UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ANDRÉ LUIS MARTINS

Desentrelaçamento de vídeo com suporte de um
detector de efeito *feathering* e de um índice de
concentração de artefatos

São Carlos

2018

ANDRÉ LUIS MARTINS

Desentrelaçamento de vídeo com suporte de um detector de efeito *feathering* e de um índice de concentração de artefatos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Instrumentação

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Linhari Rodrigues

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

MARTINS, ANDRÉ LUIS
Desentrelaçamento de vídeo com suporte de um
MM379d detector de efeito feathering e de um índice de
d concentração de artefatos / ANDRÉ LUIS MARTINS;
orientador EVANDRO LUIS LINHARI RODRIGUES. São Carlos,
2018.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2018.

1. Desentrelaçamento de vídeo. 2. Efeito
Feathering. 3. Efeito Pente. 4. Qualidade de imagem. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ LUÍS MARTINS.**

Título da tese: "Desentrelaçamento de vídeo com suporte de um detector de efeito *feathering* e de um índice de concentração de artefatos".

Data da defesa: 23/02/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Evandro Luis Linhari Rodrigues**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Adilson Gonzaga**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **João do Espírito Santo Batista Neto**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcelo Andrade da Costa Vieira**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Aparecido Nilceu Marana**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Dedico este trabalho à querida e saudosa “vó” Joana.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Cátia, pela compreensão nos momentos que deixamos de ficar juntos para que eu pudesse me dedicar às atividades do doutorado.

Ao prof. Dr. Evandro, grande amigo, cujo apoio foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao meu filho João Pedro, pela revisão final do texto desta tese.

À minha filha Bruna, por seu espírito questionador.

*"Live as if you were to die tomorrow.
Learn as if you were to live forever."*

Mahatma Gandhi

RESUMO

Martins, L. A. **Desentrelaçamento de vídeo com suporte de um detector de efeito *feathering* e de um índice de concentração de artefatos**. 2018. 132p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Este trabalho apresenta uma nova solução para conversão de campos de vídeo entrelaçado em quadros progressivos, processo conhecido como desentrelaçamento. Os algoritmos de desentrelaçamento “estado da arte”, na tentativa de evitar a geração de artefatos de vídeo do tipo “efeito *feathering*”, tendem a gerar borramento e degradar a qualidade da imagem. O objetivo é melhorar a qualidade dos quadros produzidos pelo processo de desentrelaçamento pela combinação de dois processos já existentes, sendo um deles do tipo intracampo e outro do tipo intercampos. A estratégia proposta se baseia na identificação de artefatos gerados por um processo de desentrelaçamento intercampos, com suporte de um detector de artefatos do tipo “efeito *feathering*” e da análise dos dados gerados por este detector utilizando um “índice de aglomeração de artefatos”, que neste trabalho foi denominado *Spot Index*. As regiões afetadas pelo efeito *feathering* são identificadas e substituídas pelas regiões equivalentes extraídas de um quadro gerado por um método intracampo, normalmente pouco afetado por *feathering*. Os testes demonstraram que a estratégia proposta é capaz de produzir quadros desentrelaçados com maior qualidade visual do que a obtida com um único tipo de método aplicado de modo global, pois é capaz de explorar, extrair e combinar as qualidades de cada método. Uma avaliação estatística de hipóteses demonstrou que a estratégia proposta traz vantagens consideráveis em relação às técnicas aplicadas de modo global.

Palavras-chave: Desentrelaçamento. Efeito *feathering*. Efeito pente. Qualidade de imagem.

ABSTRACT

Martins, L. A. **Video de-interlacing with support from a feathering effect detector and an artifact concentration index.** 2018. 132p. Thesis (Doctor's degree) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

This work presents a new solution for converting interlaced video fields into progressive frames, a process known as video deinterlacing. Current state-of-the-art de-interlacing algorithms, in an attempt to avoid the generation of feathering effect video artifacts, tend to generate blurring and degrade image quality. The objective is to improve the quality of the frames produced by the de-interlacing process by combining two existing processes, one of them being intra-field and the other an inter-field type. The proposed strategy is based on the identification of artifacts generated by an inter-field deinterlacing process, supported by a "feathering effect" artifact detector and the analysis of the data generated by this detector using an "agglomeration index of artifacts", which in this work was called "Spot Index". The regions affected by the feathering effect are identified and replaced by the equivalent regions extracted from a frame produced by an intra-field process known as "Edge-based Line Averaging" (ELA). Tests have demonstrated that the proposed strategy is able to produce deinterlaced frames with higher quality than the one obtained with a single type of method applied in a global way, because it is able to explore, extract and combine the qualities of each method. A statistical evaluation of hypotheses has shown that the proposed strategy brings considerable advantages over globally applied deinterlacing techniques.

Keywords: De-interlacing. Feathering Effect. Comb Effect. Image Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Quadro gerado a partir do arquivo de vídeo “viptrain.avi” (360x240), que apresenta efeito <i>feathering</i> nas regiões com presença de movimento na cena.	30
Figura 2: Como um campo ímpar e um campo par são produzidos a partir de dois quadros distintos, gerando um quadro entrelaçado.	32
Figura 3: Composição da imagem em uma tela tipo CRT.	33
Figura 4: Efeitos do desentrelaçamento por simples reordenação das linhas.	40
Figura 5: Distorção da imagem quando é realizada a simples reordenação de linhas.	41
Figura 6: O processo de desentrelaçamento duplica o número de linhas.	42
Figura 7: Método de desentrelaçamento pela média intercampos.	44
Figura 8: Direções de interpolação possíveis no método ELA.	45
Figura 9: Método de desentrelaçamento “Improved-ELA” (I-ELA).	46
Figura 10: Inclinação dos eixos de interpolação e tempo.	48
Figura 11: Método da mediana intercampos com compensação de movimento.	50
Figura 12: Perfis dinâmicos de PSNR e de MSSIM do quadro ELA e quadro média intercampos para o arquivo de vídeo “viplane.avi”.	57
Figura 13: Quadro da média intercampos (a) possui maior qualidade visual do que o quadro produzido pelo método ELA (b). Os valores de PSNR e MSSIM são consistentes com a qualidade visual percebida.	59
Figura 14: Um quadro com efeito <i>feathering</i> gerado pela média intercampos (a) e o mesmo quadro gerado pelo método ELA (b). Os valores de PSNR e MSSIM são inconsistentes com a qualidade visual percebida.	60
Figura 15: Uma região de um quadro com um objeto em movimento, o cálculo da diferença entre as linhas, a soma simples e a soma de valores absolutos.	66
Figura 16: O <i>Spot Index</i> indica o nível de aglomeração sobre o mapa de efeito <i>feathering</i> .	71
Figura 17: Diagrama apresentando a estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta.	74
Figura 18: Quadros gerados sinteticamente (500x400) com objetos de diferentes tamanhos, formas e níveis de contraste com o plano de fundo.	75
Figura 19: Quadro diferença calculado para identificar objetos em movimento.	76
Figura 20: Campos sintéticos ímpar (n) e par (n+1).	76

Figura 21: Quadro sintético desentrelaçado pelo método “Bob” .	77
Figura 22: Um quadro sintético (720x480) para testes; o mesmo objeto com diferentes tamanhos e diferentes contrastes com o plano de fundo.	78
Figura 23: Geração de um quadro pela média intercampos a partir de quadros de um arquivo de vídeo progressivo “foreman.avi” .	82
Figura 24: Teste unilateral à esquerda	84
Figura 25: Quadro sintético desentrelaçado usando o método “Bob” e o mapa gerado pelo algoritmo de detecção de efeito <i>feathering</i> .	87
Figura 26: Um quadro sintético com um simples objeto se movendo com deslocamentos diversos e seu respectivo mapa gerado pelo detector de efeito <i>feathering</i> . O valor em cada objeto indica o número de pixels do deslocamento entre o campo ímpar e o campo par.	88
Figura 27: Gráfico 3D mostrando o valor eficaz acumulado.	89
Figura 28: Gráfico 3D mostrando o valor médio acumulado e sua natureza periódica.	89
Figura 29: Mapas de efeito <i>feathering</i> para objetos em movimento com diferentes tamanhos e diferentes contrastes, e deslocamento de 1, 2, 3 e 4 pixels para a direita.	90
Figura 30: Quadro sintético com resolução HD (1280x720) e seu respectivo mapa de efeito <i>feathering</i> .	91
Figura 31: Quadro sintético entrelaçado com resolução Full HD (1920x1080) e seu respectivo mapa de efeito <i>feathering</i> .	92
Figura 32: Quadro sintético (720x480) com um objeto em diferentes condições de contraste e diferentes deslocamentos de cima para baixo e seu respectivo mapa de efeito <i>feathering</i> .	93
Figura 33: Quadro sintético (500x400) com o mesmo objeto em movimento na diagonal com diferentes deslocamentos e diferentes níveis de contrastes com o plano de fundo.	93
Figura 34: Curva ROC obtido com o detector proposto.	95
Figura 35: Curva Recall x Precision do detector proposto.	95
Figura 36: Um quadro do arquivo de vídeo “viplane.avi” (168x360) com alto nível de artefatos (a), o respectivo mapa de efeito <i>feathering</i> (b) e seu mapa SSIM (c).	97

Figura 37: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM dos quadros ELA, média intercampos e da estratégia DSMQ proposta para o arquivo de vídeo “viplane.avi” .	101
Figura 38: Um quadro do arquivo de vídeo “suzie.avi” processado por diversos métodos de desentrelaçamento; média intercampos (a), mapa <i>feathering</i> (b), quadro ELA (c) e pela estratégia DSMQ proposta (d).	102
Figura 39: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo “suzie.avi” .	103
Figura 40: Um quadro do arquivo de vídeo “traffic.avi” processado por diversos métodos de desentrelaçamento; média intercampos (a), mapa <i>feathering</i> (b), quadro ELA (c) e quadro DSMQ (d).	104
Figura 41: Perfis dinâmicos do PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo “silent.avi” .	105
Figura 42: Um quadro da média intercampos (a) e seu respectivo mapa <i>feathering</i> (b); quadro ELA (c) e quadro híbrido (d).	106
Figura 43: Um quadro exemplo do vídeo “miss_am.avi” em que o quadro da média apresenta melhor qualidade visual; o quadro ELA apresenta forte borramento.	107
Figura 44: Evolução do PSNR e MSSIM quadro a quadro para o vídeo “miss_am.avi” .	108
Figura 45: Um quadro do arquivo de vídeo “flame.avi” (320x240) processado por diversos métodos de desentrelaçamento; quadro original (a), quadro da média intercampos (b), mapa <i>feathering</i> (c) e quadro ELA (d).	109
Figura 46: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo “flame.avi” .	110
Figura 47: Situação em que o quadro da média intercampos apresenta PSNR alto, mas também alto nível de <i>feathering</i> .	111

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CRT – *Catode Ray Tube* - Tubo de raios catódicos

DSMQ – Desentrelaçamento pela Seleção do Melhor Quadro

ELA – *Edge-based Line Averaging* – Média de linhas orientada a bordas

FN – *False Negative* – Falso negativo

FP – *False Positive* – Falso positivo

FNR – *False Negative rate* - Razão de falsos negativos

FPGA – *Field-Programmable Gate Array*

FPR – *False Positive Rate* - Razão de falsos positivos

GPU – *Graphics Processing Unit* – Unidade de Processamento Gráfico

HD – *High Definition* – alta definição

MSE – *Mean Squared Error* – Erro quadrático médio

MSSIM – *Mean Structural Similarity Index* – Índice de similaridade estrutural médio

PSNR – *Peak Signal-to-Noise Ratio* – Pico da relação sinal-ruído

RGB – *Red, Green, Blue* – Vermelho, verde e azul

SSIM – *Structural Similarity Index* – Índice de similaridade estrutural

TN – *True Negative* – Verdadeiro negativo

TP – *True Positive* – Verdadeiro positivo

TNR – *True Negative Rate* - Razão de verdadeiros negativos

TPR – *True Positive Rate* – Razão de verdadeiros positivos

UHD – *Ultra High Definition* – Ultra-alta definição

LISTA DE SÍMBOLOS

n : número do campo de vídeo atual a ser processado.

$\vec{x}$: Coordenadas genéricas de um pixel de uma imagem.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	29
1.1	<i>Considerações iniciais</i>	29
1.2	<i>Formatos de transmissão do sinal de TV digital</i>	30
1.2.1	<i>O padrão de varredura entrelaçada</i>	31
1.2.2	<i>O padrão de varredura progressiva</i>	34
1.3	<i>Por que é necessário realizar o desentrelaçamento.....</i>	34
1.4	<i>Objetivo e justificativas do trabalho</i>	35
1.5	<i>Motivação e relevância do trabalho.....</i>	36
1.6	<i>Contribuições científicas</i>	36
1.7	<i>Organização do texto.....</i>	37
2.	EMBASAMENTO TEÓRICO	39
2.1	<i>O entrelaçamento e seus efeitos.....</i>	39
2.2	<i>Redução da largura de banda de transmissão.....</i>	41
2.3	<i>O processo de desentrelaçamento</i>	42
2.4	<i>Classificação das técnicas de desentrelaçamento</i>	43
2.4.1	<i>Técnicas espaço-temporais</i>	43
•	<i>Desentrelaçamento por repetição de linhas</i>	43
•	<i>Desentrelaçamento pela média intracampo (média espacial)</i>	44
•	<i>Desentrelaçamento pela média intercampos (média temporal).....</i>	44
•	<i>Métodos orientados a bordas.....</i>	44
2.4.2	<i>Técnicas de matching</i>	46
•	<i>Desentrelaçamento por estimação de movimento.....</i>	47
•	<i>Algoritmos “Motion Adaptive”</i>	47
•	<i>Compensação de movimento.....</i>	48
2.4.3	<i>Técnicas baseadas em Transformada de Fourier</i>	51

2.5	<i>Métodos intracampo e métodos intercampos</i>	51
2.6	<i>O estado-da-arte em algoritmos de desentrelaçamento</i>	52
2.7	<i>Métricas de avaliação de qualidade de imagem</i>	54
2.7.1	<i>Determinação do PSNR</i>	54
2.7.2	<i>Determinação do MSSIM</i>	55
2.8	<i>Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM.....</i>	56
2.9	<i>Compatibilidade do PSNR e MSSIM com a qualidade visual percebida em quadros desentrelaçados</i>	58
3.	PROPOSTA DE ESTRATÉGIA PARA DESENTRELAÇAMENTO.....	63
3.1	<i>Detalhes da estratégia proposta.....</i>	63
3.1.1	<i>Passo 1: Gerar quadros desentrelaçados</i>	64
3.1.2	<i>Passo 2: Identificar artefatos usando o Detector de Efeito Feathering</i>	65
3.1.2.1	<i>Caracterização do efeito feathering</i>	65
3.1.2.2	<i>Detectar o efeito feathering</i>	67
3.1.3	<i>Passo 3: Analisar e medir a distribuição de efeito feathering globalmente usando o "Spot Index"</i>	69
3.1.4	<i>Passo 4: Decidir sobre qual o melhor tipo de quadro a ser utilizado..</i>	71
3.1.5	<i>Passo 5: Analisar e medir a distribuição de efeito feathering localmente</i>	72
3.2	<i>Avaliação de desempenho do algoritmo de detecção de efeito feathering proposto</i>	73
3.3	<i>Avaliação de desempenho da estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta</i>	81
3.4	<i>Análise estatística</i>	83
3.4.1	<i>Teste "D" da normalidade</i>	83
3.4.2	<i>Teste de hipótese estatística</i>	83
4.	RESULTADOS	87
4.1	<i>Algoritmo de detecção do efeito feathering</i>	87
4.1.1	<i>Avaliação numérica do detector proposto.....</i>	94

4.1.2	<i>Comparação do mapa de efeito feathering proposto com o mapa SSIM</i>	96
4.2	<i>Estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta</i>	98
4.2.1	<i>Determinação dos limiares de Spot Index</i>	98
4.2.2	<i>Testes combinando quadros da média intercampos com quadros ELA</i>	98
4.2.3	<i>Testes combinando quadros da média intercampos com quadros “Improved-ELA”</i>	111
4.2.4	<i>Análise estatística dos resultados</i>	115
4.2.5	<i>Avaliação do esforço computacional</i>	117
5.	CONCLUSÕES	119
5.1	<i>Detector de efeito feathering</i>	119
5.2	<i>Estratégia de desentrelaçamento DSMQ</i>	120
5.3	<i>Esforço computacional dos algoritmos</i>	121
5.4	<i>Trabalhos futuros</i>	121
5.5	<i>Contribuições</i>	122
5.6	<i>Publicações</i>	122

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma introdução sobre o processo de transmissão de TV (restrito aos padrões de sequência de envio das linhas), do processo de conversão dos campos entrelaçados para quadros progressivos (desentrelaçamento), a proposta de um novo método para correção de determinados artefatos de vídeo gerados pelo processo de desentrelaçamento e as contribuições científicas do trabalho proposto.

1.1 Considerações iniciais

A implantação do sistema de transmissão digital de TV proporcionou à população em geral benefícios inegáveis em termos de qualidade de imagem. No entanto, devido a certas características inerentes à tecnologia, o processo de transmissão e recepção de TV digital pode produzir distorções na imagem apresentada ao espectador. Tais distorções são conhecidas genericamente como “artefatos de vídeo”. Um determinado tipo específico de artefato de vídeo é tratado neste trabalho, que foi denominado por diversos autores como “*feathering effect*”. O termo “*feathering effect*” foi usado e descrito por Chang et al. (2005), Jeon et. al (2007), Fan et al. (2009) e Sreekanth et al. (2011). Neste trabalho, o “*feathering effect*” será referenciado como “efeito *feathering*”.

Como ilustração, a Figura 1 apresenta um quadro de vídeo com a presença do efeito *feathering* em certas regiões da imagem. O quadro apresentado tem resolução de 360x240 pixels e pertence ao arquivo de vídeo “viptrain.avi”, que é nativo da plataforma Matlab, da empresa Mathworks (2016). Observa-se na imagem o aparecimento de efeitos de “serrilhamento” nas regiões com presença de movimento na cena, que caracterizam o efeito *feathering*. Também é possível notar que o mesmo efeito não ocorre em regiões da imagem sem presença de movimento. O termo “*feathering*” remete à semelhança do artefato com uma pena de pássaro.

Figura 1: Quadro gerado a partir do arquivo de vídeo “viptrain.avi” (360x240), que apresenta efeito *feathering* nas regiões com presença de movimento na cena.

Fonte: Arquivos de vídeo nativo da plataforma MatLab, processado pelo autor.

Para identificar as causas do aparecimento do efeito *feathering* é necessário compreender alguns detalhes dos formatos de transmissão do sinal de TV, descritos na próxima seção.

1.2 Formatos de transmissão do sinal de TV digital

Conforme Alencar (2012), as imagens geradas pelas emissoras de TV devem ser transmitidas de acordo com determinados padrões definidos em norma. Tais normas são estabelecidas por órgãos governamentais que regulam os meios de comunicação. No Brasil, este órgão é a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL (2017).

De acordo com a ANATEL, a norma ABNT NBR 15604 (2008) estabelece os padrões do sistema de transmissão de televisão digital terrestre; com relação à sequência de transmissão das informações das linhas da imagem, a norma prevê duas formas básicas: o padrão entrelaçado e o padrão progressivo, conforme mostrado no Quadro I. A letra “i” nos formatos de vídeo de saída “525i” e “1125i” indica o padrão de varredura entrelaçada, enquanto a letra “p” nos formatos “525p” e “750p” indica o padrão de varredura progressiva.

Quadro I: Resoluções e formatos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15604

Formato de vídeo de saída	Razão de aspecto	Número de linhas a ser decodificadas	aspect ratio info	Formato de vídeo de saída	Razão de aspecto	Número de linhas a ser decodificadas	aspect ratio idc
SQVGA	4:3	160 x 120	1	525i	4:3	720 x 480	3
SQVGA	16:9	160 x 90	1	525i	16:9	720 x 480	5
QVGA	4:3	320 x 240	1	525p	16:9	720 x 480	5
QVGA	16:9	320 x 180	1	750p	16:9	1280 x 720	1
CIF	4:3	352 x 288	2	1125i	16:9	1920 x 1080	1

Fonte: Norma ABNT NBR 15604

A seguir, o padrão de varredura entrelaçada e o padrão de varredura progressiva são descritos em maiores detalhes.

1.2.1 O padrão de varredura entrelaçada

O padrão de varredura entrelaçada foi criado nos Estados Unidos por Randall C. Ballard, engenheiro da RCA Corp. (1932). Neste tipo de varredura, desenvolvida para as telas do tipo Tubo de Raios Catódicos (CRT – *Cathode Ray Tube*), cada quadro (*frame*) de vídeo é dividido em dois conjuntos distintos de linhas, chamados “campos” (*fields*). As linhas ímpares de um quadro são reunidas em um campo denominado “campo ímpar”, e as linhas pares são reunidas em outro campo, por sua vez denominado “campo par”, conforme apresentado na Figura 2.

Para reproduzir a imagem, os aparelhos de TV com tela tipo CRT apresentam os campos de varredura entrelaçada na sequência em que são transmitidos, ou seja, as linhas do campo ímpar seguidas pelas linhas do campo par. O traçado de cada linha é feito por um feixe de elétrons que se movimenta de modo controlado. A varredura se inicia no canto superior esquerdo da tela, pela primeira linha do campo ímpar; o feixe é movimentado no sentido da esquerda para a direita da tela com uma ligeira inclinação, e ao chegar do lado direito, o controle do canhão de elétrons desliga o feixe e retorna para o lado esquerdo, para então iniciar o traçado da próxima linha do campo. Ao final da apresentação da última linha do campo ímpar, o canhão de elétrons é desligado e retorna para a parte superior da tela para então iniciar a

apresentação do campo par a partir da segunda linha da tela, de modo que as linhas do campo ímpar e do campo par sejam apresentadas de modo intercalado.

Figura 2: Como um campo ímpar e um campo par são produzidos a partir de dois quadros distintos, gerando um quadro entrelaçado.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

De acordo com O'Neal (2008), as origens históricas do conceito de entrelaçamento de vídeo são atribuídas ao engenheiro Ulises Armand Sanabria, um dos pioneiros na transmissão de sinais de televisão comercial na primeira metade do século 20 nos Estados Unidos da América.

Conforme descrito por Megrich (2009) e Ross (2007), o sistema de televisão em cores analógico adotado no Brasil é o PAL-M, sendo que a sigla PAL (*Phase Alternate Lines*) é o sistema de codificação do sinal de cor, e a letra "M" indica o padrão de formação de imagem. No padrão "M", a imagem é formada por 525 linhas, e considera varredura com 60 campos por segundo (30 pares de campos entrelaçados). Os dois conjuntos de campos têm de trabalhar juntos para criar um quadro completo a cada 1/30 de segundo, resultando em uma taxa de exposição de 30 quadros por segundo.

Conforme Ross (2007), no caso da TV colorida analógica, existem três canhões de elétrons, sendo um para cada componente do espaço de cor RGB. A Figura 3 representa como o padrão de varredura entrelaçada faz a composição da imagem em uma tela tipo CRT.

Figura 3: Composição da imagem em uma tela tipo CRT.

Fonte: www.melhortvld.com.br (2017).

De acordo com Bellers e Haan (1996), este padrão de varredura foi criado para minimizar problemas de desconforto visual causados por cintilação da imagem (que se tornou mais intensa com o advento de aparelhos CRT de alto brilho) sem que fosse necessário aumentar a banda de transmissão. A solução trouxe melhorias de qualidade de imagem importantes à época de sua invenção.

Anteriormente à adoção do padrão entrelaçado, as imagens eram transmitidas no padrão progressivo, o que produzia uma sensação de cintilação causada pela diferença de brilho entre a região superior e a inferior da tela. Esta diferença de brilho é causada pelo desvanescimento da energia do choque do feixe de elétrons com a camada de material fosforescente da parede interna do CRT em linhas da região superior já traçadas, enquanto as linhas da região inferior ainda estão sendo traçadas.

O brilho do material fosforescente dos monitores CRT, em combinação com a persistência da visão, resulta em dois campos sendo percebidos como uma imagem contínua. Esta técnica permite a visualização completa de detalhes horizontais com

metade da largura de banda que seria necessária para uma varredura progressiva completa, mantendo a taxa de atualização para evitar a cintilação.

1.2.2 O padrão de varredura progressiva

No padrão de varredura progressiva, que é o utilizado pelas modernas telas “não-CRT”, ou seja, com tecnologias de plasma, *Liquid Crystal Display* (LCD) e *Light Emitting Diode* (LED), as linhas de cada quadro de vídeo são apresentadas em sua sequência numérica natural, iniciando pela linha superior e finalizando na linha inferior. Isto se deve a detalhes inerentes à tecnologia destes tipos de tela. Apesar disso, conforme a norma ABNT NBR 15604 (2008), por questões de compatibilidade com o parque instalado de aparelhos de TV do tipo CRT e para reduzir a banda de transmissão, as emissoras de TV digital devem transmitir, além do padrão progressivo, sinal de vídeo com varredura por campos entrelaçados para determinadas resoluções de imagem.

1.3 Por que é necessário realizar o desentrelaçamento

Conforme mostrado no Quadro I, mesmo para o formato de transmissão de sinal de vídeo padrão “1125i”, com resolução conhecida como “*Full-HD*” (1920x1080 pixels, razão de aspecto 16:9), a norma ABNT NBR 15604 em seu item 8.1.4.1 contempla como obrigatória apenas a varredura em campos entrelaçados. Outro formato obrigatório para TV digital, também mostrado no Quadro I, é o padrão “525i” (720x480 pixels, razões de aspecto 4:3 e 16:9). Deste modo, é necessário que os próprios aparelhos de TV do tipo “não-CRT” realizem o processo de conversão do sinal de vídeo entrelaçado para progressivo (ou dispositivos externos, como a *set-top box*).

O que ocorre na realidade é que o campo ímpar e o campo par gerados pelas emissoras de TV não fazem parte da mesma imagem, uma vez que são produzidos a partir de quadros diferentes, tomados em intervalos de tempo distintos.

Assim, a redução de largura de banda produzida pelo padrão entrelaçado é devida à eliminação de metade das linhas de cada quadro original. Quando se trata de apresentar a imagem em telas “não-CRT”, o preço a ser pago pela redução da banda de transmissão é a necessidade de estimar as linhas faltantes. Este é o principal papel dos processos de desentrelaçamento.

1.4 Objetivo e justificativas do trabalho

De acordo com Bellers e Haan (1996), o desentrelaçamento reconstrói a metade das linhas da imagem, que foram eliminadas no processo de geração pelas transmissoras de TV; portanto, não se resume simplesmente em reorganizar a sequência das linhas antes de apresentá-las na tela. Este método, embora simples, gera distorções na imagem. Grande parte das distorções geradas pelo processo de desentrelaçamento por simples reordenação acontece nas regiões da imagem onde existem objetos se movimentando na cena. Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos na tentativa de corrigir estas distorções, como os propostos por Jeong (2014), mas ainda há muito a ser explorado.

Durante o processo de desentrelaçamento, é necessário aplicar técnicas para estimar as linhas inexistentes nos campos da varredura entrelaçada. É uma tentativa de reconstruir detalhes da imagem que não foram transmitidos, não só pela limitação da banda, mas em muitos casos sequer foram capturados pela câmera. Segundo Bellers e Haan (2000), o processo de desentrelaçamento duplica a densidade vertical de amostragem.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma nova proposta de melhoria dos processos de desentrelaçamento de vídeo, por meio da identificação de um tipo específico de defeito nas imagens transmitidas no padrão entrelaçado pelas emissoras de TV. Estas falhas na imagem surgem pelo fato de que os dois campos entrelaçados foram adquiridos pela câmera em instantes diferentes. A sequência das linhas do quadro progressivo (gerado por simples reordenação das linhas dos campos entrelaçados) não corresponde à ordem temporal em que elas foram capturadas pela câmera.

A hipótese fundamental que rege este trabalho é que é possível melhorar a qualidade de imagem de vídeo desentrelaçado, pela identificação do “efeito *feathering*” e correção regional pela combinação de diferentes processos de desentrelaçamento.

1.5 Motivação e relevância do trabalho

A motivação e a relevância deste trabalho tornam-se claras quando se identifica o papel dos sistemas de desentrelaçamento dentro de diversas tecnologias de dispositivos de visualização. Apesar da alta capacidade de processamento embarcado nos aparelhos de TV, o nível de artefatos de vídeo perceptíveis que são gerados pelo processo de desentrelaçamento ainda é alto. É muito comum que sejam observadas imperfeições na imagem causadas por desempenho inadequado dos métodos de desentrelaçamento; tais artefatos são responsáveis por causar desconforto visual, cuja redução traz grande benefício ao espectador.

1.6 Contribuições científicas

As principais contribuições científicas deste trabalho são:

- Um método para identificar as regiões da imagem afetadas pelo efeito *feathering*;
- Uma métrica de avaliação de qualidade de imagem sem referência com base em um “índice de aglomeração de artefatos”;
- Uma estratégia de desentrelaçamento de vídeo com critérios objetivos para decidir quando a correção do efeito *feathering* traz melhorias de qualidade visual percebida para o quadro desentrelaçado;

1.7 Organização do texto

O texto desta tese está organizado em cinco capítulos, sendo que o primeiro deles é composto por esta introdução. O segundo capítulo apresenta a teoria básica dos processos de desentrelaçamento de vídeo, além das métricas utilizadas para avaliação de qualidade de imagem e o estado da arte dos algoritmos de desentrelaçamento. O terceiro capítulo discorre sobre os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento das melhorias propostas. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos testes em aplicação efetiva. O quinto capítulo discute sobre as conclusões, complementando o trabalho.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo apresentam-se a teoria básica sobre o entrelaçamento e o desentrelaçamento de vídeo, as formas de classificação dos métodos de desentrelaçamento e as métricas de qualidade de imagem adotadas neste trabalho.

2.1 O entrelaçamento e seus efeitos

A evolução das tecnologias dos dispositivos de visualização não seguiu a direção do padrão entrelaçado, mas sim do padrão de varredura não-entrelaçada, ou varredura progressiva. A largura de banda necessária para transmissão de imagens para estas telas é significativamente maior do que para as telas entrelaçadas, pois o número de linhas verticais é maior, se for mantida a frequência de atualização.

Quando se imagina um método simples para montar um quadro progressivo a partir de campos entrelaçados, a solução mais elementar e direta é realizar a reordenação das linhas; as linhas do campo ímpar (1, 3, 5,...) são intercaladas com as linhas do campo par (2, 4, 6,...), formando um quadro progressivo completo (com as linhas na sequência numérica 1, 2, 3, 4, 5, 6,...). No entanto, se o quadro montado desta maneira for apresentado numa tela de TV de plasma, LCD ou LED, surgem artefatos de vídeo nas regiões em que existe algum tipo de movimento de um campo para outro.

O processo de desentrelaçamento por simples reordenação de linhas é conhecido sob os nomes "Bob" e "Weave", conforme descrito pela Microsoft Corp. (1987). O resultado da simples reordenação de linhas pode ser observado na Figura 4, onde na primeira linha estão os campos de 0 a 9, e na segunda linha estão os quadros montados a partir da composição de campo ímpar e campo par. É possível observar as distorções geradas na imagem devido ao deslocamento do objeto e também devido às variações de cor de um campo para outro.

Figura 4: Efeitos do desentrelaçamento por simples reordenação das linhas.

Fonte: <http://www.lurkertech.com> (2017).

Outro exemplo para ilustrar a geração de artefatos pelo desentrelaçamento por reordenação de linhas está mostrado na Figura 5. A imagem da roda do automóvel em movimento torna-se completamente distorcida. Cada campo é capturado pela câmera com uma diferença de 1/60 de segundo entre eles. As linhas são separadas e organizadas em dois conjuntos distintos, cada um com metade da informação de cada quadro. Se o quadro for congelado ou a velocidade do vídeo for diminuída, percebe-se mais claramente o serrilhamento da imagem formada pela combinação dos dois campos diferentes. Somente monitores CRT conseguem reproduzir corretamente quadros gerados por vídeos entrelaçados.

Existe, portanto, uma incompatibilidade temporal, e se houver movimento de objetos (ou movimento global devido à movimentação da câmera) entre os instantes de aquisição dos dois campos, a reorganização das linhas gera um efeito de dupla imagem, ou “serrilhamento” de partes de objetos ou pessoas que se movem de um campo para outro. Este efeito se acentua quando a velocidade dos objetos aumenta, e é pouco perceptível em telas do tipo CRT, pelo efeito de espalhamento do feixe de elétrons ao se chocar com o material fosforescente da tela. Também é pouco perceptível pelo fato da resolução limitada do CRT não permitir uma comparação direta de qualidade de imagem em todas as resoluções disponíveis nas outras tecnologias mais modernas.

Para o olho humano, o efeito *feathering* produz a sensação de duas imagens sobrepostas; a forma das bordas dos objetos lembram uma pena de pássaro, ou ainda a forma dos dentes de um pente.

Figura 5: Distorção da imagem quando é realizada a simples reordenação de linhas.

Fonte: <http://www.olharmultimidiatic.blogspot.com.br> (2017).

2.2 Redução da largura de banda de transmissão

A preocupação com a redução da largura de banda de transmissão levou ao desenvolvimento de diversos algoritmos com esta finalidade, como, por exemplo, o trabalho descrito por Mounts (1966). As técnicas de redução da banda utilizam por base o fato de que boa parcela da imagem não se altera de um quadro para outro.

Este padrão de repetição foi investigado por vários pesquisadores, como Rocca (1969), e alguns sistemas de TV experimental com banda reduzida foram testados.

O desenvolvimento de alguns métodos de desentrelaçamento aconteceu paralelamente ao desenvolvimento de técnicas de redução da largura de banda, pois estas só funcionam efetivamente se aquelas tiverem um desempenho adequado. Caso contrário, o resultado final da economia de banda pode ser desastroso, devido à geração de falhas graves na imagem. Estas falhas são geradas pela estimação incorreta das informações suprimidas.

2.3 O processo de desentrelaçamento

De acordo com Bellers e Haan (2000), o processo de desentrelaçamento converte cada campo entrelaçado em um quadro progressivo, isto é, o número de imagens apresentadas por segundo se mantém constante, enquanto o número de linhas por imagem é duplicado, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6: O processo de desentrelaçamento duplica o número de linhas.

Fonte: Bellers e Haan (2000).

O processo de desentrelaçamento é uma questão simples de ser resolvida para imagens estacionárias, ou seja, sem movimento de objetos, movimento da câmera e sem mudanças de intensidades. Mas não é isso que acontece na realidade. Nestas circunstâncias, o desentrelaçamento é, na maioria das vezes, um processo

determinado empiricamente, normalmente baseado em interpolação de pixels vizinhos.

Um dos principais desafios dos métodos de desentrelaçamento é justamente evitar a geração do efeito de dupla imagem, “serrilhamento” ou “efeito *feathering*”. A seguir são apresentadas técnicas de desentrelaçamento, que têm como objetivo comum evitar a geração do efeito *feathering*.

2.4 Classificação das técnicas de desentrelaçamento

De acordo com Thomas (1987), pode-se classificar a maioria das técnicas de desentrelaçamento de vídeo discutidas na literatura em três categorias: diferencial espaço-temporal; técnicas de *matching* e técnicas baseadas em Transformada de Fourier. Estas categorias são detalhadas a seguir.

2.4.1 Técnicas espaço-temporais

Estas técnicas representam a categoria em sua forma mais simplificada. Demandam baixos recursos de software e hardware. Exploram a alta correlação entre as amostras dos campos para estimar os pixels faltantes. Dentro desta categoria, Bellers e Haan (1996) destacam as seguintes técnicas: repetição de linhas, média intracampo e média intercampos. Além destas três técnicas, os métodos espaço-temporais orientados a bordas também são descritos a seguir, pois têm destaque neste trabalho.

- Desentrelaçamento por repetição de linhas

É a técnica espacial mais simples. Neste método, ocorre o preenchimento das linhas faltantes pela repetição da linha anterior do mesmo campo, sem nenhum tratamento ou correção de qualquer natureza.

- Desentrelaçamento pela média intracampo (média espacial)

As linhas inexistentes são reconstruídas com base nas linhas vizinhas do mesmo campo (vizinhança espacial). Neste processo, ocorre borramento da imagem, pois este tipo de procedimento produz os mesmos efeitos de um filtro passa-baixas. Os artefatos de vídeo gerados podem ser piores que o método “Bob”, pois o borramento ocorre apenas em metade das linhas, uma vez que a outra metade é composta por linhas disponíveis do campo original.

- Desentrelaçamento pela média intercampos (média temporal)

As linhas inexistentes são reconstruídas com base na média (ou mediana) das linhas vizinhas, mas no campo anterior e/ou posterior (vizinhança temporal). Em alguns casos, são utilizados mais de dois campos para estimar as linhas faltantes. A Figura 7 apresenta como este processo é realizado.

Figura 7: Método de desentrelaçamento pela média intercampos.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

- Métodos orientados a bordas

Esta classe de métodos identifica a orientação das bordas da imagem, e controla a “direção” da interpolação intracampo em função da orientação das bordas. Vale ressaltar que se trata de uma classe de métodos que faz interpolação

exclusivamente espacial, pois o objetivo principal é minimizar o tempo de processamento, para ser implementado com baixo custo nos aparelhos de TV. O método clássico, conhecido por *Edge-based Line Averaging* (ELA), foi apresentado originalmente por Doyle e Looymans (1990). Utiliza correlação direcional entre pixels vizinhos para definir a direção da interpolação. Existem três direções de interpolação possíveis, sendo elas: vertical e duas diagonais, como mostrado na Figura 8. A interpolação é feita na direção com a melhor correlação entre os pixels, ou seja, na direção em que a diferença de intensidade entre os pixels é menor.

Figura 8: Direções de interpolação possíveis no método ELA.

Fonte: Produzido pelo próprio autor

Um algoritmo estado-da-arte baseado no método ELA foi proposto por Zhang e Wang (2016), que foi denominado neste trabalho como “*Improved-ELA*” (I-ELA). Este algoritmo faz uma detecção de movimento utilizando 5 campos; se uma região estática é identificada na imagem, é feita uma média para estimar as linhas faltantes; caso seja detectado movimento, aplica-se um detector de textura. Se o detector indicar que a região é uma textura em movimento, é aplicado o método ELA tradicional (ELA 3x3); caso seja uma região de movimento suave ou textura sem movimento, aplica-se um ELA 3x13 (combinando direções de 3 linhas e 13 colunas).

Este algoritmo foi utilizado para realizar comparações quanto ao desempenho em termos de qualidade de imagem. O diagrama do método I-ELA é apresentado na Figura 9.

Figura 9: Método de desentrelaçamento "Improved-ELA" (I-ELA).

Fonte: Zhang & Wang (2016).

2.4.2 Técnicas de *matching*

Estas técnicas dividem o campo em macroblocos de pixels, de tamanhos tipicamente de 16 colunas por 8 linhas, e realizam uma busca bloco a bloco (*block matching*) pelo bloco de maior similaridade no campo anterior e/ou posterior. Esta categoria de técnicas foi extensivamente explorada por Bellers e Haan (1996); suas potencialidades foram analisadas durante o desenvolvimento preliminar deste trabalho de doutorado, mas não foram efetivamente utilizadas na proposta final apresentada.

Os subtipos das técnicas de *matching* são descritos a seguir.

- Desentrelaçamento por estimação de movimento

O conceito de estimação de movimento foi inicialmente desenvolvido para identificação de padrões de repetição em vídeo, como descrito por Mounts (1969) e para estimação de deslocamento de um quadro para outro, como descrito por Netravali e Robbins (1978), mas com objetivo final de reduzir a banda de transmissão de imagens de TV. A ideia básica é transmitir apenas informações referentes a regiões da imagem onde há movimento, e o restante da imagem é construído simplesmente pela repetição dos pixels do campo anterior.

A utilização de estimação de movimento com o objetivo de tratar sinais de vídeo surgiu mais tarde, tendo como destaque o trabalho de Netravali e Robbins, que desenvolveu e patenteou pela Bell Telephone Laboratories (1983) um método para realizar interpolação por estimação de movimento entre campos consecutivos.

Imprecisões na estimativa de movimento não são importantes no processo de redução de dados porque eles estão dentro do *loop* de tratamento de erro, e são cancelados com o envio de um quadro de diferença de dados. Se um objeto pequeno em movimento é perdido pelo estimador de movimento, o único efeito é que o quadro de diferença de dados aumenta ligeiramente.

- Métodos “Motion Adaptive”

Conforme descrito por Haan (1993, 1997 e 1998) e extensivamente desenvolvido por Bellers e Haan (2000), o conceito de métodos “*motion adaptive*” se refere a processamentos que identificam áreas da imagem que possuem movimento para decidir qual tipo de interpolação será realizada: espacial ou temporal. Quando é identificado movimento, realiza-se uma interpolação espacial (intracampo) nestas regiões; nas regiões sem movimento, é feita interpolação temporal (intercampos). Estes métodos tendem a borrar a imagem nas regiões onde há movimento.

- Compensação de movimento

De acordo com Watkinson (1994), a compensação de movimento determina onde o objeto se localiza em um campo intermediário, e então desloca o objeto para aquela posição em cada um dos campos originais. Esta explicação apenas é adequada para ilustrar o processamento de um movimento simples, como *pan* (movimento horizontal de câmera sobre um eixo vertical).

Um modo alternativo de compreender a compensação de movimento é considerar o que acontece no volume espaço-temporal. Um estimador padrão interpola apenas ao longo do eixo do tempo, enquanto um estimador que compensa movimento pode deslocar o eixo de interpolação em relação ao eixo do tempo, conforme mostrado na Figura 10. Watkinson (1994) identifica o efeito *feathering* como “*judder*”.

Figura 10: Inclinação dos eixos de interpolação e tempo.

Fonte: Watkinson (1994).

Os sinais que movem o eixo de interpolação são conhecidos como “vetores de movimento real” (*true motion vectors*), conforme proposto por Vandendorpe et al. (1994). Os métodos ditos de “compensação de movimento”, por sua vez, interpolam temporalmente as áreas com movimento, utilizando para isso os vetores de movimento real. O trabalho do processo de estimação de movimento é gerar os vetores de movimento real.

O desempenho geral do processo de estimação é determinado principalmente pela precisão dos vetores de movimento real gerados. Um vetor incorreto gera correlação incorreta de pixels entre os campos que estão sendo superpostos, e o resultado poderá ser pior que a imagem desentrelaçada pelo método “Bob”.

Para determinar os vetores de movimento real é necessário identificar as coordenadas corretas de um objeto em movimento em cada campo. O processo de interpolação deve, portanto, considerar as alterações de coordenadas do objeto equivalente de um campo para outro devido ao movimento detectado.

Também deve haver um processo chamado de atribuição de vetores, em que os vetores de movimento validados são atribuídos para cada localização de pixel na imagem, tornando-se um campo vetorial. A terceira fase é o processo de compensação de movimento real, que usa os campos vetoriais para direcionar o eixo da filtragem de modo que este seja paralelo ao eixo do fluxo óptico.

Houve um salto na evolução nos algoritmos de desentrelaçamento de vídeo desde o surgimento da tecnologia de “estimação de movimento real”, desenvolvido para reduzir os erros na estimação de vetores de movimento. Muitos destes algoritmos estimadores de vetores de movimento são baseados em busca por blocos similares (*block matching search*). Neste método, cada campo de vídeo é subdividido em macroblocos de pixels, de tamanho tal que garanta que os objetos da imagem sejam maiores que o tamanho do macrobloco.

Conforme indicado por Bellers (1998), quando é identificado movimento, realiza-se o processo de compensação de movimento por meio da estimação dos pixels das linhas faltantes pela mediana entre as duas linhas vizinhas do campo atual n (vizinhança espacial) e a linha correspondente no campo anterior ($n-1$), identificada

pelas coordenadas do vetor de movimento. O processo é representado pela Figura 11.

Figura 11: Método da mediana intercampos com compensação de movimento.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Apesar de sua simplicidade no conceito, o processo de *block matching* requer um enorme esforço computacional, porque cada movimento possível deve ser testado sobre uma vizinhança assumida. Em cada posição, cada pixel do bloco deve ser comparado com os pixels do outro campo.

Como o processo de *block matching* baseia-se na comparação das intensidades de pixel, os vetores de movimento produzidos só podem ser precisos para o pixel mais próximo. Isso é uma desvantagem para a conversão de padrões, mas é uma vantagem para aplicações de redução de dados onde o *block matching* é bastante empregado.

Pelo fato do sinal de televisão ser efetivamente subamostrado no eixo do tempo, é muito difícil desenvolver um estimador de movimento que funcione em todas as situações. Estruturas periódicas ou movimento altamente irregular podem resultar em estimativa incorreta.

2.4.3 Técnicas baseadas em Transformada de Fourier

Nesta categoria, destaca-se o método da correlação de fase, descrito a seguir.

O método de alinhamento (ou registro) de imagens utilizando correlação de fase foi proposto inicialmente por Kuglin e Hines (1975). Trata-se de um método muito poderoso, aplicado até os dias de hoje em diversas áreas para correção de imagens.

A aplicação do método de correlação de fase para estimação de movimento em imagens de TV foi inicialmente investigada por alguns pesquisadores de empresas privadas, como Thomas (1987), do departamento de pesquisa da BBC de Londres, e também por Belloeil (1987), dos laboratórios da Philips, passando depois por estudos similares com Bernardini e Vettore (2001), Sangwine, Eli e Moxey (2001), Biswas e Nguyen (2003), Argyriou e Vlachos (2006), além de análise subpixel por Ren, Jiang e Vlachos (2009).

O método da correlação de fase explora a propriedade de translação no domínio do espaço e sua contrapartida no domínio da frequência. Como é utilizada apenas a informação de fase, o método é relativamente insensível a mudanças na iluminação. Consequentemente, esta técnica alcança excelente robustez contra ruído dependente de frequência. A correlação de fase foi aplicada em nível subpixel também por Liu e Yan (2006) e para estimação robusta de fluxo de movimento em imagens novamente por Liu e Yan (2008).

2.5 Métodos intracampo e métodos intercampos

Além da classificação mais específica descrita por Thomas (1987), é possível classificar os processos de desentrelaçamento em duas grandes categorias mais genéricas: intracampo (ou espacial) e intercampos (ou temporal). Os métodos intracampo fazem algum tipo de interpolação de intensidade de pixels entre linhas de um único campo. Já os métodos intercampos usam mais de um campo para fazer este trabalho.

Os métodos de desentrelaçamento intercampos são os que mais geram artefatos de vídeo na presença de movimento de um campo para outro, principalmente o efeito *feathering*. Por outro lado, algumas técnicas avançadas de desentrelaçamento são praticamente livres de efeito *feathering* graças à sua natureza intracampo. Um bom exemplo é o método ELA, descrito originalmente por Doyle e Looymans (1990) e profundamente explorado por Jeong (2014a e 2014b). As técnicas intracampo criam linhas ao fazer algum tipo de processamento entre as linhas de um único campo. Mas mesmo os processos de desentrelaçamento mais avançados geram algum tipo de distorção na imagem, e a principal desvantagem do processo ELA é o efeito passa-baixa, que surge da mesma causa-raiz: é realizado com as linhas de um único campo.

2.6 O estado-da-arte em métodos de desentrelaçamento

Com a popularização das TV's de alta definição e transmissão de programação em resolução *high definition* (HD) na TV aberta, o volume de dados que deve ser processado torna o tempo de processamento um ponto crítico para os métodos de desentrelaçamento. Para atender à demanda crescente por qualidade de imagem dos espectadores, e ao mesmo tempo cumprir requisitos de custo dos fabricantes de aparelhos de TV, muitos pesquisadores têm se concentrado em desenvolver sistemas de desentrelaçamento de maior eficiência computacional.

Uma tendência nas publicações atuais mostra claramente que os pesquisadores vêm utilizando métodos clássicos de menor complexidade como base de suas pesquisas, atacando pontos específicos. Um método clássico que vem sendo muito utilizado é o ELA, que apresenta geração de artefatos causados quando a direção das bordas é avaliada incorretamente. O trabalho publicado por Brox et al. (2014) propõe a utilização de lógica *fuzzy* para diminuir o efeito *feathering* gerado pelo método ELA clássico e outros derivativos propostos por diversos pesquisadores. Uma implementação em *Graphics Processing Unit* (GPU) de um método ELA adaptativo foi desenvolvido por Wu, Song e Jeon (2014). Wang, Jeon e Jeong (2014a) apresentaram uma proposta para substituição do ELA por um algoritmo *block-wise* com autoregressão, confirmando uma tendência de utilização de

algoritmos com média intracampo. Algoritmos baseados em média intracampo têm a vantagem de um menor consumo de memória e menor tempo de processamento. Çavuşlu (2016) apresentou uma implementação do método ELA em um dispositivo do tipo *Field-Programmable Gate Array* (FPGA), com o objetivo de reduzir ainda mais o tempo do processo de desentrelaçamento.

A preocupação com o volume de dados é a base do trabalho apresentado por Kim, Jeon e Jeong (2014), que propõem um algoritmo baseado em autocorrelação, sempre citando o método ELA como importante referência. Estes pesquisadores afirmam que, no padrão de vídeo entrelaçado, existe maior resolução temporal que vídeo progressivo, o que reduz o efeito de *flicker* (cintilação). Os autores concordam que os algoritmos intercampos têm melhor desempenho que os intracampo, em termos de qualidade de imagem, mas estes requerem maior esforço computacional, o que nem sempre permite manter a taxa de 30 quadros por segundo. Além disso, se a informação de movimento não é confiável, a interpolação intercampos gera artefatos de vídeo e risco de propagação de erros. Kim, Jeon e Jeong (2014) afirmam que os métodos intracampo têm a vantagem de simplicidade de implementação e também têm melhor desempenho quando o movimento dos objetos é complexo ou muito rápido, além da vantagem de reduzir o risco de propagação de erro. Esta mesma afirmação é utilizada pelos autores em outro trabalho proposto por Wang, Jeon e Jeong (2014b).

A direção do contorno dos objetos também foi investigada por Murgai e Trocan (2013), que exploraram características de direção das bordas, adaptando a direção da interpolação, persistindo na estratégia de desentrelaçamento intracampo. Outra abordagem explorada por Wang, Jeon e Jeong (2014c) propõe a identificação mais precisa da direção das bordas por meio de uma função de minimização de energia. Trata-se também de uma abordagem de desentrelaçamento intracampo. Seguindo a mesma linha, o trabalho de Jakhetiya et al. (2014) propõe um algoritmo de desentrelaçamento intracampo usando um filtro bilateral baseado num modelo de observação, também com o objetivo de identificar direção de bordas.

Também é importante citar que pesquisadores da área de reconstrução de imagens têm a preocupação na aplicação de suas técnicas em desentrelaçamento de vídeo, como o trabalho proposto por Jakhetiya (2016).

O trabalho apresentado por Bi et al. (2017) se baseia em estimação e compensação de movimento, produzindo um quadro pela análise de 5 campos; também produz um quadro intracampo a partir de uma análise de textura. A decisão sobre o quadro final a ser apresentado se baseia num critério denominado “integração adaptativa”, de acordo com o nível de similaridade entre os blocos de pixels. Os autores também propõem a implementação em GPU, devido à complexidade do método.

2.7 Métricas de avaliação de qualidade de imagem

Neste trabalho, foram utilizados dois índices para medir os ganhos de qualidade objetiva de imagem entre diversos métodos de desentrelaçamento: o *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) tradicional e o *Mean Structural SIMilarity index* (MSSIM), conforme descrito por Wang et al (2004) e Bovik (2009). Tais grandezas são plenamente aceitas para avaliação de qualidade de imagem.

Métodos de avaliação subjetiva de imagens produzidas por técnicas de desentrelaçamento também foram desenvolvidos, como o trabalho proposto por Zhao e Haan (2005). Importantes métodos de avaliação de qualidade subjetiva de imagens de um modo geral também foram desenvolvidos por Bovik (2009) e estão disponíveis no *website* da Universidade do Texas¹ (2016), mas este tipo de avaliação subjetiva não foi tratado neste trabalho.

A seguir, as determinações do PSNR e do MSSIM são descritas em detalhes.

2.7.1 Determinação do PSNR

Uma forma tradicional de medir a qualidade relativa de imagens é pelo PSNR; para determiná-lo, calcula-se o erro quadrático médio (MSE), de acordo com (1); depois determina-se o PSNR de acordo com (2).

¹<http://live.ece.utexas.edu/research/Quality/index.htm>

$$MSE(org, rec) = \frac{\sum_{j=1}^{largura} \sum_{i=1}^{altura} (org(i, j) - rec(i, j))^2}{M \times N} \quad (1)$$

em que:

- $org(i, j)$ = intensidade do pixel da imagem original;
- $rec(i, j)$ = intensidade do pixel da imagem reconstruída;
- M, N = dimensões da imagem.

$$PSNR(org, rec) = 10 \log_{10} \left(\frac{L^2}{MSE(org, rec)} \right) \quad (2)$$

em que:

- L = valor máximo possível dos pixels na imagem;

2.7.2 Determinação do MSSIM

O MSSIM também é um índice plenamente aceito para avaliação objetiva de qualidade de imagem. De acordo com Wang et al. (2004), o MSSIM é o valor médio do *Structural SIMilarity index* (SSIM). O SSIM entre dois sinais x e y é determinado conforme (3).

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3)$$

em que:

- $SSIM(x, y)$ = Índice de similaridade estrutural entre os sinais x e y ;
- μ_x, μ_y = média da luminância do sinal x e do sinal y ;
- C_1, C_2 = constantes muito menores que 1 para evitar instabilidade da equação;
- σ_x, σ_y = Desvio padrão do sinal x e do sinal y ;
- σ_{xy} = coeficiente de correlação entre o desvio padrão do sinal x e o desvio padrão do sinal y .

O coeficiente de correlação σ_{xy} é calculado conforme (4).

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (4)$$

em que:

- N=quantidade de pontos discretos do sinal;
- x_i =valor discreto do sinal x;
- y_i =valor discreto do sinal y;
- μ_x =valor médio do sinal x;
- μ_y =valor médio do sinal y.

De acordo com Wang et al. (2004), “Na prática, usualmente é necessária uma medida global de qualidade de toda a imagem. Usamos um índice que é a média de SSIM (MSSIM) para avaliar a qualidade geral da imagem.” Deste modo, determina-se o MSSIM entre duas imagens conforme indicado em (5).

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SSIM(x_j, y_j) \quad (5)$$

em que:

- $MSSIM(X, Y)$ = SSIM médio de uma imagem X em relação à imagem Y;
- M = número total de pixels da imagem;
- $SSIM(x_j, y_j)$ = Similaridade estrutural entre o pixel x_j da imagem X e do pixel y_j da imagem Y.

Para determinação do SSIM e do MSSIM, foi utilizado o código fonte MatLab original, obtido do site da Universidade do Texas (2016).

2.8 Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM

O método ELA (e algumas de suas variações) apresenta quadros com alta qualidade quando comparado ao método da média intercampos, por exemplo. Este é o comportamento dos índices de qualidade para a maioria dos quadros ao longo do arquivo de vídeo. No entanto, quando o arquivo de vídeo é analisado quadro a quadro, é possível identificar um comportamento dos índices PSNR e MSSIM bastante peculiar. Depois de vários testes aplicando métodos de desentrelaçamento em arquivos de vídeo, observou-se que o método de média intercampos é capaz de

produzir, em situações específicas, quadros com maior qualidade que técnicas mais complexas, especialmente quando existe baixo nível de movimento na cena. No método da média intercampos, conforme descrito por Bellers & Haan (2000), as linhas estimadas são uma média aritmética entre as intensidades de pixels de campos ímpares e pares.

Nestas condições de pouco movimento na cena, o quadro gerado pela média intercampos apresenta maior PSNR e MSSIM do que o método ELA; este comportamento pode ser observado na Figura 12, que mostra a evolução quadro a quadro do PSNR e do MSSIM do arquivo de vídeo “viplane.avi”. Este arquivo de vídeo é nativo da plataforma Matlab e possui 80 quadros com resolução de 360x168 pixels.

Figura 12: Perfis dinâmicos de PSNR e de MSSIM do quadro ELA e quadro média intercampos para o arquivo de vídeo “viplane.avi”.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Pode-se notar que, ocasionalmente para alguns quadros, tanto o PSNR quanto o MSSIM do quadro gerado pela média intercampos é consideravelmente maior do que o quadro gerado pelo método ELA.

Para poder explorar o potencial identificado, é necessário avaliar qual dos processos de desentrelaçamento produz o quadro de melhor qualidade, considerando que o quadro *ground truth* não está disponível; além disso, poderia ser ainda mais vantajoso realizar uma análise de modo localizado ou regionalizado, identificando as partes da imagem que podem ser preservadas e as regiões que precisam de correção. Este potencial de melhoria da qualidade é completamente perdido quando o método ELA é aplicado de forma generalizada em todos os quadros e para todas as regiões de cada quadro.

Durante os testes, também observou-se que determinados quadros gerados por técnicas intercampos podem ter altos valores globais de PSNR e, ao mesmo tempo, altos índices de efeito *feathering*. Nesta situação, o desconforto visual produzido pelo efeito *feathering* se sobrepõe ao borramento presente no quadro ELA. Nesta situação, é melhor utilizar o quadro ELA completo ou substituir as regiões defeituosas do quadro da média intercampos pelos pixels do quadro ELA, mesmo que o PSNR do quadro final seja mais baixo que o do quadro da média intercampos.

O principal desafio presente neste ponto do trabalho é: como caracterizar e identificar as condições adequadas para usar um ou outro processo de desentrelaçamento.

2.9 Compatibilidade do PSNR e MSSIM com a qualidade visual percebida em quadros desentrelaçados

A Figura 13 mostra um caso de um quadro com baixo nível de movimento na cena. A imagem da Figura 13(a) é um quadro produzido pela técnica da média intercampos e a imagem da Figura 13(b) é um quadro produzido pelo método ELA. A imagem da Figura 13(a) apresenta melhor qualidade visual, o que se reflete em um valor de PSNR de 58,2087dB e MSSIM de 0,9998. A imagem da Figura 13(b) sofre de efeito de borramento, o que diminui o PSNR para 37,7694dB e o MSSIM

para 0,9907. Os quadros foram gerados a partir do arquivo de vídeo "akiyo.avi", obtido do repositório Xiph.org (2017).

Figura 13: Quadro da média intercampos (a) possui maior qualidade visual do que o quadro produzido pelo método ELA (b). Os valores de PSNR e MSSIM são consistentes com a qualidade visual percebida.

Fonte: Produzido pelo próprio autor a partir do repositório Xiph.org.

Em termos de MSSIM, a imagem da Figura 13(a) é quase perfeita. Esta imagem, produzida pelo método da média intercampos, tem efeito *feathering* leve porque o nível de movimento é baixo. Por outro lado, o quadro produzido pelo método ELA (Figura 13(b)) apresenta um alto nível de borramento, como pode ser observado na região da face da apresentadora. Esta é uma situação específica em que os valores de PSNR e MSSIM são consistentes com a qualidade visual percebida.

Este cenário pode mudar radicalmente para cenas com presença de movimento de maior intensidade. Apesar da maior quantidade de informação disponível, muitas vezes as técnicas intercampos podem falhar na tarefa de eliminar o efeito *feathering*. Quando a técnica falha, mesmo que seja apenas em algumas regiões da imagem, o processo produz artefatos que podem comprometer completamente a qualidade percebida.

A Figura 14 mostra um exemplo do efeito do movimento no quadro da média intercampos. A imagem da Figura 14(a) é um quadro gerado pela média intercampos e a imagem da Figura 14(b) apresenta o mesmo quadro, mas produzido

pelo método ELA. O quadro da Figura 14(a) apresenta PSNR de 30,6491dB e $MSSIM = 0,9755$. Os quadros foram gerados a partir do arquivo de vídeo "tabletennis.avi", obtido do repositório Consumer Digital Video Library (2017).

Figura 14: Um quadro com efeito *feathering* gerado pela média intercampos (a) e o mesmo quadro gerado pelo método ELA (b). Os valores de PSNR e MSSIM são inconsistentes com a qualidade visual percebida.

Fonte: Produzido pelo próprio autor a partir de arquivo de vídeo do repositório CDVL.

Embora a qualidade visual percebida do quadro ELA (Figura 14(b)) seja muito maior do que o quadro da média intercampos (Figura 14(a)), tanto o PSNR quanto o MSSIM da imagem da Figura 14(b) são menores: o PSNR é 24,3083dB e o MSSIM é 0,9249.

Estes exemplos demonstram que, pelo menos para imagens produzidas por técnicas de desentrelaçamento, a utilização isolada do PSNR e/ou MSSIM como métricas para avaliação e comparação da qualidade visual percebida pode apresentar incoerências graves. Deste modo, para imagens produzidas por processos de desentrelaçamento, é importante que seja utilizada outra métrica de qualidade associada às métricas tradicionais para que esta avaliação considere a possível presença de efeito *feathering*.

A determinação do PSNR de quadros desentrelaçados reflete o quanto o quadro produzido se assemelha ao *ground truth*, ou seja, o quanto a intensidade dos pixels das linhas estimadas pelo processo de desentrelaçamento são fiéis às intensidades originais. Mas isso não significa, necessariamente, que o processo de desentrelaçamento que gerou o quadro com maior PSNR é o processo com melhor

desempenho em termos de qualidade visual percebida. Torna-se necessário aplicar um procedimento preventivo, de modo a evitar que quadros produzidos por técnicas de desentrelaçamento intercampos com alto nível de efeito *feathering* sejam apresentados.

No próximo capítulo, é apresentada uma proposta de estratégia de desentrelaçamento de vídeo que trata a questão de incompatibilidade no uso do PSNR e do MSSIM como métricas de qualidade visual, além de explorar o potencial de qualidade de imagem presente em diversas técnicas.

3. PROPOSTA DE ESTRATÉGIA PARA DESENTRELAÇAMENTO

Este capítulo apresenta uma nova estratégia de desentrelaçamento que se baseia em duas propostas principais: um algoritmo de detecção do efeito *feathering* e uma técnica de interpretação do mapa gerado pelo detector que permite decidir sobre qual o melhor quadro a ser utilizado dentre três tipos: média intercampos, ELA ou o quadro “híbrido”. O tipo de quadro chamado “híbrido” é uma composição do quadro da média intercampos em que as regiões afetadas pelo efeito *feathering* são substituídas pelos pixels do quadro ELA. O presente capítulo também apresenta os métodos utilizados para avaliação comparativa de desempenho e as técnicas estatísticas com as quais foi realizada a verificação dos dados obtidos.

3.1 Detalhes da estratégia proposta

Neste trabalho, propõe-se um procedimento para identificação e correção do efeito *feathering*, além de uma estratégia para seleção do melhor tipo de quadro a ser utilizado. A estratégia de desentrelaçamento proposta foi denominada “Desentrelaçamento pela Seleção do Melhor Quadro” (DSMQ), que consiste de cinco passos:

- a) Passo 1: gerar quadros desentrelaçados usando dois tipos de método, sendo um deles do tipo intercampos e outra técnica do tipo intracampo. Neste trabalho foi utilizado o método da média intercampos, ELA e “*Improved-ELA*” (I-ELA);
- b) Passo 2: identificar o efeito *feathering* sobre o quadro da média intercampos e do quadro ELA;
- c) Passo 3: analisar e medir a distribuição de efeito *feathering* globalmente no quadro da média intercampos e no quadro ELA;
- d) Passo 4: decidir entre três opções: adotar o quadro intercampos completo, adotar o quadro ELA completo ou prosseguir à análise regional (passo 5);

- e) Passo 5: analisar a distribuição de efeito *feathering* localmente sobre o quadro da média intercampos e sobre o quadro ELA e montar um quadro híbrido;

A seguir, os passos da estratégia DSMQ proposta estão detalhados.

3.1.1 Passo 1: Gerar quadros desentrelaçados

Neste passo, dois tipos de quadros desentrelaçados são produzidos, sendo um deles utilizando uma técnica intercampos e outra utilizando uma técnica intracampo. O tipo de quadro intercampos utilizado neste trabalho é o da média intercampos. Conforme mostrado na Figura 7, para gerar um quadro desentrelaçado pelo método da média intercampos são necessários três campos entrelaçados consecutivos, sendo dois campos de uma determinada paridade e um campo com a paridade oposta, que é o campo do quadro atual a ser produzido. Se, por exemplo, estiverem sendo estimadas as linhas do quadro 2 (que é par), serão necessários o campo anterior (campo 1, que é ímpar) e o campo posterior (campo 3, que também é ímpar). Como o quadro atual a ser produzido é par, é necessário estimar as linhas ímpares. No método da média intercampos, as linhas ímpares do quadro 2 são estimadas pela média aritmética das linhas do campo 1 (anterior) e do campo 3 (posterior). Por outro lado, para produzir um campo ímpar pela média intercampos, como o campo 3 por exemplo, as linhas pares serão estimadas pela média aritmética das linhas do campo 2 e do campo 4.

Vale ressaltar que a estimação de cada linha faltante é feita pela média aritmética entre a linha do campo “n-1” e a linha do campo “n+1” correspondente.

Para gerar o quadro ELA foi utilizado o procedimento descrito por Doyle e Looymans (1990). Também foi feita a aplicação da estratégia DSMQ proposta utilizando o quadro “*Improved-ELA*” (I-ELA), de acordo com por Zhang e Wang (2016), descritos na subseção 2.4.1.

3.1.2 Passo 2: Identificar artefatos usando o Detector de Efeito *Feathering*

Uma das bases para o desenvolvimento da estratégia DSMQ é o detector de efeito *feathering* proposto neste trabalho; este detector faz uma análise do quadro e indica os artefatos por meio de um mapa de intensidades de efeito *feathering*.

3.1.2.1 Caracterização do efeito *feathering*

A percepção visual do efeito *feathering* fica mais evidente à medida que a velocidade dos objetos aumenta. Além disso, com base apenas na percepção pessoal, espera-se que os efeitos do desconforto para o olho humano sejam diferentes para diferentes resoluções, tamanho do objeto e nível de contraste dos objetos para o plano de fundo da imagem. É fácil observar os artefatos nos reflexos de luz e detalhes nas bordas internas nos objetos.

Alguns autores propuseram a identificação de efeito *feathering* embutida em métodos de desentrelaçamento; um método para identificar efeito *feathering* foi proposto por Chen (2009), com base na diferença de nível de pixel entre pixels originais e estimados por meio de interpolação.

A hipótese do detector proposto neste trabalho é a seguinte: quando o efeito *feathering* está presente em uma determinada região da imagem, a intensidade dos pixels do quadro “diferença” apresenta um comportamento com perfil de onda periódica.

Utilizando um quadro desentrelaçado pelo método “Bob” com um único objeto em movimento é possível realizar uma análise simples. Uma região deste quadro hipotético é apresentada na Figura 15, que foi dividida em pixels. O objeto em movimento no lado esquerdo da Figura 15 tem pixels marcados com valor "1". A matriz no lado direito indica a diferença entre linhas, pixel por pixel, linha por linha.

Figura 15: Uma região de um quadro com um objeto em movimento, o cálculo da diferença entre as linhas, a soma simples e a soma de valores absolutos.

Região com um objeto em movimento										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L3	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
L4	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
L5	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
L6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
L7	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
L8	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
L9	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
L10	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
L11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Quadro diferença linha a linha										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
L1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L2	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0
L3	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0
L4	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0	0
L5	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0
L6	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0	0
L7	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0
L8	0	0	-1	-1	0	0	1	1	0	0
L9	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0
L10	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
L11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

soma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
soma ABS	0	0	8	8	2	2	8	8	0	0

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Considerando a matriz de diferenças de pixels apresentada no lado direito da Figura 15, é realizada uma soma simples de todas as linhas, além da soma de valores absolutos; pode-se observar um comportamento peculiar nas regiões onde o efeito *feathering* está presente: valores mais altos para soma de valores absolutos, combinados a valores mais baixos para soma simples. Esses números trazem a idéia de que quando o *feathering* está presente, há um comportamento de onda periódica na matriz de diferença. Mais do que isso: para certas frequências espaciais, a onda tem baixo valor de soma simples e alto valor de soma de valores absolutos, como uma onda periódica oscilando em torno da referência zero.

A soma simples pode ser relacionada ao conceito de valor médio de uma onda periódica; deste modo, deste ponto em diante, a soma simples passará a ser denominada “valor médio” e associada à sigla “AVG”. Da mesma maneira, a soma de valores absolutos pode ser relacionada (mas não matematicamente equivalente) ao conceito de valor eficaz de uma onda periódica, e a soma de valores absolutos passará a ser denominada “valor eficaz” e associada à sigla “EFT”. Como se trata de um comportamento periódico local, é possível associar um período espacial “T” relacionado ao padrão de “oscilação” dos pixels próximos à borda dos objetos em movimento e que compõem o efeito *feathering*. Numa situação hipotética, como

aquela mostrada na Figura 15, o período espacial “T” fundamental tem um valor de dois pixels, uma vez que o padrão de deslocamento se repete a cada dois pixels.

3.1.2.2 Detectar o efeito *feathering*

No algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto, os valores médio e eficaz são calculados considerando o período espacial, em termos de quantidade de pixels.

Três campos são necessários para executar o algoritmo do detector, e o valor dos pixels nas mesmas coordenadas é tomado do campo n, “n+1” e “n+2”. Os campos n e “n+2” são da mesma paridade, e o campo “n+1” possui paridade oposta aos outros. O quadro “n+2” é necessário apenas para confirmar as diferenças geradas pelo movimento do objeto e não participa de outros cálculos.

O processo de avaliação envolve primeiramente a definição de uma área delimitada para avaliação local. A dimensão (em termos de quantidade de pixels) desta área depende diretamente do período espacial que os artefatos apresentam e/ou que se deseja detectar.

Uma vez definido o período espacial “T”, o cálculo do valor médio local (AVG) foi utilizado como primeira quantificação para comparação. O cálculo do valor AVG local é apresentado em (6).

$$AVG = \frac{\sum_{\vec{x} \in B(\vec{X})} (F(\vec{x}, n) - F(\vec{x}, n + 1))}{T} \quad (6)$$

em que:

- AVG = valor médio local;
- $\vec{x}$ = coordenadas do pixel no campo n;
- B = bloco selecionado no campo n;
- $\vec{X}$ = coordenadas do bloco no campo n;
- F = intensidade do pixel;
- n = número do campo atual;
- T = período espacial em pixels.

Também é necessário calcular o valor eficaz local (EFT). O cálculo do valor de EFT local é apresentado em (7).

$$EFT = \frac{\sum_{\vec{x} \in B(\vec{X})} (|F(\vec{x}, n) - F(\vec{x}, n + 1)|)}{T} \quad (7)$$

em que:

- EFT = valor eficaz local;
- $\vec{x}$ = coordenadas do pixel no campo n;
- B = bloco selecionado no campo n;
- $\vec{X}$ = coordenadas do bloco no campo n;
- F = intensidade do pixel;
- n = número do campo atual;
- T = período espacial em pixels.

Quando o valor de EFT é alto e o valor de AVG é baixo, considera-se que o comportamento de uma onda periódica oscilando em torno de zero está presente, e a região é marcada como positiva, ou, em outras palavras, o efeito *feathering* é identificado. Os valores de limiar ótimos destes parâmetros foram identificados após execução de testes com o algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto, considerando alguns parâmetros que poderiam impactar a percepção visual em diferentes níveis. Foram também realizados testes de varredura dos parâmetros com imagens sintéticas, e determinados os valores de acurácia na identificação do efeito *feathering* em cada caso.

Além dessa avaliação básica, é preciso analisar outro fenômeno: quando o comportamento das ondas não é causado pelo *feathering*, como quando a imagem apresenta regiões com textura, o detector poderia marcar erroneamente essas regiões. Para evitar esta inconsistência, é necessário utilizar um 3º quadro ("n+2") e gerar o campo "n+2".

O terceiro campo, ou campo "n+2", é usado apenas para evitar a identificação incorreta (falsos positivos) causada por texturas na imagem que atendem aos requisitos de intensidade de AVG e EFT. O campo "n" é comparado ao campo "n+2" (ou regiões específicas dos campos) para confirmar o movimento entre quadros. Se a diferença detectada for irrelevante, considera-se que não há movimento presente, então a região é desmarcada e ignorada.

O mapa produzido pelo detector indica as regiões onde o efeito *feathering* está presente, além de sua intensidade. Com o mapa em mãos, é possível centrar as ações apenas nas regiões a serem corrigidas. Este é o passo 3 apresentado a seguir.

3.1.3 Passo 3: Analisar e medir a distribuição de efeito *feathering* globalmente usando o "*Spot Index*"

Outra base fundamental para a estratégia DSMQ proposta é realizar a análise do mapa de efeito *feathering* determinado no Passo 2, usando uma medida especial de concentração, denominada neste trabalho como "*Spot Index*".

Para melhor avaliar a necessidade de correção, é necessário usar algum tipo de índice de concentração de efeito *feathering*. Com o intuito de medir o nível de concentração das marcas no mapa, algumas grandezas muito utilizadas no processamento de imagens foram inicialmente consideradas, como Entropia, Energia e Variância, mas não se mostraram úteis neste caso, por não serem sensíveis à concentração ou aglomeração regional.

É necessário ter um índice que seja sensível à vizinhança do pixel; a presença de pixels vizinhos com intensidade maior que zero no mapa de *feathering* deve ser um fator de aumento desse índice. Com base nessa necessidade, foi criada uma medida denominada aqui como "*Spot Index*".

O *Spot Index* considera a soma total de intensidades no mapa de efeito *feathering* e o número de vizinhos de todos os pixels com intensidade maior que um determinado limiar. Este limiar possui um valor próximo de zero, mas foi definido como 0,05 para diminuir possíveis efeitos de ruído da imagem.

Para determinar o *Spot Index* é calculada uma somatória ponderada de intensidades de pixels no mapa de efeito *feathering* da seguinte forma: para cada pixel com intensidade maior que o limiar de 0,05, é feita a contagem de pixels com intensidade maior que o limiar, dentro da vizinhança 8-conectada " $8c(\bar{x})$ ". A intensidade dos pixels vizinhos não é considerada, apenas incrementa-se a contagem caso o vizinho tenha intensidade maior que o limiar. O próprio pixel em análise $\bar{x}$ também é

considerado nesta contagem. A intensidade do pixel do mapa é então multiplicada pela contagem de pixels com valor maior que o limiar. É feita uma somatória varrendo todos os pixels do mapa, que é então dividida pelas dimensões MxN do mapa.

O cálculo do valor do *Spot Index* em um mapa de efeito *feathering* é apresentado em (8).

$$SI = \frac{\sum_{\vec{x} \in D} (D(\vec{x}) \times (B(\vec{x}) + \sum_{\vec{n} \in 8c(\vec{x})} B(\vec{n})))}{M \times N} \quad (8)$$

em que:

- SI = *Spot Index* de um mapa de efeito *feathering*;
- D= mapa de efeito *feathering*;
- $\vec{x}$ = coordenadas de um pixel no mapa de *feathering*;
- $8c(\vec{x})$ = vizinho 8-conectado do pixel $\vec{x}$;
- $\vec{n}$ = coordenadas do vizinho 8-conectado;
- $B(\vec{n})=1$ se $D(\vec{n})$ é maior ou igual a 0,05 e $B(\vec{n})=0$ se $D(\vec{n})$ é menor que 0,05;
- $B(\vec{x})=1$ se $D(\vec{x})$ é maior ou igual a 0,05 e $B(\vec{x})=0$ se $D(\vec{x})$ é menor que 0,05;
- M= número de linhas do mapa D;
- N= número de colunas do mapa D;

Também é possível determinar o *Spot Index* apenas para uma determinada região do mapa. O valor do *Spot Index* é menor se o efeito *feathering* estiver espalhado pelo mapa e maior para padrões concentrados. Como exemplo de aplicação, vamos considerar dois mapas hipotéticos de efeito *feathering* produzidos pelo algoritmo de detecção, com as mesmas dimensões, o mesmo número de pixels com intensidade maior que o limiar, e intensidades apenas "0" e "1". Se as marcas estiverem espalhadas sobre o mapa, sem conexão e proximidade, o *Spot Index* apresenta um valor baixo, como visto no lado esquerdo da Figura 16; no outro mapa, como pode ser visto no lado direito da Figura 16, há concentrações de marcas, com a mesma quantidade e intensidades. Neste caso, o *Spot Index* apresenta um valor mais alto, indicando aglomeração de marcas.

Figura 16: O *Spot Index* indica o nível de aglomeração sobre o mapa de efeito *feathering*.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

3.1.4 Passo 4: Decidir sobre qual o melhor tipo de quadro a ser utilizado

Uma vez determinados os dois mapas, ELA e média intercampos, o *Spot Index* é calculado para os mapas completos. O objetivo é evitar a realização da varredura dos mapas se o quadro da média intercampos apresentar baixo nível de efeito *feathering*. Neste caso, o quadro da média intercampos completo é adotado e a varredura de mapas não é realizada. Na situação extrema oposta, em que o quadro da média intercampos apresenta nível de efeito *feathering* muito alto, adota-se o quadro ELA completo. Numa terceira situação, em que o nível de efeito *feathering* fica entre os dois extremos, a varredura local dos mapas passa ser executada para produzir o quadro “híbrido” (Passo 5).

No algoritmo original do detector de efeito *feathering* proposto, é necessário fornecer dois quadros em sequência; o passo final compara esses quadros para confirmar se o comportamento periódico identificado é realmente um artefato ou é uma característica da cena, como textura ou detalhes de um objeto. Este passo final evita a detecção de falsos positivos, mas não é utilizado neste trabalho, porque o detector é aplicado a ambos os tipos de quadros e, em seguida, os mapas são comparados pela divisão do *Spot Index* do mapa do quadro da média intercampos pelo *Spot Index* do mapa do quadro ELA. Possíveis falsos positivos nos mapas não interferem

nos resultados, uma vez que estarão presentes nos dois mapas. Esta relação entre os *Spot Index* foi denominada *Spot Factor*.

Se o *Spot Factor* global apresentar um valor considerado baixo, o quadro da média intercampos é considerado de boa qualidade e não é necessário corrigi-lo regionalmente. Neste caso, o quadro intercampos completo é adotado e a análise dos mapas é concluída.

Do mesmo modo, caso o *Spot Factor* tenha um valor considerado alto, adota-se o quadro ELA completo, pois dificilmente o quadro da média intercampos poderia ser corrigido.

Identificou-se ainda outra situação especial em que o *Spot Factor* do quadro da média intercampos é relativamente baixo e o *Spot Index* não é alto; neste caso, deve-se adotar o quadro da média intercampos. Este cenário é comum em quadros de pouco movimento.

Se o *Spot Factor* estiver dentro de uma determinada faixa de valores, nem muito baixo nem muito alto, vale a pena proceder à correção local do quadro da média intercampos, nas regiões onde ocorre o efeito *feathering*. Inicia-se o Passo 5 do processo.

Para determinar esses limites de qualidade global para o *Spot Factor* e *Spot Index*, o processo foi aplicado a todos os quadros do arquivo de vídeo “viplane.avi” e os valores otimizados dos limiares foram identificados, de modo a obter o maior valor médio de PSNR ao longo de todo o arquivo de vídeo. Estes mesmos valores de limiar foram utilizados na análise dos outros arquivos de vídeo.

3.1.5 Passo 5: Analisar e medir a distribuição de efeito *feathering* localmente

Para esta análise, são utilizados os mapas de efeito *feathering* do quadro da média intercampos e do quadro ELA. O processo de correção é bem simples: é feita uma varredura dos mapas, comparando a intensidade pixels a pixel; se a intensidade do efeito *feathering* do mapa do quadro da média intercampos for maior que do mapa

do quadro ELA, adota-se o pixel correspondente do quadro ELA; do contrário, adota-se o pixels do quadro da média intercampos. Deste modo, um novo quadro é construído, numa composição de pixels de ambos os quadros, de acordo com a comparação de intensidades dos mapas.

A estratégia DSMQ proposta está apresentada graficamente na Figura 17. Os valores dos limiares “*Spot Factor* mínimo” (SF_{min}), “*Spot Factor* médio” (SF_{med}), “*Spot Factor* máximo” (SF_{max}) e “*Spot Index* alto” (SI_a) foram determinados empiricamente com base no arquivo de vídeo “viplane.avi”.

Antes de ser processado, o quadro do arquivo de vídeo em formato RGB original é convertido para o espaço de cores YCbCr e, em seguida, aplicado o detector de efeito *feathering* apenas no canal Y (intensidade), uma vez que o olho humano é mais sensível às mudanças de intensidade. Após a correção, os canais cromáticos (Cb e Cr), caracterizados por informações de imagem de baixa frequência, foram interpolados. Os três canais são então convertidos de volta para o espaço de cores RGB para apresentar o quadro final.

Todos os algoritmos foram implementados na plataforma MatLab.

3.2 Avaliação de desempenho do algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto

Para estimar a acurácia do detector de efeito *feathering* proposto, foram geradas imagens sintéticas, com as quais foram produzidos campos entrelaçados artificialmente, com objetos em movimento inseridos de forma controlada sobre eles. O procedimento adotado foi o seguinte:

- a) Criar uma imagem sintética com objetos diversos sobre ela; esta imagem será chamada quadro ímpar ou “n”;
- b) Fazer uma cópia desta imagem, deslocando alguns objetos selecionados; este é o quadro par ou “n+1”;

Figura 17: Diagrama apresentando a estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

- c) Extrair as linhas ímpares do quadro n e as linhas pares no quadro " $n+1$ ", produzindo os campos ímpares e pares;
- d) Os dois campos (ímpar e par) são combinados, gerando um quadro formado por campos entrelaçados produzido artificialmente;
- e) Com o quadro formado por campos entrelaçados, e sabendo com antecedência onde os objetos em movimento estão localizados, o algoritmo de detecção é aplicado.

Como ilustração, na Figura 18 são apresentados dois quadros sintéticos com resolução de 500x400 pixels, criados para avaliar o algoritmo de detecção em termos de tamanho e forma dos objetos, direção do movimento e contraste em relação ao plano de fundo.

Figura 18: Quadros gerados sinteticamente (500x400) com objetos de diferentes tamanhos, formas e níveis de contraste com o plano de fundo.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os dois quadros gerados têm pequenas diferenças para simular o movimento em alguns objetos, além de outros objetos mantidos estacionários; as diferenças podem ser mais facilmente observadas calculando a diferença dos quadros, como pode ser mostrado na Figura 19.

Figura 19: Quadro diferença calculado para identificar objetos em movimento.

Fonte: Produzido pelo próprio autor

É natural e esperado que objetos estacionários não apareçam no “quadro diferença”.

Continuando com a ilustração do processo, as próximas etapas são apresentadas nas figuras a seguir.

Os campos par e ímpar gerados usando estas etapas do processo são apresentados na Figura 20.

Figura 20: Campos sintéticos ímpar (n) e par (n+1).

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os dois campos (ímpar e par) são combinados, gerando um quadro sintético desentrelaçado pelo método “Bob”, como mostrado na Figura 21.

É possível observar que alguns objetos apresentam ruídos nas bordas, que são gerados pelo efeito *feathering*, pois eles estão em posições ligeiramente diferentes de um campo para outro. Da mesma forma, alguns objetos não apresentam efeito *feathering*, pois permanecem na mesma posição. Como o efeito *feathering* é gerado propositalmente, eles podem ser previamente identificados por inspeção visual.

Figura 21: Quadro sintético desentrelaçado pelo método “Bob”.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Outros quadros sintéticos foram criados reforçando características específicas que poderiam, potencialmente, alterar o nível de efeito *feathering* e a percepção pelo olho humano.

O quadro sintético apresentado na Figura 22, que possui resolução de 720x480 pixels, foi produzido para avaliar o desempenho do algoritmo com diferentes tamanhos de objetos combinados com diferentes contrastes com o plano de fundo da imagem. Esta imagem foi deslocada de 1 até 4 pixels, e o mesmo processo para criar campos entrelaçados de modo artificial foi realizado; cada par de quadros foi submetido ao algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto.

Figura 22: Um quadro sintético (720x480) para testes; o mesmo objeto com diferentes tamanhos e diferentes contrastes com o plano de fundo.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os limiares de detecção para o valor eficaz e para o valor médio foram ajustados buscando os melhores resultados possíveis e sempre considerando o limiar para o valor médio como uma fração do valor eficaz.

O algoritmo foi configurado para ser executado variando-se o período espacial de 2 a 14 pixels e o desempenho foi avaliado para cada situação.

Com base no trabalho de Baeza-Yates e Ribeiro Neto (1999) e também de Ferraz (2014), para validação do algoritmo e determinação de falsos positivos, falsos negativos, e curva *recall precision*, foram produzidas 100 imagens sintéticas em diversas situações de movimento dos objetos. Durante a produção das imagens, foram consideradas as seguintes variáveis combinadas: tamanho do objeto, direção do movimento, contraste com o plano de fundo, deslocamento do objeto em pixels e resolução da imagem. Os quatro principais parâmetros do algoritmo de detecção foram varridos da seguinte forma:

- a) PERÍODO_ESPACIAL: tamanho da região de análise (em pixels) indicado na Figura 15 para cálculo do valor médio local e valor eficaz local; varrido na faixa de 2x2 a 14x14 pixels, com intervalo de 1 pixel (região sempre com forma quadrada);
- b) THRE_EFICAZ: limiar de detecção para valor eficaz; faixa válida: de 0 a 1,0; varrido de 0,01 a 0,90, com intervalo de 0,01;

- c) FATOR_EFM: limiar de detecção da relação entre o valor eficaz e o valor médio; faixa válida: de 0 a 1,0; varrido de 0,1 a 1,0, com intervalo de 0,1.
- d) RATIO_FIXO: número de pixels que são marcados no mapa em torno de cada artefato identificado; faixa válida: de 1 a 100 pixels; varrido de 1 a 10 pixels com intervalo de 1 pixel, de 10 a 20 pixels com intervalo de 2 pixels e de 20 a 100 pixels com intervalo de 10 pixels;

De um modo semelhante ao utilizado por Heikkilä, Pietikäinen e Schmid (2009), para cada iteração do algoritmo de detecção combinando estes parâmetros, foram determinados os valores referentes a:

- a) TP: verdadeiro positivo → O elemento de entrada é genuíno (positivo) e o detector o classifica corretamente como positivo;
- b) TN: verdadeiro negativo → O elemento de entrada é impostor (negativo) e o detector o classifica corretamente como negativo;
- c) FP: falso positivo → O elemento de entrada é impostor (negativo) e o detector o classifica incorretamente como positivo;
- d) FN: falso negativo → O elemento de entrada é genuíno (positivo) e o detector o classifica incorretamente como negativo.

A partir destes valores, foram determinadas as seguintes características do detector:

- a) Sensibilidade: Proporção de verdadeiros positivos classificados corretamente como genuínos (*True Positive Rate* - TPR);
- b) Razão de falsos positivos: proporção de falsos positivos classificados corretamente em relação ao total de impostores (*False Positive Rate* - FPR);
- c) Razão de Falsos Negativos: proporção de falsos negativos classificados relativamente ao total de genuínos (*False Negative rate* - FNR);
- d) Especificidade: Proporção de verdadeiros negativos classificados corretamente como impostores (ou Razão de Verdadeiros Negativos – *True Negative Rate* - TNR);

- e) Valor Previsto da Saída Positiva (Precisão ou Proporção de Verdadeiros Positivos);
- f) Valor Previsto da Saída Negativa (Proporção de Verdadeiros Negativos);
- g) Acurácia (Exatidão): proporção de classificações corretas para o total de elementos classificados (genuínos e impostores);
- h) Erro: proporção de classificações incorretas para o total de elementos (genuínos e impostores).

Os resultados da aplicação do algoritmo de detecção de efeito *feathering* são apresentados no formato curvas “*recall x precision*” e “curva ROC”, tendo como base a informação de correspondências corretas retornadas para cada imagem.

De acordo com Davis e Goarich (2006), a curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*) é utilizada para visualizar, organizar, avaliar e comparar o desempenho de algoritmos, testes, classificadores e métodos de diagnóstico. A curva ROC é composta pela plotagem dos valores de FPR e TPR. Com base na curva ROC, a determinação da Área Sob a Curva (*Area Under the Curve* - AUC) auxilia na comparação de desempenho, sendo que no caso ideal, a AUC tem valor 1,0, e no pior caso a AUC tem valor 0,5, em que o desempenho é igual a um “palpite aleatório” (*random guess*).

Também de acordo com Davis e Goarich (2006), as curvas *recall x precision* são utilizadas para avaliar o desempenho de classificadores, sendo cada ponto da curva um par (*recall, precision*), em que o valor de *recall* é determinado por (9) e o valor de *precision* é determinado por (10).

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

em que:

- *recall* = Probabilidade de uma amostra relevante ser recuperada;
- TP = número de verdadeiros positivos;
- FN = número de falsos negativos.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

Em que:

- *precision* = Probabilidade de uma amostra recuperada ser relevante;
- TP = número de verdadeiros positivos;
- FP = número de falsos positivos.

Quanto mais próximo o ponto de inflexão da curva *recall x precision* estiver do ponto (1,1) no gráfico, melhor é o desempenho do detector.

3.3 Avaliação de desempenho da estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta

Uma técnica apropriada que foi utilizada neste trabalho para a avaliação do desempenho dos processos de desentrelaçamento é utilizar campos entrelaçados artificialmente. Os campos entrelaçados artificialmente são produzidos pela conversão de arquivos de vídeo progressivos. Deste modo, os quadros *ground truth* estão disponíveis para avaliação de qualidade.

Para arquivos de vídeo, os quadros são processados e convertidos, de modo que cada quadro original gera um campo entrelaçado artificialmente. Apenas as linhas ímpares dos quadros ímpares são usadas, formando um campo ímpar com metade das linhas originais. O mesmo procedimento é feito para os quadros pares.

Uma vez gerados os campos entrelaçados artificialmente, aplicou-se sobre eles os diversos algoritmos de desentrelaçamento. Como a informação de todas as linhas originais é conhecida (sendo que metade delas foi eliminada para gerar os campos entrelaçados artificialmente), é possível determinar o nível de qualidade do processo de estimação das linhas faltantes.

Como ilustração, o processo de produção de modo artificial de um quadro desentrelaçado pela média intercampos a partir de quadros de um arquivo de vídeo progressivo pode ser visto na Figura 23. Os quadros originais pertencem ao arquivo de vídeo “foreman.avi”, que possui resolução de 176x144 pixels.

Figura 23: Geração de um quadro pela média intercampos a partir de quadros de um arquivo de vídeo progressivo “foreman.avi”.

Fonte: SOFT AGE (2016), processado pelo autor.

Para avaliar o desempenho da estratégia de desentrelaçamento completa, foi feita uma seleção de diversas fontes que resultou num conjunto de 26 arquivos de vídeo de vários tipos, com diversos padrões de movimento em cena, variadas resoluções e quantidade de quadros, num total de mais de 7000 quadros.

Foram realizados dois testes comparativos com a estratégia DSMQ proposta utilizando o mesmo conjunto de arquivos de vídeo. Nos dois testes, o quadro intercampos é determinado pela média. A diferença entre os testes está na técnica para gerar o quadro do tipo intracampo, sendo que em um dos testes foi utilizado o quadro ELA tradicional e no outro teste utilizou-se quadro “*Improved-ELA*” (I-ELA).

Como a informação das linhas originais é conhecida (disposta para gerar campos entrelaçados de modo artificial), é possível determinar o PSNR e o MSSIM do quadro produzido pelos métodos de desentrelaçamento para comparação de qualidade.

3.4 Análise estatística

Para avaliar estatisticamente os dados obtidos com os testes realizados com a estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta, foram realizados testes de normalidade destes dados e verificação do nível de significância, que são descritos a seguir.

3.4.1 Teste “D” da normalidade

Para a realização de análises estatísticas paramétricas (que são aquelas baseadas em média, desvio padrão, etc), é necessário primeiramente verificar a normalidade dos dados. Neste trabalho, foi utilizado o teste “D” de normalidade, conforme descrito por D’Agostino e Stephens (1986). O teste “D” é conhecido por “teste D’Agostino”.

Deste modo, os dados de desempenho obtidos com a aplicação da estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta foram submetidos ao teste D’Agostino com o suporte de um programa denominado Bioestat, do Instituto Mamirauá (2017). Uma vez verificada a normalidade, foram realizadas as análises paramétricas.

3.4.2 Teste de hipótese estatística

Para verificar o nível de significância dos testes realizados com a estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta, foram realizadas análises estatísticas baseadas no teste de hipóteses, conforme descrito por Triola (1998). Neste tipo de teste são formuladas duas hipóteses básicas:

- H_0 : hipótese nula ou da existência;
- H_1 : hipótese alternativa.

O teste de hipótese é um processo de “Decisão Estatística” com base em um conjunto de dados x (amostra) de tamanho n , com média amostral $\bar{x}$. Fixa-se um nível de significância α e definem-se duas regiões: uma de não rejeição de H_0 (Região de Não Rejeição - RNR) e uma de rejeição de H_0 ou crítica (RC) para o valor calculado, ao nível de risco dado. Se o valor observado pertence à RNR, a decisão é a de não rejeitar H_0 ; se o valor observado pertence à “Região Crítica”, a decisão é a de rejeitar H_0 .

A grandeza “ α ” também é conhecida com “nível de incerteza” ou “grau de desconfiança”, e o valor “ $1 - \alpha$ ” é conhecido como coeficiente de confiança ou nível de confiabilidade.

A hipótese H_0 utilizada neste trabalho é composta de um teste unilateral à esquerda, considerando um nível de significância α de 5%. Nesta condição, a RNR e a RC atendem à distribuição padronizada Z da Figura 24. O valor de Z consiste da distribuição padronizada da média amostral $\bar{x}$.

Figura 24: Teste unilateral à esquerda

Fonte: Correa (2003)

Há dois tipos possíveis de erro ao testar uma hipótese estatística. Pode-se rejeitar uma hipótese quando ela é, de fato, verdadeira, ou aceitar uma hipótese quando ela é, de fato, falsa. A rejeição de uma hipótese verdadeira é chamada “erro tipo I”. A aceitação de uma hipótese falsa constitui um “erro tipo II”. As probabilidades desses dois tipos de erros são designadas, respectivamente, por α e β .

A probabilidade α do erro tipo I é denominada “nível de significância” do teste. O Quadro II apresenta as decisões tomadas e possíveis consequências em um teste de hipótese.

Quadro II: Decisões em um teste de hipótese.

		<u>Realidade</u>	
		<u>H₀ verdadeira</u>	<u>H₀ falsa</u>
<u>Decisão</u>	Aceitar H ₀	Decisão Correta (1- α)	Erro tipo II (β)
	Rejeitar H ₀	Erro tipo I (α)	Decisão Correta (1 - β)

Fonte: Correa (2003).

O erro tipo I só poderá ser cometido se a hipótese H₀ for rejeitada, e o erro do tipo II quando H₀ for aceita. O objetivo é reduzir ao mínimo as probabilidades dos dois tipos de erros. Infelizmente, essa é uma tarefa difícil porque, para uma amostra de determinado tamanho, a probabilidade de se incorrer em um erro tipo II aumenta à medida que diminui a probabilidade do erro I, e vice-versa. A redução simultânea dos erros poderá ser alcançada pelo aumento do tamanho da amostra.

Com a aplicação do teste de hipótese para os arquivos de vídeo analisados, foi avaliado o número de quadros em que o algoritmo produziu melhorias de qualidade em termos de PSNR. O objetivo foi estimar a porcentagem de acerto do algoritmo com probabilidade de erro baixa.

Considerando uma população e uma hipótese sobre proporção p dessa população determina-se a distribuição padronizada Z utilizando (11).

$$Z = \frac{p' - p}{\sqrt{p(1 - p)/n}} \quad (11)$$

em que:

- Z = Distribuição padronizada da média amostral x' ;
- p' = proporção da amostra;

- p = proporção definida na hipótese;
- n = tamanho da amostra.

Obs: caso n (tamanho da amostra) seja grande, Z será aproximadamente igual à normal $N(0,1)$.

Considerando $\alpha=5\%$, o intervalo de rejeição é dado por: $RC = \{Z \leq -1,65\}$, o critério de decisão é o seguinte:

- Se $Z < -1,65$, rejeita-se H_0 ao nível de $\alpha=5\%$;
- Se $Z \geq -1,65$, não se rejeita H_0 ao nível de $\alpha=5\%$;

No próximo capítulo, são apresentados os resultados dos testes com o detector de efeito *feathering* proposto e dos testes da estratégia de desentrelaçamento DSMQ com arquivos de vídeo.

4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos testes com o algoritmo de detecção de efeito *feathering* e da proposta de estratégia DSMQ para desentrelaçamento de vídeo. Também são apresentadas análises destes resultados.

4.1 Algoritmo de detecção do efeito *feathering*

O detector de efeito *feathering* proposto gera um mapa indicando as regiões onde o efeito *feathering* foi identificado, além de sua intensidade. Como ilustração, o mesmo quadro da Figura 21 e o mapa gerado pelo algoritmo de detecção de efeito *feathering* são apresentados na Figura 25.

Neste último exemplo, fica evidente na Figura 25 que o algoritmo foi capaz de identificar grande parte do efeito *feathering* que está presente na imagem.

A principal falha do algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto é a indicação de artefatos em regiões com pouca percepção visual, devido a características de baixo contraste. Esta indicação leva a correções que podem piorar a percepção visual na imagem.

Figura 25: Quadro sintético desentrelaçado usando o método “Bob” e o mapa gerado pelo algoritmo de detecção de efeito *feathering*.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Pode ser verificado na Figura 26 um quadro com um grupo do mesmo objeto simples movendo-se para o lado direito, e outro grupo movendo-se para cima, com deslocamento variando de 1 a 8 pixels. O efeito *feathering* aumenta quando o deslocamento é maior. Para o deslocamento de 1 pixel para a direita, o algoritmo detectou efeito *feathering* apenas nos cantos mais oblíquos do objeto.

Figura 26: Um quadro sintético com um simples objeto se movendo com deslocamentos diversos e seu respectivo mapa gerado pelo detector de efeito *feathering*. O valor em cada objeto indica o número de pixels do deslocamento entre o campo ímpar e o campo par.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Um fenômeno visual interessante pode ser verificado no comportamento do valor eficaz acumulado sobre o mapa de efeito *feathering* da Figura 22, como mostrado na Figura 27. O perfil de amplitude do valor acumulado fica mais elevado à medida que o deslocamento torna-se maior.

Da mesma forma, o comportamento visual do valor acumulado médio gerado a partir do mapa de efeito *feathering* da Figura 22 pode ser observado na Figura 28, onde a forma de onda periódica pode ser observada nas áreas com efeito *feathering*.

Figura 27: Gráfico 3D mostrando o valor eficaz acumulado.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Figura 28: Gráfico 3D mostrando o valor médio acumulado e sua natureza periódica.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Os resultados obtidos com o deslocamento do quadro apresentado na Figura 22 são apresentados na Figura 29. O mesmo quadro foi deslocado de 1 a 4 pixels para criar

o quadro " $n + 2$ ", e ambos submetidos ao algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto. Neste teste, o nível de contraste em relação ao plano de fundo e tamanho do objeto não tiveram influência observável na detecção; entretanto, o parâmetro do deslocamento do movimento teve uma influência muito mais elevada.

Figura 29: Mapas de efeito *feathering* para objetos em movimento com diferentes tamanhos e diferentes contrastes, e deslocamento de 1, 2, 3 e 4 pixels para a direita.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para avaliar o desempenho em relação à resolução da imagem, alguns quadros sintéticos com resolução HD (1280x720 pixels) foram criados e submetidos ao algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto. Um destes testes pode ser visto na Figura 30. Deve-se considerar que o período espacial de 6 pixels foi fixado para estes testes.

Alguns objetos não apresentam bordas serrilhadas pois não foram deslocados de um quadro para outro, portanto não aparecem no mapa de efeito *feathering*.

Figura 30: Quadro sintético com resolução HD (1280x720) e seu respectivo mapa de efeito *feathering*.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Continuando com a avaliação do desempenho em relação à resolução de imagem, alguns quadros sintéticos Full HD (1920x1080 pixels) foram criados e submetidos ao algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto. Um desses testes pode ser visto na Figura 31.

Mesmo para baixa quantidade de efeito *feathering* em um quadro com resolução “Full HD”, o algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto apresentou alta acurácia na detecção.

Figura 31: Quadro sintético entrelaçado com resolução Full HD (1920x1080) e seu respectivo mapa de efeito *feathering*.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para pequenos deslocamentos (1 pixel) o algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto não detecta o efeito *feathering*, que é quase imperceptível ao olho humano. Para o nível de deslocamento de 2 pixels, a detecção aumenta, e é possível verificar que o contraste do objeto com plano de fundo aumenta a percepção visual e também a capacidade de detecção do algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto.

Na Figura 32 é possível observar um quadro com o mesmo objeto, mesmo tamanho, mas com diferentes níveis de contraste para o plano de fundo e diferentes níveis de deslocamento para o lado de baixo da imagem.

Figura 32: Quadro sintético (720x480) com um objeto em diferentes condições de contraste e diferentes deslocamentos de cima para baixo e seu respectivo mapa de efeito *feathering*.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Outro quadro sintético com resolução 500x400 pixels é mostrado na Figura 33, onde os objetos têm o mesmo tamanho e movimento na direção diagonal, com diferentes deslocamentos de pixels e diferentes níveis de contraste com o plano de fundo.

Figura 33: Quadro sintético (500x400) com o mesmo objeto em movimento na diagonal com diferentes deslocamentos e diferentes níveis de contrastes com o plano de fundo.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Analisando os resultados da Figura 32 e da Figura 33, o algoritmo pode ser considerado invariante aos parâmetros de direção do movimento e contraste com o plano de fundo.

4.1.1 Avaliação numérica do detector proposto

Após a aplicação do algoritmo de detecção de efeito *feathering* nos 100 pares de imagens sintéticas, o melhor desempenho do detector foi obtido considerando o ponto de maior acurácia, que foi de 0,942. Este resultado foi obtido com os seguintes valores dos parâmetros:

- a) PERÍODO_ESPACIAL: 6x6 pixels para cálculo do valor eficaz local e valor médio local;
- b) Limiar de detecção para o valor eficaz (THRE_EFICAZ): 0,1 (considerando a intensidade de pixel de 0 a 1);
- c) Limiar para o valor médio (FATOR_EFM) ajustado para 0,5;
- d) Número de pixels marcados no mapa em torno de cada artefato identificado (RAIO_FIXO): 1 pixel.

Nesta situação, foram obtidos os seguintes resultados para as amostras de candidatos (pontos do mapa de efeito *feathering*): TP=273.013.200; TN=247.628.000; FP=25.257.000; FN=6.994.200.

Com base nestes valores, foram calculadas as características do classificador, que são as seguintes:

- a) Sensibilidade: 0,975
 - b) Razão de falsos positivos: 0,093
 - c) Razão de falsos negativos: 0,025
 - d) Especificidade: 0,907
 - e) Valor previsto da saída positiva: 0,915
 - f) Valor previsto da saída negativa: 0,973
 - g) Acurácia: 0,942
- Erro: 0,058

A Figura 34 apresenta a curva ROC gerado com a verredura destes parâmetros.

Figura 34: Curva ROC obtido com o detector proposto.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Figura 35 apresenta a curva *recall x precision* gerada com a verredura destes parâmetros.

Figura 35: Curva Recall x Precision do detector proposto.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Observa-se na curva ROC da Figura 34 a concentração dos pontos do lado esquerdo da diagonal *random guess* (em vermelho) e próximos ao valor máximo (1,0) do eixo “TPR”, o que caracteriza um bom classificador, pois apresenta baixo número de falsos positivos e alto número de verdadeiros positivos. O valor obtido da Área Sob a Curva ROC foi de 0,973, que é um indicador próprio de bons classificadores.

A curva *Recall x Precision* da Figura 35 também apresenta características de um bom classificador, pelo fato de possuir pontos no alto do gráfico; isto indica altos valores de precisão associados a altos valores de sensibilidade.

4.1.2 Comparação do mapa de efeito *feathering* proposto com o mapa SSIM

Observou-se durante o desenvolvimento certa semelhança entre o mapa gerado pelo detector proposto e o mapa SSIM, proposto por Wang et al. (2004). Como um exemplo, um quadro desentrelaçado usando o método "Bob", seu correspondente mapa de efeito *feathering* e também seu mapa SSIM são apresentados na Figura 36. O quadro tem resolução de 168x360 pixels, e foi extraído do arquivo de vídeo “viplane.avi”, arquivo nativo da plataforma Matlab.

É possível observar na Figura 36 a semelhança visual do mapa de efeito *feathering* (Figura 36(b)) com o mapa SSIM (Figura 36(c)), gerado pelo algoritmo de Wang et al. (2004), cujo código fonte MatLab foi obtido do site da Universidade do Texas (2016). Mas há uma diferença fundamental entre eles: para determinar o mapa SSIM é necessário ter disponível a imagem *ground truth*, desnecessária para determinar o mapa de efeito *feathering*. Esta característica pode ser utilizada como um indicador de qualidade de imagem sem referência.

Figura 36: Um quadro do arquivo de vídeo “viplane.avi” (168x360) com alto nível de artefatos (a), o respectivo mapa de efeito *feathering* (b) e seu mapa SSIM (c).

Fonte: Biblioteca de arquivos de vídeo nativa da plataforma Matlab, processado pelo autor.

4.2 Estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta

Os resultados da aplicação da estratégia DSMQ em quadros sintéticos e arquivos de vídeo são apresentados a seguir.

4.2.1 Determinação dos limiares de *Spot Index*

Após diversos testes com o arquivo de vídeo “viplane.avi”, foram determinados os limiares de *Spot Index* e *Spot Factor* da estratégia DSMQ proposta. O valor do limiar do *Spot Factor* utilizado para a seleção do quadro intercampos completo (SF_{min}) é de 1,2, ou seja, quando dividimos o *Spot Index* do mapa da média intercampos pelo *Spot Index* do mapa ELA, se este valor (*Spot Factor*) ficar abaixo deste limiar, o quadro da média intercampos tem boa qualidade e é selecionado. Quando o *Spot Factor* é menor que 2,0 (SF_{med}) e ao mesmo tempo o *Spot Index* do mapa intercampos (SI_{IF}) é menor que 10.000 (SI_a), também adota-se o quadro da média intercampos. Já para valores de *Spot Factor* acima de 6.0 (SF_{max}), o quadro ELA completo é adotado.

4.2.2 Testes combinando quadros da média intercampos com quadros ELA

Neste teste da estratégia DSMQ proposta, foram utilizados como base o método da média intercampos e o método ELA. A Tabela 1 e a Tabela 2 mostram que a estratégia DSMQ proposta traz aumento do PSNR para quase todos os arquivos de vídeo submetidos durante os testes, em comparação ao método ELA. Não é adequado comparar os resultados de PSNR da estratégia DSMQ com os resultados do método da média intercampos devido à provável presença de efeito *feathering* nos quadros da média intercampos, que não se reflete no valor do PSNR. É preciso ressaltar que todos os quadros considerados passaram por avaliação de intensidade de efeito *feathering* nas etapas da estratégia DSMQ proposta. A média ponderada foi calculada multiplicando-se cada linha da tabela pelo número de quadros (de cada

arquivo de vídeo), dividindo-se então pelo número global de quadros. Os arquivos com resolução *full HD* foram obtidos do repositório Videvo (2017).

A Tabela 1 mostra que, para o conjunto de arquivos de vídeo submetidos ao teste, o quadro gerado pela estratégia DSMQ proposta apresenta PSNR maior, igual ou, quando menor, muito próximo ao melhor quadro entre os três métodos de desentrelaçamento. Os 26 arquivos contém um total de mais de 7.000 quadros.

Tabela 1 - Comparação do PSNR para um conjunto de arquivos de vídeo, submetidos aos métodos ELA e à estratégia DSMQ proposta.

PSNR (dB)						
Arquivo	Resolução	Quadros	Intercampos	ELA	Híbrido	DSMQ
akiyo.avi	144x176	297	55,6981	37,6086	40,8671	55,6981
balls.avi	1920x1080	200	27,1412	49,2064	46,2891	49,2064
Blue_Sky.avi	1920x1080	200	43,4834	47,0921	45,2925	47,0921
carphone.avi	144x176	379	36,1225	33,3634	34,5131	35,7957
Cat_jump.avi	1920x1080	200	56,3671	44,5407	47,3833	47,3833
coastguard.avi	144x176	297	37,5286	28,9368	29,6852	29,4675
container.avi	144x176	297	54,9079	28,8387	30,9125	30,5844
Countdown_timer.avi	1920x1080	200	48,2674	44,9306	46,1759	48,3952
Dolphin.avi	1920x1080	200	40,7888	45,4403	48,8600	45,4403
Earth_Zoom.avi	1920x1080	200	45,7395	52,1685	48,9934	50,9804
flame.avi	240x320	103	20,3185	44,4863	32,0655	44,4863
football.avi	486x720	649	26,1869	26,5386	26,8806	26,8752
foreman.avi	144x176	397	37,0078	33,4321	34,5428	36,0693
miss_am.avi	144x176	147	43,1547	38,7790	40,1844	43,1547
MoonandSea.avi	1920x1080	200	35,8147	33,4689	33,8501	33,8501
mother.avi	144x176	297	50,0373	36,6443	40,2434	50,0382
shaky_car.avi	240x320	129	31,8734	34,6618	34,2985	34,6431
silent.avi	144x176	448	42,6230	34,3210	37,6839	37,6050
suzie.avi	144x176	147	42,7375	38,6565	40,8521	43,9655
tabletennis.avi	486x720	649	28,5308	25,0825	26,5695	27,5502
viplane.avi	168x360	77	33,5855	34,6701	34,5497	34,8154
viplanedeparture.avi	240x360	334	34,9041	40,1476	39,0474	39,8268
vipmosaicking.avi	240x320	69	31,1651	39,5736	36,9356	38,7134
viptraffic.avi	120x160	118	30,6224	30,0645	31,0432	31,6176
viptrain.avi	240x360	623	36,0447	31,9257	33,3260	33,1946
vipwarnsigns.avi	180x360	294	28,8373	31,6613	31,2001	31,7235
Média Ponderada ==>			37,9163	34,8719	35,7027	37,4792

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Assim como para os valores de PSNR apresentados na Tabela 1, a Tabela 2 mostra que os quadros gerados pela estratégia DSMQ proposta apresentam MSSIM maior que os quadros ELA em 16 dos 26 arquivos de vídeo analisados (61,5%). Considerando todos os quadros produzidos, a média ponderada de MSSIM para a estratégia DSMQ proposta apresentou valor superior.

Tabela 2 - Comparação de SSIM Médio (MSSIM) para o mesmo conjunto de arquivos de vídeo mostrados na Tabela 1.

SSIM Médio (MSSIM)						
Arquivo	Resolução	Quadros	Intercampos	ELA	Híbrido	DSMQ
akiyo.avi	144x176	297	0,9997	0,9904	0,9958	0,9997
balls.avi	1920x1080	200	0,9673	0,9999	0,9993	0,9999
Blue_Sky.avi	1920x1080	200	0,9980	0,9993	0,9984	0,9993
carphone.avi	144x176	379	0,9760	0,9648	0,9739	0,9761
Cat_jump.avi	1920x1080	200	0,9996	0,9991	0,9994	0,9994
coastguard.avi	144x176	297	0,9865	0,9401	0,9473	0,9462
container.avi	144x176	297	0,9993	0,9632	0,9730	0,9710
Countdown_timer.avi	1920x1080	200	0,9995	0,9997	0,9997	0,9998
Dolphin.avi	1920x1080	200	0,9952	0,9998	0,9988	0,9998
Earth_Zoom.avi	1920x1080	200	0,9961	0,9996	0,9971	0,9990
flame.avi	240x320	103	0,6703	0,9938	0,9294	0,9938
football.avi	486x720	649	0,9277	0,9446	0,9441	0,9458
foreman.avi	144x176	397	0,9618	0,9644	0,9714	0,9764
miss_am.avi	144x176	147	0,9835	0,9800	0,9797	0,9835
MoonandSea.avi	1920x1080	200	0,9989	0,9988	0,9988	0,9988
mother.avi	144x176	297	0,9972	0,9855	0,9902	0,9972
shaky_car.avi	240x320	129	0,9490	0,9768	0,9721	0,9748
silent.avi	144x176	448	0,9933	0,9785	0,9850	0,9849
suzie.avi	144x176	147	0,9876	0,9833	0,9893	0,9924
tabletennis.avi	486x720	649	0,9564	0,9538	0,9592	0,9618
viplane.avi	168x360	77	0,9535	0,9767	0,9737	0,9763
viplanedeparture.avi	240x360	334	0,9831	0,9941	0,9911	0,9923
vipmosaicking.avi	240x320	69	0,9555	0,9932	0,9875	0,9911
viptraffic.avi	120x160	118	0,9589	0,9589	0,9666	0,9684
viptrain.avi	240x360	623	0,9797	0,9673	0,9734	0,9730
vipwarnsigns.avi	180x360	294	0,9207	0,9490	0,9459	0,9496
Média Ponderada ==>			0,9700	0,9730	0,9751	0,9777

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para exemplificar e comparar o desempenho da estratégia DSMQ proposta com outros métodos ao longo da evolução do arquivo de vídeo, pode ser verificado na

Figura 37 que o PSNR e o MSSIM do quadro DSMQ, ou seja, o quadro intercampos corrigido regionalmente pelo quadro ELA, apresenta um perfil dinâmico que segue o melhor entre os tipos de desentrelaçamento. Os perfis apresentados são referentes ao arquivo de vídeo “viplane.avi”.

Figura 37: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM dos quadros ELA, média intercampos e da estratégia DSMQ proposta para o arquivo de vídeo “viplane.avi”.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para exemplificar a qualidade de imagem superior da estratégia DSMQ proposta em comparação com ELA quando há baixo nível de movimento na cena, a Figura 38 apresenta um quadro do arquivo de vídeo “suzie.avi” (176x144 pixels), obtido do repositório SOFTAGE (2016) gerado por ambos os métodos. O quadro ELA apresenta PSNR=39,0279dB e MSSIM=0,9821, enquanto o quadro DSMQ apresenta PSNR=52,2081dB e MSSIM=0,9980.

Figura 38: Um quadro do arquivo de vídeo “suzie.avi” processado por diversos métodos de desentrelaçamento; média intercampos (a), mapa *feathering* (b), quadro ELA (c) e pela estratégia DSMQ proposta (d).

Fonte: SOFTAGE (2016), processado pelo autor.

Na Figura 39 podem ser vistos os perfis dinâmicos do PSNR e MSSIM do arquivo de vídeo “suzie.avi”.

É possível observar na Figura 39 que, em alguns quadros, a estratégia DSMQ selecionou incorretamente o melhor tipo de quadro, indicando que existe a necessidade de otimizar o limiar de decisão do *Spot Index* para situações específicas de cada arquivo de vídeo. Observa-se também que, apesar do limiar não estar otimizado, a seleção incorreta causou baixo impacto na qualidade geral.

Figura 39: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo "suzie.avi".

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para cenas com objetos diagonais e contínuos, como as faixas da rodovia na Figura 40, o método ELA cria artefatos de vídeo que não aparecem na estratégia DSMQ proposta. Este quadro possui resolução de 160x120 pixels e pertence ao arquivo de vídeo "viptraffic.avi", e é um arquivo nativo da plataforma Matlab.

Figura 40: Um quadro do arquivo de vídeo “traffic.avi” processado por diversos métodos de desentrelaçamento; média intercampos (a), mapa *feathering* (b), quadro ELA (c) e quadro DSMQ (d).

Fonte: Arquivo de vídeo nativo da plataforma Matlab, processado pelo autor.

Para a comparação apresentada na Figura 40, fica claro que o método ELA produziu artefatos de vídeo nas faixas da rodovia. O PSNR do quadro ELA é de 30,9766dB, enquanto o quadro produzido pela estratégia DSMQ proposta apresenta PSNR de 40,4000dB.

Também foi verificado que, em alguns casos, todos os quadros do arquivo de vídeo desentrelaçado gera quadros da média intercampos com PSNR superior aos quadros ELA, como, por exemplo, para o arquivo de vídeo “silent.avi” (resolução 176x144 pixels). Os perfis de evolução do PSNR e MSSIM ao longo de todos os quadros deste arquivo de vídeo são mostrados na Figura 41.

Figura 41: Perfis dinâmicos do PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo “silent.avi” .

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Como ilustração, a Figura 42 apresenta um quadro do vídeo “silent.avi” e seu respectivo mapa *feathering*. É possível observar que o detector é capaz de identificar corretamente as regiões com *feathering*. O plano de fundo da imagem apresenta características que poderiam ser identificadas como *feathering*, mas como não existe movimento, o detector não marca estas regiões. O PSNR do quadro da média intercampos é de 37,8058dB, MSSIM=0,9858, *Spot Index*=3085,0 e *Spot Factor*=5,6757. Este é um caso em que o algoritmo deve corrigir localmente o quadro. O quadro ELA apresenta PSNR=34,1823dB e MSSIM=0,9797. Após a devida correção local, o quadro híbrido apresenta PSNR=38,0228dB e MSSIM=0,9855. O quadro da média intercampos apresenta melhor qualidade na região da face da pessoa, mas muito efeito *feathering* no braço e no corpo. O quadro

híbrido corrigiu o *feathering*, mas piorou a qualidade da região da face. Apesar disso, a estratégia DSMQ opta por apresentar o quadro híbrido devido ao *feathering* do quadro da média intercampos. Mesmo com o borramento da face, o quadro híbrido apresentou maior qualidade em termos de PSNR, e foi selecionado corretamente pela estratégia DSMQ.

Figura 42: Um quadro da média intercampos (a) e seu respectivo mapa *feathering* (b); quadro ELA (c) e quadro híbrido (d).

Fonte: Arquivo de vídeo nativo do Matlab processado pelo autor.

A Figura 43 apresenta um quadro do arquivo de vídeo “miss_am.avi” (176x144 pixels). Nesta situação, o quadro da média intercampos apresenta maior PSNR que o quadro ELA, baixo nível de efeito *feathering* (*Spot Index*=1207) e o *Spot Factor* é baixo (1,21) só que maior que o limiar de 1,2. Todos os quadros ELA apresentaram forte borramento. A estratégia DSMQ selecionou corretamente o quadro da média

intercampos pela combinação de baixo valor de *Spot Factor* (menor que 6,0) com baixo valor de *Spot Index* (menor que 10.000). Esta situação se repete ao longo de todo o arquivo de vídeo.

Figura 43: Um quadro exemplo do vídeo “miss_am.avi” em que o quadro da média apresenta melhor qualidade visual; o quadro ELA apresenta forte borramento.

Fonte: Arquivo de vídeo nativo do Matlab processado pelo autor.

A Figura 44 apresenta a evolução quadro a quadro do PSNR e MSSIM dos quadros gerados pelos métodos avaliados, considerando o arquivo de vídeo “miss_am.avi”. Durante todo o vídeo, o PSNR do quadro da média intercampos apresenta maior PSNR que o quadro ELA. A estratégia DSMQ seleciona corretamente o quadro da média intercampos ao longo de todo o arquivo de vídeo.

Figura 44: Evolução do PSNR e MSSIM quadro a quadro para o vídeo “miss_am.avi”.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Por outro lado, existem casos em que ocorre o contrário, ou seja, a qualidade dos quadros ELA é sempre maior do que a média intercampos em todos os quadros do arquivo de vídeo. Como exemplo, para o arquivo de vídeo sintético “flame.avi” com alto nível de movimento, em que um quadro é mostrado na Figura 45, o quadro ELA apresenta melhor PSNR e MSSIM para todo o arquivo de vídeo, e a estratégia DSMQ selecionou corretamente o melhor quadro. Esta característica pode ser verificada nos perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM apresentados na Figura 46. Este arquivo de vídeo foi obtido do banco de arquivos de vídeo Architects of Tomorrow (2016) e possui resolução de 320x240 pixels.

Figura 45: Um quadro do arquivo de vídeo “flame.avi” (320x240) processado por diversos métodos de desentrelaçamento; quadro original (a), quadro da média intercampos (b), mapa *feathering* (c) e quadro ELA (d).

Fonte: https://archive.org/details/Architects_of_Tomorrow.

O PSNR do quadro ELA é de 34,7537dB, enquanto o quadro da média intercampos apresenta PSNR de 20,4387dB.

Na Figura 47 é apresentada uma situação em que o quadro da média intercampos apresenta alto PSNR, maior que o quadro ELA e o quadro híbrido, mas a presença do *feathering* gera desconforto visual na região das faixas da estrada. Neste caso, considera-se que é melhor selecionar o quadro híbrido, que apesar de apresentar menor PSNR, não apresenta os artefatos presentes no quadro da média intercampos. O *Spot Factor* neste caso é de 1,9899, que está entre 1,2 e 6,0. A estratégia DSMQ selecionou corretamente o quadro híbrido, que apresenta um PSNR ligeiramente superior ao do quadro ELA.

Figura 46: Perfis dinâmicos de PSNR e MSSIM para o arquivo de vídeo “flame.avi”.

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Para comparar os ganhos de qualidade de imagem da estratégia DSMQ proposta em comparação ao método ELA ao longo de todos os quadros dos arquivos de vídeo, foi realizada a contagem do número de quadros produzidos pela estratégia DSMQ proposta que possuem PSNR mais alto que o quadro ELA. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Figura 47: Situação em que o quadro da média intercampos apresenta PSNR alto, mas também alto nível de *feathering*.

Fonte: Arquivo de vídeo nativo do Matlab processado pelo autor.

4.2.3 Testes combinando quadros da média intercampos com quadros “Improved-ELA”

Para confirmar a melhoria de qualidade de imagem utilizando outros processos de desentrelaçamento preexistentes, a estratégia DSMQ proposta foi também avaliada substituindo o método ELA tradicional pelo método estado-da-arte “Improved ELA”, conforme proposto por Zhang and Wang (2016), que neste trabalho foi denominado “I-ELA”. Foi observado que o método I-ELA apresenta resultados gerais muito melhores que o ELA original, e ainda assim a estratégia DSMQ proposta provou ser capaz de produzir quadros híbridos ainda melhores que os quadros I-ELA puros.

Tabela 3: Número de quadros gerados pela estratégia DSMQ proposta com PSNR maior que o quadro ELA.

Quadro final com PSNR maior que o quadro ELA			
Arquivo	Quadros	PSNR maior	Eficiência (%)
akiyo.avi	297	297	100,0
balls.avi	200	0	0,0
Blue_Sky.avi	200	0	0,0
carphone.avi	379	357	94,2
Cat_jump.avi	200	200	100,0
coastguard.avi	297	291	98,0
container.avi	297	297	100,0
Countdown_timer.avi	200	183	91,5
Dolphin.avi	200	0	0,0
Earth_Zoom.avi	200	0	0,0
flame.avi	103	0	0,0
football.avi	649	482	74,3
foreman.avi	397	313	78,8
miss_am.avi	147	147	100,0
MoonandSea.avi	200	200	100,0
mother.avi	297	296	99,7
shaky_car.avi	129	41	31,8
silent.avi	448	448	100,0
suzie.avi	147	116	78,9
tabletennis.avi	649	649	100,0
viplane.avi	77	34	44,2
viplanedeparture.avi	334	51	15,3
vimosaicking.avi	69	5	7,2
viptraffic.avi	118	109	92,4
viptrain.avi	623	623	100,0
vipwarnsigns.avi	294	146	49,7
Total==>	7151	5285	73,9

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O processo básico é o mesmo, apenas alterando o quadro ELA pelo quadro I-ELA. O quadro base permanece o da média intercampos. Os valores de limiar para *Spot Index* e *Spot Factor* também são os mesmos. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas 4, 5 e 6.

A Tabela 4 mostra o PSNR do método I-ELA puro em relação ao quadro gerado pela estratégia DSMQ, com base no quadro da média intercampos. Neste teste, o efeito *feathering* foi corrigido localmente utilizando os pixels do quadro I-ELA.

Tabela 4: Comparação do PSNR para um conjunto de arquivos de vídeo com resoluções de quadros diferentes submetidos ao algoritmo *Improved-ELA* (I-ELA) e à estratégia DSMQ proposta.

PSNR (dB)				
Arquivo	Intercampos	I-ELA	Híbrido	DSMQ
akiyo.avi	55,6981	48,2176	51,9615	55,6778
balls.avi	27,1412	34,5500	34,6672	34,5603
Blue_Sky.avi	43,4834	43,8030	44,1658	44,1278
carphone.avi	36,1225	34,0910	36,4774	36,1769
Cat_jump.avi	56,3671	56,2527	56,2590	56,2590
coastguard.avi	37,5286	31,4285	33,9515	37,5476
container.avi	54,9079	47,3836	50,5765	54,9016
Countdown_timer.avi	48,2674	44,1960	47,0839	49,4693
Dolphin.avi	40,7888	45,3716	45,4355	45,4215
Earth_Zoom.avi	45,7395	45,3537	45,8400	45,4621
flame.avi	20,3185	31,8839	31,7212	31,8839
football.avi	26,1869	26,4226	26,9065	26,9141
foreman.avi	37,0078	33,6583	36,4975	37,7045
miss_am.avi	43,1547	40,3893	42,1508	43,1497
MonnandSea.avi	35,8147	32,4660	33,9453	35,8077
mother.avi	50,0373	48,1176	49,8760	50,0393
shaky_car.avi	31,8734	32,0435	32,7753	32,9933
silent.avi	42,6230	40,8024	43,3663	42,6326
suzie.avi	42,7375	39,7565	42,3770	42,9862
tabletennis.avi	28,5308	28,4628	28,8094	28,7693
viplane.avi	33,5855	32,3860	33,7937	34,3665
viplanedeparture.avi	34,9041	37,3741	38,3662	37,3061
vipmosaicking.avi	31,1651	31,7415	32,9164	32,3939
viptraffic.avi	30,6224	34,1803	34,2719	33,4923
viptrain.avi	36,0447	34,5251	36,3422	36,0615
vipwarnsigns.avi	28,8373	30,0107	30,3748	30,0648
Média Ponderada ==>	37,9163	36,8245	38,3102	38,8471

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Pode ser visto na Tabela 4 que os quadros I-ELA apresentam melhor PSNR geral do que os quadros ELA tradicional; no entanto, a estratégia DSMQ proposta também foi capaz de melhorar a qualidade dos quadros I-ELA.

A Tabela 5 mostra a melhoria da qualidade da imagem em termos de MSSIM, obtida pela estratégia DSMQ proposta.

Tabela 5: Comparação de MSSIM para o mesmo conjunto de arquivos de vídeo da Tabela 4.

MSSIM				
Arquivo	Intercampos	I-ELA	Híbrido	DSMQ
akiyo.avi	0,9997	0,9986	0,9994	0,9997
balls.avi	0,9673	0,9939	0,9940	0,9939
Blue_Sky.avi	0,9980	0,9981	0,9981	0,9981
carphone.avi	0,9760	0,9723	0,9792	0,9764
Cat_jump.avi	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996
coastguard.avi	0,9865	0,9736	0,9821	0,9869
container.avi	0,9993	0,9992	0,9993	0,9993
Countdown_timer.avi	0,9995	0,9998	0,9998	0,9998
Dolphin.avi	0,9952	0,9976	0,9976	0,9976
Earth_Zoom.avi	0,9961	0,9961	0,9963	0,9960
flame.avi	0,6703	0,9605	0,9575	0,9605
football.avi	0,9277	0,9411	0,9436	0,9434
foreman.avi	0,9618	0,9642	0,9748	0,9755
miss_am.avi	0,9835	0,9804	0,9827	0,9835
MonnandSea.avi	0,9989	0,9978	0,9989	0,9989
mother.avi	0,9972	0,9966	0,9973	0,9972
shaky_car.avi	0,9490	0,9568	0,9588	0,9585
silent.avi	0,9933	0,9930	0,9946	0,9934
suzie.avi	0,9876	0,9861	0,9898	0,9891
tabletennis.avi	0,9564	0,9626	0,9641	0,9639
viplane.avi	0,9535	0,9589	0,9619	0,9618
viplanedeparture.avi	0,9831	0,9876	0,9891	0,9875
vipmosaicking.avi	0,9555	0,9605	0,9660	0,9639
viptraffic.avi	0,9589	0,9761	0,9775	0,9760
viptrain.avi	0,9797	0,9783	0,9812	0,9798
vipwarnsigns.avi	0,9207	0,9313	0,9348	0,9335
Média Ponderada ==>	0,9700	0,9770	0,9796	0,9793

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A Tabela 6 mostra que a estratégia DSMQ proposta melhorou a qualidade geral em 77,0% dos quadros I-ELA.

Tabela 6: Número de quadros nos quais o PSNR do quadro gerado pela estratégia DSMQ é maior que o do quadro I-ELA.

Quadro final com PSNR maior que o quadro I-ELA		
Arquivo	PSNR maior	Eficiência (%)
akiyo.avi	252	84,8
balls.avi	200	100,0
Blue_Sky.avi	189	94,5
carphone.avi	334	88,1
Cat_jump.avi	27	13,5
coastguard.avi	292	98,3
container.avi	276	92,9
Countdown_timer.avi	186	93,0
Dolphin.avi	106	53,0
Earth_Zoom.avi	32	16,0
flame.avi	0	0,0
football.avi	552	85,1
foreman.avi	346	87,2
miss_am.avi	144	98,0
MonnandSea.avi	200	100,0
mother.avi	229	77,1
shaky_car.avi	107	82,9
silent.avi	311	69,4
suzie.avi	132	89,8
tabletennis.avi	463	71,3
viplane.avi	72	93,5
viplanedeparture.avi	216	64,7
vipmosaicking.avi	53	76,8
viptraffic.avi	34	28,8
viptrain.avi	550	88,3
vipwarnsigns.avi	201	68,4
Total==>	5504	77,0

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.2.4 Análise estatística dos resultados

A primeira análise estatística dos dados obtidos foi o teste de normalidade D'Agostino, com suporte do programa Bioestat. Este teste foi realizado considerando o número de quadros gerados pela estratégia de desentrelaçamento DSMQ proposta com PSNR maior que os quadros gerados pelo método ELA e pelo método I-ELA. O resultado do teste da normalidade da Tabela 3 e da Tabela 6 (número de quadros com PSNR maior) está mostrado no Quadro III.

Quadro III: Tela do Teste D'Agostino realizado pelo programa BioEstat.

Resultados	Coluna 1	Coluna 2
Tamanho da amostra =	26	26
D (Desvio) =	0.2861	0.2806
Valores críticos 5%	0.2647 a 0.2866	0.2647 a 0.2866
Valores críticos 1%	0.2570 a 0.2872	0.2570 a 0.2872
p =	ns	ns

O Quadro III mostra que os dados da Tabela 3 e da Tabela 6 são normais para valores críticos 5%, (nível de significância α igual a 5%), portanto podemos utilizar análise paramétrica dos dados. O “valor-p” obtido para hipótese de não normalidade foi “ns” (não-significante) para os dados dos dois métodos utilizados para correção e comparação (método ELA na Coluna 1 e I-ELA na Coluna 2).

Para verificar a significância estatística dos testes realizados, foi realizado um teste de hipótese considerando os quadros gerados pelo método de desentrelaçamento proposto. É possível determinar em qual proporção a estratégia DSMQ proposta é capaz de produzir quadros com maior PSNR utilizando o teste de hipóteses descrito na seção 3.5.3.

Para a comparação da estratégia DSMQ proposta com o método ELA (Tabela 3), considerando a amostra com $n=7151$, obteve-se um número de 5285 quadros em que o quadro gerado pela estratégia DSMQ proposta possui PSNR maior que o quadro ELA. Calcula-se p' (proporção amostral), que resulta em 0,739 (73,9%). Considerando um nível de significância α igual a 5%, o intervalo de rejeição é dado por $RC = \{Z \leq -1,65\}$, determina-se Z (distribuição padronizada da média amostral $\bar{x}$) de acordo com (13). Para obter $Z=-1,65$, a proporção p deve ser igual a 0,748. Deste modo, pode-se afirmar que a hipótese de que a estratégia DSMQ proposta produz quadros com maior PSNR que o método ELA possui uma proporção de melhoria p de 74,8%, considerando um nível de significância α de 5%.

Para a comparação da estratégia DSMQ proposta com o método I-ELA (Tabela 6), considerando a amostra com $n=7151$, obteve-se um número de 5504 quadros em

que o quadro DSMQ possui PSNR maior. O valor de p' é de 0,770 (77,0%). Para obter $Z=-1,65$, a proporção p deve ser igual a 0,778. Deste modo, da mesma maneira que foi determinado para a comparação com o método ELA tradicional, pode-se afirmar que a hipótese de que a estratégia DSMQ proposta produz quadros com maior PSNR que o método I-ELA possui uma proporção de melhoria p de 77,8%, considerando um nível de significância α de 5%.

4.2.5 Avaliação do esforço computacional

Em termos de comparação de esforço computacional, a Tabela 7 mostra o consumo médio de tempo relativo para os principais processos, executados na plataforma Matlab 2012a. A medida de tempo foi realizada em todos os quadros de cada arquivo de vídeo, e os valores na Tabela 7 representam o tempo médio dessas medições em relação ao tempo consumido pelo método da média intercampos, que é o método mais simples entre os avaliados.

O sistema de computação utilizado nos testes é baseado em um processador Intel I5-3230M, 2,6 GHz, 6 GB de RAM DDR3, executado no Windows 8.1. Somente o MatLab estava em execução durante os testes, sem conexões de rede. Decidiu-se por apresentar valores de tempo relativos devido às diferentes resoluções de quadros para o conjunto de arquivos de vídeo submetidos ao teste.

Como pode ser verificado na Tabela 7, o gargalo do processamento é a determinação do mapa de efeito *feathering*. Pode também notar-se que a resolução do quadro não determina necessariamente o tempo de processamento relativo, o que depende muito mais das características específicas do efeito *feathering* presente nos quadros desentrelaçados.

O processo I-ELA também pode ser considerado pesado, sendo cerca de seis vezes mais lento que o algoritmo ELA tradicional. Uma vez que a estratégia DSMQ proposta exige a execução de um método intracampo, o consumo final de tempo total é realmente alto, quando comparado aos métodos mais simples, como o método da média intercampos e o método ELA tradicional.

Tabela 7: Esforço computacional para os principais processos, em relação ao método da média intercampos.

Consumo de tempo médio, relativo ao método da média intercampos					
Arquivo	Resolução	ELA	I-ELA	Mapa	Híbrido
akiyo.avi	144x176	60,2	281,0	1029,1	28,9
balls.avi	1920x1080	52,6	226,7	884,6	24,1
Blue_Sky.avi	1920x1080	48,2	252,5	1018,6	21,0
carphone.avi	144x176	62,4	440,3	1039,2	34,0
Cat_jump.avi	1920x1080	46,5	257,5	915,6	20,9
coastguard.avi	144x176	74,1	388,5	527,2	39,2
container.avi	144x176	56,5	318,5	961,5	33,2
Countdown_timer.avi	1920x1080	45,4	218,2	934,3	21,5
Dolphin.avi	1920x1080	46,2	244,8	999,7	22,1
Earth_Zoom.avi	1920x1080	48,9	268,2	1034,7	24,5
flame.avi	240x320	74,0	484,8	1328,2	38,4
football.avi	486x720	57,5	339,0	585,8	30,1
foreman.avi	144x176	62,1	306,0	903,7	28,3
miss_am.avi	144x176	58,2	317,9	1177,2	30,2
MonnandSea.avi	1920x1080	58,9	226,7	848,2	29,2
mother.avi	144x176	60,9	450,8	1023,9	30,6
shaky_car.avi	240x320	73,9	394,1	1189,5	38,8
silent.avi	144x176	67,0	363,3	881,8	33,0
suzie.avi	144x176	65,8	331,0	1075,6	31,2
tabletennis.avi	486x720	61,2	344,7	480,7	27,8
viplane.avi	168x360	90,2	488,4	1561,3	48,0
viplanedeparture.avi	240x360	79,5	460,1	1726,4	39,2
vipmosaicking.avi	240x320	71,6	483,8	1115,9	34,0
viptraffic.avi	120x160	52,5	297,1	828,5	27,8
viptrain.avi	240x360	81,7	434,1	1236,8	40,1
vipwarnsigns.avi	180x360	86,2	524,0	1109,5	41,2
	Média ==>	63,2	351,6	1016,1	31,4

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

No próximo capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o detector de efeito *feathering* e sobre a estratégia de desentrelaçamento DSMQ propostos.

5. CONCLUSÕES

5.1 Detector de efeito *feathering*

Verificou-se a hipótese sobre a natureza periódica do efeito *feathering*. Com base nessa verificação preliminar de hipóteses, os testes realizados indicaram que o algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto possui acurácia de 94,2% e é capaz de identificar artefatos de vídeo em várias situações e características de movimento de objetos, tamanho dos objetos, contraste para o plano de fundo da imagem, contribuindo para identificação e posterior correção local de artefatos gerados pelo processo de desentrelaçamento. O detector proposto permite que as correções sejam realizadas apenas nas regiões em que elas são necessárias.

Os resultados obtidos na avaliação do detector representados pela curva ROC da Figura 34 comprovam que o detector tem alta sensibilidade associada a alta especificidade, podendo ser considerado um detector muito bom, pois todos os pontos estão bem distantes da diagonal de *random guess*. A curva *Recall x Precision* apresentada na Figura 35 também demonstra que o detector tem bom desempenho, pois a curva traçada fica na região superior do gráfico, indicando alta sensibilidade associada a alta precisão.

Os testes realizados mostraram que o algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto é invariante à direção do movimento dos objetos e ao contraste dos objetos em relação ao plano de fundo. Também é invariante à resolução da imagem e ao tamanho do objeto.

Como esperado do detector, a principal sensibilidade do algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto está relacionada com o nível de deslocamento em pixels, já que o efeito *feathering* aumenta a percepção visual quando a velocidade dos objetos é maior.

Considerando a semelhança (em termos de percepção visual subjetiva) entre o mapa de efeito *feathering* gerado pelo algoritmo de detecção de efeito *feathering* proposto e o mapa MSSIM proposto por Wang et al. (2004), e o fato de não ser

necessário ter disponível a imagem *ground truth* para gerar o mapa proposto, pode haver um potencial a ser explorado na utilização do mapa de efeito *feathering* como um medidor objetivo de qualidade de imagem sem referência.

5.2 Estratégia de desentrelaçamento DSMQ

Uma estratégia de desentrelaçamento para melhorar a qualidade da imagem, denominada “Desentrelaçamento pela Seleção do Melhor Quadro”, foi testada com sucesso. O algoritmo de detecção de efeito *feathering* associado à determinação do *Spot Index*, comprovou ser uma estratégia capaz de contribuir para o avanço (em termos de qualidade de imagem) para os métodos de desentrelaçamento de vídeo.

Verificou-se que alguns quadros da média intercampos possuem alto PSNR e MSSIM, mas também alto nível de efeito *feathering*, e que nesta situação de alto desconforto visual é melhor optar pela diminuição dos valores de PSNR e ter maior conforto visual. Deste modo, pode-se concluir que o valor de PSNR e MSSIM nem sempre refletem a qualidade percebida em quadros desentrelaçados, e não devem ser utilizadas isoladamente para avaliação de qualidade de imagem em quadros produzidos por campos entrelaçados. Para esta aplicação, em que pode ocorrer a presença de efeito *feathering*, a utilização do *Spot Index* associado ao PSNR mostrou-se uma técnica mais adequada para avaliação de qualidade visual de imagem.

Mais de 7000 quadros de vídeo com diferentes características de movimento e resolução foram processados pela estratégia DSMQ proposta, mantendo os mesmos valores de limiar para *Spot Factor* e *Spot Index*. Foi feita a combinação da técnica da média intercampos ora com a técnica ELA tradicional, ora com a técnica *Improved-ELA*. Nestas duas combinações, o tipo de quadro com melhor qualidade visual foi selecionado corretamente para a maioria dos quadros, o que comprova a melhoria da qualidade geral de imagem dos arquivos de vídeo processados.

A estratégia DSMQ proposta possui resultados de qualidade de imagem geral superiores quando comparamos a qualidade de imagem das outras técnicas avaliadas separadamente, ou seja, apesar de cada técnica avaliada apresentar

qualidade superior em determinadas situações e características específicas do quadro e tipo de vídeo, a estratégia DSMQ proposta é capaz de produzir ou selecionar o melhor tipo de quadro na maioria das vezes.

Vale ressaltar que a estratégia DSMQ de desentrelaçamento proposta só melhora a qualidade do quadro final se o quadro da média intercampos apresentar boa qualidade em pelo menos algumas regiões; caso contrário, a estratégia DSMQ proposta não traz ganhos de qualidade, podendo até mesmo piorar sua qualidade.

Outros métodos de desentrelaçamento ou processos de melhoria de qualidade de imagem podem tirar proveito da estratégia DSMQ proposta, como técnicas de compensação de movimento como descrito por Bellers & Haan (1998), apenas mantendo o mesmo procedimento de identificação de efeito *feathering* sobre um tipo básico de quadro e substituir estas regiões pela região equivalente de um quadro produzido por outro método e livre dos artefatos.

5.3 Esforço computacional dos algoritmos

Em termos de tempo de processamento, a rotina do mapa de efeito *feathering* precisa de melhorias para diminuir o tempo utilizado pelo processo computacional, mas mesmo assim, certamente, não cumpriria os requisitos de tempo. É obrigatório reduzir drasticamente o tempo de execução para que seja possível utilizar efetivamente a estratégia DSMQ proposta em aplicação real e alcançar as taxas de quadros da transmissão de TV comercial.

Estas taxas podem ser atingidas pela implementação do algoritmo da estratégia DSMQ em hardware reconfigurável de alto desempenho do tipo FPGA, de modo similar ao proposto por Çavuslu (2016), ou em sistemas baseados em GPU, semelhante ao proposto por Bi (2017).

5.4 Trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas indicações de trabalhos futuros:

- Realizar uma análise mais aprofundada da aplicação do mapa de efeito *feathering* como uma métrica de qualidade de imagem sem referência;
- Um estudo mais detalhado sobre a otimização dos limiares de *Spot Factor* e *Spot Index* pode ser produzido a partir dos resultados do trabalho proposto, de modo a aumentar a qualidade da imagem produzida pela estratégia DSMQ proposta;
- Realizar a implementação da estratégia proposta DSMQ em plataforma baseada em FPGA ou GPU de modo a atender aos requisitos de tempo de processamento para aplicação real em aparelhos de TV;
- Como a estratégia DSMQ proposta duplica o número da linha do quadro, ela também pode ser explorada por processos de *upscaling* de vídeo, como a conversão do padrão 1080i *full* HD para 8K UHD, proposto por Chang & Fan (2017).

5.5 Contribuições

As contribuições desta tese são descritas a seguir:

- Um detector de artefatos de vídeo do tipo “efeito *feathering*” que se baseia no comportamento do valor médio (AVG) e eficaz (EFT) local dos artefatos;
- Uma métrica de avaliação de qualidade de imagem sem referência com base em um “índice de aglomeração de artefatos”, denominado *Spot Factor*;
- Uma estratégia de desentrelaçamento de vídeo denominada “Desentrelaçamento pela Seleção do Melhor Quadro” (DSMQ);

5.6 Publicações

Este trabalho gerou quatro publicações, indicadas a seguir:

- “True-Motion Estimation and Compensation with Multitemporal Block-Matching Search” - IJCA (2015);
- “A Feathering Effect Detector Based on Local Average and Effective Values” – IJCA (2016);

- “A replacement based video de-interlacing technique by feathering effect detection and artifact agglomeration index” – WVC2017 e IEEE (2018);
- “Feathering Effect Detection and Artifact Agglomeration Index-Based Video De-interlacing Technique” – Journal of Electronic Imaging – SPIE - fase final de revisão (2018).

REFERÊNCIAS¹

ABNT NBR 15604:2007. **Televisão digital terrestre – Receptores**. ABNT, versão corrigida 07.04.2008. Website da ABNT. http://www.abnt.org.br/imagens/Normalizacao_TV_Digital/ABNTNBR15604_2007Vc_2008.pdf. Acesso em: 17 set. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – ANATEL. Website da ANATEL. <http://www.anatel.gov.br/>. Acesso em: 17 jan. 2017.

ALENCAR, M. S. **Televisão Digital**. 2.a edição. Editora Érica. 2012.

ARCHITECTS OF TOMORROW. Banco de arquivo de vídeo de domínio público. Website: https://archive.org/details/Architects_of_Tomorrow. Acesso em: 03 nov. 2016.

ARGYRIOU, V., VLACHOS, T. **A study of sub-pixel motion estimation using phase estimation**. Proc. British Machine Vision Conf., Edinburgh, UK, vol. 1, pp. 387-396, 2006.

BAEZA-YATES, R. A.; RIBEIRO NETO, B. **Modern Information Retrieval**. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1999.

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INCORPORATED (USA). NETRAVALI, A. N. ROBBINS, J.D. **Video signal interpolation using motion estimation**. US Patent US4383272 A, 1983.

BELLERS, E. B., HAAN, G. **Advanced De-Interlacing Techniques**. Philips Research Laboratories, Television Systems Group, The Netherlands, 1996.

BELLERS, E. B., HAAN, G. **De-interlacing: A Key Technology for Scan Rate Conversion**. Elsevier, Amsterdam, 2000.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023 2002).

BELLOEIL, C. E. H. **Motion estimation with the phase correlation method**. Philips Research Laboratories. Internal report no. 2595, 1987.

BERNARDINI, R., VETTORE, A. **A phase correlation algorithm for multicomponent images**. Proceedings of SPIE Vol. 4309, pp. 328-335, 2001.

BI, Y., ZHANG, X., GAO, Z. **A New Source-Side De-interlacing Method for High Quality Video Content**. Springer Nature Singapore, pp. 12-23, 2017.

BISWAS, M., T. NGUYEN. **A novel de-interlacing technique based on phase plane correlation motion estimation**. Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Bangkok, Thailand, pp. 604-607, 2003.

BOVIK, A. **The Essential Guide to Image Processing**, Elsevier, 2009.

BROX, P. et al. **Edge-adaptive Spatial Video De-interlacing Algorithms Based on Fuzzy Logic**. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 60, No. 3, 2014.

ÇAVUŞLU, M.A. ; KARAKAYA, F., BALKOCA, A. **Implementation of edge dependent interpolation based de-interlacer on FPGA**. 24th Signal Processing and Communication Application Conference (ICSP), IEEE, 2016.

CHANG, Y.L, LIN, S.F., CHEN, C., CHEN, L.G. **Video De-Interlacing by Adaptive 4-Field Global/Local Motion Compensated Approach**. IEEE Trans. On Circuits and Systems for Video Technology, vol. 15, no. 12, pp 1569-1582, 2005.

CHANG, Y. M., FAN, C. P. **Spatial-domain edge-directed interpolation based de-interlacing to up-scaling technology for 1080i Full HD to Progressive 8K Ultra HD**. IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp. 275-276, 2017.

CHEN, Y.R., TAI, S.C. **True Motion-Compensated De-Interlacing Algorithm**. IEEE Trans. On Circuits and Systems for Video Tech., vol. 19, no. 10, pp. 1489-1498, 2009.

CORREA, S. M. B. B. **Probabilidade e Estatística**. 2.a Edição. Belo Horizonte. PUC Minas Virtual, 2003.

D'AGOSTINO, R. B. AND STEPHENS, M. A. **Goodness-of-Fit Techniques**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1986.

DAVIS, J., GOADRIC, M. **The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves**. Appearing in Proceedings of the 23 rd International Conference on Machine Learning, Pittsburgh, PA, 2006.

DOYLE, T., LOOYMANS, M. **Progressive scan conversion using edge information**. Signal Processing of HDTV, II, Elsevier, pp. 711-721, 1990.

FAN, Y.C, CHUNG, C.H. **De-interlacing Algorithm Using Spatial-temporal Correlation-Assisted Motion Estimation**. IEEE Trans. On Circuits and Systems for Vídeo Tech., vol. 19, no. 7, pp. 932-944, 2009.

FERRAZ, C. T. et al. **Object recognition based on bag of features and a new local pattern descriptor**. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, v. 28, n. 8, p.14550101 – 145501032, 2014.

HAAN, G. et al. **True motion estimation with 3-D recursive search block matching**. IEEE Transactions. Circuits Syst. Vídeo Technology, vol. 3, no. 5, pp. 368–379, 1993.

HAAN, G., BELLERS, E. B. **De-interlacing of vídeo data**. IEEE Transactions on Consumer Electrononics, vol. 43, no. 3, pp. 819-825, 1997.

HAAN, G., BELLERS, E. B. **De-interlacing - An overview**. Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 9, pp. 1839-1857, 1998.

HEIKKILÄ, M.; PIETIKÄINEN, M.; SCHMID, C. **Description of interest regions with local binary patterns**. Pattern Recognition, v. 42, p. 425 – 436, 2009.

INSTITUTO MAMIRAUÁ. Sobre o programa Bioestat versão 5.3; web site de download do programa: <http://www.mamiraua.org.br/pt-br/downloads/programas/bioestat-versao-53/>. Acesso em: 03 fev. 2017.

JAKHETIYA, V. et al. **Fast and efficient intra-frame deinterlacing using observation model based bilateral filter**. IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, pp. 5819-5823, 2014.

JAKHETIYA, V., LIN, W., JAISWAL, S.P., GUNTUKU, S. C., AU, O. C. **Maximum a Posterior and Perceptually Motivated Reconstruction Algorithm: A Generic Framework**. IEEE Transactions on Multimedia, Volume: 19 Issue: 1, pp. 93-106, 2016.

JEON, G., ANISETTI, M., BELLANDI, V., JEONG, J. **Fuzzy rule-Based Edge-Restoration Algorithm in HDTV Interlaced Sequences**. IEEE Trans. On Consumer Electronics, vol. 534, no. 2, pp 725-731, 2007.

JEONG, J., JEON, G., WANG, J. **De-Interlacing Algorithm Using Weighted Least Squares**. IEEE Trans. On Cir. & Syst. For Vídeo Tech, vol. 24-, no. 1, pp. 39-48, 2014.

KIM, J. **Adaptive Interpolation Algorithm Considering Total Edge Directions for Effective Deinterlacing**. International Journal of Software Engineering ans Its Applications. Ol.8, No.2, pp.41-50, 2014.

KIM, J., JEON, G., JEONG, J. **Autocorrelation-based interlaced to progressive format conversion**. Elsevier Digital Signal Processing 29, pp.67-77, 2014.

KUGLIN, C. D., HINES, D. C. **The phase correlation image alignment method**. Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society, San Francisco, pp. 163-165, 1975.

LIU, J. G., YAN, H. **Robust phase correlation methods for sub-pixel feature matching**. Proceeding of 1st Annual Conference of Systems Engineering for Autonomous Systems, Defence Technology Centre, A13, Edinburgh, UK, 2006.

LIU, J. G., YAN, H. **Robust Phase Correlation Based Feature Matching for Image Co-registration and DEM Generation**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7, pp. 1751-1756, 2008.

LURKERTech WEB SITE. <http://www.lurkertech.com>. Acesso em: 25 set. 2017.

MEGRICH, A. **Televisão Digital, Princípios e Técnicas**. 1.a edição. Editora Érica, 2009.

MELHORTVLCD WEB SITE. <http://www.melhortvlcd.com.br>. Acesso em: 30 set. 2017.

MICROSOFT CORP. **Broadcast-enabled computer hardware requirements**. WinHEC'97, Broadcast Technologies White Paper, pp. 11–12, 1997.

MOUNTS, F.W. **Low-resolution TV: An experimental digital system for evaluation bandwidth-reduction techniques**. Bell Labs Technical Journal, Vol. 46, Issue 1, pp. 167–198, 1966.

MOUNTS, F. W. **A vídeo encoding system with conditional picture-element replenishment**. The Bell System Technical Journal, Vol. 48, pp. 2545-2554, 1969.

MURGAI, P., TROCAN, M. **Spatial Edge Directed Vídeo Deinterlacing**. Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP), 2013 Conference on, 2013.

NETRAVALI, A. N., ROBBINS, J.D. **Motion compensated television coding: Part I**. The Bell System Technical Journal, 58, pp. 631-670, 1978.

OLHAR MULTIMIDIA WEB SITE. <http://www.olharmultimidiadec.blogspot.com.br>. Acesso em: 22 set. 2017.

O'NEAL, J. E. **Ulises A Sanabria and the Origins of Interlaced Television Images**. IEEE Broadcast Technology Society Newsletter, Vol 16, 2008, 15-18, 2008.

RCA CORP (USA). Randall C. Ballard. **Television System**. US PATENT US2152234A, July 19th, 1932.

REN, J., JIANG, J., VLACHOS, T. **High-Accuracy Sub-pixel Motion Estimation from Noisy Images in Fourier Domain**. IEEE Transactions on Image Processing, Vol.19, pp. 1379-1384, 2009.

ROCCA, F. **TV bandwidth compression utilizing frame-to-frame correlation and movement compensation**. In proc 1969 Symp, Picture Bandwidth Compression, ed. T.S. Huang and O.J. Tretiak, New York: Gordon and Breach, 1969.

ROSS, J. **Televisão Analógica e Digital**. 1.a edição. Antenna Edições Técnicas, 2007.

SANGWINE, S. J., ELI, T. A., MOXEY, C. E. **Vector phase correlation**. Electronics Letters, Vol. 37, issue 25, pp. 1513-1515, 2001.

SINGH, S., ARYA, R.K. , SHARMA, H. **A robust deinterlacing multiple image Watermarking technique in DWT**. 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT), IEEE, 2016.

SOFT AGE. Banco de arquivos de vídeo. <http://www.softage.ru/products/video-codec/demo-page/>. Acesso em: 22 jun. 2016.

SREEKANTH, S., CHAKRAPANI, Y., SRI, K.U. **Motion Adaptive Compensation Approach for Deinterlacing of Vídeo Sequences**. International Journal of Computer Applications, vol. 15, no. 3, pp. 0975-8887, 2011.

THE CONSUMER DIGITAL VIDEO LIBRARY. Repositório de arquivos de vídeo para testes. <http://www.cdvl.org/>. Acesso em: dez. 2017.

THE MATHWORKS, INC. Sobre a plataforma MatLab. Mathworks web site. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Acesso em: 05 mar. 2016.

THOMAS, G. A. **Television motion measurement for DATV and other applications**. BBC Research Department, Engineering Division. Internal report no. BBC RD 1987/11, 1987.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. 11.a Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora . Rio de Janeiro.1998.

UNIVERSIDADE DO TEXAS. Laboratory for Image & Vídeo Engineering web site, <http://live.ece.utexas.edu/research/Quality/index.htm>. Acesso em: 20 jul. 2016.

VANDENDORPE, L. et al. **Motion-compensated conversion from interlaced to progressive formats**. Signal Process.: Image Commun., vol. 6, pp. 193-211, 1994.

VIDEVO WEB SITE. Repositório de arquivos de video full HD para testes. <https://www.videvo.net/>. Acessado em: dez.2017.

WANG, J., JEON, G., JEONG, J. **A Block-Wise Autoregression-Based Deinterlacing Algorithm**. Journal of Display Technology, vol. 10, no. 5, pp. 414-419, 2014a.

WANG, J., JEON, G., JEONG, J. **De-Interlacing Algorithm Using Weighted Least Squares**. IEEE Trans. On Cir. & Syst.For Vídeo Tech, vol. 24, no. 1, pp. 39-48, 2014b.

WANG, J., JEON, G., JEONG, J. **A Hybrid Algorithm Using Maximum a Posteriori for Interlaced to Progressive Scanning Format Conversion**. Journal of Display Technology, vol. 11, issue 2, pp. 183-192, 2014c.

WANG, Z. , A.C. BOVIK, A.C., SHEIKH, H. R. and SIMONCELLI, E.P. **Image quality assessment: from error visibility to structural similarity**. IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, 2004.

WATKINSON, J. **The Engineer's Guide to Motion Compensation**. Snell&Wilcox, Petersfield, Hampshire, 1994.

WU, J., SONG, Z., JEON, G. **GPU-Parallel Implementation of the Edge-Directed Adaptive intra-Field Deinterlacing Method**. IEEE Journal of Display Technology, vol. 10, no. 9, pp. 746-753, 2014.

ZHAO, M., HAAN, G. **Subjective evaluation of de-interlacing techniques**. Proceedings of the SPIE, vol. 5685, pp. 683-691, 2005.

ZHANG, X., WANG, D. **An efficient motion adaptive deinterlacing algorithm using improved edge-based line average interpolation**. 13th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), 2016, pp. 659-662, Nov. 2016.

XIPH WEB SITE. Repositório de arquivos de vídeo para testes. <https://media.xiph.org/video/>. Acesso em: dez. 2017.