Shifted Gradient Similarity: A perceptual video quality assessment index for adaptive streaming encoding

Estêvão Chaves Monteiro (ecm3 arroba cin ponto ufpe ponto br)

Dissertação de Mestrado
Orientador: Carlos André Guimarães Ferraz
Recife, Março/2016

Centro de Informática UFPE
Universidade Federal de Pernambuco

Sumário

1. Introdução
2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo
3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java
4. Experimentos
5. Conclusões

1. Introdução

- *Vídeo constitui 64% do tráfego de Internet para consumidor.*
- *Netflix, Youtube e Amazon Video dominam o setor de serviços de streaming e lideram a adoção de tecnologias de ponta.*
- *A proporção do volume de downloads de arquivos de vídeo P2P está caindo.*
- *Conteúdo HD (720p) e Full HD (1080p) tornou-se comum na Web.*
  - *HDTV/Blu-Ray: 18 a 40 Mbit/s.*
  - *1080p na Web: 3 a 8,5 Mbit/s.*
  - *Qualidade de experiência (QoE):*
    - *Qualidade visual (fidelidade): compressão mais eficiente.*

1. Introdução

Uma miríade de dispositivos.

- *Diversos tamanhos e resoluções de tela.*
- *Diversas capacidades de decodificação de vídeo.*

H.264 Constrained Baseline Profile.

- *Ubíquo em dispositivos com suporte a vídeo, inclusive embarcado.*
- *Equilibrado entre compressão e complexidade.*
- *Baixos requisitos de processamento e bateria.*

H.264 High Profile.

- *Ubíquo em dispositivos "HD-ready".*
- *Mais compressão, mais complexo e exigente com hardware.*

1. Introdução

Configurações típicas no streaming da Netflix: foco em qualidade.

Taxa de dados (kbit/s)	Resolução codificada	Proporção do pixel	Resolução de reprodução
235	320×240	4:3	426×240
375	384×288	4:3	512×288
560	512×384	4:3	682×384
750	512×384	4:3	682×384
1050	640×480	4:3	854×480
1750	720×480	32:27	854×480
2350	1280×720	1:1	1280×720
3000	1280×720	1:1	1280×720
4300	1920×1080	1:1	1920×1080
5800	1920×1080	1:1	1920×1080

1. Introdução

Eficiência de compressão de vídeo:

- *Redundâncias espaciais e temporais.*
  - *Densidade de quadros-chave.*
- *Otimização para a percepção humana.*
  - *Importância dos detalhes perdidos varia.*
  - *Qualidade física vs. qualidade psicovisual.*
  - *Métricas de qualidade visual perceptível.*
  - *Média do erro quadrático (e PSNR) é uma métrica inadequada.*
  - *Índice de similaridade estrutural (SSIM).*

1. Introdução

Objetivo: *aprimorar métricas baseadas em SSIM.*

- *Fast MS-SSIM, GMSD etc.*
- *Métricas serão decompostas nas suas técnicas componentes.*
- *Técnicas componentes serão recombinadas para comparar a eficácia e eficiência específica de cada uma.*
- *Técnica de realce proposta:* **gradiente deslocado (shifted gradient)**.
- *Filtros propostos:* **gaussianos 2σ 1D cruzados; Box subamostrado baseado em imagem integral**.

1. Introdução

Objetivo: *aprimorar métricas baseadas em SSIM (cont.).*

- *Implementação em Java, decodificando nativamente com FFmpeg e AviSynth:* **jVQA**.
- *Correlação com* **escores subjetivos** *de bases de imagens e vídeos acadêmicas.*
  - *Metodologia ITU-T VQEG.*
- *Comparação de* **eficiência** *(velocidade computacional).*
- *Investigação de* **escalabilidade** *entre resoluções variadas.*

1. Introdução

Métricas para **otimização de taxa-distorção (RDO)** *na compressão.*

- *PSNR-RDO: método clássico.*
- *SSIM-RDO: método contemporâneo. x264, x265, vpx, Daala…*
- *Psy-RDO: método inovador, psicovisual. x264, x265.*
- *Correlação com qualidade perceptível:*
  - **Psy-RDO > SSIM-RDO > PSNR-RDO.**
  - **Objetivo:** *Modificar SSIM para atingir essa classificação.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Escopo limitado por eficiência computacional.

- *Sem processar a dimensão temporal.*
  - *Ex.: VQM, ST-VSSIM, MOVIE, SSIMplus.*
- *Sem transformações complexas (wavelets, frequência).*
  - *Ex.: CW-SSIM, PSNR-HVS, Fixation SSIM, IW-SSIM, FSIM.*
- *Escopo final:*
  - *SSIM, MS-SSIM, Gradient SSIM, 3-SSIM, 4-SSIM, Fast MS-SSIM, GMSD.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Técnicas de análise baseadas em SSIM:

1) *Escala(s) de análise;*
2) *Realce de características espaciais (contraste);*
3) *Filtragem (pooling) de características espaciais;*
4) *Índice de similaridade local: produz o mapa de qualidade;*
5) *Consolidação do índice de similaridade global;*
6) *Similaridade de luminosidade (luma).*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Realce de características espaciais:

- *Covariância (SSIM, MS-SSIM);*
- *Covariância dos gradientes (Gradient SSIM);*
- *Covariância ponderada por segmentação por gradientes (3-SSIM, 4-SSIM);*
- *Gradientes (Fast SSIM, GMSD).*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Índice de similaridade:

- *Comparando imagens* **x** *&* **y***, pixel a pixel (com ou sem filtro).*
- *Covariância* σ_{xy}*: -1,0 a 1,0.*
- *Gradientes* ∇_x*: 0,0 a 1,0.*
- *Correlação de variância ou gradientes:*
  - *Se uma das magnitudes for zero, uma anula o outro no numerador e perdemos informação útil.*
  - *Solução: ajustar a magnitude por* $+1$ **(gradiente deslocado/shifted gradient)**.

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

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Mapa de qualidade ou de erro:

- *Índice de similaridade [0,1] é convertido para tons de cinza [0, 255].*
  - *SSIM=1,0 : branco (255) : idêntico.*
  - *SSIM=0,0 : preto (0) : extremamente diferente.*
- *Aberrações no mapa indicam problemas na eficácia da métrica.*
- *Se numerador = 0, então SSIM = 0; todavia, frequentemente, esse resultado não corresponde à realidade:*

  a) *Se x=y=0, SSIM deveria ser 1, não 0.*

  b) *Se x=0, y=1, então SSIM=0; mas a diferença relativa, perceptível, é muito menor que o extremo 0.*

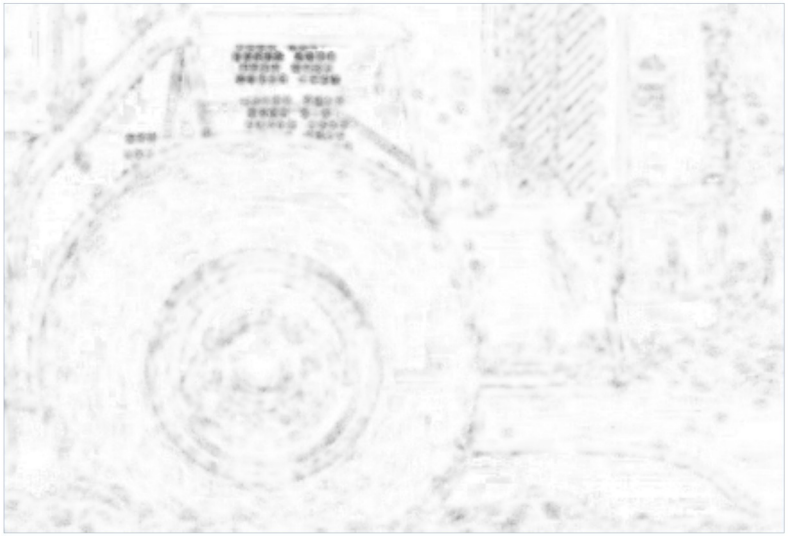
  c) *Se x=1, y=2, a diferença é de no máximo 4/5=0,8; "b" deveria se aproximar disso.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

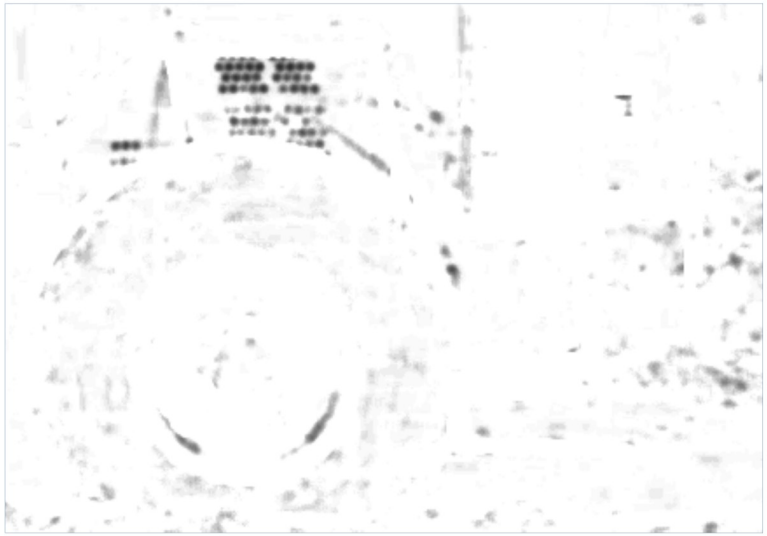
Imagem referencial

Versão comprimida da referência

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo



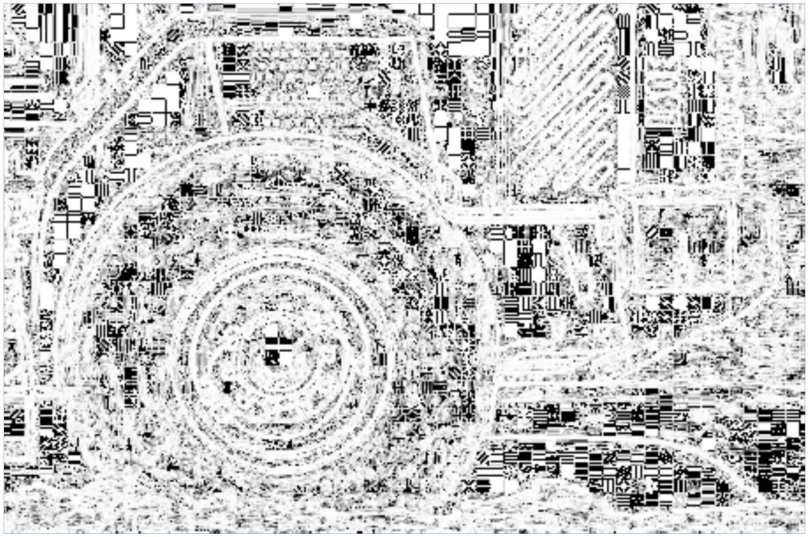
Mapa de qualidade por SSIM



Mapa de qualidade por Fast SSIM

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

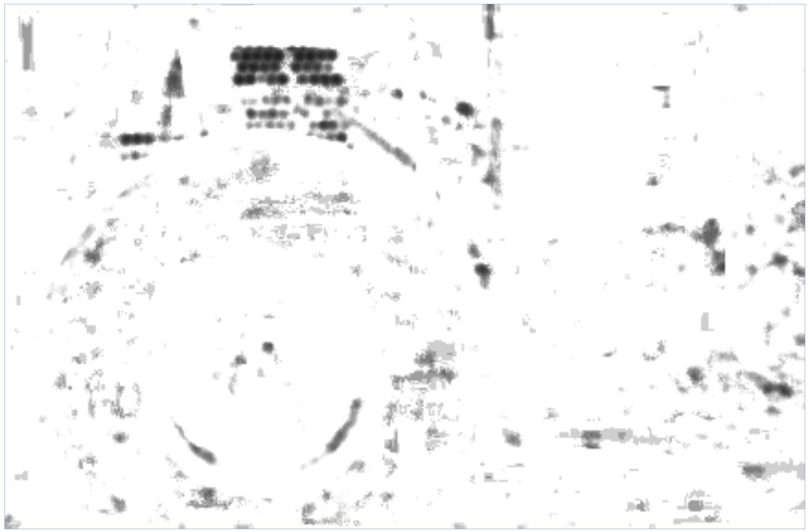
Mapa de qualidade por Fast SSIM com $C_1 = 0$.



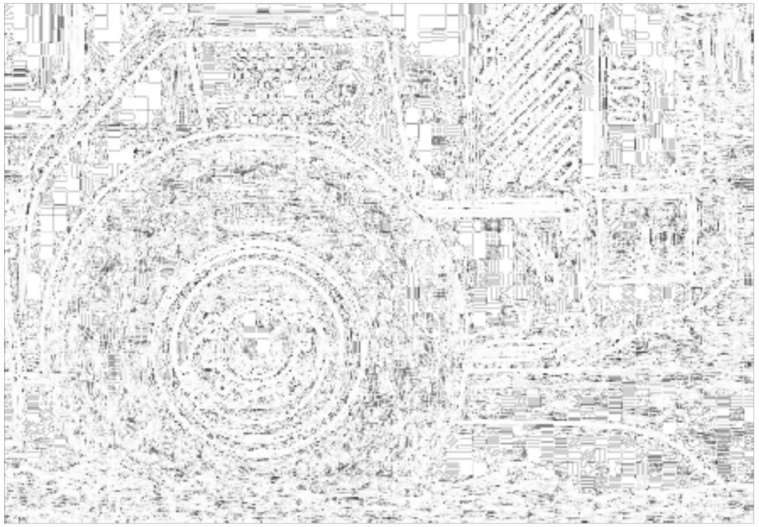
Mapa de qualidade por Fast SSIM com $C_1 = 0$ e sem filtro.

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

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo



Mapa de qualidade por Shifted Gradient Similarity com $C_1 = 0$.



Mapa de qualidade por Shifted Gradient Similarity sem filtro.

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Técnicas de estabilização do mapa de qualidade.

σ_x	σ_y	*SSIM* com C_1=58.5	*SSIM* com C_1=0	*SSIM* com C_1=0, σ_x+1, σ_y+1
0	1	0.9832	0.0000	0.8000
1	2	0.9843	0.8000	0.9231
0	8	0.4776	0.0000	0.2195
1	9	0.5445	0.2195	0.2289
150	200	0.9600	0.9600	0.9604

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

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Filtros de agregação (pooling) de características espaciais.

- *Índice de qualidade de imagem universal (Wang & Bovik): filtro Box (média) 8×8.*
  - *Mapa de erro quadriculado.*
- *SSIM: filtro Gaussiano (distribuição normal 2D) 11×11 (3,3σ), σ =1,5.*
  - *Contornos suaves e naturais.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Operador gaussiano de $\sigma = 1{,}5$, 11×11 ($3{,}3\sigma$).

0	1	5	16	31	39	31	16	5	1	0
1	8	39	117	229	286	229	117	39	8	1
5	39	183	556	1084	1353	1084	556	183	39	5
16	117	556	1690	**3292**	4111	**3292**	1690	556	117	16
31	229	1084	**3292**	6412	**8007**	6412	**3292**	1084	229	31
39	286	1353	4111	**8007**	10000	**8007**	4111	1353	286	39
31	229	1084	**3292**	6412	**8007**	6412	**3292**	1084	229	31
16	117	556	1690	**3292**	4111	**3292**	1690	556	117	16
5	39	183	556	1084	1353	1084	556	183	39	5
1	8	39	117	229	286	229	117	39	8	1
0	1	5	16	31	39	31	16	5	1	0

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Filtros de agregação (pooling) de características espaciais (cont.).

- *Fast SSIM: aproximação inteira do filtro gaussiano.*
  - *37,5% nulo!*

0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	**2**	**2**	1	0	0
0	1	**2**	4	4	**2**	1	0
1	**2**	4	**8**	**8**	4	**2**	1
1	**2**	4	**8**	**8**	4	**2**	1
0	1	**2**	4	4	**2**	1	0
0	0	1	**2**	**2**	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

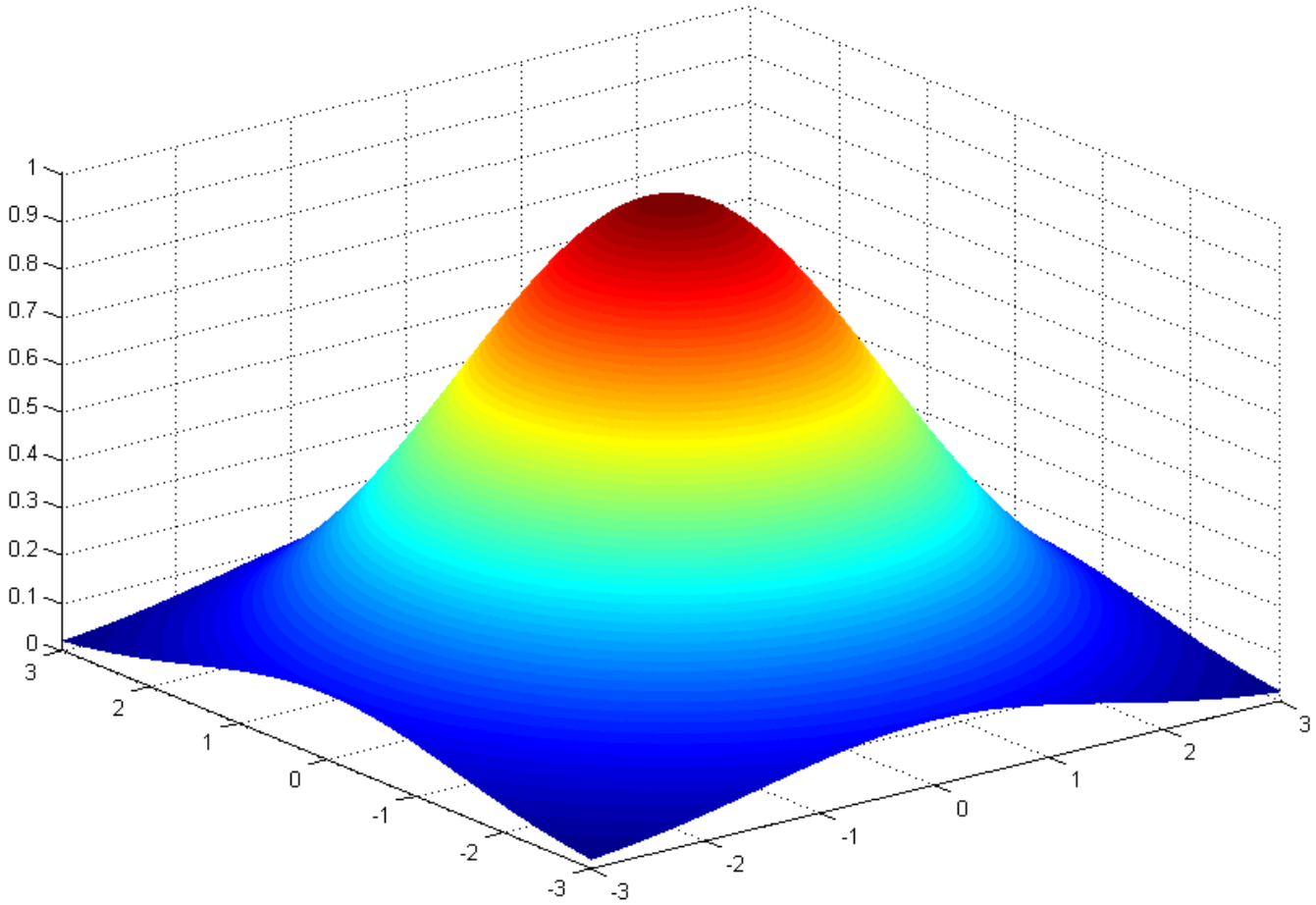
Proposta: *Otimização do filtro Gaussiano para SSIM.*

- *Distribuição normal.*
  - *3.3σ (11×11) = 99,7% dos pesos.*
  - *2σ (7×7) = 96%. 40,5% das operações de 11×11.*
  - *1.3σ (5×5) = 86%: 20,7% de 11×11.*

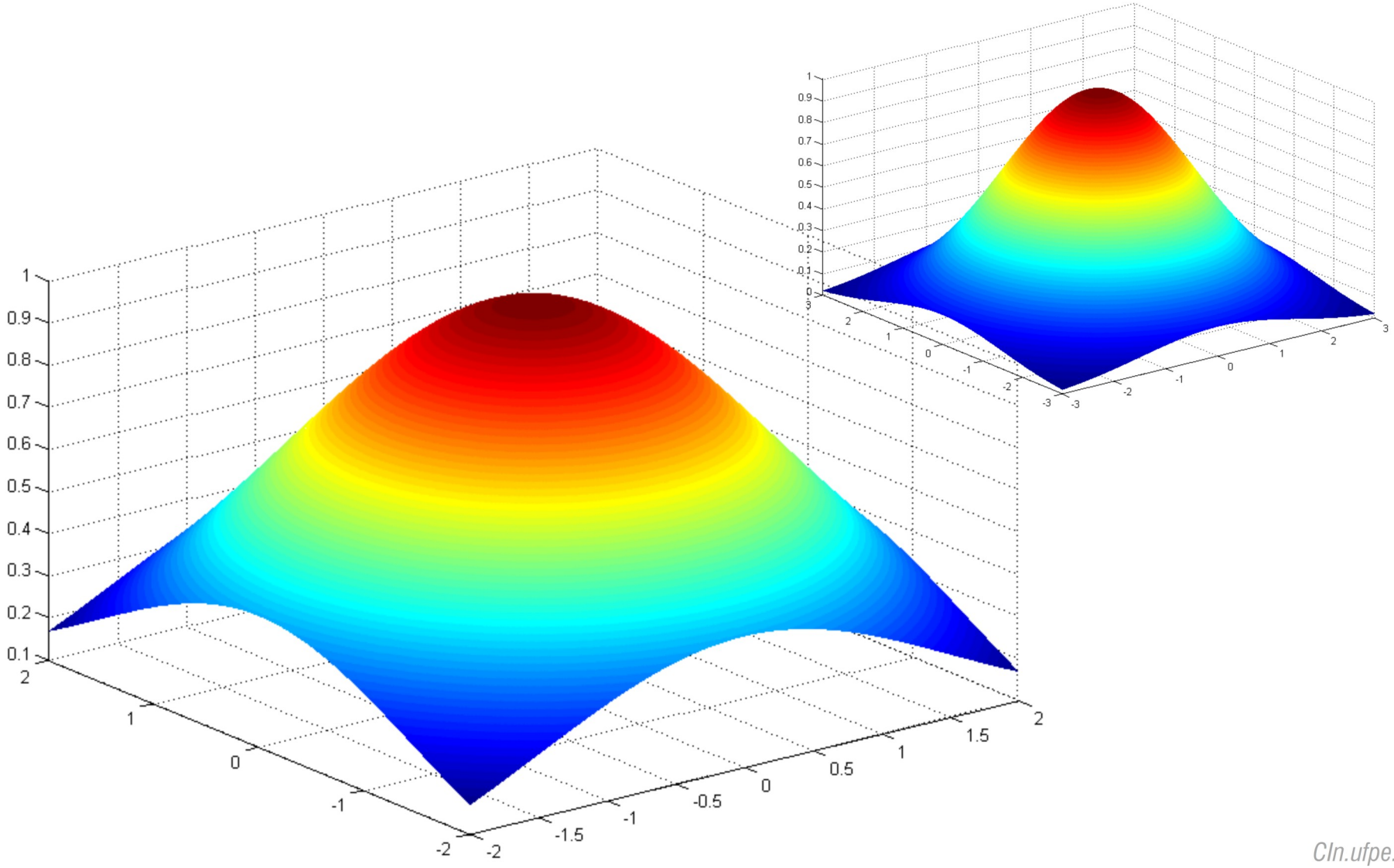
1	3	6	8	6	3	1
3	9	**18**	23	**18**	9	3
6	**18**	36	**45**	36	**18**	6
8	23	**45**	56	**45**	23	8
6	**18**	36	**45**	36	**18**	6
3	9	**18**	23	**18**	9	3
1	3	6	8	6	3	1

2	**4**	5	**4**	2
4	8	**10**	8	**4**
5	**10**	12	**10**	5
4	8	**10**	8	**4**
2	**4**	5	**4**	2

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo



2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo



2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Proposta: *Otimização do filtro Gaussiano para SSIM (cont.).*

- *Decomposição do operador 2D em operadores cruzados 1D.*
  - *Ganho de velocidade:* **36%**.

2	6	12	15	12	6	2

4	8	10	8	4

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Proposta: *Otimização do filtro Gaussiano para SSIM (cont.).*

- *7×7 e 5×5 resultam em valores de SSIM* **99%** *próximos dos de 11×11.*
  - *Coerência espacial de imagens naturais.*
- *7×7 e 5×5 em 2×1D são* **68%** *e* **89%** *mais rápidos que 11×11 2D.*
  - *24% e 30% comparados a 11×11 em 2×1D.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Proposta: *Otimização do filtro Box com subamostragem.*

- *Filtro Box 5×5 aproxima razoavelmente o Gaussiano 5×5.*
  - *SSIM resultantes são* **99%** *equivalentes.*
  - **68%** *mais rápido que o Gaussiano 11×11 em 2×1D.*
  - *Otimizado com imagem integral.*
  - *Menos sobreposição a blocos de transformação espacial (8×8).*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Filtro Box 5×5 subamostrado:

- *Segmenta a imagem, em vez de deslizar pixel a pixel.*
- *Todos os pixels contribuem com a mesma importância.*
- **96%** *menos posições para computar.*
- *SSIM continua* **98%** *equivalente ao Gaussiano.*

Filtro Box 7×7 subamostrado:

- **98%** *menos posições para computar.*
- *Menos sobreposição a blocos de transformação.*
- *SSIM* **99%** *equivalente ao Gaussiano.*
- **255%** *mais rápido que o Gaussiano 11×11 em 2×1D.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

GMSD não usa filtro.

- **619%** *mais rápido.*
- *Remover filtro de SSIM resulta na menor de todas as correlações entre o mapa de erro e a qualidade subjetiva.*
  - *GMSD compensa ao consolidar o mapa de erro pelo desvio padrão, em vez da média.*

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

O índice Shifted Gradient Similarity (SG-Sim):

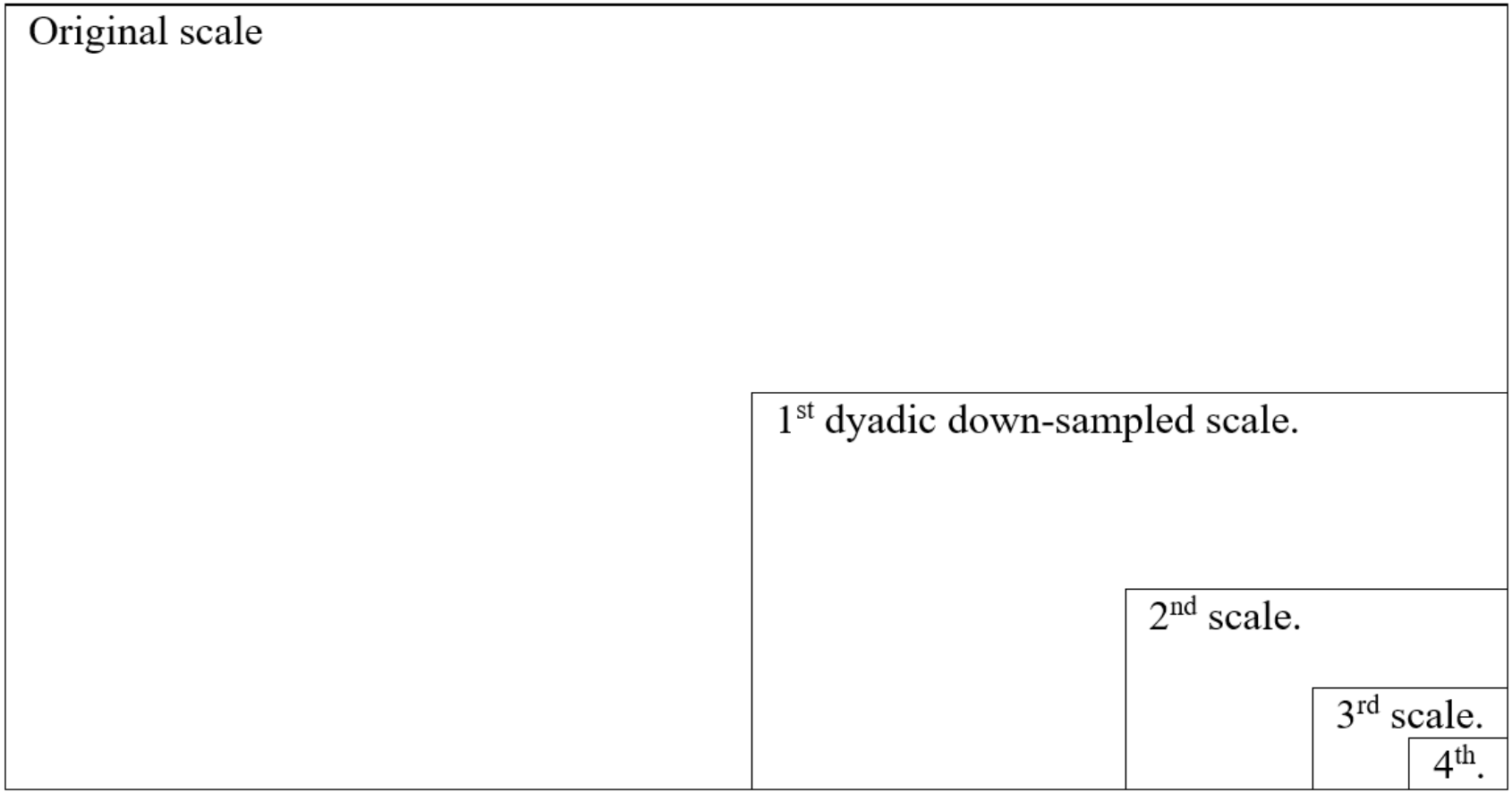
$$\mu_{\nabla S} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \nabla S_i$$

$$\mu_{\nabla SV} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (\nabla S_i \, \nabla V_i)$$

$$SG\text{-}Sim(S,V) = \frac{2\mu_{\nabla SV}}{\mu_{\nabla S}^2 + \mu_{\nabla V}^2}$$

2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Escalas de análise:



2. Aperfeiçoamento de técnicas de análise de qualidade de vídeo

Escalas de análise:

- *Filtro passa-baixa na subamostragem eleva o valor de SSIM.*
  - *Inconsistência entre valores de escalas diferentes.*

Similaridade de luma:

- *Pouco contribui ao índice.*
- *Tende a reduzir a predição de qualidade subjetiva.*

3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA

Requisitos primários de software:

- *Decompor e recombinar técnicas de análise de qualidade.*
- *Decodificação de imagem e vídeo.*
- *Execução em lotes.*

Matlab?

- *Requer vídeo puro YUV.*
  - *Arquivos muito grandes, decodificação lenta.*
- *Código interpretado e não otimizado para a aplicação.*
- *Proprietário, baixa portabilidade.*

3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA

Moscow State University Video Quality Measurement Tool (MSU VQMT)?

- *Métricas: MSE, PSNR, SSIM, MS-SSIM, 3-SSIM, ST-VSSIM.*
- *Arquivos: AVI, AviSynth, Y4M, YUV, BMP.*
- *Gráficos e estatísticas.*
- *Código otimizado para CPU e GPU.*
- *Software proprietário, requer licença para conteúdo HD.*
- *Não permite reconfigurar as métricas.*

3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA

AviSynth.

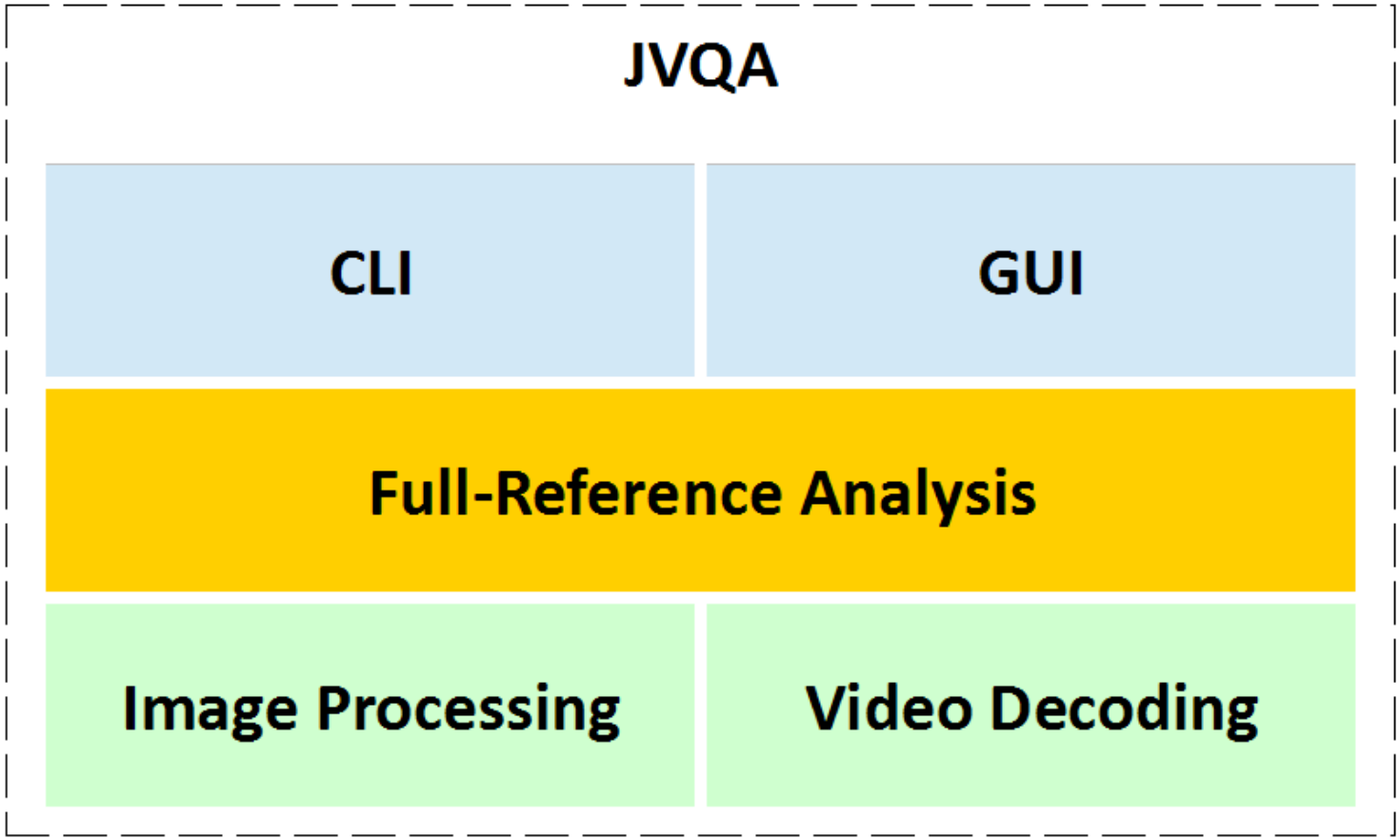
- *Usado em MSU VQMT, x264, x265, FFmpeg, MeGUI etc.*
- *Frameserver, usa os codecs nativos do sistema.*
- *Scripts processam o vídeo decodificado:*
  - *sincorniza, ajusta taxa de quadros, redimensiona, corta, desfaz entrelaçamento, filtra ruído e artefatos, corrige cores.*

3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA

jVQA.

- *Orientado a objetos: flexível, configurável, extensível, reusável, baixa redundância.*
- *Usa FFmpeg e AviSynth para decodificar vídeo e imagem.*
- *Suporta Ultra-HD 4K (3840×2160).*
- *GUI para testes rápidos e demonstrações, CLI para massas de testes.*
- *Implementações otimizadas de SSIM e demais métricas.*
- *Implementação realista para permitir comparação de complexidade das métricas.*

3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA



3. O arcabouço Video Quality Assessment in Java - jVQA

jVQA — Video Quality Assessment in Java

Input

AviSynth script - reference video

```
DirectShowSource("F:\jvqa\tid2008\tid2008-reference.mp4",
audio=false)
ConvertToYV12()
```

Select reference video file...

AviSynth script - distorted/compressed video

```
DirectShowSource("F:\jvqa\tid2008\tid2008-distorted.mp4",
audio=false)
ConvertToYV12()
```

Select distorted/compressed video file...

Analysis

VQA metric composition

Input scaling:	Multi-scaled (4 half-scales)
Feature enhancement:	Shifted gradient
Stabilization:	Arithmetic (lower range)
Feature pooling:	Box (fast, downsampling)
Pooling size:	5
Luma similarity:	None (ignore luminance)

(See tooltips for explanations of parameters.)

Operation

RUN

SAVE FULL RESULTS

Operation log

```
21:32:16 INFO  [Thread-12] estevaocm.jvqa.frameserver.FfmpegClip.getFormatContext(?), line 150:
Input #2, avisynth, from F:\jvqa\tid2008\tid2008-distorted.avs:
  Duration: 0:0:56.6999, bitrate: N/A
    Stream #2.0: Video: rawvideo (I420 / 0x30323449), yuv420p, 512x384, 30.0 fps, 30.0 tbn, 30.0 tbc

21:32:16 INFO  [Thread-12] estevaocm.jvqa.cli.Experiment.run(?), line 120:
{multiscaled-4 shifted-gradient-structure downsampled 5x5 constant-stabilized ignore-luma}

21:32:51 INFO  [Thread-12] estevaocm.jvqa.cli.Experiment.logResults(?), line 294:
Job completed. Visual quality index: 0.992121 (21.04db). Time elapsed: 34,682 ms. Total frames in video: 1701.
```

Clear Log

4. Experimentos

Metodologia ITU-T VQEG para avaliação de métricas objetivas de qualidade visual:

- *Mensura a correlação entre as predições das métricas com os dados subjetivos reais para as mesmas imagens.*
- **DMOS:** *escore de opinião média diferencial*
  - *Obtido em testes subjetivos em laboratório.*
- *Coeficiente de correlação de ranking* **(RCC)** *de Spearman ou Kendall: monotonicidade de correlação.*
- *Coeficiente de correlação linear* **(LCC)** *de Pearson: precisão de correlação*
- *Raiz da média do erro quadrático* **(RMSE)***: consistência da correlação.*

4. Experimentos

LIVE Mobile Video Quality Database (Universidade do Texas):

- *10 vídeos referenciais (qualidade transparente).*
  - *1280×720, 30 Hz, 15 s.*
- *200 versões distorcidas.*
  - *40 se referem a perdas de compressão (H.264).*
- *Comprimi o material em H.264 sem perda (qp=0).*
  - *Manuseio e processamento facilitados: 1/7 do volume de dados.*

Mensurar eficiência: qualidade/tempo.

$$Efficiency = \frac{RCC \times LCC}{RMSE \times Time}$$

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC	LCC	RMSE	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
4S-SG-Sim	0.935	0.925	0.434	62	41	4.82
5S-SG-Sim	0.934	0.921	0.447	187	127	1.54
Fast MS-SG-Sim	0.929	0.915	0.461	39	26	7.09
SG-Sim	0.843	0.832	0.633	124	83	1.34
MS-SSIM	0.840	0.839	0.619	210	140	0.81
SG-Sim (Roberts)	0.838	0.813	0.663	103	69	1.46
SG-Sim (estab. lógica)	0.832	0.839	0.619	127	85	1.33
SG-Sim (Roberts; lógica)	0.823	0.812	0.665	103	69	1.46
Fast SG-Sim	0.810	0.816	0.668	61	41	2.47
Fast SSIM	0.807	0.803	0.679	102	68	1.40
GMSD	0.782	0.804	0.678	55	37	2.53
3-SSIM	0.731	0.761	0.739	222	148	0.51
SSIM	0.708	0.743	0.763	150	100	0.69

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC	LCC	RMSE	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
4S-SG-Sim	**0.935**	**0.925**	**0.434**	62	41	4.82
5S-SG-Sim	**0.934**	**0.921**	**0.447**	187	127	1.54
Fast MS-SG-Sim	**0.929**	**0.915**	**0.461**	39	26	7.09
SG-Sim	0.843	0.832	0.633	124	83	1.34
MS-SSIM	0.840	0.839	0.619	210	140	0.81
SG-Sim (Roberts)	0.838	0.813	0.663	103	69	1.46
SG-Sim (estab. lógica)	0.832	0.839	0.619	127	85	1.33
SG-Sim (Roberts; lógica)	0.823	0.812	0.665	103	69	1.46
Fast SG-Sim	0.810	0.816	0.668	61	41	2.47
Fast SSIM	0.807	**0.803**	**0.679**	102	68	1.40
GMSD	**0.782**	**0.804**	**0.678**	55	37	2.53
3-SSIM	**0.731**	**0.761**	**0.739**	222	148	0.51
SSIM	**0.708**	**0.743**	**0.763**	150	100	0.69

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC	LCC	RMSE	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
4S-SG-Sim	0.935	0.925	0.434	62	41	4.82
5S-SG-Sim	0.934	0.921	0.447	187	127	1.54
Fast MS-SG-Sim	0.929	0.915	0.461	39	26	7.09
SG-Sim	0.843	0.832	0.633	124	83	1.34
MS-SSIM	0.840	0.839	0.619	210	140	0.81
SG-Sim (Roberts)	0.838	0.813	0.663	103	69	1.46
SG-Sim (estab. lógica)	0.832	0.839	0.619	127	85	1.33
SG-Sim (Roberts; lógica)	0.823	0.812	0.665	103	69	1.46
Fast SG-Sim	0.810	0.816	0.668	61	41	2.47
Fast SSIM	0.807	0.803	0.679	102	68	1.40
GMSD	0.782	0.804	0.678	55	37	2.53
3-SSIM	0.731	0.761	0.739	222	148	0.51
SSIM	0.708	0.743	0.763	150	100	0.69

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC	LCC	RMSE	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
4S-SG-Sim	0.935	0.925	0.434	**62**	**41**	4.82
5S-SG-Sim	0.934	0.921	0.447	**187**	**127**	1.54
Fast MS-SG-Sim	0.929	0.915	0.461	**39**	**26**	7.09
SG-Sim	0.843	0.832	0.633	124	83	1.34
MS-SSIM	0.840	0.839	0.619	**210**	**140**	0.81
SG-Sim (Roberts)	0.838	0.813	0.663	103	69	1.46
SG-Sim (estab. lógica)	0.832	0.839	0.619	127	85	1.33
SG-Sim (Roberts; lógica)	0.823	0.812	0.665	103	69	1.46
Fast SG-Sim	0.810	0.816	0.668	**61**	**41**	2.47
Fast SSIM	0.807	0.803	0.679	102	68	1.40
GMSD	0.782	0.804	0.678	**55**	**37**	2.53
3-SSIM	0.731	0.761	0.739	**222**	**148**	0.51
SSIM	**0.708**	**0.743**	**0.763**	**150**	**100**	**0.69**

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC	LCC	RMSE	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
4S-SG-Sim	0.935	0.925	0.434	**62**	**41**	**4.82**
5S-SG-Sim	0.934	0.921	0.447	**187**	**127**	1.54
Fast MS-SG-Sim	0.929	0.915	0.461	**39**	**26**	**7.09**
SG-Sim	0.843	0.832	0.633	124	83	1.34
MS-SSIM	0.840	0.839	0.619	**210**	**140**	**0.81**
SG-Sim (Roberts)	0.838	0.813	0.663	103	69	1.46
SG-Sim (estab. lógica)	0.832	0.839	0.619	127	85	1.33
SG-Sim (Roberts; lógica)	0.823	0.812	0.665	103	69	1.46
Fast SG-Sim	0.810	0.816	0.668	**61**	**41**	**2.47**
Fast SSIM	0.807	0.803	0.679	102	68	1.40
GMSD	0.782	0.804	0.678	**55**	**37**	**2.53**
3-SSIM	0.731	0.761	0.739	**222**	**148**	**0.51**
SSIM	0.708	0.743	0.763	150	100	**0.69**

4. Experimentos

Experimento complementar com imagens estáticas de distorções variadas.

- *Inconsistência do experimento com resultados dos autores do GMSD.*
  - **GMSD** > *FSIM* > *IW-SSIM* > **MS-SSIM** > *SSIM etc.*
- *Tampere Image Database – TID2008.*
  - *25 imagens de referência de 512×384.*
  - *1700 versões distorcidas, com todo tipo de ruído (não só compressão).*

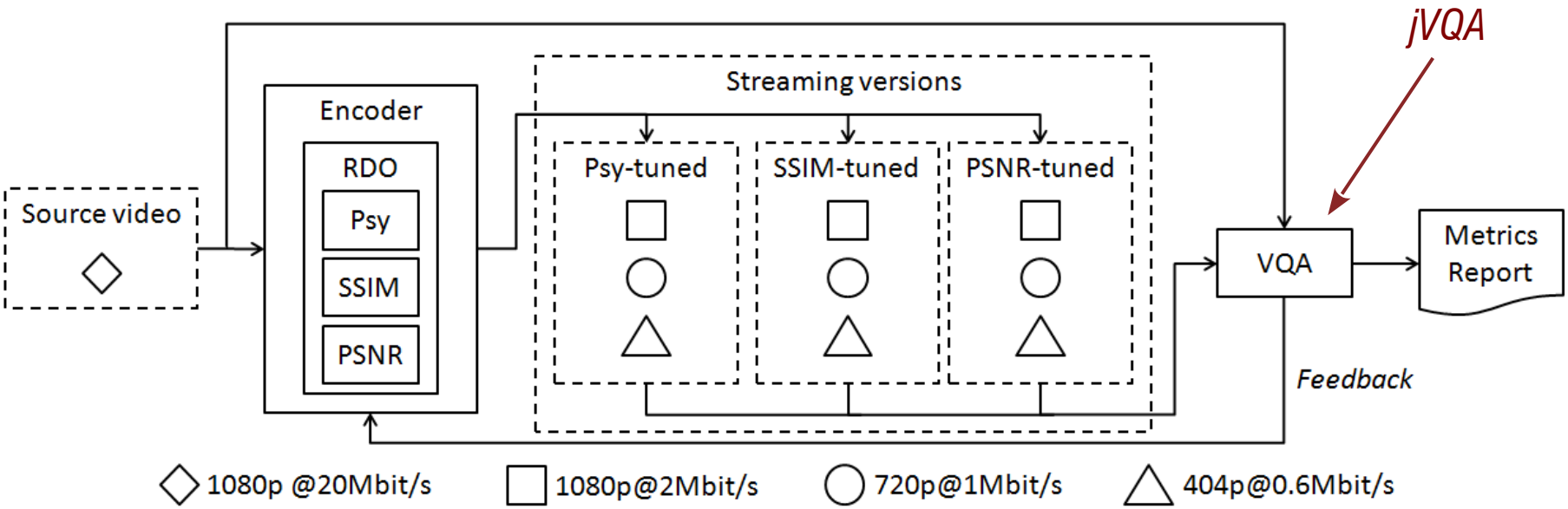
4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC Spearman	RCC Kendall	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
5S-SG-Sim	**0.853**	**0.648**	205	110	0.50
GMSD (deslocado)	**0.845**	**0.660**	118	63	**0.88**
GMSD	**0.842**	0.642	**95**	**51**	**1.06**
Fast MS-SG-Sim	0.827	0.621	**80**	**43**	**1.19**
4S-SG-Sim	0.824	0.618	**102**	**55**	**0.93**
MS-SSIM	0.815	0.624	224	120	0.47
SG-Sim	0.812	0.604	153	82	0.60
SG-Sim (euclidiano)	0.806	0.537	168	90	0.53
SG-Sim (Sobel)	0.805	0.597	150	81	0.60

4. Experimentos

Índice de qualidade visual	RCC Spearman	RCC Kendall	Tempo (s)	Tempo (%)	Eficiência
Fast SG-Sim	0.799	0.591	**98**	**53**	**0.90**
SG-Sim (lógico)	0.766	0.560	152	82	0.48
SG-Sim (sem filtro)	0.703	**0.652**	**90**	**48**	0.75
3-SSIM	0.696	0.500	191	103	0.34
SG-Sim (Roberts)	0.695	0.502	144	77	0.45
SSIM (3σ)	0.682	0.491	196	105	0.32
Fast SSIM	0.678	0.486	131	70	0.47
SSIM (2σ)	0.678	0.488	186	100	0.33
SSIM (sem filtro)	0.656	0.464	**57**	**31**	**0.99**

4. Experimentos



Experimento com otimização entre taxa e distorção na compressão.

- *As métricas ajudam o compressor a tomar decisões.*
- *As métricas avaliam o resultado.*

4. Experimentos

Correlação de SSIM e SG-Sim com **otimização de taxa-distorção (RDO)** *em compressores.*

- *Meta: classificar* **Psy-RDO > (SSIM-RDO & PSNR-RDO)**.
- *Categorias de conteúdo típicas:*
  - *"Cinema": cena natural com ruído granular de filme e muita movimentação.*
  - *"Entrevista": cena natural sem ruído, com pouco movimento e fundo fora de foco.*
  - *"Anime": animação clássica sem ruído e com muita movimentação.*
  - *Extraídos de Blu-ray, 5 trechos de 14 a 18 s por categoria.*
  - *Resolução 1280×720 é a mais representativa (71% da Web global).*

4. Experimentos

Resultados de correlação com RDO:

- *SSIM: 28/30 SSIM-RDO > Psy-RDO.*
- *SG-Sim: 30/30 Psy-RDO > (SSIM-RDO & PSNR-RDO).*
- *Multi-escalas comprime a amplitude dos índices.*
- *Filtro subamostrado expande a amplitude dos índices.*

5. Conclusão

Contribuições:

- *Estudo do comportamento matemático das métricas SSIM.*
- *Otimização matemática dos filtros espaciais para maior eficiência.*
  - *Filtro Box subamostrado 7×7.*
- *Estudo da contribuição de cada técnica componente de SSIM.*
- *Métrica de qualidade de vídeo equilibrada com eficiência computacional, adequada para streaming adaptativo na Web, e correspondendo ao moderno Psy-RDO:*
  - *Shifted Gradient Similarity (SG-Sim).*
- *Ferramenta jVQA implementa as otimizações propostas.*

5. Conclusão

Limitações e trabalhos futuros:

- *Escopo limitado a métricas de baixa latência e alta eficiência.*
- *Teste de RDO limitado ao x264.*
  - *x265, vpx e Daala também seriam interessantes.*
- *Testes limitados a 720p.*
  - *Interessante expandir para 1080p e 480p (escalabilidade).*
- *Expandir bases de testes:*
  - *LIVE Mobile VQA inteira, LIVE VQA, LIVE IQA, TID2013, CSIQ, IVC.*
- *jVQA: automatizar estatísticas de correlação, gerar gráficos, otimizações de performance.*