



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Análise de qualidade do Low Complexity
Enhancement Video Coding (LCEVC) baseado em
AVC e VVC**

Lucas Araújo Pena

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador
Prof. Ricardo L. de Queiroz

Brasília
2025



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Análise de qualidade do Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC) baseado em AVC e VVC

Lucas Araújo Pena

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Prof. Ricardo L. de Queiroz (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Eduardo Peixoto Fernandes da Silva Prof. Camilo Chang Dórea
ENE/UnB CIC/UnB

Prof. Edson Mitsu Hung
ENE/UnB

Prof. Marcelo Grandi Mandelli
Coordenador do Bacharelado em Ciéncia da Computac o

Brasília, 1 de agosto de 2025

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise qualitativa do padrão de codificação de vídeo Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC), padronizado pela Moving Picture Experts Group (MPEG) e desenvolvido pela V-Nova. O LCEVC atua como uma camada de aprimoramento sobre codecs existentes, oferecendo melhorias de qualidade com baixa complexidade computacional. Foram realizados testes com diferentes valores de quantização para a camada base (Advanced Video Coding / H.264 (AVC) e Versatile Video Coding / H.266 (VVC)) e dos parâmetros da camada de aprimoramento do LCEVC. Os resultados obtidos, analisados a partir da relação entre Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) e a Taxa de bits, indicam que o LCEVC pode apresentar desempenho superior em certos cenários, especialmente em comparação ao uso isolado de codecs convencionais. A implementação dos testes foi realizada por meio de scripts automatizados em ambientes Linux. Este estudo reforça o potencial do LCEVC como uma solução eficiente para transmissão de vídeo de alta qualidade com baixo custo computacional.

Palavras-chave: LCEVC, AVC, VVC, compressão de vídeo, PSNR, análise de qualidade, TV Digital Brasileira

Abstract

This work presents a qualitative analysis of the Low Complexity Enhancement Video Coding (Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC)) standard, standardized by the Moving Picture Experts Group (MPEG) and developed by V-Nova. LCEVC operates as an enhancement layer over existing codecs, providing quality improvements with low computational complexity. Tests were conducted with different quantization values for the base layer (Advanced Video Coding / H.264 (AVC) and Versatile Video Coding / H.266 (VVC)) and for the enhancement parameters of LCEVC. The obtained results, analyzed comparing Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and bitrate values, indicate that LCEVC can offer superior performance in certain scenarios, especially when compared to the isolated use of conventional codecs. The tests were implemented through automated scripts in Linux environments. This study highlights the potential of LCEVC as an efficient solution for high-quality video transmission with low computational cost.

Keywords: LCEVC, AVC, VVC, video compression, PSNR, quality analysis, Brazilian Digital TV

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo	1
1.3	Codificadores de vídeo	2
1.4	Advanced Video Coding / H.264 (AVC)	3
1.5	Versatile Video Coding / H.266 (VVC)	3
1.6	Taxa de bits e Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)	4
1.6.1	Taxa de bits	4
1.6.2	Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)	4
1.7	Low Complexity Enhancement Video Coding	5
1.7.1	Codificação	5
1.7.2	Decodificação	6
2	Metodologia	8
2.1	Codificando Vídeos	8
2.2	Análise dos Vídeos	8
2.3	Fronteira de Pareto	9
2.4	Sequências	10
2.5	Programas Usados	11
3	Resultados	12
3.1	AVC	13
3.1.1	Bosphorus	13
3.1.2	ReadySteadyGo	14
3.1.3	Jockey	15
3.1.4	SOCCER	16
3.1.5	City	17
3.1.6	vc-globo-05	18
3.1.7	vc-lcevc-01	19

3.1.8	vc-philips-01	20
3.1.9	vc-philips-03	22
3.2	VVC	24
3.2.1	Bosphorus	24
3.2.2	SOCCKER	25
3.2.3	Jockey	26
3.2.4	City	27
3.2.5	vc-philips-01	28
3.2.6	vc-lcevc-01	30
3.2.7	vc-globo-05	31
3.3	Visão geral dos resultados	32
4	Conclusão	35
4.1	Trabalhos Futuros	36
Referências		37

Lista de Figuras

1.1	Processo de codificação do LCEVC.	5
1.2	Processo de decodificação do LCEVC.	7
2.1	Exemplo da Fronteira de Pareto. [1]	10
2.2	Frames representativos das sequências de vídeo utilizadas.	11
3.1	Resultados para "Bosphorus" em AVC. [2]	13
3.2	Resultados para "ReadySteadyGo" em AVC. [2]	14
3.3	Resultados para "Jockey" em AVC. [2]	15
3.4	Resultados para "SOCCER" em AVC. [3]	16
3.5	Resultados para "City" em AVC. [3]	17
3.6	Resultados para "vc-globo-05" em AVC. [4]	18
3.7	Resultados para "vc-lcevc-01" em AVC.	19
3.8	Resultados para "vc-philips-01" em AVC.	20
3.9	Resultados para "vc-philips-03"em AVC.	22
3.10	Resultados para "Bosphorus" em VVC. [2]	24
3.11	Resultados para "SOCCER" em VVC. [3]	25
3.12	Resultados para "Jockey" em VVC. [2]	26
3.13	Resultados para "City" em VVC. [3]	27
3.14	Resultados para "vc-philips-01" em VVC.	28
3.15	Resultados para "vc-lcevc-01"em VVC.	30
3.16	Resultados para "vc-globo-05"em VVC [4].	31

Listas de Tabelas

1.1	Interpretação dos valores de PSNR. [5]	5
2.1	Versões dos programas utilizados para codificação e decodificação.	11
3.1	Resultados para Bosphorus em AVC.	13
3.2	Resultados favoráveis do LCEVC para Bosphorus em AVC	14
3.3	Resultados para Jockey em AVC.	15
3.4	Resultados favoráveis do LCEVC para Jockey em AVC.	16
3.5	Resultados para vc-globo-05 em AVC.	18
3.6	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-globo-05 em AVC.	19
3.7	Resultados para vc-lcevc-01 em AVC.	20
3.8	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-lcevc-01 em AVC.	20
3.9	Resultados para vc-philips-01 em AVC.	21
3.10	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-philips-01 em AVC.	21
3.11	Resultados para vc-philips-03 em AVC.	22
3.12	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-philips-03 em AVC.	23
3.13	Resultados para Bosphorus em VVC.	24
3.14	Resultados favoráveis do LCEVC para Bosphorus em VVC.	25
3.15	Resultados para Jockey em VVC	26
3.16	Resultados favoráveis do LCEVC para Jockey em VVC.	27
3.17	Resultados para vc-philips-01 em VVC.	28
3.18	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-philips-01 em VVC.	29
3.19	Resultados para vc-globo-05 em VVC.	31
3.20	Resultados favoráveis do LCEVC para vc-globo-05 em VVC.	32
3.21	Quantidade de pontos acima da curva de eficiência para o AVC.	32
3.22	Quantidade de pontos acima da curva de eficiência para o VVC.	32
3.23	Quantidade de ocorrências de cada valor de SW2 nos resultados favoráveis ao LCEVC	33
3.24	Frequência de testes por combinação de SW2 e QP	34

Lista de Abreviaturas e Siglas

AVC Advanced Video Coding / H.264.

DLSS Deep Learning Super Sampling.

EVC Essential Video Coding.

HEVC High Efficiency Video Coding / H.265.

ITU Telecommunication Standardization Sector.

JVET Joint Video Experts Team.

LCEVC Low Complexity Enhancement Video Coding.

MPEG Moving Picture Experts Group.

PSNR Peak Signal-to-Noise Ratio.

VVC Versatile Video Coding / H.266.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O crescimento do consumo de vídeo digital, impulsionado por serviços de streaming, transmissões ao vivo e a popularização de dispositivos conectados, trouxe desafios significativos para a transmissão de conteúdos em alta qualidade sem sobrecarregar as redes de comunicação. No contexto brasileiro, a demanda por vídeos em resoluções cada vez maiores, como 4K e 8K, exige soluções de compressão mais eficientes para garantir a entrega de conteúdo com qualidade e baixo custo operacional.

Nesse cenário, o Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC) surge como uma tecnologia inovadora, capaz de aprimorar a eficiência de codificadores tradicionais ao adicionar camadas de aprimoramento com baixa complexidade computacional. Sua adoção tem ganhado destaque internacionalmente e, mais recentemente, no Brasil, onde foi escolhida como parte do padrão para a próximas gerações da TV Digital, parcialmente na TV 2.5 e por completo na TV 3.0 [6], onde atualmente é usado o codec Advanced Video Coding / H.264 (AVC). Essa escolha reflete o potencial do LCEVC em viabilizar transmissões de alta qualidade com menor uso de banda e recursos computacionais, tornando-se um tema relevante para pesquisa e análise no contexto nacional [7, 8].

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise qualitativa do desempenho do padrão Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC), comparando seus resultados com os obtidos por codecs convencionais utilizados de forma isolada, como o AVC e o VVC. Com isso, encontrar casos onde o LCEVC consegue uma vantagem em relação à forma isolada, para tentar encontrar a melhor maneira de utilizar e configurar o LCEVC.

Para isso, são realizadas codificações das mesmas sequências de vídeo sob diferentes configurações de parâmetros, variando o fator de quantização da camada base e os valores de qualidade da camada de aprimoramento. Com base na relação entre PSNR e taxa de bits, busca-se identificar em quais cenários o LCEVC apresenta ganhos reais de qualidade e eficiência.

1.3 Codificadores de vídeo

Quando se cria um vídeo para ser utilizado como mídia em alguma plataforma, é esperado que ele seja recebido e consumido com a melhor qualidade possível. Isso é um desafio que estas plataformas enfrentam há muitos anos. Por exemplo, quando se grava um filme, as filmagens são geradas em um formato bruto que ainda não sofreu nenhum tipo de edição ou compressão. Este formato gera vídeos de tamanhos gigantescos com a melhor qualidade possível [9]. Quando um filme está pronto para ser distribuído, é preciso fazer com que ele caiba em uma mídia física, como um DVD ou Blu-Ray, ou tenha um tamanho aceitável para ser transferido via streaming. Para que isso pudesse ser realizado, criou-se o padrão MPEG-2, que é capaz de codificar vídeos a taxas aproximadas de 4 a 9 Mb/s [10]. Esses algoritmos visam diminuir o tamanho de um vídeo, mas manter a melhor qualidade possível.

Com o aumento significativo do tráfego de dados em redes digitais e a popularização de serviços como streaming e videoconferências, a compressão eficiente de vídeo se tornou um fator crucial para garantir a qualidade destes serviços ao usuário final e também sua viabilidade técnica e econômica para os provedores destes serviços.

Apesar dos avanços destes *codecs*, os ganhos de compressão vieram acompanhados do aumento significativo da complexidade computacional, o que dificulta o seu uso em dispositivos com recursos limitados, como *smartphones*, receptores de TV ou plataformas web.

Segundo a Globo [11], serviços e aplicações envolvendo o uso de sinais de vídeo mantêm uma tendência de crescimento ao longo dos anos, onde o tráfego de vídeo responde por 80% do tráfego presente na Internet. Durante a pandemia, esse cenário incrementou sensivelmente, a ponto de alguns Governos Nacionais cogitarem a redução da oferta de sinais de vídeo de alguns serviços de streaming receando um possível colapso na infraestrutura de internet. Entende-se que a existência de codificadores mais eficientes é mais do que nunca uma forte demanda do mercado, oferecendo excelentes oportunidades para pesquisa e inovação.

Esses algoritmos foram sendo aprimorados com o passar do tempo e novos algoritmos foram sendo criados. Existem inúmeros algoritmos para compressão de áudio e vídeo,

onde o foco agora serão os padrões Advanced Video Coding / H.264 (AVC) e Versatile Video Coding / H.266 (VVC), que serão utilizados neste trabalho.

1.4 Advanced Video Coding / H.264 (AVC)

O AVC é um padrão para compressão de vídeo baseado no MPEG-4 Parte 10, desenvolvido pela Telecommunication Standardization Sector (ITU) em conjunto com a MPEG. É um dos codificadores mais utilizados no mundo, devido a sua alta eficiência de compressão e boa qualidade de imagem, além da ampla compatibilidade.

O AVC é um codificador híbrido baseado em blocos, ou seja, ele divide o frame de um vídeo em pequenos blocos, onde nesses blocos são aplicadas as técnicas de compressão. Isso permite que o processamento seja segmentado facilitando a previsão, transformação e codificação. Ele emprega técnicas de compressão de movimento, transformada discreta do cosseno, quantização escalável e codificação de entropia. Ele possui um modelo de compressão temporal e compressão espacial. Estas características permitem a redução da taxa de bits sem degradação perceptível. Ele define uma arquitetura modular com níveis e perfis, para permitir sua aplicação em diferentes contextos, como streaming ou conteúdo de alta definição.

Este codificador se destaca em relação aos seus predecessores, como o MPEG-2, em eficiência de compressão. Essa característica foi essencial para que ele se tornasse um dos codificadores mais utilizados. [12]

1.5 Versatile Video Coding / H.266 (VVC)

O VVC também é um padrão de codificação de vídeo desenvolvido pela Joint Video Experts Team (JVET), que é uma colaboração entre o Telecommunication Standardization Sector (ITU) e o Moving Picture Experts Group (MPEG). Seu objetivo era dobrar a eficiência de compressão do codificador HEVC, mas mantendo a mesma qualidade visual. O VVC também é um codificador híbrido baseado em blocos, porém com diversas inovações que o tornam mais eficiente. Entre suas principais técnicas estão a unidade quadricomposta com partições adaptativas, melhorias no *intra-prediction*, maior sofisticação na compensação de movimento e filtros de interpolação, introdução de novos modos de transformadas e aprimoramento nas técnicas de codificação entropia.

Este codificador possui um amplo uso como vídeos com resoluções altas (como 8k), com realidade virtual, streaming e vídeo conferências em redes móveis. Possui suporte para HDR e um amplo espaço de cores. Porém, este alto desempenho vem como uma alta complexidade computacional, ainda maior que outros codificadores, especialmente na

codificação, o que demanda otimizações específicas e o uso de aceleração por hardware, ou seja, o uso de placas de vídeo. [13]

1.6 Taxa de bits e Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Para que fosse possível estudar, analisar e comprar se sequências geradas, é necessário ter alguma métrica para poder compará-los. Para este caso, foi escolhido gerar um gráfico relacionando a taxa de bits e o PSNR de cada vídeo gerado dentro de um determinado parâmetro em comum.

1.6.1 Taxa de bits

A taxa de bits pode ser definida como o número de *bits* que é transferido ou processado por alguma unidade de tempo [14]. Este valor dá uma ideia da quantidade de recursos que serão necessários para transmitir e decodificar cada vídeo. Quanto maior este valor, maior foi o tempo necessário para a codificação, maior é o tamanho do arquivo, que acarreta em uma quantidade maior de dados sendo transferidos, caso for utilizado para streaming, e maior é a computação necessária para que o vídeo seja reconstruído pelo de codificador. Então, este valor nos ajuda a determinar se um determinado ponto é ou não viável. Pode-se calcular a taxa de bits com a seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de bits} = \frac{\text{Tamanho (em bits)}}{\text{Duração (em segundos)}}$$

1.6.2 Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Signal-to-Noise Ratio, ou Relação Sinal-Ruído, é uma medida que compara a força de um sinal desejado com a força do ruído de fundo. É uma métrica utilizada para avaliar a qualidade e a confiabilidade de um sinal [14]. Para utilizar esta métrica na análise de vídeos, costuma-se usar o PSNR, que é a relação entre a máxima energia de um sinal e o ruído que afeta sua representação. Por muitos sinais terem sua amplitude dinâmica, o PSNR é normalmente expressado por uma escala logarítmica em decibéis.

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right)$$

Onde:

- PSNR: Peak Signal-to-Noise Ratio (em decibéis, dB);
- MAX: valor máximo possível de um pixel (por exemplo, 255 em 8 bits);

- MSE: erro quadrático médio entre os quadros original e comprimido;

Para este estudo, o importante é saber interpretar quanto cada valor representa na qualidade final do vídeo. Para isso, esta tabela demonstra a interpretação básica destes valores:

PSNR > 33 dB	Qualidade Excelente
33 dB > PSNR > 30 dB	Qualidade Aceitável
PSNR < 30 dB	Qualidade Ruim

Tabela 1.1: Interpretação dos valores de PSNR. [5]

1.7 Low Complexity Enhancement Video Coding

O LCEVC é uma tecnologia de codificação em múltiplas camadas desenvolvida para atuar como uma camada de aprimoramento sobre os codificadores já existentes, como os que foram mencionados anteriormente.

O LCEVC, por ser um codificador de vídeo, o LCEVC possui o processo de codificação e decodificação do vídeo, onde o decodificador é responsável por reconstruir o vídeo.

1.7.1 Codificação

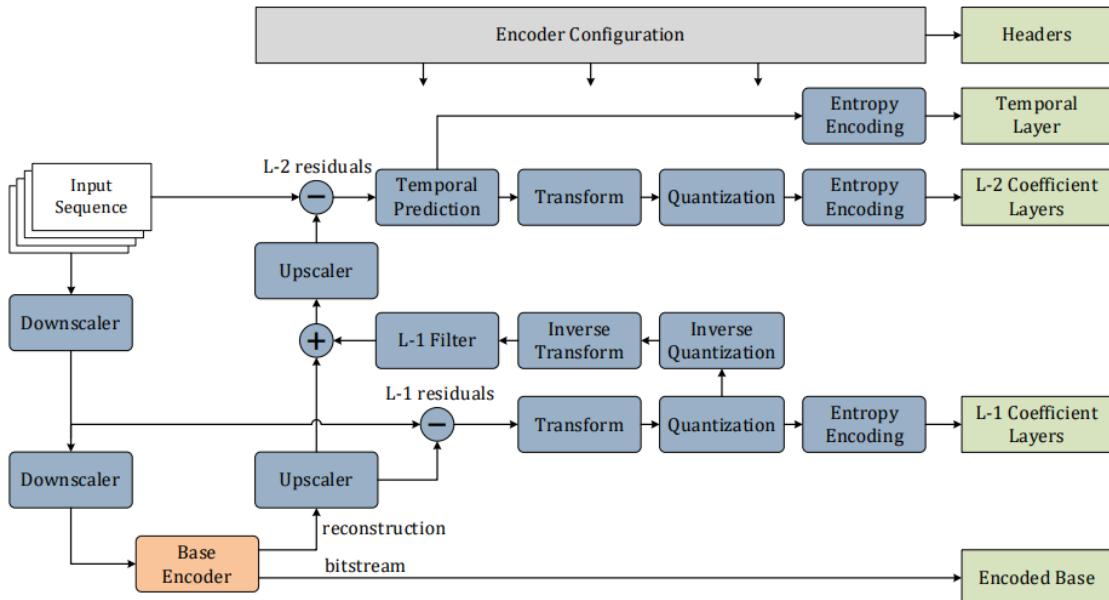


Figura 1.1: Processo de codificação do LCEVC (Fonte: [15]).

Camada Base

Primeiro, a sequência de entrada possui sua resolução reduzida por um processo chamado de *downscaling*. Ela passa por dois processos de *downscaling* que utilizam o parâmetro de modo de escalonamento (*scaling mode*) definido. Com o vídeo reduzido, então, é acionado o codificador responsável por codificar a camada base de acordo com o modo escolhido, que pode ser AVC, VVC, HEVC ou EVC. O bitstream gerado pode ser incluído diretamente no fluxo LCEVC. [15, 16]

Subcamada de Aprimoramento 1 (L-1)

A imagem reconstruída da camada base é reamostrada para a resolução original e subtraída da versão redimensionada da sequência original. Essa diferença forma o *resíduo L-1*. Este é processado por ferramentas de codificação específicas (transformada, quantização e codificação de entropia), gerando coeficientes quantizados codificados. Esses dados compõem a primeira subcamada da camada de aprimoramento. [15, 16]

Subcamada de Aprimoramento 2 (L-2)

A reconstrução da subcamada L-1 é reconstruída internamente e, dependendo do modo de escalonamento, reamostrada novamente. A subtração da sequência de entrada original com essa reconstrução gera o *resíduo L-2*, que também é transformado e quantizado. Nesta etapa, é possível aplicar predição temporal aos coeficientes transformados, aumentando a eficiência de codificação. Os dados gerados, incluindo a informação de predição temporal por bloco, são inseridos no bitstream final. [15, 16]

1.7.2 Decodificação

O processo de decodificação de um vídeo com o LCEVC é composto por três etapas principais: decodificação da camada base, reconstrução da subcamada de aprimoramento 1 (L-1) e aplicação da subcamada de aprimoramento 2 (L-2). Abaixo, descrevemos cada uma dessas etapas.

Camada Base

O decodificador extrai e decodifica o bitstream da camada base utilizando o codec tradicional configurado. A imagem reconstruída, chamada de *Decoded Base Picture*, pode ser reamostrada (upscaleing) conforme o modo de escalonamento utilizado na codificação, formando a *Preliminary Intermediate Picture*. [15, 16]

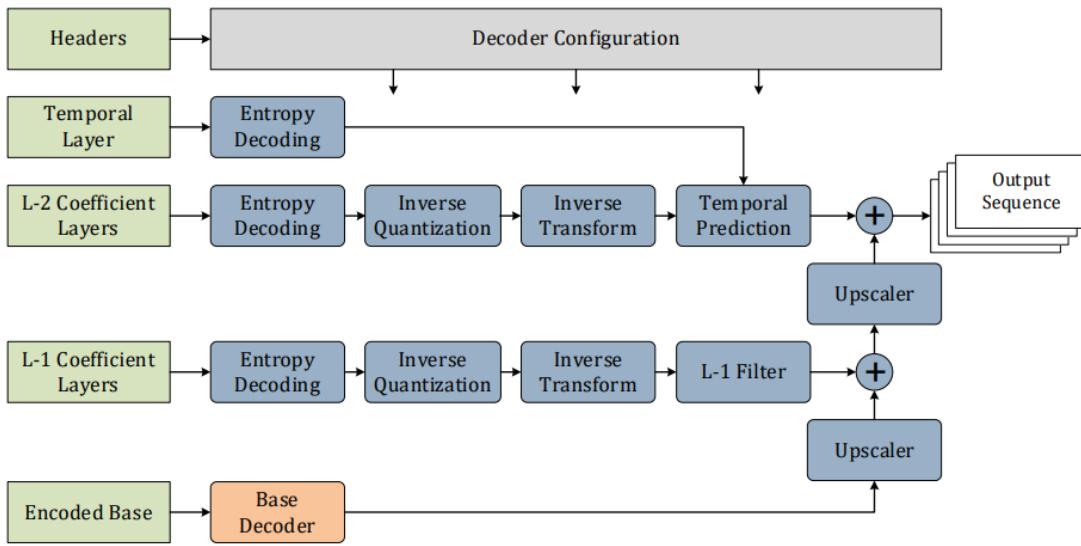


Figura 1.2: Processo de decodificação do LCEVC (Fonte: [15]).

Subcamada de Aprimoramento 1 (L-1)

Os coeficientes quantizados da subcamada [16]L-1 são decodificados utilizando as ferramentas inversas do processo de codificação (decodificação de entropia, desquantização e transformada inversa). Opcionalmente, é aplicado um filtro L-1 para suavizar as bordas dos blocos transformados. O resultado é somado à *Preliminary Intermediate Picture*, formando a *Combined Intermediate Picture*. Em seguida, pode ser aplicada uma nova etapa de upscaling para obter a *Preliminary Output Picture*. [15, 16]

Subcamada de Aprimoramento 2 (L-2)

Por fim, a segunda subcamada de aprimoramento é decodificada. Caso os metadados indiquem o uso de predição temporal, os coeficientes são ajustados com base nos resíduos temporais do quadro anterior. Após a decodificação dos coeficientes, o resultado da subcamada L-2 é somado à *Preliminary Output Picture*, produzindo o quadro final decodificado, denominado *Combined Output Picture*. [15, 16]

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Codificando Vídeos

Para codificar os vídeos para o LCEVC, foi usado o codificador LTM Model Encoder e Decoder, obtido através do Git da MPEG. Para codificar um vídeo utilizando este codificador, são passados os parâmetros pela linha de comando, ou através de um arquivo de configuração que possui os valores padrões do codificador. Como mencionado anteriormente, o LCEVC é constituído por duas camadas, a camada base contendo um vídeo com a metade da resolução do vídeo original, e uma camada de aprimoramento, que possui as informações para que o LCEVC possa realizar um upscaling no vídeo para que ele fique o mais parecido com o vídeo original possível. A camada base pode estar nos formatos AVC, VVC, HEVC e EVC. Já a camada de aprimoramento, possui duas subcamadas, onde uma é opcional e a outra é obrigatória, contendo os principais dados.

Para este trabalho, foi alterado o parâmetro que determina o nível da qualidade que será destinada para esta subcamada. Este valor determina a quantização desta camada, onde o quanto menor o valor, melhor a qualidade que esta camada possuirá, consequentemente aumentando o tamanho que a camada do LCEVC terá em relação ao arquivo final. Este valor é chamado de $SW2$, e seu parâmetro é `--cq_step_width_loq_0`. Além do valor de $SW2$ que modifica a qualidade da camada do LCEVC, foi modificado o valor do QP para a camada base. Para cada valor de QP , foi usado uma sequência de valores fixos para o $SW2$, para que fosse possível comparar a relação que estes valores iriam influenciar na qualidade e tamanho final do arquivo.

2.2 Análise dos Vídeos

Neste trabalho, será analisado o resultado de várias codificações utilizando o LCEVC, para tentar demonstrar qual seriam os melhores parâmetros para o seu uso, levando em

consideração os seus casos de uso. O programa utilizado foi compilado para Linux e sempre utilizado em uma distribuição Linux com base em Ubuntu.

Foi desenvolvido um *script Bash* para Linux [17] que executa o programa codificador paralelamente para cada valor de QP utilizado. O *script* cria uma execução por QP e processa sequencialmente por valor de $SW2$. Os valores utilizados foram:

QPs: 22, 25, 27, 30, 32, 35, 37.

SW2: 250, 750, 1250, 1750, 2250, 2750, 3250.

Além das codificações utilizando LCEVC, também foram codificados vídeos no mesmo padrão de compressão utilizado pelo LCEVC, mas sem o LCEVC, para que fosse possível ter uma referência da qualidade máxima possível obter sem o LCEVC. Neste caso, foram usados os mesmos valores de QP e utilizado a resolução final que o vídeo do LCEVC teria. Também foram extraídos os parâmetros que o LCEVC altera para o *downsampling* da camada base e adicionados no comando de execução da codificação sem o LCEVC.

Por fim, também é realizado uma codificação usando somente o algoritmo base de *Downsampling* e *Upsampling* que o codificador LCEVC utiliza. Porém, não há interferência de nenhum padrão de compressão neste estágio, onde ele transforma um YUV, um formato bruto de vídeo, em outro YUV. Por isso sua taxa de bits não é considerada.

Após cada vídeo ser codificado, o *script* também faz o cálculo de Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) do resultado obtido, convertido para o formato YUV, assim como o arquivo original.

2.3 Fronteira de Pareto

A *Fronteira de Pareto* é uma técnica utilizada para analisar a relação entre dois ou mais objetivos, onde é possível identificar quais soluções são eficientes em relação a outros objetivos [18]. Neste trabalho, a Fronteira de Pareto é utilizada para analisar a relação entre a qualidade do vídeo, medida pelo PSNR, e o tamanho do arquivo, medido pela taxa de bits. A Fronteira de Pareto é representada por um conjunto de pontos que não podem ser melhorados em um objetivo sem piorar outro objetivo. Ou seja, se um ponto está na fronteira de Pareto, não é possível aumentar a qualidade do vídeo sem aumentar o tamanho do arquivo, ou diminuir o tamanho do arquivo sem diminuir a qualidade do vídeo.

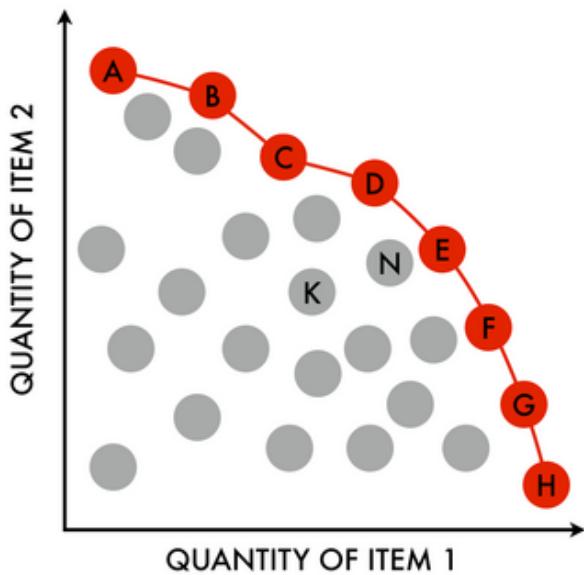


Figura 2.1: Exemplo da Fronteira de Pareto. [1]

2.4 Sequências

As sequências utilizadas para os testes deste trabalho foram obtidas em diversos locais diferentes, como: Ultra Video Group [2], Xiph.org [3] e vídeos que foram utilizados para testes da TV Digital, fornecidos pelo Laboratório de Engenharia Elétrica da UnB. A seguir uma breve descrição do conteúdo de cada sequência.

- Bosphorus: Um barco navegando pelo Estreito de Bósforo;
- Jockey: Um jóquei montado em seu cavalo correndo em um hipódromo. A câmera está com zoom e seguindo o cavalo.
- ReadySteadyGo: Uma largada de corrida de cavalos.
- vc-globo-05: Trecho de uma transmissão de futebol da Seleção Brasileira pela TV Globo.
- vc-lcevc-01: Um vídeo mostrando o horizonte e uma tabela fixa na tela.
- vc-phillips-01: Um campo em um dia claro. Plantas ao vento próximo da câmera.
- vc-phillips-03: Um vídeo de um canal em uma cidade.
- City: Uma visão aérea de Nova Iorque, focando em um prédio.
- SOCCER: Um trecho de um treinamento de futebol.



Figura 2.2: Frames representativos das sequências de vídeo utilizadas.

2.5 Programas Usados

Como mencionado previamente, o codificador e decodificador principal é o "*Test Model of Low Complexity Enhancement Video Coding*" LTM [19]. Quando é realizado a codificação do LCEVC com o formato escolhido da base, o LTM chama outro programa para codificar ou decodificar o arquivo. No caso deste trabalho, ao escolher o AVC, o LTM chama o JM, e no caso do VVC, o VTM é acionado. As versões utilizados estão na 2.1.

Programa	Versão
LTM (LCEVC Test Model)	7.0
JM (AVC Reference Software)	19.0
VTM (VVC Test Model)	12.0

Tabela 2.1: Versões dos programas utilizados para codificação e decodificação.

Capítulo 3

Resultados

Após a execução do Script de codificação, os dados obtidos são armazenados em um arquivo CSV. Com os resultados finais, outro script em *Python* é executado, onde ele cria um gráfico com estes dados. Abaixo estão os resultados obtidos.

A análise dos gráficos gerados para as sequências testadas permite observar o comportamento do LCEVC em diferentes condições de codificação. Foram analisados dois codificadores: AVC e VVC, com e sem o uso do LCEVC como camada de aprimoramento.

No geral, os gráficos PSNR x Taxa de bits permitem avaliar a eficiência da compressão, considerando que uma melhor relação é obtida quando se atinge maior qualidade (PSNR) com menor taxa de bits. A seguir, apresenta-se uma análise detalhada por cenário. Para alguns resultados, se um vídeo em LCEVC resultou em uma taxa de bits muito alta, ficando distante dos valores do codificador base, eles foram omitidos para melhor análise e visualização nos gráficos.

Além disso, para que o gráfico pudesse ficar legível, só foi rotulado o valor de SW2 para o parâmetro de QP37.

3.1 AVC

3.1.1 Bosphorus

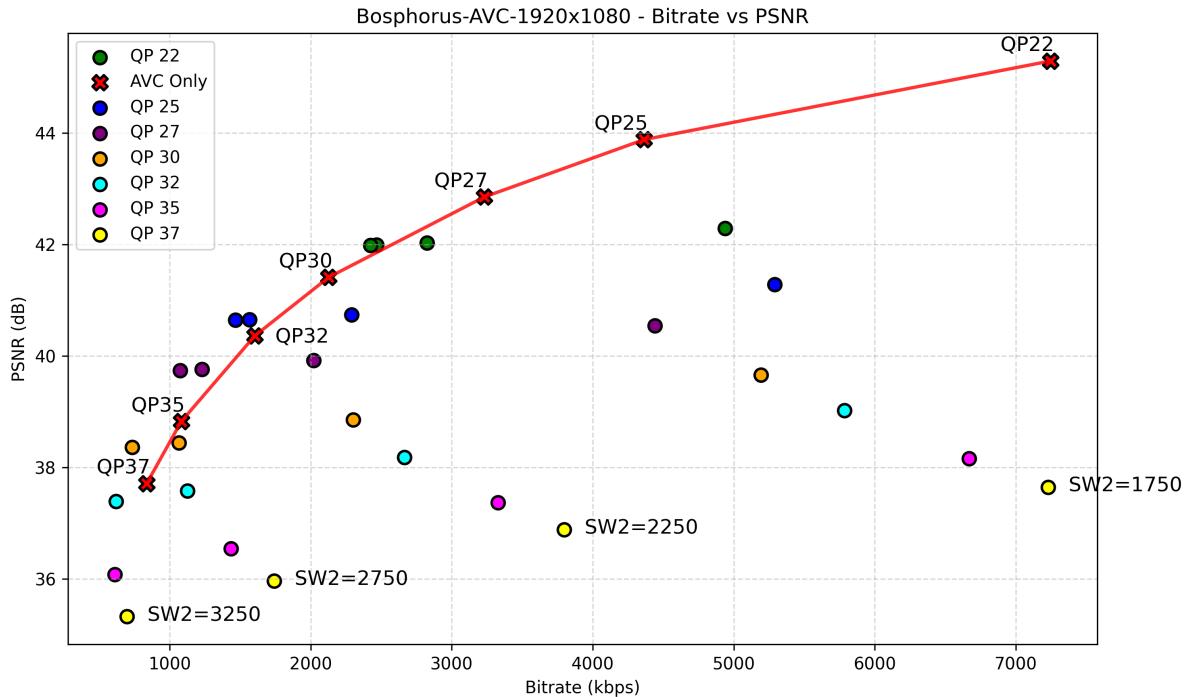


Figura 3.1: Resultados para "Bosphorus" em AVC. [2]

Para a sequência Bosphorus, o LCEVC conseguiu ótimos resultados. Mesmo com uma grande dispersão pela tabela e vários resultados ineficientes, certos valores de SW2 conseguiram atingir resultados positivos.

Para o LCEVC, vemos resultados positivos para QP 30, 27, 25 e 22. Estes QPs conseguiram resultados superiores à curva de eficiência dos vídeos de referência. Os resultados que apresentaram um resultado superior ao AVC estão abaixo.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	1047004	37.71	837.60
35	1352315	38.82	1081.85
32	2005088	40.36	1604.07
30	2660081	41.41	2128.06
27	4038641	42.85	3230.91
25	5455551	43.88	4364.44
22	9055951	45.29	7244.76

Tabela 3.1: Resultados para Bosphorus em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	916195	10.03%	38.36	732.96	AVC QP37
3250	27	1342845	2.68%	39.74	1074.28	AVC QP35
2750	27	1536124	14.93%	39.76	1228.90	AVC QP35
3250	25	1831695	2.30%	40.64	1465.36	AVC QP32
2750	25	1958104	8.61%	40.65	1566.48	AVC QP32
3250	22	3031413	1.21%	41.98	2425.13	AVC QP30-27
2750	22	3083003	2.86%	41.99	2466.40	AVC QP30-27

Tabela 3.2: Resultados favoráveis do LCEVC para Bosphorus em AVC

Estes resultados mostram cenários onde o LCEVC se mostrou superior ao uso de somente AVC e o respectivo resultado que ele superou.

3.1.2 ReadySteadyGo

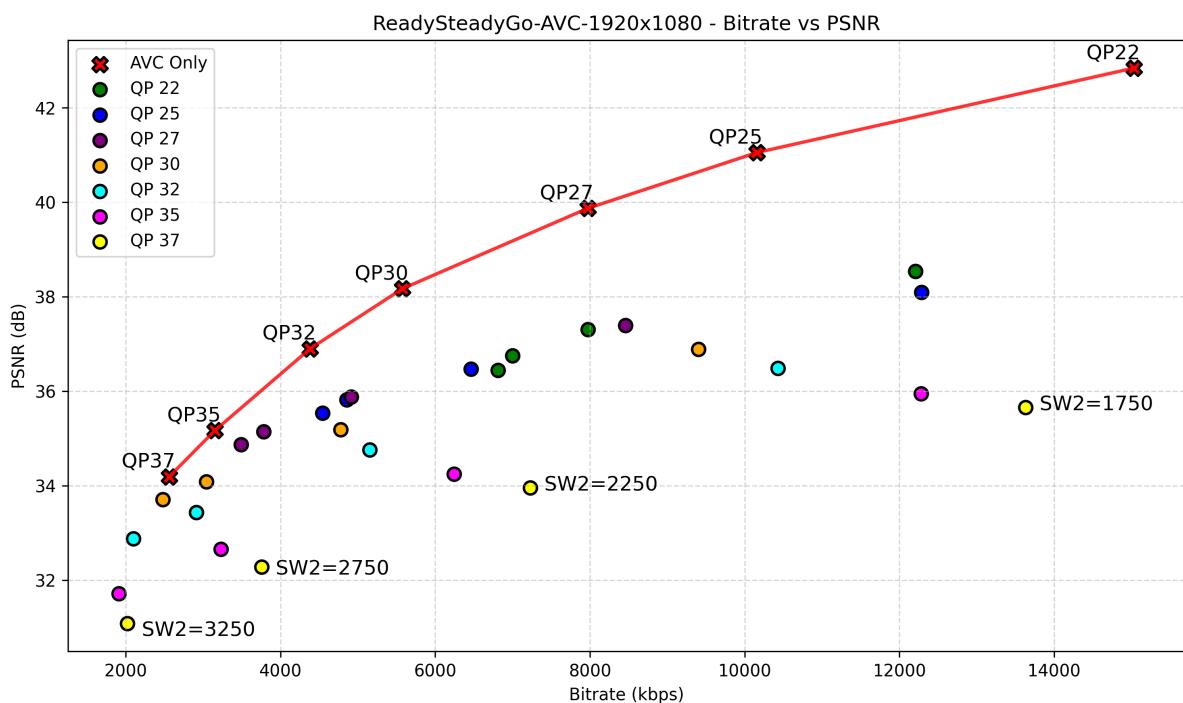


Figura 3.2: Resultados para "ReadySteadyGo" em AVC. [2]

Para esta sequência, o LCEVC não conseguiu atingir resultados satisfatórios. Todos os seus resultados foram abaixo da curva do AVC e não mostrou resultados que justifiquem o seu uso baseado em melhora de qualidade ou taxa. Porém, os resultados para um SW2 maior, ficaram relativamente próximos, como é o caso do QP 30 e 27 do LCEVC. Nestes casos, o uso do LCEVC manteria o PSNR próximo ao resultado obtido para a referência

em QP 37 e 35, onde, por exemplo, o uso do LCEVC para se adequar a um novo padrão não seria perceptível.

3.1.3 Jockey

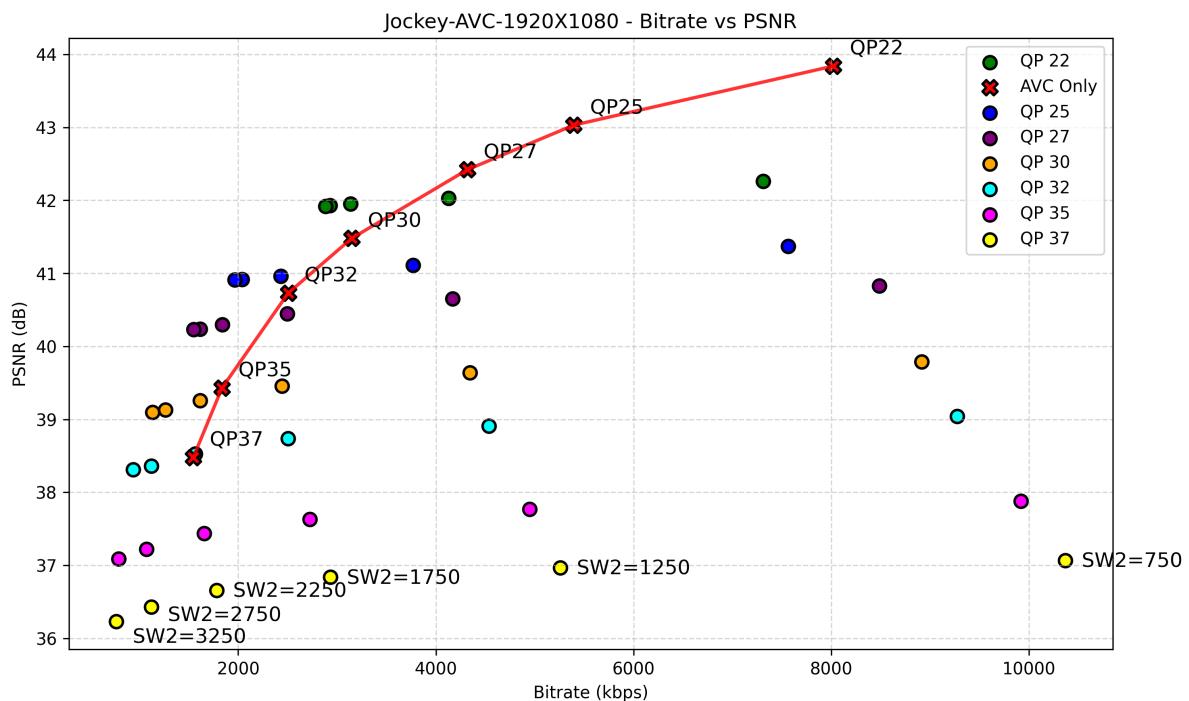


Figura 3.3: Resultados para "Jockey" em AVC. [2]

Aqui é outro caso onde o LCEVC obteve resultados satisfatórios. Vários resultados estão acima da curva do AVC, demonstrando uma ótima performance o LCEVC para os parâmetros escolhidos. Os valores de QP para LCEVC que se destacaram foram 32, 30, 27 e 25, que ficaram acima da curva de referência. Agora, levando em consideração somente os pontos que estão acima dos pontos do AVC, temos o seguinte resultado.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	1932479	38.48	1545.98
35	2294827	39.43	1835.86
32	3132841	40.73	2506.27
30	3935452	41.48	3148.36
27	5398380	42.42	4318.70
25	6743403	43.03	5394.72
22	10029224	43.84	8023.38

Tabela 3.3: Resultados para Jockey em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
2250	32	1955243	45.60%	38.53	1564.19	AVC QP37
3250	30	1417144	4.45%	39.10	1133.72	AVC QP37
2750	30	1580745	14.34%	39.13	1264.60	AVC QP37
2250	30	2019083	32.94%	39.26	1615.27	AVC QP37
3250	27	1934343	1.69%	40.23	1547.47	AVC QP35
2750	27	2017641	5.75%	40.24	1614.11	AVC QP35
2250	27	2298071	17.25%	40.30	1838.46	AVC QP35
3250	25	2455423	1.78%	40.91	1964.34	AVC QP32
2750	25	2549768	5.41%	40.92	2039.81	AVC QP32
2250	25	3036843	20.58%	40.96	2429.47	AVC QP32
3250	22	3603619	1.11%	41.92	2882.90	AVC QP30
2750	22	3658403	2.59%	41.93	2926.72	AVC QP30
2250	22	3923132	9.16%	41.95	3138.51	AVC QP30

Tabela 3.4: Resultados favoráveis do LCEVC para Jockey em AVC.

3.1.4 SOCCER

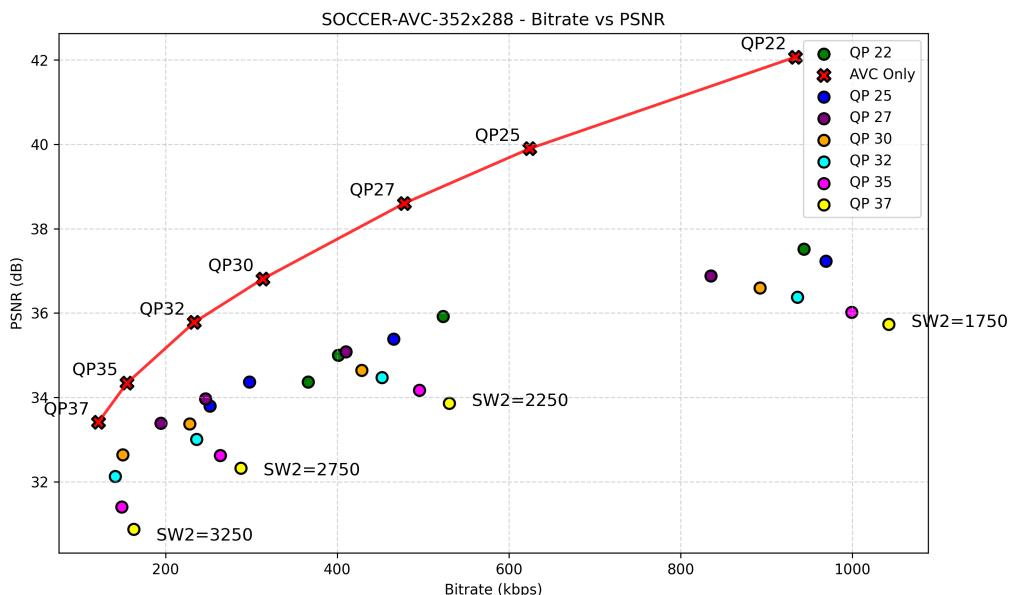


Figura 3.4: Resultados para "SOCCER" em AVC. [3]

Os resultados indicam que o LCEVC não apresentou vantagem clara em relação a somente o AVC na maioria das configurações testadas. Para esta sequência com uma resolução menor, ele não conseguiu atingir resultados satisfatórios. Assim, não houve benefícios em utilizar o LCEVC com AVC nesta sequência, pois os resultados usando somente o AVC já obtiveram o melhor resultado.

3.1.5 City

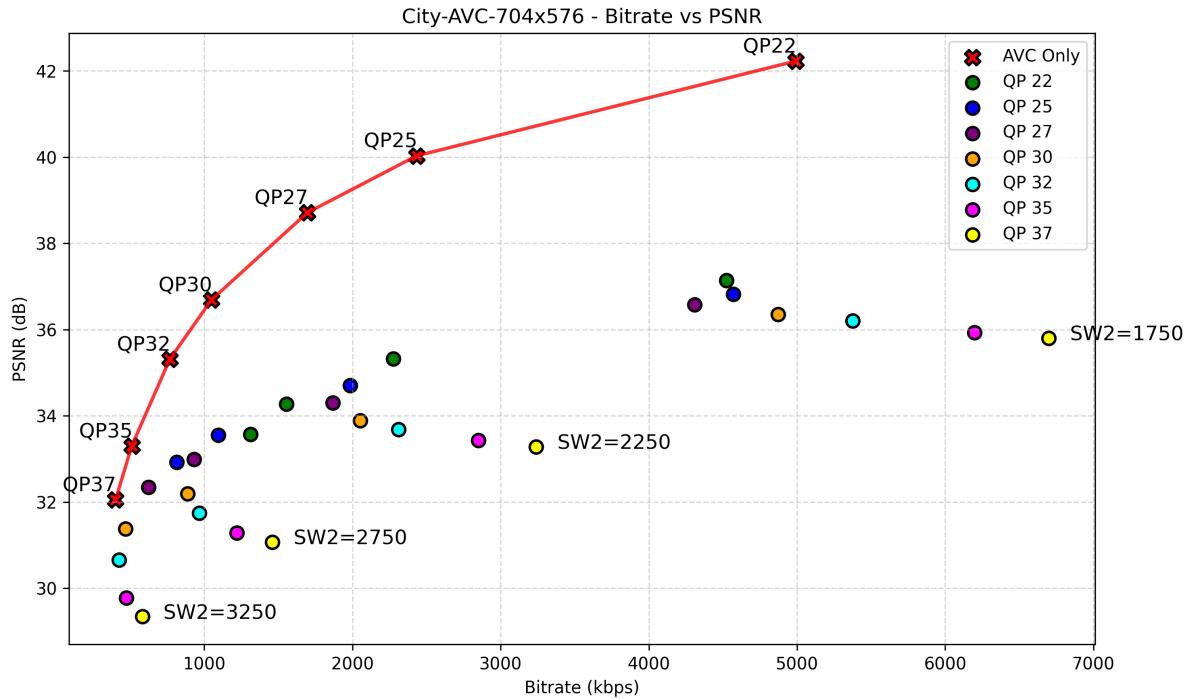


Figura 3.5: Resultados para "City" em AVC. [3]

Na sequência City, o LCEVC não demonstrou uma performance satisfatória. Mais uma sequência com uma resolução menor que 1080p que o LCEVC não obtém um resultado ótimo. Neste caso, o LCEVC não demonstrou um benefício em seu uso, no caso da relação qualidade-tamanho, e não obteve um PSNR superior à curva de referência em nenhum ponto.

3.1.6 vc-globo-05

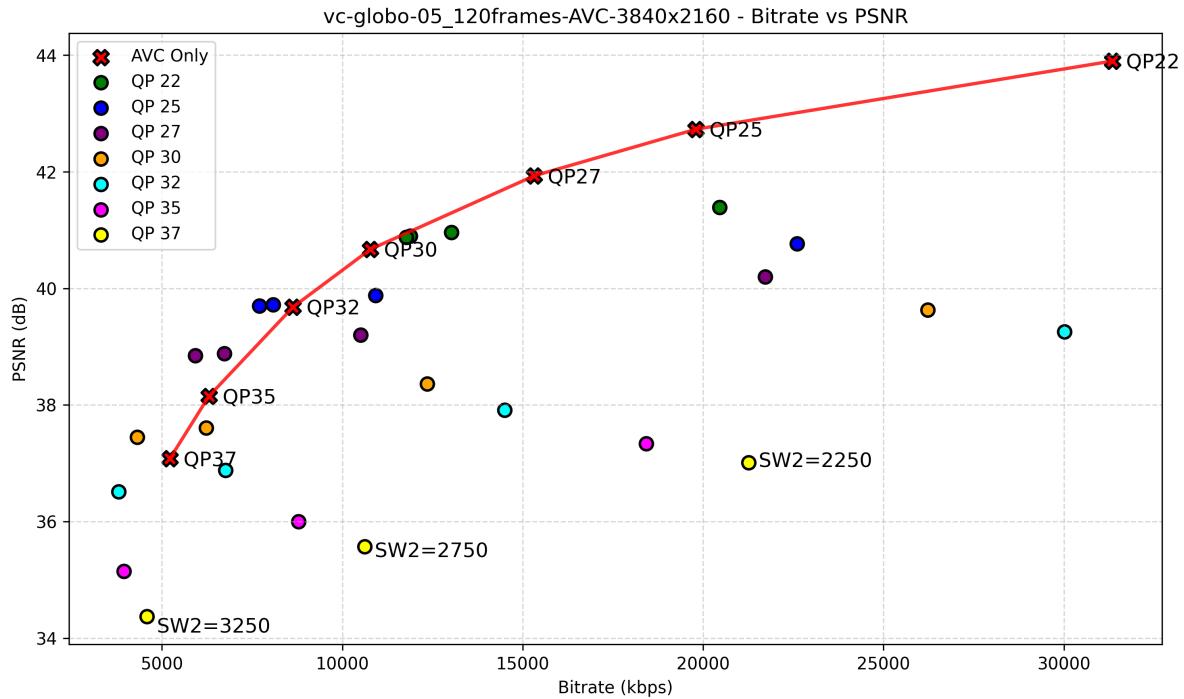


Figura 3.6: Resultados para "vc-globo-05" em AVC. [4]

Para esta sequência, o LCEVC conseguiu obter resultados satisfatórios acima da curva de referência do AVC. Os QPs que se destacaram para o LCEVC foram: 30, 27 e 25. Os resultados obtidos para QP 22 foram muito próximos da curva, onde mesmo não estando acima, ainda representa um valor satisfatório, por manter a qualidade que o AVC obteve. Os resultados favoráveis ao LCEVC estão abaixo.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	1305057	37.08	5220.23
35	1575423	38.15	6301.69
32	2158588	39.68	8634.35
30	2694302	40.67	10777.21
27	3828463	41.93	15313.85
25	4950018	42.73	19800.07
22	7836829	43.90	31347.32

Tabela 3.5: Resultados para vc-globo-05 em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	1079936	8.22%	37.45	4319.74	AVC QP37
3250	27	1480606	1.49%	38.85	5922.42	AVC QP35
2750	27	1681499	13.26%	38.88	6726.00	AVC QP35
3250	25	1924885	0.68%	39.70	7699.54	AVC QP32
2750	25	2021470	5.43%	39.72	8085.88	AVC QP32

Tabela 3.6: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-globo-05 em AVC.

3.1.7 vc-lcevc-01

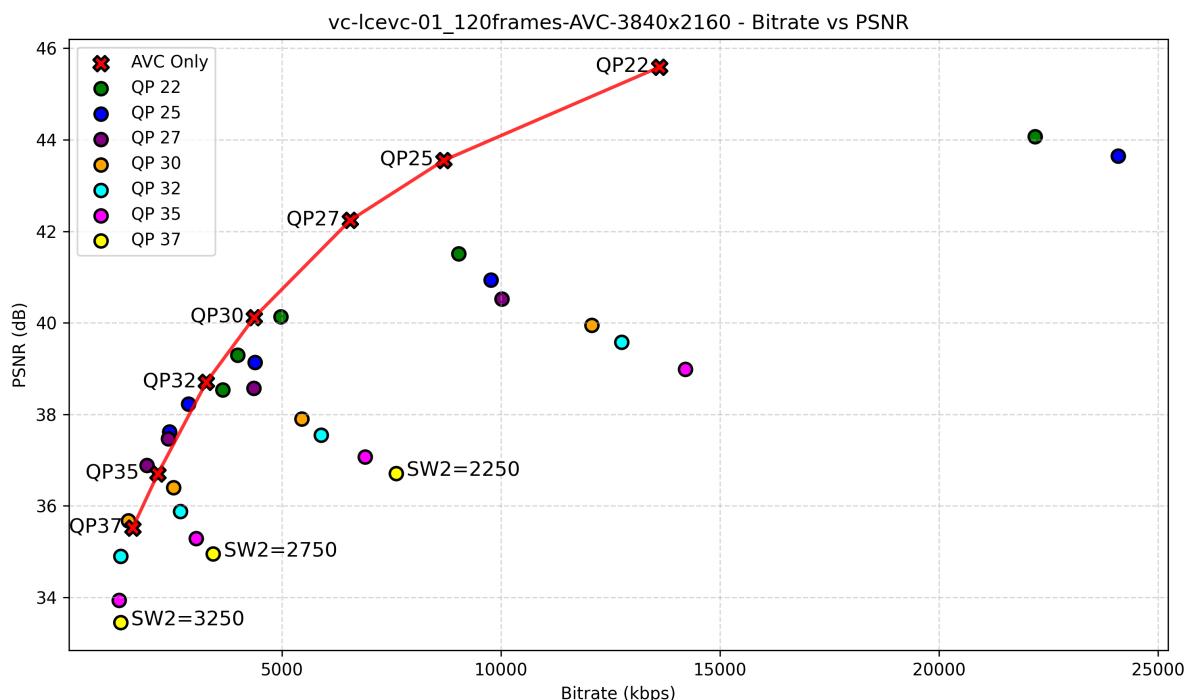


Figura 3.7: Resultados para "vc-lcevc-01" em AVC.

Nesta sequência, o LCEVC conseguiu resultados relevantes para QP igual a 30, 27 e 25. Para o QP de 22, ele não conseguiu alcançar a curva do AVC. Os resultados favoráveis ficaram bem próximos da curva do AVC. Os resultados são apresentados a seguir.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	398114	35.52	1592.46
35	541605	36.70	2166.42
32	818304	38.70	3273.22
30	1091870	40.12	4367.48
27	1639723	42.24	6558.89
25	2173840	43.55	8695.36
22	3405589	45.59	13622.36

Tabela 3.7: Resultados para vc-lcevc-01 em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	373846	28.13%	35.68	1495.38	AVC QP37
3250	27	480407	17.20%	36.89	1921.63	AVC QP35
2750	27	600914	33.80%	37.47	2403.66	AVC QP35
3250	25	608435	13.11%	37.62	2433.74	AVC QP35
2750	25	715498	26.11%	38.23	2861.99	AVC QP35

Tabela 3.8: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-lcevc-01 em AVC.

3.1.8 vc-phillips-01

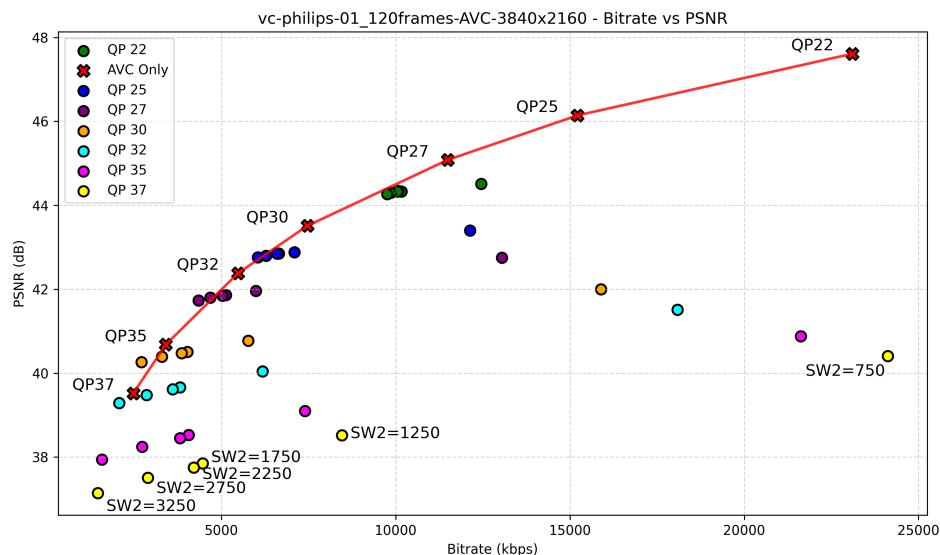


Figura 3.8: Resultados para "vc-phillips-01" em AVC.

Aqui, o LCEVC obteve alguns resultados acima da curva do AVC, mostrando obter resultados superiores ao AVC puro. Os QPs que se destacaram neste resultado foram 30, 27, e 25. Estes valores conseguiram resultados acima da curva.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	617900	39.52	2471.60
35	850687	40.68	3402.75
32	1368899	42.38	5475.60
30	1866486	43.51	7465.94
27	2872324	45.08	11489.30
25	3803303	46.14	15213.21
22	5775373	47.61	23101.49

Tabela 3.9: Resultados para vc-philips-01 em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	54458	8.05%	40.26	2704.88	AVC QP37
3250	27	20276	1.87%	41.73	4338.48	AVC QP37
2750	27	104990	8.98%	41.80	4677.34	AVC QP35
3250	25	9350	0.62%	42.76	6043.10	AVC QP32-30

Tabela 3.10: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-philips-01 em AVC.

3.1.9 vc-phillips-03

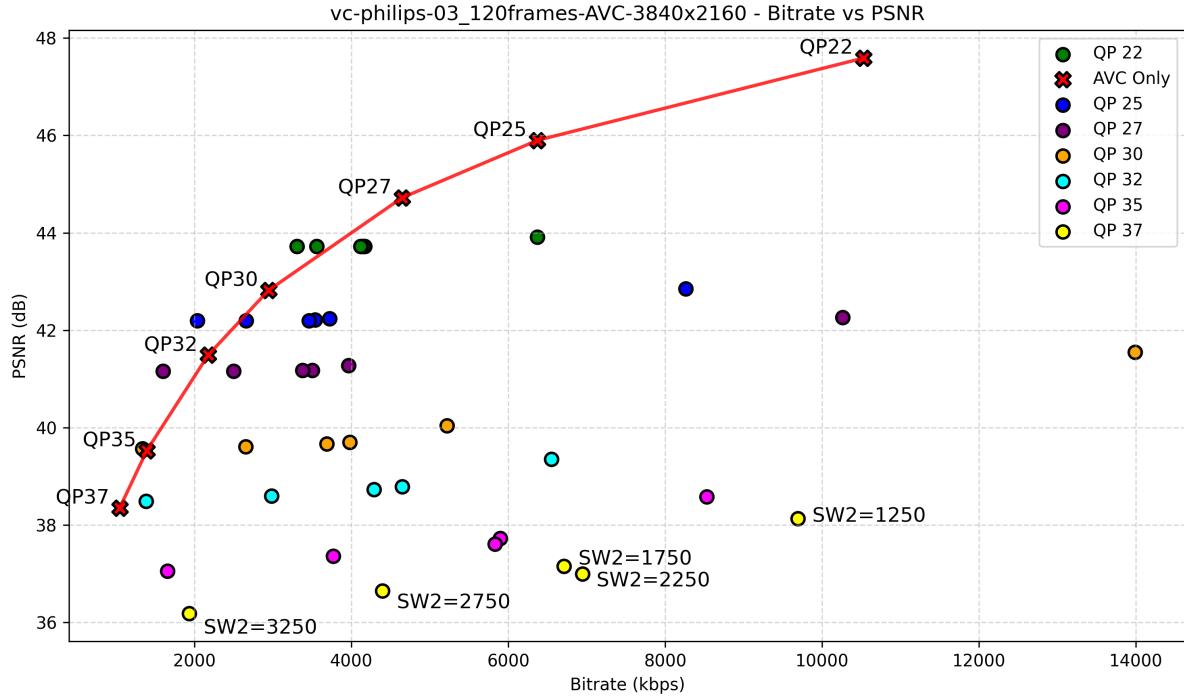


Figura 3.9: Resultados para "vc-phillips-03" em AVC.

Para esta sequência, o LCEVC gerou resultados melhores que o AVC puro. Novamente, os QPs menores se saíram melhor, como esperado, com destaque para os valores de QP de 30, 27, 25 e 22.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	261857	38.35	1047.43
35	348522	39.53	1394.09
32	543963	41.49	2175.85
30	736459	42.82	2945.84
27	1161656	44.72	4646.62
25	1593342	45.90	6373.37
22	2633079	47.59	10532.32

Tabela 3.11: Resultados para vc-phillips-03 em AVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	334155	31.98%	39.57	1336.62	AVC QP35
3250	27	399297	9.08%	41.16	1597.19	AVC QP35
3250	25	509493	2.68%	42.20	2037.97	AVC QP32
3250	22	826826	0.61%	43.72	3307.30	AVC QP30
2750	22	890314	7.70%	43.72	3561.26	AVC QP30

Tabela 3.12: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-phillips-03 em AVC.

3.2 VVC

3.2.1 Bosphorus

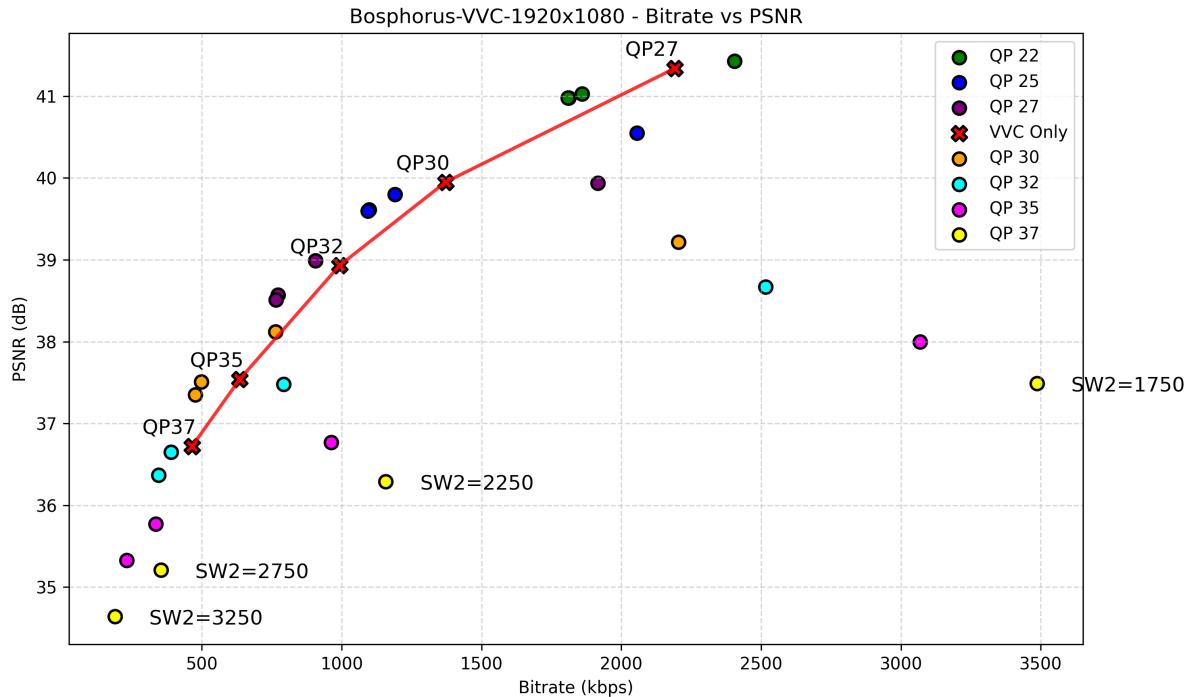


Figura 3.10: Resultados para "Bosphorus" em VVC. [2]

Para o Bosphorus em VVC, o LCEVC também obteve bons resultados. Vários pontos se encontram acima da curva dos vídeos somente em VVC. Os valores para o QP que alcançaram estes pontos foram 30, 27, 25 e 22. Observa-se que se a curva dos vídeos em VVC mantivessem a mesma tendência, haveriam mais pontos favoráveis para o LCEVC.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	580476	36.72	464.38
35	793851	37.54	635.08
32	1239951	38.93	991.96
30	1714361	39.95	1371.49
27	2738770	41.34	2191.02

Tabela 3.13: Resultados para Bosphorus em VVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	594855	3.25%	37.35	475.88	VVC QP37
2250	30	954971	39.74%	38.12	763.98	VVC QP37
2750	30	621725	7.43%	37.51	497.38	VVC QP35-32
3250	27	955429	1.73%	38.51	764.34	VVC QP35-32
2750	27	965637	2.77%	38.57	772.51	VVC QP35-32
2250	27	1132188	17.07%	38.99	905.75	VVC QP35-32
2750	25	1373014	2.61%	39.61	1098.41	VVC QP32-30
3250	25	1367475	2.22%	39.60	1093.98	VVC QP32-30
2250	25	1487470	10.11%	39.80	1189.98	VVC QP32-30
2750	22	2264797	1.48%	40.98	1811.84	VVC QP30-27
3250	22	2261661	1.34%	40.98	1809.33	VVC QP30-27

Tabela 3.14: Resultados favoráveis do LCEVC para Bosphorus em VVC.

3.2.2 SOCCER

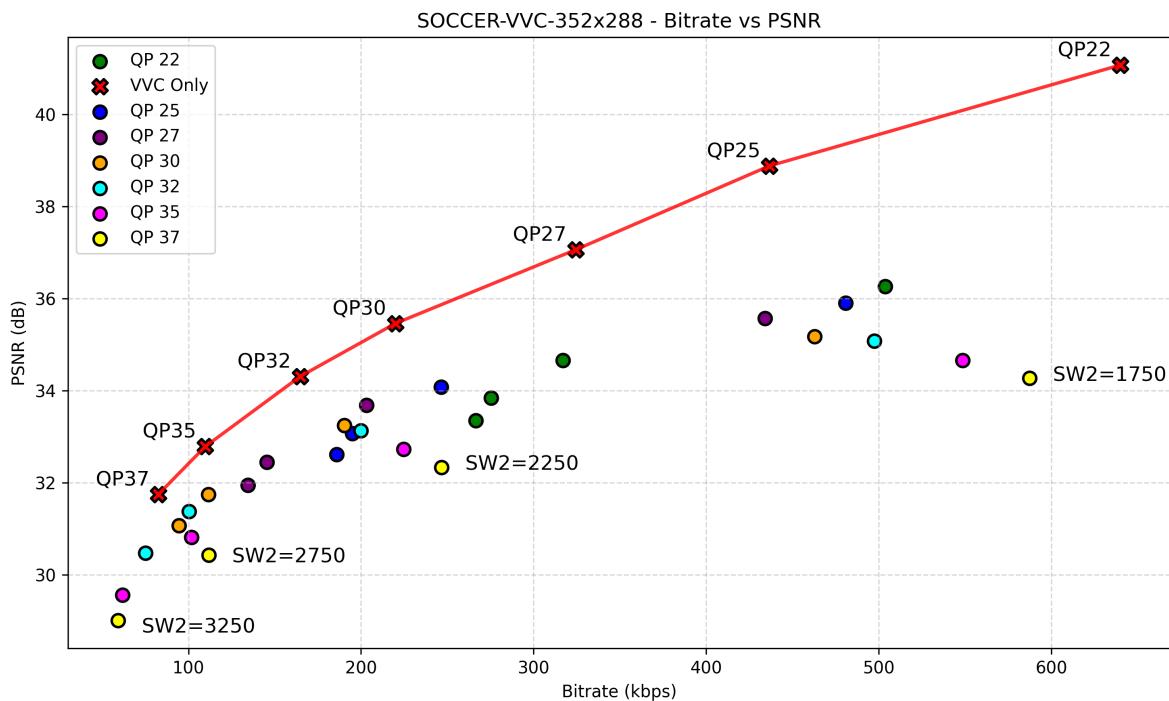


Figura 3.11: Resultados para "SOCCER" em VVC. [3]

Os resultados demonstram que neste caso houve uma vantagem para o uso de somente o VVC, com desempenho superior em todas as configurações testadas. O LCEVC demonstrou que nesta sequência, para os maiores valores de SW2 escolhidos, ele foi capaz de chegar próximo a relação de tamanho e qualidade que o VVC conseguiu, porém não conseguiu superá-lo e foi se distanciando dos pontos obtidos pelo VVC.

3.2.3 Jockey

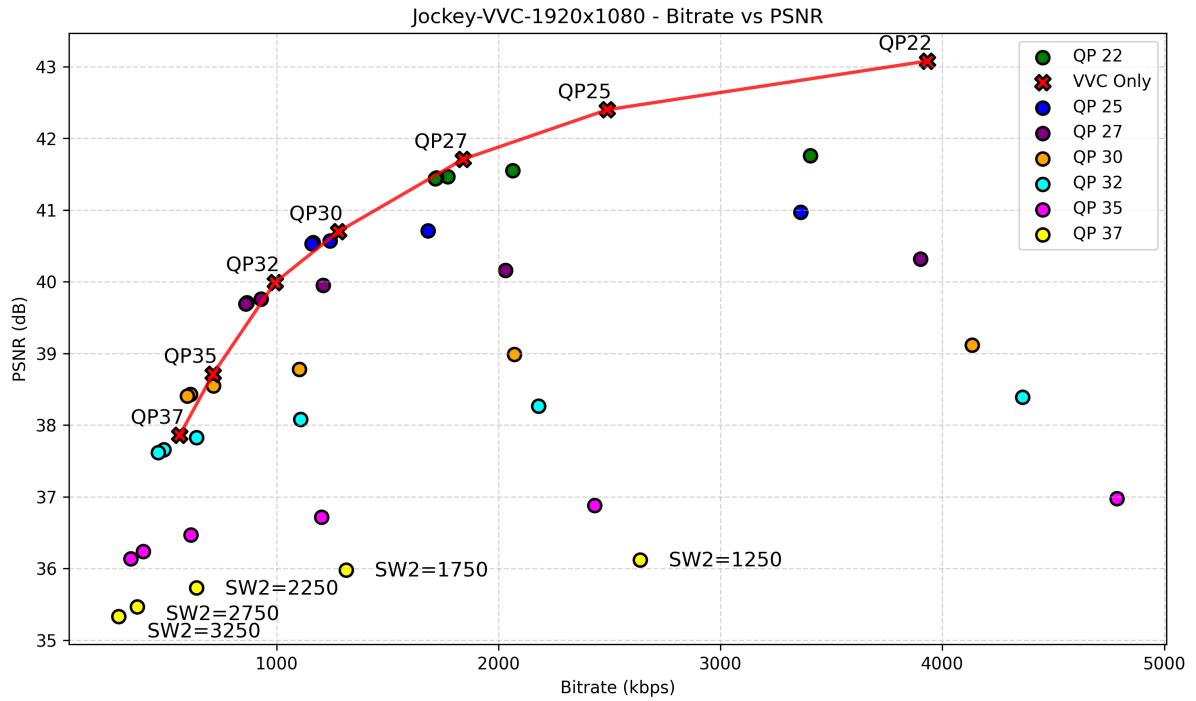


Figura 3.12: Resultados para "Jockey" em VVC. [2]

Para esta sequência, o LCEVC obteve bons resultados acima da curva de eficiência obtida pelo VVC puro. Valores para QPs iguais a 30, 27, 25 se saíram bem e estão acima da curva. QP igual a 22 ficou bastante próximo, mostrando ser um resultado com potencial, onde a qualidade e o tamanho destes arquivos estão próximos ao QP 27 do VVC.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	704469	37.86	563.58
35	891197	38.71	712.96
32	1241194	39.99	992.96
30	1598336	40.70	1278.67
27	2300814	41.71	1840.65
25	3111449	42.40	2489.16
22	4916006	43.08	3932.80

Tabela 3.15: Resultados para Jockey em VVC

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	747523	2.48%	38.41	598.02	VVC QP37
2750	30	765746	4.80%	38.43	612.60	VVC QP37
3250	27	1075071	1.59%	39.69	860.06	VVC QP35-32
2750	27	1083226	2.33%	39.71	866.58	VVC QP35-32
2250	27	1162481	8.99%	39.76	929.98	VVC QP35-32
3250	25	1449506	2.17%	40.53	1159.60	VVC QP32-30
2750	25	1456646	2.65%	40.55	1165.32	VVC QP32-30

Tabela 3.16: Resultados favoráveis do LCEVC para Jockey em VVC.

3.2.4 City

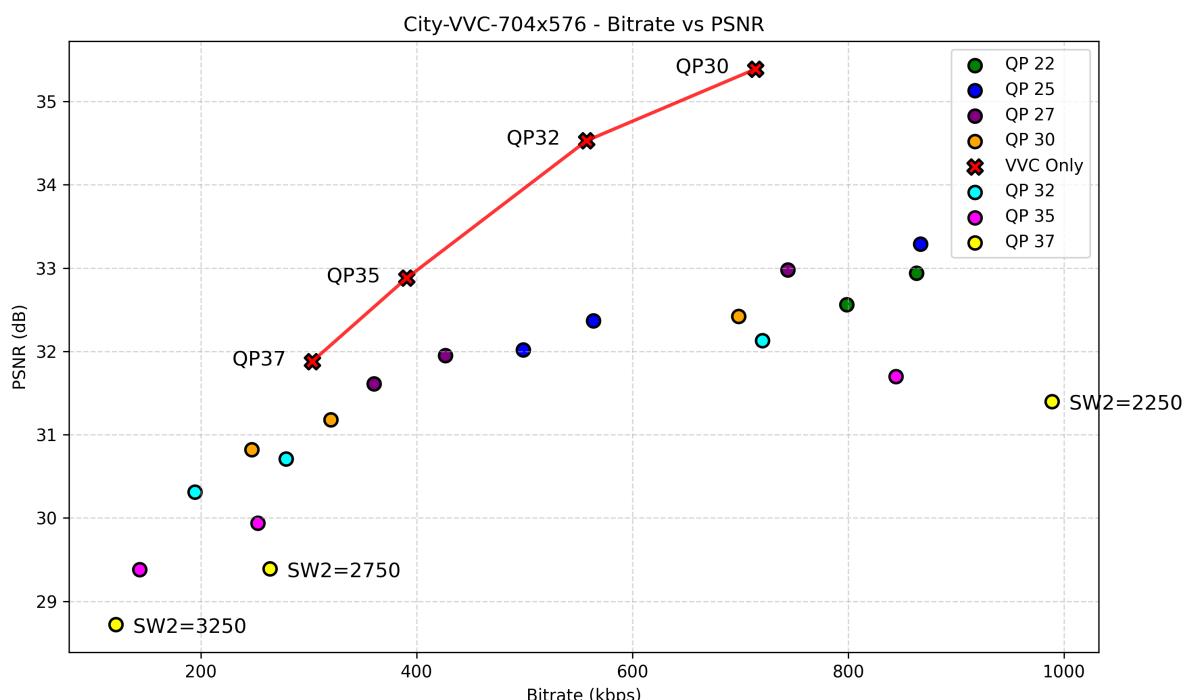


Figura 3.13: Resultados para "City" em VVC. [3]

Em City, o LCEVC não conseguiu superar os resultados obtidos com o VVC. Os resultados aparentam estar seguindo a mesma tendência que os resultados de referência no início, mas começam a decair ao chegarem perto do VVC QP37. Com esse decaimento, se distanciam cada vez mais e não conseguem um resultado satisfatório.

3.2.5 vc-phillips-01

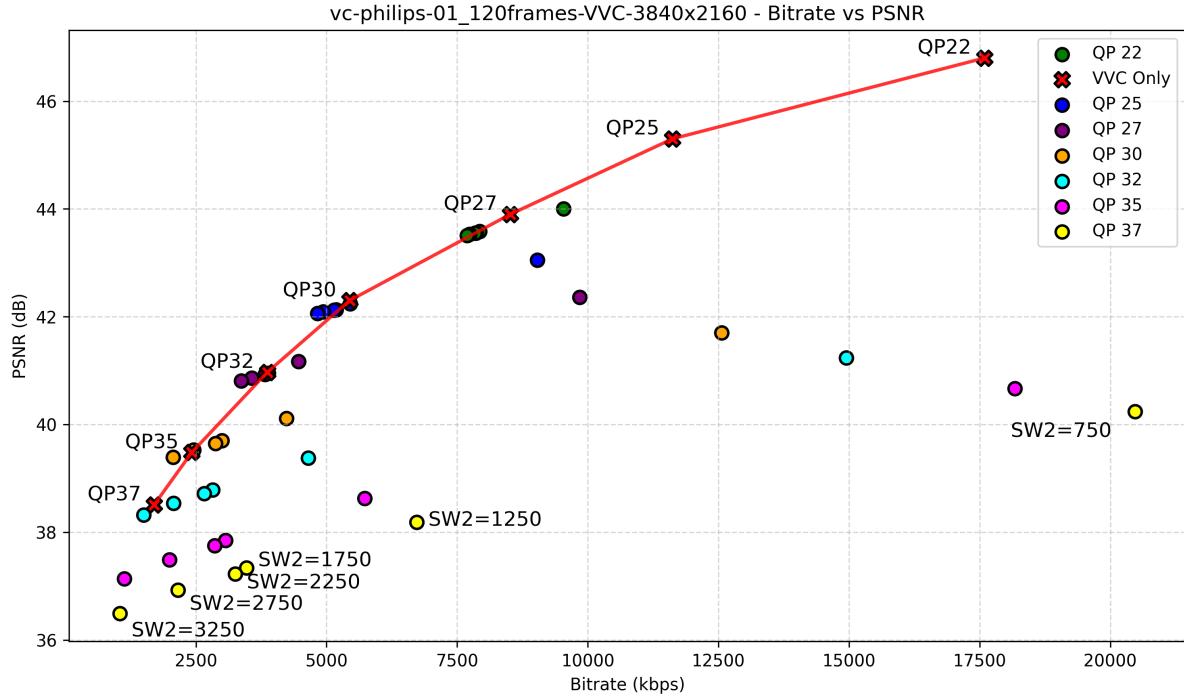


Figura 3.14: Resultados para "vc-phillips-01" em VVC.

Esta sequência obteve uma quantidade considerável de resultados positivos para o LCEVC, para valores de QP iguais 30, 27, 25 e 22. Para o QP 22, observa-se que o LCEVC obteve vários valores em cima da curva de eficiência das sequências de referência, onde pela tendência observada, é possível que os resultados para um QP menor que 22 iria resultar em resultados abaixo da curva de eficiência.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	425336	38.51	1701.34
35	604903	39.48	2419.61
32	966774	40.97	3867.10
30	1360536	42.30	5442.14
27	2129169	43.90	8516.68
25	2905023	45.30	11620.09
22	4397908	46.80	17591.63

Tabela 3.17: Resultados para vc-phillips-01 em VVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	30	516071	5.39%	39.39	2064.28	VVC QP37-35
2750	30	613763	20.45%	39.53	2455.05	VVC QP35
3250	27	842020	1.12%	40.81	3368.08	VVC QP35-32
2750	27	891745	6.63%	40.86	3566.98	VVC QP35-32
2250	27	955257	12.84%	40.93	3821.03	VVC QP35-32
1750	27	971277	14.28%	40.95	3885.11	VVC QP35-32
3250	25	1205943	0.50%	42.06	4823.77	VVC QP32-30
2750	25	1234327	2.78%	42.09	4937.31	VVC QP32-30
2250	25	1286043	6.69%	42.12	5144.17	VVC QP32-30
1750	25	1295331	7.36%	42.13	5181.32	VVC QP32-30
3250	22	1922342	0.26%	43.51	7689.37	VVC QP30-QP27
2750	22	1933946	0.86%	43.53	7735.78	VVC QP30-QP27
2250	22	1961129	2.24%	43.55	7844.52	VVC QP30-QP27
1250	22	1982576	3.29%	43.58	7930.30	VVC QP30-QP27
1750	22	1965174	2.44%	43.55	7860.70	VVC QP30-QP27

Tabela 3.18: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-phillips-01 em VVC.

3.2.6 vc-lcevc-01

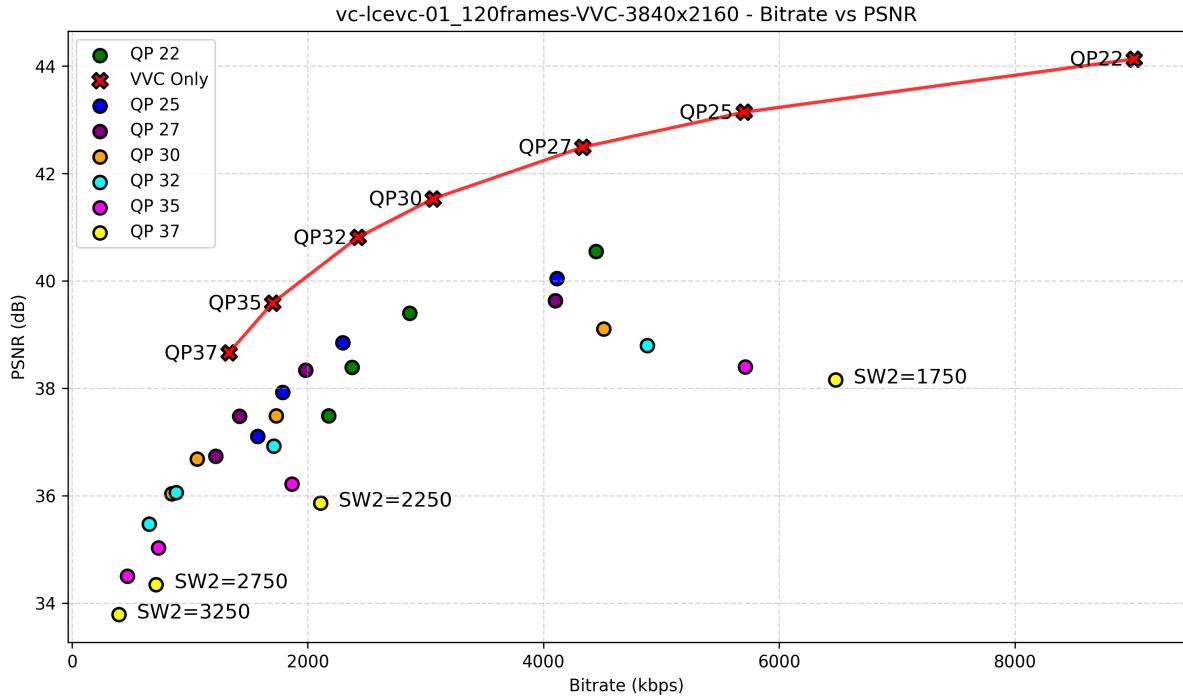


Figura 3.15: Resultados para "vc-lcevc-01" em VVC.

Para esta sequência, o LCEVC não obteve resultados acima da curva de eficiência. Os resultados para o LCEVC ficaram relativamente distantes da curva de referência do VVC. Ela apresenta um mesmo formato de curva, sugerindo que está mantendo a qualidade da mesma maneira que o VVC puro.

3.2.7 vc-globo-05

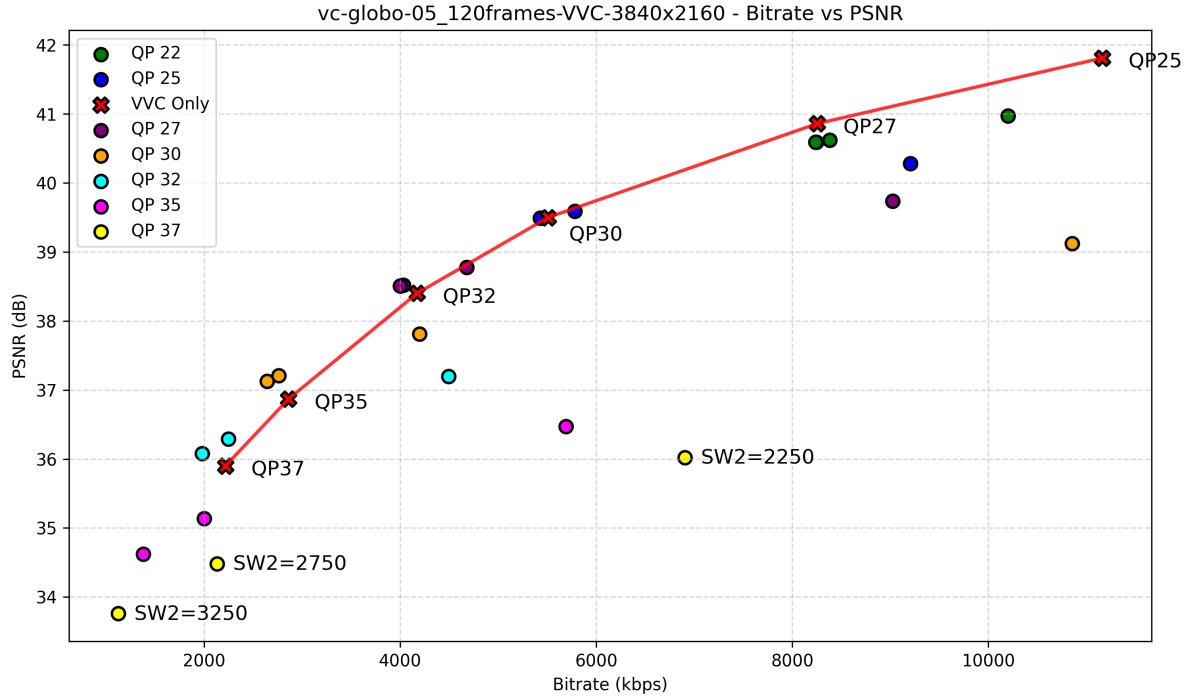


Figura 3.16: Resultados para "vc-globo-05" em VVC [4].

Em *vc-globo-05*, o LCEVC obteve resultados positivos melhores que os resultados obtidos pelo VVC. Os valores de QP que conseguiram resultados acima da curva foram 32, 30, 27 e 25. Para QP igual a 22, os resultados ficaram com o valor de PSNR levemente inferior ao QP 27 do VVC, com a mesma taxa de bits.

QP	Tamanho (b)	PSNR (dB)	Taxa (kbps)
37	554404	35.90	2217.62
35	715402	36.87	2861.61
32	1042958	38.40	4171.83
30	1377368	39.50	5509.47
27	2063711	40.86	8254.84
25	2790684	41.81	11162.74

Tabela 3.19: Resultados para vc-globo-05 em VVC.

SW2	QP	Tamanho (b)	Proporção	PSNR (dB)	Taxa (kbps)	Superou
3250	32	495040	1.35%	36.08	1980.16	VVC QP37
2750	32	561763	13.06%	36.29	2247.05	VVC QP37
3250	30	660706	0.58%	37.13	2642.82	VVC QP35
2750	30	689863	4.78%	37.21	2759.45	VVC QP35
3250	27	1000292	0.31%	38.51	4001.17	VVC QP32
2750	27	1007875	1.06%	38.52	4031.50	VVC QP32
3250	25	1356490	0.44%	39.49	5425.96	VVC QP30
2750	25	1359403	0.66%	39.49	5437.61	VVC QP30

Tabela 3.20: Resultados favoráveis do LCEVC para vc-globo-05 em VVC.

3.3 Visão geral dos resultados

Com os estes resultados obtidos, as tabelas abaixo demonstram a quantidade de pontos favoráveis para o LCEVC para cada sequência.

Sequência	Pontos favoráveis
Bosphorus (1920x1080, AVC)	7
ReadySteadyGo (1920x1080, AVC)	0
Jockey (1920x1080, AVC)	13
SOCCKER (352x288, AVC)	0
City (704x576, AVC)	0
vc-globo-05 (3840x2160, AVC)	5
vc-lcevc-01 (3840x2160, AVC)	5
vc-phillips-01 (3840x2160, AVC)	4
vc-phillips-03 (3840x2160, AVC)	5

Tabela 3.21: Quantidade de pontos acima da curva de eficiência para o AVC.

Sequência	Pontos favoráveis
Bosphorus (1920x1080, VVC)	11
SOCCKER (352x288, VVC)	0
Jockey (1920x1080, VVC)	7
City (704x576, VVC)	0
vc-phillips-01 (3840x2160, VVC)	15
vc-lcevc-01 (3840x2160, VVC)	0
vc-globo-05 (3840x2160, VVC)	8

Tabela 3.22: Quantidade de pontos acima da curva de eficiência para o VVC.

Analizando os resultados obtidos, pode-se observar os seguintes comportamentos:

- O LCEVC apresentou resultados superiores ao codificador base (AVC ou VVC) em diversas sequências, especialmente nas de maior resolução.

- Para sequências de baixa resolução, como SOCCER e City, o LCEVC não demonstrou vantagem significativa em relação ao codificador base.
- Os melhores resultados do LCEVC foram obtidos para valores de QP mais baixos (maior qualidade), onde superou a curva de eficiência dos codificadores de referência.
- Em algumas sequências, o LCEVC manteve a qualidade próxima ao codificador base, mesmo sem superá-lo, indicando potencial para aplicações onde a compatibilidade é importante.
- O número de pontos favoráveis ao LCEVC foi maior nas sequências codificadas com VVC em resoluções UHD (3840x2160).
- O desempenho do LCEVC depende fortemente dos parâmetros escolhidos, especialmente do valor de SW2 e do QP.
- Em geral, o LCEVC se mostrou mais eficiente em cenários de alta qualidade e alta resolução, enquanto em resoluções menores o benefício foi limitado.

Agora, para o parâmetro SW2 do LCEVC, observou-se que para o intervalo escolhido, os maiores valores foram os que mais apareceram dentre os pontos acima da curva de eficiência. A quantidade que cada valor de SW2 apareceram dentre estes pontos foram:

SW2	Ocorrências
1250	1
1750	3
2250	12
2750	28
3250	36

Tabela 3.23: Quantidade de ocorrências de cada valor de SW2 nos resultados favoráveis ao LCEVC

Para poder destacar os parâmetros que conseguiram os resultados positivos, a [?] demonstra quantas vezes cada SW2 e QP juntos apareceram como pontos acima da curva de eficiência.

SW2	QP	Ocorrências
3250	32	1
3250	30	10
3250	27	10
3250	25	10
3250	22	5
2750	32	1
2750	30	5
2750	27	9
2750	25	8
2750	22	5
2250	32	1
2250	30	2
2250	27	4
2250	25	3
2250	22	2
1750	27	1
1750	25	1
1750	22	1
1250	22	1

Tabela 3.24: Frequência de testes por combinação de SW2 e QP

Capítulo 4

Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise qualitativa do padrão Low Complexity Enhancement Video Coding (LCEVC), investigando seu desempenho quando utilizado como camada de aprimoramento sobre codecs tradicionais, como AVC e VVC. A proposta do LCEVC de oferecer melhorias de qualidade com baixa complexidade é bastante útil para o contexto atual dos codificadores de vídeo.

Os teste realizados evidenciaram que o desempenho do LCEVC é fortemente atrelado ao tipo de conteúdo codificado e à parametrização aplicada, especialmente os valores de QP para a camada base e o SW2 para a camada de aprimoramento. De maneira geral, o LCEVC demonstrou resultados positivos em algumas condições específicas, particularmente em conteúdos com maior movimentação e complexidade temporal, como a sequência "Jockey", onde a camada de aprimoramento se mostrou eficaz na preservação da qualidade virtual, com uma taxa de bits eficiente.

Em outras sequências como "Soccer" e "City" os resultados indicam que o isolado dos codecs foi mais eficiente. O uso do LCEVC com uma baixa quantização (SW2) resultou em taxas de bits elevadas, sem ganhos de PSNR.

Os resultados indicam que a principal vantagem do LCEVC está na sua flexibilidade de adaptação ao cenário. Quando ele é bem parametrizado, ele oferece uma relação qualidade e taxa de bits competitiva, tornando-o uma solução atrativa para ambientes com restrições de hardware, banda ou complexidade computacional, onde ele permite que seja alcançado níveis satisfatórios de qualidade mesmo quando não é viável utilizar codecs mais exigentes. Outro ponto forte é sua alta customização de parâmetros, que o torna uma tecnologia com alto nível de adaptação a vários cenários.

Porém, seu uso requer cuidado nas escolhas dos parâmetros, porém, seus ganhos em eficiência nem sempre são garantidos, principalmente quando se utiliza codecs modernos, como observado com o VVC.

4.1 Trabalhos Futuros

Embora este trabalho tenha explorado o LCEVC em combinação com codecs tradicionais, há várias direções futuras que podem ser investigadas:

- Explorar o uso do LCEVC com outros codecs, como HEVC e EVC, para avaliar seu desempenho em diferentes cenários de compressão.
- Investigar a aplicação do LCEVC em contextos de transmissão ao vivo, onde a latência e a eficiência são críticas.
- Analisar o impacto do LCEVC em dispositivos com recursos limitados, como smartphones e dispositivos embarcados, para entender melhor sua viabilidade em cenários de baixa potência.
- Realizar uma análise mais aprofundada da complexidade computacional do LCEVC, comparando-a com outros métodos de aprimoramento de vídeo.
- Investigar a integração do LCEVC com técnicas de aprendizado de máquina para otimização de parâmetros e melhoria da qualidade do vídeo.
- Realizar um estudo mais profundo sobre os parâmetros de codificação do LCEVC, como o SW1 e outras centenas de parâmetros disponíveis, para entender melhor como eles afetam a qualidade e a eficiência da codificação.
- Explorar a possibilidade de utilizar o LCEVC em conjunto com técnicas de super-resolução para melhorar ainda mais a qualidade do vídeo em resoluções mais baixas. Como por exemplo, o uso do Deep Learning Super Sampling (DLSS) ao invés do algoritmo de *Upsampling* do LCEVC.

Referências

- [1] Wikipedia: *Pareto efficient frontier*. https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_front, acesso em 2025-07-27. vii, 10
- [2] Mercat, A., M. Viitanen e J. Vanne: *Uvg dataset: 50/120fps 4k sequences for video codec analysis and development*. Proc. ACM Multimedia Syst. Conf., June 2020. vii, 10, 13, 14, 15, 24, 26
- [3] Xiph.Org: *Xiph.org video test media*. <https://media.xiph.org/video/derf/>, acesso em 2025-05-05. vii, 10, 16, 17, 25, 27
- [4] TV Globo: *Trecho de vídeo da tv globo em formato raw/mov*, 2024. Conteúdo obtido para testes de compressão. Sem distribuição pública. vii, 18, 31
- [5] Syahbana, Yoanda Alim, Herman, Azizah Abdul Rahman e Kamalrulnizam Abu Bakar: *Aligned-psnr (apsnr) for objective video quality measurement (vqm) in video stream over wireless and mobile network*. Em *2011 World Congress on Information and Communication Technologies (WICT)*, Johor, Malaysia, 2011. IEEE. <https://core.ac.uk/download/pdf/228026495.pdf>. viii, 5
- [6] SBTVD: *Resultados da avaliação subjetiva da qualidade da codificação de vídeo em tempo real para tv 2.5.* 1
- [7] Carlos Eduardo Cosme Ribeiro: *Gt tv 3.0: Funcionalidades do mpeg-5, low complexity enhancement video coding (lcevc)*. <https://set.org.br/news-revista-da-set/revista/gt-tv-3-0-funcionalidades-do-mpeg-5-low-complexity-enhancement-video-coding-lcevc/>. 1
- [8] V-Nova: *Brazilian tv giant achieves 10mbps uhd with lcevc enhancement*. <https://v-nova.com/press-releases/brazilian-tv-giant-achieves-10mbps-uhd-with-lcevc-enhancement/>, acesso em 2024-09-05. 1
- [9] Miller, Jeremy: *What is raw footage and when to use it*. <https://bxfilms.tv/blog/what-is-raw-footage>, acesso em 2022-09-09. 2
- [10] Morris, O.J.: *Mpeg-2: where did it come from and what is it?* Em *IEE Colloquium on MPEG-2 - What it is and What it isn't*, páginas 1/1–1/5, 1995. 2
- [11] Carlos Eduardo Cosme Ribeiro e Globo: *Panorama dos codificadores de vídeos*. <https://globotech.globo.com/blog/noticia/panorama-dos-codificadores-de-videos.ghtml>, acesso em 2024-08-13. 2

- [12] ITU-T Study Group 16 (VCEG) and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 (MPEG): *ITU-T Recommendation H.264 / ISO/IEC 14496-10: Advanced video coding for generic audiovisual services*. Recommendation / international standard H.264 / ISO/IEC 14496-10, International Telecommunication Union, International Organization for Standardization International Electrotechnical Commission, maio 2003. <https://www.videosurveillance.co.in/H.264.pdf>, Corrigendum 1 added May 7, 2004. 3
- [13] Hamidouche, Wassim, Thibaud Biatek, Mohsen Abdoli, Edouard François, Fernando Pescador, Miloš Radosavljević, Daniel Menard e Mickael Raulet: *Versatile video coding standard: A review from coding tools to consumers deployment*. arXiv preprint, junho 2021. <https://arxiv.org/pdf/2106.14245>, Revised version (v2) submitted on 6 Nov 2021. 4
- [14] Gupta, Prakash C.: *Data Communications and Computer Networks*. PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, India, 2006, ISBN 9788120328464. https://books.google.com.br/books?id=-kNn_p6WA38C&pg=PA7. 4
- [15] ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 MPEG-5 Part 2 Working Group: *White paper on low complexity enhancement video coding (lcevc)*. White paper MPEG-137, LCEVC (Low Complexity Enhancement Video Coding), janeiro 2022. 5, 6, 7
- [16] Battista, Stefano, Guido Meardi, Simone Ferrara, Lorenzo Ciccarelli, Florian Maurer, Massimo Conti e Simone Orcioni: *Overview of the low complexity enhancement video coding (lcevc) standard*. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 32(11):7983–7995, 2022. 6, 7
- [17] Lucas Pena: *Lcevc-enhancement*. https://github.com/lucpena/LCEVC-Enhancement/tree/main/Low_Complexity_Enhancement_Video_Coding, acesso em 2025-07-27. 9
- [18] Emmerich, Michael e André Deutz: *Multicriteria optimization and decision making: Principles, algorithms and case studies*, 2025. <https://arxiv.org/abs/2407.00359>, Página 26. 9
- [19] *LTM Git (requer uma conta MPEG)*. <https://git.mpeg.expert/MPEG/Video/LCEVC/LTM>. 11