

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Computação



Dissertação

**SOLUÇÃO ARQUITETURAL PARA A DECODIFICAÇÃO INTRAQUADRO DO
PADRÃO DE CODIFICAÇÃO AV1**

Jones William Goebel

Pelotas, 2019

Jones William Goebel

**SOLUÇÃO ARQUITETURAL PARA A DECODIFICAÇÃO INTRAQUADRO DO
PADRÃO DE CODIFICAÇÃO AV1**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Schiavon Porto
Coorientadores: Prof. Dr. Bruno Zatt
Prof. Dr. Luciano Volcan Agostini

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

G593s Goebel, Jones William

Solução arquitetural para a decodificação intraquadro do padrão de codificação AV1 / Jones William Goebel ; Marcelo Schiavon Porto, orientador ; Bruno Zatt, Luciano Volcan Agostini, coorientadores. — Pelotas, 2019.

117 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Codificação de vídeo. 2. AV1. 3. Decodificação intraquadro. 4. Projeto de hardware. I. Porto, Marcelo Schiavon, orient. II. Zatt, Bruno, coorient. III. Agostini, Luciano Volcan, coorient. IV. Título.

CDD : 005

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer minha família, especialmente aos meus pais Jorge e Selda, que juntos me educaram e proporcionaram a oportunidade para que eu pudesse estudar. Aos meus irmãos Jorge e João por ficarem sempre me apoiando. Agradeço a minha namorada Julia por ser muito amável e compreensiva comigo. Sou grato por fazer parte do Grupo de Arquiteturas e Circuitos Integrados (GACI) e pela oportunidade que os meus orientadores Marcelo Porto, Bruno Zatt e Luciano Agostini me proporcionaram de crescimento tanto acadêmico como pessoal.

"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes". MARTIN LUTHER KING

RESUMO

GOEBEL, Jones William. **SOLUÇÃO ARQUITETURAL PARA A DECODIFICAÇÃO INTRAQUADRO DO PADRÃO DE CODIFICAÇÃO AV1**. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Os vídeos digitais estão presentes cada vez mais no nosso dia-a-dia, justamente pelo aumento do número de dispositivos eletrônicos que são capazes de manipular os vídeos e também pela redução do custo da produção dos dispositivos. A codificação de vídeo tem o objetivo em reduzir o tamanho do vídeo respeitando a relação entre qualidade do vídeo e o tamanho do *bitstream*. Para atender estes requisitos, inúmeros codificadores foram desenvolvidos, sendo que cada codificador visa atender a demanda e as restrições de desempenho vigentes em sua época de desenvolvimento. Desta forma, podemos citar alguns codificadores importantes na atualidade: H.264 e HEVC e VP9. Tais codificadores são definidos por órgãos de padronização internacionais e seu uso é submetido ao pagamento de royalties para os casos do H.264 e HEVC. Diante disto, Google, Xiph e Cisco deram início a uma aliança chamada AOMedia (*Alliance for Open Media*) e definiram um novo codificador de vídeo, onde, a partir dos codificadores previamente desenvolvidos por estas empresas, iniciou-se o desenvolvimento do AV1 (*AOMedia Video 1*). A proposta do AV1 é justamente ser um codificador livre de royalties e de código aberto. Nos codificadores de vídeo atuais, a predição intraquadro é o módulo responsável por reduzir a redundância espacial entre amostras vizinhas dentro de um mesmo quadro. O AV1 trouxe novas técnicas para a predição intraquadro, tornando-a mais complexa e eficiente. Dentre as novas técnicas podemos citar o modo Chroma from Luma e os intrafiltros, além disso o AV1 estendeu a predição intraquadro para 19 tamanhos de blocos. A arquitetura desenvolvida neste trabalho visa abordar uma solução arquitetural para a decodificação intraquadro do padrão de codificação AV1. No decorrer da dissertação será explicado a estratégia de modelamento utilizado para desenvolver a arquitetura como também os módulos que a compõem. A arquitetura decodificador intraquadro AV1 (DIAV1) foi sintetizada em ASIC considerando três casos de estudo, que visam retratar a operação da arquitetura desde cenários pessimistas até cenários mais realistas. Os resultados demonstram que a DIAV1 pode operar nestes três cenários tendo uma potência dissipada que pode variar desde 76,03 mW até 16,9 mW, de acordo com o cenário pretendido

Palavras-Chave: codificação de vídeo; av1; decodificação intraquadro; projeto de hardware

ABSTRACT

GOEBEL, Jones William. **ARCHITECTURAL SOLUTION FOR THE INTRA-FRAME DECODING OF THE AV1 CODING STANDARD**. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Digital videos are increasingly present in our daily lives, precisely because of the increase in the number of electronic devices that are able to handle the videos and also by the reduction of the cost of the production of the devices. Video encoding aims to reduce video size by respecting the relationship between video quality and bitstream size. To meet these requirements, numerous encoders have been developed, each encoder aiming to meet the demand and the performance constraints in force at the time of its development. In this way, we can cite some important coders currently: H.264 and HEVC and VP9. Such coders are defined by international standardization bodies and their use is subject to the payment of royalties. As a result, Google, Xiph, and Cisco started an alliance called AOMedia (Alliance for Open Media) and defined a new video encoder, AV1 (AOMedia Video 1). The AV1 proposal is to be a royalty-free and open-source encoder. In current video encoders, the intra-frame prediction is the module responsible for reducing spatial redundancy between neighboring samples within the same frame. AV1 has introduced new techniques for intra-frame prediction, making it more complex and efficient. Among the new techniques we can mention the Chroma from Luma mode and the intrafilters, in addition, the AV1 extended the intra-frame prediction for 19 block sizes. The architecture developed in this work aims to approach an architectural solution for the intra-frame decoding of the coding standard AV1. In the course of the dissertation will be explained the modeling strategy used to develop the architecture as well as the modules that compose it. The intra-frame decoder architecture AV1 (DIAV1) was synthesized in ASIC considering three case studies, which aim to portray the operation of the architecture from pessimistic scenarios to more realistic scenarios. The results show that DIAV1 can operate in these three scenarios having a dissipated power that can vary from 76.03 mW to 16.9 mW, according to the desired scenario.

Keywords: video coding; av1; intra-frame decoder; hardware design

LISTA DE FIGURAS

1	Linha Cronológica para os principais codificadores desenvolvidos. . .	17
2	Formatos de subamostragem de cor do YCbCr (PORTO, 2012). . .	23
3	Modelo simplificado dos codificadores de vídeo atuais.	24
4	Modelo simplificado dos Decodificadores de vídeo.	25
5	Particionamentos suportados pelo codificador AV1.	27
6	Amostras vizinhas utilizadas como referência na predição intraquadro para um bloco 8x8, considerando todos os modos possíveis. . .	31
7	Amostras de referência (destacadas em tons de cinza) utilizadas para a modo DC.	33
8	Exemplo da aplicação do modo Paeth.	35
9	Aplicação da interpolação horizontal (a) e vertical (b) da modo Smooth.	36
10	Direções dos modos de predição angulares no AV1.	38
11	Geração do bloco 8x8 aplicando o modo de predição de ângulo (a) 180° e (b) 90°.	40
12	Exemplo de aplicação dos filtros intraquadro para um bloco 8x8. . .	42
13	Diagrama que demonstra as etapas do modo CFL.	43
14	Exemplo de aplicação da pré-filtragem <i>Edge Filter Strength</i>	45
15	Exemplo de aplicação da pré-filtragem <i>Edge Upsample</i>	48
16	Fluxo do núcleo da decodificação intraquadro.	50
17	Fluxo completo da decodificação intraquadro.	51
18	Percentual de escolha e representatividade para os tamanhos de blocos na predição Intraquadro.	56
19	Percentual de representatividade (%) de cada modo intraquadro. . .	57
20	Percentual de representatividade (%) para os modos direcionais. . .	57
21	Percentual de escolha e representatividade para os tamanhos de blocos na predição intraquadro.	59
22	Percentual de representatividade (%) de cada modo intraquadro. . .	60
23	Percentual de representatividade (%) para os modos direcionais. . .	60
24	Percentual de ocorrência para os tamanhos de blocos para todo o decodificador (intraquadro+intrequadros).	61
25	Percentual de representatividade para os tamanhos de blocos para todo o decodificador (intraquadro+interquadros).	62
26	Contagem das amostras da intraquadro do vídeo Cactus considerando dois segundos para o QP 42.	63

27	Contagem das amostras da intraquadro do vídeo Cactus considerando dois segundos para o QP 22.	63
28	Formatos de saída das amostras processadas pela DIAV1 para um bloco 16x16 amostras.	67
29	Arquitetura Decodificador IntraQuadro do AV1.	68
30	Módulo de memória (armazenamento, distribuidor e receptor). . . .	70
31	Arquitetura do Módulo Direcional.	72
32	Arquitetura do Módulo Smooth.	73
33	Arquitetura do Módulo intra filtros.	75
34	Blocos internos do Módulo intra filtros: Bloco FILTER (a), Bloco Multiplicador (b) e Bloco Seletor/Somador (c).	76
35	Arquitetura do Módulo Paeth.	77
36	Arquitetura do Módulo DC.	78
37	Arquitetura do bloco AS (Árvore de Somadores).	79
38	Arquitetura do Módulo CFL.	80
39	Temporização para os módulos desenvolvidos considerando o processamento de um bloco 16x16.	82
40	Intervalos de processamento intercalando entre o máximo processamento e sem processamento.	89

LISTA DE TABELAS

1	Pesos para cada tamanho de bloco para o modo <i>Smooth</i>	36
2	Especificação dos ângulos para cada um dos modos.	38
3	Valores atribuídos aos deslocamentos dentro dos ângulos 0° a 90°.	39
4	Cinco famílias de filtros com os seus respectivos coeficientes de multiplicação para uma das posições P.	41
5	Kernels suportados pela filtragem Edge filter strength.	44
6	Seleção dos filtros caso as amostras de referência venham do modo smooth.	46
7	Seleção dos filtros caso as amostras de referência não venham do modo smooth.	46
8	Características da predição intra dos codificadores de vídeo atuais.	52
9	Número de ciclos para o processamento de 64x64 amostras de luminância e 32x32 amostras de croma, considerando diferentes tamanhos de bloco.	83
10	Frequências alvo para os casos analisados.	88
11	Resultados de síntese individual considerando.	90
12	Resultados de síntese da arquitetura DIAV1 considerando os três cenários de operação.	91
13	Sequências de testes de utilizadas nas simulações dos vídeos 4K.	99
14	Sequências de testes definidas pela CTC.	100
15	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K.	102
15	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K (continuação).	103
16	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de croma - Onlyintra - sequências de vídeos 4K.	104
16	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de croma - Onlyintra - sequências de vídeos 4K (continuação).	105
17	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K.	106
17	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K (continuação).	107
18	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de croma - Lowdelay - sequências de vídeos 4K.	108

18	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K (continuação). .	109
19	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC.	110
19	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC (continuação) .	111
20	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC.	112
20	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC (continuação).	113
21	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - LowDelay - sequências de vídeos da CTC	114
21	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - LowDelay - sequências de vídeos da CTC (continuação).	115
22	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos da CTC.	116
22	Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos da CTC (continuação).	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
ADST	<i>Asymmetric Discrete Sine Transform</i>
AOM	AOMedia
AOMedia	<i>Alliance for Open Media</i>
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
AS	Árvore de somadores
AV1	AOMedia Video 1
BB	Bloco Base
CDEF	<i>Constrained Directional Enhancement Filter</i>
CFL	<i>chroma from luma</i>
CLPF	<i>constrained lowpass filter</i>
CTC	<i>Common Test Conditions</i>
Cb	<i>Chrominance Blue</i>
Cr	<i>Chrominance Red</i>
DBF	<i>deblocking filter</i>
DCT	<i>Discrete Cosine Transform</i>
DERING	<i>directional deringing filter</i>
DIIV1	Decodificador IntraQuadro do AV1
DM	Bloco Multiplicador
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FME	<i>Fractional Motion Estimation</i>
FlipADST	<i>flipped Asymmetric Discrete Sine Transform</i>
HEVC	<i>High Efficiency Video Coding</i>
IDTX	<i>identity transform</i>
ITU-T	<i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i>
JCT-VC	<i>Joint Collaborative Team on Video Coding</i>

LRF	<i>Loop Restoration Filters</i>
MCFL	Memória CFL
MC	<i>Motion Compensation</i>
MM	Módulo de Memória
PVT	<i>Process Voltage Temperature</i>
QP	<i>Quantization Parameter</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SB	SuperBlock
SoCs	<i>System-on-a-chip</i>
SS	bloco Seletor/Somador
TMC	Taxa Média de Ciclos
TM	<i>True Motion</i>
TSMC	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>
UHD	<i>Ultra High Definition</i>
VCEG	<i>Video Coding Experts Group</i>
YCbCr	<i>Luminance, Chrominance Blue, Chrominance Red</i>
Y	<i>Luminance</i>
intraBC	<i>Intra Block Copy</i>
qps	quadros por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	PRINCÍPIOS DE CODIFICAÇÃO DE VÍDEO	21
2.1	Redundâncias de dados, Espaço de Cores e Subamostragem	21
2.2	Modelo do codificador/decodificador	23
2.3	Padrão de codificação de vídeo AV1	26
3	A PREDIÇÃO INTRAQUADRO NO CODIFICADOR AV1	30
3.1	Modos de predição intraquadro do padrão AV1	32
3.1.1	Modo DC	32
3.1.2	Modo Paeth	33
3.1.3	Modo Smooth	35
3.1.4	Modo Direcional	37
3.1.5	Predição Intra Filtros	41
3.1.6	Predição CFL	42
3.1.7	Predição Palette	43
3.1.8	Modo <i>Intra Block Copy</i>	43
3.2	Técnicas de pré-processamento das amostras	44
3.2.1	<i>Intra Edge Filter Strength</i>	44
3.2.2	<i>Intra Edge Upsample</i>	46
3.2.3	<i>Corner Process</i>	48
3.3	Processo de decodificação dos modos intraquadro no AV1	49
3.4	A Predição Intra dos Codificadores Atuais	52
4	AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA PREDIÇÃO INTRAQUADRO NO AV1	53
4.1	Avaliações para a configuração <i>OnlyIntra</i>	55
4.2	Avaliações para a configuração <i>LowDelay</i>	58
4.3	Visão geral sobre as configurações	64
5	ARQUITETURA PARA O DECODIFICADOR INTRAQUADRO DO PADRÃO AV1	65
5.1	A arquitetura do Módulo de Memória	69
5.2	Arquitetura do Módulo Direcional	71
5.3	Arquitetura do Módulo Smooth	73
5.4	Arquitetura do Módulo intra Filtros	74
5.5	Arquitetura do Módulo Paeth	76
5.6	Arquitetura do Módulo DC	77
5.7	Arquitetura do Módulo CFL	79

5.8	Arquitetura do Módulo Palette	80
5.9	Diagrama de ciclos e temporização	81
6	VALIDAÇÃO E RESULTADOS DE SÍNTESE	85
6.1	Metodologia de modelagem e validação	85
6.2	Definição da frequência mínima de operação da arquitetura DIAV1	86
6.3	Resultados de síntese	89
7	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	95
	ANEXO A DEFINIÇÃO DAS SEQUÊNCIAS DE VÍDEOS SIMULADAS.	99
	APÊNDICE A DADOS COLETADOS NAS SIMULAÇÕES.	101

1 INTRODUÇÃO

Os vídeos digitais estão cada vez mais presentes na nossa sociedade, trazendo para as pessoas mais lazer, entretenimento, informação e notícias em tempo real. Esta grande popularização dos vídeos digitais se deve a redução dos custos para produção de SoCs (*System-on-a-Chip*) dedicados para a manipulação de vídeos digitais, sendo estes SoCs confeccionados para a codificação/decodificação de vídeo tendo como foco principal sistemas embarcados como dispositivos móveis (*smartphones, smartwatches, Blu-Ray players, tablets, etc.*). Outro fator que contribui para a popularização dos vídeos digitais está na facilidade da disseminação e acesso de tal conteúdo através da internet. Com o advento da internet surgiram provedores de serviços de *streaming* de vídeos digitais como o Netflix, YouTube, Facebook, entre outros. Uma pesquisa realizada pela Cisco (CISCO, 2018) prevê que o tráfego de vídeos digitais na internet em 2022 poderá chegar a 82% do total de tráfego de dados que circula pela internet. Diante desta demanda por conteúdo de vídeo, alguns aspectos devem ser considerados para o seu armazenamento e transmissão: (i) o número proibitivo de bits necessários para representar os vídeos digitais, sem considerar uma codificação adequada e (ii) a demanda crescente por vídeos de maior resolução, como os UHD (*Ultra High Definition*) 4K (3840x2160 pixels) e 8K (7680x 4320 pixels).

Diante destas restrições, os codificadores devem atender a capacidade/necessidade de lidar com aspectos inerentes aos vídeos UHD. Para contornar este problema, o desenvolvimento de novos codificadores que apresentem ferramentas mais eficazes na compressão se torna indispensável. Este cenário pode se tornar ainda mais preocupante se for levada em consideração a demanda de desempenho para o processamento deste grande volume de informação em tempo real, considerando uma taxa de reprodução de, no mínimo, 60 quadros por segundo para vídeos UHD 4K.

A codificação tem o objetivo de reduzir o volume de dados necessários para representar um vídeo digital (AGOSTINI, 2007), devido a isso, o processo de codificação é indispensável para os dispositivos que manipulam os vídeos, tanto para o seu armazenamento como para a sua transmissão. Um dos primeiros padrões de codificação

de vídeo a ser utilizado foi o codificador H.261 (TURLETTI; HUITEMA, 1996), publicado em 1988 e desenvolvido pela ITU-T VCEG (*Video Coding Experts Group*). O codificador H.261 era um codificador simples e que tinha que atender a demanda de processamento de sua época, ele tinha como o bloco principal de processamento de 16x16 amostras de luminância e tendo como alvo resoluções de no máximo de 322x288 pixels. A partir deste codificador, vários outros codificadores foram sendo desenvolvidos, justamente para atender à necessidade e a demanda de processamento dos vídeos digitais de sua época de vigência. Outro fator que limita muito o desenvolvimento de um codificador mais eficiente são os recursos tecnológicos disponíveis. Os recursos tecnológicos estão relacionados com a tecnologia disponível para a produção de SoCs, que é limitado à largura do canal do transistor e o número máximo de transistores que podem ser encapsulados dentro da mesma área de silício. Com o avanço tecnológico (redução do canal do transistor e o aumento do número de transistores na mesma área de silício) é possível desenvolver circuitos menores e com alta densidade de transistores. Desta forma, os SoCs para a codificação de vídeos conseguem comportar codificadores com taxas de processamento mais elevadas que os seus antecessores. Contudo, e por outro lado, essas taxas elevadas de processamento e as novas ferramentas aumentam a complexidade e o tempo de desenvolvimento dos SoCs.

Na Figura 1 é apresentada uma linha do tempo com as datas aproximadas do desenvolvimento dos principais codificadores de vídeo existentes. A Figura 1 apresenta desde o desenvolvimento do codificador H.261, passando pelos codificadores H.264/AVC (WIEGAND et al., 2003) e H.265 (SZE; BUDAGAVI; SULLIVAN, 2014) e, por fim, chegando ao codificador AV1 (AOM, 2019a), que teve sua divulgação em meados de março de 2018. Dos codificadores citados anteriormente o que mais merece destaque é o codificador H.264/AVC, por ser o codificador mais empregado na atualidade. Ele é amplamente utilizado em vídeos que circulam pela internet e também é utilizado na transmissão de conteúdo pelo SBTVD (Sistema Brasileiro de Televisão Digital) (MENDES, 2007). O codificador H.265, conhecido também como HEVC (*High Efficiency Video Coding*), vem seguindo a linha de desenvolvimento do H.26X. O HEVC é muito importante justamente por trazer inúmeras ferramentas e estruturas que não existiam nos codificadores anteriores visando proporcionar melhores taxas de codificação. O HEVC foi desenvolvido para substituir o H.264 e com o foco no processamento de vídeos UHD (já que o H.264 processava até resolução HD), seu desenvolvimento foi realizado pelo grupo JCT-VC (*Joint Collaborative Team on Video Coding*).

Outra linha de codificadores que merece destaque são os VPX (VP8, VP9 e VP10), que tem como origem o seu desenvolvimento pela própria Google. Esta linha de codificadores surgiu com uma proposta diferente dos demais codificadores, um codificador

livre de royalties e de código aberto (WEBM, 2012). O codificador VP9 teve sua primeira versão em 2011 e ocorrendo o lançamento em 2013. Este codificador ainda é muito utilizado pela Google no YouTube (VP9, 2010) no formato WebM.

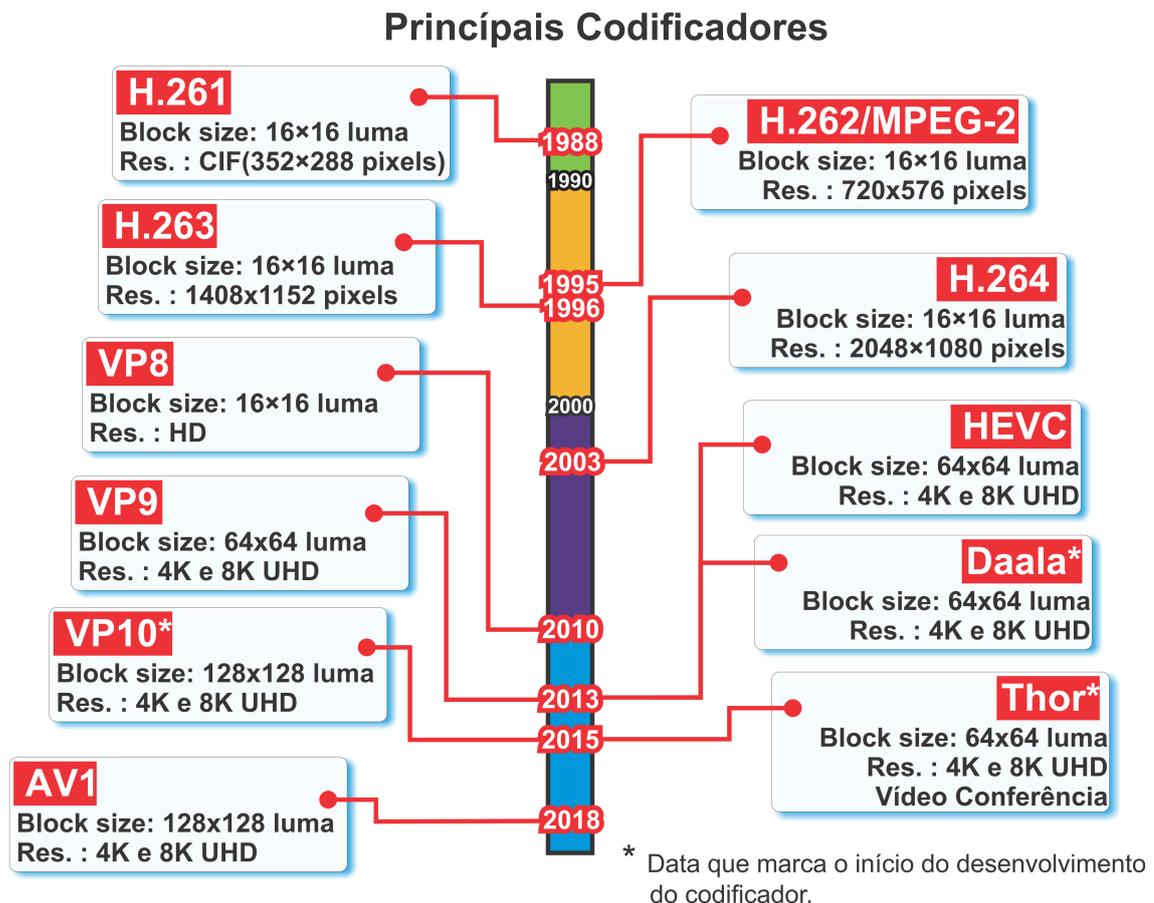


Figura 1 – Linha Cronológica para os principais codificadores desenvolvidos.

O mercado de vídeos digitais está em franco crescimento, como por exemplo, em 2013 o YouTube ultrapassou a marca de 1 bilhão de usuários ativos e em junho de 2017 atingiu o recorde de 1,5 bilhões de usuários ativos, onde os usuários gastam, em média, mais de uma hora por dia assistindo vídeos (MATNEY, 2017). Uma dificuldade que a Google tem para manter o YouTube é justamente a manutenção de toda a sua infraestrutura (servidores, rede, funcionários, etc.) para armazenar todos estes vídeos. Dados de 2015 demonstram que YouTube movimentou mais de 4 bilhões de dólares naquele ano e, mesmo com este montante, a Google não obteve lucro expressivo (R. WINKLER, 2015). Este cenário poderia ser bem pior para a Google se o YouTube não utilizasse um codificador livre de royalties como o VP9 (o que não é o caso do HEVC e do H.264 que precisam pagar royalties para os desenvolvedores (OZER, 2015)).

O codificador VP9 veio a ser finalizado em meados de junho de 2013, justamente no mesmo ano que o codificador do HEVC foi normatizado (a versão final padronizada do decodificador), neste mesmo ano a Google começou a desenvolver o seu novo codificador, o VP10. A Google tinha a previsão de lançar uma versão final para o codificador VP10 em 2016, mas em meados de 2015, ela anunciou o cancelamento do codificador VP10 e formou uma aliança com outras duas empresas a Cisco e a Xiph, que estavam desenvolvendo seus próprios codificadores (GROUP, 2019). O objetivo desta união seria formar uma aliança para as mídias abertas (*AOMedia - Alliance for Open Media*) (AOM, 2019a), onde seria desenvolvido um codificador livre de royalties e com o foco no processamento de vídeos UHD 8K. Cada uma destas empresas se comprometeu em disponibilizar e unir os codificadores que estavam desenvolvendo e fazer um único codificador que veria a ser chamado de *AOMedia Video 1 (AV1)*.

Desta união a Google disponibilizou os codificadores VP10/VP9, a Cisco o codificador Thor que estava sendo desenvolvido para vídeo conferência e a Xiph que é o codificador Daala patrocinado pela Mozilla (GROUP, 2019). Com a popularização desta aliança, foram surgindo cada vez mais empresas interessadas em fazer parte desta aliança, dentre elas podemos citar a AMD, ARM, Chips&Media, Intel, Nvidia, Microsoft, Mozilla, Adobe, Amazon, Netflix, entre outras (AOM, 2019a).

O codificador AV1 é um codificador livre de royalties e de código aberto, tendo o propósito de ser mais eficiente que o HEVC. Para que o codificador AV1 atingisse uma eficiência de codificação superior ao HEVC foi necessário o desenvolvimento de novas ferramentas, bem como o aumento na complexidade de ferramentas já conhecidas e utilizadas em padrões anteriores. Esta estratégia já havia sido aplicada no desenvolvimento do padrão HEVC, enquanto que as novas ferramentas e estruturas de codificação provocaram um aumento no esforço computacional entre 9.1% e 502.2% em comparação ao H.264/AVC (CORREA et al., 2012). Na literatura podemos encontrar algumas análises iniciais que realizam uma comparação entre o HEVC e o AV1, dentre eles podemos destacar dois trabalhos. O primeiro trabalho (Layek et al., 2017) realizou a codificação de quatro sequências de vídeos para os codificadores H.264, H.265, VP9 e AV1, com os resultados obtidos entre o AV1 e o HEVC ficou demonstrado que o HEVC apresentou ser um pouco superior que o AV1 na compressão. No segundo trabalho (Nguyen; Marpe, 2018) foram realizadas as comparações entre os codificadores AV1, VP9, HEVC e JEM (JEM do Joint Video Exploration Team – sucessor do HEVC), para as avaliações realizadas com o Codificador AV1 foram realizadas as codificações para os parâmetros de quantização 31, 39, 47 e 55 e considerando duas passadas (que são suportadas tanto para o codificador AV1 e o VP9), os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que o AV1 teve um BD-rate 30,5% em relação ao HEVC, ou seja, BD-rate positivo indica que o AV1 precisou utilizar 30,5% a mais da taxa de bits para manter a mesma qualidade objetiva do vídeo..

De forma geral, os codificadores de vídeo atuais apresentam um fluxo de codificação similar, somente ocorrendo mudanças nas ferramentas que são utilizadas em cada uma das etapas do codificador. Além disso, dentro dos codificadores é necessário que existam módulos de decodificação para gerar amostras de referência/reconstruídas, mantendo a coerência entre o que o codificador gera e o que é disponibilizado para o decodificador. Desta forma, o codificador terá exatamente as mesmas informações que o decodificador. Apesar do decodificador ser mais simples que o codificador, em termos de complexidade e no tempo de decodificação, os projetos de um decodificador contêm seus próprios desafios, uma vez que existe a necessidade de contemplar todas as funcionalidades suportadas pelos padrões, pois não se tem a informação (a priori) de quais ferramentas foram utilizadas para a codificação do vídeo.

Dentro dos codificadores/decodificadores uma etapa que merece destaque é a predição intraquadro. A predição intraquadro é responsável por explorar as redundâncias espaciais, ou seja, redundâncias de informações que estão contidas dentro do mesmo quadro. Dentro do processo de codificação/decodificação o primeiro quadro a ser decodificado é composto em sua totalidade de blocos preditos pela predição intraquadro. Em virtude de ferramentas cada vez mais complexas utilizadas nos codificadores e, conseqüentemente, nos decodificadores, o desenvolvimento em hardware dedicado destes módulos se torna indispensável, especialmente quando existe a necessidade de codificação/decodificação em tempo real (mínimo de 60 quadros por segundo para vídeos UHD).

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um projeto de hardware dedicado para o módulo intraquadro do padrão de codificação de vídeo AV1, focando na decodificação. Na literatura podemos encontrar outros trabalhos referentes a predição intraquadro na decodificação de outros decodificadores como em (WANG et al., 2013) (XU; XING; WEI, 2011) que abordam soluções para os decodificadores do H.264 e até soluções arquiteturais para o HEVC nos trabalhos (Zhou et al., 2014) (Chiang et al., 2016). A arquitetura desenvolvida neste trabalho visa abordar o módulo intraquadro contemplando 68 dos 69 modos de predição previstos no padrão AV1, sendo o modo IntraBC não contemplado por esta solução justamente por ele conter um vetor de movimento associado a sua predição, o que o torna muito mais propenso para a implementação junto com os modos interquadros. Desta forma esta solução é capaz de realizar a decodificação intraquadro para qualquer cenário possível de codificação utilizado (exceto no caso do IntraBC). O trabalho desenvolvido visa realizar análises no decodificador para determinar as taxas de processamento da arquitetura e auxiliar na modelagem e desenvolvimento do projeto arquitetural final. Os resultados obtidos demonstraram que a arquitetura pode codificar vídeos 4K a 60 quadros por segundo tendo uma potência dissipada de 31,04 mW e ocupando uma área de 238,2 Kgates para um cenário em que é realizada a decodificação somente de blocos preditos pela

predição intraquadro.

A estrutura do texto está organizada da seguinte forma: o capítulo dois apresenta alguns conceitos básicos sobre a codificação de vídeo e uma visão global das ferramentas utilizadas no AV1. O capítulo três aborda, em profundidade, todos os 69 modos intraquadro suportados pelo AV1. No capítulo quatro é demonstrada uma avaliação da seletividade e da representatividade média de cada modo dentro do decodificador. No quinto capítulo serão introduzidas as soluções arquiteturais desenvolvidas. No capítulo seis é apresentado os resultados obtidos para síntese ASIC e a metodologia empregada para a validação das arquiteturas. No último capítulo será apresentada a conclusão desta dissertação.

2 PRINCÍPIOS DE CODIFICAÇÃO DE VÍDEO

A maioria dos padrões de codificação de vídeo atuais são baseados em predição, codificação residual e codificação de entropia. Com isso, eles costumam apresentar um fluxo de codificação bastante similar. As principais diferenças entre os padrões atuais estão nas ferramentas e/ou técnicas empregadas para poder atingir a melhor exploração das redundâncias de informação presentes nos vídeos. Tendo isso em mente, nas próximas seções serão discutidos os tipos de redundâncias contidas nos vídeos e, em paralelo, apresentando os módulos que compõem os codificadores. No final deste capítulo será ainda feita uma introdução ao codificador AV1, apresentando suas principais ferramentas.

2.1 Redundâncias de dados, Espaço de Cores e Subamostragem

Na maioria das vezes os dados redundantes são informações contidas nos vídeos, que não representam uma nova informação relevante para a representação do vídeo. Desta forma, as redundâncias presentes nos vídeos são categorizadas em três categorias: espacial, temporal e entrópica (AGOSTINI, 2007).

A redundância espacial ocorre devido à similaridade de uma amostra com seus vizinhos dentro de um mesmo quadro do vídeo. Em outras palavras procura explorar a correlação existente entre as amostras espacialmente distribuídas no mesmo quadro. Dentro do processo de codificação os padrões de codificadores apresentam diversos modos que visam explorar a redundância espacial para reduzir o volume de dados.

A redundância temporal ocorre devido à similaridade nas informações contidas entre quadros temporalmente vizinhos que compõe o vídeo. Este efeito ocorre devido à taxa de amostragem de quadros (valores maiores que 30 quadros por segundo para vídeos FullHD e 60 quadros por segundo para vídeos UHD 4K) o que faz com que grande parte dos quadros vizinhos temporalmente apresentem informações parecidas entre si. Existem casos onde determinadas regiões do quadro não apresentam mudanças, como um fundo ou um objeto estático. Em outras circunstâncias os pixels podem apresentar apenas uma mudança na luminosidade ou também leve desloca-

mento de um quadro para o outro. A redundância temporal é a principal redundância presente nos vídeos, logo, todos os padrões atuais possuem diversas ferramentas para tentar identificá-la e reduzi-la, justamente por que uma exploração eficiente nesta redundância proporciona elevadas taxas de compressão, mas em contrapartida aumenta a complexidade do codificador.

A terceira redundância explorada é a entrópica, que está relacionada com a quantidade de bits para a representação de cada símbolo do vídeo codificado, sendo explorada pela etapa de codificação de entropia. A redução da redundância entrópica é baseada na exploração probabilística de ocorrência dos símbolos que compõem o vídeo codificado (AGOSTINI, 2007).

As imagens digitais podem ser representadas de várias formas, cada forma de representação está correlacionada com a interpretação do sistema visual humano. Dentre todas as formas de representação, conhecidas como espaço de cores, as mais comuns são as: RGB, HSI e YCbCr (SHI; SUN, 1999). O Espaço de cores RGB (*Red, Green, Blue*) é o mais comum dentre todos, justamente por ser utilizado na exibição das cores em qualquer dispositivo que tenha um *display* colorido. O RGB é constituído por três matrizes ou canais, que representam as cores primárias captada pelo sistema visual humano (vermelho, verde e azul). Cada um dos canais R, G e B contém a intensidade de sua cor e a informação luminosa (luminância) (RICHARDSON, 2002).

Outro espaço de cores muito utilizado também é o YCbCr, neste formato os seus três canais são chamados de: luminância (Y) que define a intensidade luminosa, croma- minância azul (Cb) e croma- minância vermelha (Cr) (MIANO, 1999). Todas as cores que são representadas pelo espaço RGB podem ser representadas pelo sistema de cores YCbCr. Uma vantagem da representação YCbCr é que ela contém um baixo grau de correlação entre os canais quando comparado ao RGB. Isto é desejável pois a correlação dificulta o processamento independente das informações contidas em cada canal (R, G e B) do vídeo.

Como a representação YCbCr apresentam baixa correlação entre os canais, os codificadores podem tirar proveito do fato de que o sistema visual humano tem uma maior sensibilidade à intensidade luminosa do que com as cores (POLLACK, 2006). Esta característica pode ser explicada pelo fato do olho humano possuir mais bastonetes do que cones (os bastonetes são responsáveis pela captação da luminosidade e os cones são responsáveis pela captação das cores) (POLLACK, 2006).

Devido às características do olho humano mencionadas, as informações de cor podem ser subamostradas sem causar perdas significativas de qualidade. Existem várias formas de representar o relacionamento dos componentes de luminância com os componentes de croma- minâncias. Os formatos mais comuns são: 4:4:4, 4:2:2 e 4:2:0. O formato 4:4:4 define que a cada 4 amostras do componente de luminância (Y), existem quatro amostras do componente de croma- minância azul (Cb) e 4 amostras do

componente de croma (Cr) associadas, logo, não há subamostragem de cor e nenhuma perda de informação visual. Para o formato 4:2:2, temos quatro amostras de luminância, duas amostras de croma azul e duas amostras de croma vermelha. Nesta representação se obtém uma redução de 50% em relação às amostras de croma, o que representa uma redução do total de 25% nas amostras do vídeo. No formato 4:2:0, para cada quatro amostras da luminância temos uma amostra de croma azul e uma amostra de croma vermelha. Isso representa uma redução de 75% nas componentes de croma, que no total significa uma redução de 50% dos dados do vídeo. Estes padrões de subamostragens podem ser observados na Figura 2. O formato 4:2:0 é um dos mais utilizados, por apresentar uma redução de 75% no número de informações de cor, inserindo uma perda visual quase imperceptível.

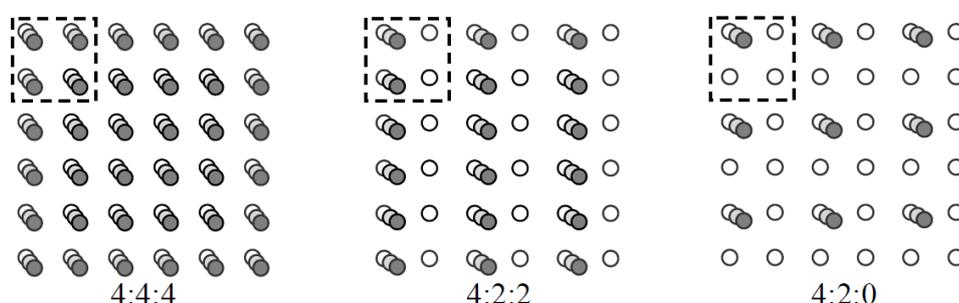


Figura 2 – Formatos de subamostragem de cor do YCbCr (PORTO, 2012).

2.2 Modelo do codificador/decodificador

Na Figura 3 é apresentado um modelo simplificado do fluxo de codificação utilizado pelos codificadores de vídeo atuais. O processo de codificação começa com a etapa de predição (intraquadro e interquadros) que é aplicada em porções (blocos) do quadro a ser codificado. Os padrões atuais permitem diversas partições do quadro em blocos de diferentes tamanhos e formas, sendo que quanto maior a flexibilidade deste particionamento, maiores são as chances de se obter uma melhor predição. A predição intraquadro utiliza as amostras de referências dos blocos vizinhos já codificados dentro do mesmo quadro, ele tem o objetivo em identificar a redundância temporal presentes naquela região do vídeo. A predição interquadros utiliza amostras reconstruídas de quadros vizinhos temporalmente, com o objetivo em identificar a redundância temporal que ocorre em blocos temporalmente vizinhos (AGOSTINI, 2007).

O resultado desta etapa de predição são os resíduos, que indicam a diferença entre as amostras originais e as preditas. A próxima etapa na codificação é a codificação residual, que irá transformar os resíduos para o domínio das frequências e prepara-las

para a codificação de entropia. Este processo é constituído pelas etapas da transformada, quantização direta e pela transformada e quantização inversa. A transformada direta (T) é uma importante etapa do processo de codificação que visa transformar as informações residuais do domínio espacial para o domínio das frequências, para que a etapa da quantização possa ser aplicada de forma mais eficiente. A quantização direta (Q) por sua vez, atenua os coeficientes transformados, com maior ou menor intensidade de acordo com a sua característica (alta ou baixa frequência) (AGOSTINI, 2007). Os coeficientes de mais alta frequência são mais atenuados que os coeficientes de baixa frequência. A quantização pode ser controlada pelo Parâmetro de Quantização (QP), que é um parâmetro relacionado com a qualidade do vídeo, em outro modo, esta parâmetro também pode ser controlado através da definição da taxa de bits (*bitrate*) para o vídeo em questão. A etapa de quantização dos codificadores é responsável por reduzir a amplitude dos coeficientes (em alguns casos eliminar os coeficientes de alta frequência), por isso esta etapa provoca uma diferença entre as amostras originais e as reconstruídas (com perdas). Estas perdas provenientes da quantização resultam no ganho obtido na compressão do vídeo. Finalmente, na última etapa as amostras provenientes da quantização são codificadas pela codificação de entropia, usando uma representação que reduz a quantidade de bits por amostra codificada.

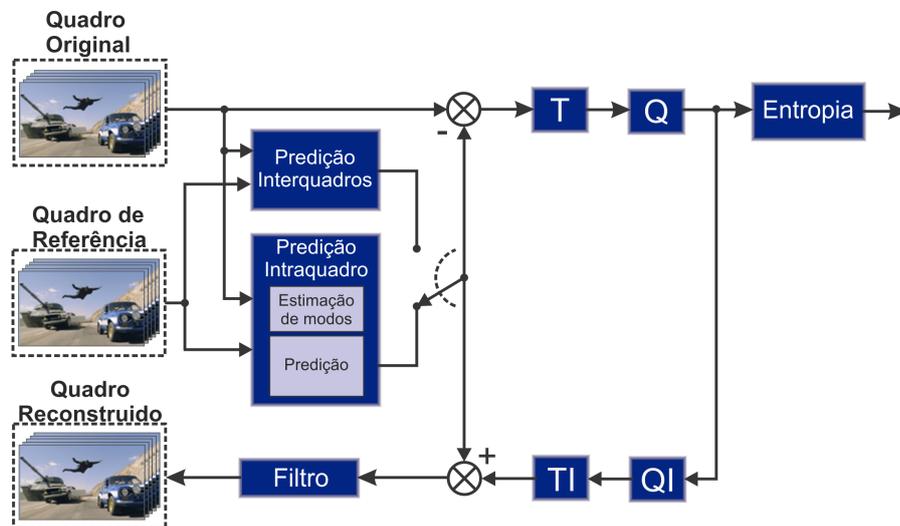


Figura 3 – Modelo simplificado dos codificadores de vídeo atuais.

Como pode ser visto na Figura 3, o codificador também possui um laço de decodificação residual que utiliza os dados provenientes da quantização, este laço corresponde exatamente ao processo realizado pelo decodificador para reconstruir as amostras preditas. Este laço de decodificação é usado para gerar uma versão reconstruída do quadro codificado, que será usado como referência para as próximas predições. Esta etapa é necessária também para manter a consistência nas amostras

de referência que o codificador tem a sua disponibilidade e a que o decodificador terá.

Para que seja possível reconstruir o próximo quadro de referência, será aplicada a quantização inversa (QI) e a transformação inversa (TI) nesta ordem. Neste processo serão gerados os resíduos que serão somados as amostras geradas pelas previsões. Para completar a etapa de reconstrução do quadro, a maioria dos padrões atuais aplica algum tipo de filtragem para suavizar os artefatos que são inseridos pelo processo de particionamento do vídeo em blocos junto com os efeitos gerados pela quantização.

O modelo de um decodificador está representado na Figura 4. Com uma comparação entre o a Figura 3 e a Figura 4 podemos perceber que o decodificador é muito similar com a parte de reconstrução do quadro presente no modelo simplificado para o codificador.

A decodificação de entropia é responsável por receber o *bitstream* e decodificar gerando as amostras residuais quantizadas no domínio espacial. Após a decodificação de entropia as amostras residuais remontadas são entregues para a quantização inversa (QI) e por final para a transformada inversa (TI). Estas etapas presentes no decodificador são exatamente iguais às presentes no codificador.

A decodificação intraquadro utiliza os blocos reconstruídos do quadro atual associados às informações laterais presentes no *bitstream* que sinalizam o modo de previsão aplicado. Na decodificação interquadros é realizado o mesmo processo, só havendo a diferença que neste caso são utilizados os blocos reconstruídos dos quadros já decodificados. Com o bloco predito (pela reconstrução intraquadro ou interquadros) é realizada a soma do mesmo com o bloco residual gerando o bloco reconstruído. Finalmente, após a filtragem, os blocos reconstruídos são armazenados para serem utilizados como referência na decodificação do próximo quadro e para a visualização do vídeo.

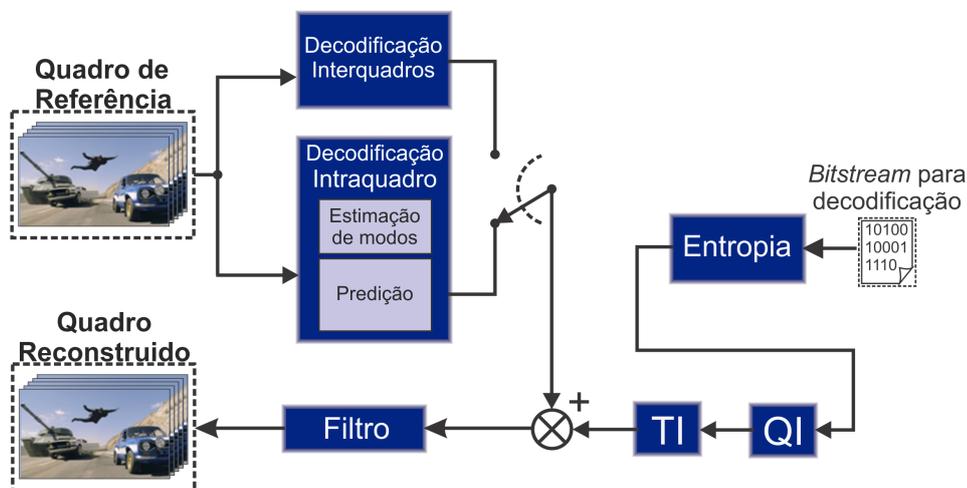


Figura 4 – Modelo simplificado dos Decodificadores de vídeo.

2.3 Padrão de codificação de vídeo AV1

O padrão de codificação do AV1 foi especificado em meados de 2018. Neste padrão foram testadas inúmeras ferramentas para poder determinar as que iriam proporcionar melhores ganhos na compressão. Como o AV1 é um codificador emergente, existe pouca documentação que explique, detalhadamente, cada uma das etapas do codificador. Desta forma, este capítulo irá apresentar, de forma resumida, algumas ferramentas/estruturas empregadas no codificador AV1. Para elucidar estas ferramentas/estruturas a pesquisa consistiu em fazer um estudo no *draft* (AOM, 2019b) e uma investigação aplicando engenharia reversa no software de referência do AV1, o AOM (AOM, 2019a), justamente porque existe pouco material disponível sobre o AV1. Além destes dois meios, também foram coletado vídeos de apresentações realizadas pela equipe de desenvolvendo do AV1 (TURLETTI; HUITEMA, 2017) e os primeiros trabalhos na literatura publicados sobre o AV1 (EGGE, 2018) e (Chen et al., 2018).

No processo de codificação do vídeo o quadro é dividido em blocos, sendo este primeiro bloco a unidade básica de codificação chamado de *SuperBlock* (SB) e sempre tem o formato quadrado. No AV1 o SB representa a raiz da árvore de particionamentos no processo de codificação, esta árvore é particionada recursivamente em formato de *quad-tree*. O SB pode ser definido em dois tamanhos iniciais: 128x128 ou 64x64 amostras de luminância, podendo atingir folhas que tem o tamanho de 4x4 amostras para as informações de luminância e 2x2 amostras para as informações de crominância. A possibilidade de escolher entre dois tamanhos iniciais do *SuperBlock* significa que o codificador pode ser ajustado *off-line* para atender alguma característica do vídeo, ou seja, utilizar o bloco 128x128 de amostras representa atingir boas taxas de compressão mas podem degradar a qualidade dos vídeos de baixa resolução, enquanto que *SuperBlock* com 64x64 pixels representam um menor tempo de codificação (justamente por não fazer testes para os tamanhos de blocos superiores). Todos os tipos de particionamento permitidos pelo codificador AV1 estão apresentados na Figura 5 (Chen et al., 2018).

Como podemos notar cada SB pode ser subdividido em partições menores, chamadas *MacroBlock*. Desta forma, considerando um SB com dimensões 2Nx2N, onde N representa a quantidade de amostras, assim ele não pode ser particionado, preservando a dimensão original de 2Nx2N. Caso o SB seja particionado ele pode ser subdividido em outros formatos: como particionado em quatro blocos NxN, da forma que este particionamento gera quatro blocos idênticos. Mais dois particionamentos possíveis são os particionamentos retangulares verticais e horizontais, nesta modalidade de particionamento o *MacroBlock* será na vertical, ficando com dois blocos retangulares com a dimensão de Nx2N ou com dois blocos retangulares com a dimensão de 2NxN para o particionamento horizontal. Os demais particionamentos podem ser categori-

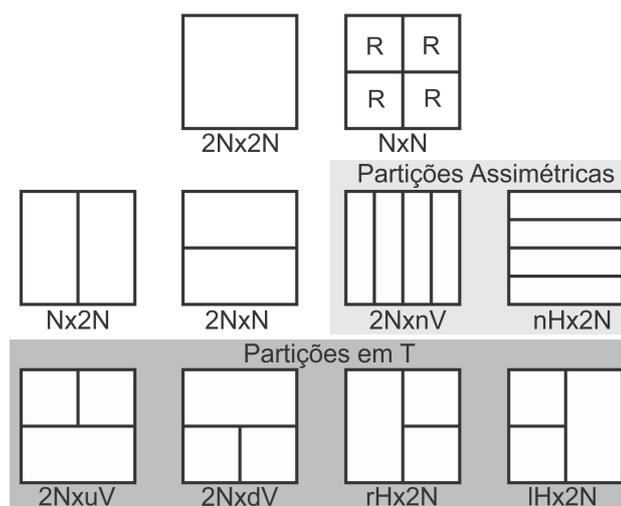


Figura 5 – Particionamentos suportados pelo codificador AV1.

zados em duas classes: os particionamentos em formato T e os particionamentos em grade, ou assimétricos. São definidos quatro formatos de particionamentos em T para o AV1, sendo que este particionamento gera sempre três blocos, dois blocos terão a dimensão de $N \times N$ e o terceiro bloco terá a dimensão $2N \times N$ ou $N \times 2N$, de acordo com a orientação de aplicação do particionamento em T. Os quatro formatos de partições em T estão representados por $2N \times uV$, $2N \times dV$, $uH \times 2N$ e $dH \times 2N$, onde a sintaxe V e H representam vertical e horizontal respectivamente e u, d, r, l representam na ordem *up*, *down*, *right* e *left*. Para os particionamentos assimétricos são definidos dois formatos de partição, neste particionamento o bloco $2N \times 2N$ é particionado em quatro blocos com dimensões idênticas, sendo a orientação do particionamento em $2N \times nV$ (4:1) ou $nH \times 2N$ (1:4), onde a nomenclatura ‘n’ representa o número de vezes que foi subdividido o bloco que neste caso é sempre quatro.

O AV1 tem suporte para até 22 tamanhos de blocos no processo de codificação para as amostras de luminância, partindo do pressuposto que o *SuperBlock* inicial possui 128×128 amostras de luminâncias. Sendo os tamanhos de blocos suportados: 128×128 , 128×64 , 64×128 , 64×64 , 64×32 , 64×16 , 32×64 , 16×64 , 32×32 , 32×16 , 32×8 , 16×32 , 8×32 , 16×16 , 16×8 , 16×4 , 8×16 , 4×16 , 8×8 , 8×4 , 4×8 e 4×4 (AOM, 2019b).

A predição intraquadro apresentou melhorias como aumento na quantidade dos modos direcionais, onde 56 modos direcionais podem ser utilizados. Foram adicionados modos que consistem na aplicação de filtros recursivos chamados de intra filtros. Também foi adicionado um novo modo específico para as amostras de chroma: *chroma from luma*. Todas as ferramentas da predição intraquadro do AV1 serão abordadas com mais detalhes no próximo capítulo.

A predição interquadros no AV1 define a utilização de um vetor de movimento por bloco predito, mas também é permitida a utilização de preditores compostos (*com-*

pound prediction), em que podem ser utilizados dois vetores de movimento para formar um bloco predito, sendo que este bloco predito conterá a média dos dois blocos dos dois vetores de movimento. Além de permitir preditores compostos entre os vetores de movimento da predição interquadros, é possível utilizar preditores compostos para compor um bloco predito entre a predição interquadros e intraquadro (*inter-intra compound prediction*), ou seja, após o processo de predição os blocos preditos que tiverem taxas de distorção/qualidade similares compõem um novo bloco constituído da média de dois blocos preditos, um bloco predito pela predição interquadros e o outro bloco predito pela predição intraquadro. A utilização de preditores compostos na predição intraquadro e intrerquadros se deve ao fato de que certos contextos terão preferência em serem codificados pela predição interquadros enquanto que outro contexto a intraquadro é mais beneficiada (MUKHERJEE et al., 2017). Além disso a predição interquadros pode referenciar até 3 quadros candidatos dentro de um número de quadros de referências, que podem variar de 3 até 7 quadros de referência. Os quadros de referência são organizados como LAST(*nearest past*), LAST2, LAST3, GOLDEN(*distant past*), ALTREF(*temporal filtered future*), ALTREF2 e BWDREF. O BWDREF veria ser um quadro antecipado diretamente codificado sem aplicar filtragem temporal, desta forma, mais aplicável como referência em distâncias relativamente menores na codificação (Chen et al., 2018).

A predição intrequadros também é constituída pela estimação de movimento fracionária que realiza uma interpolação linear entre as amostras preditas pela estimação de movimento inteira. O objetivo da estimação de movimento fracionária é proporcionar uma precisão fracionária nos movimentos que acontecem de um quadro para outro, ou seja, em alguns casos o movimento existente entre um quadro e outro pode ser melhor representado por um movimento fracionário. Dentro do AV1 a compensação de movimento fracionária define filtros com *8-taps* que podem atingir uma precisão de oito amostras fracionárias para as amostras de luminância e 16 amostras de precisão fracionária para as amostras de crominância. Além de ter suporte para precisões maiores que os demais codificadores também são definidas quatro famílias de filtros para compensação de movimento fracionário: *8-tap*, *8-tap smooth*, *8-tap sharp* e *bilinear*.

No processo da codificação residual o *SuperBlock* pode ser definido com dois tamanhos blocos iniciais: bloco de 64x64 amostras ou um bloco de 32x32 amostras. O menor bloco residual suportado tem o tamanho de 4x4 amostras e estes blocos podem ser particionados no formato quadrado, retangular ou assimétrico. Desta forma, considerando que o bloco residual inicial aplicado seja 64x64 amostras, são permitidos 19 tamanhos de blocos para a codificação residual: 64x64, 64x32, 64x16, 32x64, 16x64, 32x32, 32x16, 32x8, 16x32, 8x32, 16x16, 16x8, 16x4, 8x16, 4x16, 8x8, 8x4, 4x8 e 4x4. Para a etapa de codificação residual é possível aplicar quatro tipos de transformada distintas: transformada discreta do cosseno (DCT – *Discrete Cosine Transform*),

transformada discreta do seno assimétrica (ADST – *Asymmetric Discrete Sine Transform*), *Flip* transformada discreta do seno assimétrica (*FlipADST – Flipped Asymmetric Discrete Sine Transform*) e a transformada identidade (IDTX – *Identity Transform*).

A transformada *flipADST* consiste na aplicação da ADST em ordem reversa e IDTX significa em não aplicar a codificação da transformada em certas direções, assim ela beneficia a codificação de arestas. Além disso as transformadas não necessariamente podem ser aplicadas de forma exclusiva para formar a transformada 2D, sendo assim, as transformadas são aplicadas no sentido da coluna e no sentido da linha para realizar a transformada 2D, mas no AV1 é possível utilizar transformadas diferentes em um sentido e em outro sentido para realizar a transformada 2D. Assim, as amostras residuais podem ser transformadas utilizando dois tipos de transformadas diferentes: uma transformada para o sentido da coluna e outro tipo de transformada para o sentido vertical. Desta forma é possível ter transformadas 2D constituídas exclusivamente pelo mesmo tipo de transformada DCTxDCT (DCT 2D) ou com dois tipos de transformadas DCTxADST. A possibilidade de compor transformadas 2D com tipos diferentes de transformadas possibilita obter resíduos com a energia melhor agrupada em determinados modos de predição. Assim a DCTxDCT é a única aplicada para todos os resíduos provenientes tanto da predição interquadros como intraquadro, as demais combinações das transformadas são aplicadas na predição intraquadros e alguns casos específicos da predição interquadros (Chen et al., 2018). Desta forma são suportados 16 tipos de transformadas utilizando os arranjos possíveis das combinações que são suportadas pelo codificador.

O laço de filtragem no AV1 utiliza três ferramentas distintas: *Deblocking Filter* (DBF), *Constrained Directional Enhancement Filter* (CDEF) e *Loop Restoration Filter* (LRF). O DBF é similar ao utilizado no VP9 mas teve redução para 13-taps (no VP9 era usado 15-taps). Já o CDEF foi projetado para ser aplicado depois do DBF e é formado por duas partes: um *Directional Deringing Filter* (DERING) do codificador Daala e *Constrained Lowpass Filter* (CLPF) do codificador Thor. A ideia do CDEF consiste em tentar casar padrões de bordas e remover artefatos inseridos pela quantização. Por sua vez o LRF foi projetado para ser utilizado pós CLPF, onde podem ser selecionados dois tipos de filtros: *Wiener filter* que terá seus coeficientes explicitamente codificados e o *Self-guided filter*.

Neste subcapítulo foi discutido brevemente um fluxo geral sobre o codificador AV1, demonstrando algumas estruturas, como os tamanhos de blocos suportados. Também foram demonstrados alguns modos empregados em cada uma das etapas presentes no AV1. No próximo capítulo vamos detalhar todas os modos e suas respectivas técnicas empregadas na predição intraquadro.

3 A PREDIÇÃO INTRAQUADRO NO CODIFICADOR AV1

O codificador AV1 trouxe inúmeras ferramentas novas e aperfeiçoou outras que já existiam em padrões anteriores, no entanto, o módulo da predição intraquadro foi um dos que mais apresentaram inovações. Como nos demais codificadores o AV1 também realiza a predição intraquadro utilizando extrapolação ou interpolação direcional para gerar os blocos preditos. Para atingir maiores ganhos da taxa de compressão o codificador AV1 definiu novos modos de predição, novas ferramentas e aprimorou alguns modos de predição já existentes e que podem ser encontrados no HEVC (SULLIVAN et al., 2012) ou no VP9 (MUKHERJEE et al., 2015). Nesta seção serão discutidos os conceitos da predição intraquadro do padrão AV1, bem como todos os modos de predição definidos pelo padrão.

Como mencionado anteriormente a predição intraquadro realiza uma extrapolação, desta forma os modos precisam de amostras dos blocos vizinhos adjacentes (amostras dos blocos já reconstruídos) ao bloco que será predito. Na Figura 6 são ilustradas todas as amostras de referência para um bloco $N \times N$ (no exemplo para $N=8$) que são necessárias para poder realizar todos os modos de predição para a decodificação intraquadro, desta forma, cada modo pode utilizar essas amostras de acordo com a necessidade exigida pela predição aplicada. As amostras em cinza mais escuro representam as amostras dos blocos vizinhos superiores, identificadas na matriz por $A[x][-1]$. As amostras em tom de cinza mais claro representam as amostras dos blocos vizinhos à esquerda, identificadas na matriz por $A[-1][y]$ e a amostra em preto é a amostra do bloco superior e à esquerda, identificada pela posição na matriz $A[-1][-1]$. As amostras de referência podem ser agrupadas em dois vetores (as amostras superiores e as amostras à esquerda), como pode ser observado, para prever um bloco 8×8 , o vetor das amostras superiores precisa de 17 amostras e o vetor à esquerda precisa de 16 amostras para poder realizar o processamento de todos os modos de predição suportados na predição intraquadro do padrão AV1.

Entretanto, existe a possibilidade de os vetores de referência não estarem disponíveis para a predição do bloco, desta forma, existem duas estratégias para serem utilizadas para substituir amostras de referências indisponíveis, contudo elas serão

utilizadas de acordo com a disponibilidade dos vetores de referência. No pior caso em que não existe a disponibilidade de nenhum dos vetores de referência o codificador utiliza a estratégia de atribui valores padrões para as amostras de referência. Para o vetor superior o valor atribuído pode ser 129 para amostras de referência de 8 bits ou 513 para amostras de referência de 10 bits. Já o vetor a esquerda pode assumir os valores de 127 para as amostras de 8 bits ou 511 para as amostras de referência de 10 bits.

A segunda estratégia está condicionada a disponibilidade de um dos dois vetores de referência (esta condição está mais relacionada a disponibilidade da amostra de referência $A[-1][-1]$), mas o vetor de referência disponível não é o vetor exigido para o processamento do modo, ou seja, para um modo direcional com o ângulo de 90° é necessário somente o vetor de referência superior, contudo este vetor superior não está disponível para o processamento, mas é encontrado disponível o vetor à esquerda. Assim, neste caso o decodificador vai completar todo o vetor de referência superior com a amostra $A[-1][-1]$ e prosseguir no processo de predição. Este mesmo procedimento e condições são válidas para o caso em que o vetor de referência à esquerda não esteja disponível, mas o vetor de referência superior se encontra disponível.

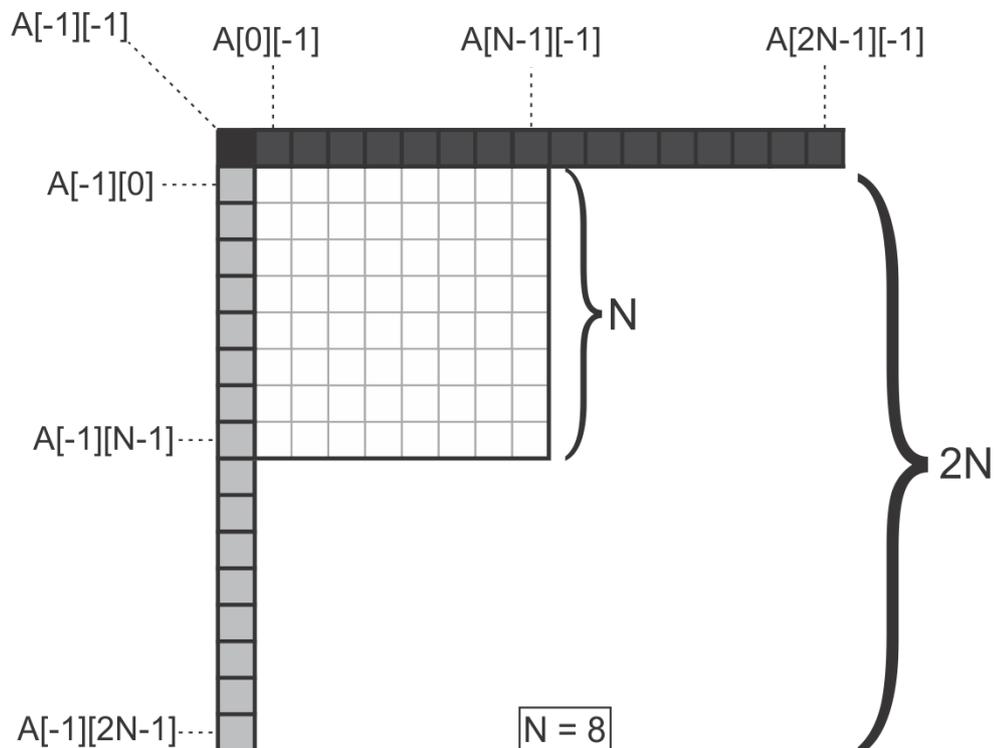


Figura 6 – Amostras vizinhas utilizadas como referência na predição intraquadro para um bloco 8x8, considerando todos os modos possíveis.

Na predição intraquadro são definidos 16 modos de predição base: DC, paeth, smooth, smooth vertical, smooth horizontal, *chroma from luma* (CFL), palette, intra filtros,

e oito modos de predição direcionais base (Chen et al., 2018). Alguns destes modos são aplicados exclusivamente a um canal das amostras (luminância ou croma), como é o caso da predição CFL (*chroma from luma*), que é aplicada somente nas amostras de croma. Dentre os modos suportados, a predição direcional possui uma peculiaridade, ela é definida como tendo 8 ângulos nominais (90° , 180° , 45° , 135° , 113° , 157° , 203° , 67°).

Assim para suportar mais ângulos na predição direcional foi definida uma estrutura (que será detalhada no decorrer do capítulo), esta estrutura tem uma variável chamada de ângulo delta e um passo, que permitem expandir de oito ângulos nominais para 56 ângulos. Desta forma o codificador AV1 deve ter suporte a 68 modos de predição intraquadro indiretamente (56 modos angulares + DC + Paeth + três Smooth + CFL+ palette + cinco filtros intraquadro), podendo estes modos serem aplicados para todos os 19 tamanhos de blocos suportados pelas transformadas, sendo eles quadrados ou retangulares de 1:2/2:1 ou 1:4/4:1 (64x64, 64x32, 64x16, 32x64, 16x64, 32x32, 32x16, 32x8, 16x32, 8x32, 16x16, 16x8, 16x4, 8x16, 4x16, 8x8, 8x4, 4x8 e 4x4). Além destes modos apresentados existe mais um modo que pode ser considerado como parte da predição intraquadro, o *Intra Block Copy* (intraBC). Este módulo, apesar de ter o nome intra e ser tratada como uma predição intraquadro, é similar à predição interquadros justamente por conter um vetor de movimento associado a predição. Desta forma podemos totalizar no total 69 modos de predição intraquadro.

3.1 Modos de predição intraquadro do padrão AV1

Como mencionado anteriormente, o codificador AV1 suporta 69 modos distribuídos em 17 categorias (16 categorias + IntraBC) e para 19 tamanhos de blocos. Esta seção apresenta cada um destes modos de predição suportados pelo AV1.

3.1.1 Modo DC

O modo DC é o mais simples dentre todos os modos de predição em aspectos de implementação, demandando baixo esforço computacional, ainda assim, sendo extremamente eficiente para regiões com textura homogênea. Este modo consiste, basicamente, em gerar um bloco predito em que todas as amostras preditas têm a média das amostras de referências. O valor médio obtido através das amostras de referência é chamado de DC e seu cálculo está definido na Equação 1. Este valor médio pode ser calculado considerando todas as amostras de referências superiores e à esquerda do bloco a ser predito ou pode utilizar apenas um dos vetores de referência (o vetor de amostras de referências superiores ou o vetor de amostras de referência à esquerda). A decisão de quais vetores de referência utilizar fica a critério do codificador e, geralmente, é tomada de acordo com a disponibilidade das amostras

de referência (esta decisão deve ser transmitida como informação lateral no *bitstream* do vídeo codificado). Contudo, pode existir a possibilidade de nenhum dos vetores de referências (tanto o superior como o da esquerda) estarem disponíveis, neste caso será utilizado um valor padrão para compor o valor DC. Este valor DC adotado como padrão é atrelado à largura de bits das amostras de referências. Desta forma, para uma amostra de referência de 8 bits este valor DC será de 128 enquanto que para uma amostra de referência de 10 bits este valor DC será de 512. Na Figura 7 são apresentadas as amostras vizinhas utilizadas para gerar o coeficiente DC para um bloco 8x8.

$$DC = \left(\sum_{i=0}^{N-1} (A[i][-1] + A[-1][i]) \right) \gg (2 * N) \quad (1)$$

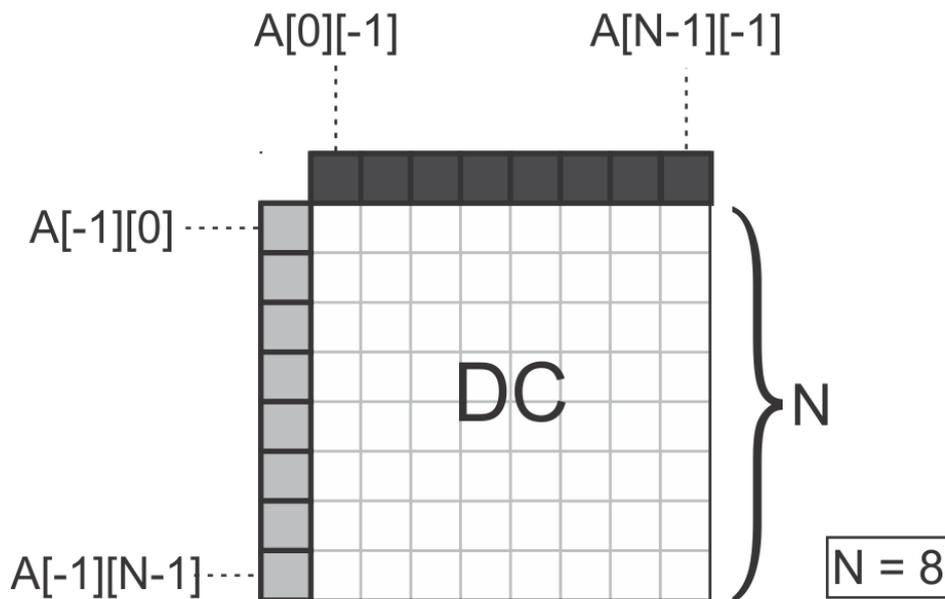


Figura 7 – Amostras de referência (destacadas em tons de cinza) utilizadas para a modo DC.

3.1.2 Modo Paeth

O modo de predição Paeth é o substituto do modo TM (*True Motion*) existente no codificador VP9 (MUKHERJEE et al., 2015), sendo um modo de predição relativamente simples e com baixa complexidade. O modo Paeth realiza a interpolação das amostras preditas tendo como base sempre três amostras de referência, os cálculos que descrevem este procedimento estão descritos nas Equações 2-6. A ideia central deste modo é tentar prever o bloco considerando qual das três amostras está mais próxima da amostra predita, formando um gradiente. Desta forma, se o gradiente for maior no sentido horizontal, a tendência é de utilizar a amostra superior, caso

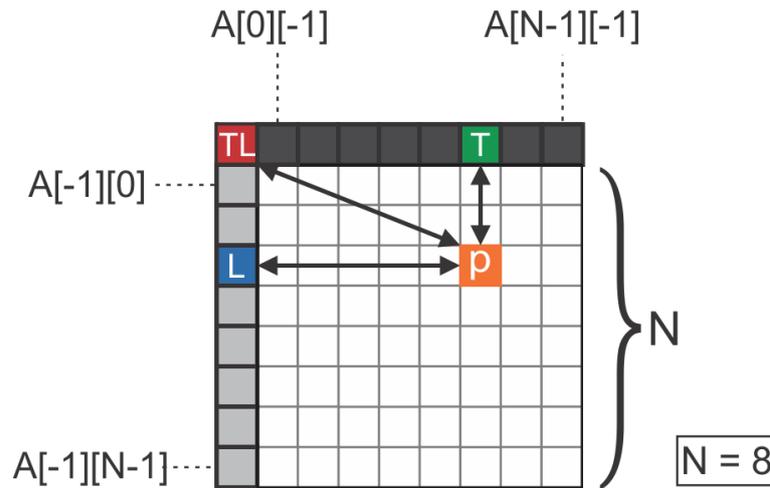


Figura 8 – Exemplo da aplicação do modo Paeth.

3.1.3 Modo Smooth

O modo de predição smooth se assemelha com o modo planar do HEVC (SULLIVAN et al., 2012). Este modo é indicado para regiões com textura em gradiente, oferecendo como vantagem preservar a continuidade nas bordas.

Este modo consiste na aplicação de uma média de interpolação quadrática no sentido vertical e horizontal, baseada na distância das amostras de referência para a amostra predita (MUKHERJEE et al., 2017). Assim as amostras de referência são processadas por duas etapas de interpolação: uma interpolação no sentido vertical, definida na Equação 7, que utiliza as amostras de referência superiores e a última amostra das amostras de referência à esquerda ($A[-1][N-1]$). A segunda interpolação é aplicada no sentido horizontal, definida na Equação 8, e utiliza as amostras de referência a esquerda e a última amostra de referência superior adjacente ao bloco predito ($A[N-1][-1]$). A última etapa restante na predição é realizar a média entre as amostras preditas na interpolação que está definida na Equação 9, junto com o arredondamento aplicado. Na Figura 9 (a) e Figura 9 (b) é demonstrada a aplicação da interpolação horizontal e na vertical, respectivamente. Nessas figuras podem ser notado que a amostra em verde da figura mais à esquerda e a amostra azul da figura mais a direita são as amostras comuns nas interpolações vertical e horizontal.

$$P_V[x][y] = (Peso[y]) * A[x][-1] + (255 - Peso[y]) * A[-1][N - 1] \quad (7)$$

$$P_H[x][y] = (Peso[x]) * A[-1][y] + (255 - Peso[x]) * A[N - 1][-1] \quad (8)$$

$$P[x][y] = ((P_V[x][y] + P_H[x][y]) + 256) >> 9 \quad (9)$$

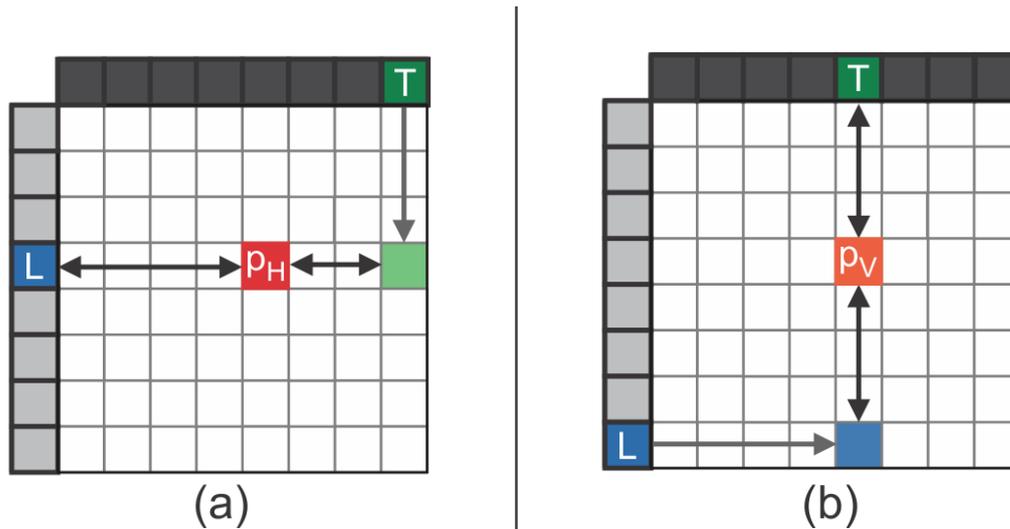


Figura 9 – Aplicação da interpolação horizontal (a) e vertical (b) da modo Smooth.

Para que a interpolação seja aplicada de forma adequada, cada amostra de referência é multiplicada por um valor (um peso) atribuído a sua posição de interpolação. Estes valores estão presentes nas Equação 7 e 8 através da variável Peso. Como pode ser notado estes valores são tabelados e definidos para ter uma precisão de 1/256 pixels para o bloco com o tamanho de 64x64 amostras. Como mencionado anteriormente os pesos de multiplicação tem seus valores atribuídos à distância que as amostras de referência se encontram da amostra predita e ao tamanho do bloco em que está sendo aplicado o modo. Na Tabela 1 podem ser encontrados todos os pesos de multiplicação apresentados de acordo com o tamanho do bloco.

Tabela 1 – Pesos para cada tamanho de bloco para o modo *Smooth*.

Tamanho de Blocos	Pesos Atribuídos
4	{255, 149, 85, 64}
8	{255, 197, 146, 105, 73, 50, 37, 32}
16	{255, 225, 196, 170, 145, 123, 102, 84, 68, 54, 43, 33, 26, 20, 17, 16}
32	{255, 240, 225, 210, 196, 182, 169, 157, 145, 133, 122, 111, 101, 92, 83, 74, 66, 59, 52, 45, 39, 34, 29, 25, 21, 17, 14, 12, 10, 9, 8, 8}
64	{255, 248, 240, 233, 225, 218, 210, 203, 196, 189, 182, 176, 169, 163, 156, 150, 144, 138, 133, 127, 121, 116, 111, 106, 101, 96, 91, 86, 82, 77, 73, 69, 65, 61, 57, 54, 50, 47, 44, 41, 38, 35, 32, 29, 27, 25, 22, 20, 18, 16, 15, 13, 12, 10, 9, 8, 7, 6, 6, 5, 5, 4, 4, 4}

Além do modo de predição smooth (que consiste da interpolação vertical e horizontal), o AV1 também define duas variações deste modo de predição: o smooth vertical e o smooth horizontal. O smooth vertical consiste na aplicação da interpolação vertical, com um arredondamento específico para este modo, na Equação 10 é apresentado o arredondamento aplicado para esta predição. O modo de predição smooth horizontal

consiste de forma análoga a smooth vertical, mas aplicando a interpolação horizontal. Na Equação 11 podemos ver a etapa de arredondamento.

$$P[x][y] = (P_V[x][y] + 128) \gg 8 \quad (10)$$

$$P[x][y] = (P_H[x][y] + 128) \gg 8 \quad (11)$$

3.1.4 Modo Direcional

Os modos direcionais presentes no AV1 contemplam 56 ângulos de predição, onde podemos destacar os ângulos de 90° e 180° como especiais, por terem uma predição mais simples que os demais 54 ângulos. A predição direcional é adequada para regiões que apresentam bordas definidas (características direcionais) (WIEGAND et al., 2003). Este tipo de predição é muito similar à que pode ser encontrada em codificadores anteriores como H.264, HEVC e VP9, porém, com um número maior de amostras de referências e ângulos dos que utilizados no H.264 e VP9 e mais ângulos que o HEVC. A predição angular realiza uma extrapolação das amostras dos blocos adjacentes considerando um ângulo de composição para o bloco predito. Cada modo direcional apresenta um ângulo associado e também tem uma precisão de 1/32 amostras associada a ele. Esta precisão representa um deslocamento (um peso) associado para cada amostra de referências utilizada no processo para compor o bloco predito.

No AV1 são definidos oito ângulos nominais, que são utilizados para compor os demais ângulos suportados. Os ângulos nominais definidos são: 90°, 180°, 45°, 135°, 113°, 157°, 203°, 67°. Com a utilização dos ângulos nominais e de mais duas variáveis, o passo e o ângulo delta, é possível determinar os demais ângulos resultantes suportados. O passo assume o valor três e o ângulo delta pode assumir valores inteiros dentro da faixa de [-3, +3]. A Equação 12 define como estas variáveis são utilizadas para sintetizar os 56 ângulos permitidos para a predição direcional. Na Figura 10 são ilustrados todos os 56 ângulos suportados pelos modos direcionais e na Tabela 2 são apresentados os valores dos ângulos para cada um dos modos da predição direcional.

$$anguloPredito = anguloNominal + (anguloDelta * passo) \quad (12)$$

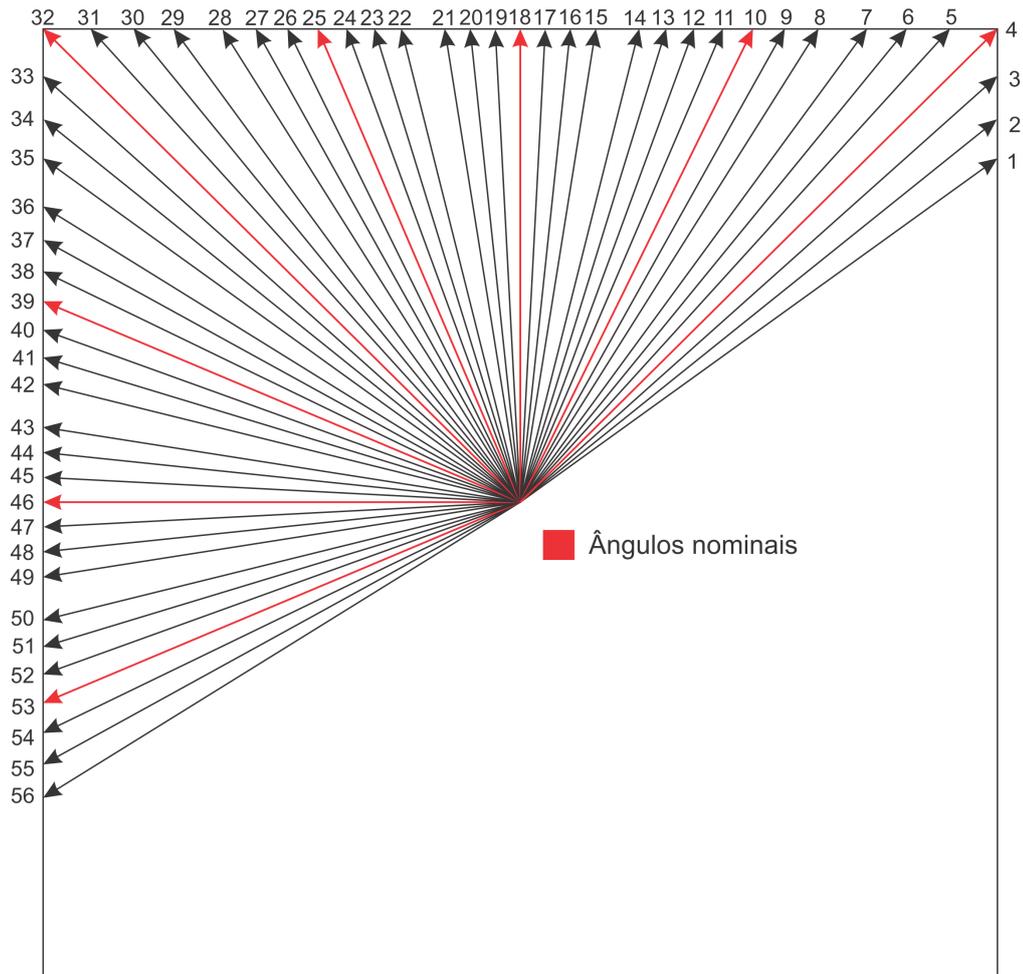


Figura 10 – Direções dos modos de predição angulares no AV1.

Tabela 2 – Especificação dos ângulos para cada um dos modos.

Modulo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ângulo	36	39	42	45	48	51	54	58	61	64	67	70	73	76
Modulo	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Ângulo	81	84	87	90	93	96	99	104	107	110	113	116	119	122
Modulo	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Ângulo	126	129	132	135	138	141	144	148	151	154	157	160	163	166
Modulo	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Ângulo	171	174	177	180	183	186	189	194	197	200	203	206	209	212

O modo direcional apresenta uma disposição dos ângulos resultantes no sentido horizontal e/ou no vertical (referente a como as amostras de referências são utilizadas no processo de predição). Sendo assim, os ângulos de predição não são aplicados de forma direta para o cálculo das amostras preditas, eles devem ser mapeados para a Tabela 3 através dos valores no eixo de coordenadas cartesianas definidos como dx

e dy . A Equação 13 descreve como é realizado o cálculo para determinar o valor que correspondente para o eixo das Abcissas (coordenadas x que está representado por dx) e a Equação 14 representa o mapeamento para o eixo das Ordenadas (coordenada y representado pela variável dy). A Tabela 3 corresponde a valores que podem ser obtidos através do dx e dy , que por sua vez são obtidos através do ângulo de predição (agl). Ela é organizada para conter os ângulos resultantes para 0° a 90° , onde as colunas são as unidades e as linhas são as dezenas.

$$dx = \begin{cases} dr[agl] & se \quad agl > 0 \ \&\& \ agl < 90 \\ dr[180 - agl] & se \quad agl > 90 \ \&\& \ agl < 180 \\ else \ 1 & \end{cases} \quad (13)$$

$$dy = \begin{cases} dr[agl - 90] & se \quad agl > 90 \ \&\& \ agl < 180 \\ dr[270 - agl] & se \quad agl > 180 \ \&\& \ agl < 270 \\ else \ 1 & \end{cases} \quad (14)$$

Tabela 3 – Valores atribuídos aos deslocamentos dentro dos ângulos 0° a 90° .

		Compor a Unidade									
		-	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Compor a Dezena	0	0	0	0	1023	0	0	547	0	0	372
	1	0	0	0	0	273	0	0	215	0	0
	2	178	0	0	151	0	0	132	0	0	116
	3	0	0	102	0	0	0	90	0	0	80
	4	0	0	71	0	0	64	0	0	57	0
	5	0	51	0	0	45	0	0	0	40	0
	6	0	35	0	0	31	0	0	27	0	0
	7	23	0	0	19	0	0	15	0	0	0
	8	0	11	0	0	7	0	0	3	0	0

Como foi mencionado anteriormente os modos de predição dos ângulos de 180° e de 90° apresentam seus cálculos de uma forma diferente dos demais ângulos, pois eles apenas realizam uma cópia das amostras de referências. Na Figura 11 é demonstrado a geração do bloco predito para estes dois ângulos, como podemos perceber, o processo corresponde apenas a fazer preenchimento das amostras preditas utilizando as amostras de referência, seguindo sempre o sentido do ângulo. Para os demais modos, eles seguem uma equação que apresenta comportamento diferente para ângulos maiores ou menores que 135° . A predição das amostras para os modos verticais (33-56), que correspondem à ângulos maiores que 135° , é realizada pela Equação 15 e para os modos horizontais (1-32), que são os ângulos menores que 135° , é realizada pela Equação 16. Este cálculo necessita da valor base para o deslocamento da amostra de referência no vetor tanto para as amostras superiores quanto à esquerda.

Na Equação 17 é demonstrado o cálculo da base para as amostras de referência superiores e na Equação 18 é a base para as amostras de referência à esquerda. Além do valor da base é necessário calcular o *shift* que corresponde ao peso que as amostras de referências são multiplicadas (este *shift* corresponde a parte fracionária). Na Equação 19 é demonstrado o cálculo do *shift* para as amostras superiores e na Equação 20 para as amostras à esquerda. Como pode ser notado nas equações apresentadas, existe duas variáveis denominadas *upsampleAbove* e *upsampleLeft*, estas variáveis definem se as amostras de referências foram processadas pela técnica de pré-processamento *edge upsample* (que será explicada no subcapítulo 3.2 de Técnicas de pré-processamento das amostras), sendo que o *upsampleAbove* significa se as amostras superiores foram processadas pela técnica *upsample* e o *upsampleLeft* significa se as amostras a esquerda foram processadas pelo *upsample*.

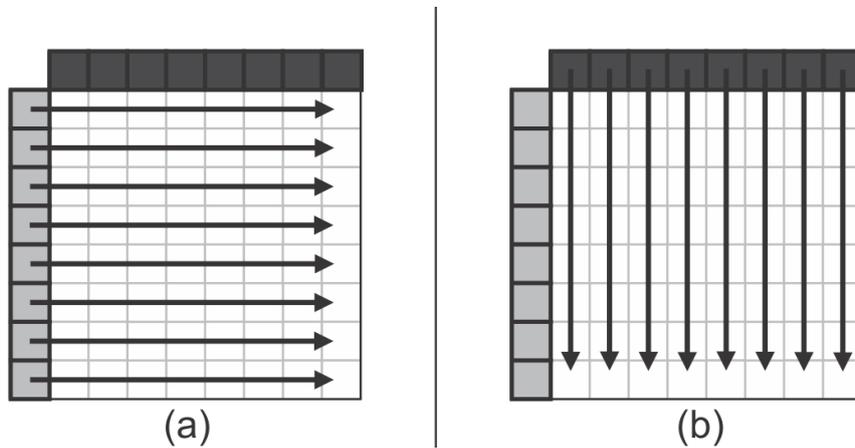


Figura 11 – Geração do bloco 8x8 aplicando o modo de predição de ângulo (a) 180° e (b) 90°.

$$P[x][y] = A[base] * (256 - shift) + A[base + 1] * shift \quad (15)$$

$$P[x][y] = A[base] * (256 - shift) + A[base + 1] * shift \quad (16)$$

$$base = dx \gg (8 - upsampleAbove) \quad (17)$$

$$base = dy \gg (8 - upsampleLeft) \quad (18)$$

$$shift = (dx \ll upsampleAbove) \& 255 \quad (19)$$

$$shift = (dy \ll upsampleLeft) \& 255 \quad (20)$$

3.1.5 Predição Intra Filtros

Além das predições tradicionais apresentadas nas seções anteriores, o AV1 introduziu outro modo de predição, a predição intra filtros, onde são propostas famílias de modos em que as amostras do bloco reconstruído são preditos recursivamente (MUKHERJEE et al., 2017). Desta forma, a amostra “P”, que será reconstruída, é predita como uma combinação ponderada dos seus vizinhos já preditos ou do vetor de referência. Para este processo recursivo definiu-se cinco frequências de filtros (famílias): DC, V, H, D135 e Paeth.

O modo Intra Filtros consiste na aplicação direta de filtros nas amostras de referência para compor o bloco predito. Cada família de filtro é formada por conjuntos de oito filtros, onde cada filtro é responsável por gerar uma das oito amostras “P” preditas que compõem uma distribuição 4x2 amostras. Os filtros são todos definidos com de 7-taps e na Tabela 4 são apresentadas todas as cinco famílias presentes no modo Intra Filtros. Este modo apresenta a restrição de ser aplicado somente nas amostras de luminância (AOM, 2019b).

Tabela 4 – Cinco famílias de filtros com os seus respectivos coeficientes de multiplicação para uma das posições P.

DC		V		H	
P1 =	{-6, 10, 0, 0, 0, 12, 0}	P1 =	{-10, 16, 0, 0, 0, 10, 0}	P1 =	{-8, 8, 0, 0, 0, 16, 0}
P2 =	{-5, 2, 10, 0, 0, 9, 0}	P2 =	{-6, 0, 16, 0, 0, 6, 0}	P2 =	{-8, 0, 8, 0, 0, 16, 0}
P3 =	{-3, 1, 1, 10, 0, 7, 0}	P3 =	{-4, 0, 0, 16, 0, 4, 0}	P3 =	{-8, 0, 0, 8, 0, 16, 0}
P4 =	{-3, 1, 1, 2, 10, 5, 0}	P4 =	{-2, 0, 0, 0, 16, 2, 0}	P4 =	{-8, 0, 0, 0, 8, 16, 0}
P5 =	{-4, 6, 0, 0, 0, 2, 12}	P5 =	{-10, 16, 0, 0, 0, 0, 10}	P5 =	{-4, 4, 0, 0, 0, 0, 16}
P6 =	{-3, 2, 6, 0, 0, 2, 9}	P6 =	{-6, 0, 16, 0, 0, 0, 6}	P6 =	{-4, 0, 4, 0, 0, 0, 16}
P7 =	{-3, 2, 2, 6, 0, 2, 7}	P7 =	{-4, 0, 0, 16, 0, 0, 4}	P7 =	{-4, 0, 0, 4, 0, 0, 16}
P8 =	{-3, 1, 2, 2, 6, 3, 5}	P8 =	{-2, 0, 0, 0, 16, 0, 2}	P8 =	{-4, 0, 0, 0, 4, 0, 16}
D135			PAETH		
P1 =	{-2, 8, 0, 0, 0, 10, 0}	P1 =	{-12, 14, 0, 0, 0, 14, 0}		
P2 =	{-1, 3, 8, 0, 0, 6, 0}	P2 =	{-10, 0, 14, 0, 0, 12, 0}		
P3 =	{-1, 2, 3, 8, 0, 4, 0}	P3 =	{-9, 0, 0, 14, 0, 11, 0}		
P4 =	{0, 1, 2, 3, 8, 2, 0}	P4 =	{-8, 0, 0, 0, 14, 10, 0}		
P5 =	{-1, 4, 0, 0, 0, 3, 10}	P5 =	{-10, 12, 0, 0, 0, 0, 14}		
P6 =	{-1, 3, 4, 0, 0, 4, 6}	P6 =	{-9, 1, 12, 0, 0, 0, 12}		
P7 =	{-1, 2, 3, 4, 0, 4, 4}	P7 =	{-8, 0, 0, 12, 0, 1, 11}		
P8 =	{-1, 2, 2, 3, 4, 3, 3}	P8 =	{-7, 0, 0, 1, 12, 1, 9}		

Na Figura 12 é demonstrado um exemplo de como é realizada a aplicação dos filtros neste modo. Como pode ser observado na Figura 12 (a), cada um dos oito filtros é aplicado para compor uma das amostras preditas “P” em uma região que compreende 4x2 amostras (destacadas em amarelo). Para esta iteração as amostras de referência utilizadas estão representadas pela letra “A” (destacadas em Azul). Como exemplo de aplicação dos filtros podemos considerar a predição da amostra P1 com a família DC, assim, as amostras P1 será composto pela aplicação do filtro -6,10,0,0,0,12,0 nas

amostras de referências A1, A2, A3, A4, A5, A6 e A7, o que resulta em uma equação resultante: $-6*A1+10*A2+12*A6$.

Na Figura 12 (b) é demonstrada a segunda iteração da aplicação dos filtros. Como podemos notar na Figura 12 (b) que nas amostras de referência (todas em azul) usadas para realizar a predição na segunda iteração precisou de duas amostras de referência (A6 e A7) que foram processadas na iteração anterior (P4 e P8 na Figura 12 (a)). Por causa disso, este modo apresenta uma grande dependência entre as iterações, dado que para a próxima iteração da predição é preciso utilizar amostras de referência que são preditas pela iteração anterior. A disposição de como os filtros são aplicados na predição é sempre a mesma, somente havendo mudança nas amostras de referência utilizada em cada iteração e na família.

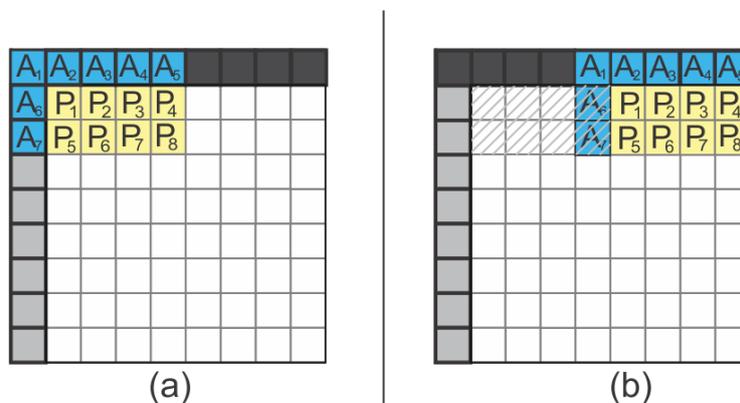


Figura 12 – Exemplo de aplicação dos filtros intraquadro para um bloco 8x8.

3.1.6 Predição CFL

O modo *Chroma from Luma* (CFL) é um novo modo inserido pelo AV1, que consiste em realizar uma predição para os blocos de crominância a partir das amostras reconstruídas do bloco de luminância. A ideia deste modo de predição é baseada na premissa de que mesmo havendo a separação da imagem em canais YCbCr, ainda permanece alguma correlação entre os canais, ou seja, a separação entre canais não é perfeita.

Na Figura 13 é demonstrado o processo da predição CFL. As amostras de luma reconstruídas utilizadas na predição CFL são amostras que já foram somadas com os seus respectivos resíduos, ou seja, são as amostras prontas para a exibição do vídeo. Este bloco de amostras de luma reconstruído será subamostrado para o tamanho do bloco de cromina com a taxa de quatro para um, posteriormente, o valor DC é removido destas amostras. Com o coeficiente DC removido das amostras é calculado com a somatória de todas as amostras de referência do bloco de luma. No processo do CFL é realizada uma subtração das amostras subamostradas pela somatória das amos-

tras de referência e posteriormente será realizada uma multiplicação com um fator de escala de acordo com o canal (fator de escala com sinal - *signed scaling factor*) (α), que é sinalizado no *bitstream*. Por fim, os blocos de croma são preditos pela predição DC (mesma apresentada na subseção 3.1.1) e este bloco predito será somado com as amostras já previamente calculadas na etapa anterior.

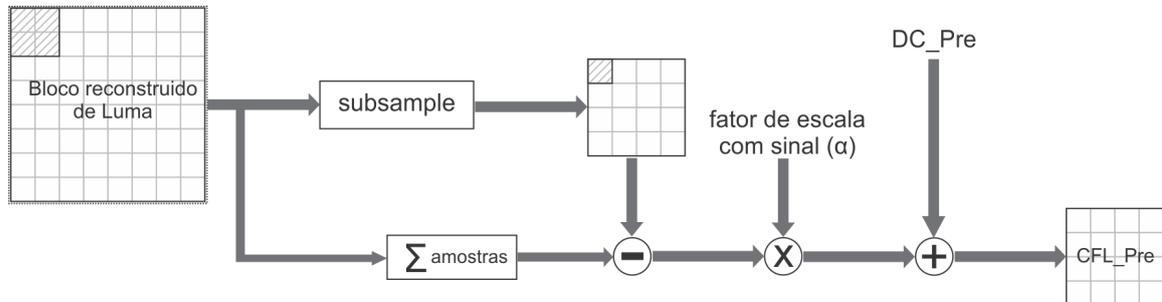


Figura 13 – Diagrama que demonstra as etapas do modo CFL.

3.1.7 Predição Palette

Outro modo novo, apresentado pelo AV1, foi o modo Palette. Este modo de predição foi adicionado especialmente para vídeos sintéticos como *screen-capture* e jogos. A ideia central deste modo está que em vídeos sintéticos as amostras preditas podem ser representadas por poucas amostras de referências o que resulta em um número pequeno de amostras de referência. Deste modo, o bloco predito tem a sua disposição paletas de amostras que podem conter de duas até oito amostras. Estas paletas são processadas pelo codificador e enviadas para decodificador para que ele possa gerar as amostras reconstruídas a partir da paleta. Desta forma, além das paletas deve ser enviada a posição da amostra dentro da paleta que irá representar as amostras “P” reconstruídas. Vale destacar que existe um conjunto de paletas para cada canal das amostras (Y, Cb e Cr).

3.1.8 Modo *Intra Block Copy*

Outra inovação que o codificador AV1 trouxe foi a inserção do modo de predição *Intra Block Copy* (intraBC). Como mencionado anteriormente, este modo procura referenciar regiões já codificadas dentro do mesmo quadro, de forma análoga com o que a predição interquadros realiza para os quadros temporalmente vizinhos. Este modo também possui melhor desempenho em vídeos de *screen content*, por terem uma menor variação de texturas.

Este modo também tem um vetor de movimento associado ao bloco predito como na predição interquadros, desta forma, ele irá copiar o bloco reconstruído para o bloco predito. Justamente por este modo de predição intraquadro ser mais parecido com a predição interquadros e por estar contido dentro da predição interquadros no software

de referência, não foi realizado nenhum estudo neste trabalho que visava aprofundar mais o conhecimento neste modo, como também nenhuma avaliação decorrente dele.

3.2 Técnicas de pré-processamento das amostras

As técnicas de pré-processamento têm como objetivo suavizar as amostras que serão utilizadas como referência para compor o bloco predito, evitando o aparecimento de bordas indesejadas no resultado final da predição. Isto faz com que variações bruscas que existam entre as amostras de referência sejam eliminadas (MUKHERJEE et al., 2017). O pré-processamento de amostras é utilizado somente para o modo direcional de acordo com determinadas condições que serão explicadas em cada uma das técnicas de pré-processamento. Para a aplicação das técnicas de pré-processamento são definidos três métodos/técnicas: *Intra Edge Filter Strength*, *Intra Edge Upsample* e *Corner Process*.

3.2.1 Intra Edge Filter Strength

Esta técnica define três tipos de filtros FIR (*Finite Impulse Response*) com cinco *taps*, sendo eles apresentados na Tabela 5, de acordo com o *kernel* de cada um. Esta etapa de pré-processamento das amostras de referência pode ser aplicada tanto nas amostras de referência superior como à esquerda. Na Equação 21 é demonstrado como é o processo de filtragem nas amostras de referência superiores e, na Equação 22, é explicitado o arredondamento empregado. As Equações 23 e 24 apresentam a mesma informação, só que para as amostras de referência à esquerda.

Tabela 5 – Kernels suportados pela filtragem Edge filter strength.

	A0	A1	A2	A3	A4
Kernel 1	0	4	8	4	0
Kernel 2	0	5	6	5	0
Kernel 3	2	4	4	4	2

$$P_S[-1][y] = \sum_{i=0}^4 kernel[y+i] * A[-1][y+i] \quad (21)$$

$$P[-1][y] = (P_S[-1][y] + 8) \gg 4 \quad (22)$$

$$P_E[x][-1] = \sum_{i=0}^4 kernel[x+i] * A[x+i][-1] \quad (23)$$

$$P[x][-1] = (P_E[x][-1] + 8) \gg 4 \quad (24)$$

Na Figura 14 é possível ver a ordem de aplicação dos filtros, a filtragem é aplicada em todas as mostras, exceto nas amostras $A[-1][2N-1]$, $A[2N-1][-1]$ e $A[-1][-1]$ (amostras A, Q e I da Figura 14). No processo de filtragem todas as amostras de referências são percorridas, mas em algum momento é atingido o limite das bordas e, desta forma, a última amostra de referência é estendida para completar todas as cinco amostras necessárias para a filtragem (como na filtragem da amostra B, H, J e P da Figura 14).

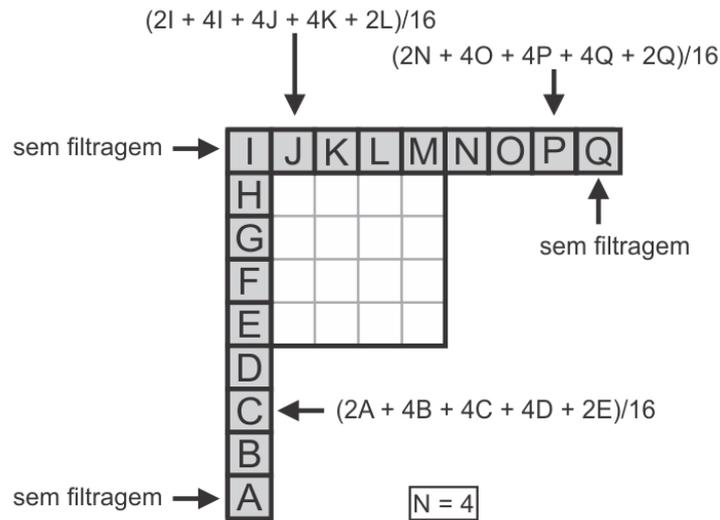


Figura 14 – Exemplo de aplicação da pré-filtragem *Edge Filter Strength*.

Esta técnica de pré-processamento tem objetivo em suavizar as amostras, no entanto, ela não é aplicada em todos os casos. A aplicação tem restrições condicionadas ao tamanho do bloco e ao ângulo utilizado na predição direcional. Estas condições também irão determinar qual *kernel* será utilizado na aplicação do modo. Uma outra condição mais extrema consiste em verificar se as amostras de referências (tanto as amostras superiores como as a esquerda) tem origem do modo smooth. Caso alguma das amostras de referências tenha sido predita pelo modo smooth, o *kernel* selecionado será determinado pela Tabela 6. Caso as amostras de referência não tenham sido preditas pelo modo smooth o *kernel* é obtido pela Tabela 7. O ângulo resultante superior (ARS) demonstrado na tabela é calculado considerando a Equação 25 e a Equação 26 para o ângulos resultante à esquerda (ARE), ambas equações tem como entrada o ângulo de predição nominal (ângulo).

$$ARS = \text{abs}(\hat{\text{ângulo}} - 90) \quad (25)$$

$$ARE = \text{abs}(\hat{\text{ângulo}} - 180) \quad (26)$$

Tabela 6 – Seleção dos filtros caso as amostras de referência venham do modo smooth.

	ângulos resultantes						
	1	4	8	16	32	40	56
4x4	-	-	-	-	-	-	1
8x4	-	-	-	-	-	1	1
4x8	-	-	-	-	-	1	1
8x8	-	-	1	2	3	3	3
16x8	-	-	-	-	-	-	-
8x16	-	1	1	2	3	3	3
16x4	-	1	1	2	3	3	3
4x16	-	1	1	2	3	3	3
16x16	1	2	2	2	3	3	3
32x32	-	-	-	-	-	-	-
32x16	-	-	-	-	-	-	-
16x32	3	3	3	3	3	3	3
32x8	-	-	-	-	-	-	-
8x32	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 7 – Seleção dos filtros caso as amostras de referência não venham do modo smooth.

	Ângulos Resultates					
	1	4	20	40	48	64
4x4	-	-	-	1	1	2
8x4	-	-	-	-	-	-
4x8	-	-	1	1	2	2
8x8	-	-	-	-	-	-
16x8	-	-	-	-	-	-
8x16	-	3	3	3	3	3
16x4	-	3	3	3	3	3
4x16	-	3	3	3	3	3
32x32	-	-	-	-	-	-
16x16	-	-	-	-	-	-
32x16	3	3	3	3	3	3
16x32	3	3	3	3	3	3
32x8	-	-	-	-	-	-
8x32	-	-	-	-	-	-

3.2.2 Intra Edge Upsample

Esta técnica de pré-processamento procura aumentar a precisão das amostras de referência em certas condições. Ela consiste em realizar uma interpolação linear entre as amostras de referência, aumentando assim o número de amostras de referências utilizadas no processo de predição direcional, ou seja, calcula um pixel fracionário

entre as amostras de referências inteiras (AOM, 2019b). A geração dos pixels fracionários permite que o modo direcional tenham disponíveis o dobro de amostras de referência. Esta técnica também apresenta alguns padrões restritivos quanto ao uso. Assim a aplicação desta técnica nas amostras de referência tem condição de aplicação se as amostras de referência são provenientes do modo smooth e com o tamanho de bloco menor ou igual a 8x8.

O primeiro teste realizado para definir se é aplicado *Edge Upsample* está definido na Equação 27, onde é realizada uma verificação se o ângulo resultante é menor ou igual a 40°. Caso o ângulo seja menor que 40° o pré-processamento do tipo *Edge Upsample* não é aplicado. Se o ângulo for maior que 40° e as amostras de referências tenham origem do modo smooth é realizado o teste que está definida na Equação 28 (w representa a largura e o h a altura do bloco a ser predito), onde verifica se a soma das dimensões do bloco é menor ou igual a oito. Se esta última condição for satisfeita é aplicada a filtragem *Edge Upsample*. Caso esta última condição não seja satisfeita é realizado mais um teste definido na Equação 29, para verificar se a soma das dimensões é igual ou menor que 16 e as amostras de referência não tem origem do modo smooth. Caso esta condição seja atendida, é realizado o *Edge Upsample*.

$$dr \leq 40^\circ \quad (27)$$

$$(w + h) \leq 8 \quad (28)$$

$$(w + h) \leq 16 \quad (29)$$

A Figura 15 exemplifica a aplicação desta técnica demonstrando as amostras de referências originais (em letras maiúsculas) e as amostras geradas pela interpolação (em letras minúsculas). O filtro utilizado está especificado na Equação 30 para as amostras superiores e na Equação 31 para as amostras à esquerda e, como pode ser notado, é um filtro de quatro *taps* e cada amostra gerada pelo filtro assume a posição intermediária entre as amostras de referência utilizadas no processo.

$$P[-1][y] = (-A[-1][y] + 9 * A[-1][y + 1] + 9 * A[-1][y + 2] - A[-1][y + 3] + 8) \gg 4 \quad (30)$$

$$P[x][-1] = (-A[x][-1] + 9 * A[x + 1][-1] + 9 * A[x + 2][-1] - A[x + 3][-1] + 8) \gg 4 \quad (31)$$

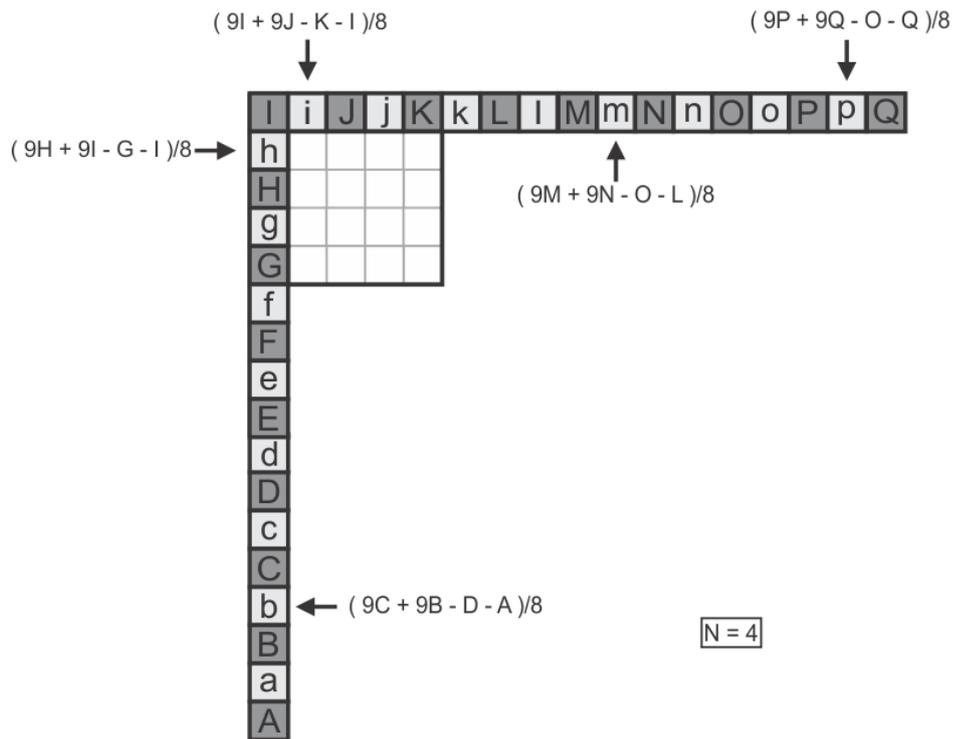


Figura 15 – Exemplo de aplicação da pré-filtragem *Edge Upsample*.

3.2.3 Corner Process

A técnica de pré-processamento *Corner Process* é aplicada para suavizar a amostra de referência mais superior e à esquerda (amostra $A[-1][-1]$). Esta técnica é aplicada quando o ângulo direcional for maior que 90° e menor que 180° , ou seja, quando o ângulo de predição utiliza tanto as amostras de referências superiores como as da esquerda. Além desta condição, também deve ser verificado se a soma das dimensões do bloco predito for maior ou igual a 24. Na Equação 32 é definido o filtro utilizado por esta técnica.

$$P[-1][-1] = (5 * A[-1][0] + 6 * A[-1][-1] + 5 * A[0][-1] + 8) \gg 4 \quad (32)$$

3.3 Processo de decodificação dos modos intraquadro no AV1

O processo de decodificação de um vídeo consiste em remontar o vídeo codificado com as informações que o codificador disponibiliza no *bitstream*. Estas informações disponibilizadas no *bitstream* seguem regras e estruturas para que o decodificador possa decodificar o vídeo, deste modo, o codificador é responsável por testar todos os modos de predição e partições possíveis e codificar o vídeo com as melhores combinações de modos de predição e partições de blocos. Dado o grande número de modos de predição e possibilidades de particionamento de blocos dos codificadores de vídeo atuais, é usual que os codificadores implementem heurísticas que possibilitem testar apenas alguns modos/partições, tomando decisões locais que aceleram o processo de codificação. No AV1 existem fluxos que definem a ordem de decodificação do *bitstream*, sendo que a própria predição intraquadro apresenta regras para poder realizar a decodificação satisfatoriamente e manter a consistência entre o que o codificador gera e o que o decodificador consegue decodificar.

Nas Figuras 16-17 são apresentados os fluxogramas que demonstram a ordem em que é realizada a decodificação do *bitstream* do vídeo para a predição intraquadro. Este fluxo procura agranger todos os modos estudados nas seções anteriores, exceto o modo IntraBC. Na Figura 16 é apresentado o núcleo da decodificação intraquadro (que consiste das predições: DC, Paeth, smooth, smooth vertical e smooth horizontal, direcionais e intra filtros). No início deste núcleo são realizados dois testes para verificar se o bloco a ser reconstruído é do plano Y (bloco de luminância) e se o bloco foi predito com os filtros intraquadro. Caso esta condição seja satisfeita é realizada uma leitura para determinar a família do filtro utilizada na predição do bloco, com a família de filtros determinada é aplicado o processo de filtragem para reconstruir o bloco. O próximo teste realizado é verificar se o bloco foi predito pelo modo direcional, sendo esta condição verdadeira são realizados três testes para verificar se as amostras tiveram pré-processamento: sendo o primeiro teste para a técnica *Edge Filter Strength*, caso verdadeiro é aplicada o filtro de pré-processamento *Edge Filter Strength*. O segundo teste é verificar se será utilizada *Edge Upsample* nas amostras de referências, caso verdadeiro, será aplicada a técnica *Edge Upsample*. A terceira verificação realizada no fluxo da predição direcional consiste em verificar se é necessário aplicar a filtragem *Corner Process*. Com o término do teste destas três etapas é determinado o ângulo de predição e os valores das variáveis das coordenadas (dx e dy) e, por fim, é realizada a aplicação da predição direcional para reconstruir o bloco predito.

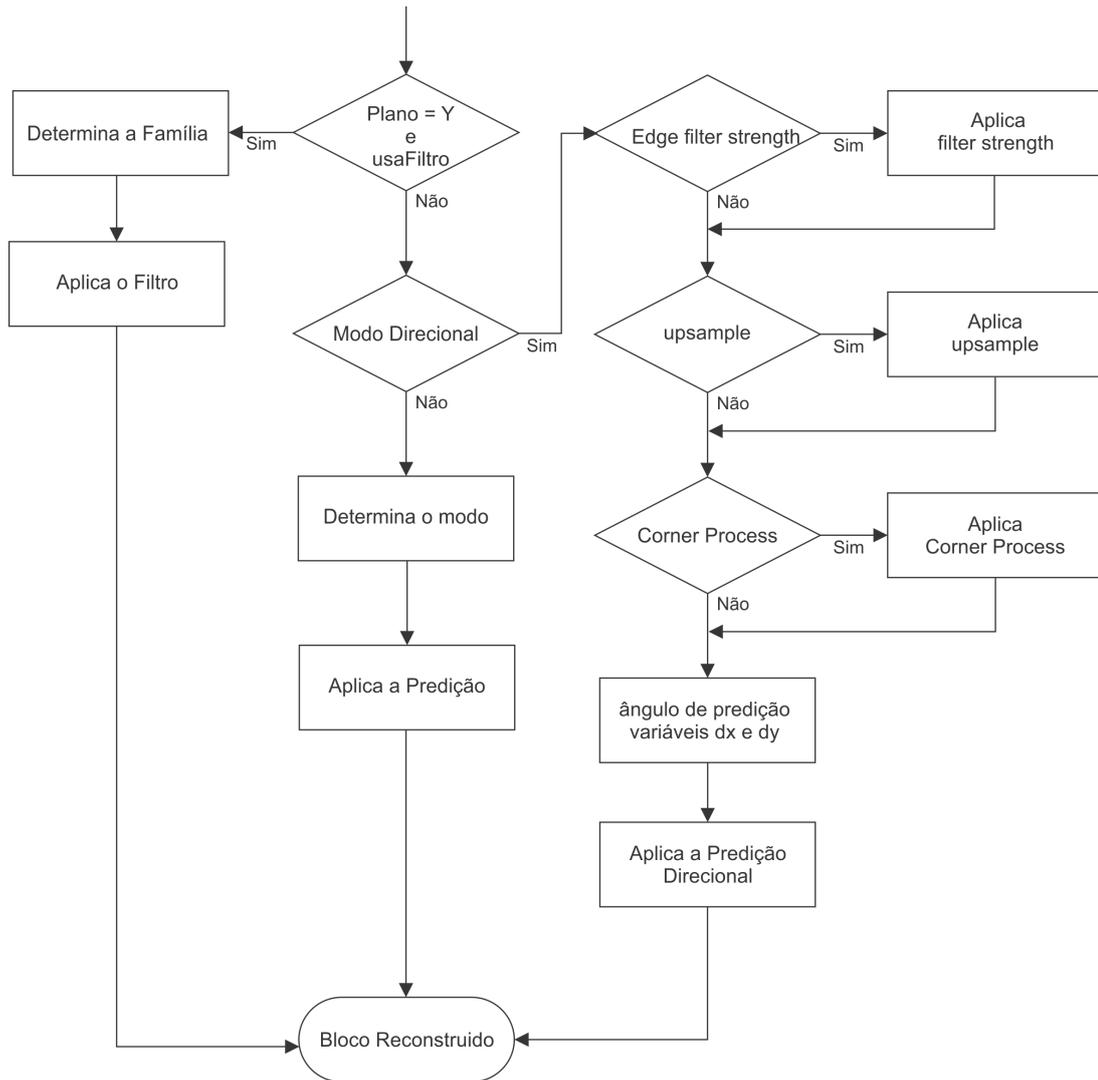


Figura 16 – Fluxo do núcleo da decodificação intraquadro.

Caso o bloco não for predito pelos filtros da intrapredição e da predição direcional é verificado qual dos demais modos foi utilizada na predição do bloco (DC, Paeth, smooth, smooth vertical e smooth horizontal) e aplicada a predição para reconstruir o bloco.

Na Figura 17 é apresentado o restante do fluxo da decodificação intraquadro, este fluxo contempla a predição CFL, palette e o núcleo da predição intraquadro (apresentado na Figura 16). Como pode ser observado, para realizar a predição CFL é necessário que o bloco a ser reconstruído não seja do plano Y (significa que o bloco a ser reconstruído é um dos canais de crominâncias – Cb ou Cr) e que o modo aplicado seja o CFL. Com estas condições atendidas é realizado mais um teste para verificar se o bloco predito pelo modo DC já está disponível, caso o bloco já esteja disponível é dado o prosseguimento no modo CFL. Caso contrário, é necessário reconstruir o bloco DC executando o núcleo da predição intraquadro para formar o bloco DC. Com o bloco DC disponível é realizada a carga do mesmo e dado o prosseguimento para a

última etapa do modo CFL. Como observado, se as condições para realizar a predição CFL não sejam satisfeitas, o fluxo de reconstrução do bloco segue para realizar um teste se o modo aplicado seria palette. Por fim, se não for aplicado o modo palette o fluxo de decodificação segue para o núcleo da intraquadro.

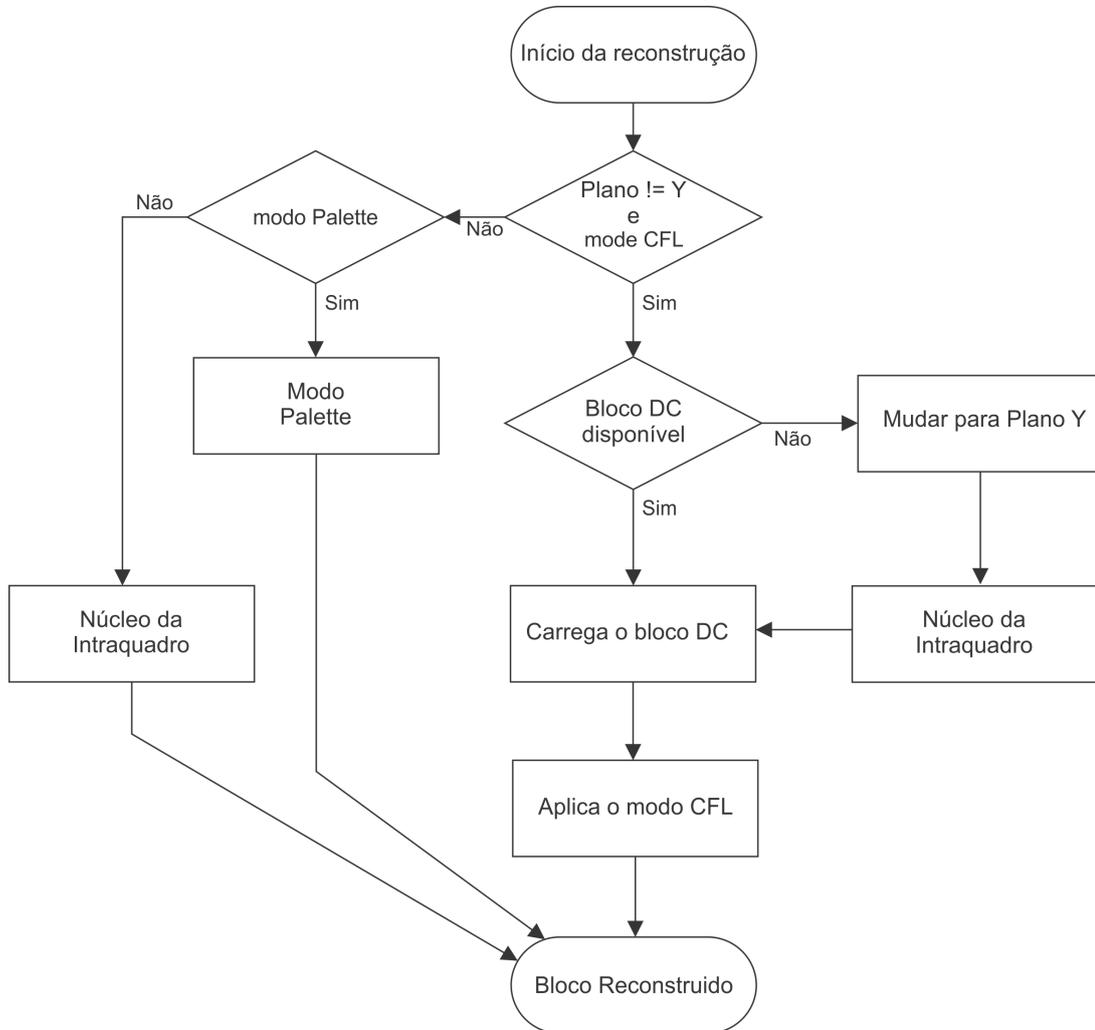


Figura 17 – Fluxo completo da decodificação intraquadro.

3.4 A Predição Intra dos Codificadores Atuais

Até o momento foram demonstradas todas as ferramentas presentes na predição intraquadro do codificador AV1, desta forma, na Tabela 8 são apresentados os principais atributos/características presentes na predição intraquadro do codificador AV1 bem como nos principais codificadores atuais. É possível constatar que o codificador AV1 utiliza um conjunto maior de ferramentas, sendo que muitas das ferramentas presentes no AV1 não são encontradas nos demais codificadores. Além disso, também podemos destacar maior suporte para outros formatos e tamanhos de blocos. Este capítulo apresentou todos os modos suportados para a decodificação intraquadro junto com o fluxo de decodificação aplicado no codificador AV1. Contudo, a decodificação destes modos no decodificador pode apresentar um comportamento de distribuição dos modos e tamanhos de blocos de acordo com as características do vídeo e as configurações impostas na codificação, o que pode provocar uma maior maior utilização de um modo em relação aos demais. Para elucidar melhor todo este comportamento, no próximo capítulo será apresentada uma avaliação estatística realizada sobre a utilização de cada modo e tamanho de bloco na predição intrquadro.

Tabela 8 – Características da predição intra dos codificadores de vídeo atuais.

Ferramentas	Codificadores			
	AV1	VP9	HEVC	H.264
Modos Intraquadro	69	10	35	9
Tamanho de blocos	4x4 até 64x64 (19)	4x4 até 32x32 (10)	64x64, 32x32, 16x16, 8x8 e 4x4	16x16 e 4x4
DC	sim	sim	sim	sim
Direcionais	56	10	33	8
Modos alternativos	Paeth + 3 Smooth	TrueMotion (TM)	Planar	-
Modo especial para Croma	CFL	-	-	-
Modo filtro (Composto)	5	-	-	-
screen-capture e screen content	2	-	-	-
Pré-processamento	Sim (modos direcionais)	Sim	Sim	Sim

4 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA PREDIÇÃO INTRAQUADRO NO AV1

Esta avaliação tem como objetivo realizar um levantamento estatístico do comportamento da utilização dos modos de predição intra na decodificação do codificador AV1. A partir da análise destes resultados, será possível definir as demandas de desempenho para o decodificador, baseadas nos resultados de ocorrência dos modos de predição obtidos. O decodificador apresenta restrições de desempenho em relação ao processamento menores que o requerido pelo codificador, justamente por que o codificador deve testar e avaliar muitos tamanhos de blocos e modos de predição, já o decodificador precisa decodificar apenas o modo escolhido pelo codificador. Contudo, o decodificador deve ter suporte a todos os modos definidos no padrão, uma vez que o modo utilizado na codificação de um determinado vídeo não é conhecido e, mesmo assim, o decodificador deve ser capaz de decodificar qualquer vídeo que respeite o formato do codificador. Isto torna as otimizações difíceis empregadas principalmente no codificador, como remoção e/ou simplificação de modos de predição menos relevantes. Como as decisões para as melhores partições e modos de predição ficam ao encargo do codificador, o decodificador fica responsável por reconstruir o vídeo a partir das informações disponibilizadas no *bitstream*. A predição intraquadro no AV1 é responsável por explorar as redundâncias espaciais, onde podem ser aplicados 19 tamanhos de blocos e 68 modos de predição (mas 69 se considerar o intraBC).

No processo de codificação do AV1 é possível definir como será a interação das predições intraquadro e interquadros, ou seja, é possível definir que o vídeo será codificado somente com a predição intraquadro (comumente chamado de *OnlyIntra*), ou ainda, que um quadro puramente constituído da predição intraquadro seja inserido de n em n quadros, onde os demais quadros podem possuir blocos preditos tanto pela predição intraquadro quanto interquadros (configuração conhecida como *LowDelay*). Para salientar, que existem outras configurações que podem ser utilizadas, mas nas avaliações que foram realizadas neste trabalho, estas foram as duas configurações utilizadas. Justamente por isso, a configuração *OnlyIntra* representa um cenário mais pessimista e a *Lowdelay* um cenário mais próximo da realidade. Para deixar bem des-

tacado em relação às configurações que podem ser utilizadas na codificação do vídeo, o primeiro quadro de qualquer sequência de vídeo é codificado somente com a predição intraquadro, justamente por que ainda não existe informação de uma referência temporal já codificada para a predição interquadros. Para definir estas configurações, o software de referência do padrão AV1 possui a *flag kf-max-dist=<value>*, que representa o intervalo em que é inserido um quadro codificado somente com a predição intraquadro, desta forma para uma codificação *OnlyIntra* temos este parâmetro definido como 0 e para o *Lowdelay* terá o valor atribuído referente a taxa de reprodução do vídeo, que nos casos dos vídeos UHD 4K utilizados nos experimentos é 60.

Para as simulações foram definidos também quatro valores de parâmetros de quantização (*quantization parameter* - QP) para uma configuração de qualidade constante. Os valores escolhidos para o QP foram 22, 32, 42 e 52, onde temos um QP 22 categorizado como QP baixo, dois QPs 32 e 42 categorizados como médios e o QP 52 categorizado com QP alto de acordo com esta referência (Lei et al., 2017). Para realizar este controle é utilizada a *flag end-usage=<value>* com o parâmetro 3 e na *flag cq-level=<22, 32, 42 e 52>* é passado o valor de QP utilizado para produzir uma qualidade constante. Como no início das simulações deste trabalho ainda não existia nada que normatizava ou definia QPs padrões se optou por utilizar os QP comentados anteriormente, contudo hoje já é possível encontrar alguma norma referente a este tema como (ZIMMERMAN, 2017).

Na Equação 33 é demonstrado o comando utilizado para realizar a codificação dos vídeos e também é possível ver todas as *flags* definidas na codificação. Podemos perceber que algumas *flags* adicionais foram utilizadas como, por exemplo, *passes*, que define o número de passadas que o codificador pode realizar no processo de codificação, neste caso foi utilizada apenas um passo. Existem outras *flags* que são referentes a parâmetros provenientes do vídeo, como a resolução, taxa de reprodução, etc. Na Equação 34 é demonstrado a linha de comando utilizado para decodificar o *bitstream* do vídeo.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{aomenc} \quad & --verbose \quad --passes = 1 \quad -i420 \quad < path_{\text{video}} > \quad -w \quad < width > \quad -h \quad < height > \\
 & --fps = < fps_{\text{video}} > \quad 000/1000 \quad --end \quad -usage = 3 \quad --cq \quad -level = < QP > \\
 & \quad \quad \quad --kf \quad -max \quad -dist = < value > \quad --psnr \quad --bit \quad -depth = 10 \\
 & --input \quad -bit \quad -depth = 10 \quad --tune = psnr \quad --output = video.av1
 \end{aligned} \tag{33}$$

$$\mathbf{aomdec} \quad -i420 \quad --rawvideo \quad video.av1 \quad -o video.yuv \tag{34}$$

Para o desenvolvimento deste experimento foi utilizado o software de referência do padrão AV1, nome aom, na versão 1.0.0-1024-g5b8f393 (AV1, 2019) da data 22 de novembro de 2018. As sequências de testes utilizadas nestas simulações foram seis vídeos UHD 4K (3840x2160 pixels): Cactus, Coastguard, Mobile, News, Suzie e Foreman. Além destas sequências, foram também codificados os 24 vídeos defini-

dos pelas condições comuns de testes (*Common Test Conditions - CTC*) (BOSSÉN et al., 2011) da JCT-VC (sequências definidas para o HEVC), que compreendem por vídeos de 1600p, 1080p, 720p, 480p e 240p. Como foco deste trabalho está no desenvolvimento de uma solução arquitetural para o processamento de vídeo UHD 4K, no decorrer deste capítulo será apresentado os resultados obtidos da coleta somente para os vídeos UHD 4K. Deste modo, os resultados coletados para as sequências de vídeos definidas pela CTCs podem ser encontrados em APÊNDICE A, sendo que no ANEXO A podem ser encontrado algumas informações adicionais, por exemplo, a largura de bits das amostras dos vídeos utilizados tanto para as CTCs como também para as sequências UHD 4K. Todos os vídeos utilizados no experimento possuem uma subamostragem de 4:2:0.

4.1 Avaliações para a configuração *OnlyIntra*

Como mencionado anteriormente, na configuração *OnlyIntra* o codificador realiza a codificação do vídeo somente utilizando a predição intraquadro. Desta forma, os resultados que serão apresentados a seguir correspondem ao total de blocos decodificados pelo decodificador (nenhum bloco da predição interquadros foi decodificado). Os resultados apresentados iram ser demonstrados no formato de representatividade e/ou de ocorrência para os tamanhos de blocos decodificados. Os resultados apresentados por ocorrência representam a contagem de blocos verificada no processo de decodificação enquanto que a representatividade representa a multiplicação da contagem de blocos pela quantidade de amostras presentes no respectivo tamanho de bloco.

Na Figura 18 são apresentados os resultados médios de todas as sequências e QPs decodificadas para esta configuração. Como pode ser observado, o tamanho de bloco com maior ocorrência/seleção foi o bloco 8x8 com 29,02%, seguido pelos blocos 4x4 com 15%, e pelo bloco 16x16 com 14,9%. Com estes resultados podemos inferir que na ocorrência os três blocos que mais se destacaram são quadrados e os de menores tamanhos dentro dos blocos quadrados.

Na análise da representatividade temos o bloco 16x16 como mais representativo atingindo 23,72%. O segundo mais representativo foi o bloco 32x32 com 23,14%, seguido pelo bloco 8x8 com 12,19%. Desta vez, podemos perceber que o bloco mais representativo foi exatamente o tamanho de bloco intermediário dentro dos blocos quadrados. Também é possível notar que existe uma tendência por tamanhos de blocos intermediários da parte do codificador, isso seria justificado por esta análise apresentada conter apenas vídeos com resolução UHD 4K.

Os resultados coletados para a configuração *OnlyIntra*, demonstraram que o codificador optou por tamanhos de blocos intermediários ao codificar vídeos UHD 4K, tendo

destaque para os tamanhos 16x16 e 8x8, como pode ser observado nas análises dos tamanhos de blocos decodificados.

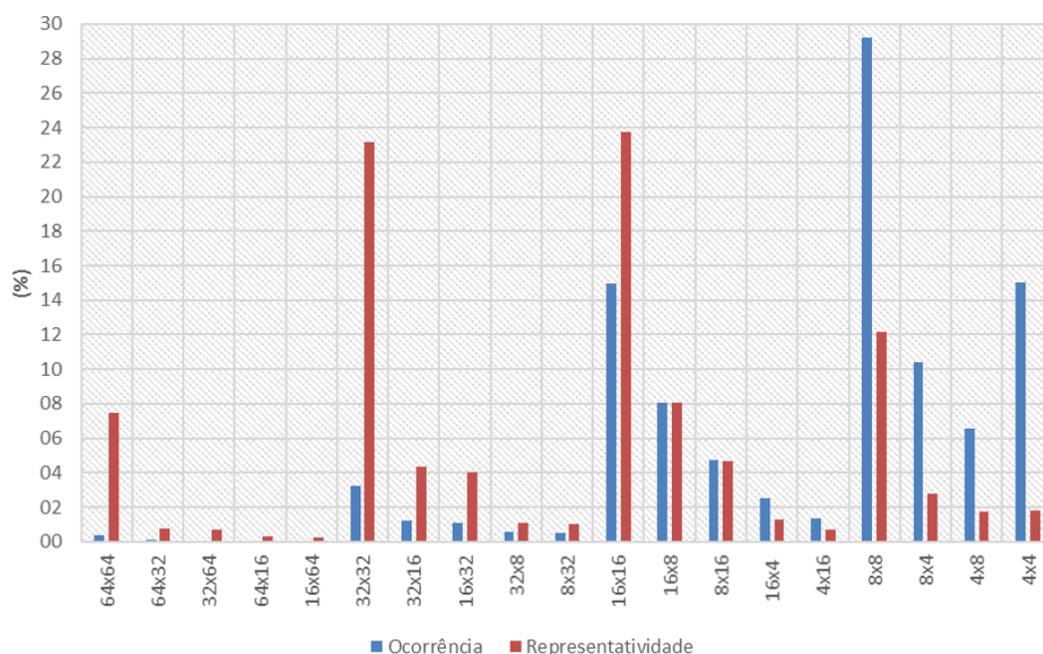


Figura 18 – Percentual de escolha e representatividade para os tamanhos de blocos na predição Intraquadro.

Para permitir uma análise acerca dos modos de predição, a Figura 19 apresenta os resultados médios de representatividade considerando todos os modos intra (exceto o intrabc). Estes resultados consideram tanto as amostras de luminância como de crominância. Os resultados presentes na Figura 19 demonstram que o modo DC foi o que apresentou a segunda maior ocorrência, com 26,80%, sendo o modo direcional com a maior ocorrência de 33,66%. Eles são seguidos pelo Smooth com 11,71%, modo CFL com 11,59%, e o Smooth H com 3,12%. Dentre os intra filtros, o modo DC foi o que teve o maior destaque e apresentou a maior representatividade com 2,37%. Vale ressaltar também que o modo CFL é aplicado somente nas amostras de crominância e, ainda assim, foi o quarto modo com maior representatividade. Podemos perceber, na Figura 19 que o modo Palette apresentou 0% de representatividade, isso se deve ao fato de que nenhuma das sequências de vídeo utilizadas na análise era sintética ou artificial. Quando analisamos os modos direcionais (Dir.) percebemos que eles correspondem a 33,66% das amostras decodificadas, mas vale ressaltar que este valor corresponde aos percentuais acumulados de todos os 56 ângulos direcionais. Para um maior detalhamento em relação aos modos direcionais, a Figura 20 demonstra o percentual da representatividade de cada ângulo do modo direcional. Podemos perceber que existe uma tendência dentro do modo direcional para o ângulo 180°, tendo ele obtido uma representatividade de 3,5%, que ainda é inferior quando comparado individualmente aos modos DC, Smooth, CFL e Smooth H.

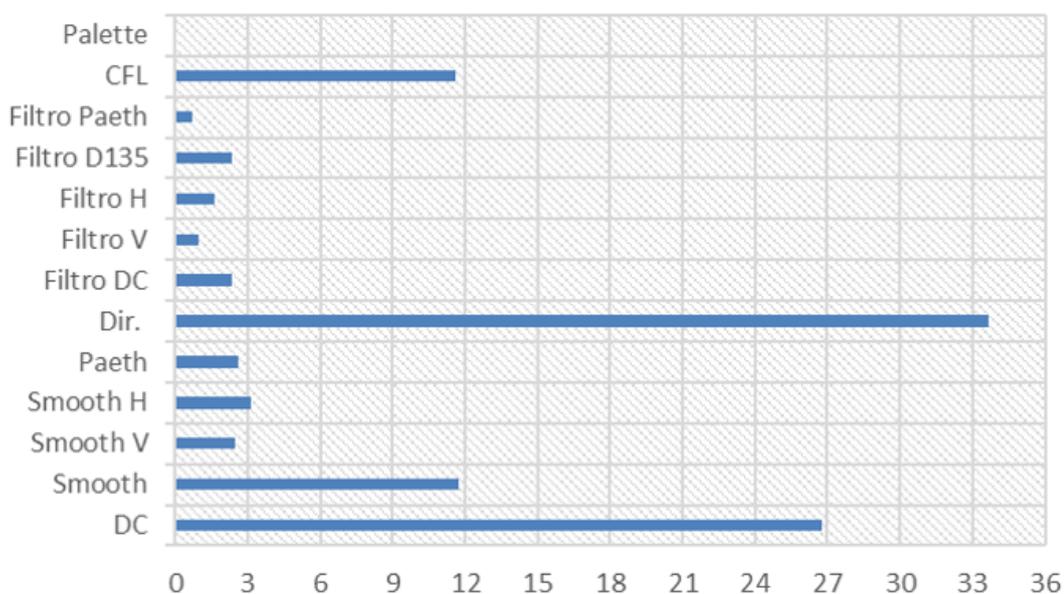


Figura 19 – Percentual de representatividade (%) de cada modo intraquadro.

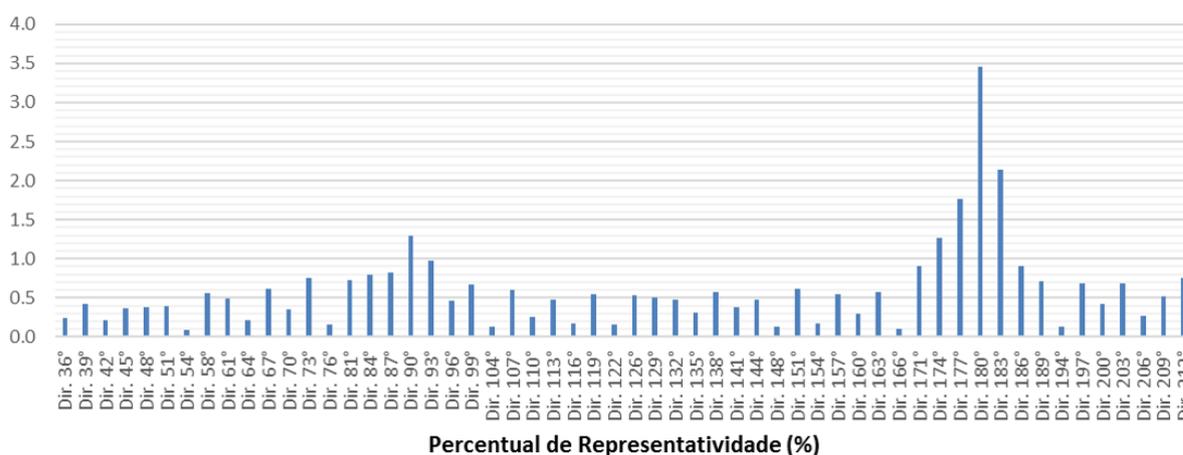


Figura 20 – Percentual de representatividade (%) para os modos direcionais.

O ângulo direcional de 180° foi o mais representativo enquanto que o ângulo de 90° ficou sendo o quarto mais representativo com 1,3%. Era esperado que os ângulos de 180° e de 90° fossem os mais representativos pois eles representam melhor o comportamento de objetos no sentido horizontal e vertical, mas isso não foi observado para o caso do ângulo de 90°, contudo ele se encontra entre os modos direcionais com maiores representatividades.

Vale salientar que os resultados completos desta análise podem ser encontrados no APÊNDICE A, junto com os resultados coletados para os vídeos UHD 4K e as seqüências recomendadas pelas CTCs que não foram apresentados.

4.2 Avaliações para a configuração LowDelay

A configuração *LowDelay* corresponde a um cenário mais realista em que o codificador pode tomar a decisão de utilizar a predição interquadros ou intraquadro no processo de codificação (a tomada de decisão depende exclusivamente do algoritmo e da heurística de tomada de decisão implementada pelo codificador). Desta forma, quando o quadro é constituído apenas por blocos preditos pela predição intraquadro, ele recebe o nome de quadro do tipo I e quando ele é constituído por blocos preditos tanto pela predição intraquadro quanto interquadros ele recebe o nome de quadro do tipo P (AGOSTINI, 2007). Além disso, nesta configuração o codificador foi configurado para que no início de cada segundo do vídeo o codificador utilize um quadro do tipo I, ou seja, um quadro exclusivamente predito com a predição intraquadro a cada segundo.

Com a utilização da configuração *LowDelay* existem tanto blocos provenientes da predição intraquadro como da interquadros (quadro tipo P). Como o foco deste trabalho está voltado para a predição intraquadro as coletas foram realizadas considerando esta predição. Além disso, na contagem realizada não foi feita nenhuma distinção entre os blocos que tinham origem da função que estava decodificando, ou seja, se ele tinha origem da decodificação intraquadro pura ou de uma decodificação oriunda de uma predição composta inter-intra (predição composta inter-intra é uma técnica que visa combinar a predição intraquadro e interquadro no mesmo bloco predito, como já foi explicado anteriormente).

A Figura 21 apresenta o percentual de ocorrência e representatividade dos diferentes tamanhos de bloco, os valores apresentados nesta figura representam os 100% dos blocos decodificados no módulo intraquadro, ou seja, não considera os blocos preditos pela predição interquadros. Os resultados são bastante similares aos obtidos com a configuração *OnlyIntra*, sendo que os blocos com as maiores ocorrências foram o 8x8 com 29,06%, seguido pelo 16x16 com 27,03%. Em relação à representatividade, os blocos que apresentaram os maiores percentuais foram o 16x16, com 31,35%, e o bloco 32x32, com 20,72%. O resultado que chama a atenção na Figura 21 é o obtido para os blocos retangulares menores (Ex.: 64x16, 8x32, 16x4, etc.), que apresentaram baixos percentuais de ocorrência e representatividade (valores inferiores que 0,5% e, em alguns casos, menores que 0,2%).

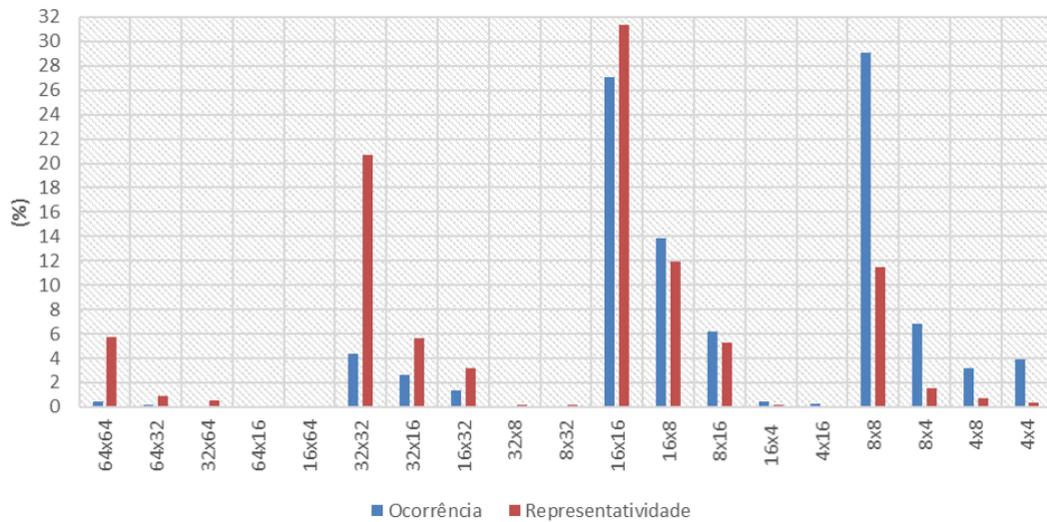


Figura 21 – Percentual de escolha e representatividade para os tamanhos de blocos na predição intraquadro.

Na Figura 22 é apresentada o percentual de representatividade para os modos da predição intraquadro. Os resultados mostram que o modo direcional corresponde a 33,33%; seguido pelo modo DC 23,33%; Smooth com 12,03%; CFL com 8,9%; Filtro DC com 4,36%. A Figura 23 apresenta o detalhamento dos resultados para todos os modos direcionais, onde é possível perceber uma tendência maior de representatividade para os modos próximos ao ângulo de 180° , como aconteceu na configuração *OnlyIntra*. Desta vez os dois ângulos que tiveram maior representatividade foram o ângulo de 180° e 90° , respectivamente, com 8,7% e 3,7% de ocorrência. De forma geral, podemos perceber que nos ângulos dentro do modo direcional ficaram com uma representatividade inferior a 1%, com exceção dos ângulos de 90° , 177° , 180° , 183° e 186° .

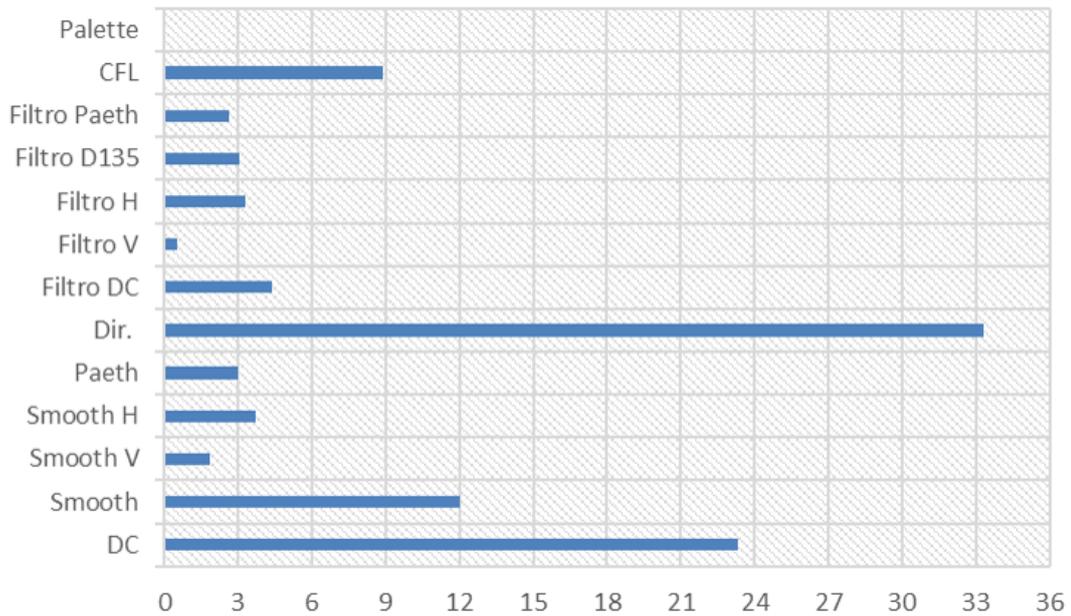


Figura 22 – Percentual de representatividade (%) de cada modo intraquadro.

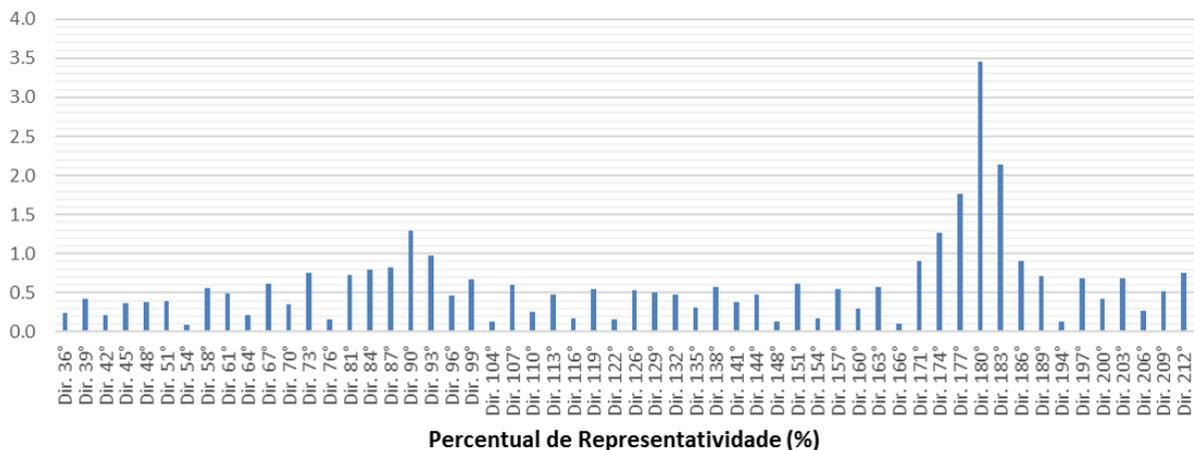


Figura 23 – Percentual de representatividade (%) para os modos direcionais.

Na Figura 24 é apresentado o percentual de ocorrência de todos os blocos, extraídos do processo de decodificação, considerando todas as amostras processadas, tanto pela predição intraquadro e interquadros. Desta forma, é possível perceber que os blocos com maiores ocorrências são o 8x8 e o 16x16, dentro de todos os blocos decodificados. Estes dois tamanhos são exatamente os mesmos tamanhos observados nas análises realizadas anteriormente, quando observamos somente as amostras codificadas com a predição intraquadro.

Partindo para análise da representatividade, que é apresentada na Figura 25, é possível perceber que a representatividade correspondente das amostras preditas pela predição intraquadro é menor que das amostras preditas pela predição interquadros. Existe destaque principalmente para os tamanhos de bloco 128x128, com

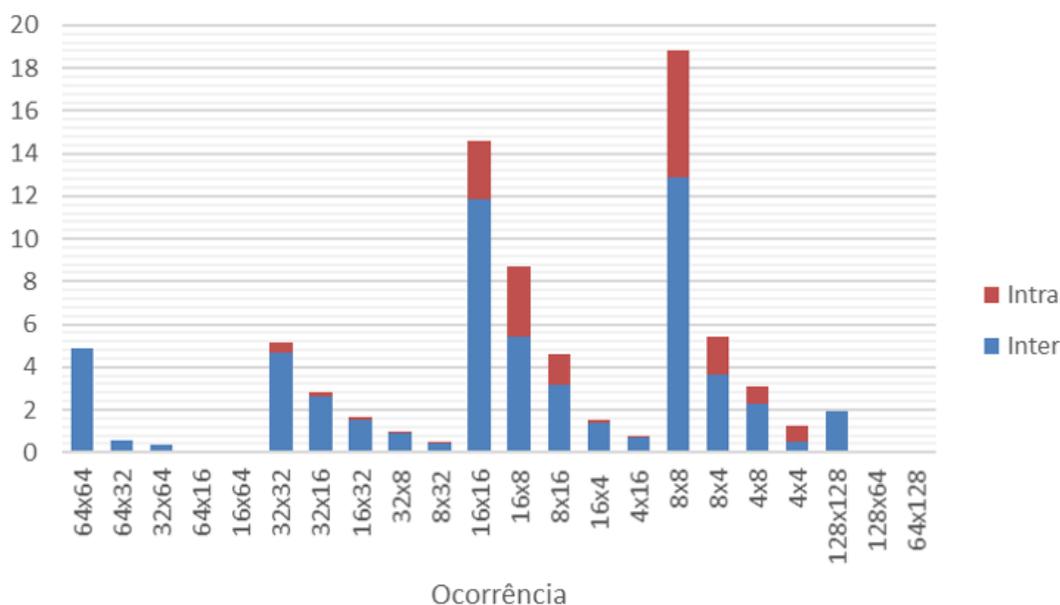


Figura 24 – Percentual de ocorrência para os tamanhos de blocos para todo o decodificador (intraquadro+intrequadros).

mais de 42,71%, justamente um tamanho de bloco não utilizado pela predição intraquadro, e o 64x64, com no total 26,54%. No total das amostras decodificadas em todas as sequências de vídeos, podemos perceber que apenas 9,85% das amostras decodificadas foram decodificadas com a predição intraquadro.

Com estes resultados podemos identificar que, na configuração *LowDelay*, os modos da intraquadro não são utilizados de forma contínua e que ela se faz jus em dois cenários: (i) quadros completamente preditos com a predição intraquadro, situação que pode ocorrer no primeiro quadro de cada sequência ou quando é especificada a utilização de um quadro do tipo I ou (ii) quando o codificador testou os modos disponíveis (intra e inter) no processo de codificação e optou por utilizar uma predição intraquadro para um determinado bloco de um quadro, que também pode possuir blocos preditos com a predição interquadros.

No primeiro cenário é mandatória a utilização da predição intraquadro, pois ainda não existem quadros de referências previamente codificados (primeiro quadro) para aplicação da predição interquadros ou o uso de quadros anteriores não é permitido (quadros I ao longo do vídeo codificado). No segundo cenário, dentre todos os modos testados, o codificador determinou que utilizando a predição intraquadro naquela região implica na melhor relação entre qualidade e custo em taxa de bits. Este é um comportamento possível, apesar de não muito frequente. Para visualizar o comportamento do volume de amostras processadas ao longo do vídeo codificado, foi realizado um experimento em que dois segundos do vídeo Cactus no QP 42, com resolução UHD 4K e taxa de amostragem de 60 quadros por segundo foram codificados, onde o

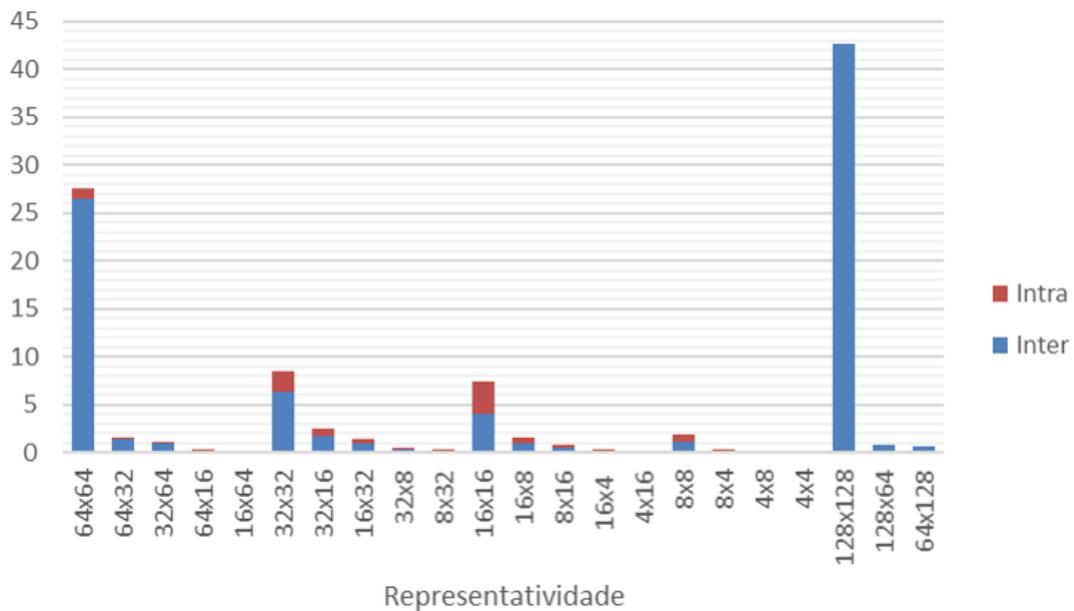


Figura 25 – Percentual de representatividade para os tamanhos de blocos para todo o decodificador (intraquadro+interquadros).

volume total de amostras processadas pela predição intraquadro foi mensurado, quadro a quadro.

O resultado deste experimento pode ser observado na Figura 26. Como pode ser observado, temos exatamente os dois comportamentos descritos anteriormente, onde temos o primeiro cenário no primeiro quadro do vídeo e no quadro 60 (um segundo de vídeo), que é um quadro do tipo I, e nos demais quadros temos o segundo cenário, que é um quadro do tipo P. Além disso, na Figura 26 podemos perceber que existem alguns padrões. Podemos observar picos que ocorrem entre os quadros tipo P, estes padrões caracterizam o primeiro quadro do GOP (*Group Of Pictures*). O GOP são os quadros individuais do vídeo que são agrupamento para compor uma estrutura para a aplicação da codificação, dentro dele podem ser definidos padrões para a codificação realizada, sendo que no AV1 pelo que pode ser percebido nos resultados coletados o GOP é agrupado com oito quadros. Um experimento similar, desta vez usando o QP 22, foi conduzido. O resultado desta simulação pode ser observado na Figura 27 e como podemos perceber o comportamento neste QP ficou bem diferente no observado na Figura 26. É perceptível que na utilização de um QP mais baixo faz com que o codificador opte por utilizar mais amostras processadas nos modos intraquadro.

Dentro da Figura 27 podemos observar que alguns quadros do tipo P nas amostras intraquadro apresentaram um processamento superior em relação a quantidade de amostras processadas pelos quadros do tipo I (ultrapassando a linha vermelha destacada na Figura 27). O esperado seria que as amostras processadas nos quadros do tipo P na decodificação intraquadro não ultrapassem a quantidade de amostras

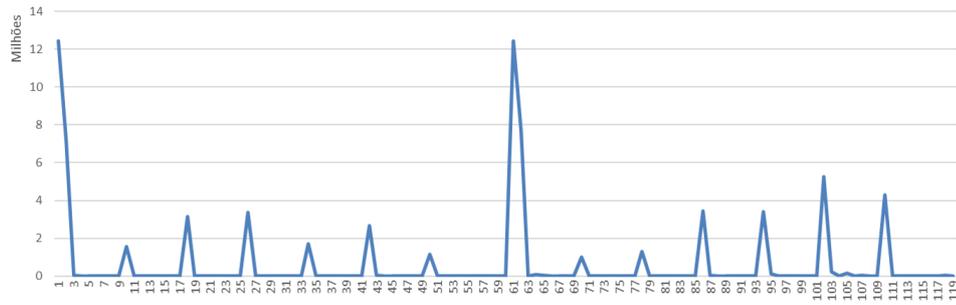


Figura 26 – Contagem das amostras da intraquadro do vídeo Cactus considerando dois segundos para o QP 42.

processadas no quadro do tipo I. Desta forma foi investigado a causa deste comportamento fazendo observações no software de referência do AV1 e buscas na literatura. Esta investigação realizada não permitiu chegar a uma conclusão final, contudo ela indicou que o codificador AV1 pode utilizar quadros escondidos (*hidden frames* - quadros codificados com uma maior qualidade e utilizados exclusivamente como referência para a predição interquadro), todavia não foi possível encontrar algum material que retratasse a utilização de quadros escondidos pelo codificador em seu *draft*, mas foi possível encontrar apenas duas referências (EGGE, 2018)(TERRIBERRY, 2017) que fizeram uma menção sobre a utilização de quadros escondidos no AV1. Vale destacar que o antecessor do AV1, o VP9, faz a utilização de quadros escondidos como pode ser encontrado no seu *draft* (MUKHERJEE et al., 2015).



Figura 27 – Contagem das amostras da intraquadro do vídeo Cactus considerando dois segundos para o QP 22.

Assumindo que este comportamento observado na Figura 27 seja provocado pelos quadros escondidos que são processados sempre no início do GOP podemos inferir que estes picos em alguns quadros do tipo P que ultrapassam a quantidade de amostras processadas pelos quadros tipo P são provenientes do processamento de dois quadros (sendo um o quadro escondido e o outro não que será exibido). Como a coleta foi realizada considerando um intervalo que equiparava ao da exibição dos quadros não foi possível identificar estes quadros de forma individual o que fez que as amostras processadas por estes dois quadros sejam somadas no mesmo intervalo de

exibição.

Vale destacar que este comportamento foi observado nos vídeos codificados somente na configuração *LowDelay*, o que contribui para a teoria do quadro escondido, justamente por que os quadros escondidos são quadros codificados com uma qualidade maior que os demais quadros para serem utilizados como referência para os modos interquadros.

4.3 Visão geral sobre as configurações

AO comparar as duas configurações não é possível perceber muita diferença nos valores absolutos, somente o que é possível inferir dos resultados médios obtidos que na configuração *OnlyIntra* dentro do modo direcional houve uma maior distribuição na representatividade entre os modos, o que não aconteceu no *LowDelay*. Esse comportamento de distribuição é mais percebido para o modo direcional, havendo uma maior distribuição da representatividade entre os ângulos (de forma geral). O outro comportamento perceptível é em relação aos tamanhos de blocos selecionados, onde o *LowDelay* teve uma concentração maior nos blocos quadrados e nos retangulares maiores (ex. 64x32, 8x16, etc.).

Nos experimentos realizados podemos constatar que de acordo com a configuração utilizada na codificação do vídeo podemos ter algumas respostas de processamento diferentes que tem impacto na demanda de desempenho que o hardware precisa fornecer. Desta forma, o hardware a ser desenvolvido deve ser capaz de lidar com todos os comportamentos identificados nas análises.

Assim, a configuração *OnlyIntra* remete a um cenário mais pessimista para a predição intraquadro, implicando que o hardware precisa de um desempenho maior para poder decodificar o vídeo que foi codificado utilizando somente modos intraquadro. Enquanto que na configuração *Lowdelay* temos um cenário de decodificação em que o vídeo é composto por blocos intraquadro e interquadros, desta maneira o hardware para a decodificação intraquadro não é tão exigido, contudo foi demonstrado que em certos quadros podemos ter uma taxa de amostras processadas superior que dos quadros do tipo I, o que ira provocar no hardware momentos de alternância entre processamentos extremos e momentos sem nenhum processamento.

A análise realizada será usada para ajudar a determinar as taxas de processamento alvo requeridos para o hardware que deve ter a capacidade de decodificar todos os cenários que o decodificador pode estar sujeito, e além disso esta análise ajudará indiretamente a tomada de algumas decisões referente ao desenvolvimento do hardware para a decodificação intraquadro, como a escolha do tamanho de bloco básico para a arquitetura.

5 ARQUITETURA PARA O DECODIFICADOR INTRAQUADRO DO PADRÃO AV1

Este Capítulo apresenta uma arquitetura desenvolvida para a decodificação intraquadro do padrão AV1. A predição intraquadro é constituída por 69 modos, contudo esta solução arquitetural para a decodificação intraquadro contempla os 68 modos, sendo não implementado modo IntraBC. Como apresentado na Seção 3.1, o modo IntraBC apresenta características completamente distintas dos demais 68 modos de predição intraquadro. O processo de decodificação do modo IntraBC é idêntico ao necessário para os modos de predição interquadros, a única diferença está na fonte das amostras de referência que, neste caso, pertencem ao mesmo quadro. A decodificação do modo IntraBC pode ser mais facilmente (e mais eficientemente) suportada em hardware pelo módulo da MC. Desta forma, a arquitetura do decodificador intraquadros do padrão AV1 desenvolvida neste trabalho contempla os demais 68 modos intraquadro, sendo: 56 modos angulares + DC + Paeth + três Smooth + CFL + palette + intra filtros.

Com um grande número de modos e seus distintos comportamentos no processamento das amostras, a solução viável para o desenvolvimento desta arquitetura teve como princípio o desenvolvimento dos módulos individuais com o intuito de deixar as interfaces de comunicação (que corresponde pelo caminho de dados das amostras de referência) mais próximas possíveis. Desta forma, a apresentação da arquitetura desenvolvida será seguindo a abordagem *top-down*, ou seja, abordado a solução arquitetural topo, onde temos todos os módulos conectados, o que permitirá compreender a dinâmica de operação da arquitetura e, ao longo das demais seções, será detalhado cada um dos módulos que implementam cada modo de predição. Vale destacar que para todos os módulos que iram ser apresentados a seguir, bem como a arquitetura completa do decodificador intraquadro, a quantidade de amostras entregue pela arquitetura é de 16 amostras, ou seja, todos os módulos foram desenvolvidos para que tenham a capacidade de entregar sempre 16 amostras processadas por ciclo.

A arquitetura do Decodificador IntraQuadro do AV1 (DIAV1), foi projetada para lidar com o menor tamanho de bloco suportado pela predição intraquadro do AV1, que é o

tamanho de 4x4 amostras. Com a unidade básica de processamento neste tamanho é possível extrair o maior desempenho da arquitetura, sem nenhuma subutilização indesejável que poderia ser causada pela escolha de tamanhos básicos maiores como, por exemplo, 8x8 e 16x16. A arquitetura foi projetada precisando de um *buffer* externo ou alguma outra estrutura adjacente a ele para que as amostras processadas sejam armazenadas corretamente (mas não apresentado neste trabalho), isso é necessário para que a arquitetura entregue 16 amostras processadas por ciclo no formato de uma matriz 4x4. A adoção deste tamanho de bloco deve-se ao fato de que usando blocos 4x4 é possível compor os tamanhos maiores, como também por ser o menor tamanho de bloco suportado pela predição intraquadro. Desta forma, para processar blocos maiores que 4x4 é necessário de um *buffer* externo para poder armazenar todas as amostras processadas corretamente.

Devido ao formato de saída das amostras processadas estarem organizada em uma matriz 4x4, a arquitetura apresenta dois formatos de saída ou ordem de entrega da matriz 4x4 das amostras processadas. Na Figura 28 é possível visualizar estes dois formatos de entrega das amostras para um bloco maior que o tamanho da matriz 4x4. A opção de ter dois formatos de entrega das amostras processadas se deve principalmente às otimizações que foram realizadas dentro dos módulos na etapa de desenvolvimento (modelamento), onde os dois modos que restringiram a estes dois formatos foram o modo direcional e o intra filtros. Para os demais modos o formato da geração das amostras processadas independe de qual dos formatos será utilizado, contudo eles foram projetados seguindo o formato do modo direcional.

Como pode ser observado na Figura 28 (a) temos um formato em ziguezague que foi desenvolvido para os modos direcionais. Este tipo de formato permitiu que fossem feitas otimizações nos acessos das amostras de referência armazenadas, desta forma, com um acesso mais comportado permite redução na quantidade de multiplexadores utilizados para realizar o acesso às amostras de referência armazenadas. O segundo formato se assemelha com o comportamento de uma varredura, quando acabou o processamento de todas as amostras no sentido horizontal é passado para a próxima linha abaixo e começando novamente o processamento. Este formato, visto na Figura 28 (b), é imutável para o modo intra filtro, devido a este modo ter características recursivas em que para processar o próximo bloco é preciso ter as amostras processadas do bloco anterior (estas amostras exigidas podem ser tanto do bloco superior e/ou do anterior). Desta forma, existe uma grande dependência entre as amostras e sendo este o único formato que permitia o processamento deste modo.

Na Figura 29 é apresentada a arquitetura DIAV1, onde ela é constituída por sete módulos que correspondem aos modos de predição: smooth, paeth, DC, CFL, Palette, direcional e intra filtro, além do módulo de memória. Como pode ser observado, ainda existem outros módulos que têm como objetivo dar suporte para os demais e realizar

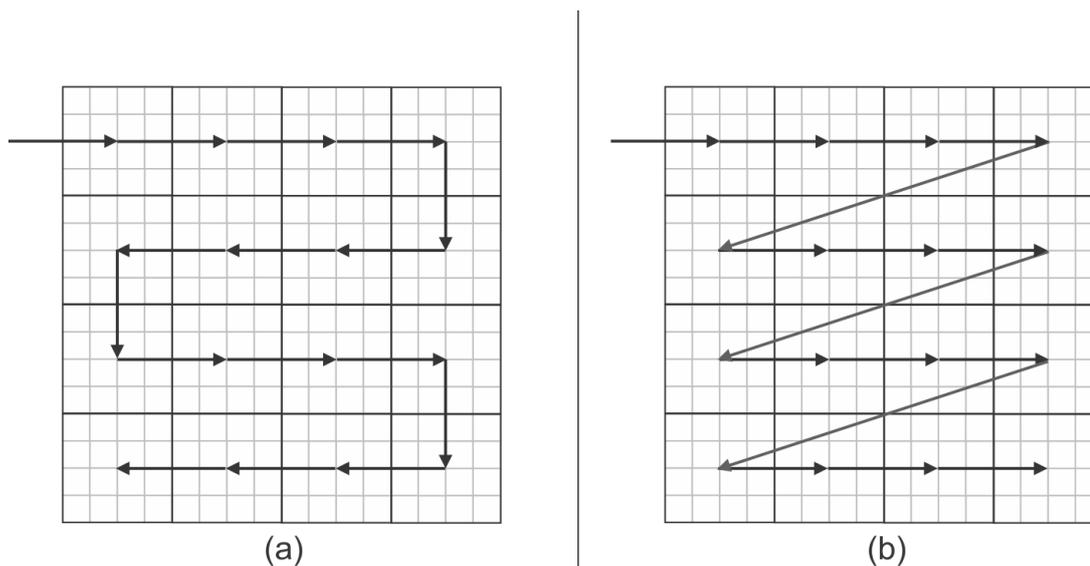


Figura 28 – Formatos de saída das amostras processadas pela DIAV1 para um bloco 16x16 amostras.

alguma função de controle no escopo da arquitetura topo.

No projeto da DIAV1 o carregamento de todas as amostras de referências de uma só vez era inviável para blocos grandes, a solução adotada foi carregar uma parte por vez do vetor de referência para dentro da arquitetura. Esta solução é mais realista em relação a carregar todo o vetor de referência em um único ciclo, dadas as restrições de largura de banda de acesso à memória. Para a tomada desta decisão foi considerado que em algum momento a arquitetura desenvolvida será utilizado em um sistema que precisa de uma comunicação com a memória externa, tanto na leitura das amostras de referências como na escrita das amostras processadas. Deste modo, considerando que as larguras dos canais de comunicação das memórias encontradas no mercado ficam na faixa de 168 bits até 288 bits (as melhores memórias encontradas no mercado) (PREMIER, 2018), a arquitetura deve limitar sua largura de barramento máximo de modo que não ultrapasse estes limites. Por outro lado, se poucas amostras de referência forem carregadas a cada ciclo, o desempenho da arquitetura seria comprometido, inviabilizando o processamento em tempo real de vídeos de ultra alta resolução (objetivo desse trabalho). Diante destas duas restrições o desenvolvimento da arquitetura ficou condicionado a uma largura de banda que respeitasse tais restrições, sendo assim, a largura projetada para a arquitetura foi definida como 18 amostras de referências (máximo), contudo no primeiro ciclo a arquitetura em determinados casos realiza a leitura das 18 amostras de referência, mas a partir do segundo ciclo, as leituras são realizadas para 16 amostras de referência até o carregamento completo das amostras de referências. Conseqüentemente, para o acesso à memória externa, o pior caso consiste de uma largura de 180 bits por ciclo para a leitura (considerando amostras de 10 bits), o que são valores dentro dos aceitáveis, mas se considerarmos

a escrita em paralelo que pode ocorrer em alguns casos, seria necessário entregar 16 amostras por ciclo, o que totaliza mais 160 bits.

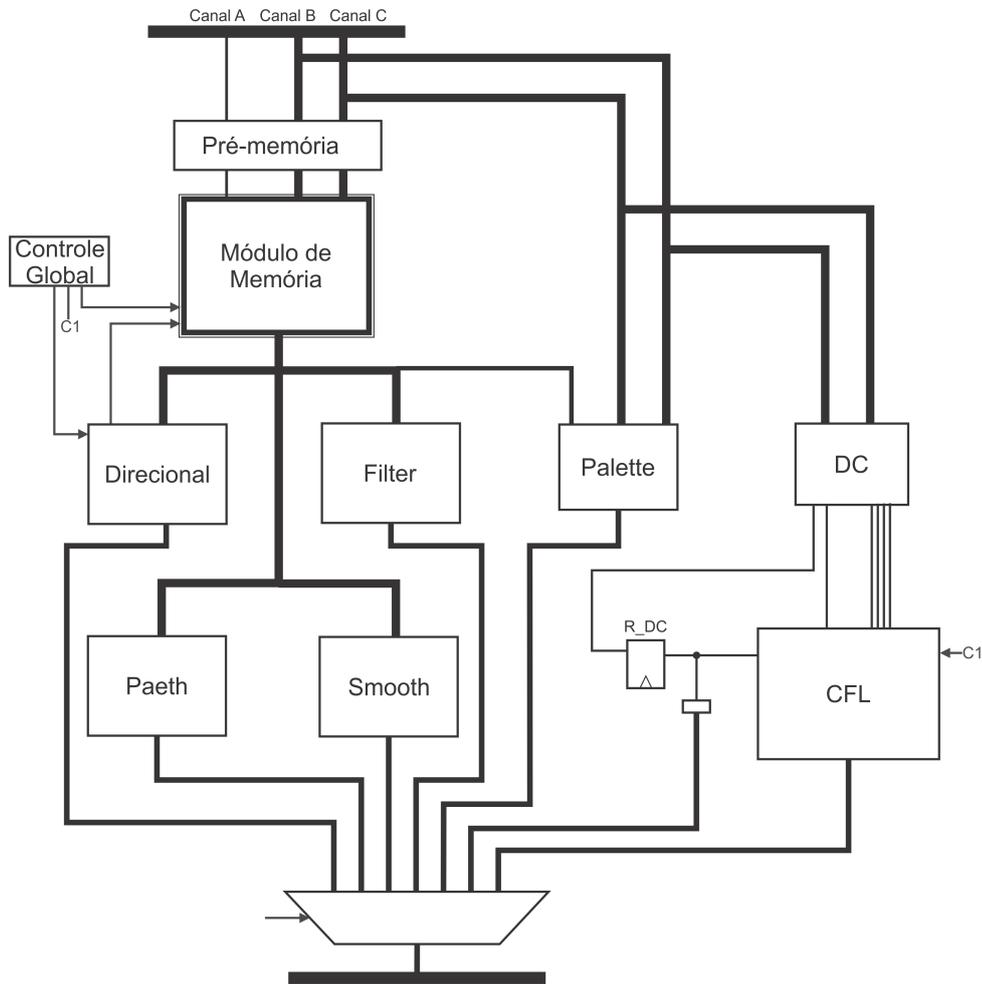


Figura 29 – Arquitetura Decodificador IntraQuadro do AV1.

A arquitetura DIAV1 pode receber no máximo 18 amostras de referência por ciclo, desta forma as amostras estão distribuídas em três canais. O canal A é constituído por um caminho de duas amostras, neste canal a arquitetura pode receber a amostra mais à esquerda e ao topo das amostras de referências ($A[-1][-1]$), que é utilizada nos modos paeth, intra filtro e no direcional, ou receber as duas amostras da extremidade do vetor de referência superior e da esquerda, que são utilizadas no modo smooth. O canal B e C apresentam a mesma quantidade de amostras, exatamente oito amostras, cada um destes canais é responsável por entregar as amostras de referência do vetor de referência superior no canal B e o vetor de referência à esquerda no canal C, mas em certas circunstâncias os dois canais podem formar um só para aumentar a vazão de entrada das amostras de referências para os modos direcionais que correspondem aos ângulos menores que 90° ou maiores que 180° . Assim, esta estrutura permite que, após a carregamento das primeiras amostras, - exceto no módulo CFL, DC e em alguns casos do modo direcional - possa ser dado o início do processamento das

amostras, sem ter praticamente nenhum custo adicional de espera pelas amostras de referência. Vale salientar também que além destes canais existe a necessidade de algumas informações de controle adicionais, como por exemplo qual família de filtro foi utilizada para o modo intra filtro; o ângulo para os modos direcionais; o tipo do modo smooth; e a informação referente ao modo que está sendo processado.

Como pode ser notado na Figura 29 o módulo de memória é encarregado de armazenar as amostras que entram pelos canais, mas somente os módulos paeth, direcional, smooth e intra filtro recebem todas as suas amostras diretamente do módulo de memória. O modo palette recebe apenas da memória a paleta de amostras armazenadas, enquanto que a indicação de qual paleta será utilizada para gerar a amostra P é conectada diretamente aos canais. Os modos DC e CFL não têm nenhum contato com o módulo de memória, justamente por que o modo DC não precisa armazenar as amostras de referência para ser utilizada em acessos futuros e, como o módulo CFL utiliza o módulo DC e apresenta um bloco de memória próprio para ele, não existe a necessidade de ser conectada ao módulo de memória principal.

O Módulo Pré-memória que aparece na arquitetura DIAV1 apresentada na Figura 29 tem o objetivo de inverter o canal B pelo canal C, este processo de trocar os canais tem como finalidade proporcionar algumas otimizações para o projeto da arquitetura, mais especificamente, para o modo direcional. Além desta inversão este módulo tem a finalidade de aplicar o pré-processamento *corner process*. O registrador R_DC por sua vez tem o objetivo de armazenar o valor DC obtido no Módulo DC, este registrador é conectado ao multiplexador que seleciona qual saída dos módulos é válida. Esse registrador também é conectado ao Módulo CFL que em parte utiliza o valor DC em seus cálculos. Todos estes módulos e sincronismos são controlados pelo controle principal e os principais objetivos dele são controlar o acesso ao bloco de memória e selecionar as amostras processadas no multiplexador.

5.1 A arquitetura do Módulo de Memória

O Módulo de Memória (MM) é responsável por armazenar as amostras de referências e fornecer elas para os demais módulos de acordo com a posição da amostra solicitada pelo módulo que a requisitou. Inicialmente este módulo foi projetado para comportar todas operações e as otimizações aplicadas no módulo Direcional e terminou sendo ajustado para comportar todas as operações necessárias dos demais módulos que fazem uso do mesmo.

Na Figura 30 é exibida a arquitetura topo do MM. Essencialmente este módulo é constituído por três estágios: armazenamento, distribuidor e receptor. Para o armazenamento das amostras de referências foi constatado que os piores casos ao acesso das amostras de referências (acesso muito esparsos) tinham origem no módulo arma-

zenador para modos direcionais com ângulos maiores que 180° e menores que 90° . Justamente nesta faixa de ângulos existe a necessidade de apenas um vetor de referência (que de acordo com o ângulo pode ser superior ou a esquerda) que contém no máximo 128 amostras de referência, sendo que para os demais modos não é necessário ter espaço de armazenamento maior que 64 para a superior e para a esquerda das amostras de referência. Deste modo, o armazenamento é constituído de dois blocos onde cada um contém 64 registradores, dependendo do modo que está sendo processado estes dois blocos trabalham de forma independente ou em conjunto tendo no total as 128 amostras armazenadas acessíveis. Além destes dois blocos são necessários mais dois registradores para armazenar a amostra mais superior e a esquerda ($A[-1][-1]$) quando o modo apresenta a necessidade desta amostra ou podem ser utilizados dois registradores para armazenar as amostras mais dos extremos dos vetores de referências para o modo smooth ($A[-1][n-1]$ e $A[n-1][-1]$).

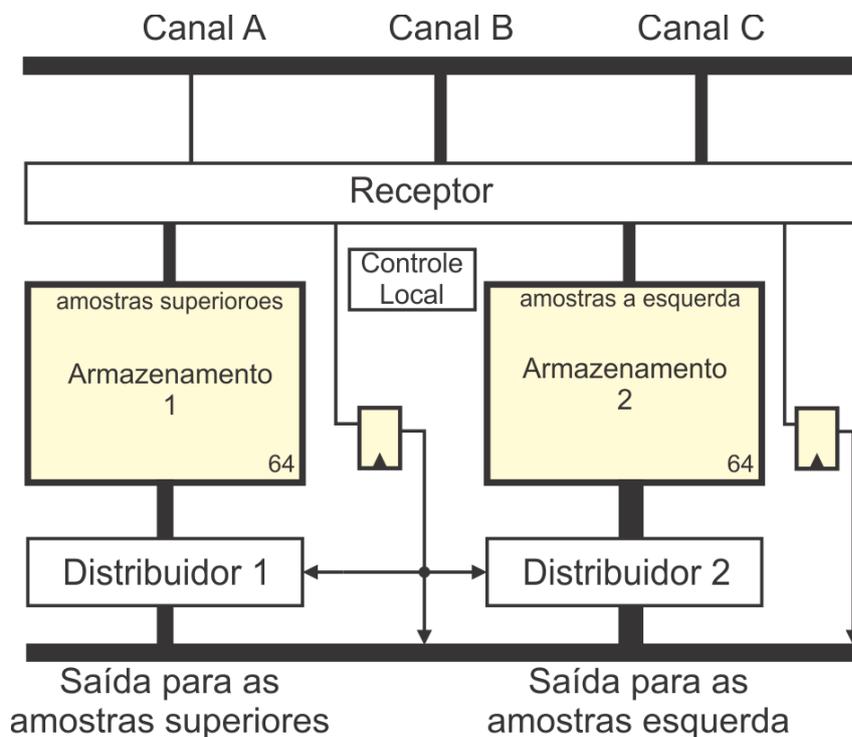


Figura 30 – Módulo de memória (armazenamento, distribuidor e receptor).

O módulo Distribuidor é responsável por selecionar a posição das amostras solicitadas pelos demais módulos, como existem dois blocos de armazenamento, cada um apresenta sua própria política de leitura. Esta diferença da política permite que seja possível no processo de reconstrução do bloco, as amostras de referências possam ser disponibilizadas de acordo com a necessidade. A política tem como origem nas otimizações aplicadas nos modos direcionais, e que também foi influenciada pelo formato de saída das amostras de referências. A política do primeiro módulo armazenador consiste em limitar a faixa de amostras que ele pode atingir, no máximo,

19 posições, mas quando a posição solicitada está próxima de ultrapassar um valor crítico máximo de 13 ele realiza um deslocamento de oito posições no vetor de amostras armazenadas para trazer as amostras para as posições em que ele possa realizar a leitura normalmente. Esse mesmo processo é realizado quando a posição solicitada passar por um valor mínimo crítico de 8, só que fazendo as amostras se deslocarem para o outro lado. O segundo módulo armazenador apresenta uma política de leitura totalmente diferente do explicado anteriormente. Ele não implementa nenhum deslocamento e a leitura é realizada percorrendo todas as posições do vetor de amostras armazenadas, ou seja, este módulo pode atingir qualquer uma das amostras armazenadas sem nenhuma restrição. O comportamento do segundo módulo se deve principalmente ao acesso das amostras de referência muito esparso, o que inviabilizou de realizar alguma otimização no acesso de leitura das amostras no bloco de armazenamento.

Já o módulo receptor tem a finalidade de posicionar as amostras nas suas devidas posições nos blocos armazenadores, sendo realizada em paralelo onde cada um dos canais de entrada estão conectados diretamente aos seus respectivos módulos armazenadores.

Após a primeira remessa de amostras estar armazenada, já é possível começar o processamento das amostras, mas os ciclos em que os módulos irão ficar processando é bem maior do que os ciclos de escrita das amostras de referência.

5.2 Arquitetura do Módulo Direcional

A arquitetura do Módulo Direcional é responsável por processar os 56 ângulos, que são suportados pelo decodificador do AV1. Este módulo é o mais complexo, justamente por ser o que precisa lidar com o maior número de variações (de acordo com o ângulo). Além disso, é preciso coordenar o acesso ao módulo de memória e realizar o pré-processamento das amostras de referência, quando necessário. Na Figura 31 é apresentada a arquitetura do Módulo Direcional, ele é constituído por um bloco de pré-processamento, um pré-organizador, um Kernel, um bloco SPS (*Sample position-shift*) e o bloco de controle. Como pode ser observado na figura, também é apresentado o Módulo de Memória e o Pré-memória, que são utilizados por este módulo e que foram explicados anteriormente na arquitetura topo da DIAV1.

O bloco SPS é responsável por realizar o cálculo do deslocamento para a multiplicação das amostras de referência e determinar quais são as amostras de referência que serão utilizadas para o processamento do bloco 4x4. O Módulo Pré-memória é responsável por aplicar o pré-processamento *Corner Process* na amostra mais superior e a esquerda ($A[-1][-1]$), já o Módulo de Pré-processamento aplica as demais técnicas de pré-processamento (*Edge Strength* e a *Edge Upsample*), desta forma, o

Módulo de Pré-processamento é constituído por mais três blocos: ESL (*Edge Strength Left*), ESR (*Edge Strength Right*) e EU (*Edge Upsample*). O bloco ESL é responsável por aplicar o processamento *Edge Strength* nas amostras a esquerda, enquanto que o bloco ESR é responsável por aplicar nas amostras superiores. Como podemos perceber o bloco EU é responsável por realizar o processamento da técnica *Edge Upsample*. Ambos os blocos que compõem o Módulo de Pré-processamento implementam os filtros explicados no Capítulo 3, contudo a implementação dos mesmos se deve pela utilização de multiplicadores, além disso cada um destes blocos permite que as amostras em suas entradas passem por este módulo sem realizar o processamento de alguma das técnicas de pré-processamento, para os casos em que não é realizado o pré-processamento.

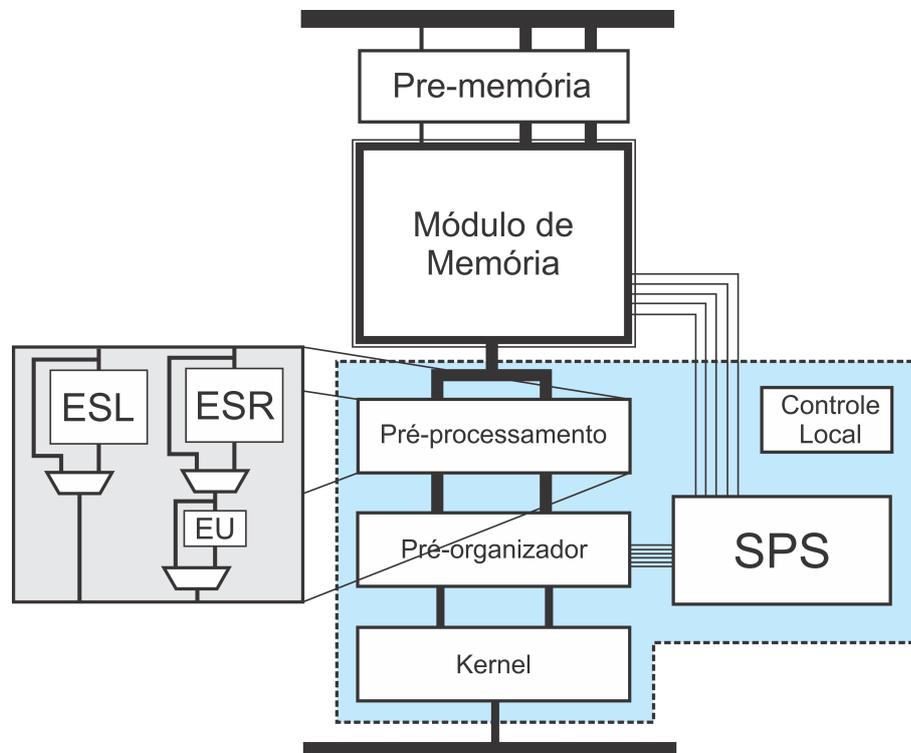


Figura 31 – Arquitetura do Módulo Direcional.

Como existe sempre a possibilidade de realizar o pré-processamento nas amostras de referência, se faz necessário que amostras adicionais para a aplicação do pré-processamento sejam transmitidas para o módulo de pré-processamento. Desta forma, antes do módulo de pré-processamento sempre irá existir mais amostras de referência para o caso de aplicar as técnicas de pré-processamento. Devido a estas amostras adicionais, o Módulo Pré-organizador tem o objetivo em remover as amostras adicionais (não necessárias para as etapas posteriores) e, em paralelo, reposicionar elas de acordo com a posição correspondente do deslocamento de cada amostra. Por fim, o bloco kernel é onde se realiza a multiplicação das amostras de referências com os seus respectivos pesos, vale destacar que esta multiplicação é realizada utili-

zando operações de multiplicação. Além destes blocos é possível perceber que existe um bloco de controle, este bloco é necessário para gerar os sinais para os demais blocos e determinar se será necessário aplicar o pré-processamento e consecutivamente qual pré-processamento.

5.3 Arquitetura do Módulo Smooth

A Figura 32 apresenta a arquitetura do Módulo Smooth, que implementa o modo de predição smooth na interpolação vertical e na horizontal. A arquitetura do Módulo Smooth é basicamente constituída por duas etapas de interpolação, no sentido vertical e horizontal, e uma etapa em que é realizada a média das amostras interpoladas no sentido vertical e horizontal. O bloco H é responsável por realizar a interpolação no sentido horizontal e o bloco V é responsável por aplicar a interpolação no sentido vertical. Desta forma, se o modo seleccionado para o processamento for tanto no sentido vertical e horizontal é realizado uma média do processamento realizado pelos blocos H e V. Esta média está representada pelo bloco H/V, no final existe um multiplexador para seleccionar de acordo como modo que está sendo processado.

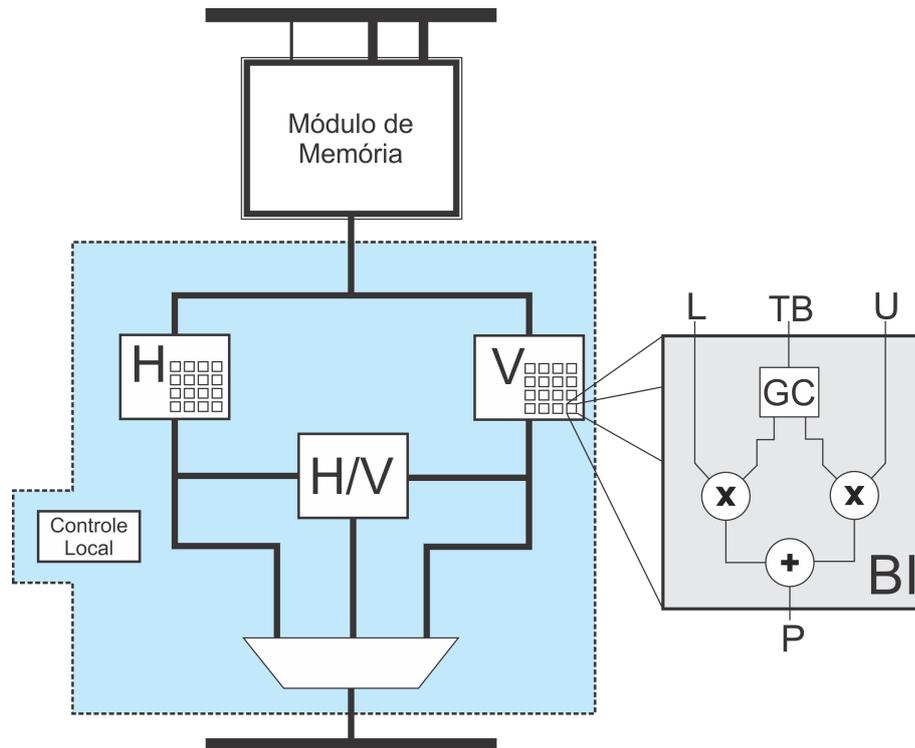


Figura 32 – Arquitetura do Módulo Smooth.

Os blocos H e V apresentam a mesma configuração interna, sendo a única diferença entre eles as amostras que os alimentam. Desta forma, os blocos H e V são constituídos internamente por 16 Blocos Interpoladores (BI). Um BI tem a função de realizar a multiplicação das amostras L e U por uma constante, que é gerada pelo

Gerador de Constantes (GC), sendo por fim, realizada a soma resultante da multiplicação. O bloco GC tem como parâmetro de entrada o tamanho de bloco (TB) em que está sendo realizada a predição e a posição do bloco 4x4 que está sendo gerada as amostras preditas (P), omitido da Figura 32.

Vale ressaltar que após todas as etapas de processamento que envolvem a multiplicação, soma e cálculo da média, existe mais uma etapa (omitida da Figura 32) responsável por fazer o arredondamento das amostras P, contudo este arredondamento segue as especificações apresentadas para este modo no capítulo 3.

5.4 Arquitetura do Módulo Intra Filtros

O modo intra filtro é constituído por cinco famílias de filtros: DC, V, H, D135 e Paeth. Na Figura 33 são apresentados os módulos que compõem o Módulo Intra Filtro, como pode ser notado na figura, ele é composto por dois blocos FILTER, e mais alguns registradores e multiplexadores. Como este modo apresenta características recursivas (necessidade de realimentação por utilizar amostras processadas na iteração anterior) era preciso fornecer a arquitetura a capacidade de armazenar internamente as amostras que seriam utilizadas na próxima iteração, desta forma, temos cinco registradores: R_UL responsável por armazenar a amostra mais à esquerda e superior ($A[-1][-1]$), dois registradores no R_L0 para armazenar as duas primeiras amostras da esquerda (responsável para alimentar o FILTER1) e mais dois registradores no R_L1 para armazenar as duas últimas amostras da esquerda (responsável para alimentar o FILTER2). Assim o Módulo Intra Filtro tem a capacidade de armazenar as amostras de referência à esquerda (denominadas pela letra L) e a amostras mais à esquerda e superior (denominada pelas letras UL), havendo apenas a necessidade da alimentação pelo MM das amostras superiores (denominadas pela letra U), após o carregamento de todas as amostras.

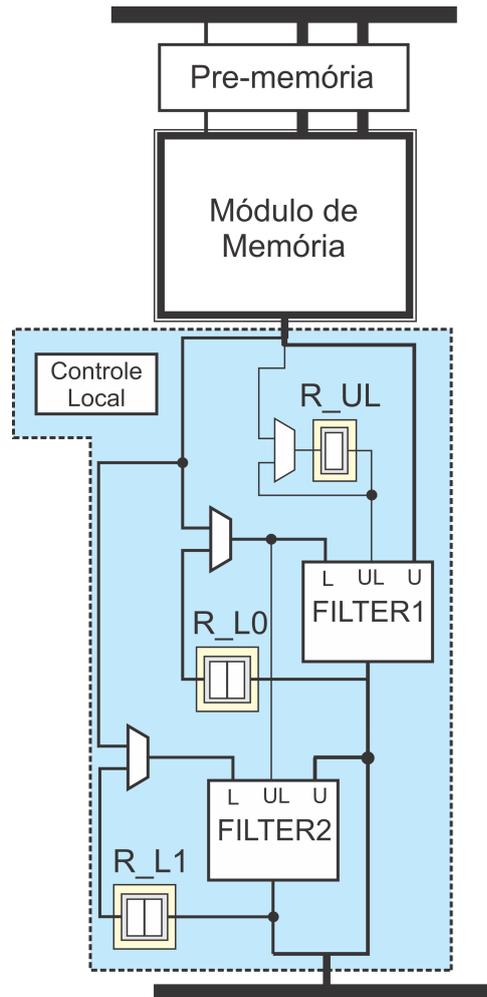


Figura 33 – Arquitetura do Módulo intra filtros.

Cada um dos blocos FILTER tem a mesma configuração interna e é responsável por realizar o processamento de uma área que corresponde a 4x2 amostras, desta forma são necessários dois módulos FILTER para compor a área de processamento 4x4 amostras da arquitetura DIAV1. Como pode ser observado na Figura 33, parte das amostras de saída do primeiro bloco FILTER deve servir de entrada para o segundo módulo FILTER. A saída do Módulo Intra filtros é constituída pela saída dos dois blocos FILTER. Como foi mencionado anteriormente, o modo intra filtros tem característica de realimentação ou recursivas, desta forma, a próxima iteração no processo da aplicação dos filtros necessita de amostras da iteração anterior e, por isso, existe o outro formato de saída das amostras processadas conforme apresentado na Figura 28 (b).

Na Figura 34 (a) podemos ver a topologia simplificada para o bloco FILTER, sendo composto por sete Blocos Multiplicadores (BM) e oito blocos Seletor/Somador (SS). Nesta configuração os BM são responsáveis por gerar todas as constantes utilizadas no processo de multiplicação e que por sua vez todas as saídas dos BMs são conectadas aos blocos SS. Cada um dos BM foi projetado para poder realizar todas as multiplicações necessárias de acordo com as amostras de entrada em que ele está

vinculado, assim cada um dos BM tem uma arquitetura interna diferente. Na Figura 34 (b) é demonstrado a arquitetura interna para o BM4, como podemos perceber a arquitetura foi projetada para utilizar somadores e deslocadores em vez de multiplicadores. Podemos perceber que o BM4 gera o resultado da multiplicação (soma e deslocamento) para sete saídas (S), considerando a amostra de referência de entrada (UL). Neste caso o resultado na saída equivalem a multiplicação por: $16 \cdot UL$, $14 \cdot UL$, $12 \cdot UL$, $10 \cdot UL$, $8 \cdot UL$, $6 \cdot UL$ e $4 \cdot UL$. Já o bloco SS, que é apresentado na Figura 34 (c), tem a sua disposição todas as saídas dos BM e podendo de acordo com a posição da amostra predita por ele selecionar as multiplicações resultantes e realizar uma última etapa de soma.

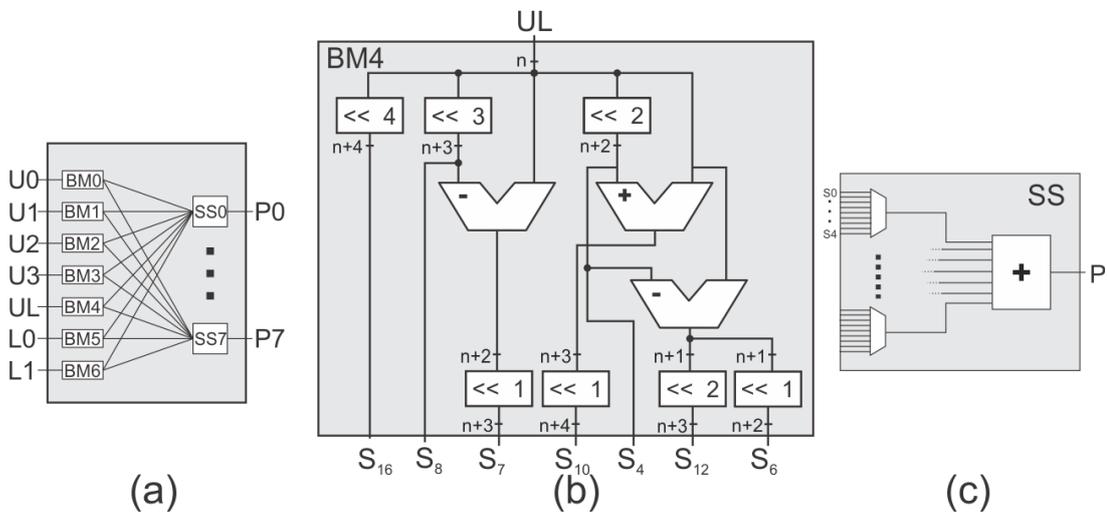


Figura 34 – Blocos internos do Módulo intra filtros: Bloco FILTER (a), Bloco Multiplicador (b) e Bloco Seletor/Somador (c).

5.5 Arquitetura do Módulo Paeth

O modo Paeth consiste em realizar uma comparação entre um conjunto de três amostras. Desta maneira, a arquitetura do Módulo Paeth é constituída de seletores e comparadores que seguem o critério e a implementação das fórmulas do modo, que já foram previamente explicados no capítulo 3. Na Figura 35 pode ser visto a arquitetura topo deste módulo, sendo ele relativamente simples, pois contém 16 Blocos Bases (BBs) e os BB apresentam internamente a mesma arquitetura. O BB é constituído por um somador, três subtratores, um comparador e um seletor.

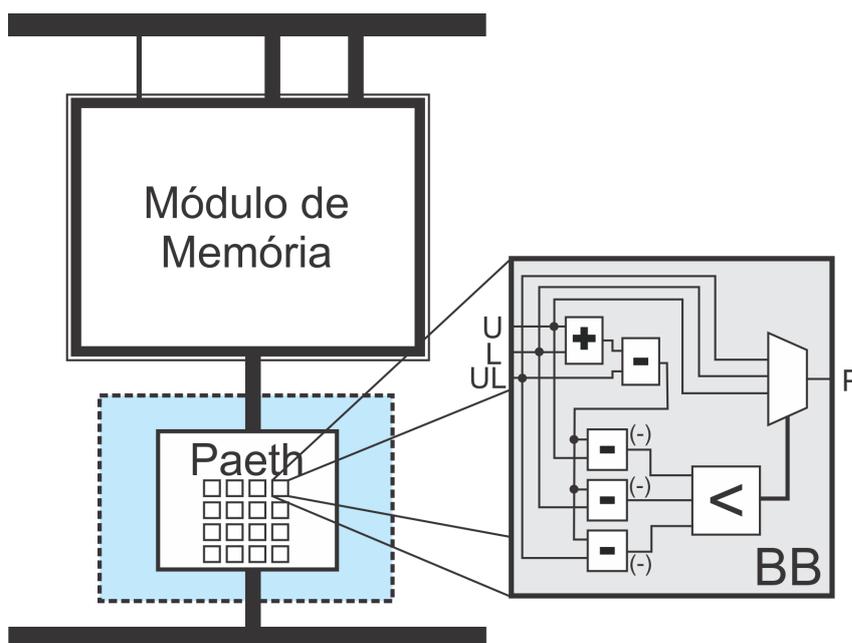


Figura 35 – Arquitetura do Módulo Paeth.

5.6 Arquitetura do Módulo DC

O Módulo DC é responsável por realizar a média das amostras de referências e utilizar essa média para gerar a predição do bloco todo, mas na prática, existem alguns comportamentos que devem ser observados. Estes comportamentos se remetem a como é realizada a leitura das amostras de referência superiores e à esquerda. Em alguns casos o codificador pode ter à disposição somente um dos vetores de amostras de referência (pode ser o vetor de referência das amostras superiores ou o da esquerda), nestes casos, o codificador irá realizar a média considerando somente este conjunto de amostras.

Desta forma, este módulo é projetado considerando a utilização dos canais B e C da entrada da DIAV1, que podem entregar 16 amostras por ciclo, sendo o canal B para as amostras de referências pertencentes ao vetor à esquerda e o canal C para o vetor superior. Além disso, este módulo foi projetado para comportar a primeira etapa de processamento do modo CFL (aplicação da subamostragem e geração do coeficiente DC das amostras reconstruídas). Na Figura 36 é apresentada a arquitetura do Módulo DC, como pode ser notado, ela é apresentada em mais baixo nível de abstração, justamente para permitir uma melhor compreensão.

Como pode ser observado na figura, existem quatro blocos de Árvore de Somadores (AS), onde cada um tem como entrada quatro amostras de referência e a saída será a soma correspondente das entradas. Na Figura 37 é apresentada a arquitetura interna do bloco AS. No cálculo do DC, as saídas dos blocos AS serão somadas com o valor já previamente armazenado no registrador L (caso exista algum valor já

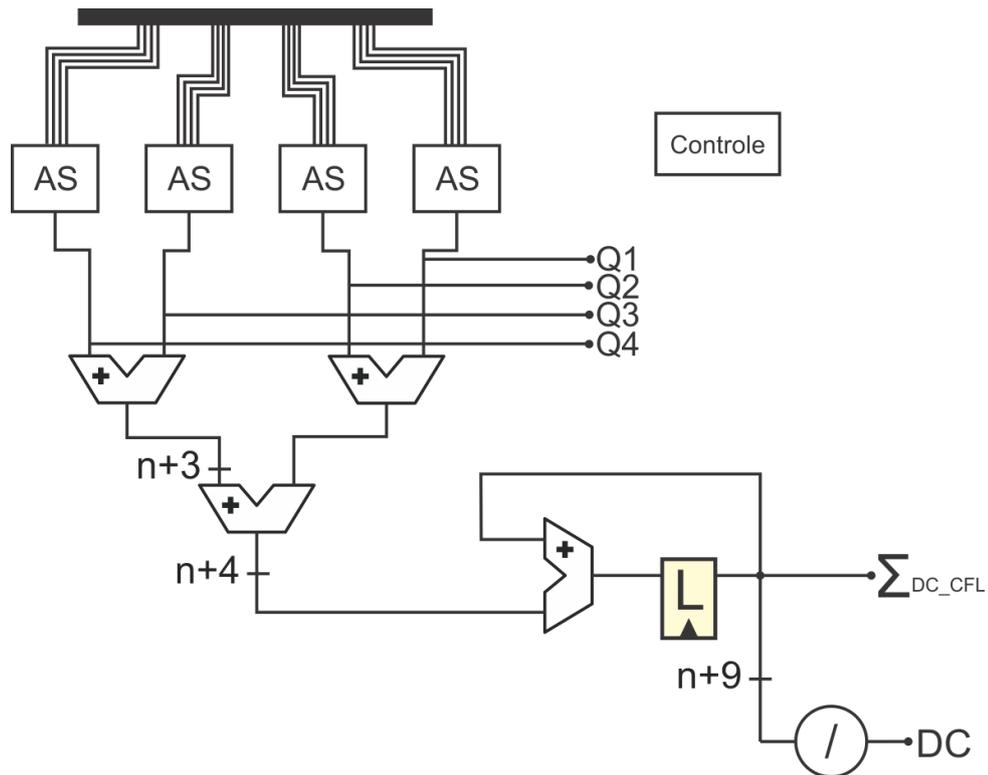


Figura 36 – Arquitetura do Módulo DC.

armazenado) e, para a obtenção do DC, no final da soma de todo o vetor de referências é realizada uma divisão pela quantidade de amostras de referências utilizadas no cálculo do DC. A outra funcionalidade do módulo DC é servir de suporte para o módulo CFL, onde temos o somatório DC_CFL que seria a soma de todas as amostras de referência, sem realizar a divisão final no caso do DC normal. O DC_CFL no módulo CFL representa o valor que será subtraído das amostras que sofreram subamostragem. Em conjunto com o processamento do DC_CFL, são extraídas as amostras subamostradas de 4/1 (*subsample*) de cada um dos blocos AS que estão representadas pela letra Qx. Neste caso, a cada processamento realizado por ciclo é feita a subamostragem das 16 amostras da entrada gerando 4 amostras (Q1, Q2, Q3 e Q4) que serão encaminhadas para o Módulo CFL. O comportamento do Módulo DC, utilizado como suporte para o CFL, será melhor detalhado na descrição do Módulo CFL. O modo DC, apesar de parecer simples, apresenta alguns inconvenientes em sua implementação, principalmente na divisão no DC normal, devido ao codificador AV1 ter suporte a 19 tamanhos de blocos. Alguns destes tamanhos, principalmente os não quadráticos, não resultam em uma divisão por um número que seja potência de base 2 (4, 8, 16, 32, etc), como pode ser visto em outros padrões de codificador. Por exemplo, considerando um tamanho de bloco 8x4 sendo processado pelo modo DC, após todas as amostras de referência terem sido somadas, elas precisam ser divididas pelo valor 12. Este valor não permite que a divisão seja realizada por um simples

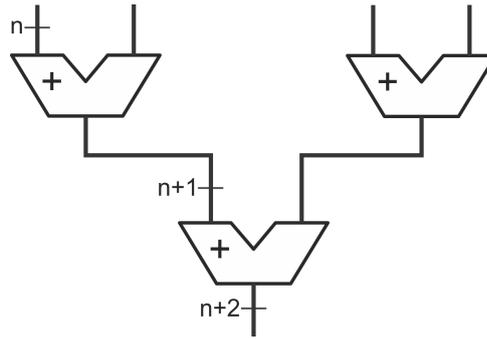


Figura 37 – Arquitetura do bloco AS (Árvore de Somadores).

deslocamento de bits à direita. Se fosse processado um bloco com o tamanho 8x8, a divisão teria como base o número 16, permitindo a aplicação de uma divisão por um simples deslocamento.

5.7 Arquitetura do Módulo CFL

O Módulo CFL foi projetado para aproveitar algumas estruturas que estão presentes no Módulo DC. Dentro destas funcionalidades o Módulo DC é responsável por gerar a subamostragem e a somatório das amostras reconstruídas de luma. No geral, o modo CFL é um pouco diferente dos demais modos, justamente por ser um modo exclusivo para as amostras de croma e que a primeira etapa consiste em realizar uma subamostragem das amostras de luma reconstruídas, o que torna este modo muito dependente do laço de reconstrução durante a codificação. No entanto, para a decodificação podemos inferir que a informação do bloco reconstruído de luma já deve estar disponível para a subamostragem.

Na Figura 38 é apresentada a arquitetura do Módulo CFL como pode ser notado, a figura apresenta também o Módulo DC. O Módulo CFL opera em dois estágios, o primeiro estágio será responsável por gerar as amostras subamostradas e armazenar elas em um bloco de Memória do CFL (MCFL) e também armazenar o valor da somatória obtido nas amostras de luma reconstruídas no registrador R_DC_CFL. O bloco MCFL é constituído por registradores dispostos em uma matriz com a dimensão de 32x32. Para o armazenamento no bloco de memória é definida uma largura de bits com três unidades a mais que a das amostras de referências, por exemplo, se as amostras de referências de luma têm 10 bits, a largura de bits necessária para armazenar as amostras subamostradas deve ser de 13 bits (AV1, 2019).

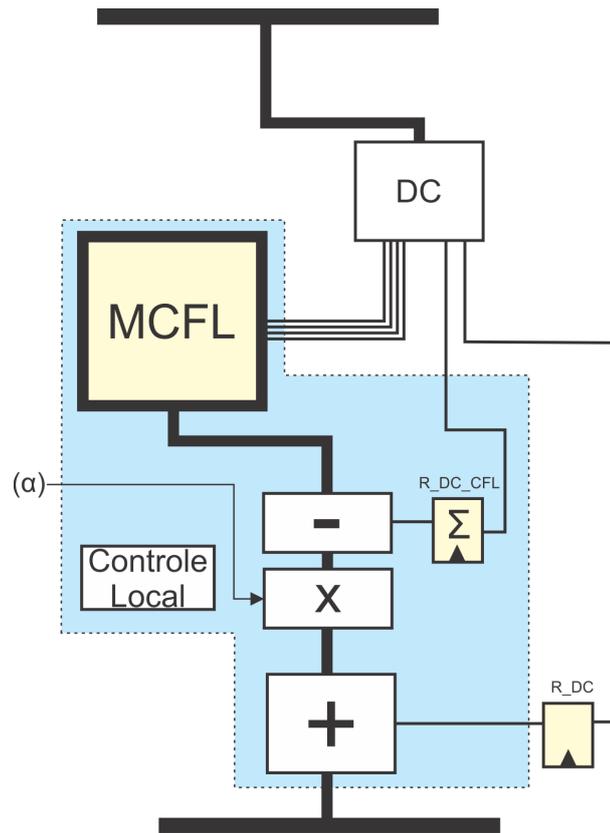


Figura 38 – Arquitetura do Módulo CFL.

O segundo estágio, por sua vez, é constituído por duas etapas que correspondem exatamente ao processamento do DC para o primeiro (C_b) e para o segundo (C_r) bloco de croma. Desta forma, ao término do primeiro estágio se dá o início do processamento do DC do primeiro bloco de croma. Ao término do módulo DC o valor DC é armazenado no registrador DC, desta forma, é dado o início da leitura das amostras armazenadas no MCFL realizando a subtração com o valor armazenado no registrador R_DC_CFL e feito o ajuste de escala para o canal correto de croma através da multiplicação pela entrada *SSF* (*signed scaling factor*) e por final é realizada a soma do DC armazenado no registrador DC. Quando terminar o processamento do primeiro bloco de croma, é prosseguido para o processamento do segundo bloco de croma, que é realizado da mesma forma descrita anteriormente.

5.8 Arquitetura do Módulo Palette

O Módulo Palette é o módulo mais simples, como pode ser observado na Figura 29, ele começa carregando as paletas de cores no Módulo de Memória e posteriormente conforme ele vai recebendo a posição da paleta que compõem cada uma das amostras de saída pelos canais B e C, ele vai buscando do Módulo de Memória a respectiva amostra para compor o bloco reconstruído.

5.9 Diagrama de ciclos e temporização

Os módulos desenvolvidos foram projetados individualmente, seguindo as restrições de acesso a memória e a disponibilidade das amostras de referência para o início do processamento dos blocos. Desta forma, podemos destacar dois estágios diferentes para a arquitetura, estes dois estágios são responsáveis por latências diferentes entre os módulos e para os tamanhos de bloco. O primeiro estágio corresponde ao carregamento das amostras de referências e o segundo estágio é responsável pela geração das amostras processadas na saída da arquitetura.

Com a utilização de uma comunicação que permite o acesso de até 18 amostras de referência por ciclo (no ciclo inicial), o primeiro estágio fica condicionado a alguns ciclos para realizar a leitura completa das amostras de referência, ou seja, no caso de um bloco 64x64, são necessários oito ciclos para realizar a leitura completa de todas as amostras de referência. Mas, em alguns casos, como será visto no decorrer deste subcapítulo, esta latência inicial no primeiro estágio pode ser minimizada.

O segundo estágio é encarregado de processar as amostras e entregá-las na saída da arquitetura, justamente por ser responsável por gerar todas as amostras na saída da arquitetura, este estágio apresenta uma latência maior que o primeiro estágio, pelo fato de que o bloco básico de processamento está condicionado a um tamanho de bloco de 4x4 amostras. Com a arquitetura projetada para o processamento de um bloco básico de 4x4, 256 ciclos são necessários para realizar o processamento completo de um bloco de 64x64 amostras.

Na Figura 39 é apresentado um exemplo demonstrando os ciclos para o processamento de um bloco 16x16 amostras. Vale destacar que todos os modos apresentam o primeiro estágio e o segundo estágio, mas existem diferenças nos ciclos em que cada estágio necessita. Como podemos perceber na Figura 39, o Módulo DC precisa de dois ciclos para a carga das amostras de referência no primeiro estágio. Este módulo no primeiro estágio realiza a carga das amostras de referência e, em paralelo, o cálculo do DC. Ao término dos dois ciclos o módulo DC terá o valor do DC das amostras de referências do bloco 16x16 já calculado, finalizando assim o primeiro estágio. O segundo estágio fica responsável por gerar as amostras na saída da arquitetura e, neste caso, são necessários 16 ciclos para terminar o processo de geração das amostras reconstruídas para o modo DC.

No Módulo CFL, no primeiro estágio é realizado o processo de subamostragem do bloco 32x32 de luma reconstruído para realizar o cálculo tanto para o bloco de croma Cb e Cr. Neste estado são necessários 64 ciclos para realizar todo o processo de subamostragem. Depois disso, é iniciado o processamento do valor DC das amostras de referências do primeiro bloco de croma (o bloco Cb), onde são necessários mais dois ciclos para obter o valor DC. Desde o início do processamento do Módulo CFL,

decorreram 66 ciclos finalizando o primeiro estágio de carga para o modo CFL para o primeiro bloco de croma. Com o término do primeiro estágio será iniciado o segundo estágio (processamento das amostras) que será finalizado nos próximos 16 ciclos. Com o término do segundo estágio do primeiro bloco o Módulo CFL iniciará novamente o primeiro estágio para o processamento do segundo bloco de croma (o bloco Cr), onde são necessários mais dois ciclos e novamente a execução do segundo estágio do segundo bloco de croma. Como podemos perceber na descrição da temporização, o Módulo CFL precisou de 100 ciclos para o processamento dos dois blocos de croma. Em média, é possível inferir que são necessários 50 ciclos para o processamento de um bloco de croma.

Os demais módulos presentes na DIAV1 (direcional, smooth, intra filtros, e paeth) apresentam o mesmo comportamento de processamento em relação as latências. Devido a esta característica eles foram agrupados em um único gráfico na Figura 39. Apenas para o Módulo Palette existem algumas diferenças em relação ao primeiro estágio. Como já foi mencionado anteriormente estes módulos fazem uso do bloco MM para poder armazenar as amostras de referências que irão ser utilizadas em algum momento futuro para o processamento do bloco, em contrapartida, os modos DC e CFL não utilizam o bloco MM, porque no caso do DC não existe a necessidade de armazenar tais amostras, após elas terem sido usadas, e no caso do módulo CFL, ele já tem seu próprio bloco de memória MCFL.

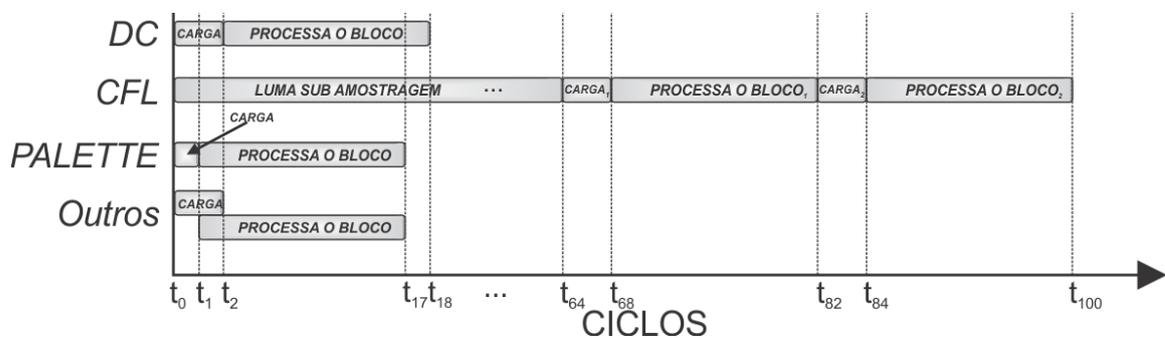


Figura 39 – Temporização para os módulos desenvolvidos considerando o processamento de um bloco 16x16.

O Módulo Palette precisa de apenas um ciclo no primeiro estágio para carregar as paletas e, posteriormente, é iniciado o segundo estágio de processamento onde são necessários 16 ciclos de processamento. Os demais módulos precisam de dois ciclos para poder carregar as amostras de referências, mas eles foram projetados para que com um conjunto mínimo de amostras de referências carregadas possam dar o início do processamento do segundo estágio sem mesmo ter carregados todas as amostras de referências. Este comportamento pode ser constatado observando a figura onde temos os dois ciclos de carga e no meio do estágio de carga é iniciado o processamento do bloco.

Neste exemplo, demonstramos a temporização para todos os módulos, considerando um bloco de 16x16 amostras, contudo, podemos inferir que estes tempos podem mudar de acordo com o tamanho de bloco processado. No entanto, o comportamento que foi explicado anteriormente não muda, sempre havendo o primeiro estágio e o segundo estágio, mas com temporizações diferentes de acordo com o módulo e o tamanho do bloco. Na Tabela 9 é demonstrada a temporização para o processamento das amostras de luminância considerando um bloco 64x64 e para as amostras de crominância considerando um bloco 32x32 amostras. Nesta tabela temos nas linhas todos os tamanhos de blocos suportados pela predição intraquadro e, nas colunas, temos os canais de luma e croma e os modos. Os números apresentados representam os valores normalizados para o respectivo tamanho máximo de bloco suportado por aquele canal. Por exemplo, no canal de luma, o máximo tamanho suportado é 64x64 amostras, então, todos os outros blocos foram normalizados para este tamanho de bloco. Como exemplo, considerando o tamanho de bloco 32x32, para a normalização com o tamanho de bloco 64x64, é necessário decodificar quatro blocos 32x32 para poder gerar a mesma quantidade de amostras decodificadas por um bloco 64x64. Assim, no processamento do modo DC para um bloco 64x64, são necessários 264 ciclos, enquanto que para um bloco normalizado de 32x32 são necessários 272 ciclos.

Tabela 9 – Número de ciclos para o processamento de 64x64 amostras de luminância e 32x32 amostras de crominância, considerando diferentes tamanhos de bloco.

Bloco	Bloco Luma normalizado para 64x64				Bloco Croma normalizado para 32x32		
	DC	Dir. <90 e >180 graus	Dir. Demais	outros	DC	*CFL	outros
64x64	264	258	257	257	-	-	-
64x32	272	260	258	258	-	-	-
32x64	272	260	258	258	-	-	-
64x16	288	264	260	260	-	-	-
16x64	288	264	260	260	-	-	-
32x32	272	260	260	260	68	392	65
32x16	288	264	264	264	72	400	66
16x32	288	264	264	264	72	400	66
32x8	320	272	272	272	80	416	68
8x32	320	272	272	272	80	416	68
16x16	288	272	272	272	72	400	68
16x8	320	288	288	288	80	424	72
8x16	320	288	288	288	80	424	72
16x4	384	320	320	320	96	464	80
4x16	384	320	320	320	96	464	80
8x8	320	320	320	320	80	432	80
8x4	384	384	384	384	96	480	96
4x8	384	384	384	384	96	480	96
4x4	512	512	512	512	128	576	128

*Considera o processamento de dois blocos de croma (Cb e o Cr).

Como podemos perceber na tabela, quanto menor for o tamanho de bloco normalizado, mais ciclos são necessários para realizar a decodificação de um bloco 64x64 para luma ou um bloco 32x32 para croma. Nas amostras de luma, todos os modos precisam de 512 ciclos para processar um bloco 4x4 normalizado em 64x64. Vale destacar que na tabela para as amostras de luma existe uma coluna específica para o modo direcional (Dir. $<90^\circ$ e $>180^\circ$; Dir. demais), esta distinção entre o modo direcional representam comportamento diferente em alguns casos dentro do Módulo Direcional. O Dir. $<90^\circ$ e $>180^\circ$ correspondem aos ângulos maiores que 180° ou menores que 90° e com tamanho de bloco igual com dimensão de 64 amostras. Já os Dir. demais correspondem aos demais modos e tamanhos de bloco não pertencentes ao conjunto Dir. $<90^\circ$ e $>180^\circ$. Como podemos perceber, nestes dois casos, nos tamanhos de blocos com a dimensão 64 existe diferença de ciclos necessários para o processamento do tamanho de bloco, esta diferença existe pela necessidade de adicionar mais um ciclo de carga para os Dir. $<90^\circ$ e $>180^\circ$ dentro do primeiro estágio, ou seja, nestes tamanhos de bloco são necessários dois ciclos de espera dentro do primeiro estágio para carregar as amostras de referência, para depois iniciar o processamento do bloco no segundo estágio. Este comportamento destacado anteriormente não acontece nos demais ângulos direcionais.

Nas amostras de luma percebemos que de acordo com a Tabela 9, o pior módulo para processar é o Módulo DC para tamanhos de bloco grandes, mas conforme o tamanho de bloco vai se reduzindo é possível perceber que a diferença nos ciclos vai reduzindo, sendo que para os tamanhos de blocos 8 e 4 não existe como dizer qual seria o pior módulo. Podemos destacar também que em relação aos tamanhos de blocos o pior cenário para o processamento são os tamanhos de bloco 4x4.

Nas amostras de croma os blocos foram normalizados para o tamanho de bloco 32x32, neste canal podemos perceber que o módulo CFL foi o módulo que mais precisa de ciclos para processar o mesmo tamanho de bloco em relação aos demais módulos, mas vale ressaltar que os resultados de ciclos apresentados para o módulo CFL estão considerando o processamento de dois blocos de croma (um para Cb e outro para Cr), sendo assim, o valor médio para o processamento de um único bloco é a metade, ou seja, no caso do bloco 4x4 normalizado na tabela são necessários 576 ciclos, mas como são dois blocos processados o valor para um bloco 4x4 normalizado seria 288 ciclos.

Dentre todos os módulos desenvolvidos, o módulo CFL precisa mais ciclos para realizar todo o processamento de suas amostras, este comportamento pode ser constatado tanto para as amostras de croma, como também para as amostras de luma (normalizando as amostras de luma para um bloco 32x32 seriam necessários 128 ciclos no pior caso).

6 VALIDAÇÃO E RESULTADOS DE SÍNTESE

A arquitetura desenvolvida para o decodificador intraquadro do padrão AV1 (DIAV1) é capaz de processar 68 modos de predição para 19 tamanhos diferentes de blocos. Antes da implementação em linguagem de descrição de hardware, cada módulo que compõe a DIAV1 foi modelado, utilizando a linguagem MATLAB.

As próximas seções apresentam a metodologia utilizada para a modelagem e validação da DIAV1, bem como a definição de frequência de operação necessária para garantir o desempenho para a decodificação de vídeo UHD 4K em tempo real e, por fim, os resultados de síntese, obtidos a partir da síntese em ASIC são apresentados.

6.1 Metodologia de modelagem e validação

O primeiro passo na implementação da arquitetura DIAV1 desenvolvida foi a modelagem de cada módulo de predição presente na arquitetura. Esta modelagem foi importante para ajudar na compreensão das peculiaridades envolvidas em cada modo de predição, além de auxiliar nas otimizações empregadas em cada módulo e facilitar o processo de validação

Para a modelagem dos modos de predição se optou em utilizar a ferramenta MATLAB (MATLAB, 2019) e a validação das arquiteturas utilizando co-simulação. O modelagem inicial consistia em implementar exatamente o comportamento dos modos de predição em MATLAB, senso que posteriormente seria iniciado as análises comportamentais, que permitiam inferir alguma otimização para a arquitetura. Tendo identificado algum comportamento que poderia beneficiar o hardware final, dava-se início a modificações cabíveis no modelo para que ele fosse compatível com esse comportamento esperado.

Esta estratégia de modelagem dos modos teve o objetivo de facilitar e acelerar o desenvolvimento dos módulos em hardware, além de facilitar a automatização da validação da arquitetura. O modelamento trouxe um maior benefício no desenvolvimento do Módulo Direcional que foi aquele que necessitou de maior tempo de desenvolvimento. O modelamento do Módulo Direcional permitiu a identificação do comporta-

mento de acesso do Módulo de Memória e a separação das amostras de referência superiores e à esquerda e da política de leitura empregada em cada um dos módulos armazenadores dentro do módulo de memória (explicado anteriormente). Mais uma otimização realizada consiste em realizar o pré-processamento após o Módulo de Memória, onde no software de referência era realizado antes das amostras serem armazenadas. Estas foram algumas otimizações realizadas, mas não existe nada que impeça que outras otimizações mais profundas nos modelos sejam aplicadas e que possam mudar a organização da arquitetura final.

Para os demais módulos, a modelagem realizada não proporcionou grandes otimizações, justamente por serem módulos mais simples e apresentarem menos etapas envolvidas no processamento, o que não foi o caso do Módulo Direcional descrito anteriormente.

Tendo a etapa de modelagem finalizada e todos os modelos validados, foi dado o início da descrição da arquitetura em Verilog. As arquiteturas de cada módulo de predicação, bem como a arquitetura DIAV1 completa, foram descritas em Verilog e então validadas, com o auxílio dos modelos desenvolvidos. Nesta etapa de validação das arquiteturas, utilizou-se a co-simulação do MATLAB acoplando-se a ferramenta de verificação/validação INCISIVE (CADENCE, 2018) da Cadence. Com a utilização da co-simulação foi possível confrontar os resultados gerados pelo modelo com as saídas da arquitetura desenvolvida. Em todas as etapas de validação tanto para o modelo desenvolvido e como também a arquitetura desenvolvida foram utilizadas entradas reais coletadas do software de referência do AV1 (AV1, 2019).

6.2 Definição da frequência mínima de operação da arquitetura DIAV1

Nos capítulos anteriores foi apresentada uma análise estatística da decodificação considerando dois cenários (*onlyintra* e *lowdelay*). Como foi possível perceber nas análises, existe uma diferença de processamento dos blocos entre estes dois cenários. Desta forma, a arquitetura DIAV1 vai estar sujeita a vários requisitos de processamento que são originários da configuração adotada. Além da configuração utilizada na decodificação, o desempenho requisitado está sujeito a variações internas decorrentes do parâmetro de quantização e das características de conteúdo do vídeo codificado.

Deste modo, todas estas variações inerentes ao decodificador tornam difícil determinar as taxas mínimas de processamento (amostras por segundo) necessárias para garantir o desempenho necessário para a decodificação em tempo real. Portanto, foram definidos três cenários de operação do decodificador, com demandas distintas de taxa de processamento. Esses três cenários foram selecionados para demonstrar

diferentes configurações possíveis de entrada para o decodificador, de acordo com as características dos modos utilizados na codificação. Todos os cenários consideram que o vídeo de entrada possui resolução UHD 4K, com taxa de amostragem de 60 quadros por segundo. O primeiro cenário, considera que todas as amostras do vídeo são codificadas com os modos de predição que demandam o maior número de ciclos para a sua decodificação, sendo este o pior caso possível para a arquitetura DIAV1. Como podemos constatar na discussão apresentada na seção 5.10, o pior caso de processamento acontece nos blocos de tamanho 4x4, onde todos os modos demandam o mesmo número de ciclos, para as amostras de luma, e para as amostras de crominância, o pior caso é o CFL também para os blocos de tamanho 4x4.

Para o segundo caso foi considerado um cenário em que a codificação foi realizada somente com a predição intraquadro, para representar este cenário foi verificado dentro de todas as sequências de vídeos decodificadas o vídeo que apresentava os piores desempenhos para a decodificação na arquitetura desenvolvida. Esta sequência de vídeo terá seu efeito percebido na frequência de operação da arquitetura DIAV1, a frequência de operação será dada pelo vídeo codificado que utilizou os modos que necessitam de mais ciclos para que a arquitetura realize-se a decodificação, justamente tendendo para as piores temporizações na arquitetura. Essa sequência de vídeo dada como a pior foi extraída dos experimentos realizados com a codificação *onlyIntra*, sendo que o vídeo que apresentou o pior desempenho para a arquitetura foi o Costquad no QP 22. Com os resultados de seleção deste pior caso foi realizado a estimativa para decodificar um vídeo UHD 4K, a 60 quadros por segundo, considerando que todos os quadros são codificados com esse mesmo custo.

O terceiro caso foi projetado para ser um cenário mais realista, mas considerando o desempenho de processamento encontrado no segundo caso. Em aplicações práticas, é esperado que na decodificação da intraquadro nos quadros do tipo I representam a pior condição de decodificação dentro do cenário da configuração *LowDelay*, mas foi demonstrado no seção 4.2 que existe a possibilidade do codificador utilizar quadros escondidos que provocam um processamento relativo maior em determinados quadros do tipo P. Além disso, foi demonstrado também que na média a maior parte das amostras de um vídeo (cerca de 90,15%) são, de fato, codificadas com modos interquadros na configuração *LowDelay*. Deste modo, a análise realizada na configuração *LowDelay* identificou que pior vídeo para o decodificador é o Costquad no QP 22 (o mesmo vídeo indicado para a configuração *Onlyintra*). Com o pior vídeo identificado foi estimada a quantidade de amostras que o decodificador precisaria processar para realizar o processamento de tal vídeo. Desta forma, foi estimado que para este vídeo a arquitetura DIAV1 precisaria de um tempo que resultaria no processamento de 17,6% das amostras processadas por todo o decodificador, sendo que no restante do tempo a arquitetura ficaria parada (sem nada para processar).

Para esta análise foi considerando como base a potência obtida no segundo modo e estimado as fatias de tempo em que a arquitetura precisa ficar processando no máximo de seu desempenho as amostras e o tempo em que ele ficaria em espera (bloqueio). Este bloqueio poderia ser realizado por uma estrutura hipotética em que se utilizasse registradores na entrada da arquitetura em que poderiam ser bloqueados com a utilização da técnica de clock gating de acordo com a necessidade de processamento.

Na Tabela 10 são apresentados os dois primeiros casos de estudos, tendo como o alvo o processamento de vídeo 4K a 60 quadros por segundo. Também é possível verificar a existência de informações adicionais como a taxa média de ciclos para um bloco 64x64 (TMC64) para as amostras de luma e a taxa média de ciclos para um bloco 32x32 (TMC32) para as amostras de croma. Estas taxas representam quantos ciclos na média foram necessários para realizar a decodificação do respectivo tamanho de bloco, o motivo de apresentar o tamanho do bloco da TMC diferentes para as amostras de luma e croma está no fato de que os tamanhos de blocos máximos aplicados para cada um dos canais são diferentes e também pela existência de modos que existem em apenas um dos canais. Para o cálculo da frequência foi utilizada a Equação 35, onde temos os parâmetros da resolução dos vídeo (altura e largura) e a taxa de quadros por segundos (qps) multiplicados pelos TMC dos respectivos canais.

$$freg = \frac{altura * largura * qps}{64x64} * TMC_{Luma} + \frac{altura * largura * qps}{32x32} * \frac{1}{2} * TMC_{Croma} \quad (35)$$

Tabela 10 – Frequências alvo para os casos analisados.

Cenário	TMC64 (Luma)	TMC32 (Croma)	freq.(MHz)
Caso 1	512	288	132,19
Caso 2	315	265	102,62

Como pode ser observado na Tabela 10, o primeiro caso necessita a maior frequência de operação, com 132,19 MHz, justamente por ter o TMC64 e TMC32 com os maiores valores possíveis 512 e 288 respectivamente. O segundo caso requer uma frequência de operação menor tendo o TMC64 de 315 e TMC32 de 265.

O terceiro caso retrata momentos que intercalam entre alta intensidade de processamento e sem nenhuma intensidade de processamento, como pode ser observados na Figura 40. Nestas condições, os momentos de alta intensidade ou máximo processamento é representado pela potência instantânea máxima obtida no caso 2, enquanto que os momentos sem processamento são caracterizados pela componente de consumo estático (leakage) da arquitetura.

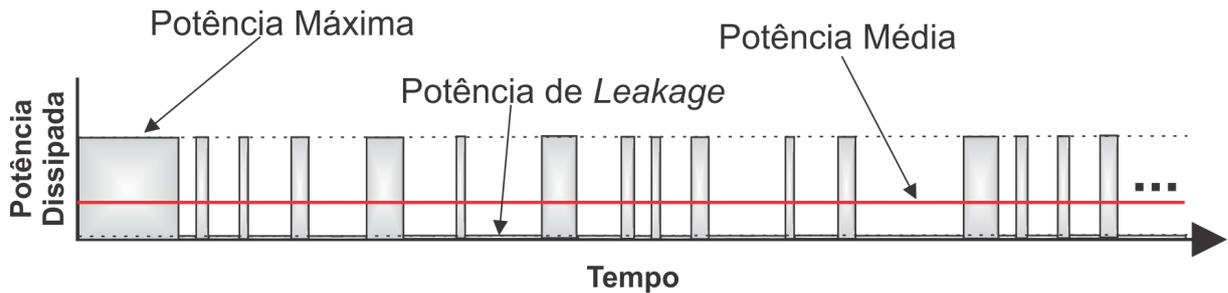


Figura 40 – Intervalos de processamento intercalando entre o máximo processamento e sem processamento.

6.3 Resultados de síntese

Para a geração dos resultados de síntese foram utilizados os fluxos de síntese ASIC utilizando a ferramenta *Cadence Encounter RTL Compiler* (CADENCE, 2005) versão 11.10 com a biblioteca *standard-cells* de 40nm da TSMC (TSMC, 2008). A biblioteca utilizada na síntese considerou os parâmetros de temperatura e tensão do processo (*Process voltage temperature-PVT*) de 25°C e 1,1 volts de alimentação, respectivamente. O resultado de área em chip no decorrer desta seção se refere ao número de gates equivalentes, onde um gate é equivalente a área de uma célula NAND de duas entradas e *Fan-out* 1 (nesta biblioteca a área da NAND2 é de 0,9048 μm^2). Na síntese ASIC também é possível extrair resultados de potência considerando quatro fluxos dentro da ferramenta *RTL Compiler* (Perleberg et al., 2018). Para este trabalho foi utilizado o fluxo da configuração padrão da ferramenta que tem a atividade de chaveamento definido nos 20%.

O início desta seção será destinado a discussão e apresentação dos resultados de síntese individuais para os módulos que compõem a arquitetura para a decodificação da predição intraquadro do AV1 - DIAV1 – e, posteriormente, serão apresentados os resultados para a arquitetura completa. A arquitetura desenvolvida foi projetada para poder realizar a decodificação de vídeos 4K que normalmente têm uma largura de 10 bits, ou seja, os resultados a seguir foram todos sintetizados considerando o processamento de amostras com 10 bits. Na Tabela 11 são demonstrados os resultados de síntese obtidos para os módulos individuais considerando os dois primeiros casos analisados: o primeiro com um cenário em que se utilizou os piores modos para a decodificação na arquitetura o que resultou em uma frequência de operação de 132,19 MHz; o segundo caso em que foi utilizado as análises para determinar um cenário em que o decodificador terá que decodificar somente blocos preditos pela predição intraquadro o que resultou em um frequência de operação de 102,62 MHz.

Como podemos perceber nos resultados de síntese para o caso 1, o módulo que apresentou a maior utilização de área foi o Módulo CFL com aproximadamente 81 kga-tes, grande parte desta área se deve justamente pelo bloco de memória presente den-

Tabela 11 – Resultados de síntese individual considerando.

Módulo	Caso 1 (132,19 MHz)		Caso 2 (102,63 MHz)	
	área (Kgates)	POTÊNCIA TOTAL (mW)	área (Kgates)	POTÊNCIA TOTAL (mW)
MM	44,95	4,93	42,44	3,88
PRE-MM	0,86	0,33	0,86	0,26
DIRECIONAL	78,93	30,98	61,33	18,95
CFL	81,00	3,79	80,93	2,92
SMOOTH	28,47	10,60	28,46	8,65
PAETH	9,35	4,86	9,37	3,98
PALETTE	2,94	4,48	2,89	3,68
INTRAFILTROS	14,23	6,90	13,40	5,58
DC	6,57	2,14	4,90	1,19

tre deste módulo, como já explicado anteriormente ele precisa armazenar as amostras subamostradas do bloco reconstruído de luma. Devido a isso, o bloco de memória tem uma dimensão de 32x32 registradores sendo eles sempre com dois bits a mais que as amostras de referência (neste caso eles terão 12 bits de largura). O segundo módulo que mais apresentou utilização de área foi o direcional com 78,93 Kgates e a justificativa por esta utilização está em sua complexidade, onde temos os filtros de pré-processamento e o núcleo de processamento, além destes dois módulos ainda são necessários muitos multiplexadores para poder colocar as amostras em suas posições respectivas ao seu processamento. Em relação aos demais módulos podemos destacar o MM e o Smooth, para o MM os valores de área estão dentro do esperado (44,95 Kgates) justamente por ele conter 64 registradores e por conter políticas de leitura e escritas que necessitam de multiplexadores. Para o Módulo Smooth a área (28,47 Kgates) utilizada foi mais alta que o esperado, mas a justificativa pode ser encontrada nas multiplicações, que têm a precisão de 8 bits.

Para os resultados obtidos na dissipação total de potência, podemos perceber que alguns módulos tiveram o resultado de potência não condizente com os resultados de área obtidos, como por exemplo, o Módulo Direcional, que teve uma dissipação de potência de 30,98 mW enquanto que o Módulo CFL apresentou uma potência de 3,79 mW, sendo que o Módulo CFL apresentou uma área maior do que o Módulo Direcional. A justificativa desta diferença na potência está relacionada, em parte, com escolhas que a ferramenta realiza na síntese. Como a Módulo CFL apresenta muitos registradores com acesso a escrita controlável pelo hardware, a ferramenta consegue converter está lógica por uma única célula de clock gating. Desta forma o Módulo CFL pode atingir reduções muito expressivas na potência dissipada em relação aos demais módulos quando comparado com a área utilizada pelo mesmo. Este mesmo comportamento pode ser observado no Módulo MM, onde teve uma potência de 4,87 mW contra 13,52 mW do Módulo Smooth que teve uma área menor que o dele.

Com os resultados de síntese individuais apresentados iremos partir para os resultados de síntese da arquitetura DIAV1 completa para três casos analisados. Com

os casos bem estabelecidos se realizou uma síntese considerando para cada um dos casos, na Tabela 12 é possível verificar estes resultados. Como podemos perceber a síntese do primeiro caso apresentou uma área de aproximadamente 269,13 Kgates e teve uma potência dissipada de 76,03 mW, enquanto que no segundo caso a síntese demonstrou que a arquitetura teve uma utilização de área igual a 251,91 Kgates e uma potência dissipada de aproximadamente 56,83 mW e para o terceiro caso, que tem uma estimativa baseado no segundo caso, tem a mesma área utilizada pelo segundo caso 251,91 Kgates e com uma potência média dissipada na faixa de 16,9 mW.

A diferença de área constatada na síntese entre o primeiro caso e os demais casos é consequência da diferença da frequência utilizada na síntese. Na síntese do primeiro caso a ferramenta teve que substituir as células complexas (portas lógicas existentes dentro da biblioteca) por células mais simples para poder atingir a frequência alvo na síntese, por consequência células mais simples (não complexas) apresentam latências menores o que beneficia a latência, mas em contrapartida utilizando mais área, que consecutivamente apresenta também uma maior potência dissipada.

Tabela 12 – Resultados de síntese da arquitetura DIAV1 considerando os três cenários de operação.

Casos Analisados	Freq. (MHz)	área (Kgates)	POTÊNCIA (mW)	
			LEAKAGE	TOTAL
caso 1	132,19	269,13	0,37	76,03
caso 2	102,63	251,91	0,32	56,83
caso 3*	102,63	251,91	0,32	16,90

* Estimado com base nos valores obtidos no caso 2.

Todos os resultados apresentados sobre a arquitetura foram considerando o processamento de amostras com 10 bits, para poder demonstrar os resultados considerando o processamento de amostras com 8 bits foi realizado mais uma síntese, para este experimento foi usada a frequência de operação do segundo caso, 102,63 MHz. Os resultados obtidos neste último experimento demonstraram que a arquitetura para 8 bits teve uma utilização de área de 212,9 Kgates e uma potência dissipada de 46,52 mW.

Como já mencionado anteriormente não foi possível encontrar na literatura nenhum trabalho sobre hardware que apresente resultados de implementação em hardware para a decodificação ou para a codificação da predição intraquadro do AV1, o que inviabiliza a realização de comparações. Mas podemos citar alguns trabalhos que podem ser encontrados na literatura, contudo estes outros trabalhos são hardwares para decodificadores de outros padrões. Estes outros padrões suportam menos modos de predição e tamanho de blocos, como por exemplo, podemos citar dois trabalhos que

abordam o decodificador. Em (Chiang et al., 2016) é apresentada uma solução completa para a decodificação do HEVC, porém, ele apresenta resultados parciais para os modos que compõem a sua solução. Deste modo, a predição intraquadro apresentou uma utilização de área de aproximadamente 76K com uma região de memória de 704 Bytes para uma biblioteca da TSMC de 90 nm, sendo esta solução capaz de decodificar vídeos UHD 4K a 30 quadros por segundo a uma frequência de 270 MHz. No trabalho (Zhou et al., 2014) também é apresentada uma solução para o HEVC mas desta vez somente para a predição intraquadro. Neste trabalho a área utilizada foi de 72,1 Kgates e um espaço de armazenamento (SRAM no caso deste trabalho) de 21 kBytes para uma biblioteca da TSMC de 90 nm, sendo capaz de processar vídeos UHD 8K a 120 quadros por segundo com a frequência de 397 MHz. Uma comparação realizada entres estes trabalhos não permite uma apuração precisa dos trabalhos justamente por que o HEVC tem 35 modos de predição e para cinco tamanhos de blocos e o AV1 tem 68 modos para 19 tamanhos de blocos. Além disso só o Módulo CFL presente neste trabalho, e que não existe no codificador HEVC, apresentou uma área de 81 Kgates, o que já é maior que a área total dos módulos da predição intraquadro dos trabalhos relacionados.

7 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou uma solução arquitetural para a decodificação intraquadro para o padrão de codificação AV1. A arquitetura desenvolvida foi chamada de DIAV1, sendo este o primeiro trabalho na literatura a apresentar um hardware completo para esta finalidade. No decorrer deste trabalho foram apresentados conceitos introdutórios sobre codificação de vídeo e sobre este novo codificador.

O codificador AV1 trouxe inúmeras técnicas novas que não existiam nos outros codificadores, como também aumentou o tamanho de bloco máximo suportado. Além do aspecto tecnológico, o AV1 gera grande interesse por ser totalmente livre de royalty diferentemente de outros codificadores, como no caso do HEVC. Dentro do módulo da predição intraquadro, também podem ser encontradas inúmeras técnicas novas como o CFL, que é uma técnica voltada somente para as amostras de croma. Além das novas técnicas que podem ser encontradas, ele ampliou técnicas presentes nos demais codificadores como é o caso do modo direcional, onde são definidos 56 ângulos no AV1 contra 33 do HEVC.

No decorrer do texto, foram apresentadas análises estatísticas com o objetivo de auxiliar em determinar os pontos de operação da arquitetura e taxas de processamento. Esses pontos de operação foram necessários para que a arquitetura seja capaz de operar em taxas mais próximas possíveis da realidade. Ainda, a análise também foi utilizada indiretamente para auxiliar nas tomadas de decisões dos projetos arquiteturais. Por fim, foram apresentados todos os módulos que compõem a arquitetura DIAV1 e, posteriormente, apresentados os resultados para a arquitetura topo, considerando três cenários que procuravam demonstrar condições de operação. No primeiro cenário foi emulada uma condição extremamente pessimista para a operação da arquitetura, considerando que todas as amostras do vídeo foram codificadas com o modo mais custoso para a decodificação. No segundo cenário foi usada uma condição em que o decodificador estaria sujeito somente a decodificação de modos intraquadro considerando a análise estatística realizada, mas sem apresentar nenhuma limitação em relação ao modo e ao tamanho de bloco que poderiam ser codificados no codificador. O terceiro cenário teve o objetivo de emular uma condição mais realista, onde o

decodificador tem blocos para decodificar tanto para os modos intraquadro como para os modos interquadros. Toda a arquitetura foi descrita em Verilog HDL e sintetizada para ASIC utilizando a biblioteca da TSMC de 40nm para um PVT de 25°C e 1,1 volts. Todos os resultados extraídos tiveram como a meta o processamento de vídeos UHD 4K a 60 quadros por segundo e os resultados de síntese demonstraram que a arquitetura DIAV1 é capaz de realizar a decodificação em todos os cenários, mesmo para o caso extremamente pessimista. Vale destacar que os resultados de potência extraídos por este trabalho utilizaram a atividade de chaveamento padrão da ferramenta (20% de chaveamento), este resultado pode ser melhorado se for realizada a síntese utilizando entradas reais extraídas do software de referência.

Como este é o primeiro trabalho arquitetural para a predição intraquadro do AV1, é impossível realizar uma comparação justa deste trabalho com a literatura. Além disso, a comparação com outros trabalhos já publicados se torna injusta, pois as arquiteturas desenvolvidas suportam outros padrões de codificação com inúmeras diferenças no número de modos de predição e tamanhos de bloco suportados.

Como trabalhos futuros, entende-se que ainda existe espaço para possíveis otimizações arquiteturais para a predição intraquadro em relação a solução apresentada. Uma das possíveis otimizações visa reduzir a área e potência final da arquitetura a partir de novas otimizações sobre o modelo e a da troca das multiplicações por somas e deslocamentos (principalmente nos blocos de pré-processamento no Módulo Direcional). Além das otimizações que podem ser aplicadas nesta solução, outro trabalho futuro é a adaptação desta arquitetura para operar no codificador.

REFERÊNCIAS

AGOSTINI, L. **Desenvolvimento de Arquiteturas de Alto Desempenho Dedicadas à Compressão de Vídeo Segundo o Padrão H. 264/AVC**. 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Programa de Pós-Graduação em Computação — , Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AOM. **HE OPEN AND ROYALTY-FREE CODEC FOR NEXT-GENERATION ULTRA HIGH DEFINITION MEDIA**. Disponível em: <<http://aomedia.org/>>. Acesso em: 2019-02-18.

AOM. **AV1 Bitstream e Decoding Process Specification**. Disponível em: <<https://aomediacodec.github.io/av1-spec/av1-spec.pdf>>. Acesso em: 2019-02-18.

AV1. **Alliance for Open Media - Git at Google**. Disponível em: <<https://aomedia.google.com/aom/>>. Acesso em: 2019-02-18.

BOSSÉN, F. et al. Common test conditions and software reference configurations. **Joint Collaborative Team on Video Coding (JCT-VC), JCTVC-F900**, [S.l.], 2011.

CADENCE. **Using Encounter™ RTL Compiler**. [S.l.: s.n.], 2005.

CADENCE. **Incisive Enterprise Simulator**. Disponível em: <https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/system-design-and-verification/simulation-and-testbench-verification/incisive-enterprise-simulator.html>. Acesso em: 2019-01-07.

Chen, Y. et al. An Overview of Core Coding Tools in the AV1 Video Codec. In: **PICTURE CODING SYMPOSIUM (PCS)**, 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.41–45.

Chiang, P. et al. A QFHD 30-frames/s HEVC Decoder Design. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, [S.l.], v.26, n.4, p.724–735, April 2016.

CISCO. **Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022**. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>>. Acesso em: 2018-02-18.

CORREA, G.; ASSUNCAO, P.; AGOSTINI, L.; SILVA CRUZ, L. A. da. Performance and computational complexity assessment of high-efficiency video encoders. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, [S.l.], v.22, n.12, p.1899–1909, 2012.

EGGE, N. **Into the Depths: The Technical Details Behind AV1**. Disponível em: <http://mile-high.video/files/mhv2018/pdf/day1/1_02_Egge.pdf>. Acesso em: 2019-02-18.

GROUP, N. W. **Video Codec Testing and Quality Measurement draft-ietf-netvc-testing-08**. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-netvc-testing-08>>. Acesso em: 2019-02-22.

Layek, M. A. et al. Performance analysis of H.264, H.265, VP9 and AV1 video encoders. In: ASIA-PACIFIC NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM (APNOMS), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.322–325.

Lei, Z.; Reddy, S.; Cherepanov, V.; Deng, Z. GPGPU implementation of VP9 in-loop deblocking filter and improvements for AV1 codec. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.925–929.

MATLAB. **MATLAB - MathWorks**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 2019-02-23.

MATNEY, L. **YouTube has 1.5 billion logged-in monthly users watching a ton of mobile video | TechCrunch**. Disponível em: <<https://techcrunch.com/2017/06/22/youtube-has-1-5-billion-logged-in-monthly-users-watching-a-ton-of-mobile-video/>>. Acesso em: 2019-02-18.

MENDES, L. L. SBTVD—Uma visão sobre a TV Digital no Brasil. **T&C Amazônia, Ano V**, [S.l.], n.12, 2007.

MIANO, J. **Compressed image file formats: Jpeg, png, gif, xbm, bmp**. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1999.

MUKHERJEE, D. et al. A Technical Overview of VP9—the Latest Open-Source Video Codec. **SMPTE Motion Imaging Journal**, [S.l.], v.124, p.44–54, 02 2015.

MUKHERJEE, D. et al. Novel inter and intra prediction tools under consideration for the emerging AV1 video codec. In: 2017 , 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.15.

Nguyen, T.; Marpe, D. Future Video Coding Technologies: A Performance Evaluation of AV1, JEM, VP9, and HM. In: PICTURE CODING SYMPOSIUM (PCS), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.31–35.

OZER, J. **Current Status of HEVC Royalties**. Disponível em: <<https://streaminglearningcenter.com/blogs/current-status-of-hevc-royalties.html>>. Acesso em: 2019-02-18.

Perleberg, M. R. et al. ASIC power-estimation accuracy evaluation: A case study using video-coding architectures. In: IEEE 9TH LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON CIRCUITS SYSTEMS (LASCAS), 2018., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p.1–4.

POLLACK, J. Displays of A Different Stripe. **IEEE Spectrum**, [S.l.], v.43, n.8, p.40–44, Aug 2006.

PORTO, M. S. **Desenvolvimento algorítmico e arquitetural para a estimação de movimento na compressão de vídeo de alta definição**. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Programa de Pós-Graduação em Computação — , Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PREMIER. **DDR42133 pdf, DDR42133 description, DDR42133 datasheets, DDR42133 view :: ALLDATASHEET ::**. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/979155/A-DATA/DDR42133.html>>. Acesso em: 2019-02-24.

R. WINKLER, w. **YouTube: 1 Billion Viewers, No Profit**. Disponível em: <https://www.wsj.com/articles/viewers-dont-add-up-to-profit-for-youtube-1424897967#comments_sector>. Acesso em: 2019-02-18.

RICHARDSON, I. E. **Video codec design: developing image and video compression systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.

SHI, Y. Q.; SUN, H. **Image and video compression for multimedia engineering: Fundamentals, algorithms, and standards**. [S.l.]: CRC press, 1999.

SULLIVAN, G. J.; OHM, J. R.; HAN, W. J.; WIEGAND, T. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, [S.l.], v.22, n.12, p.1649–1668, Dec 2012.

SZE, V.; BUDAGAVI, M.; SULLIVAN, G. J. **High Efficiency Video Coding (HEVC)**. [S.l.]: Springer, 2014. 1–375p.

TERRIBERRY, T. B. **AV1 Update**. Disponível em: <https://people.xiph.org/~tdaede/demuxed_av1_2017.pdf>. Acesso em: 2019-02-22.

TSMC. **40nm Technology**. Disponível em: <<https://www.tsmc.com/english/dedicated-Foundry/technology/40nm.htm>>. Acesso em: 2019-02-23.

TURLETTI, T.; HUITEMA, C. **RTP payload format for H.261 video streams**. Disponível em: <<https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-avt-h261-03>>. Acesso em: 2017-03-02.

TURLETTI, T.; HUITEMA, C. **Thomas Daede - AV1 Update - YouTube**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=yKEDf5-2sT4>>. Acesso em: 2018-03-01.

VP9. **About WebM**. Disponível em: <<https://www.webmproject.org/about/>>. Acesso em: 2019-02-22.

WANG, Q. et al. An optimized hardware architecture for intra prediction in H.264 decoder. In: IEEE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASIC, 2013., 2013. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013. p.1–4.

WEBM. **About WebM**. Disponível em: <<https://www.webmproject.org/about/>>. Acesso em: 2019-02-18.

WIEGAND, T.; SULLIVAN, G. J.; BJONTEGAARD, G.; LUTHRA, A. Overview of the H. 264/AVC video coding standard. **IEEE Transactions on circuits and systems for video technology**, [S.l.], v.13, n.7, p.560–576, 2003.

XU, S.; XING, Y.; WEI, X. Design of intra prediction module in H.264 and AVS dual modes video decoder chip. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND NETWORK TECHNOLOGY, 2011., 2011. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. v.2, p.635–638.

Zhou, J.; Zhou, D.; Sun, H.; Goto, S. VLSI architecture of HEVC intra prediction for 8K UHD TV applications. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP), 2014., 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.1273–1277.

ZIMMERMAN, S. **A Look at AV1 and the Future of Video Codecs: Google's Answer to HEVC**. Disponível em: <<https://www.xda-developers.com/av1-future-video-codecs-google-hevc/>>. Acesso em: 2019-02-18.

ANEXO A DEFINIÇÃO DAS SEQUÊNCIAS DE VÍDEOS SIMULADAS.

Tabela 13 – Sequências de testes de utilizadas nas simulações dos vídeos 4K.

Sequence name Resolution	Frame count	Frame rate	Bit depth
Cactus 3840x2160	600	60fps	10
Coastguard 3840x2160	600	60fps	10
Foreman 3840x2160	600	60fps	10
Mobile 3840x2160	600	60fps	10
News 3840x2160	600	60fps	10
Suzie 3840x2160	600	60fps	10

Tabela 14 – Sequências de testes definidas pela CTC.

Class	Sequence name Resolution	Frame count	Frame rate	Bit depth	Class	Sequence name Resolution	Frame count	Frame rate	Bit depth
A	Traffic 2560x1600	150	30fps	8	D	RaceHorses 416x240	300	30fps	8
A	PeopleOnStreet 2560x1600	150	30fps	8	D	BQSquare 416x240	600	60fps	8
A	Nebuta 2560x1600	300	60fps	10	D	BlowingBubbles 416x240	500	50fps	8
A	SteamLocomotive 2560x1600	300	60fps	10	D	BasketballPass 416x240	500	50fps	8
B	Kimono 1920x1080	240	24fps	8	E	FourPeople 1280x720	600	60fps	8
B	ParkScene 1920x1080	240	24fps	8	E	Johnny 1280x720	600	60fps	8
B	Cactus 1920x1080	500	50fps	8	E	KristenAndSara 1280x720	600	60fps	8
B	BQTerrace 1920x1080	600	60fps	8	F	BaskeballDrillText 832x480	500	50fps	8
B	BasketballDrive 1920x1080	500	50fps	8	F	ChinaSpeed 1024x768	500	30fps	8
C	RaceHorses 832x480	300	30fps	8	F	SlideEditing 1280x720	300	30fps	8
C	BQMall 832x480	600	60fps	8	F	SlideShow 1280x720	500	20fps	8
C	PartyScene 832x480	500	50fps	8					

APÊNDICE A DADOS COLETADOS NAS SIMULAÇÕES.

Este apêndice apresenta os resultados coletados nas simulações realizadas para verificar o percentual de escolha dos modos de predição e dos tamanhos de blocos. Considerando os resultados coletados as tabelas apresentam a contagem obtida em cada tamanho de bloco e modo. As tabelas são organizadas para demonstrar individualmente os resultados da coleta para as amostras de luminância e para as amostras de cromaticidade.

Tabela 15 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	267873	27061	23482	17018	16208	476882	101203	93078	49487	29263	2619651	203123	172943	16823	12409	8122911	10027	8126	98652	0	0	0
Smooth	66841	18250	17992	10366	10113	247610	98232	59891	25963	14877	1779233	245187	156458	32940	26305	2012452	32895	32372	94957	0	0	0
Smooth V	14281	4976	6363	3820	3532	55564	23533	15318	8390	4131	333044	61580	39869	6459	6182	421325	6554	11104	23659	0	0	0
Smooth H	38661	9493	6639	4867	3808	98497	33848	16932	7431	3764	577240	62132	32964	7498	4007	292233	7874	5460	18118	0	0	0
Paeth	43187	11542	9119	13502	7021	78379	24720	12149	12811	7561	366614	62720	34021	13854	9918	269648	18588	13645	274868	0	0	0
Dir. 36	1190	319	237	184	98	3842	3103	749	2717	177	43324	22960	4540	8586	730	39412	5748	486	25228	0	0	0
Dir. 39	1810	424	225	411	138	6438	4079	1485	2351	436	77580	28423	7770	11571	1329	76829	12044	1022	53980	0	0	0
Dir. 42	423	180	59	71	15	3755	2163	690	822	109	30343	15523	3957	5498	244	49642	10124	468	50180	0	0	0
Dir. 45	1632	473	186	244	50	7291	3317	1308	920	200	64886	18941	5979	6138	651	72067	35262	10107	61252	0	0	0
Dir. 48	843	297	142	156	65	7818	3048	1246	800	196	56593	17128	6881	5566	804	98691	19298	1616	63276	0	0	0
Dir. 51	2253	707	407	459	164	9796	4104	2003	1220	343	96022	18860	8594	4763	826	68560	15522	1188	61048	0	0	0
Dir. 54	465	128	75	25	19	3751	1202	853	149	47	23417	3978	2389	705	59	19331	2550	392	16604	0	0	0
Dir. 58	2668	659	385	418	122	11781	4222	2310	1006	325	87723	17428	10709	3402	724	101482	23342	1552	132948	0	0	0
Dir. 61	4563	948	845	463	197	14409	4107	3499	982	566	101409	17990	12573	6306	1546	82615	12414	1026	58208	0	0	0
Dir. 64	2269	320	639	134	75	11080	2231	2762	260	184	52479	5971	8863	1416	472	43727	4860	572	25776	0	0	0
Dir. 67	4772	1086	1308	424	268	17455	4175	5283	819	691	118718	13773	18205	4231	1279	91935	30470	17284	101841	0	0	0
Dir. 70	2209	413	667	166	137	11979	2602	3435	412	462	69921	8699	14737	2823	971	74040	7460	1284	57428	0	0	0
Dir. 73	7491	1483	1529	1099	680	21694	5143	5940	1330	1653	172983	17698	22369	5072	2727	110280	12842	7526	125960	0	0	0
Dir. 76	1574	219	318	155	140	10452	1512	2118	191	285	49560	3785	5013	772	655	27112	1834	1818	22504	0	0	0
Dir. 81	6887	1136	2056	436	1167	23159	4221	8347	767	2239	163787	15524	28967	3931	3898	130582	10996	4116	93588	0	0	0
Dir. 84	25769	1702	5539	481	3961	35384	4530	11983	678	3644	238449	10603	22839	4696	3949	119186	6384	2982	45816	0	0	0
Dir. 87	19092	1687	5928	380	3863	41068	5238	15116	854	5411	225906	9241	31285	3927	4595	172688	5116	2678	41276	0	0	0
Dir. 90	31886	3038	13117	1070	12553	41889	2995	27806	1251	9391	209674	8840	44670	3638	5143	358935	22447	20107	101887	0	0	0
Dir. 93	14841	2131	4950	521	2988	33962	5872	11233	1433	3528	246312	12348	43182	5186	5524	206181	6072	3810	57916	0	0	0
Dir. 96	3734	880	845	246	717	8816	2833	3186	835	1014	111140	9735	13277	4109	1974	106091	5456	4080	50900	0	0	0
Dir. 99	6694	1158	893	593	412	10833	3103	2800	1155	1039	144430	14392	15712	3213	2139	137231	12114	4664	128676	0	0	0
Dir. 104	189	114	104	44	84	1906	662	733	107	322	25101	2572	4839	454	1093	31348	1936	2856	31392	0	0	0
Dir. 107	590	487	405	219	257	4684	2607	1915	772	961	76220	12746	15200	2426	4031	103403	12236	9156	122112	0	0	0
Dir. 110	212	204	158	50	81	2699	1353	1004	158	385	37970	8096	10699	1256	1948	65980	5652	3486	51868	0	0	0
Dir. 113	384	362	313	128	206	4132	2276	1668	541	696	58867	12146	15314	2400	3072	72724	31028	13363	104407	0	0	0
Dir. 116	224	252	168	48	78	3130	1342	1148	179	318	35378	6214	9878	767	1927	45035	3886	1798	34660	0	0	0
Dir. 119	527	492	314	243	222	4825	2685	1789	1042	745	63614	18196	18221	4742	5016	90346	12588	8196	103608	0	0	0
Dir. 122	202	193	92	85	39	2598	1110	613	123	107	27620	3928	3738	697	825	31239	4842	2454	36116	0	0	0
Dir. 126	177	320	194	108	96	3785	2147	1625	595	661	56671	14373	15702	2407	4907	101360	14004	16898	130524	0	0	0
Dir. 129	159	274	176	146	67	3932	2162	1699	636	605	54003	13398	12949	2565	2545	81818	11092	9514	113196	0	0	0

Tabela 15 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	94	182	124	68	51	3127	1632	1508	485	387	44972	13259	12701	2284	2315	99379	9274	7690	125712	0	0	0
Dir. 135	115	105	93	42	50	2512	1175	1038	261	258	30691	6469	5254	783	606	51660	22633	24085	116997	0	0	0
Dir. 138	95	143	133	79	58	2605	1442	1348	636	451	40869	14482	11885	3088	1948	107894	9400	8388	134492	0	0	0
Dir. 141	144	216	202	80	84	2358	1245	1074	517	296	35776	11650	8389	1764	1078	73470	7544	6814	86684	0	0	0
Dir. 144	511	329	577	154	124	2915	1341	1208	628	515	38086	14024	8330	3502	1118	96396	13610	9578	110032	0	0	0
Dir. 148	312	180	257	71	54	1320	432	388	117	94	15598	3221	2414	584	323	27760	1542	3512	31964	0	0	0
Dir. 151	1349	540	1352	393	586	5216	1926	1966	833	926	54325	18954	14099	5308	2752	94212	6082	9774	80764	0	0	0
Dir. 154	1388	463	725	180	178	4435	1163	969	240	141	29317	9257	4040	1701	403	43541	2004	3558	27496	0	0	0
Dir. 157	761	500	705	695	196	4889	1998	1876	801	469	47933	15478	7937	4234	1629	80824	14433	26362	112747	0	0	0
Dir. 160	383	310	312	429	64	3019	1478	1093	468	283	35070	11466	5990	2710	983	69766	4422	4506	56872	0	0	0
Dir. 163	1123	565	692	591	294	6487	2673	2379	1196	988	60544	18098	9114	3562	1915	98374	5426	6696	79040	0	0	0
Dir. 166	133	104	103	85	21	1342	714	618	256	82	15636	4574	1798	693	258	26551	2008	1044	16596	0	0	0
Dir. 171	3326	1093	1314	845	484	14770	5331	4050	2098	1854	133533	33722	17829	3747	3651	221148	7730	10116	128496	0	0	0
Dir. 174	4324	2048	1737	1335	496	19122	11246	5260	4987	1392	226762	51743	15406	4742	5638	368167	5468	5896	72980	0	0	0
Dir. 177	7682	3944	1663	1683	474	33611	15649	8139	4390	1769	332116	57727	10591	3130	3073	846168	2952	3474	37916	0	0	0
Dir. 180	21280	12454	3697	24151	1423	41347	50026	5321	16864	3369	205584	92324	12070	7918	4024	2157546	24535	22084	114037	0	0	0
Dir. 183	16597	5436	1520	3832	400	102046	57525	9993	16424	1428	387227	72150	11385	9064	4194	770922	5002	5592	43236	0	0	0
Dir. 186	6431	3185	709	2914	126	53436	33373	5405	9098	538	214279	40252	8680	3713	3018	163375	2064	4592	25544	0	0	0
Dir. 189	3125	1385	548	847	172	30239	18643	4179	4351	519	137399	41309	13216	3443	2395	139544	2794	9526	43296	0	0	0
Dir. 194	771	169	88	102	25	10505	3607	1299	638	75	29701	7248	2765	723	433	26800	744	1288	4912	0	0	0
Dir. 197	1790	916	643	601	255	16166	8493	3534	2909	746	104762	35749	16297	3679	2945	142223	3468	9030	35336	0	0	0
Dir. 200	560	275	281	175	48	9629	5581	2081	1236	278	66421	32514	12495	1966	1857	124545	2160	7088	23684	0	0	0
Dir. 203	956	375	426	167	150	11533	7093	3224	1577	701	89250	35658	18464	2682	3278	156740	15215	28956	68468	0	0	0
Dir. 206	470	195	231	67	42	7827	4320	2205	474	393	53037	18247	10422	807	1336	79000	1424	6224	19236	0	0	0
Dir. 209	1212	309	454	118	160	11951	5337	3750	1102	938	86482	24401	22760	2154	4701	124225	2232	11302	32580	0	0	0
Dir. 212	2653	457	758	174	407	14418	5725	6463	1330	1844	134809	26224	34156	2700	4067	185940	4018	21942	61044	0	0	0
Filtro DC	0	0	0	0	0	112759	48419	21644	8519	3460	1136075	162157	77764	28503	16982	933450	36328	27984	196897	0	0	0
Filtro V	0	0	0	0	0	11138	4439	19386	3038	9787	142958	41956	94183	24856	29335	355765	47158	50978	352060	0	0	0
Filtro H	0	0	0	0	0	22825	52981	4569	18419	1815	306608	215289	28010	57837	15394	734652	70805	35744	335418	0	0	0
Filtro D135	0	0	0	0	0	88495	35630	19967	7276	3980	954118	153184	94397	31615	20232	1058891	49615	39793	232678	0	0	0
Filtro Paeth	0	0	0	0	0	28287	13484	7490	3519	1658	340942	53822	27222	11461	6797	231996	15288	12293	78165	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 16 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	0	0	0	0	0	701792	228816	250818	108572	151696	2820450	2549282	1449454	653484	361712	5133802	2158226	1311300	1554680	0	0	0
Smooth	0	0	0	0	0	144696	55120	50840	27920	23262	567668	692734	451568	305138	158942	1986686	1464116	887390	2098578	0	0	0
Smooth V	0	0	0	0	0	37270	17880	15274	12806	6082	136568	202980	87162	90904	16094	468100	390718	107078	306544	0	0	0
Smooth H	0	0	0	0	0	67834	27030	27998	11024	16030	197336	239890	127290	59110	38482	602998	354170	225958	470672	0	0	0
Paeth	0	0	0	0	0	112836	39840	30558	36408	22194	113580	130670	84008	82820	52122	266896	284248	191238	385228	0	0	0
Dir. 36	0	0	0	0	0	2750	864	704	446	162	4402	11098	3426	9654	724	25738	42298	10318	15208	0	0	0
Dir. 39	0	0	0	0	0	4836	1654	1884	914	708	10028	14726	6754	11536	2380	46120	61372	21426	34332	0	0	0
Dir. 42	0	0	0	0	0	974	404	218	136	34	3938	5034	1668	1886	240	18474	24860	7116	15018	0	0	0
Dir. 45	0	0	0	0	0	2414	1396	834	796	210	8272	9722	3864	4132	530	28526	35620	10384	39404	0	0	0
Dir. 48	0	0	0	0	0	1124	798	568	470	144	8106	8158	3722	3086	1044	36332	45466	19770	39852	0	0	0
Dir. 51	0	0	0	0	0	6202	2524	1816	1254	542	12270	14376	7686	5452	1798	32236	34946	15162	31864	0	0	0
Dir. 54	0	0	0	0	0	800	312	244	78	28	3566	3404	1958	482	182	4912	4674	2958	3038	0	0	0
Dir. 58	0	0	0	0	0	3734	2318	1542	740	530	19520	16756	10540	5608	2634	44354	65608	26468	67720	0	0	0
Dir. 61	0	0	0	0	0	8078	2694	2902	964	836	18648	18572	13116	7212	2766	48786	48518	27048	53848	0	0	0
Dir. 64	0	0	0	0	0	3852	804	2200	122	86	8480	4708	4718	1112	464	15408	12158	12328	16486	0	0	0
Dir. 67	0	0	0	0	0	7410	2410	3558	756	720	18502	14696	12932	4754	3072	48498	49780	35240	101692	0	0	0
Dir. 70	0	0	0	0	0	2778	1016	1492	238	284	10540	8324	7100	2110	1392	29172	28090	24326	38586	0	0	0
Dir. 73	0	0	0	0	0	12430	4260	5376	1938	1788	29828	25764	21690	7948	7494	66110	64420	48656	78682	0	0	0
Dir. 76	0	0	0	0	0	1942	446	682	56	154	7074	4964	4048	1040	906	8536	7712	7390	8972	0	0	0
Dir. 81	0	0	0	0	0	18002	3634	8396	978	4866	23812	14872	19862	4658	10194	55700	58572	54374	82478	0	0	0
Dir. 84	0	0	0	0	0	54064	7952	25874	1390	17110	30514	14630	24220	3886	11462	53542	42828	47340	67464	0	0	0
Dir. 87	0	0	0	0	0	26920	4622	17606	502	11078	30368	8074	24646	2680	20966	56958	39210	57846	73420	0	0	0
Dir. 90	0	0	0	0	0	62010	9048	32400	3650	24186	39152	22798	52096	9600	38176	81662	46470	63138	133296	0	0	0
Dir. 93	0	0	0	0	0	32216	8032	21518	910	13658	37724	12442	29176	5088	22666	72930	54082	71932	102468	0	0	0
Dir. 96	0	0	0	0	0	7602	2250	5446	648	3068	14522	10216	11558	2988	4698	31606	32774	33242	57184	0	0	0
Dir. 99	0	0	0	0	0	9808	3756	3940	968	2286	14480	14794	12726	5666	5972	42776	55534	39092	87554	0	0	0
Dir. 104	0	0	0	0	0	538	286	412	52	298	2598	2722	3278	700	2442	5946	6164	8546	9206	0	0	0
Dir. 107	0	0	0	0	0	3324	2782	2236	1152	1408	15274	20468	17522	6694	9264	55118	65462	56962	89648	0	0	0
Dir. 110	0	0	0	0	0	646	532	488	116	162	3352	4194	3784	950	1626	16046	23620	20908	40520	0	0	0
Dir. 113	0	0	0	0	0	1660	1388	1152	366	622	7486	9320	8112	2780	3154	28766	41762	32572	102616	0	0	0
Dir. 116	0	0	0	0	0	510	314	456	78	128	2566	2978	2912	552	656	8582	9432	11000	16168	0	0	0
Dir. 119	0	0	0	0	0	2688	2626	1740	882	818	11370	16934	11766	5908	4902	45606	61120	45480	93330	0	0	0
Dir. 122	0	0	0	0	0	626	592	416	138	106	3796	5638	2742	1102	366	8292	14134	7428	23010	0	0	0
Dir. 126	0	0	0	0	0	1000	1024	946	442	324	11608	16402	11152	4740	3644	36514	51302	50912	78452	0	0	0
Dir. 129	0	0	0	0	0	1010	1792	1206	740	436	14942	20872	15466	6180	4324	40770	48402	43112	82132	0	0	0

Tabela 16 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos 4K (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	0	0	0	0	0	622	664	610	254	178	9774	12106	8948	3140	2156	38518	55486	44244	72396	0	0	0
Dir. 135	0	0	0	0	0	368	444	400	122	46	4866	4892	3572	588	432	9450	13012	10586	57856	0	0	0
Dir. 138	0	0	0	0	0	730	890	724	424	272	11498	15122	11536	5060	3630	47790	74500	65122	106374	0	0	0
Dir. 141	0	0	0	0	0	1986	1172	1092	576	364	13814	15474	11542	4612	3182	29730	37432	30724	67650	0	0	0
Dir. 144	0	0	0	0	0	2340	1646	1878	420	484	17178	16362	13342	4926	3894	34554	52168	37510	72736	0	0	0
Dir. 148	0	0	0	0	0	428	360	302	160	62	5510	4874	3850	642	548	8416	9702	9694	22006	0	0	0
Dir. 151	0	0	0	0	0	5992	3232	6282	2618	2252	29038	25964	25596	9036	8692	70384	64280	60358	111494	0	0	0
Dir. 154	0	0	0	0	0	1652	600	380	230	94	3644	4620	2156	990	182	10016	16634	7630	19752	0	0	0
Dir. 157	0	0	0	0	0	2544	1680	1878	1548	386	12740	15320	10472	5004	2268	41258	47866	39172	135058	0	0	0
Dir. 160	0	0	0	0	0	1106	896	632	974	92	5990	7188	4426	2668	806	21736	32620	20170	48880	0	0	0
Dir. 163	0	0	0	0	0	4650	2646	3264	3254	1064	23224	24688	20292	9914	7080	65176	64838	52878	103346	0	0	0
Dir. 166	0	0	0	0	0	914	464	242	584	38	3010	4322	1948	2144	416	6578	10866	4774	11780	0	0	0
Dir. 171	0	0	0	0	0	7250	5258	3428	3716	746	22226	30934	14710	14040	6220	76194	94764	62322	141970	0	0	0
Dir. 174	0	0	0	0	0	12426	8590	2798	6638	736	33940	68430	18482	32630	6566	127086	137662	64162	170452	0	0	0
Dir. 177	0	0	0	0	0	18084	13930	4504	8670	1032	41918	88660	13750	35582	4226	135324	141058	47640	166500	0	0	0
Dir. 180	0	0	0	0	0	51054	34460	14988	43802	5920	73862	145564	39052	108762	18910	160692	200910	67214	322584	0	0	0
Dir. 183	0	0	0	0	0	20736	15500	3426	10322	696	64874	129014	23024	71988	6754	204938	195884	68976	191844	0	0	0
Dir. 186	0	0	0	0	0	12888	10866	1622	7140	272	32430	68010	12930	32068	3576	91440	89996	41648	90074	0	0	0
Dir. 189	0	0	0	0	0	7472	6790	1570	3294	376	25388	41478	11582	16332	3550	67846	74216	49018	83742	0	0	0
Dir. 194	0	0	0	0	0	2408	1510	304	338	38	7006	9140	2498	2492	552	10138	12460	7058	10884	0	0	0
Dir. 197	0	0	0	0	0	6580	4688	2524	2566	802	25798	34644	19302	15952	9566	72882	75626	59790	87486	0	0	0
Dir. 200	0	0	0	0	0	1942	1376	464	364	90	8860	14072	6006	4612	2142	40158	47082	29220	44110	0	0	0
Dir. 203	0	0	0	0	0	2422	1546	1158	642	304	14930	23806	14216	8322	9102	68880	68036	51422	108970	0	0	0
Dir. 206	0	0	0	0	0	1518	606	396	200	68	6954	9806	5518	1806	1926	22762	23406	14240	17398	0	0	0
Dir. 209	0	0	0	0	0	3204	1974	1642	886	530	16474	22546	20640	7742	12732	59608	46840	41562	50834	0	0	0
Dir. 212	0	0	0	0	0	5922	2032	2376	850	990	21104	23064	22410	8012	11370	86544	62204	72762	72350	0	0	0
Filtro DC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro D135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro Paeth	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2256740	2051996	1093624	413314	236706	3917638	1625928	967482	1186038	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 17 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	21915	7038	3819	262	321	85201	33079	21279	869	491	423168	14646	10710	306	202	190057	297	199	1982	0	0	0
Smooth	6195	1866	1213	144	149	31743	26515	12388	431	252	167109	12511	6256	584	463	49991	617	607	1818	0	0	0
Smooth V	1411	473	335	62	67	3279	1678	760	131	56	18993	2388	1019	129	84	8535	116	202	299	0	0	0
Smooth H	4147	1220	572	72	62	9244	3349	914	120	61	32307	1730	806	138	59	6419	155	104	358	0	0	0
Paeth	5044	1379	944	211	122	7282	2281	919	184	67	27744	2565	1309	198	139	8462	405	316	5637	0	0	0
Dir. 36	87	25	8	2	3	195	120	49	28	1	1498	394	85	114	13	713	98	4	380	0	0	0
Dir. 39	121	37	6	8	0	379	166	71	29	12	2971	666	194	206	29	1683	188	34	1120	0	0	0
Dir. 42	72	19	3	0	1	280	136	37	8	0	1592	318	72	76	4	998	140	6	980	0	0	0
Dir. 45	207	46	13	6	1	476	160	65	11	1	2922	428	134	87	10	1352	578	185	1005	0	0	0
Dir. 48	114	35	9	3	1	455	159	72	13	1	2932	371	175	87	23	2017	320	20	1184	0	0	0
Dir. 51	221	50	17	7	3	688	250	102	15	6	4812	462	199	73	9	1491	218	8	1036	0	0	0
Dir. 54	94	8	7	1	1	309	103	66	1	0	2105	127	66	14	0	531	34	6	416	0	0	0
Dir. 58	206	47	24	5	3	638	195	146	15	6	4428	410	243	49	12	1978	464	34	2404	0	0	0
Dir. 61	360	71	66	3	1	981	214	251	17	5	4171	398	291	105	12	1754	250	24	1116	0	0	0
Dir. 64	300	35	69	2	0	768	140	224	2	6	2647	156	186	34	6	1126	90	10	444	0	0	0
Dir. 67	453	75	121	7	4	1316	239	342	15	13	5484	333	407	76	22	2213	544	296	1955	0	0	0
Dir. 70	406	35	107	2	3	1103	145	275	6	7	4270	226	363	57	13	1819	152	30	1164	0	0	0
Dir. 73	657	81	169	21	11	1639	264	408	33	35	8053	470	525	94	30	2680	250	126	2476	0	0	0
Dir. 76	346	33	84	2	2	958	121	232	1	3	3508	137	156	17	9	724	22	32	472	0	0	0
Dir. 81	631	57	152	6	28	1426	185	461	13	33	6802	366	607	67	68	2762	188	84	1772	0	0	0
Dir. 84	1042	103	356	7	68	2211	222	572	12	67	8878	218	540	81	66	2535	130	40	872	0	0	0
Dir. 87	929	99	366	2	60	2632	261	749	10	95	9394	210	646	59	72	3504	86	44	816	0	0	0
Dir. 90	1376	111	532	23	166	16789	12630	11400	20	138	50600	10126	8820	57	79	9781	385	381	1875	0	0	0
Dir. 93	635	123	255	12	42	1891	342	484	20	59	12988	310	973	81	108	4411	102	82	1172	0	0	0
Dir. 96	447	66	60	3	5	807	175	168	23	23	5711	211	308	59	31	2689	82	70	1016	0	0	0
Dir. 99	521	62	80	9	7	889	154	140	14	21	5790	312	345	42	33	2957	192	114	2460	0	0	0
Dir. 104	233	26	35	0	2	442	118	103	3	4	2933	131	210	8	19	911	34	50	592	0	0	0
Dir. 107	371	71	71	5	4	926	244	181	15	22	6029	484	487	36	80	2785	182	156	2316	0	0	0
Dir. 110	185	39	37	2	4	687	163	108	6	13	3862	331	414	25	39	1768	118	64	968	0	0	0
Dir. 113	325	49	47	0	4	753	198	170	13	24	5808	506	662	32	56	2251	537	246	2008	0	0	0
Dir. 116	229	62	42	0	2	625	176	149	6	9	4390	279	400	9	40	1395	52	46	640	0	0	0
Dir. 119	231	76	49	2	2	786	210	206	13	21	6016	706	758	74	81	2897	174	112	1972	0	0	0
Dir. 122	172	41	33	1	1	465	133	118	2	2	4895	269	262	21	8	1195	60	52	612	0	0	0
Dir. 126	94	42	27	0	0	434	162	136	13	15	5009	636	757	33	80	3277	172	244	2412	0	0	0
Dir. 129	83	36	21	5	2	498	197	150	13	28	5104	702	736	56	46	3159	154	124	2204	0	0	0

Tabela 17 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	58	30	18	0	0	354	128	151	8	18	4055	670	645	48	48	3813	146	140	2296	0	0	0
Dir. 135	54	21	19	1	1	304	113	88	8	7	2915	353	294	23	11	2015	424	436	2286	0	0	0
Dir. 138	62	27	18	0	1	266	117	99	20	15	3402	628	557	76	33	4010	192	132	2732	0	0	0
Dir. 141	61	28	10	0	2	207	128	92	16	9	3266	577	404	37	26	2764	128	104	1648	0	0	0
Dir. 144	36	19	25	0	0	209	100	69	19	8	2578	482	250	59	20	2744	252	156	1952	0	0	0
Dir. 148	59	35	19	0	1	172	88	50	3	0	2459	239	102	8	6	1189	18	48	628	0	0	0
Dir. 151	122	60	38	4	12	362	167	120	7	14	4268	672	491	95	45	2582	110	188	1604	0	0	0
Dir. 154	87	42	29	3	5	265	134	63	4	3	2866	329	114	24	9	1225	30	38	540	0	0	0
Dir. 157	99	58	34	11	6	383	183	107	5	5	3863	556	246	63	30	2100	242	428	2032	0	0	0
Dir. 160	54	28	13	8	0	313	167	72	2	5	3038	352	146	44	18	1567	74	64	1068	0	0	0
Dir. 163	55	52	21	9	8	433	231	142	22	17	4824	462	260	67	32	2260	108	126	1396	0	0	0
Dir. 166	27	37	13	2	1	222	151	72	3	0	3757	210	107	12	6	853	30	30	268	0	0	0
Dir. 171	124	79	24	11	12	794	381	221	37	34	10890	865	418	81	46	5059	144	182	2420	0	0	0
Dir. 174	174	114	40	29	6	1524	843	429	83	26	26771	1563	482	79	79	10355	78	120	1312	0	0	0
Dir. 177	306	189	30	30	9	3334	1586	665	66	24	49490	1629	300	50	46	15918	44	36	712	0	0	0
Dir. 180	733	545	70	407	31	37145	50201	25777	310	44	112536	23861	9337	145	62	55591	436	378	2030	0	0	0
Dir. 183	1861	910	53	64	14	11840	7708	813	265	20	55108	2077	348	233	84	14601	78	104	720	0	0	0
Dir. 186	771	626	29	41	1	6444	4751	495	163	8	33169	1209	228	50	50	4528	42	64	372	0	0	0
Dir. 189	348	238	21	12	1	3103	2313	289	87	5	15304	1166	353	78	29	3179	68	134	816	0	0	0
Dir. 194	164	87	16	2	2	1312	997	151	11	1	5788	414	135	12	12	812	32	14	84	0	0	0
Dir. 197	200	96	33	14	3	1297	917	205	51	6	7140	969	379	65	53	3222	52	170	692	0	0	0
Dir. 200	95	33	11	3	1	717	487	130	13	4	3970	746	233	24	25	2386	28	64	360	0	0	0
Dir. 203	128	54	25	1	2	792	503	145	26	4	4469	884	360	64	68	2967	312	494	1271	0	0	0
Dir. 206	89	22	21	1	0	557	304	117	6	6	2551	393	171	8	21	1371	20	72	276	0	0	0
Dir. 209	158	32	37	2	4	807	363	182	34	10	4111	584	559	46	89	2749	22	256	540	0	0	0
Dir. 212	208	35	36	3	8	810	299	243	21	23	5776	527	604	52	67	3036	70	344	996	0	0	0
Filtro DC	0	0	0	0	0	14166	14157	3281	142	64	231853	26319	8173	545	265	104062	915	712	4806	0	0	0
Filtro V	0	0	0	0	0	2239	1282	1976	50	170	21738	2694	3910	421	429	13633	1062	1025	7644	0	0	0
Filtro H	0	0	0	0	0	6669	25699	1759	292	17	153212	33884	3994	1094	257	84772	1657	856	7093	0	0	0
Filtro D135	0	0	0	0	0	9982	7855	2890	144	82	161176	16914	8011	604	353	78324	1069	839	5569	0	0	0
Filtro Paeth	0	0	0	0	0	10556	10672	2747	41	30	136997	11202	3409	201	141	34536	439	286	2041	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	258972	107742	64205	29117	18724	754201	501646	281021	184028	88268	1726081	482124	298792	9712	7776	58872	2334	1789	645	533552	19834	17649

Tabela 18 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	0	0	0	0	0	52308	23648	16116	1628	2440	406738	451468	190024	11428	6098	741552	184484	81810	46772	0	0	0
Smooth	0	0	0	0	0	16036	5478	4186	420	386	100574	121870	60532	4826	2506	268340	85354	38750	47034	0	0	0
Smooth V	0	0	0	0	0	4832	1700	1474	248	124	14644	17254	7428	1478	266	35716	15272	3662	6002	0	0	0
Smooth H	0	0	0	0	0	10876	3548	2704	118	238	25836	30704	11130	930	576	57468	18112	8342	9776	0	0	0
Paeth	0	0	0	0	0	6492	2858	1870	570	426	8174	12556	6042	1326	718	17274	9668	5140	7598	0	0	0
Dir. 36	0	0	0	0	0	270	72	28	4	2	248	394	110	122	4	680	722	170	250	0	0	0
Dir. 39	0	0	0	0	0	530	164	74	18	18	574	612	276	220	50	1498	1440	554	828	0	0	0
Dir. 42	0	0	0	0	0	200	56	10	6	2	174	210	48	8	6	480	462	132	244	0	0	0
Dir. 45	0	0	0	0	0	386	124	58	0	2	512	404	168	52	14	876	692	214	720	0	0	0
Dir. 48	0	0	0	0	0	246	76	38	6	0	410	318	152	48	10	1048	860	406	756	0	0	0
Dir. 51	0	0	0	0	0	714	224	146	20	6	816	738	406	70	24	1038	722	312	542	0	0	0
Dir. 54	0	0	0	0	0	92	14	4	6	2	268	182	96	4	4	166	104	64	68	0	0	0
Dir. 58	0	0	0	0	0	488	164	142	10	8	946	798	440	102	30	1212	1348	548	1298	0	0	0
Dir. 61	0	0	0	0	0	884	250	256	10	6	1072	818	586	130	44	1586	1194	598	1052	0	0	0
Dir. 64	0	0	0	0	0	474	68	206	0	2	470	186	248	4	4	418	228	240	276	0	0	0
Dir. 67	0	0	0	0	0	920	210	402	8	8	1164	702	752	90	78	1720	1178	828	1996	0	0	0
Dir. 70	0	0	0	0	0	722	122	200	4	6	672	372	390	34	36	848	720	510	826	0	0	0
Dir. 73	0	0	0	0	0	1218	308	456	40	20	1626	1198	1104	144	110	2318	1338	1092	1468	0	0	0
Dir. 76	0	0	0	0	0	228	48	110	0	0	356	220	168	6	12	324	154	188	164	0	0	0
Dir. 81	0	0	0	0	0	1492	220	744	16	86	1256	712	958	56	202	1576	1268	1096	1584	0	0	0
Dir. 84	0	0	0	0	0	2294	388	1176	30	212	1540	540	1062	46	188	1556	854	1036	1170	0	0	0
Dir. 87	0	0	0	0	0	1494	274	1148	16	228	1600	344	1166	44	330	1722	840	1282	1374	0	0	0
Dir. 90	0	0	0	0	0	2794	446	1304	60	294	32574	26238	23658	182	594	90350	21260	17546	9240	0	0	0
Dir. 93	0	0	0	0	0	1682	454	1132	8	204	2102	596	1624	68	384	2416	1350	1712	2186	0	0	0
Dir. 96	0	0	0	0	0	1074	260	366	16	46	924	548	688	58	110	1222	766	766	1042	0	0	0
Dir. 99	0	0	0	0	0	1264	280	316	8	34	938	666	608	62	106	1460	1248	974	1712	0	0	0
Dir. 104	0	0	0	0	0	168	36	58	0	6	324	150	214	22	38	248	170	178	212	0	0	0
Dir. 107	0	0	0	0	0	1080	342	260	20	22	1378	1198	1086	124	206	1990	1500	1304	1644	0	0	0
Dir. 110	0	0	0	0	0	466	88	140	0	4	422	242	330	10	38	634	568	486	776	0	0	0
Dir. 113	0	0	0	0	0	714	160	208	6	14	808	692	598	34	136	1240	968	886	2046	0	0	0
Dir. 116	0	0	0	0	0	412	86	108	0	0	420	256	342	6	6	466	234	324	312	0	0	0
Dir. 119	0	0	0	0	0	828	258	218	10	4	976	934	686	112	126	1776	1444	1072	1948	0	0	0
Dir. 122	0	0	0	0	0	298	142	86	0	0	570	470	280	22	4	496	396	214	514	0	0	0
Dir. 126	0	0	0	0	0	344	134	94	8	2	1572	1562	1022	60	62	1774	1324	1388	1474	0	0	0
Dir. 129	0	0	0	0	0	442	190	122	12	12	2268	2004	1314	162	164	2454	1710	1440	1884	0	0	0

Tabela 18 – Contagem realizada na decodificação intraquqdro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos 4K (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	0	0	0	0	0	222	72	60	4	0	1146	920	654	44	42	2028	1652	1312	1480	0	0	0
Dir. 135	0	0	0	0	0	88	34	42	0	2	434	344	246	6	10	506	378	318	1098	0	0	0
Dir. 138	0	0	0	0	0	194	124	72	12	2	1300	1268	874	114	78	2344	2218	1850	2292	0	0	0
Dir. 141	0	0	0	0	0	310	156	104	6	2	2180	1786	1228	180	70	2062	1320	1058	1560	0	0	0
Dir. 144	0	0	0	0	0	166	102	74	2	4	1510	1244	774	84	58	1244	1452	922	1390	0	0	0
Dir. 148	0	0	0	0	0	60	30	20	0	0	624	610	280	4	10	580	304	266	420	0	0	0
Dir. 151	0	0	0	0	0	434	226	250	36	48	2802	2546	1818	156	186	3858	2112	1838	2334	0	0	0
Dir. 154	0	0	0	0	0	100	56	18	0	2	412	414	134	16	2	426	446	194	380	0	0	0
Dir. 157	0	0	0	0	0	186	156	74	16	2	1210	1388	642	68	24	1988	1472	874	2442	0	0	0
Dir. 160	0	0	0	0	0	102	68	36	14	4	624	732	224	44	14	1036	914	452	942	0	0	0
Dir. 163	0	0	0	0	0	376	288	138	68	26	2092	2588	1366	150	142	3806	2156	1438	2128	0	0	0
Dir. 166	0	0	0	0	0	80	56	14	2	4	390	624	188	32	4	600	348	98	248	0	0	0
Dir. 171	0	0	0	0	0	426	446	90	60	22	1886	3402	808	258	104	5254	3212	1394	2576	0	0	0
Dir. 174	0	0	0	0	0	1052	1066	116	90	12	4938	11110	1800	488	82	17790	9802	2162	3636	0	0	0
Dir. 177	0	0	0	0	0	1464	1310	154	178	10	5762	12606	1306	574	50	18420	8102	1706	3000	0	0	0
Dir. 180	0	0	0	0	0	2264	2406	446	732	108	79518	119360	56626	2030	268	236120	56184	20688	16238	0	0	0
Dir. 183	0	0	0	0	0	2208	2052	134	172	8	8674	18850	2098	1186	94	29258	15760	2980	4410	0	0	0
Dir. 186	0	0	0	0	0	1570	2146	140	84	4	6760	16356	2082	516	38	18852	9222	1516	2014	0	0	0
Dir. 189	0	0	0	0	0	738	870	114	34	10	3416	7100	930	296	32	7690	3800	1190	1664	0	0	0
Dir. 194	0	0	0	0	0	342	268	38	8	0	564	928	152	50	8	616	394	178	274	0	0	0
Dir. 197	0	0	0	0	0	750	506	204	32	6	1982	2744	1166	290	136	3732	2064	1316	1850	0	0	0
Dir. 200	0	0	0	0	0	204	158	42	2	2	626	906	212	78	32	1382	1126	566	762	0	0	0
Dir. 203	0	0	0	0	0	366	176	88	12	2	954	1232	550	134	134	2388	1774	1092	2344	0	0	0
Dir. 206	0	0	0	0	0	168	66	28	4	2	334	374	152	28	32	680	524	240	290	0	0	0
Dir. 209	0	0	0	0	0	476	224	98	14	24	1366	1536	926	184	254	2872	1240	1048	1172	0	0	0
Dir. 212	0	0	0	0	0	702	146	184	14	30	1278	1104	822	124	156	2482	1272	1398	1242	0	0	0
Filtro DC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro D135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro Paeth	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	272972	346502	130344	7640	3978	529720	154102	64340	36134	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	1067104	39668	35298	0	0	517944	215484	128410	58234	37448	1508402	1003292	562042	368056	176536	3452162	983672	613136	127280	0	0	0

Tabela 19 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	267873	27061	23482	17018	16208	476882	101203	93078	49487	29263	2619651	203123	172943	16823	12409	8122911	10027	8126	98652	0	0	0
Smooth	66841	18250	17992	10366	10113	247610	98232	59891	25963	14877	1779233	245187	156458	32940	26305	2012452	32895	32372	94957	0	0	0
Smooth V	14281	4976	6363	3820	3532	55564	23533	15318	8390	4131	333044	61580	39869	6459	6182	421325	6554	11104	23659	0	0	0
Smooth H	38661	9493	6639	4867	3808	98497	33848	16932	7431	3764	577240	62132	32964	7498	4007	292233	7874	5460	18118	0	0	0
Paeth	43187	11542	9119	13502	7021	78379	24720	12149	12811	7561	366614	62720	34021	13854	9918	269648	18588	13645	274868	0	0	0
Dir. 36	1190	319	237	184	98	3842	3103	749	2717	177	43324	22960	4540	8586	730	39412	5748	486	25228	0	0	0
Dir. 39	1810	424	225	411	138	6438	4079	1485	2351	436	77580	28423	7770	11571	1329	76829	12044	1022	53980	0	0	0
Dir. 42	423	180	59	71	15	3755	2163	690	822	109	30343	15523	3957	5498	244	49642	10124	468	50180	0	0	0
Dir. 45	1632	473	186	244	50	7291	3317	1308	920	200	64886	18941	5979	6138	651	72067	35262	10107	61252	0	0	0
Dir. 48	843	297	142	156	65	7818	3048	1246	800	196	56593	17128	6881	5566	804	98691	19298	1616	63276	0	0	0
Dir. 51	2253	707	407	459	164	9796	4104	2003	1220	343	96022	18860	8594	4763	826	68560	15522	1188	61048	0	0	0
Dir. 54	465	128	75	25	19	3751	1202	853	149	47	23417	3978	2389	705	59	19331	2550	392	16604	0	0	0
Dir. 58	2668	659	385	418	122	11781	4222	2310	1006	325	87723	17428	10709	3402	724	101482	23342	1552	132948	0	0	0
Dir. 61	4563	948	845	463	197	14409	4107	3499	982	566	101409	17990	12573	6306	1546	82615	12414	1026	58208	0	0	0
Dir. 64	2269	320	639	134	75	11080	2231	2762	260	184	52479	5971	8863	1416	472	43727	4860	572	25776	0	0	0
Dir. 67	4772	1086	1308	424	268	17455	4175	5283	819	691	118718	13773	18205	4231	1279	91935	30470	17284	101841	0	0	0
Dir. 70	2209	413	667	166	137	11979	2602	3435	412	462	69921	8699	14737	2823	971	74040	7460	1284	57428	0	0	0
Dir. 73	7491	1483	1529	1099	680	21694	5143	5940	1330	1653	172983	17698	22369	5072	2727	110280	12842	7526	125960	0	0	0
Dir. 76	1574	219	318	155	140	10452	1512	2118	191	285	49560	3785	5013	772	655	27112	1834	1818	22504	0	0	0
Dir. 81	6887	1136	2056	436	1167	23159	4221	8347	767	2239	163787	15524	28967	3931	3898	130582	10996	4116	93588	0	0	0
Dir. 84	25769	1702	5539	481	3961	35384	4530	11983	678	3644	238449	10603	22839	4696	3949	119186	6384	2982	45816	0	0	0
Dir. 87	19092	1687	5928	380	3863	41068	5238	15116	854	5411	225906	9241	31285	3927	4595	172688	5116	2678	41276	0	0	0
Dir. 90	31886	3038	13117	1070	12553	41889	2995	27806	1251	9391	209674	8840	44670	3638	5143	358935	22447	20107	101887	0	0	0
Dir. 93	14841	2131	4950	521	2988	33962	5872	11233	1433	3528	246312	12348	43182	5186	5524	206181	6072	3810	57916	0	0	0
Dir. 96	3734	880	845	246	717	8816	2833	3186	835	1014	111140	9735	13277	4109	1974	106091	5456	4080	50900	0	0	0
Dir. 99	6694	1158	893	593	412	10833	3103	2800	1155	1039	144430	14392	15712	3213	2139	137231	12114	4664	128676	0	0	0
Dir. 104	189	114	104	44	84	1906	662	733	107	322	25101	2572	4839	454	1093	31348	1936	2856	31392	0	0	0
Dir. 107	590	487	405	219	257	4684	2607	1915	772	961	76220	12746	15200	2426	4031	103403	12236	9156	122112	0	0	0
Dir. 110	212	204	158	50	81	2699	1353	1004	158	385	37970	8096	10699	1256	1948	65980	5652	3486	51868	0	0	0
Dir. 113	384	362	313	128	206	4132	2276	1668	541	696	58867	12146	15314	2400	3072	72724	31028	13363	104407	0	0	0
Dir. 116	224	252	168	48	78	3130	1342	1148	179	318	35378	6214	9878	767	1927	45035	3886	1798	34660	0	0	0
Dir. 119	527	492	314	243	222	4825	2685	1789	1042	745	63614	18196	18221	4742	5016	90346	12588	8196	103608	0	0	0
Dir. 122	202	193	92	85	39	2598	1110	613	123	107	27620	3928	3738	697	825	31239	4842	2454	36116	0	0	0
Dir. 126	177	320	194	108	96	3785	2147	1625	595	661	56671	14373	15702	2407	4907	101360	14004	16898	130524	0	0	0
Dir. 129	159	274	176	146	67	3932	2162	1699	636	605	54003	13398	12949	2565	2545	81818	11092	9514	113196	0	0	0

Tabela 19 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC (continuação)

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	94	182	124	68	51	3127	1632	1508	485	387	44972	13259	12701	2284	2315	99379	9274	7690	125712	0	0	0
Dir. 135	115	105	93	42	50	2512	1175	1038	261	258	30691	6469	5254	783	606	51660	22633	24085	116997	0	0	0
Dir. 138	95	143	133	79	58	2605	1442	1348	636	451	40869	14482	11885	3088	1948	107894	9400	8388	134492	0	0	0
Dir. 141	144	216	202	80	84	2358	1245	1074	517	296	35776	11650	8389	1764	1078	73470	7544	6814	86684	0	0	0
Dir. 144	511	329	577	154	124	2915	1341	1208	628	515	38086	14024	8330	3502	1118	96396	13610	9578	110032	0	0	0
Dir. 148	312	180	257	71	54	1320	432	388	117	94	15598	3221	2414	584	323	27760	1542	3512	31964	0	0	0
Dir. 151	1349	540	1352	393	586	5216	1926	1966	833	926	54325	18954	14099	5308	2752	94212	6082	9774	80764	0	0	0
Dir. 154	1388	463	725	180	178	4435	1163	969	240	141	29317	9257	4040	1701	403	43541	2004	3558	27496	0	0	0
Dir. 157	761	500	705	695	196	4889	1998	1876	801	469	47933	15478	7937	4234	1629	80824	14433	26362	112747	0	0	0
Dir. 160	383	310	312	429	64	3019	1478	1093	468	283	35070	11466	5990	2710	983	69766	4422	4506	56872	0	0	0
Dir. 163	1123	565	692	591	294	6487	2673	2379	1196	988	60544	18098	9114	3562	1915	98374	5426	6696	79040	0	0	0
Dir. 166	133	104	103	85	21	1342	714	618	256	82	15636	4574	1798	693	258	26551	2008	1044	16596	0	0	0
Dir. 171	3326	1093	1314	845	484	14770	5331	4050	2098	1854	133533	33722	17829	3747	3651	221148	7730	10116	128496	0	0	0
Dir. 174	4324	2048	1737	1335	496	19122	11246	5260	4987	1392	226762	51743	15406	4742	5638	368167	5468	5896	72980	0	0	0
Dir. 177	7682	3944	1663	1683	474	33611	15649	8139	4390	1769	332116	57727	10591	3130	3073	846168	2952	3474	37916	0	0	0
Dir. 180	21280	12454	3697	24151	1423	41347	50026	5321	16864	3369	205584	92324	12070	7918	4024	2157546	24535	22084	114037	0	0	0
Dir. 183	16597	5436	1520	3832	400	102046	57525	9993	16424	1428	387227	72150	11385	9064	4194	770922	5002	5592	43236	0	0	0
Dir. 186	6431	3185	709	2914	126	53436	33373	5405	9098	538	214279	40252	8680	3713	3018	163375	2064	4592	25544	0	0	0
Dir. 189	3125	1385	548	847	172	30239	18643	4179	4351	519	137399	41309	13216	3443	2395	139544	2794	9526	43296	0	0	0
Dir. 194	771	169	88	102	25	10505	3607	1299	638	75	29701	7248	2765	723	433	26800	744	1288	4912	0	0	0
Dir. 197	1790	916	643	601	255	16166	8493	3534	2909	746	104762	35749	16297	3679	2945	142223	3468	9030	35336	0	0	0
Dir. 200	560	275	281	175	48	9629	5581	2081	1236	278	66421	32514	12495	1966	1857	124545	2160	7088	23684	0	0	0
Dir. 203	956	375	426	167	150	11533	7093	3224	1577	701	89250	35658	18464	2682	3278	156740	15215	28956	68468	0	0	0
Dir. 206	470	195	231	67	42	7827	4320	2205	474	393	53037	18247	10422	807	1336	79000	1424	6224	19236	0	0	0
Dir. 209	1212	309	454	118	160	11951	5337	3750	1102	938	86482	24401	22760	2154	4701	124225	2232	11302	32580	0	0	0
Dir. 212	2653	457	758	174	407	14418	5725	6463	1330	1844	134809	26224	34156	2700	4067	185940	4018	21942	61044	0	0	0
Filtro 0	0	0	0	0	0	112759	48419	21644	8519	3460	1136075	162157	77764	28503	16982	933450	36328	27984	196897	0	0	0
Filtro 1	0	0	0	0	0	11138	4439	19386	3038	9787	142958	41956	94183	24856	29335	355765	47158	50978	352060	0	0	0
Filtro 2	0	0	0	0	0	22825	52981	4569	18419	1815	306608	215289	28010	57837	15394	734652	70805	35744	335418	0	0	0
Filtro 3	0	0	0	0	0	88495	35630	19967	7276	3980	954118	153184	94397	31615	20232	1058891	49615	39793	232678	0	0	0
Filtro 4	0	0	0	0	0	28287	13484	7490	3519	1658	340942	53822	27222	11461	6797	231996	15288	12293	78165	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 20 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	0	0	0	0	0	701792	228816	250818	108572	151696	2820450	2549282	1449454	653484	361712	5133802	2158226	1311300	1554680	0	0	0
Smooth	0	0	0	0	0	144696	55120	50840	27920	23262	567668	692734	451568	305138	158942	1986686	1464116	887390	2098578	0	0	0
Smooth V	0	0	0	0	0	37270	17880	15274	12806	6082	136568	202980	87162	90904	16094	468100	390718	107078	306544	0	0	0
Smooth H	0	0	0	0	0	67834	27030	27998	11024	16030	197336	239890	127290	59110	38482	602998	354170	225958	470672	0	0	0
Paeth	0	0	0	0	0	112836	39840	30558	36408	22194	113580	130670	84008	82820	52122	266896	284248	191238	385228	0	0	0
Dir. 36	0	0	0	0	0	2750	864	704	446	162	4402	11098	3426	9654	724	25738	42298	10318	15208	0	0	0
Dir. 39	0	0	0	0	0	4836	1654	1884	914	708	10028	14726	6754	11536	2380	46120	61372	21426	34332	0	0	0
Dir. 42	0	0	0	0	0	974	404	218	136	34	3938	5034	1668	1886	240	18474	24860	7116	15018	0	0	0
Dir. 45	0	0	0	0	0	2414	1396	834	796	210	8272	9722	3864	4132	530	28526	35620	10384	39404	0	0	0
Dir. 48	0	0	0	0	0	1124	798	568	470	144	8106	8158	3722	3086	1044	36332	45466	19770	39852	0	0	0
Dir. 51	0	0	0	0	0	6202	2524	1816	1254	542	12270	14376	7686	5452	1798	32236	34946	15162	31864	0	0	0
Dir. 54	0	0	0	0	0	800	312	244	78	28	3566	3404	1958	482	182	4912	4674	2958	3038	0	0	0
Dir. 58	0	0	0	0	0	3734	2318	1542	740	530	19520	16756	10540	5608	2634	44354	65608	26468	67720	0	0	0
Dir. 61	0	0	0	0	0	8078	2694	2902	964	836	18648	18572	13116	7212	2766	48786	48518	27048	53848	0	0	0
Dir. 64	0	0	0	0	0	3852	804	2200	122	86	8480	4708	4718	1112	464	15408	12158	12328	16486	0	0	0
Dir. 67	0	0	0	0	0	7410	2410	3558	756	720	18502	14696	12932	4754	3072	48498	49780	35240	101692	0	0	0
Dir. 70	0	0	0	0	0	2778	1016	1492	238	284	10540	8324	7100	2110	1392	29172	28090	24326	38586	0	0	0
Dir. 73	0	0	0	0	0	12430	4260	5376	1938	1788	29828	25764	21690	7948	7494	66110	64420	48656	78682	0	0	0
Dir. 76	0	0	0	0	0	1942	446	682	56	154	7074	4964	4048	1040	906	8536	7712	7390	8972	0	0	0
Dir. 81	0	0	0	0	0	18002	3634	8396	978	4866	23812	14872	19862	4658	10194	55700	58572	54374	82478	0	0	0
Dir. 84	0	0	0	0	0	54064	7952	25874	1390	17110	30514	14630	24220	3886	11462	53542	42828	47340	67464	0	0	0
Dir. 87	0	0	0	0	0	26920	4622	17606	502	11078	30368	8074	24646	2680	20966	56958	39210	57846	73420	0	0	0
Dir. 90	0	0	0	0	0	62010	9048	32400	3650	24186	39152	22798	52096	9600	38176	81662	46470	63138	133296	0	0	0
Dir. 93	0	0	0	0	0	32216	8032	21518	910	13658	37724	12442	29176	5088	22666	72930	54082	71932	102468	0	0	0
Dir. 96	0	0	0	0	0	7602	2250	5446	648	3068	14522	10216	11558	2988	4698	31606	32774	33242	57184	0	0	0
Dir. 99	0	0	0	0	0	9808	3756	3940	968	2286	14480	14794	12726	5666	5972	42776	55534	39092	87554	0	0	0
Dir. 104	0	0	0	0	0	538	286	412	52	298	2598	2722	3278	700	2442	5946	6164	8546	9206	0	0	0
Dir. 107	0	0	0	0	0	3324	2782	2236	1152	1408	15274	20468	17522	6694	9264	55118	65462	56962	89648	0	0	0
Dir. 110	0	0	0	0	0	646	532	488	116	162	3352	4194	3784	950	1626	16046	23620	20908	40520	0	0	0
Dir. 113	0	0	0	0	0	1660	1388	1152	366	622	7486	9320	8112	2780	3154	28766	41762	32572	102616	0	0	0
Dir. 116	0	0	0	0	0	510	314	456	78	128	2566	2978	2912	552	656	8582	9432	11000	16168	0	0	0
Dir. 119	0	0	0	0	0	2688	2626	1740	882	818	11370	16934	11766	5908	4902	45606	61120	45480	93330	0	0	0
Dir. 122	0	0	0	0	0	626	592	416	138	106	3796	5638	2742	1102	366	8292	14134	7428	23010	0	0	0
Dir. 126	0	0	0	0	0	1000	1024	946	442	324	11608	16402	11152	4740	3644	36514	51302	50912	78452	0	0	0
Dir. 129	0	0	0	0	0	1010	1792	1206	740	436	14942	20872	15466	6180	4324	40770	48402	43112	82132	0	0	0

Tabela 20 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Onlyintra - sequências de vídeos da CTC (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	0	0	0	0	0	622	664	610	254	178	9774	12106	8948	3140	2156	38518	55486	44244	72396	0	0	0
Dir. 135	0	0	0	0	0	368	444	400	122	46	4866	4892	3572	588	432	9450	13012	10586	57856	0	0	0
Dir. 138	0	0	0	0	0	730	890	724	424	272	11498	15122	11536	5060	3630	47790	74500	65122	106374	0	0	0
Dir. 141	0	0	0	0	0	1986	1172	1092	576	364	13814	15474	11542	4612	3182	29730	37432	30724	67650	0	0	0
Dir. 144	0	0	0	0	0	2340	1646	1878	420	484	17178	16362	13342	4926	3894	34554	52168	37510	72736	0	0	0
Dir. 148	0	0	0	0	0	428	360	302	160	62	5510	4874	3850	642	548	8416	9702	9694	22006	0	0	0
Dir. 151	0	0	0	0	0	5992	3232	6282	2618	2252	29038	25964	25596	9036	8692	70384	64280	60358	111494	0	0	0
Dir. 154	0	0	0	0	0	1652	600	380	230	94	3644	4620	2156	990	182	10016	16634	7630	19752	0	0	0
Dir. 157	0	0	0	0	0	2544	1680	1878	1548	386	12740	15320	10472	5004	2268	41258	47866	39172	135058	0	0	0
Dir. 160	0	0	0	0	0	1106	896	632	974	92	5990	7188	4426	2668	806	21736	32620	20170	48880	0	0	0
Dir. 163	0	0	0	0	0	4650	2646	3264	3254	1064	23224	24688	20292	9914	7080	65176	64838	52878	103346	0	0	0
Dir. 166	0	0	0	0	0	914	464	242	584	38	3010	4322	1948	2144	416	6578	10866	4774	11780	0	0	0
Dir. 171	0	0	0	0	0	7250	5258	3428	3716	746	22226	30934	14710	14040	6220	76194	94764	62322	141970	0	0	0
Dir. 174	0	0	0	0	0	12426	8590	2798	6638	736	33940	68430	18482	32630	6566	127086	137662	64162	170452	0	0	0
Dir. 177	0	0	0	0	0	18084	13930	4504	8670	1032	41918	88660	13750	35582	4226	135324	141058	47640	166500	0	0	0
Dir. 180	0	0	0	0	0	51054	34460	14988	43802	5920	73862	145564	39052	108762	18910	160692	200910	67214	322584	0	0	0
Dir. 183	0	0	0	0	0	20736	15500	3426	10322	696	64874	129014	23024	71988	6754	204938	195884	68976	191844	0	0	0
Dir. 186	0	0	0	0	0	12888	10866	1622	7140	272	32430	68010	12930	32068	3576	91440	89996	41648	90074	0	0	0
Dir. 189	0	0	0	0	0	7472	6790	1570	3294	376	25388	41478	11582	16332	3550	67846	74216	49018	83742	0	0	0
Dir. 194	0	0	0	0	0	2408	1510	304	338	38	7006	9140	2498	2492	552	10138	12460	7058	10884	0	0	0
Dir. 197	0	0	0	0	0	6580	4688	2524	2566	802	25798	34644	19302	15952	9566	72882	75626	59790	87486	0	0	0
Dir. 200	0	0	0	0	0	1942	1376	464	364	90	8860	14072	6006	4612	2142	40158	47082	29220	44110	0	0	0
Dir. 203	0	0	0	0	0	2422	1546	1158	642	304	14930	23806	14216	8322	9102	68880	68036	51422	108970	0	0	0
Dir. 206	0	0	0	0	0	1518	606	396	200	68	6954	9806	5518	1806	1926	22762	23406	14240	17398	0	0	0
Dir. 209	0	0	0	0	0	3204	1974	1642	886	530	16474	22546	20640	7742	12732	59608	46840	41562	50834	0	0	0
Dir. 212	0	0	0	0	0	5922	2032	2376	850	990	21104	23064	22410	8012	11370	86544	62204	72762	72350	0	0	0
Filtro 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2256740	2051996	1093624	413314	236706	3917638	1625928	967482	1186038	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 21 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - LowDelay - sequências de vídeos da CTC

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	21915	7038	3819	262	321	85201	33079	21279	869	491	423168	14646	10710	306	202	190057	297	199	1982	0	0	0
Smooth	6195	1866	1213	144	149	31743	26515	12388	431	252	167109	12511	6256	584	463	49991	617	607	1818	0	0	0
Smooth V	1411	473	335	62	67	3279	1678	760	131	56	18993	2388	1019	129	84	8535	116	202	299	0	0	0
Smooth H	4147	1220	572	72	62	9244	3349	914	120	61	32307	1730	806	138	59	6419	155	104	358	0	0	0
Paeth	5044	1379	944	211	122	7282	2281	919	184	67	27744	2565	1309	198	139	8462	405	316	5637	0	0	0
Dir. 36	87	25	8	2	3	195	120	49	28	1	1498	394	85	114	13	713	98	4	380	0	0	0
Dir. 39	121	37	6	8	0	379	166	71	29	12	2971	666	194	206	29	1683	188	34	1120	0	0	0
Dir. 42	72	19	3	0	1	280	136	37	8	0	1592	318	72	76	4	998	140	6	980	0	0	0
Dir. 45	207	46	13	6	1	476	160	65	11	1	2922	428	134	87	10	1352	578	185	1005	0	0	0
Dir. 48	114	35	9	3	1	455	159	72	13	1	2932	371	175	87	23	2017	320	20	1184	0	0	0
Dir. 51	221	50	17	7	3	688	250	102	15	6	4812	462	199	73	9	1491	218	8	1036	0	0	0
Dir. 54	94	8	7	1	1	309	103	66	1	0	2105	127	66	14	0	531	34	6	416	0	0	0
Dir. 58	206	47	24	5	3	638	195	146	15	6	4428	410	243	49	12	1978	464	34	2404	0	0	0
Dir. 61	360	71	66	3	1	981	214	251	17	5	4171	398	291	105	12	1754	250	24	1116	0	0	0
Dir. 64	300	35	69	2	0	768	140	224	2	6	2647	156	186	34	6	1126	90	10	444	0	0	0
Dir. 67	453	75	121	7	4	1316	239	342	15	13	5484	333	407	76	22	2213	544	296	1955	0	0	0
Dir. 70	406	35	107	2	3	1103	145	275	6	7	4270	226	363	57	13	1819	152	30	1164	0	0	0
Dir. 73	657	81	169	21	11	1639	264	408	33	35	8053	470	525	94	30	2680	250	126	2476	0	0	0
Dir. 76	346	33	84	2	2	958	121	232	1	3	3508	137	156	17	9	724	22	32	472	0	0	0
Dir. 81	631	57	152	6	28	1426	185	461	13	33	6802	366	607	67	68	2762	188	84	1772	0	0	0
Dir. 84	1042	103	356	7	68	2211	222	572	12	67	8878	218	540	81	66	2535	130	40	872	0	0	0
Dir. 87	929	99	366	2	60	2632	261	749	10	95	9394	210	646	59	72	3504	86	44	816	0	0	0
Dir. 90	1376	111	532	23	166	16789	12630	11400	20	138	50600	10126	8820	57	79	9781	385	381	1875	0	0	0
Dir. 93	635	123	255	12	42	1891	342	484	20	59	12988	310	973	81	108	4411	102	82	1172	0	0	0
Dir. 96	447	66	60	3	5	807	175	168	23	23	5711	211	308	59	31	2689	82	70	1016	0	0	0
Dir. 99	521	62	80	9	7	889	154	140	14	21	5790	312	345	42	33	2957	192	114	2460	0	0	0
Dir. 104	233	26	35	0	2	442	118	103	3	4	2933	131	210	8	19	911	34	50	592	0	0	0
Dir. 107	371	71	71	5	4	926	244	181	15	22	6029	484	487	36	80	2785	182	156	2316	0	0	0
Dir. 110	185	39	37	2	4	687	163	108	6	13	3862	331	414	25	39	1768	118	64	968	0	0	0
Dir. 113	325	49	47	0	4	753	198	170	13	24	5808	506	662	32	56	2251	537	246	2008	0	0	0
Dir. 116	229	62	42	0	2	625	176	149	6	9	4390	279	400	9	40	1395	52	46	640	0	0	0
Dir. 119	231	76	49	2	2	786	210	206	13	21	6016	706	758	74	81	2897	174	112	1972	0	0	0
Dir. 122	172	41	33	1	1	465	133	118	2	2	4895	269	262	21	8	1195	60	52	612	0	0	0
Dir. 126	94	42	27	0	0	434	162	136	13	15	5009	636	757	33	80	3277	172	244	2412	0	0	0
Dir. 129	83	36	21	5	2	498	197	150	13	28	5104	702	736	56	46	3159	154	124	2204	0	0	0

Tabela 21 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de Luminância - LowDelay - sequências de vídeos da CTC (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	58	30	18	0	0	354	128	151	8	18	4055	670	645	48	48	3813	146	140	2296	0	0	0
Dir. 135	54	21	19	1	1	304	113	88	8	7	2915	353	294	23	11	2015	424	436	2286	0	0	0
Dir. 138	62	27	18	0	1	266	117	99	20	15	3402	628	557	76	33	4010	192	132	2732	0	0	0
Dir. 141	61	28	10	0	2	207	128	92	16	9	3266	577	404	37	26	2764	128	104	1648	0	0	0
Dir. 144	36	19	25	0	0	209	100	69	19	8	2578	482	250	59	20	2744	252	156	1952	0	0	0
Dir. 148	59	35	19	0	1	172	88	50	3	0	2459	239	102	8	6	1189	18	48	628	0	0	0
Dir. 151	122	60	38	4	12	362	167	120	7	14	4268	672	491	95	45	2582	110	188	1604	0	0	0
Dir. 154	87	42	29	3	5	265	134	63	4	3	2866	329	114	24	9	1225	30	38	540	0	0	0
Dir. 157	99	58	34	11	6	383	183	107	5	5	3863	556	246	63	30	2100	242	428	2032	0	0	0
Dir. 160	54	28	13	8	0	313	167	72	2	5	3038	352	146	44	18	1567	74	64	1068	0	0	0
Dir. 163	55	52	21	9	8	433	231	142	22	17	4824	462	260	67	32	2260	108	126	1396	0	0	0
Dir. 166	27	37	13	2	1	222	151	72	3	0	3757	210	107	12	6	853	30	30	268	0	0	0
Dir. 171	124	79	24	11	12	794	381	221	37	34	10890	865	418	81	46	5059	144	182	2420	0	0	0
Dir. 174	174	114	40	29	6	1524	843	429	83	26	26771	1563	482	79	79	10355	78	120	1312	0	0	0
Dir. 177	306	189	30	30	9	3334	1586	665	66	24	49490	1629	300	50	46	15918	44	36	712	0	0	0
Dir. 180	733	545	70	407	31	37145	50201	25777	310	44	112536	23861	9337	145	62	55591	436	378	2030	0	0	0
Dir. 183	1861	910	53	64	14	11840	7708	813	265	20	55108	2077	348	233	84	14601	78	104	720	0	0	0
Dir. 186	771	626	29	41	1	6444	4751	495	163	8	33169	1209	228	50	50	4528	42	64	372	0	0	0
Dir. 189	348	238	21	12	1	3103	2313	289	87	5	15304	1166	353	78	29	3179	68	134	816	0	0	0
Dir. 194	164	87	16	2	2	1312	997	151	11	1	5788	414	135	12	12	812	32	14	84	0	0	0
Dir. 197	200	96	33	14	3	1297	917	205	51	6	7140	969	379	65	53	3222	52	170	692	0	0	0
Dir. 200	95	33	11	3	1	717	487	130	13	4	3970	746	233	24	25	2386	28	64	360	0	0	0
Dir. 203	128	54	25	1	2	792	503	145	26	4	4469	884	360	64	68	2967	312	494	1271	0	0	0
Dir. 206	89	22	21	1	0	557	304	117	6	6	2551	393	171	8	21	1371	20	72	276	0	0	0
Dir. 209	158	32	37	2	4	807	363	182	34	10	4111	584	559	46	89	2749	22	256	540	0	0	0
Dir. 212	208	35	36	3	8	810	299	243	21	23	5776	527	604	52	67	3036	70	344	996	0	0	0
Filtro 0	0	0	0	0	0	14166	14157	3281	142	64	231853	26319	8173	545	265	104062	915	712	4806	0	0	0
Filtro 1	0	0	0	0	0	2239	1282	1976	50	170	21738	2694	3910	421	429	13633	1062	1025	7644	0	0	0
Filtro 2	0	0	0	0	0	6669	25699	1759	292	17	153212	33884	3994	1094	257	84772	1657	856	7093	0	0	0
Filtro 3	0	0	0	0	0	9982	7855	2890	144	82	161176	16914	8011	604	353	78324	1069	839	5569	0	0	0
Filtro 4	0	0	0	0	0	10556	10672	2747	41	30	136997	11202	3409	201	141	34536	439	286	2041	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	258972	107742	64205	29117	18724	754201	501646	281021	184028	88268	1726081	482124	298792	9712	7776	58872	2334	1789	645	533552	19834	17649

Tabela 22 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos da CTC.

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
DC	0	0	0	0	0	52308	23648	16116	1628	2440	406738	451468	190024	11428	6098	741552	184484	81810	46772	0	0	0
Smooth	0	0	0	0	0	16036	5478	4186	420	386	100574	121870	60532	4826	2506	268340	85354	38750	47034	0	0	0
Smooth V	0	0	0	0	0	4832	1700	1474	248	124	14644	17254	7428	1478	266	35716	15272	3662	6002	0	0	0
Smooth H	0	0	0	0	0	10876	3548	2704	118	238	25836	30704	11130	930	576	57468	18112	8342	9776	0	0	0
Paeth	0	0	0	0	0	6492	2858	1870	570	426	8174	12556	6042	1326	718	17274	9668	5140	7598	0	0	0
Dir. 36	0	0	0	0	0	270	72	28	4	2	248	394	110	122	4	680	722	170	250	0	0	0
Dir. 39	0	0	0	0	0	530	164	74	18	18	574	612	276	220	50	1498	1440	554	828	0	0	0
Dir. 42	0	0	0	0	0	200	56	10	6	2	174	210	48	8	6	480	462	132	244	0	0	0
Dir. 45	0	0	0	0	0	386	124	58	0	2	512	404	168	52	14	876	692	214	720	0	0	0
Dir. 48	0	0	0	0	0	246	76	38	6	0	410	318	152	48	10	1048	860	406	756	0	0	0
Dir. 51	0	0	0	0	0	714	224	146	20	6	816	738	406	70	24	1038	722	312	542	0	0	0
Dir. 54	0	0	0	0	0	92	14	4	6	2	268	182	96	4	4	166	104	64	68	0	0	0
Dir. 58	0	0	0	0	0	488	164	142	10	8	946	798	440	102	30	1212	1348	548	1298	0	0	0
Dir. 61	0	0	0	0	0	884	250	256	10	6	1072	818	586	130	44	1586	1194	598	1052	0	0	0
Dir. 64	0	0	0	0	0	474	68	206	0	2	470	186	248	4	4	418	228	240	276	0	0	0
Dir. 67	0	0	0	0	0	920	210	402	8	8	1164	702	752	90	78	1720	1178	828	1996	0	0	0
Dir. 70	0	0	0	0	0	722	122	200	4	6	672	372	390	34	36	848	720	510	826	0	0	0
Dir. 73	0	0	0	0	0	1218	308	456	40	20	1626	1198	1104	144	110	2318	1338	1092	1468	0	0	0
Dir. 76	0	0	0	0	0	228	48	110	0	0	356	220	168	6	12	324	154	188	164	0	0	0
Dir. 81	0	0	0	0	0	1492	220	744	16	86	1256	712	958	56	202	1576	1268	1096	1584	0	0	0
Dir. 84	0	0	0	0	0	2294	388	1176	30	212	1540	540	1062	46	188	1556	854	1036	1170	0	0	0
Dir. 87	0	0	0	0	0	1494	274	1148	16	228	1600	344	1166	44	330	1722	840	1282	1374	0	0	0
Dir. 90	0	0	0	0	0	2794	446	1304	60	294	32574	26238	23658	182	594	90350	21260	17546	9240	0	0	0
Dir. 93	0	0	0	0	0	1682	454	1132	8	204	2102	596	1624	68	384	2416	1350	1712	2186	0	0	0
Dir. 96	0	0	0	0	0	1074	260	366	16	46	924	548	688	58	110	1222	766	766	1042	0	0	0
Dir. 99	0	0	0	0	0	1264	280	316	8	34	938	666	608	62	106	1460	1248	974	1712	0	0	0
Dir. 104	0	0	0	0	0	168	36	58	0	6	324	150	214	22	38	248	170	178	212	0	0	0
Dir. 107	0	0	0	0	0	1080	342	260	20	22	1378	1198	1086	124	206	1990	1500	1304	1644	0	0	0
Dir. 110	0	0	0	0	0	466	88	140	0	4	422	242	330	10	38	634	568	486	776	0	0	0
Dir. 113	0	0	0	0	0	714	160	208	6	14	808	692	598	34	136	1240	968	886	2046	0	0	0
Dir. 116	0	0	0	0	0	412	86	108	0	0	420	256	342	6	6	466	234	324	312	0	0	0
Dir. 119	0	0	0	0	0	828	258	218	10	4	976	934	686	112	126	1776	1444	1072	1948	0	0	0
Dir. 122	0	0	0	0	0	298	142	86	0	0	570	470	280	22	4	496	396	214	514	0	0	0
Dir. 126	0	0	0	0	0	344	134	94	8	2	1572	1562	1022	60	62	1774	1324	1388	1474	0	0	0
Dir. 129	0	0	0	0	0	442	190	122	12	12	2268	2004	1314	162	164	2454	1710	1440	1884	0	0	0

Tabela 22 – Contagem realizada na decodificação intraquadro - amostras de crominância - Lowdelay - sequências de vídeos da CTC (continuação).

	64x64	64x32	32x64	64x16	16x64	32x32	32x16	16x32	32x8	8x32	16x16	16x8	8x16	16x4	4x16	8x8	8x4	4x8	4x4	128x128	128x64	64x128
Dir. 132	0	0	0	0	0	222	72	60	4	0	1146	920	654	44	42	2028	1652	1312	1480	0	0	0
Dir. 135	0	0	0	0	0	88	34	42	0	2	434	344	246	6	10	506	378	318	1098	0	0	0
Dir. 138	0	0	0	0	0	194	124	72	12	2	1300	1268	874	114	78	2344	2218	1850	2292	0	0	0
Dir. 141	0	0	0	0	0	310	156	104	6	2	2180	1786	1228	180	70	2062	1320	1058	1560	0	0	0
Dir. 144	0	0	0	0	0	166	102	74	2	4	1510	1244	774	84	58	1244	1452	922	1390	0	0	0
Dir. 148	0	0	0	0	0	60	30	20	0	0	624	610	280	4	10	580	304	266	420	0	0	0
Dir. 151	0	0	0	0	0	434	226	250	36	48	2802	2546	1818	156	186	3858	2112	1838	2334	0	0	0
Dir. 154	0	0	0	0	0	100	56	18	0	2	412	414	134	16	2	426	446	194	380	0	0	0
Dir. 157	0	0	0	0	0	186	156	74	16	2	1210	1388	642	68	24	1988	1472	874	2442	0	0	0
Dir. 160	0	0	0	0	0	102	68	36	14	4	624	732	224	44	14	1036	914	452	942	0	0	0
Dir. 163	0	0	0	0	0	376	288	138	68	26	2092	2588	1366	150	142	3806	2156	1438	2128	0	0	0
Dir. 166	0	0	0	0	0	80	56	14	2	4	390	624	188	32	4	600	348	98	248	0	0	0
Dir. 171	0	0	0	0	0	426	446	90	60	22	1886	3402	808	258	104	5254	3212	1394	2576	0	0	0
Dir. 174	0	0	0	0	0	1052	1066	116	90	12	4938	11110	1800	488	82	17790	9802	2162	3636	0	0	0
Dir. 177	0	0	0	0	0	1464	1310	154	178	10	5762	12606	1306	574	50	18420	8102	1706	3000	0	0	0
Dir. 180	0	0	0	0	0	2264	2406	446	732	108	79518	119360	56626	2030	268	236120	56184	20688	16238	0	0	0
Dir. 183	0	0	0	0	0	2208	2052	134	172	8	8674	18850	2098	1186	94	29258	15760	2980	4410	0	0	0
Dir. 186	0	0	0	0	0	1570	2146	140	84	4	6760	16356	2082	516	38	18852	9222	1516	2014	0	0	0
Dir. 189	0	0	0	0	0	738	870	114	34	10	3416	7100	930	296	32	7690	3800	1190	1664	0	0	0
Dir. 194	0	0	0	0	0	342	268	38	8	0	564	928	152	50	8	616	394	178	274	0	0	0
Dir. 197	0	0	0	0	0	750	506	204	32	6	1982	2744	1166	290	136	3732	2064	1316	1850	0	0	0
Dir. 200	0	0	0	0	0	204	158	42	2	2	626	906	212	78	32	1382	1126	566	762	0	0	0
Dir. 203	0	0	0	0	0	366	176	88	12	2	954	1232	550	134	134	2388	1774	1092	2344	0	0	0
Dir. 206	0	0	0	0	0	168	66	28	4	2	334	374	152	28	32	680	524	240	290	0	0	0
Dir. 209	0	0	0	0	0	476	224	98	14	24	1366	1536	926	184	254	2872	1240	1048	1172	0	0	0
Dir. 212	0	0	0	0	0	702	146	184	14	30	1278	1104	822	124	156	2482	1272	1398	1242	0	0	0
Filtro 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Filtro 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	272972	346502	130344	7640	3978	529720	154102	64340	36134	0	0	0
Palette	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inter+IntraBC	1067104	39668	35298	0	0	517944	215484	128410	58234	37448	1508402	1003292	562042	368056	176536	3452162	983672	613136	127280	0	0	0