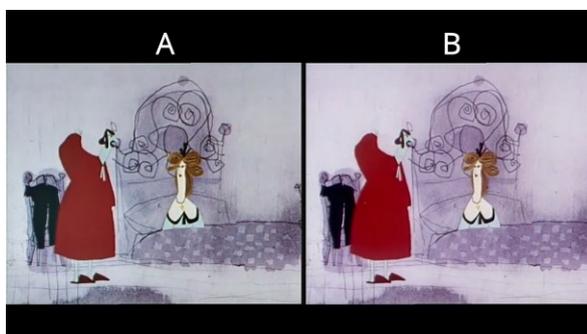
il ripristino delle funzionalità del film. Segue il 25% degli utenti che sostiene che la finalità più importante consiste nel rimuovere i difetti dovuti all'usura.

Il grafico in fig.9 mostra quale scopo sia ritenuto dagli utenti al secondo posto, per importanza, nel restauro. Emerge una prevalenza relativa alla rimozione dei difetti. L'unione dei dati risultanti da questi primi due grafici indica che, per la maggioranza degli utenti, il ripristino delle funzionalità e la rimozione dei difetti sono i primi obiettivi da raggiungere con il restauro. Tuttavia, dal grafico in fig. 9 emerge anche l'importanza della modernizzazione, infatti il 25% degli utenti sostiene che gradirebbe che il restauro fosse anche in grado di migliorare i video, non tanto riportandoli al loro stato primitivo, ma addirittura ad una versione migliore e più attuale. Questa operazione, però, rientra nel concetto di 'riedizione' analizzato nei primi capitoli. Un altro 20% (in fig. 9) e 45% (in fig. 10) degli utenti, però, considera molto importante, come fine del restauro, la conservazione del patrimonio artistico e culturale.

Passando ora all'ultimo posto (fig.11), il 60% degli utenti ritiene che la cosa meno importante del restauro sia la modernizzazione, mentre il 35% la colorizzazione dei film in bianco e nero. Entrambe queste risposte sono legate al fatto che, per alcuni utenti, è importante vedere i film per come sono stati pensati all'epoca della loro creazione.

In ogni caso, il 60% degli utenti ritiene che il restauro cinematografico sia molto utile, mentre il 40% non si è espresso al riguardo (Fig.12).

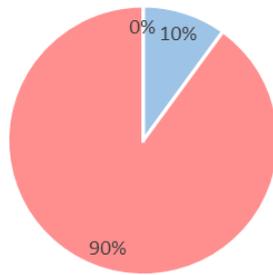
Di seguito sono illustrati i grafici che riportano le percentuali delle risposte date dagli utenti alle domande proposte relative alle due versioni de "La lunga calza verde":



Restaurato con STRESS

Originale

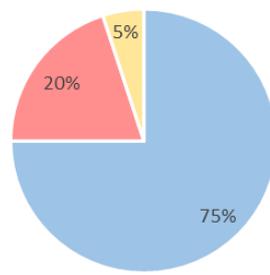
Più luminoso



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.13

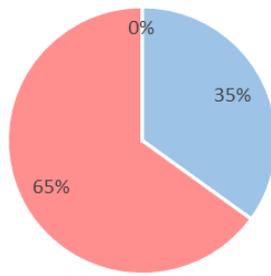
Più nitido



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.14

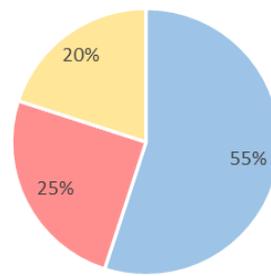
Più contrasto



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.15

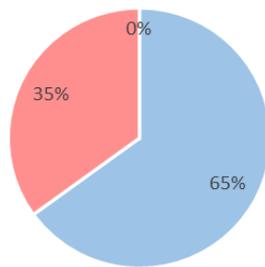
Più rovinato



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.16

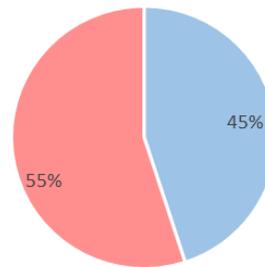
Colori più naturali



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.17

I due video sono poco fluidi?



■ Sì ■ No

Fig.18

Video non leggibile a causa di difetti?

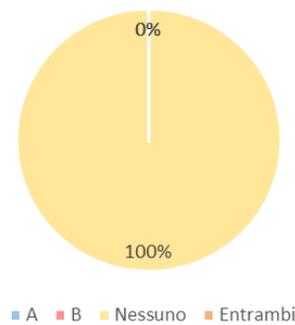


Fig.19

La quasi totalità degli utenti ha identificato come più luminosa la versione originale (B) (Fig. 13). Per quanto riguarda la nitidezza (Fig. 14), la maggioranza degli utenti ha notato che la versione restaurata (A) ha particolari più nitidi e linee più marcate. Nonostante questo dettaglio sia stato identificato, gli utenti hanno preferito la versione originale (B) per altre caratteristiche, secondo loro, più rilevanti (un utente commenta: *“Nel video A le linee sono più marcate e più nitide, ma nel video B i colori sono più accesi. Preferisco i colori accesi alle linee nitide, quindi preferisco il video B”*).

Premettendo che non tutti gli utenti conoscevano la definizione di ‘contrasto’, le risposte sono basate sull’interpretazione soggettiva della domanda per come è stata formulata. Il 65% degli utenti ha ritenuto che nella versione originale (B) ci fosse una maggior differenza tra toni chiari e toni scuri (Fig. 15).

È stata posta agli utenti anche una domanda relativa alla presenza di difetti quali, ad esempio graffi, nonostante il restauro non abbia coinvolto tali riparazioni. Si è pensato, tuttavia, che una risposta di questo tipo (Fig. 16) avrebbe comunque potuto produrre risultati utili. La maggior parte degli utenti ha percepito un maggior numero di difetti nel video restaurato (A). Siccome il restauro di tale video ha modificato il colore, cercando di eliminare/ridurre la dominante cromatica emersa con il passare del tempo nella versione originale (B), è probabile che la dominante stessa abbia, di fatto, reso meno evidenti i difetti, ad esempio graffi, e che, quindi, essi siano percettivamente meno visibili nella versione originale (B). Una volta rimossa la dominante cromatica per mezzo del restauro, i difetti sembrerebbero essere più evidenti. Si tratterebbe, quindi, solo di un’impressione, in quanto il restauro del cortometraggio non ha modificato tale aspetto.

Il restauro del video in questione, come abbiamo già specificato, si è concentrato sul ripristino del colore; perciò, è stato ritenuto opportuno domandare agli utenti quale video avesse, per loro, i colori più naturali (Fig.17). Il 65% degli utenti ha ritenuto più naturali/meno artificiali i colori della versione restaurata (A). Questo è stato, per altro, uno degli obiettivi principali del restauro, in quanto il colore è stato influenzato dalla dominante cromatica emersa con il tempo. (Un utente commenta: *“in B migliorerei la naturalezza del colore”*, mentre un altro: *“interessante il colore dello sfondo, perché viola?”*). Questi commenti dimostrano che alcuni degli utenti hanno riscontrato, nella versione originale (B), colori particolari e poco veritieri. Tuttavia, la risposta degli osservatori a questa domanda non è stata immediata, in quanto la domanda posta non è stata facilmente interpretabile trattandosi di un cortometraggio di animazione e non di una scena reale (un utente commenta: *difficile dire quale versione abbia colori più naturali perché è un cartone*).

È stato anche chiesto agli utenti se pensassero che i due video fossero poco fluidi (Fig. 18). La domanda è stata pensata in relazione al concetto di *frame rate* (*frame* al secondo) che, in entrambe le versioni mostrate, è di 24 fps. Il 55% degli utenti ha reputato che entrambe le versioni fossero abbastanza fluide. Tuttavia, alcuni degli utenti (45%) hanno associato l’espressione “poco fluidi” ai particolari movimenti “a scatti” dei soggetti rappresentati, nonostante il frame rate sia di 24fps. Per questo motivo il risultato non è significativo per l’indagine.

Alla domanda che chiedeva se il contenuto di una o entrambe le versioni fosse poco o per nulla leggibile a causa di difetti, gli utenti hanno fornito una risposta unanime, sostenendo che entrambe le versioni erano leggibili nonostante i difetti (Fig. 19).

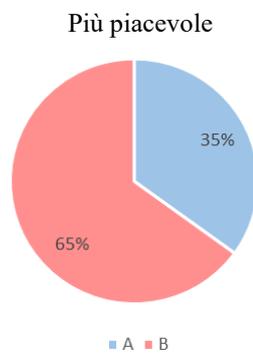


Fig.20

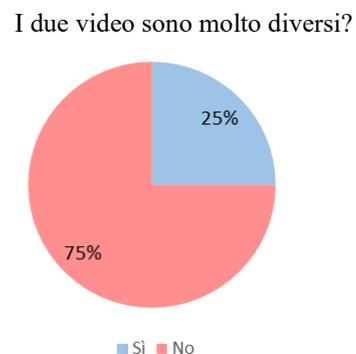


Fig.21

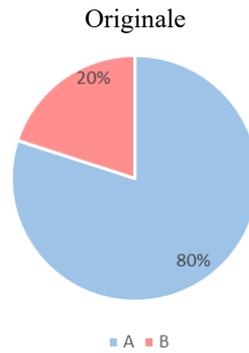


Fig.22

La maggioranza degli utenti (65%) ha gradito maggiormente il video originale (B) (Fig. 20). Le motivazioni di tale scelta sono state attribuite principalmente al colore e alla luminanza. (Un utente commenta: *“preferisco colori accesi alle linee nitide, quindi preferisco il B”*). In ogni caso il 75% degli utenti non ha ritenuto che le due versioni fossero molto diverse (Fig. 21). La domanda è stata pensata per una risposta totalmente soggettiva a partire dalla stessa interpretazione del concetto di “molto diversi”.

È stato chiesto agli utenti quale video, secondo loro, fosse l'originale (Fig.22). La stragrande maggioranza degli utenti (80%) ha pensato che la versione originale fosse la A, ovvero quella che in realtà è la versione restaurata. Questa risposta è in primo luogo dovuta al fatto che gli utenti si sono basati sulla versione da loro preferita (originale B) e, di conseguenza, hanno pensato che quella, essendo per loro la versione migliore, fosse anche quella “migliorata”, ovvero quella restaurata (un utente commenta: *“credo che, essendo abituati ai colori di adesso, principalmente su Instagram, ma anche in parte in televisione, le immagini sono spesso modificate con colori molto luminosi e accesi. Credo di essere abituato a vedere immagini con bianchi molto alti e contrasto elevato, anche io modifico così le mie foto, e di conseguenza quando si vede un'immagine molto luminosa o con colori forti si pensa subito che sia stata modificata o ritoccata. Collego la luminosità alta a qualcosa di recente”*).

Quale versione avrebbe migliorato?

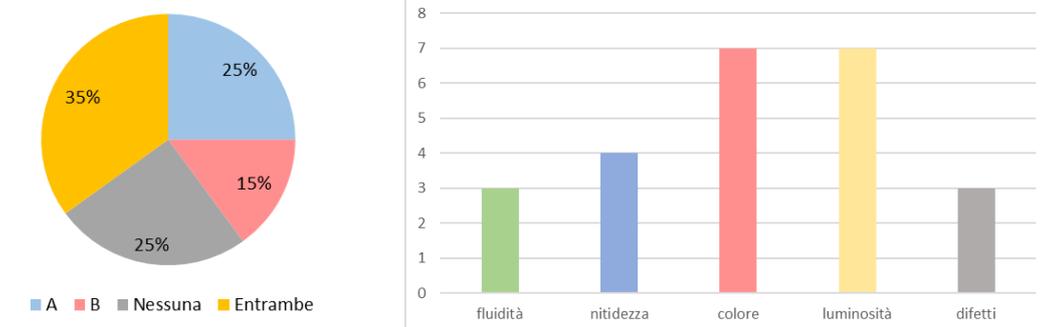


Fig.23

Il 25% degli utenti avrebbe migliorato la versione A, ovvero quella restaurata. Di questi osservatori fanno parte alcuni di quelli che hanno preferito la versione B. Il 15% avrebbe migliorato la versione B, il 25% non avrebbe migliorato nessuna delle due versioni, reputando che ognuna avesse motivo di essere mostrata. Una percentuale del 35% avrebbe migliorato entrambe le versioni (un utente commenta: “*avrei trovato una via di mezzo tra A e B per la luminosità*”). Alcuni degli utenti avrebbero apportato più di una modifica. Colore e luminosità sono state le modifiche più votate, questo perché la maggioranza degli osservatori ha preferito i colori più accesi del video originale (B) e la sua luminosità. Per questo motivo avrebbero migliorato il video restaurato (A) aumentando la luminosità e rendendo i colori più accesi (Fig. 23).

Affaticamento/disturbo della vista?

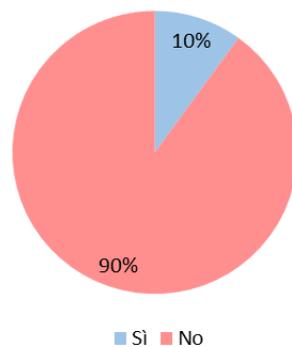


Fig. 24

Per quanto riguarda un eventuale disturbo della vista derivante dall'osservazione del video, praticamente nessun utente ha riscontrato affaticamento durante la visione (Fig. 24). Questo sicuramente anche a causa della breve durata (12 sec). Solo il 10% ha risposto affermativamente alla domanda (un utente commenta: *“il video B risulta poco dettagliato e troppo luminoso. Con conseguente fastidio per la vista”*). Questo utente, inoltre, fa parte della minoranza che ha preferito il video restaurato (A), poiché ha ritenuto troppo luminoso e artificioso il video originale (B). Il 100% degli utenti che hanno risposto affermativamente alla domanda precedente ha riscontrato un maggior fastidio visivo nella versione originale (B).

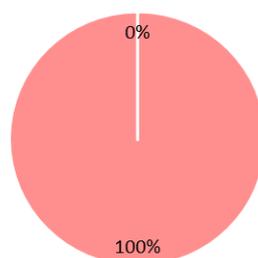
Di seguito sono illustrati i grafici che riportano le percentuali delle risposte date dagli utenti alle domande proposte per il video *“Fiat”*:



Originale

restaurato con ACE

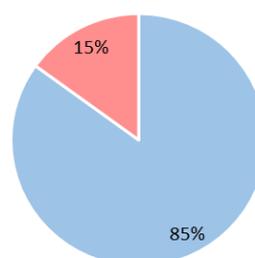
Più luminoso



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.26

Più nitido



■ A ■ B ■ Uguali

Fig.27

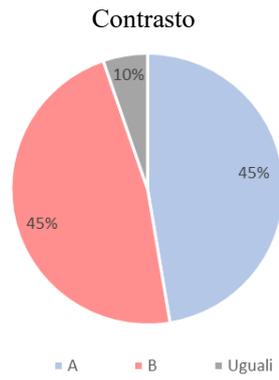


Fig.28

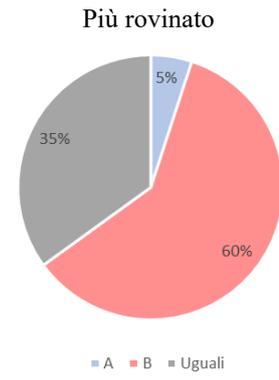


Fig.29

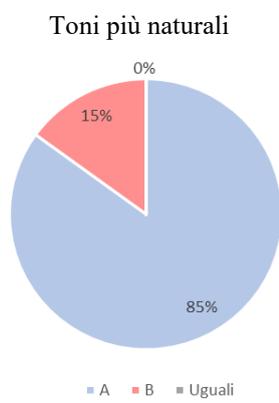


Fig.30

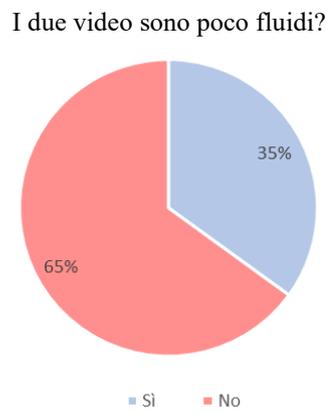


Fig.31

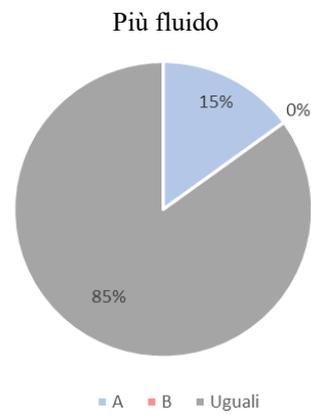


Fig.32

Video non leggibile a causa di difetti?

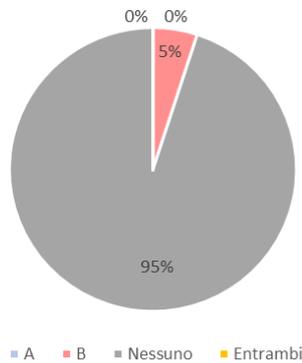


Fig.33

Tutti gli utenti hanno percepito come più luminosa la versione restaurata (B) (Fig. 26). L'85% degli utenti ha ritenuto che il video originale (A) avesse i particolari più nitidi e le immagini meno mosse/sfocate (Fig. 27). Effettivamente, come abbiamo detto precedentemente, ACE ha leggermente enfatizzato l'effetto *flickering* già presente, andando a ridurre la nitidezza della scena. Per quanto riguarda il contrasto, gli utenti si sono divisi circa a metà, un 45% pensa che ci sia maggior contrasto nel video originale (A), così come un altro 45% nel video restaurato (B), mentre il 10% non ha saputo riconoscere il video più contrastato, reputandoli uguali per questo parametro (Fig.28). Non è stato semplice far capire ad utenti non esperti cosa si intendesse per contrasto; perciò, è possibile che essi abbiano interpretato non del tutto correttamente la domanda e, di conseguenza, non siano riusciti a riconoscere il video che avesse effettivamente più contrasto. Tuttavia, un utente commenta: "in B troppo contrasto". Questo osservatore ha individuato un eccessivo contrasto nel fatto che la versione restaurata (B) abbia zone buie e altre altamente luminose. Il 60% degli utenti ha notato che il video restaurato (B) era leggermente più rovinato (Fig. 29), questo è in linea con il tipo di restauro effettuato. Infatti, con ACE ci si è occupati esclusivamente del restauro colore e, a parità di un precedente miglioramento dei difetti per mezzo di Phoenix, il video restaurato (B) evidenzia maggiormente l'effetto *flickering*, rendendo l'immagine meno nitida. Questa condizione è stata probabilmente interpretata dagli utenti come un difetto aumentato rispetto a quello del video originale (A). Anche in questo caso, come per "La lunga calza verde", il lavoro di restauro si è concentrato sui toni. L'85% degli utenti ha reputato che il video originale (A) fosse quello con i

toni più naturali (Fig. 30) e ha sostenuto che, immaginando una scena reale, essa sarebbe stata più simile a tale versione.

La maggior parte degli utenti non ha ritenuto che le due versioni fossero poco fluide (Fig. 31). È probabile che gli utenti abbiano fatto un confronto con il video precedentemente osservato (“*La lunga calza verde*”) e abbiano ritenuto più fluido il video “*Fiat*”. L’85% degli utenti ha percepito un’uguale fluidità nelle due versioni, mentre il 15% ha reputato più fluida la versione originale (A), probabilmente anche a causa della maggior nitidezza (Fig. 32).

Per quanto riguarda la leggibilità dei contenuti (Fig. 33), la quasi totalità degli utenti non ha avuto problemi a comprendere il contenuto delle due versioni. Solo il 5% degli utenti ha ritenuto faticosa la comprensione del video restaurato (B), commentando: “*B è poco dettagliato e troppo luminoso [...] non riesco a vedere i dettagli del viso dei personaggi*”.

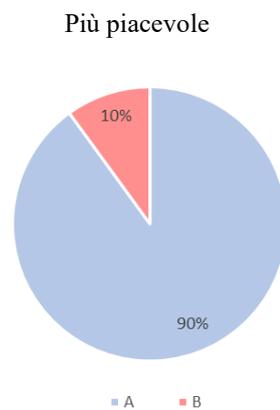


Fig.34

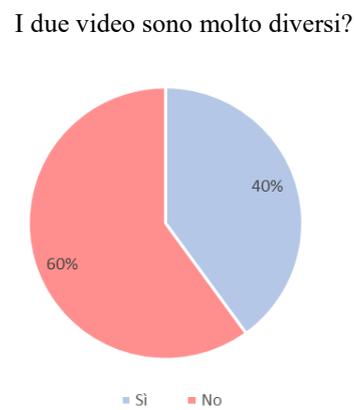


Fig.35

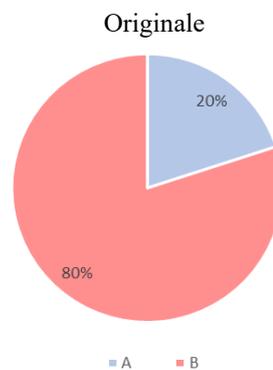


Fig.36

Il 90% degli utenti ha preferito la versione originale (A) (Fig. 34). Questa preferenza sembra dovuta alla maggiore nitidezza e alla minor luminosità. Tra i commenti: “B è troppo luminoso e poco dettagliato”, “A si vede meglio”, “B è troppo luminoso”. Tuttavia, il 60% degli utenti sostiene che le due versioni non siano molto diverse (Fig. 35). Anche in questo caso, come per “La lunga calza verde”, il termine “diversi” è stato interpretato soggettivamente da ogni osservatore. In ogni caso, il 40% degli utenti che reputa le due versioni molto diverse ha indicato la luminosità quale principale differenza (un utente commenta: “avrei trovato una via di mezzo tra A e B per la luminosità”, oppure: “le due versioni sono molto diverse per luminosità”).

È stato chiesto agli utenti quale, secondo loro, fosse la versione originale (Fig. 36). Le risposte a questa domanda sono strettamente legate alle risposte date alle domande 9 e 11. Gli utenti hanno reputato che la versione originale fosse quella, secondo loro, meno bella, ovvero quella che, in realtà, è stata restaurata (B).

Quale versione avrebbe migliorato?

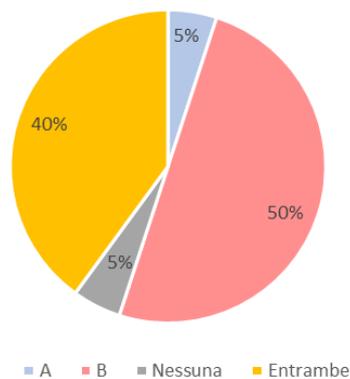


Fig.37

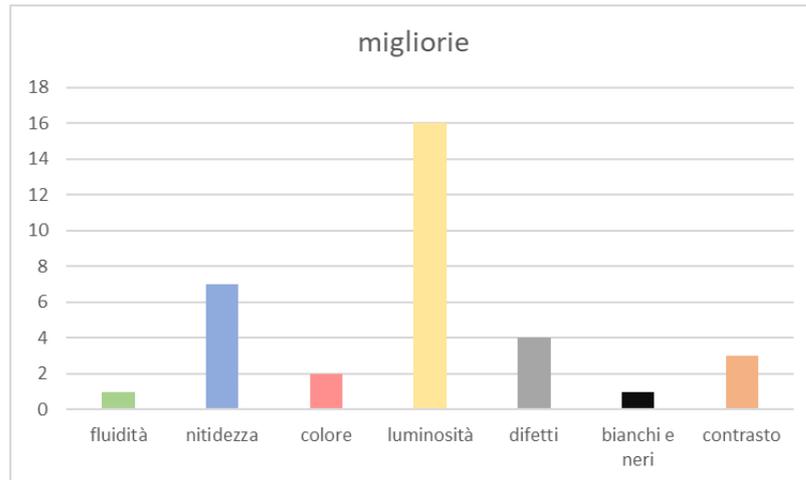


Fig.38

È stato interessante anche sapere quale versione avrebbero migliorato gli utenti (Fig. 37) e per quali metriche (Fig. 38). Il 50% avrebbe migliorato la versione meno piacevole (B), ma il 40% avrebbe migliorato entrambe le versioni (un utente commenta: “avrei migliorato entrambe le versioni schiarendo A e scurendo B”). Il parametro che più di tutti avrebbero migliorato gli utenti è la luminosità e, a seguire, la nitidezza.

Affaticamento/disturbo della vista

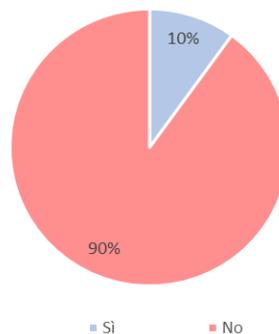


Fig.39

Solo il 10% ha riscontrato affaticamento nell’osservare il video (Fig. 39). Come “La lunga calza verde”, anche questo video è molto breve. Perciò quasi nessun utente ha risposto affermativamente alla domanda. Tra i commenti degli utenti che fanno parte del 10%: “B è poco dettagliato e troppo luminoso, con conseguente fastidio per la vista”. Al 100% degli utenti che ha risposto affermativamente alla domanda precedente, la versione restaurata (B) ha causato maggior fastidio.

4.4) Confronto tra i dati soggettivi e quelli restituiti dal software MRQA

Per mezzo del software MRQA sono state analizzate le stesse due versioni del video “La lunga calza verde” sottoposte agli utenti durante l’indagine soggettiva. Di seguito verranno riportati e confrontati alcuni dei risultati ottenuti rispettivamente dall’applicazione del software e dalle risposte fornite dai soggetti intervistati.

Gli attributi di qualità considerati significativi ai fini del confronto sono luminanza (fig. 40), nitidezza (fig. 41) e ΔE (fig. 42).

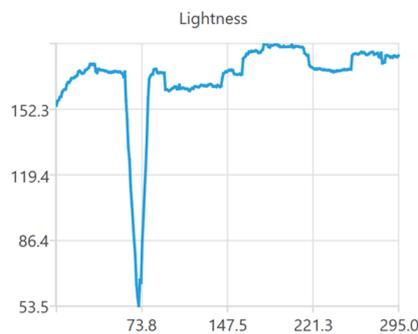


Fig. 40.a – originale

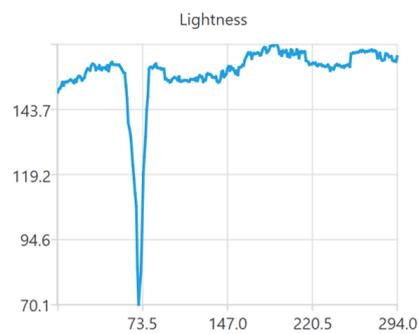


Fig. 40.b – restaurato

Il 90% degli utenti ha considerato la versione originale più luminosa. Effettivamente, anche il software MRQA ha restituito un valore assoluto più alto di luminosità, equivalente, circa, a 185,2 per la versione originale (fig. 40.a), che è leggermente inferiore rispetto al massimo valore di luminosità per la versione restaurata (circa 176,6) (fig. 40.b). La stessa cosa vale per il valore minimo, 53,5 per la versione originale (fig. 40.a) e 70,1 per quella restaurata (fig. 40.b). Purtroppo, le scale dei grafici restituiti dal software non sempre sono uguali e questo rende più difficile la loro lettura e il loro confronto.

Come specificato anche nel manuale d’uso del software, i due grafici evidenziano come, nella versione restaurata le variazioni di luminanza siano meno brutali e più concentrate su valori simili.

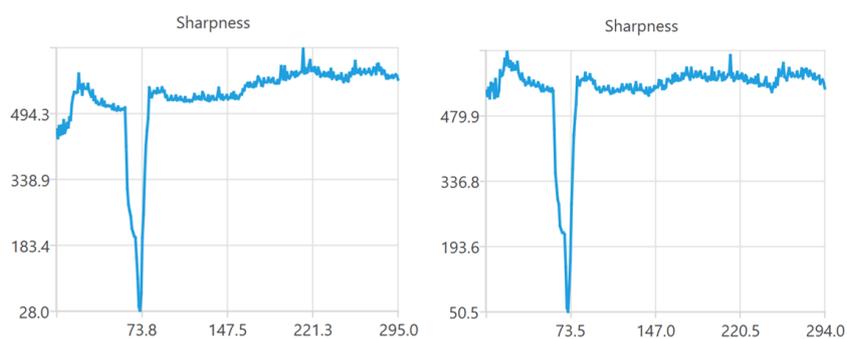


Fig. 41.a – originale

Fig. 41.b - restaurato

Nel caso della nitidezza, il 75% degli utenti ha dato una risposta conforme all’obiettivo del restauro, ovvero ha notato una maggior nitidezza nella versione restaurata. Analizzando i grafici restituiti dal software MRQA, come per la luminanza, il video originale (fig. 41.a) ha un più alto valore massimo (circa 649,7) rispetto a quello restaurato (circa 623,5) (fig.41.b) e un minor valore minimo (28,0) contro 50,5 del video restaurato. Questa differenza tra l’opinione degli utenti e i risultati oggettivi dipende da una serie di fattori. I valori ricavati dal software sono misurati per singoli frame e per mezzo di una formula specifica, mentre l’utente valuta il video nel suo complesso, soffermandosi sulle sequenze per lui più significative.

Anche in questo caso, come per la luminanza, il grafico della versione restaurata mostra valori leggermente più convergenti attorno ad un valore, diminuendo variazioni brutali.

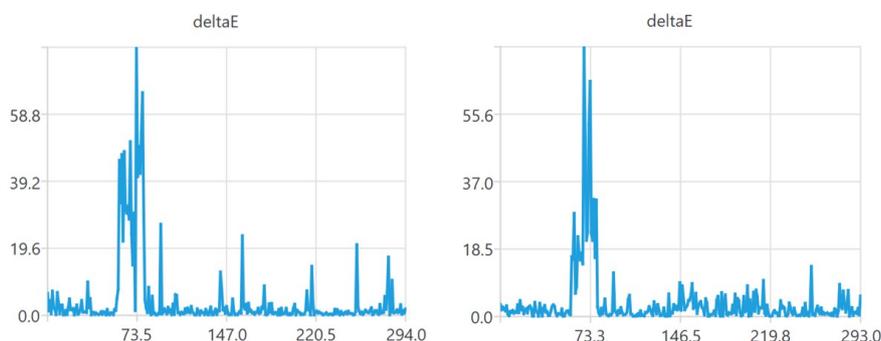


Fig. 42.a – originale

Fig. 42.b – restaurato

Per quanto riguarda le tonalità, è stato chiesto agli utenti di individuare quale fosse, per loro, la versione con i colori più naturali. Il 65% degli osservatori ha riscontrato tale caratteristica nel video restaurato. È evidente anche dai grafici in fig. 42 che la versione restaurata presenta picchi più attenuati e una maggior oscillazione attorno ad un valore. Questo spiega la percezione, da parte degli utenti, di colori più naturali nel video restaurato.

E' possibile concludere che il software MRQA può essere utile da un punto di vista tecnico, oggettivo e matematico, ma la percezione che un utente ha del medesimo video può differire dai risultati ottenuti.

Conclusioni

Come già specificato nel presente elaborato, i metodi oggettivi e soggettivi per la valutazione della qualità dell'immagine non sono necessariamente congruenti tra loro. Pertanto, l'obiettivo della ricerca sulla valutazione della qualità delle immagini consiste nel progettare algoritmi per la valutazione oggettiva che siano anche coerenti con le valutazioni soggettive.

È doveroso specificare che l'indagine soggettiva, da me effettuata, ha coinvolto utenti non esperti e si è concentrata su domande che richiedevano l'esternazione di preferenze puramente istintive. Il giudizio dei soggetti intervistati ha espresso quasi sempre una preferenza dettata dal proprio gusto estetico che, a sua volta, è influenzato dalla cultura sviluppata nel settore delle immagini e della loro manipolazione nell'epoca attuale, grazie anche alle nuove tecnologie. Quindi l'indagine ha confermato che spesso il giudizio soggettivo degli utenti non è conforme ai risultati ottenuti con l'applicazione delle metriche oggettive. Inoltre, alcuni deterioramenti causati dal tempo, come ad esempio la dominante cromatica rossa che è emersa nella versione "originale" del video "*La lunga calza verde*", hanno reso le immagini più sature e luminose. Questa caratteristica è stata percepita gradevole dalla maggioranza degli utenti, poiché maggiormente rispondente al gusto attuale.

Lo scopo dell'indagine soggettiva non è stato quindi quello di valutare quanto correttamente fosse stato effettuato il restauro, bensì di confrontare l'esito di quest'ultimo con i giudizi soggettivi di alcuni utenti inesperti. Le risposte degli intervistati alle domande specifiche sugli attributi di qualità più facilmente identificabili anche da non professionisti, come ad esempio nitidezza e naturalezza del colore, hanno confermato, per il video "*La lunga calza verde*", il raggiungimento degli obiettivi da parte dei software applicati in sede di restauro, che hanno tentato di tener conto dell'HVS. Per quanto riguarda il contrasto, la valutazione è stata più difficile poiché non tutti gli utenti conoscevano il significato tecnico dell'attributo. Ciononostante, le risposte in merito al gradimento generale dei video proposti hanno privilegiato quasi sempre la versione non restaurata. Il fatto che un algoritmo di restauro tenda a simulare l'HVS, ossia tenti di riprodurre le sensazioni visive dell'occhio umano, non comporta necessariamente che ciò determini anche una

preferenza di termini di gusto. Pertanto, se i restauratori dovessero tenere conto di tali preferenze, si rischierebbe in alcuni casi di confondere il restauro con la riedizione, ovvero il tentativo di rendere la nuova versione più gradevole agli utenti. Invece, nel caso specifico dell'indagine, gli intervistati hanno preliminarmente riferito cosa intendessero per "restauro cinematografico", identificando correttamente alcune delle finalità di questa tecnica nel ripristino delle funzionalità e dell'aspetto originario dell'opera. Questo significa che l'utente medio, se debitamente informato della principale finalità del restauro, ossia di conservazione del patrimonio culturale, potrebbe essere in grado di fornire un giudizio sulla copia restaurata più conforme ai criteri oggettivi, ovviamente in quei rari casi in cui si possa avere a disposizione per il confronto anche una versione pre-decadimento, a cui quella restaurata dovrebbe somigliare il più possibile, limitando l'indagine a tale scopo e senza indagare preferenze soggettive.

Viceversa, nelle operazioni di riedizione, volte principalmente alla fruibilità dell'opera da parte del pubblico, potrebbero essere applicate in prevalenza metriche soggettive, che maggiormente rispondono al gusto e alle preferenze dell'utente medio in una determinata epoca.

Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, desidero ringraziare le persone che mi hanno aiutato e supportato.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore Professor Alessandro Rizzi, che mi ha dato l'opportunità di svolgere il tirocinio e mi ha consigliato sulla scelta dell'argomento da trattare ai fini della stesura della tesi.

Grazie anche alla mia correlatrice Dottoressa Alice Plutino per i suoi preziosi consigli e per avermi seguito puntualmente in ogni fase di lavoro.

Ringrazio di cuore i miei genitori per avermi sempre sostenuto e per avermi permesso di portare a termine gli studi universitari.

Vorrei ringraziare anche i miei compagni di corso Martina, Federica, Evandro e Younes con i quali ho condiviso l'esperienza universitaria, sebbene spesso a distanza a causa della pandemia.

Infine, un grazie alla mia gatta Pimpa, sempre presente sulla tastiera del mio computer, e al mio cavallo The Little Bravy che mi ha insegnato a superare ogni ostacolo.

Bibliografia e sitografia

- [1] Francesca Sandri, *Uno, dieci, cento film da salvare* (1999)
- [2] Alice Plutino, *Tecniche di restauro cinematografico* (2020)
- [3] Dario Minutolo, *Cinema italiano: restauri e preservazioni (1945-1985)*
- [4] Alessandro Anibaldi, Alice Rispoli, Claudio Santancini, Stella Dagna, *Conversazione sul restauro* (2016)
- [5] Livia Marcellino, *Alcuni metodi numerici per il restauro automatico digitale di immagini* (2005)
- [6] Davide Pozzi, *Metodologia (del restauro cinematografico) e deontologia (dei restauratori)* (2017)
- [7] M. Chambah, *Digital film restoration and image quality* (2020)
- [8] Burningham Norman, Pizlo Zygmunt, Allebach Jan P., *Image Quality Metrics* (2002).
- [9] Wang Zhou, Bovik Alan C., “Prefazione”. *Valutazione moderna della qualità dell’immagine* (2006)
- [10] Sebastiano Battiato, *Metriche di Qualità per le Immagini Digitali* (2007-2008)
- [11] Laureando: Emanuele Giordano. Relatore: Prof. Michele Zorzi. Correlatore: Prof. Antonio Liotta, Tesi Magistrale in Ingegneria Informatica, *Metodo cognitivo no-reference per la stima della qualità dei video*. (2015)
- [12] Marius Pedersen, *Image quality metrics for the evaluation of printing workflows* (2011)
- [13] <http://scarlet.stanford.edu/~brian/scielab/introduction.html>
- [14] Giovanni Albani Lattanzi, *Guida alla nitidezza* (2010)
- [15] Luca Dondossola, *Vignettatura in fotografia: cos’è e come gestirla* (2020)
- [16] <http://www.culturweb.com/Bokeh/Aberrazione%20cromatica.html>
- [17] Silvia Zajac, *Effetto moiré: cos’è, come si verifica e come evitarlo?* (2020)
- [18] Muhammad Shahid, Andreas Rossholm, Benny Lövsström & Hans-Jürgen Zepernick, *Valutazione della qualità di immagini e video senza riferimento: una classificazione e una revisione degli approcci recenti* (2014)
- [19] Supervisor: Alice Plutino. Tutor: Alessandro Rizzi. Teacher: Philippe Meseure. Studente: Fabien Corso, Master 1 EUR – Internship, *Quality Assessment in Film Restoration* (2020-2021)
- [20] A. Plutino, *Searching a frame quality metric for movie restoration assessment* (2020)
- [21] B. Rita Barricelli, E. Casiraghi, M. Lecca, A. Plutino, A. Rizzi, *A cockpit of multiple measures for assessing film restoration quality* (2020)
- [22] Anna J. Berolo, Simone Brivio, Desirée Sabatini, Alessandro Rizzi, *Il restauro del colore de “La lunga calza verde”* (2012)
- [23] A. Rizzi, M. Chambah, *Perceptual Color Film Restoration* (2010)

[24] Docente: Prof. Alessandro Rizzi, Progetto di: Serena Bellotti, Francesca Facchinetti, *Restauro cinematografico di un cortometraggio* (2017)

[25] Alessandro Rizzi, Anna Jerry Berolo, Cristian Bonanomi, Davide Gadia, *Unsupervised digital movie restoration with spatial models of color* (2016)