

Eric Lucas Gavazzi Vazzoler

***Estudo e Desenvolvimento de Dispositivos Eletrônicos com
Tecnologia HDMI***

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Universidade Federal de
Santa Catarina como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
Grau de Engenheiro Eletricista.
Orientador: Prof. Dr. Raimes Moraes

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vazzoler, Eric Lucas
Estudo e Desenvolvimento de Dispositivos Eletrônicos com
Tecnologia HDMI / Eric Lucas Vazzoler ; orientador, Raimés
Moraes - Florianópolis, SC, 2014.
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Estudo Teórico. 3. Protocolo
HDMI. 4. Desenvolvimento de Hardware. I. Moraes, Raimés.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

Eric Lucas Gavazzi Vazzoler

***Estudo e Desenvolvimento de Dispositivos Eletrônicos com
Tecnologia HDMI***

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Universidade Federal de
Santa Catarina como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
Grau de Engenheiro Eletricista.

Florianópolis, 12 de Julho de 2014.

Prof. Jorge Coelho, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Raimes Moraes, Dr.
Orientador



Prof. Carlos Aurelio Faria Da Rocha, Dr.
Universidade Federal De Santa Catarina



Prof. DJones Vinicius Lettnin, Dr.
Universidade Federal De Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha esposa, Samara Andruchak Vazzoler, pelo companheirismo incondicional e ao meu irmão, Igor Vazzoler, pela constante orientação e apoio em todos os sentidos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo e Patrícia, e irmãos, Igor e Natália, pelo apoio e presença ao longo de todas as fases da vida.

A minha esposa, Samara Andruchak, pelo amor e companheirismo.

Ao meu orientador, Professor Raimes Moraes, pela oportunidade de estudo e pelo apoio no desenvolvimento do Projeto de Conclusão de Curso.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo realizado sobre a tecnologia HDMI com a finalidade de se desenvolver dois produtos eletrônicos que realizam operações sobre essa interface digital de vídeo. Serão mostradas as técnicas e tecnologias que tornam a interface HDMI capaz de transmitir sinais digitais com altíssima taxa de dados, tais como o sinal diferencial, o par trançado e o algoritmo de codificação TMDS. Também será exposto como foi o processo de desenvolvimento dos dispositivos que foram criados para suprir uma demanda do mercado, o extensor e o divisor HDMI.

Palavras-chave: HDMI. Sinal diferencial. Par trançado. TMDS. Desenvolvimento de Hardware.

ABSTRACT

The main goal of this work is to present a study of the HDMI technology in order to develop two electronic devices, which perform some operations under this digital video interface. Techniques and technologies, such as differential signaling, twisted pair, and the TMDS coding algorithm, will be introduced to show how the HDMI interface is able to transmit high data rate digital signals.

Keywords: HDMI. Differential Signaling. Twisted Pair. TMDS. Hardware Developing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação entre os dois métodos de transmissão para um sinal analógico.....	25
Figura 2: Esquemático do sistema de transmissão <i>single-ended</i> e sua forma em uma placa de circuito impresso.....	26
Figura 3: Esquemático do sistema de transmissão de sinal diferencial e sua forma em uma placa de circuito impresso.....	26
Figura 4: Sinal ‘A’ gerando interferência eletromagnética similar em um par diferencial.....	28
Figura 5: Exemplificação simplificada da eliminação de ruído em um sinal diferencial	28
Figura 6: <i>Jitter</i>	29
Figura 7: Transição de um sinal digital e seus limiares.....	30
Figura 8: Diminuição do <i>jitter</i> por causa da alteração dos limiares	30
Figura 9: Corrente necessária para mudança de estado é a metade para um sinal diferencial	32
Figura 10: Roteamento de um sinal diferencial em uma placa de circuito impresso	33
Figura 11: Radiação eletromagnética afetando desigualmente um sinal diferencial em (a) e em (b).	35
Figura 12: Cabo de rede “CAT5e”	36
Figura 13: Uma palavra digital de 8 bits	37
Figura 14: Distribuição da corrente em um condutor devido ao efeito pelicular.....	38
Figura 15: Soma de senos para a obtenção de uma onda quadrada.....	40
Figura 16: Sinal de vídeo HDMI no início de sua transmissão.....	41
Figura 17: Mesmo sinal de vídeo após 5 metros de transmissão.....	41
Figura 18: Arquitetura de conexão do I2C, com um microcontrolador “mestre” e três dispositivos “escravos”.....	42
Figura 19: Cabo HDMI comum	44

Figura 20: Disposição dos condutores do cabo HDMI	45
Figura 21: Conector HDMI.....	46
Figura 22: Diagrama de conexão de teste do equalizador.....	49
Figura 23: Diagrama de olho no ponto TPA.....	49
Figura 24: Diagrama de olho no ponto TPB	50
Figura 25: Diagrama de olho no ponto TPC	51
Figura 26: Operação de <i>emphasis</i> em um sinal serial	52
Figura 27: Diagrama de teste para a operação de <i>emphasis</i>	52
Figura 28: Diagrama de olho no ponto TPD e TPE sem a aplicação de <i>pre-emphasis</i>	53
Figura 29: Diagrama de olho no ponto TPD e TPE com a aplicação de <i>pre-emphasis</i>	53
Figura 30: Esquemático de um regulador de tensão	57
Figura 31: Esquemático genérico do extensor.	59
Figura 32: Esquemático genérico do <i>splitter</i>	60
Figura 33: Conector HDMI (vista superior e inferior) e seu <i>footprint</i> ...61	
Figura 34: Modelo 3D da placa de circuito impresso do <i>splitter</i>	61
Figura 35: PCBs do divisor e do extensor já com os componentes soldados	62
Figura 36: Carenagem do extensor	64
Figura 37: Divisor e extensor HDMI finalizados.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer-Aided Design
CRT	Cathode Ray Tube
DDC	Display Data Channel
DVI	Digital Visual Interface
EDID	Extended Display Identification Data
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMI	Electromagnetic Interference
HDCP	High-Bandwidth Content Protection
HDMI	High Definition Multimedia Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
LCD	Liquid-Crystal Display
PCB	Printed Circuit Board
TMDS	Transition-Minimized Differential Signaling

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	9
SUMÁRIO	10
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO	20
1.1.1 OBJETIVO GERAL	20
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	21
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2. O PROTOCOLO HDMI	23
2.1 ESPECIFICAÇÃO HDMI	23
2.1 AS TÉCNICAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS	24
2.1.1 SINAL DIFERENCIAL	24
2.1.1.1 VANTAGENS	27
2.1.1.1 DESVANTAGENS	32
2.1.1.1 QUANDO UTILIZAR O SINAL DIFERENCIAL	33
2.1.2 PAR TRANÇADO	35
2.1.3 TMDS	36
2.1.4 DDC	42
2.1.5 EDID	43
2.1.6 HDCP	43
2.2 O CABO HDMI	44

3. OS PRODUTOS E AS OPERAÇÕES NECESSÁRIAS NOS SINAIS	47
3.1 O EXTENSOR	47
3.1.1 EQUALIZAÇÃO	48
3.1.2 EMPHASIS	51
3.2 O DIVISOR	53
3.2.1 O CONTROLE EDID	54
3.2.2 O HDCP	56
4. O DESENVOLVIMENTO DOS PRODUTOS	57
4.1 OS ESQUEMÁTICOS	57
4.2 DESENVOLVIMENTO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	60
4.3 O FIRMWARE	62
4.4 TESTES DE VALIDAÇÃO	63
4.5 DEMAIS ASPECTOS DO PRODUTO	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E ESPECTATIVAS	67
BIBLIOGRAFIA	69

1 INTRODUÇÃO

A velocidade com que a tecnologia avança é impressionante, e quando se observa apenas a evolução dos dispositivos de áudio e vídeo, o deslumbre é ainda maior.

Há não muito tempo atrás, os programas de televisão eram usualmente assistidos em grandes “caixas” que utilizavam o tubo de raio catódico para exibir o sinal de vídeo, e apesar da televisão em cores ter sido desenvolvida em 1953 nos Estados Unidos (Butler, 2006), não era difícil encontrar TVs em preto e branco ainda na década de 80 e 90 no Brasil.

Hoje, essas “caixas” foram substituídas por painéis totalmente planos e finos cujo tamanho físico é praticamente todo utilizado para a apresentação do vídeo. São os *displays* de tela plana, que em sua maioria utilizam a tecnologia conhecida como tela de cristal líquido (*Liquid-Crystal Display*). Porém, não foi apenas a televisão que se beneficiou dessa evolução. Com os *displays* de vídeo mais leves e finos, outros dispositivos eletrônicos também evoluíram, como os *laptops*, ou computadores portáteis, os gravadores de vídeos e câmeras fotográficas, celulares e vários outros. Existem também, os aparelhos que só puderam ser inventados graças a disponibilidade dessa tecnologia, como é o caso dos *tablets*.

Juntamente com essa multiplicidade de opções de exibição de vídeo, surgiram também, inúmeras alternativas de fontes de vídeos. Alguns exemplos são: o tradicional *broadcasting*, o DVD Player e o Blu-Ray Player (aparelhos dedicados a reprodução de mídias armazenadas em discos ópticos), mídia players (reprodução de vídeos armazenados em discos rígidos).

Então, aonde antes existia um aparelho dedicado exclusivamente a receber e decodificar um sinal de vídeo enviado por uma única fonte, hoje este dispositivo precisa estar apto a receber e interpretar tal sinal proveniente de diversas origens.

Assim, voltando para a década de 50 e comparando com a atualidade, percebe-se que além da qualidade do aparelho de televisão ter melhorado muito, agora existem vários outros dispositivos, com funções distintas, que também exibem vídeo, e vários outros que podem fornecer essas mídias, todos atualmente disponíveis no mercado.

Então, com todos esses conceitos em mente, pode-se finalmente apresentar o âmbito desse trabalho: o estudo do padrão HDMI, acrônimo de *High Definition Multimedia Interface*, que é o modelo de conexão

entre fonte e receptor de vídeo mais difundido para a transmissão de sinais digitais de vídeo de alta resolução. Este estudo será a base para o desenvolvimento de dois produtos eletrônicos que almejam aumentar os limites do padrão HDMI, o extensor e o divisor HDMI.

A necessidade desses produtos foi identificada pelo contato direto com um mercado bem específico, conhecido como *Digital Signage*, ou Sinalização Digital.

O *Digital Signage* é um painel informativo tipicamente colocado em espaços públicos, usados normalmente para informar, publicitar ou simplesmente distrair. Esse painel na maioria dos casos se trata de um monitor, mas também pode ser um painel de LED ou um projetor.

Nesse mercado, não é incomum que a distância entre a fonte do vídeo e o *display* precise ser grande. Um exemplo simples é o caso de um *outdoor* feito de painéis de LED, que pode ficar a metros do solo, e se a fonte do vídeo precisar de algum controle frequente, este não poderá ficar perto do *display*.

Outra necessidade constante nesse mercado é a utilização de mais de um receptor de vídeo para uma mesma fonte. Como por exemplo, em filas de supermercados, aonde existe um monitor em cada fila e todas exibindo a mesma mídia.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo das técnicas e tecnologias utilizadas pelo padrão HDMI para compreender seu funcionamento, suas capacidades e suas limitações. O conhecimento adquirido com esse estudo será a base para o desenvolvimento de dois dispositivos eletrônicos que serão posteriormente comercializados, o extensor HDMI, e o divisor HDMI. O primeiro aumenta o alcance de transmissão do protocolo, enquanto que o segundo permitirá a exibição do sinal de vídeo em dois monitores simultaneamente.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o padrão HDMI. Entender o funcionamento de seu sistema como um todo.
- Conhecer as técnicas e tecnologias utilizadas pelo protocolo HDMI.
- Definir e analisar as operações necessárias que o extensor e o divisor terão que fazer para realizar suas premissas.
- Mostrar como é feito o desenvolvimento de Hardware, desde a criação do esquemático até a finalização do PCB.
- Realização dos procedimentos de testes para validação dos dispositivos.
- Adaptar detalhes finais para produção e comercialização dos produtos.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A motivação para o desenvolvimento de tais projetos é simples e elementar: é uma necessidade de mercado.

Quando as características de uma ferramenta apresentam limitações a ponto de impossibilitar certos casos de usos, existirão pessoas trabalhando para expandir esses limites e viabilizar as funções anteriormente indisponíveis. Pode-se dizer até, de um modo geral, que é assim que a tecnologia avança.

No âmbito deste trabalho, a ferramenta em questão é o padrão de comunicação HDMI, a limitação é o alcance desse meio de comunicação e também o paradigma ponto a ponto do HDMI. Os casos de usos reprimidos são óbvios: quando a fonte e o receptor do vídeo sob esta interface estão separados por uma distância superior ao limite estabelecido, ou quando se tem mais de uma fonte para apenas um receptor ou vice-versa.

O convívio diário com essas necessidades foi a motivação principal para o desenvolvimento desses produtos. O fator, posteriormente observado, de não ter nenhum item similar desenvolvido nacionalmente, também foi um incentivo para a idéia sair do papel.

A utilização de conteúdo digital de alta definição é uma prática recente, que ainda está em crescimento e, naturalmente, irá substituir a tecnologia antecedente por completo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. A introdução, que norteia a respeito do tema escolhido abordando os principais aspectos que serão explanados, fundamentando a importância dos produtos desenvolvidos e orientando a respeito dos objetivos, justificativa e motivação do presente trabalho.

O segundo capítulo apresenta as principais tecnologias envolvidas no protocolo HDMI, com todas suas técnicas e ferramentas que fizeram dele, a interface mais utilizada atualmente.

No capítulo três é explicado o funcionamento de cada produto desenvolvido e mostrado quais são as operações necessárias que devem ser feitas nos sinais da interface HDMI para se chegar à solução desejada de cada produto.

Finalmente, no capítulo quatro foi colocada em prática toda a bagagem teórica adquirida com os estudos realizados, e exposto como foi o desenvolvimento dos produtos, desde a elaboração dos esquemáticos elétricos, até a manufatura de sua carenagem mecânica e escrita de seus manuais.

O último capítulo conclui o trabalho, analisando os conhecimentos adquiridos e mostrando as expectativas com o desenvolvimento dos produtos.

2 PROTOCOLO HDMI

O HDMI, ou Interface de Multimídia de Alta Definição, é o protocolo mais utilizado atualmente para transmitir sinal de vídeo digital de alta resolução (resolução igual ou maior que 1280x720) (CIANCI, 2012). Este protocolo foi desenvolvido em 2002 por sete empresas líderes no segmento de fabricação de dispositivos eletrônicos. São elas: Hitachi, Panasonic Corporation, Philips, Sony, Technicolor, Toshiba and Silicon Image (HDMI Adopters, 2002).

Ele é uma evolução do protocolo de interface DVI (*Digital Visual Interface*), e é o primeiro que transmite vídeo e áudio digitais em um único cabo.

Além disso, o HDMI conta com características auxiliares que o ajudaram a se tornar o líder de mercado e vender até hoje, mais de três bilhões de dispositivos que suportam essa interface (HDMI Licensing, 2013).

A seguir, será estudado a fundo a arquitetura HDMI, desde seu conceito físico até a mecânica de seu cabo.

2.1 ESPECIFICAÇÃO HDMI

O HDMI transfere dados de áudio e vídeo descomprimidos de uma fonte para um receptor de vídeo compatível com o protocolo. Essa interface é eletricamente compatível com o DVI, que é seu antecessor, porém o DVI não suporta a transmissão de áudio. Nenhuma conversão é necessária para passar de uma interface para a outra, apenas um adaptador, e não há perda na qualidade de imagem (Audioholics, 2004) (HDMI Presentation, 2002).

Várias versões do HDMI foram desenvolvidas e colocadas no mercado desde a sua versão inicial de 2002; e todas utilizam o mesmo cabo e conector. As versões mais atuais suportam características avançadas, como o vídeo 3D e conexão ethernet através do cabo, mas a principal evolução entre as versões é o aumento da taxa de transmissão de dados.

A versão atual, que é a HDMI 2.0, lançada em setembro de 2013, suporta um *clock* máximo de 600MHz e uma taxa de dados de até 6Gbits/s por canal TMDS, que será explicado ainda neste capítulo (HDMI 2.0 Specification, 2013).

Para contextualizar, com essa taxa de dados é possível transmitir um vídeo digital com uma resolução de 4096 píxeis em cada linha de um vídeo com 2160 linhas e uma taxa de atualização de 60

vezes por minuto. Essa resolução é comumente denominada 4096x2160p60, ou simplesmente 4K, e é quatro vezes maior que a conhecida resolução 1080P, que é a padrão do Blu-Ray. Fazendo uma conta rápida, pode-se descobrir quantos bits por segundo são necessários transmitir na resolução 4K. Cada pixel tem três cores e cada cor tem oito bits de informação, então tem-se 24 bits por pixel. Cada quadro, ou frame, tem 4096 vezes 2160 píxeis, e o vídeo tem 60 quadros por segundo, assim:

$$\text{Bitrate} = (\text{bits por cor}) \cdot (\text{número de cores}) \cdot (\text{número de píxeis}) \cdot (\text{quadros por segundo})$$

$$\text{Bitrate} = 8 \cdot 3 \cdot 4096 \cdot 2160 \cdot 60$$

$$\text{Bitrate} = 12.740.198.400 \text{ (bits por segundo)}$$

Comparando com a resolução da TV analógica no Brasil, com o padrão PAL-M, que tem 720 píxeis por linha e 525 linhas por quadro, com uma taxa de atualização de 30 quadros por segundo. Isso nos daria uma taxa de dados de 272.160.000 bits por segundo, quase 50 vezes menor que a resolução 4K.

Um parâmetro que está na especificação HDMI e é relevante para este trabalho, é o comprimento máximo recomendado do seu cabo, que é de 10 metros (HDMI Knowledge Base, 2002). Essa limitação acontece devido às perdas durante a transmissão, as quais serão estudadas posteriormente, e depende da qualidade do cabo, da taxa de dados e do ambiente em que o cabo se encontra.

2.2 AS TÉCNICAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Para ser capaz de realizar suas premissas, o protocolo HDMI utiliza uma série de técnicas e tecnologias que serão discutidas a seguir.

2.2.1 SINAL DIFERENCIAL

Um sinal diferencial é aquele que representa um valor como a diferença entre duas quantidades físicas. De certa forma, todos os sinais de tensão são diferenciais, pois uma tensão só pode ser medida em relação à outra tensão. Na maioria dos sistemas, a referência na qual a tensão de interesse é medida é chamada de *ground*, ou “terra”, e seu módulo é de zero volts. Os sistemas nos quais o “terra” é usado como

referência de medição são conhecidos como *single-ended*, ou terminação única. Esse termo é usado porque os sinais são representados pela tensão em um único condutor, enquanto o outro é a referência (Graham Blyth, 2009).

Um sinal diferencial, por outro lado, é carregado por dois condutores, tipicamente chamados de “V₊” e “V₋”, e mais um condutor de referência. Se cada valor de tensão dos condutores de sinais for subtraído pela referência, será observado que eles são complementares, isto é, têm o mesmo módulo, porém sinais contrários.

$$+(V_+ - V_{ref}) = -(V_- - V_{ref})$$

O valor do sinal transmitido é a diferença entre a tensão individual em cada condutor.

$$V_{Diff} = V_+ - V_-$$

A figura 1 ilustra um mesmo sinal analógico sendo transmitido pelos dois métodos.

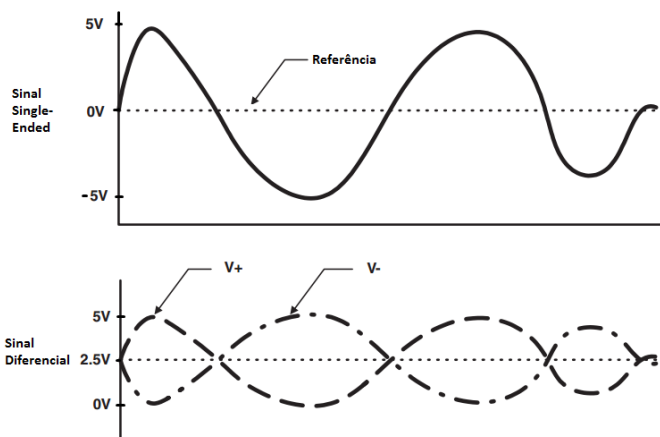


Figura 1 – Comparação entre os dois métodos de transmissão para um sinal analógico (Lattice, 2001).

Observa-se que no sinal transmitido pela técnica *single-ended*, a tensão de referência é zero volts, enquanto no sinal diferencial é 2,5V. Constata-se também que a amplitude do sinal de terminação única varia

de +5V até -5V, enquanto que um condutor de sinal no modo diferencial varia de +5V a 0V (Lattice, 2001).

As figuras 2 e 3 mostram como é o esquemático do sistema em cada técnica, e os ilustram em uma PCB, ou placa de circuito impresso. As vantagens e desvantagens da transmissão por sinal diferencial serão vistas a seguir.

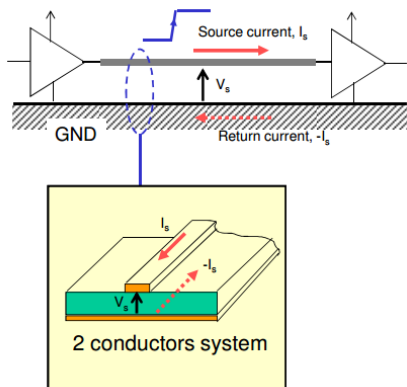


Figura 2 – Esquemático do sistema de transmissão *single-ended* e sua forma em uma placa de circuito impresso (Lee, 2012).

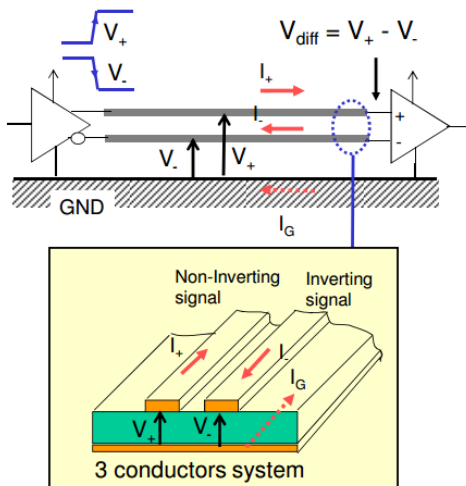


Figura 3 – Esquemático do sistema de transmissão de sinal diferencial e sua forma em uma placa de circuito impresso (Lee, 2012).

A corrente de retorno no modo *single-ended* passa toda pelo “terra”, ou seja:

$$I_S = I_G$$

Já no sistema diferencial, a corrente flui do condutor positivo para o condutor negativo, e idealmente não passa corrente nenhuma pela referência, ou seja:

$$I_+ = I_- \qquad I_G = 0 \text{ (A)}$$

Porém, isso só acontece se o sistema diferencial estiver equilibrado, o que requer condutores fisicamente iguais, com a mesma impedância, e bem acoplados (Lattice, 2001).

2.2.1.1 VANTAGENS

Mudando o esquemático de terminação única para sinal diferencial, será necessário mais um condutor e a complexidade dos circuitos de interface irão aumentar. Quais seriam então as vantagens tangíveis que a técnica de *differential signaling* fornece para explicar seu uso?

O primeiro benefício é que o sinal diferencial é mais tolerante a variações do sinal de referência. Na técnica de *single-ended*, o valor exato da medição do sinal depende da qualidade do *ground* do sistema. Já no sinal diferencial, como o circuito de recepção faz a medição apenas pela diferença entre os dois condutores de sinais, o sistema é, dentro de certos limites, independente do valor da referência. A vantagem prática dessa característica é que a distância entre a fonte e o receptor do sinal pode ser maior, já que quanto mais longe um fica do outro, maior é a probabilidade de que irá ter uma discrepância entre as referências dos dois circuitos (Lattice, 2001).

Outro benefício muito importante desta técnica, é que ela é altamente imune à interferência eletromagnética (*Electromagnetic Interference* - EMI) exterior, inclusive o *crosstalk*, que é quando um sinal transmitido em um circuito ou canal de um sistema de transmissão cria uma interferência indesejada em outro canal ou circuito próximo. Isso se deve ao fato de que essa fonte de interferência irá afetar cada lado do sinal diferencial quase que igualmente nos dois condutores se eles estiverem próximos um do outro, seja em um cabo, ou nas trilhas de uma placa de circuito impresso. Um exemplo de como isso funciona está mostrado na figura 4 (Lee, 2012).

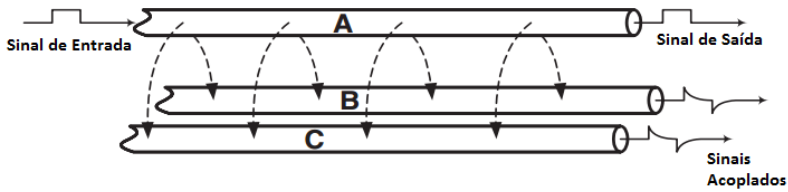


Figura 4 – Sinal ‘A’ gerando interferência eletromagnética similar em um par diferencial (Lattice, 2001).

Um sinal no cabo ‘A’ pode gerar interferência aos fios próximos, ‘B’ e ‘C’. Como os condutores ‘B’ e ‘C’ estão próximos um do outro, o acoplamento deles em relação ao fio ‘A’ será praticamente igual. Isso resultará em quantidades similares de *crossstalk* sendo injetado em ambos condutores ‘B’ e ‘C’. Se esses condutores fossem *single-ended*, seria difícil de identificar e remover essa interferência. Já em um sistema de sinais diferenciais, como o valor do sinal é determinado pela diferença das tensões, qualquer interferência externa que ocorre igualmente em ambos condutores, como ruídos, serão inerentemente removidos pelo circuito subtrator da recepção. Essa característica é ilustrada de forma simplificada na figura 5.

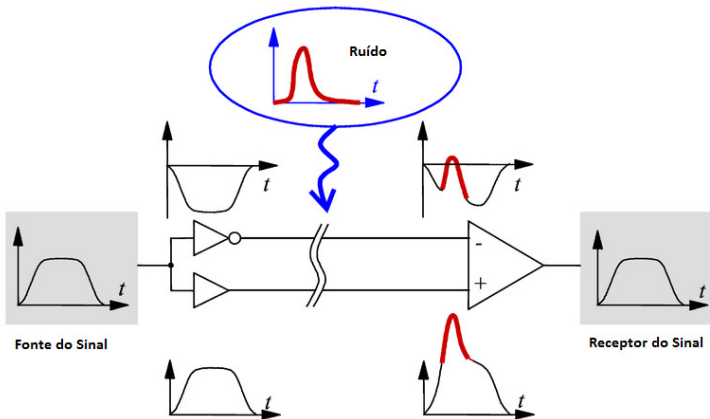


Figura 5 – Exemplificação simplificada da eliminação de ruído em um sinal diferencial (Lee, 2012).

Adicionalmente à característica de serem menos susceptíveis à interferência eletromagnética externa, um par de condutores de sinais

diferenciais também tendem a gerar menos EMI do que a técnica *single-ended*. Isso ocorre devido ao fato de que as correntes nos condutores são idealmente de mesmo módulo e de sentido contrário, o que vai gerar campos eletromagnéticos de sentidos opostos que, caso ambos condutores estiverem próximos um do outro, irão se anular, reduzindo a emissão eletromagnética e o *crosstalk*.

É por causa destas características que, em cabos, os dois condutores do sinal diferencial são entrelaçados entre si, formando o par diferencial trançado. Esta técnica será explicada posteriormente.

Indiretamente, a característica de ter melhor imunidade a interferência eletromagnética traz outra vantagem ao sistema de transmissão diferencial. Uma imunidade superior ao *jitter*. É um termo em inglês para o desvio indesejado que acontece em uma transição de um sinal periódico. A figura 6 ilustra esse efeito.

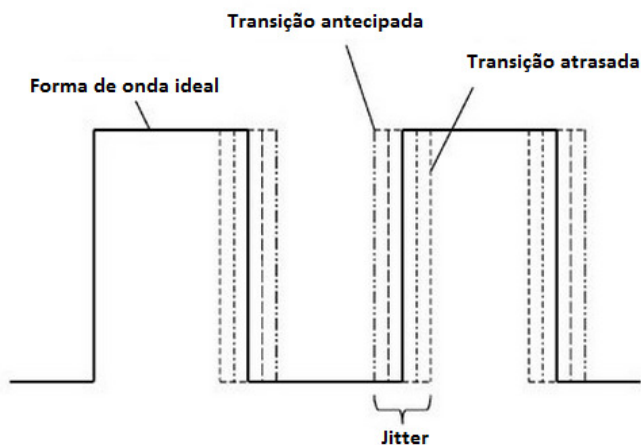


Figura 6 – Jitter (Pinheiro, 2004).

O *jitter* ocorre no intervalo de tempo de uma transição em que o nível de tensão não é nem alta nem baixa. Em circuitos digitais existe uma fronteira (*threshold*, em inglês) mínima para o nível lógico ser considerado alto ou baixo. Na figura 7 esse *threshold* é definido pelas tensões V_{TH} e V_{TL} . Os níveis de tensão acima de V_{TH} são considerados nível lógico alto, e os níveis de tensão abaixo de V_{TL} são considerados nível lógico baixo. Qualquer nível de tensão entre V_{TL} e V_{TH} é indefinido, e para um sistema de recepção, qualquer leitura nessa

região pode resultar tanto em nível lógico alto quanto baixo (Pinheiro, 2004).

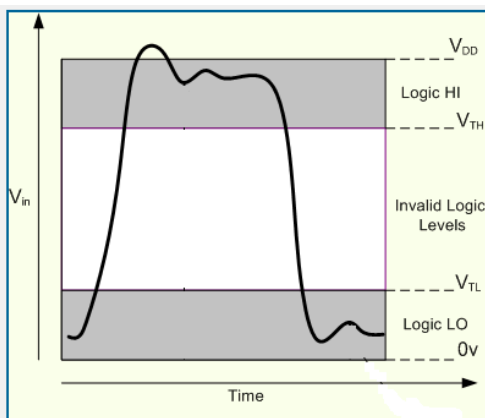


Figura 7 – Transição de um sinal digital e seus limiares (Pinheiro, 2004).

O sistema de transmissão diferencial, por ser mais imune a interferência eletromagnética, permite diminuir as regiões de níveis inválidos sem aumentar a ocorrência de erros de leituras pelo sistema de recepção. A figura 8 ilustra este efeito.

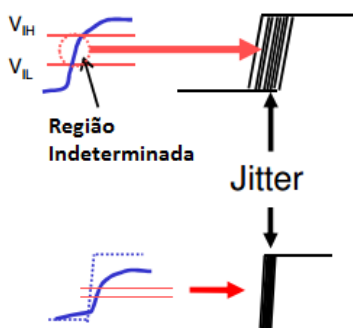


Figura 8 – Diminuição do jitter por causa da alteração dos limiares (Lee, 2012).

Outra grande vantagem da técnica de sinal diferencial é a sua adequabilidade a sistemas eletrônicos de baixa tensão.

Na indústria eletrônica, e particularmente em dispositivos portáteis, existe uma contínua tendência de diminuir a tensão de alimentação dos aparelhos, reduzindo o consumo de energia dos mesmos e também emissões eletromagnéticas indesejadas. O problema em reduzir a tensão é que isso também diminui a imunidade ao ruído dos sinais, pois um ruído de determinada amplitude irá afetar mais um sinal com menor módulo.

Sinal diferencial ajuda a reduzir esse problema por que, para uma dada tensão de alimentação, ele oferece o dobro de imunidade ao ruído se comparado ao sistema *single-ended*.

Para ver o porquê, considere um sistema digital de terminação única com uma tensão de alimentação V_s . O nível lógico alto é V_s , e o nível lógico baixo é zero volts. Portanto, a diferença entre os dois níveis é

$$V_s - 0 = V_s \text{ (Volts).}$$

Agora, considerando um sistema diferencial com a mesma tensão de alimentação, a diferença de tensão no nível alto é

$$V_s - 0 = V_s \text{ (Volts)}$$

A diferença de tensão no nível baixo, aonde os sinais são complementares, é

$$0 - V_s = -V_s \text{ (Volts)}$$

Portanto, a diferença entre a lógica alta e baixa total é

$$V_s - (-V_s) = 2V_s \text{ (Volts)}$$

Isso é o dobro se comparado ao sistema *single-ended*. Na prática, essa característica permite que sistemas diferenciais trabalhem com tensões menores, sem a desvantagem do aumento de susceptibilidade a ruídos.

A diminuição da tensão têm outras implicações além das já citadas. A corrente necessária para suprir a mudança de estado diminui se for considerada uma mesma constante de tempo τ , como mostrado na figura 9.

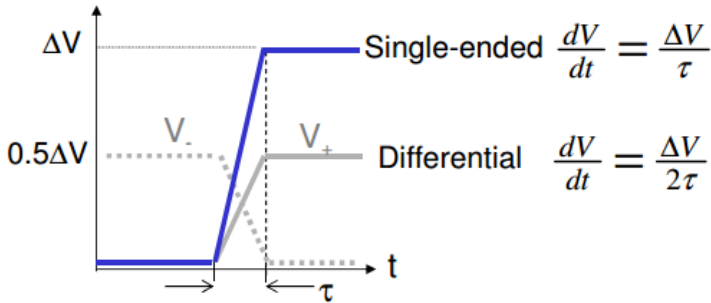


Figura 9 – Corrente necessária para mudança de estado é a metade para um sinal diferencial.

Isso significa que se comparado a técnica de terminação única, o sinal diferencial pode operar com o dobro da velocidade.

2.2.1.2 DESVANTAGENS

Conhecendo a arquitetura do sistema de transmissão de sinais diferenciais, podem-se deduzir suas principais desvantagens em relação ao sistema de terminação única.

A mais óbvia é a necessidade de um condutor extra. Em um cabo de transmissão, isso pode significar um aumento significativo do seu custo de produção, assim como um aumento de seu diâmetro, deixando-o menos flexível. Em uma placa de circuito impresso, além de o sinal ocupar mais espaço devido à trilha adicional, é muito mais complicado fazer o projeto da placa. Isso porque as duas trilhas de sinal, V+ e V-, tem que estar sempre juntas e ter o mesmo comprimento, para melhorar seu acoplamento e reduzir as emissões eletromagnéticas. Deve-se também ter uma constante preocupação com o terceiro condutor do sistema, a referência. O ideal é que se tenha um plano inteiro de referência na PCB, e onde o sinal diferencial trafegar, não pode haver quebras deste plano (Lattice, 2001).

A figura 10 mostra um exemplo de como é a disposição de um sinal diferencial em uma PCB.

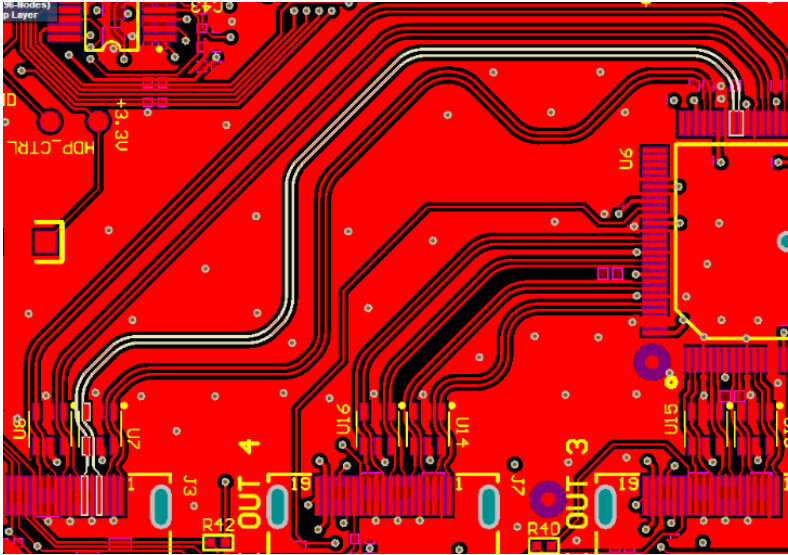


Figura 10 – Roteamento de um sinal diferencial em uma placa de circuito impresso.

Outra desvantagem dessa tecnologia é que ela requer um sistema de transmissão e recepção mais complexo do que a terminação única. Na transmissão, é necessária uma lógica adicional para se obter o sinal e seu complemento. Na recepção diferencial, é necessário o circuito adicional do subtrator.

2.2.1.3 QUANDO USAR SINAL DIFERENCIAL

A transmissão de um sinal pela técnica diferencial se mostrou muito vantajosa em relação à terminação única. Porém sua implementação tem um custo adicional associado ao aumento de componentes e condutores suplementares. Por isso, a utilização desse método nem sempre é necessária, e o paradigma *single-ended* já é o suficiente para realizar certas tarefas.

Com as características de cada tecnologia em mente, pode-se tirar conclusões de quando utilizar a técnica de sinal diferencial apesar dos custos adicionais.

- Sinais de baixa amplitude: Quando sinais de amplitudes pequenas (tensões menores que três Volts) precisam ser manuseados, a transmissão e o processamento diferencial podem oferecer vários benefícios para manter a integridade do sinal. A

sensibilidade reduzida a ruídos da alimentação e eletromagnéticos, além da menor dependência do valor de referência tornam esse método a melhor opção nesse caso.

- Quando há muito ruído: Em certas aplicações, ruídos elétricos do ambiente podem ser da mesma escala dos sinais transmitidos. Um exemplo de tal ambiente são os circuitos de um automóvel, na qual tensões elevadas provindos do sistema de ignição podem influenciar outros circuitos mais sensíveis. Em situações assim, um circuito diferencial pode lidar com um alto ruído de modo comum, tanto aqueles que incidem na alimentação, quanto aos que afetam os sinais diretamente, e ainda assim conseguem recuperar o valor real do sinal de interesse.
- Quando sinais precisam ser conduzidos por distâncias grandes: Por ser menos sensível a variação da tensão de referência, e ter alta resistência a ruídos, essa opção é muito válida para a transmissão de sinais por longas distâncias.
- Sinais de alta frequência: A maioria das características estudadas de um sistema diferencial de transmissão só se diferem significativamente da técnica *single-ended* se a frequência do sinal carregado for elevada (frequências acima de 50 MHz), que é quando os condutores começam a se comportar como linhas de transmissão. Para sinais de baixa frequência, utilizam-se, geralmente, os cabos e os circuitos mais baratos do método *single-ended* (Lattice, 2001).

Então, como pode-se constatar, sinal diferencial é uma simples e elegante, porém fundamental ferramenta dos sistemas modernos de comunicação de alta velocidade. Esta técnica expande os limites da tecnologia e está presente no nosso dia-a-dia, seja dentro de um equipamento eletrônico, em uma placa de circuito impresso, fazendo a comunicação entre dois ou mais circuitos integrados, ou dentro de cabos de sinais elétricos, fazendo a transmissão de dados em alta velocidade (S. H. Hall, 2000).

2.2.2 PAR TRANÇADO

O par trançado nada mais é do que dois condutores entrelaçados entre si.

Apesar de ter sido utilizada muito antes do sistema de transmissão de sinal diferencial ser inventado, ela é uma técnica complementar perfeita para o mesmo. Isso por que o objetivo do entrelaçamento é fazer com que as interferências eletromagnéticas exteriores afetem ambos os condutores igualmente, conforme é exemplificado na figura 11:

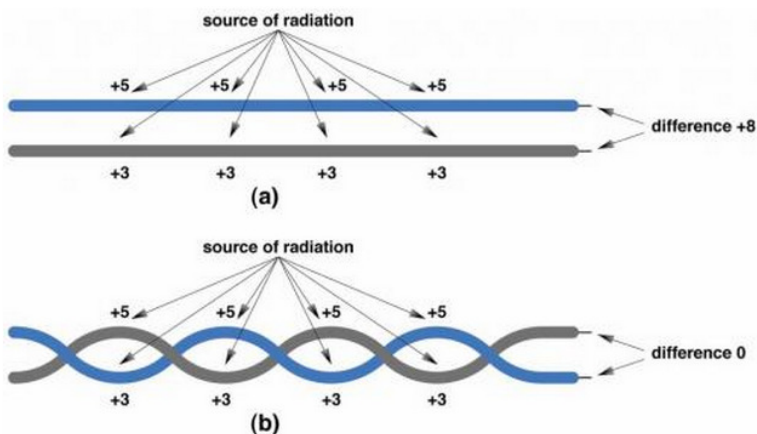


Figura 11 – Radiação eletromagnética afetando desigualmente um sinal diferencial em (a) e em (b) (Laumeister, 2012).

Observa-se que caso dois condutores estiverem paralelos entre si, qualquer fonte de ruído eletromagnético que não estejam equidistantes entre os fios, irá afetar diferentemente os dois sinais. Já com a técnica de entrelaçamento dos fios, hora o campo eletromagnético afeta um condutor mais severamente, hora afeta o outro, fazendo com que o total de ruído que cada fio irá receber seja semelhante.

Se a fonte de ruído estiver muito distante dos sinais de interesse, pouco importaria se os dois condutores estivessem entrelaçados ou paralelos entre si, pois a distância entre os dois fios seria muito pequena em relação à distância do ruído. Entretanto, quanto menor for o afastamento entre a procedência da interferência e os sinais diferenciais, mais importância terá o entrelaçamento.

Então, qualquer cabo que precise transportar dois sinais diferenciais diferentes pode tirar proveito da técnica do par trançado. Isso por que em um cabo, os condutores estão muito próximos uns dos outros, e cada transição de nível de tensão irá gerar um fluxo de corrente que por sua vez irá gerar um campo eletromagnético ao redor do fio. Esse campo irá afetar os sinais diferentes que estão sendo transmitido no mesmo cabo. Essa interferência já foi estudada, e é denominada *crosstalk*. O *crosstalk* pode ser mitigado se os sinais transmitidos forem diferenciais, e se os dois condutores forem entrelaçados entre si (A. J. Gibbs, 1979).

Além do cabo HDMI, outro exemplo bem comum e conhecidos em que essas duas técnicas são utilizadas é o cabo de ethernet, ou cabo de rede, ilustrado na figura 12. Seu modelo mais usual é conhecido como “*Category 5 enhanced*”, ou “CAT5e”.

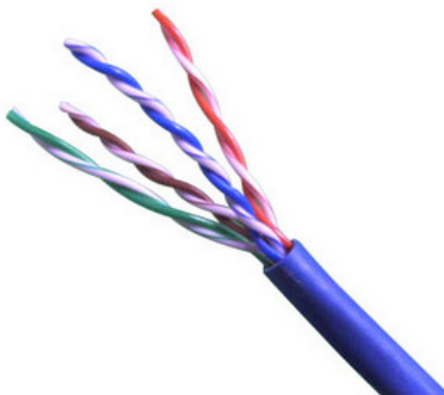


Figura 12 – Cabo de rede “CAT5e”.

2.2.3 TMDS

TMDS é o acrônimo para *Transition-Minimized Differential Signaling*, ou Sinal Diferencial com Transição Minimizada. É uma técnica que codifica o sinal que trafega pelo par diferencial, com o objetivo de minimizar o número de transições existentes dentro de uma palavra digital. Foi desenvolvida pela Silicon Image e é utilizada pelos protocolos DVI e HDMI de transmissão de vídeo.

Para a finalidade desta tecnologia ser melhor visualizada, observa-se a figura 13, que ilustra uma palavra digital de 8 bits, que pode ser, por exemplo, a informação da cor vermelho em um pixel de um sinal de vídeo.

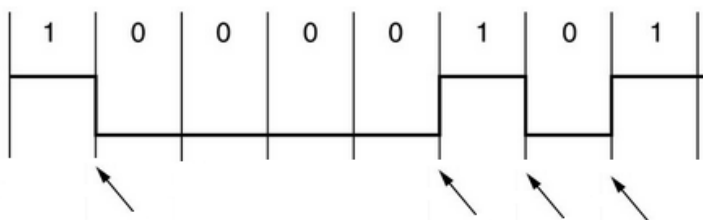


Figura 13 – Uma palavra digital de 8 bits.

As setas apontam as transições do sinal, que neste caso, são quatro.

De uma maneira simplificada, a técnica TMDS realiza uma operação no sinal de vídeo que transforma um dado de 8 bits, em 10 bits. O primeiro bit da palavra se repete, o segundo bit é o resultado da operação XOR (OU exclusivo) ou a operação XNOR (OU exclusivo inverso) do primeiro bit com o segundo bit, e assim sucessivamente até o oitavo bit. O nono bit diz qual operação foi aplicada, e o décimo bit diz se a palavra resultante foi invertida ou não. Essa inversão serve para tentar balancear o número de zeros e uns do sinal, com o objetivo de manter o nível médio DC. A operação que será utilizada, XOR ou XNOR, é definida a cada palavra, e essa escolha se baseia em qual das duas palavras resultantes de 10 bits terá um menor número de transições (DDWG Promoters, 1999).

Exemplificando, aplica-se a técnica no sinal da figura 13.

Com a operação XOR, que é igual a operação “OU” com a diferença que quando ambos sinais são ‘1’ o resultado é ‘0’, a palavra original (10000101) se transformaria em:

$$10000101 \rightarrow 11000111.00$$

Já com a operação XNOR, “OU exclusivo inverso”, a operação seria assim:

$$10000101 \rightarrow 10111000.10$$

Como se pode observar, utilizando a operação XOR a palavra resultante terá três transições, enquanto com XNOR, terá cinco

transições. Portanto, o sistema codificador TMDS escolheria a operação XOR, pois diminuiria em uma transição em relação à palavra original.

Mas qual a vantagem em minimizar o número de transições em um sinal digital serial, para então ser transmitido?

A resposta dessa questão está na alta frequência dos sinais de vídeos dos protocolos DVI e HDMI. Quanto maior a frequência do sinal em um condutor, maior serão os danos causados pelo efeito pelicular (*skin effect*).

O efeito pelicular é a tendência da corrente elétrica alternada se distribuir mais acentuadamente perto da superfície do condutor, enquanto que em seu interior a densidade de corrente diminui, e esse efeito é maior quanto maior for a frequência do sinal.

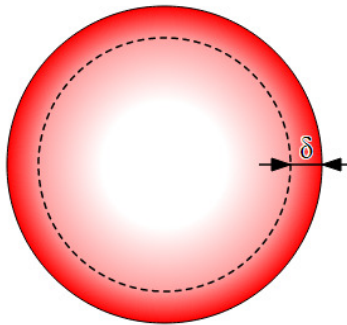


Figura 14 – Distribuição da corrente em um condutor devido ao efeito pelicular (Toy Makers, 2001).

A figura 14 mostra a secção transversal da distribuição de uma corrente alternada em um condutor cilíndrico. O termo δ se chama profundidade pelicular e é definido como a profundidade abaixo da superfície do condutor na qual a densidade de corrente diminui em $1/e$ (aproximadamente 0,37) da corrente máxima no condutor, que é a corrente na superfície e conhecido com JS. Em casos normais, δ pode ser calculado pela seguinte fórmula (Edward Jordan, 1968):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu_0}} \quad \text{em metros}$$

$$\text{onde: } \begin{cases} \rho - \text{Resistividade do condutor} \\ \omega - \text{Frequência angular da corrente} = 2\pi * \text{frequência} \\ \mu_r - \text{Permeabilidade magnética relativa do condutor} \\ \mu_0 - \text{Permeabilidade magnética do espaço livre} \end{cases}$$

Pela fórmula, percebe-se que quanto maior for a frequência da corrente, menor será a profundidade pelicular, o que significa que a densidade de corrente que passa pelo condutor estará mais concentrada em sua superfície. Em consequência disso, a corrente estará confinada em uma área de seção transversal menor se comparada com a área que esta mesma corrente teria se ela fosse contínua, e, portanto, a resistência efetiva do cabo será maior.

Essa resistência efetiva pode ser calculada pela fórmula (Edward Jordan, 1968):

$$R = \frac{L\rho}{\pi(D-\delta)\delta} \approx \frac{L\rho}{\pi D\delta} \quad \text{em Ohms}$$

A aproximação assume que $D \gg \delta$

$$\text{onde: } \begin{cases} \rho - \text{Resistividade do condutor} \\ D - \text{Diâmetro do condutor} \\ L - \text{Comprimento do condutor} \\ \delta - \text{Profundidade pelicular} \end{cases}$$

Assim, quanto maior a frequência do sinal, menor será a profundidade pelicular δ , e maior será a resistência efetiva do cabo.

Em um sinal de vídeo digital, o tempo de transição de nível de tensão é muito pequeno, e está na ordem de pico segundos. Por exemplo, a especificação do HDMI sugere que o tempo de subida/descida do sinal fique entre 75ps a 200ps.

O tempo de subida de um sinal é o tempo que este sinal leva para sair de seu nível lógico baixo e alcançar o nível lógico alto. O tempo de descida é o inverso. Geralmente, são considerados os limiares

de 10% até 90% do nível lógico alto em relação à referência (Levine, 1996). Quanto menor for esse tempo, maior será a largura de banda do sinal, e para explicar o porquê disto, observa-se a figura 15 a seguir:

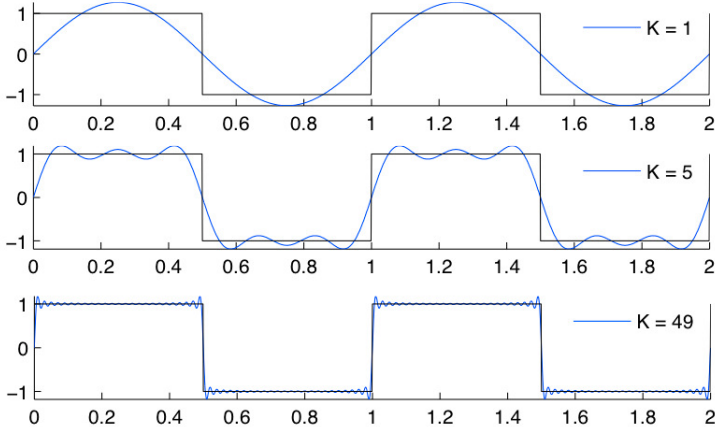


Figura 15 – Soma de senos para a obtenção de uma onda quadrada.

Essa onda quadrada é obtida pela soma de senos, pela seguinte série de Fourier:

$$\begin{aligned}
 X_{\text{Square}}(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi(2k-1)ft)}{(2k-1)} \\
 &= \frac{4}{\pi} \left(\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{5} \sin(10\pi ft) + \dots \right)
 \end{aligned}$$

Como se observa pela fórmula e pela figura, quanto mais termos se somam na série, maior é a largura de banda do sinal, pois terá componentes de frequências maiores, e mais próximo de uma onda quadrada será o sinal.

Em uma transição é igual, quanto mais rápido o tempo de subida ou descida, mais componentes de frequências altas terá o sinal e, portanto, maior será sua largura de banda. A relação entre as duas grandezas é dada pela fórmula (1) a seguir (Nise, 2008):

$$T_R = \frac{0,34}{BW} \quad (1)$$

onde: $\begin{cases} T_R - \text{Tempo de subida} \\ BW - \text{Largura de banda do sinal} \end{cases}$

Então, considerando um sinal de vídeo HDMI, para $T_R = 100\text{ps}$, a largura da banda do sinal será: $BW = 3,4 \text{ GHz}$.

Analisando os pontos estudados, percebe-se que as componentes de frequência altas em uma transmissão de dados digitais estão em suas transições, nas bordas de subida e descida. Percebe-se também que devido ao efeito pelicular, a resistência de um condutor aumenta para as componentes de frequências mais altas. Portanto, não é difícil deduzir as consequências da transmissão de dados digitais por condutores longos, e as figuras 16 e 17 ilustram isso:

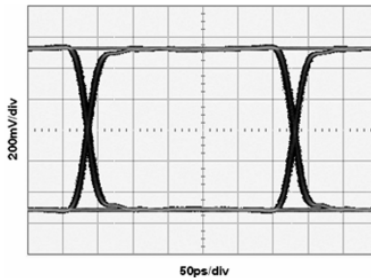


Figura 16 – Sinal de vídeo HDMI no início de sua transmissão.

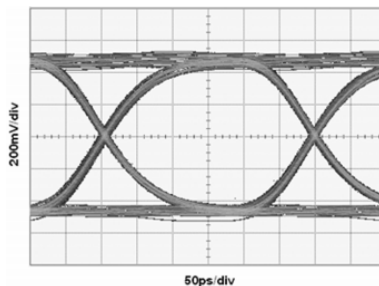


Figura 17 – Mesmo sinal de vídeo após 5 metros de transmissão.

Na figura 16, tem-se um sinal de vídeo HDMI de 3.4Gbps medido na saída de sua fonte. Na figura 17, tem-se o mesmo sinal após condução por cinco metros de cabo.

Como se observa, a principal perda na transmissão de dados digitais está em suas bordas de subida e descida, e é exatamente por isso que a técnica TMDS é utilizada no protocolo HDMI, para diminuir as transições do sinal e, conseqüentemente, diminuir as perdas do sinal pelo efeito pelicular.

2.2.4 DDC

O *Display Data Channel*, ou DDC, ou Canal de Dados da Tela, é um protocolo específico para a comunicação digital entre uma fonte de vídeo e a tela de exibição, como por exemplo, um Blu-Ray Player e um monitor. O padrão DDC foi criado pela VESA (*Video Electronics Standards Association*).

O DDC utiliza o protocolo de comunicação conhecido como I2C (*Inter-Integrated Circuit*), que é o protocolo mais utilizado para a comunicação entre circuitos integrados atualmente (VESA, 1997).

O I2C se difundiu rapidamente por habilitar a conversa entre um microcontrolador e vários CIs, todos conectados a um mesmo barramento de comunicação serial composto por apenas dois condutores, o SDA (*Serial Data Line*) e o SCL (*Serial Clock Line*):

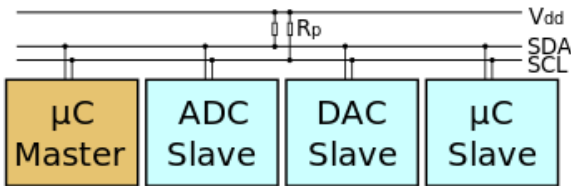


Figura 18 – Arquitetura de conexão do I2C, com um microcontrolador “mestre” e três dispositivos “escravos”.

Existe um microcontrolador “mestre” (*Master*) que pode se comunicar com vários circuitos integrados “escravos” (*Slaves*) de cada vez. Cada IC escravo tem um endereço específico, permitindo que o mestre estabeleça com qual CI ele irá conversar.

No caso do padrão DDC, esse canal de comunicação serve principalmente para duas funções: a troca de dados EDID e a comunicação HDCP, descritas a seguir.

2.2.5 EDID

EDID significa Dado Estendido de Identificação da Tela, do inglês *Extended Display Identification Data*. É um padrão de dados estruturados que todo *display* digital tem (VESA, 2000). Esses dados ficam armazenados em uma memória EEPROM dentro do monitor e é acessado pela fonte do vídeo via DDC. O endereço de acesso desta EEPROM é padronizado e não muda de monitor para monitor, melhorando assim, a interoperabilidade entre os vários modelos de fontes e exibidores de vídeo.

Os dados EDID contidos nessa EEPROM, contêm informações do fabricante do *display*, o tipo do produto, temporizadores suportados, tamanho máximo da tela, informações de luminância, mapeamento de píxeis do *display*, entre outras. Ou seja, servem para a fonte de vídeo saber as capacidades do monitor, e com isso, enviar o vídeo ideal para o *display* conectado.

Um exemplo simples que tira proveito desta técnica é um Blu-Ray Player conectado a uma tela cuja resolução máxima é 720P. Se o Blu-Ray Player não interpretasse os dados EDID, ele não saberia que haveria limitação na tela, e poderia enviar um vídeo de 1080P, que obviamente não funcionaria no *display*. É assim também, que um computador decide qual resolução enviar para um determinado monitor conectado.

2.2.6 HDCP

Outra comunicação que utiliza o canal de comunicação DDC é o protocolo HDCP, que é o acrônimo de *High-bandwidth Digital Content Protection*, ou traduzindo, Proteção de Conteúdo Digital de Banda Alta.

HDCP é uma encriptografia feita no sinal de vídeo para dificultar a pirataria, dificultando a cópia de conteúdos protegidos. Foi desenvolvido pela Intel Corporation e é usado pelas interfaces HDMI, DVI e DisplayPort (DCP, LLC, 2008).

Cada dispositivo capaz de enviar ou receber conteúdo protegido pelo HDCP possui chaves que são utilizadas para fazer a autenticação entre fonte e receptor do vídeo. Isso ajuda a prevenir que dispositivos não licenciados recebam o conteúdo protegido.

Toda a comunicação de autenticação é feita pelo canal de comunicação DDC; além disso, mesmo depois do sistema ter sido

autenticado, a fonte de vídeo continua checando se o canal é legítimo a cada segundo, através de trocas de chaves. Caso ocorra alguma falha em alguma etapa do processo, o envio do conteúdo é cessado.

2.3 O CABO HDMI

A figura 19 mostra um cabo HDMI comum. Geralmente ele tem um metro e meio, porém existem vários comprimentos, podendo chegar a até 20 metros. Existem também cabos com um dispositivo embutido de regeneração do sinal, permitindo assim que seu comprimento seja superior a 30 metros.



Figura 19 – Cabo HDMI comum.

O cabo HDMI contém 19 condutores. Seis desses condutores transmitem o áudio e o vídeo por sinal diferencial utilizando a técnica TMDS. Outros dois condutores transmitem o *clock* do sinal, também por sinal diferencial. Quatro condutores carregam a referência de cada sinal diferencial, e são colocados fisicamente próximos aos respectivos pares. Outros dois fios carregam os sinais SDA e SCL da interface de controle DDC.

Um condutor carrega a tensão de +5 volts, que é a tensão que alimenta a memória EEPROM do *display* que contém as informações EDID e, pela especificação HDMI, deve ser capaz de fornecer no mínimo 50 miliamperes de corrente. Outro condutor é a referência do cabo, e recebe a corrente de retorno do condutor de alimentação.

Os três conectores restantes carregam os sinais CEC, HPD e HEAC+. CEC significa *Consumer Electronics Control*, ou Controle de Eletrônicos de Consumo; é uma característica do HDMI com o objetivo de permitir o controle de vários dispositivos habilitados com apenas um

controle remoto. Assim, por exemplo, o usuário é capaz de controlar a televisão com o controle remoto do Blu-ray.

O HPD é o acrônimo de *Hot-Plug Detect*; informa para a fonte do vídeo que há um *display* conectado, possibilitando assim o início da transferência dos dados EDID e, subsequentemente, do vídeo. Os cabos HDMI de versões da especificação 1.4 ou superior, usam este condutor para transmitir o HEAC-. O último condutor carrega o sinal HEAC+, que possibilita a conexão internet através do próprio cabo, mas apenas para dispositivos que cumprem as especificações 1.4 ou superior. Para versões anteriores, este condutor não se encontrava especificado (HDMI Specification, 2008).

A figura 20 mostra o interior do cabo HDMI e como os condutores são geralmente dispostos.

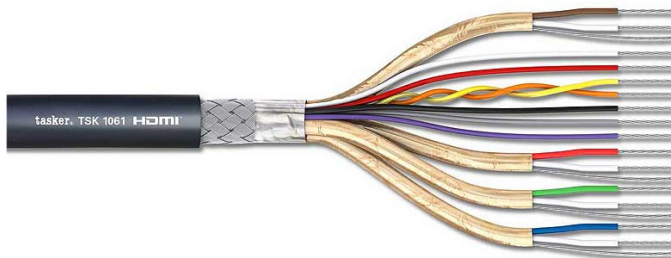


Figura 20 – Disposição dos condutores do cabo HDMI.

Observar-se que quatro trios de condutores são isolados fisicamente entre si por uma malha metálica. Tratam-se dos três sinais TMDS e mais o *clock*, cada conjunto leva dois condutores do sinal diferencial por par trançado e mais o condutor de referência. Os condutores do sinal diferencial são revestidos por um material isolante, menos a referência, porém este não entra em contato com a malha metálica, pois existe uma fina camada de isolamento entre os três condutores e a malha.

Os condutores do *Display Data Channel*, SDA e SCL, são entrelaçados entre si, porém não necessitam de uma blindagem especial, à exceção do isolamento, por se tratar de sinais de baixa frequência.

Os outros cinco condutores são apenas revestidos por um material isolante e também não precisam de atenção especial de blindagem.

Todos os 19 condutores são então revestidos por uma fina folha de alumínio e também por uma malha de cobre. Finalmente, tem-se um

isolante rígido de PVC. Alguns cabos contam também com uma malha de nylon que cobre a camada de PVC externa.

A figura 21 mostra como é o conector HDMI e onde cada sinal está disposto.

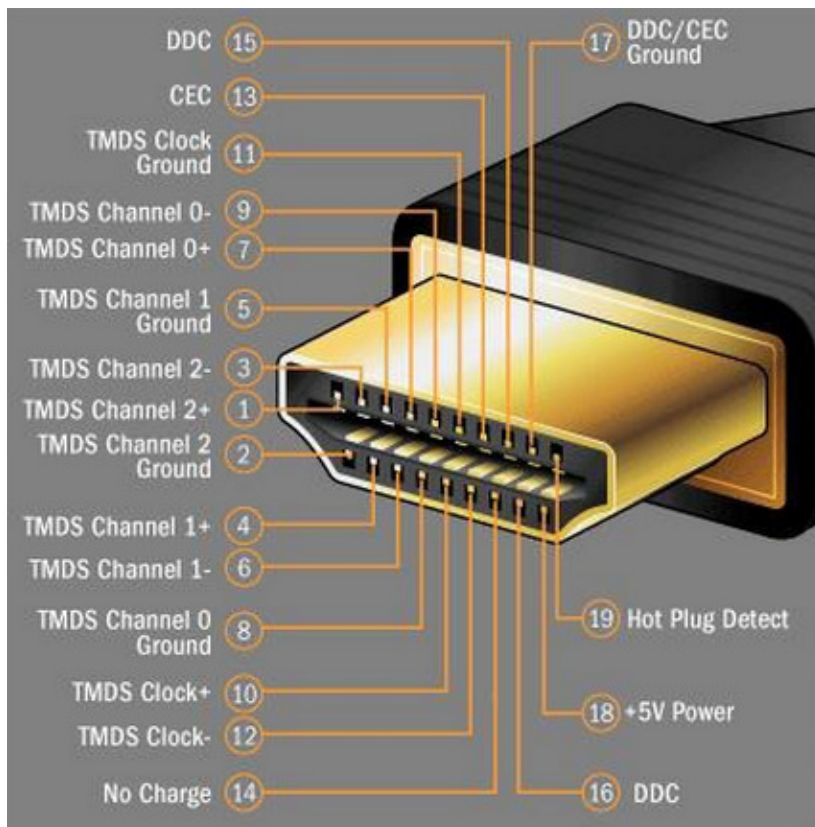


Figura 21 – Conector HDMI.

3 OS PRODUTOS E AS OPERAÇÕES NECESSÁRIAS NOS SINAIS

Neste capítulo, será estudado a fundo o funcionamento de cada produto. Serão apresentadas as operações que precisam ser aplicadas nos sinais do protocolo HDMI que está sendo transmitido para se alcançar o objetivo esperado.

3.1 O EXTENSOR

Como já foi dito anteriormente, o sinal de vídeo transmitido pelo cabo HDMI têm perdas ao longo de sua extensão principalmente devido ao efeito pelicular. Quanto maiores forem as perdas, será mais difícil para o *display* de vídeo decodificar e exibir corretamente o sinal. Pode-se dizer que para obter essa correta interpretação do vídeo, o sistema depende basicamente de três fatores: a qualidade do vídeo transmitida (*bit rate*), a qualidade do cabo utilizado e o comprimento desse cabo.

É claro que existem vários outros fatores que também influenciam no êxito da leitura do sinal de vídeo, como por exemplo, o meio em que o sistema está (nível de interferência eletromagnética) e a correta aplicação dos protocolos e especificações HDMI tanto pela fonte do vídeo quanto pelo *display*, porém será considerado o caso mais comum de uso aonde os três fatores citados anteriormente são as principais causas das perdas do sinal dentro de um cabo HDMI.

Essas três principais características que causam as perdas no sinal estão sempre relacionadas na hora de definir se o sistema irá funcionar ou não. Por exemplo, não tem como afirmar que irá aparecer vídeo na tela apenas conhecendo a resolução do vídeo e o comprimento do cabo, também seria necessário saber a qualidade do mesmo.

Em outro exemplo, um vídeo de Blu-ray com resolução 1080P pode ser transmitido com sucesso em um cabo de 10 metros bem construído com AWG 22 (condutor mais grosso), porém com certeza não funcionaria em um cabo de mesmo comprimento com AWG 30 (condutor mais fino) e sem muitas proteções.

Justamente por essas variáveis que na especificação HDMI não há um limite fixo sobre o comprimento do cabo, há apenas uma sugestão de que sua extensão não supere 10 metros, mesmo que em certos sistemas esse comprimento possa ser muito maior.

Há casos de usos em que o usuário precisa transmitir o sinal de vídeo por uma distância superior à praticável, como por exemplo, em

um *outdoor* com um painel de LEDs, que geralmente fica a vários metros do chão, ou quando é necessário transmitir o mesmo vídeo para duas telas diferentes e que estão distantes uma da outra. Neste caso seria preciso a utilização de um divisor (*splitter*) e em seguida de um extensor, como será visto posteriormente.

Nessas situações, é necessário o uso de um dispositivo conhecido como Extensor HDMI, ou em inglês, HDMI *Extender*. A função dele é óbvia, regenerar o sinal de vídeo transmitido para aumentar a distância máxima do cabo HDMI sem que haja falhas na recepção deste vídeo.

Existem diversas empresas fabricantes de semicondutores que já desenvolveram soluções integradas para realizar tal função, como por exemplo, a ST Semicondutores, Texas Instruments (Texas Instruments, 2008) e Analog Devices (Analog Devices, 2008). Serão utilizadas essas soluções já disponíveis no mercado como base para nossos estudos.

As operações necessárias para possibilitar o uso de cabos HDMI maiores serão vistas a seguir.

3.1.1 EQUALIZAÇÃO

Equalização é o processo de regulação do balanço entre as componentes de frequência de um sinal eletrônico. Os equalizadores intensificam ou atenuam a energia de bandas de frequência específicas que variam dependendo do objetivo da operação.

Esse processo é bastante conhecido na gravação e reprodução de áudio, com o objetivo de melhorar o aspecto auditivo do sinal sonoro. Já na transmissão de vídeo, a finalidade da equalização é regenerar o sinal que se degradou no cabo ou nas trilhas de uma PCB.

Como foi estudado, em uma interface HDMI as perdas do sinal são basicamente devido ao efeito pelicular, em consequência das altas taxas de transmissão dos dados. Foi visto também, que essas perdas se concentram mais nas frequências mais altas do sinal, ou seja, nas bordas de descida e subida (por isso é utilizado a técnica TMDS). Assim, para equalizar um sinal de vídeo que foi transmitido por um cabo muito longo, é necessário dar um ganho nas frequências mais altas do sinal.

Essa é a principal operação que deve ser realizada para a regeneração de um sinal digital de alta velocidade, e todo circuito integrado com tal premissa se baseia basicamente neste processo.

Para entender de forma prática os resultados desse processo, será exemplificada a utilização dessa operação com alguns dados e

medições tiradas de uma folha de especificações, ou *datasheet*, do DS34RT5110, um circuito integrado da *Texas Instruments*, que é uma das empresas líder de semicondutores do segmento (Texas Instruments, 2008).

A figura 22 mostra o diagrama de conexão do exemplo de estudo. As setas são os pontos das medições; “TPA” significa “*Test Point A*”, é a saída da fonte de vídeo. O ponto B é na entrada do equalizador, depois da transmissão do sinal através do cabo HDMI. O ponto C é após ser aplicada a função de equalização no sinal.

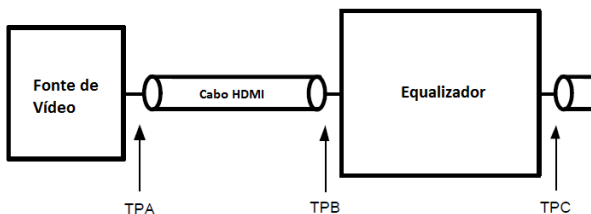


Figura 22 – Diagrama de conexão de teste do equalizador (Texas Instruments, 2008).

Neste exemplo, a resolução do vídeo é 1080P com 60 quadros por segundo e o cabo HDMI tem 25 metros.

A figura 23 abaixo mostra como é o diagrama de olho do sinal no ponto TPA:

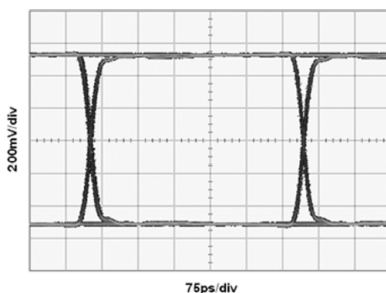


Figura 23 – Diagrama de olho no ponto TPA (Texas Instruments, 2008).

Diagrama de olho, ou *eye diagram*, em telecomunicação, é uma forma de exibição por um osciloscópio na qual os dados digitais de um sinal são repetidamente amostrados e aplicados no eixo vertical,

enquanto a taxa de dados é usada como gatilho, ou *trigger*, na varredura horizontal. Simplificando, é como mostrar, por superposição, todo o sinal digital serial em apenas um período deste sinal, exibindo assim, toda possível trajetória que este sinal possa ter dentro de cada período. É uma importante ferramenta de testes para o estudo de ruídos e interferências no desempenho de um sistema de transmissão por pulsos.

Diversas medidas de desempenho do sistema podem ser tiradas pela análise de um diagrama de olho. Se o sinal é muito longo, muito curto, mal sincronizado com o *clock* do sistema, com a amplitude muito alta ou baixa, com muito ruído, com o tempo de subida muito lento ou então tem muito *undershoot* ou *overshoot*, tudo isto pode ser observado no diagrama. Um diagrama de olho aberto, como na figura 16, corresponde a um mínimo de distorção no sinal. Já um olho mais fechado, como na figura 17, significa que o sinal já sofreu muita distorção por perdas ou interferências.

O ponto de medição TPB é mostrado na figura 24.

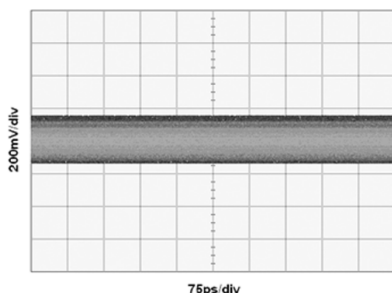


Figura 24 – Diagrama de olho no ponto TPB (Texas Instruments, 2008).

Pode-se observar que depois de 25 metros de cabo, o sinal se distorceu tanto devido às perdas que ele não possui mais um formato específico em um diagrama de olho. Estatisticamente ele pode assumir qualquer valor dentro de um período do sinal. Além disso, percebe-se também que a amplitude do sinal foi reduzida drasticamente devido à resistência do cabo. Este sinal dificilmente seria corretamente interpretado por um *display* de vídeo.

É então aplicada a operação de equalização. O diagrama de olho resultante é ilustrado na figura 25.

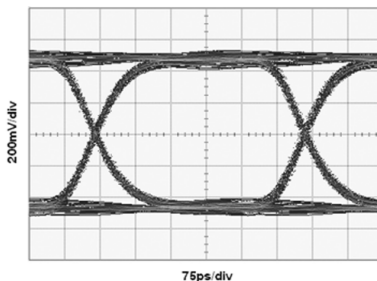


Figura 25 – Diagrama de olho no ponto TPC (Texas Instruments, 2008).

Pode-se observar que o sinal retoma o seu formato característico. Apesar do tempo de subida e descida ter aumentado, assim como a variação do valor instantâneo de cada período do sinal, esta forma de onda seria facilmente interpretada por uma tela que respeita as especificações HDMI.

3.1.2 EMPHASIS

Emphasis, ou em português, ênfase, é uma operação que aumenta ou diminui a magnitude de certas faixas de frequências em relação a outras faixas de frequências do sinal para minimizar efeitos adversos como a atenuação ou saturação nas partes subsequentes do sistema. É o mesmo conceito da equalização, só que na operação de *emphasis* as mudanças na frequência do sinal são feitas prevendo as perdas que o sinal terá em seu meio de transmissão, enquanto que a equalização regenera o sinal no qual já houve as perdas.

Na transmissão serial de dados, a aplicação desta técnica é feita da seguinte maneira: o primeiro bit depois de uma transição é amplificado enquanto que os demais bits permanecem com a mesma amplitude. Neste caso a operação é conhecida como *pre-emphasis*. Há também o caso em que o primeiro bit da transição permanece com a mesma amplitude e todos os outros são enfraquecidos, neste caso a operação é conhecida com *de-emphasis*. Com a utilização desta técnica o conteúdo de alta frequência do sinal (que estão na transição, como já foi visto) seja enfatizado em comparação com o conteúdo de baixa frequência.

Não é apenas no protocolo HDMI que esta técnica é utilizada. Padrões bastante conhecidos de transmissão serial de dados também a utilizam, como o PCI Express, SATA e SAS.

A figura 26 mostra o resultado de um sinal serial diferencial com a aplicação da operação de *emphasis*.

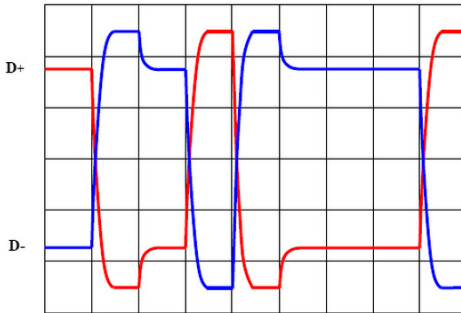


Figura 26 – Operação de *emphasis* em um sinal serial.

Para exemplificar o uso desta operação em um sinal de vídeo HDMI, será utilizado os dados da folha de especificação de outro circuito integrado, o ADV3003 da *Analog Devices* (Analog Devices, 2008). Foi utilizada a operação de *pre-emphasis*, e o comprimento do cabo HDMI neste caso é de 10 metros.

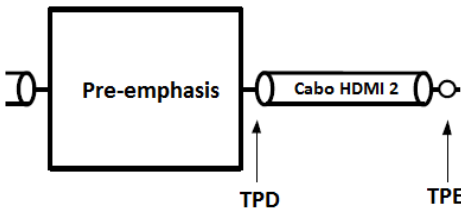


Figura 27 – Diagrama de teste para a operação de *emphasis* (Analog Devices, 2008).

Para melhor visualizar os benefícios da utilização da técnica, primeiro será mostrado o sinal nos pontos de teste TPD e TPE quando não é aplicado *pré-emphasis*.

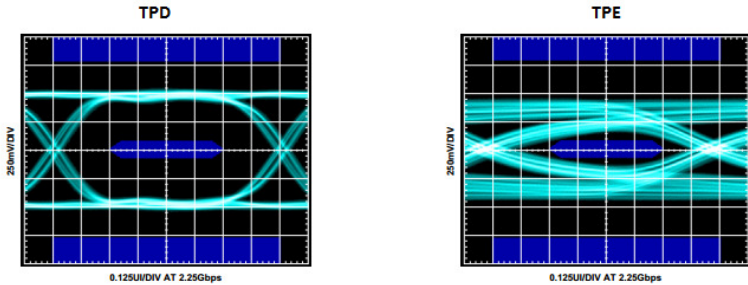


Figura 28 – Diagrama de olho no ponto TPD e TPE sem a aplicação de *pre-emphasis* (Analog Devices, 2008).

Agora o mesmo sinal quando é aplicada a operação de *pre-emphasis*:

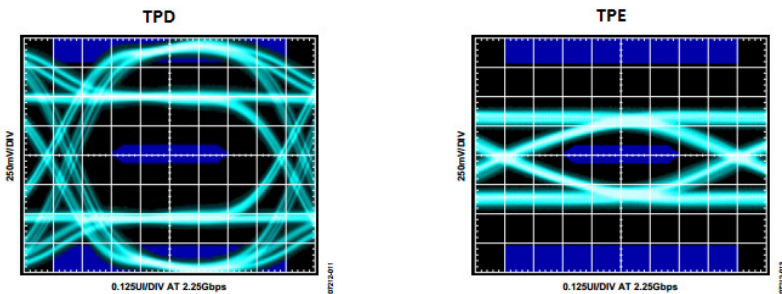


Figura 29 – Diagrama de olho no ponto TPD e TPE com a aplicação de *pre-emphasis* (Analog Devices, 2008).

No diagrama de olho em TPD pode-se observar que o valor da amplitude de algumas amostras aumenta enquanto que de outras continuam iguais. As maiores amplitudes correspondem as dos primeiros bits depois de uma transição.

Comparando TPE nos dois casos, percebe-se nitidamente que o diagrama de olho é mais aberto e compreensível quando a operação de *pre-emphasis* é empregada.

3.2 O DIVISOR

O principal modelo de uso de um diagrama de conexão HDMI é aquele na qual vem sendo falado desde o início desde trabalho: a fonte de vídeo envia o sinal digital pelo cabo usando o protocolo HDMI e este

sinal é recebido e decodificado por um *display*. Algumas das técnicas utilizadas por este protocolo são relativamente simples considerando apenas este caso de uso, porém podem ficar extremamente complexas se eventualmente essa conexão precise ser diferente.

No caso de um grande supermercado com dezenas de caixas para a realização da soma e pagamento das mercadorias, e em cada caixa deve ser feita a instalação de uma tela para distrair os consumidores durante o tempo que eles estão aguardando na fila, se fosse adotado o diagrama de conexão ponto a ponto, essa instalação seria muito custosa, pois seria necessária uma fonte de vídeo para cada *display*.

Outro exemplo interessante são as telas de *digital signage* instaladas dentro de um ônibus. Por ser um veículo longo são necessárias duas ou três telas espalhadas em seu interior para que todos os assentos tenham acesso visual a, no mínimo, uma tela. Neste caso, além de ser mais caro a instalação de uma fonte de vídeo para cada *display*, também tem a questão do espaço físico reduzido disponível dentro de um ônibus.

Nestes dois casos, assim como em diversas outras situações, é muito mais interessante e viável a utilização de um divisor de sinal de vídeo HDMI, conhecido simplesmente como Divisor HDMI, ou em inglês, HDMI Splitter.

Sua função é replicar o vídeo da entrada e enviá-lo para duas ou mais telas sem perda de qualidade, exibidos simultaneamente e que respeite as exigências do protocolo HDMI.

Nos tópicos seguintes, será visto como isso é feito e quais as complicações ao se realizar tal operação.

3.2.1 O CONTROLE EDID

O principal problema que surge ao ter que exibir duas imagens oriundas da mesma fonte de vídeo é o canal de comunicação DDC, que precisa ser compartilhado com ambos os monitores.

Como vimos anteriormente, EDID é o padrão de dados dos *displays* que contém informações sobre as características do mesmo. Esses dados são usados pela fonte do vídeo para definir o formato do sinal a ser enviado.

Cada monitor tem seu próprio código EDID, pois cada um tem capacidades diferentes, tais como resoluções suportadas e formato de áudio e vídeo suportados. Assim, antes de enviar o sinal de vídeo, a

fonte requisita estes dados do monitor para saber se ele é capaz de enviar um formato de vídeo aceito pelo *display*. Com a divisão, serão dois monitores, com dois dados EDID distintos.

Como a comunicação dos dados EDID é feita pela arquitetura I2C, seria perfeitamente possível conectar os dois condutores SCL e SDA de cada monitor diretamente com os da fonte, formando assim uma conexão paralela, pois é justamente esse o paradigma de funcionamento I2C. Porém, em um *splitter* esse diagrama de conexão não funcionaria corretamente devido a dois fatores.

O primeiro é que em uma conexão I2C, o dispositivo mestre se comunica com um dispositivo escravo por vez, e o mestre escolhe com qual escravo vai conversar através de um endereço único que cada escravo possui, e pela especificação DDC, a memória EEPROM de um *display* tem um endereço padrão, 0x50. Portanto, se as duas telas estiverem dentro das normas, as memórias EEPROM de ambas terão o mesmo endereço, o que resultaria em conflito caso essas estivessem conectadas diretamente em paralelo.

Caso o endereço de cada EEPROM fosse diferente e a fonte de vídeo conseguisse conversar corretamente com um monitor por vez, ainda assim o sistema poderia não funcionar corretamente, pois a fonte de vídeo iria se configurar baseado nos dados EDID do primeiro *display*, e depois iria fazer o mesmo para o segundo *display*, configurando os padrões de áudio e vídeo em cada caso para o monitor da conversa atual. No caso em que os *displays* tenham capacidades diferentes um do outro, o primeiro a se comunicar com a fonte de vídeo poderia não funcionar no final de todas as conversações.

Para exemplificar este último caso em que haveria problema, imagina-se dois monitores, a primeira aceita uma resolução máxima de 720P e a segunda 1080i. Ao ler os dados EDID do primeiro *display*, a fonte de vídeo começaria a enviar vídeo no formato 720P, que funcionaria corretamente em ambos os *displays*. Ao ler e se configurar com base nos dados EDID do segundo *display*, o vídeo agora enviado pela fonte, que será no formato 1080i, não será mais exibido no primeiro *display*, pois essa resolução excede suas capacidades.

Portanto, para fazer o sistema funcionar corretamente por completo, é necessário ter controle sobre a conversação EDID entre a fonte de vídeo e os dois monitores.

O que precisa ser feito, basicamente, é fazer a leitura dos dois dados EDID de cada monitor e achar a intersecção das configurações possíveis dos dois, e então enviar esta informação para configurar a fonte de vídeo.

Praticamente, isto é feito da seguinte maneira: ao iniciar, o *splitter* pede as informações EDID do primeiro *display* e as grava em uma memória. O mesmo processo é feito para o segundo monitor. Em posse dos dois dados EDID, o *splitter* agora realiza um processamento nessas informações a fim de identificar as características comuns entre os dois monitores, e com isso gera um novo código EDID único que será então enviado para a fonte de vídeo, que finalmente se configura de uma maneira compreensível para ambos os *displays*.

3.2.2 O HDCP

Com o protocolo HDCP acontece o mesmo problema. Não será estudado como é feito a encriptografia deste protocolo, pois foge do escopo do trabalho. Basta ter consciência de que o vídeo é encriptografado na fonte e o monitor só irá conseguir desfazer este processo e interpretar corretamente o sinal com uma chave específica.

Para ser capaz de dividir o sinal sem violar o protocolo, o *splitter* precisa desfazer a encriptografia utilizando a chave específica e encriptografar novamente para então enviar para os dois monitores. Assim, visto do protocolo HDCP, o divisor se comporta tanto como um receptor de vídeo como uma fonte.

4 O DESENVOLVIMENTO DOS PRODUTOS

Neste capítulo será mostrado como foi o processo de desenvolvimento dos produtos propostos. Utilizando todo o conhecimento teórico adquirido, pôde-se então dar início ao processo de elaboração dos esquemáticos eletrônicos, *design* do *layout* da PCB, desenvolvimento do software embarcado de controle e demais aspectos que compõem o produto.

Por ser um produto desenvolvido por uma empresa privada e com o objetivo de comercialização, será dado um enfoque mais conceitual e metodológico do processo de desenvolvimento, sem violar as normas da empresa com relação à proteção de sua tecnologia. Detalhes específicos de ferramentas ou componentes utilizados serão suprimidos para a garantia dessas normas.

4.1 OS ESQUEMÁTICOS

Um esquemático eletrônico nada mais é do que uma apresentação gráfica das conexões eletrônicas de um circuito. É o processo de colocar todas as ligações do circuito em um esquema bidimensional.

Atualmente, existem diversos programas de computador que são focados no desenvolvimento de esquemáticos eletrônicos e subseqüentemente no layout de suas respectivas placas de circuito impresso. Tais programas aumentam a velocidade de criação de projetos eletrônicos absurdamente, reduzindo o “*time to market*” do produto e, conseqüentemente, seu custo de implementação.

Na figura 30 a seguir é mostrado um exemplo de um esquemático simples de um circuito eletrônico desenhado em um desses software.

Figura 30 – Imagem retirada para proteção do capital intelectual da empresa

Neste exemplo, é mostrado um circuito de regulação de tensão. Os símbolos de resistores, capacitores, diodos e indutores são padrões, já conhecidos. Os circuitos integrados são representados por retângulos amarelos, aonde cada pino de saída é representado por uma linha anexada ao retângulo junto a sua discriminação.

As linhas que unem um componente ao outro são as trilhas, ou condutores, de uma PCB. É interessante denominá-las para se ter maior

clareza tanto no próprio esquemático quanto na hora do roteamento da placa de circuito impresso. Um exemplo é o nome “+5V_Adapter” que a trilha da entrada recebe. Com essa nomenclatura fica claro que se trata de uma linha com tensão igual a +5 volts, assim como é claro que na saída do circuito integrado “U3” (NCP5501), tem-se a tensão de +3.3 volts.

Agora será descrito quais são os passos do processo de criação de um esquemático utilizando um software específico para tal função. Primeiro, é feita a escolha dos componentes que serão utilizados, tais como capacitores, diodos, circuitos integrados, conectores, etc. Criam-se então, os elementos gráficos dos mesmos, por exemplo, o capacitor é representado por duas barras paralelas e com dois conectores. Depois que se criou toda a biblioteca de componentes do projeto, é feita então o posicionamento dos mesmos na folha do esquemático com as devidas ligações entre eles para se formar um circuito eletrônico funcional.

Deve-se mencionar que os passos citados compreendem apenas a técnica do desenvolvimento de um esquemático, conhecimento que teria pouca utilidade sem a base teórica em engenharia eletrônica aliada com a experiência no mercado de componentes eletrônicos.

No caso do extensor HDMI, os sinais de vídeo e *clock* contidos nos oito condutores TMDS são enviados para o circuito integrado especializado, que realiza as operações de regeneração necessárias. Para configurar alguns parâmetros desse CI, tal como magnitude do ganho da operação *emphasis*, foi necessário utilizar um microcontrolador, que se comunica com o CI através de um canal I2C.

Além disso, o microcontrolador controla o sinal HPD e também habilita ou desabilita a comunicação DDC, para evitar que esta comunicação seja feita enquanto o sistema ainda não está pronto.

Após feito o processamento de regeneração, o circuito integrado especializado envia os sinais TMDS para o conector HDMI da saída.

A figura 31 ilustra o esquemático do extensor HDMI finalizado, sem especificar nenhum componente utilizado nem as nomenclaturas dos sinais.

Figura 31 – Imagem retirada para proteção do capital intelectual da empresa

O esquemático finalizado do divisor é ilustrado na figura 32. O circuito integrado especializado neste caso é responsável pela divisão dos sinais TMDS de vídeo e *clock*, pelo controle dos canais DDC dos dois receptores e da fonte de vídeo e também pela comunicação para autenticação HDCP.

No divisor, o microcontrolador é responsável pelas mesmas funções do extensor e algumas funções adicionais que será visto no desenvolvimento do firmware.

Figura 32 – Imagem retirada para proteção do capital intelectual da empresa

4.2 DESENVOLVIMENTO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Com o esquemático eletrônico pronto, o próximo passo é o desenvolvimento da placa de circuito impresso. Neste processo é definido o tamanho da placa e em seguida o posicionamento de cada componente. Posteriormente, é feita a ligação entre os componentes através das trilhas da PCB.

Cada componente tem um *footprint* específico. *Footprint*, que traduzindo literalmente seria “pegada”, é a marca do componente na placa de circuito impresso. Essa marca é definida pelas características físicas do componente, tais como tamanho e posicionamento de seus terminais. Na figura 33 é mostrada a parte inferior de um conector HDMI e seu respectivo *footprint* em uma PCB.

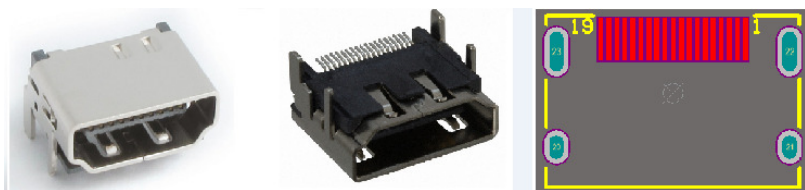


Figura 33 – Conector HDMI (vista superior e inferior) e seu footprint.

Os *footprints* dos componentes são feitos junto com a criação dos elementos gráficos dos mesmos, ou seja, no desenvolvimento do esquemático.

A criação de placas de circuito impresso envolve diversas técnicas, as quais serão omitidas para evitar a demasiada extensão deste trabalho.

A figura 34 é um modelo 3D da placa de circuito impresso finalizada do *splitter*. Para se chegar neste produto, é feito um extensivo trabalho que envolve o posicionamento de todos os componentes do produto, roteamento dos sinais elétricos que ligam esses componentes, além de diversas outras técnicas. Estes passos são realizados iterativamente até que se chegue ao PCB final.

Figura 34 – Imagem retirada para proteção do capital intelectual da empresa

Após a finalização deste desenvolvimento para ambos os produtos, os arquivos digitais dessas placas de circuito impresso são enviadas para uma empresa especializada na manufatura de PCBs.

A figura 35 mostra a placa do extensor e do divisor já com os componentes soldados.

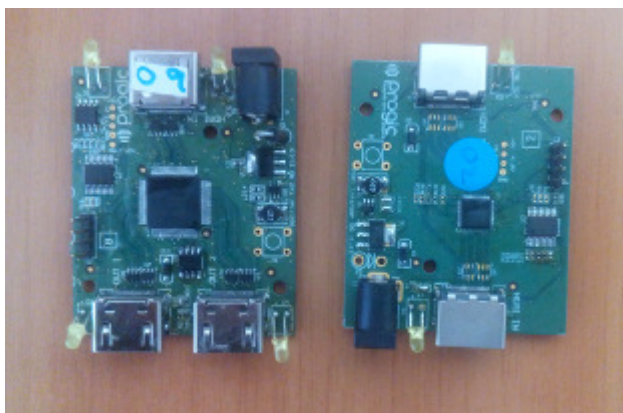


Figura 35 – PCBs do divisor e do extensor já com os componentes soldados.

4.3 O FIRMWARE

Como já explicado anteriormente, em ambos os produtos, extensor e divisor, foi utilizado um circuito integrado dedicado para realizar as operações específicas propostas ou seja, no extensor, este CI

realiza a operação de equalização e *emphasis* e no *splitter* o circuito integrado divide o sinal e gerencia o HDCP.

Assim, para realizar as tarefas restantes em cada produto, foi necessário implementar um microcontrolador, que precisa ser programado através de um firmware para efetuar tais funções.

No extensor, existem três principais tarefas que o microcontrolador realiza. A mais importante é a configuração do CI de extensão. Esse ajuste também é feito utilizando a arquitetura I2C, porém é um canal independente do DDC. São enviados parâmetros para o CI configurá-lo de acordo com nossas necessidades específicas.

Outra função do microcontrolador é a administração do sinal *hot-plug detect*. Esse controle é necessário para evitar que a fonte do vídeo e a tela se comuniquem enquanto o extensor estiver se configurando. O mesmo é feito com o canal DDC. Foi necessário adicionar uma lógica que ativa ou desativa o canal de comunicação pelo microcontrolador.

No divisor, o microcontrolador realiza mais funções. Além de configurar o CI de divisão com os parâmetros específicos do nosso projeto, controlar o HPD e DDC, também é executada a lógica de fusão dos dados EDID das telas para ser posteriormente enviado para a fonte de vídeo. Essa é uma tarefa um pouco mais complexa, pois além de ser necessário realizar funções de escrita e leitura em uma memória externa, também foi necessário o conhecimento completo da arquitetura de dados do EDID.

Foi utilizada a linguagem de programação C e, novamente para a proteção da tecnologia da empresa, não serão apresentados dados específicos do projeto, tais como o código fonte do firmware ou qual o microcontrolador utilizado.

4.4 TESTES DE VALIDAÇÃO

Uma importante e demorada parte no desenvolvimento de um produto é a sua validação. É necessário realizar diversos testes nesta fase para evitar que problemas ocorram quando o produto já estiver sendo comercializado, assegurando assim, a qualidade do produto e evitando perdas em grandes lotes de produção.

Os produtos foram testados com diversas fontes de vídeos e modelos de telas, para que se tenha um maior grau de interoperabilidade, em diversos ambientes e temperaturas diferentes, sempre corrigindo eventuais problemas em seu funcionamento.

Foi necessário a manufatura de diversos protótipos de cada produto para agilizar e paralelizar os testes. Além da realização dos testes dentro do ambiente de desenvolvimento na empresa, foram distribuídos alguns exemplares dos protótipos para os demais funcionários da empresa para a execução de testes em campo.

Este processo, como já esperado, gerou a necessidade do desenvolvimento de uma nova versão das placas de circuito impressos dos produtos, considerando todas as modificações necessárias que foram constatadas durante o processo de validação. Esta segunda versão da PCB veio a ser a final, e seu tempo de desenvolvimento foi mais rápido por já se ter como base as placas de protótipo.

Houve também a necessidade de diversas modificações e otimizações no firmware do produto, com o objetivo de eliminar *bugs* e aprimorar o funcionamento do produto.

Foi nesse processo também que foi definido as reais capacidades e características do produto, tal como o comprimento máximo do cabo HDMI que o extensor consegue suportar para cada resolução de vídeo. Essas capacidades foram comparadas com produtos similares já existentes no mercado, obtendo resultados superiores, satisfazendo os propósitos dos produtos.

4.5 DEMAIS ASPECTOS DO PRODUTO

Foram desenvolvidas também, as demais partes do projeto que formam o produto como um todo, deixando-o pronto para ser comercializado. Isso engloba a carenagem das placas, os manuais de utilização de cada equipamento e o fornecimento dos acessórios que compõem o kit (fonte e cabo).

O desenvolvimento da carenagem de cada produto, na realidade, teve início junto com o desenvolvimento das placas de circuito impresso. Isso porque neste estágio já é necessário idealizar as carenagens para poder escolher o melhor posicionamento possível dos conectores, como a entrada do cabo HDMI e da alimentação, e dos indicadores de iluminação LED. É preciso considerar também no projeto da PCB, os furos de fixação da mesma na carenagem.

É desenvolvido, em um software CAD, um arquivo gráfico com as medidas e dimensões da carenagem. É criado então, em outro software, a serigrafia que será impressa na carenagem. A manufatura efetiva é feita por uma empresa terceirizada.

A figura 36 a seguir mostra o projeto 3D da carenagem do extensor.

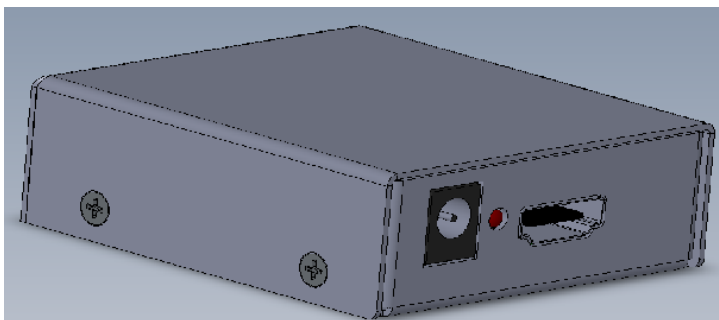


Figura 36 – Carenagem do extensor.

Os manuais dos produtos são escritos para descrever o funcionamento dos mesmos, suas características, limitações e formas de uso. Contém também diversas ilustrações do produto e seus diagramas de conexão.

A figura 37 mostra os dois produtos já finalizados dentro de suas carenagens.



Figura 37 – Divisor e extensor HDMI finalizados

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E EXPECTATIVAS

O desenvolvimento de produtos eletrônicos é uma importante vertente da engenharia elétrica e eletrônica e ainda tem muito a se desenvolver no Brasil.

A maioria dos equipamentos de alta tecnologia são importados, até mesmo os mais simples, como o extensor e o divisor HDMI. Esta é uma área que tem que evoluir muito para poder ser comparado com a engenharia de outros países. Muito precisa ser desenvolvido ainda para o Brasil se tornar mais tecnologicamente auto-suficiente.

Apesar da relativa simplicidade dos produtos propostos, é necessário um grande conhecimento teórico e prático para poder tirá-los do papel e transformá-los em produtos funcionais e viáveis para a empresa.

O conhecimento teórico adquirido e aplicado neste projeto é vasto, assim como a experiência prática dos métodos utilizados para transformar teoria em algo concreto.

Diversas áreas de competências foram desenvolvidas. Especificação de produto, desenvolvimento de hardware e firmware, engenharia de qualidade e de produto, relacionamento com fornecedores de diversos segmentos são algumas dessas áreas.

Os objetivos principais da proposta de trabalho foram alcançados com sucesso. Ambos os produtos gerados realizam suas funções corretamente, seja estender ou dividir um sinal de vídeo HDMI.

Por ser um desenvolvimento custeado por uma empresa privada, as expectativas para estes produtos não poderiam ser diferentes. Que o retorno financeiro com sua comercialização liquide o custo de desenvolvimento e que gere lucro, que possivelmente será utilizado para custear novos projetos de alta tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

A. J. Gibbs, R. Addie, "*The covariance of near end crosstalk and its application to PCM system engineering in multipair cable*"
IEEE Trans. on Commun., Vol. COM-27, No. 2, Feb. 1979,
pp.469-477.

Analog Devices, "*HDMI/DVI TMDS Equalizer – ADV3003*",
disponível em: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADV3003.pdf, 2008. Acesso em: 27 de jun de 2014.

Butler, Jeremy G.. *Television: Critical Methods and Applications*.
Psychology Press, 2006.

Cianci, Philip J., "*High Definition Television*". NC, USA: McFarland.
pp. 1–25. ISBN 978-0-7864-4975-0, 2012.

DCP, LLC, "*HDCP deciphered: white paper*", Disponível
em: http://www.digital-cp.com/files/documents/04A897FD-FEF1-0EEE-CDBB649127F79525/HDCP_deciphered_070808.pdf, 2008.
Acesso em: 27 de jun de 2014.

DDWG Promoters. "*Digital Visual Interface - DVI*". Disponível em:
http://www.cs.unc.edu/Research/stc/FAQs/Video/dvi_spec-V1_0.pdf,
capítulo 4, 2 de Abril, 1999. Acesso em: 26 de jun de 2014.

Blyth, Graham. "*Audio Balancing Issues*". Disponível em:
http://www.soundcraft.com/support/white_papers.aspx#, 2 de Abril,
2009. Acesso em: 26 de jun de 2014.

HDMI Licensing. "*HDMI Specification Marks 10-Year Milestone as De-Facto Standard for HD Connectivity*". Disponível em:
http://www.hdmi.org/press/press_release.aspx?prid=132. Acesso em: 20
de jun de 2014.

HDMI Organization. *HDMI Adopters – Founders*. Disponível em:
http://www.hdmi.org/learningcenter/adopters_founders.aspx. Acesso
em: 20 de jun de 2014.

HDMI Organization. "Knowledge Base". Disponível em: <http://www.hdmi.org/learningcenter/kb.aspx#45>, 2002. Acesso em: 20 de jun de 2014.

HDMI Organization. "Finding the Right Cable". Disponível em: http://www.hdmi.org/consumer/finding_right_cable.aspx, 4 de Setembro 2013. Acesso em: 27 de jun de 2014.

HDMI Organization. HDMI Presentation. Disponível em: http://www.hdmi.org/pdf/HDMI_CPTWG_4-17-02.PDF. Acesso em: 20 de jun de 2014.

HDMI Organization. "HDMI Forum releases version 2.0 of the HDMI specification". Disponível em: http://www.hdmi.org/press/press_release.aspx?prid=133, 4 de Setembro 2013. Acesso em: 20 de jun de 2014.

Joseph D. Cornwall. *"Understanding Digital Interconnects". Audioholics.* Disponível em: <http://www.audioholics.com/audio-video-cables/understanding-digital-interconnects>, 2004. Acesso em: 20 de jun de 2014.

Jordan, Edward Conrad, *"Electromagnetic Waves and Radiating Systems"*, Prentice Hall, ISBN 978-0-13-249995-8, 1968

Lattice Semiconductor Corporation. *"Differential Signalling"* Disponível em: <http://www.latticesemi.com/lit/docs/appnotes/pac/an6019.pdf>, 2001. Acesso em: 20 de jun de 2014.

Laumeister, Bill. *"Strategic Application Engineer"* Disponível em: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4644.pdf>, 2012. Acesso em: 20 de jun de 2014.

Lee, Fabian Kung Wai. *"Differential Signalling"* Disponível em: http://pesona.mmu.edu.my/~wlkung/ADS/HSPCB_EMI/Part5.pdf, 2012. Acesso em: 20 de jun de 2014.

Levine, William S., *"The control handbook"*, Boca Raton, FL: CRC Press, p. 1548, ISBN 0-8493-8570-9, 1996.

Nise, Norman S., "**Control Systems Engineering**" (Fifth ed.), John Wiley & Sons, pp. xvii+880, ISBN 978-0-471-79475-2, 2008.

Pinheiro, José. "**Dispersão, Jitter e Latência**" Disponível em: http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_dispersao_jitter_latencia.php, 2004. Acesso em: 20 de jun de 2014.

S. H. Hall, G. W. Hall, and J. A. McCall, "**High-Speed Digital System Design, A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices**", John Wiley & Sons, Inc., capítulo. 7, 2000.

Texas Instruments, "**Video Equalizer (3D+C) for DVI, HDMI Source/Repeater/Sink Applications**", disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/snls301c/snls301c.pdf>, 2008. Acesso em: 27 de jun de 2014.

Thakur, Dinesh, "**Twisted Pair: What is Twisted Pair Cable**". Disponível em: <http://ecomputernotes.com/computernetworkingnotes/communication-networks/twisted-pair>, 2004. Acesso em: 21 de jun de 2014.

Toy Makers Television, "**Coaxial Cable**". Disponível em: <http://tymkrs.tumblr.com/post/5102845277/24-coaxial-cable-part-ii-ham-lesson-o-de-day>, 2001. Acesso em: 21 de jun de 2014.

VESA, "**Extended Display Identification Data (EDID) Standard**", Version 3, 1997.

VESA, "**Enhanced EDID Standard**", Disponível em: <http://read.pudn.com/downloads110/ebook/456020/E-EDID%20Standard.pdf>, p. 32, 2000. Acesso em: 27 de jun de 2014.