

**GUSTAVO MISAWA HAMA
GUSTAVO OLIVEIRA BARRANOVA**

SISTEMA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO 60 GHZ

São Paulo
2022

**GUSTAVO MISAWA HAMA
GUSTAVO OLIVEIRA BARRANOVA**

SISTEMA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO 60 GHZ

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista com ênfase em Sistemas Eletrônicos.

**GUSTAVO MISAWA HAMA
GUSTAVO OLIVEIRA BARRANOVA**

SISTEMA DE COMUNICAÇÃO SEM FIO 60 GHZ

Trabalho apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista com ênfase em Sistemas Eletrônicos.

Orientador:
Gustavo Pamplona Rehder

São Paulo
2022

RESUMO

Soluções para a enorme quantidade de dados e a alta demanda de uma taxa de transmissão cada vez maior tem se tornado necessidade, principalmente quando o assunto é vídeo que exige uma enorme quantidade de dados e estão no nosso cotidiano tanto para entretenimento e informação mas também para a saúde. Problemas como interferência, quantidade de fios e alta latência são comuns de ver. Para isso os estudos estão voltados para ondas milimétricas que são ondas com uma alta taxa de transferência e pouco exploradas até então. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de comunicação sem fio de 60 GHz utilizando um transmissor e um receptor para a transferência de um vídeo em 4K, dando prioridade a baixa latência e qualidade do sinal. A comunicação proposta será fabricada utilizando um substrato de cristal líquido e implementada através de uma FPGA para realizar a modulação e demodulação do vídeo.

Palavras-Chave – Ondas Milimétricas, 60 GHz, Transmissão de vídeo 4k.

ABSTRACT

Solutions for the majority quantity of data and the high demand of a great baud rate has become necessity, mostly when the topic is video, that demands a huge amount of data and are present in our daily lives, at information and entertainment as well as healthy. Problems like interference, number of cables and high latency are very common. For that, studies are aimed at millimeters waves, which are high baud rate waves and have a wide area to explore. The main goal of this work is to develop a wireless communication system using 60 GHz, using a transmitter and a receiver for 4k video transmission, giving priority to low latency and the signal quality. The communication will be manufactured with a liquid crystal substrate and implemented through a FPGA to do the video modulation and demodulation.

Keywords – millimeter waves, 60 GHz, 4k video transmission.

SUMÁRIO

1	Introdução	p. 1
1.1	Motivação	p. 1
1.2	Objetivos	p. 2
1.3	Árvore de Objetivos	p. 2
2	Estado da Arte	p. 3
3	Materiais e Métodos	p. 5
3.1	Fabricação das PCBs	p. 5
3.1.1	Placa-mãe	p. 9
3.1.2	Placa-filha	p. 9
3.2	Modulação do sinal de vídeo	p. 10
3.2.1	Operação do transmissor	p. 10
3.2.2	Entrada	p. 11
3.3	Cronograma	p. 12
Referências		p. 14

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O avanço da tecnologia e o aumento de sua complexidade trouxe a necessidade de um enorme tráfego de dados entre dispositivos. Com isso surgiram alguns problemas, como o congestionamento de dados, interferências no transporte e aumento do número de cabos para comunicação, entre outros, que levam a uma diminuição na velocidade de transmissão de dados. Isso, além de uma maior demora no recebimento, dificulta tarefas do nosso dia a dia que estão ficando cada vez mais prioritárias, é o caso de transmissões em tempo real de vídeos 4K, utilizado muito em vídeo conferências, *streaming* e também na medicina, área na qual é preciso ter o máximo de detalhes na imagem e baixa latência.

Isso gera a necessidade do desenvolvimento de sistemas de transmissão mais avançados e em bandas de frequência que permitam essa alta taxa de transmissão, o que pode ser obtido através de ondas milimétricas. As ondas milimétricas são ondas que encontram-se na faixa de frequência entre 24-100GHz, portanto possuem uma grande banda a ser explorada mas com alguns desafios na transmissão e recepção devido a altas frequências.

Foi com essa necessidade que o professor Gustavo Rehder nos propôs o desafio de desenvolver uma comunicação sem fio em 60 GHz, um projeto que é continuação de outro projeto de formatura de 2017, feito por Perun e Ramassamy[1] e orientado também pelo Professor Gustavo Rehder. Os autores fizeram a seleção dos componentes utilizados, estruturaram a arquitetura da solução, conseguiram desenvolver a interface de configuração entre o computador e o transceptor comercial. Entretanto, devido a problemas de fabricação do transmissor e receptor, não foi possível realizar os testes de transmissão e a modulação do vídeo a ser enviado ao transmissor.

O principal problema foram curto-circuitos nos pinos do circuito integrado utilizado, isso aconteceu devido a precisão necessária para soldar o componente, que possui encapsulamento do tipo *ball grid array (BGA)*, e a falta de um método preciso para realizar a metalização das vias de ligação entre os dois lados condutores da placa de circuito impresso.

1.2 OBJETIVOS

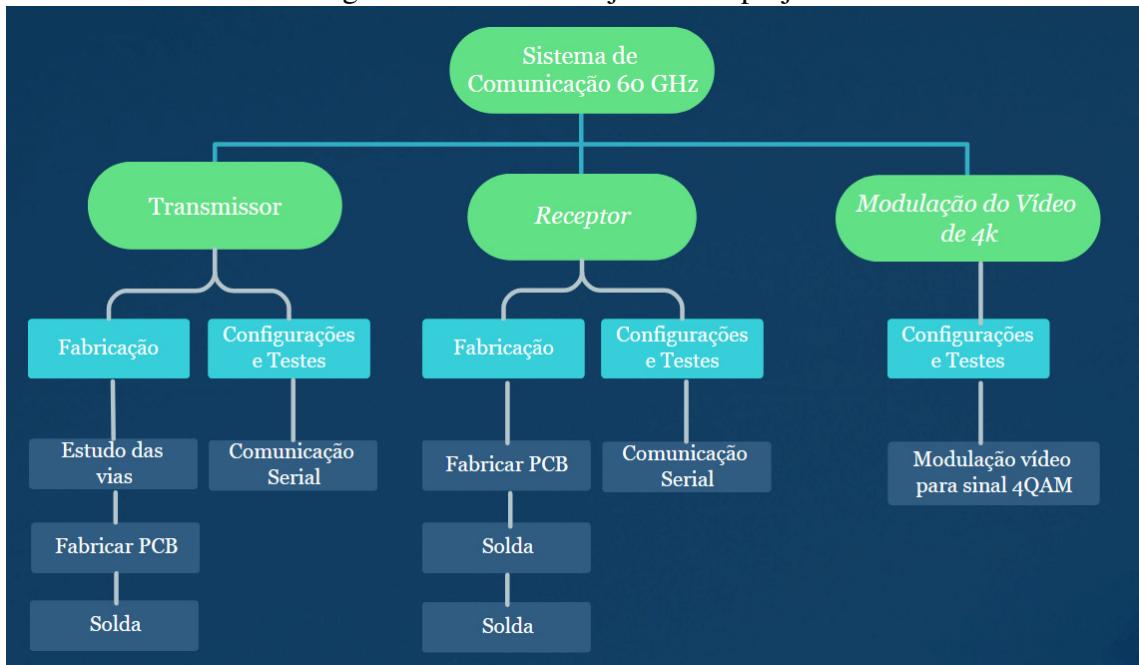
Este projeto terá como objetivo a pesquisa, o desenvolvimento e a fabricação de um transmissor e um receptor de ondas milimétricas, mais especificamente na faixa de 60 GHz, para a transmissão em tempo real de vídeos em alta qualidade sem compressão. Nessa frequência, conseguimos uma baixa latência devido a alta taxa de transmissão mas também uma qualidade do sinal devido a faixa de 60 GHz que é absorvida pelo oxigênio e que resulta em menos interferências no sinal, o que não é possível em baixas frequências.

Para a fabricação do projeto serão estudadas maneiras de realizar a deposição de cobre nas paredes internas das vias, revisão do projeto e fabricação das placas transmissora e receptora, estudo modulação de vídeos para envio e testes de transmissão sem fio na faixa de 60 GHz entre os dois dispositivos. Todos os processos de fabricação e testes serão feito com apoio da equipe e infraestrutura do Laboratório de Microeletrônica da USP (LME).

1.3 ÁRVORE DE OBJETIVOS

Uma árvore objetivos é a representação gráfica do objetivo geral do projeto mostrando os objetivos específicos, que são os meios para chegar no objetivo principal. Para atingir esse objetivo, realizando a comunicação de um vídeo em 4k foi elaborada a seguinte árvore de objetivos:

Figura 1: Árvore de objetivos do projeto



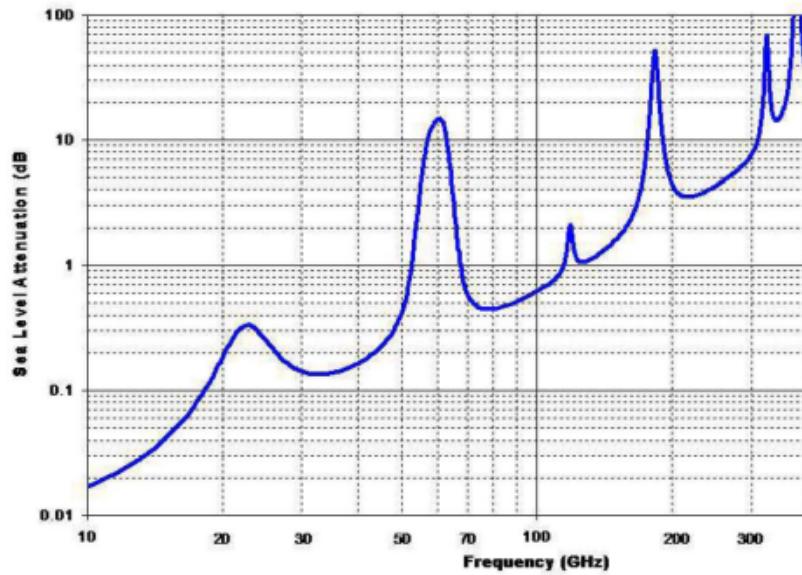
Fonte: De autoria própria

2 ESTADO DA ARTE

Na literatura, diversos estudos estão sendo realizados na área de ondas milimétricas, mais especificamente nas faixas de 28, 38, 60, 71-76 e 81-86 GHz, devido a suas altas taxas de transmissão, exigido para aplicações da quinta geração de redes de comunicação mobile (5G) [2].

Em comparação com as faixas de mais baixa frequência (1-10 GHz), a atenuação é maior em bandas de mais alta frequência devido a sua absorção em nível molecular e atmosférica, limitando o alcance dessas bandas [3], como pode ser visto na Figura 2. Entretanto, isso pode ser considerado uma vantagem para redes de curto alcance devido ao menor risco de interferência por outros dispositivos.

Figura 2: Atenuação em ondas milimétricas



Fonte: Seker, Güneser e Ozturk[2] (2018)

Outro fator que difere as ondas milimétricas em relação as tradicionais é sua diretividade. Com a utilização de conjuntos de antenas, é possível criar um feixe mais estreito, criando um feixe mais diretivo. Devido ao menor tamanho de antena, é possível adicionar mais antenas em um mesmo espaço fixo, aumentando o ganho direcional em frequências mais altas, também

resultando em menor interferência [3].

Para redes de área pessoal (*WPAN - Wireless Personal Area Networks*), os principais trabalham se concentram na faixa de 60 GHz. Podem ser citados a camada de adaptação para envio de vídeos sem compressão [4] e o desenvolvimento de um sistema de *scheduling* para comunicação com ondas milimétricas levando em consideração métricas de qualidade de serviço (*QoS - Quality of Service*) para aplicações de multimídia [5].

Houve o desenvolvimento de alguns circuitos integrados (CI) capazes de realizar a transmissão e recepção de sinais na faixa de frequência de 60 GHz, como a Peraso[6], GotMIC (Göteborg Microwave Integrated Circuits) [7], Pasternack [8], Infineon [9], Tensorcom [10] e Analog Devices [11].

Ao analisar critérios como preço, encapsulamento, dimensões, figura de ruído, ganho e, principalmente, documentação disponível, Perun e Ramassamy[1] optaram pela escolha da utilização dos CIs da Analog Devices para montagem do projeto.

Já existem produtos comercializados utilizando a frequência de 60 GHz, como sistemas de transmissão de vídeo sem compressão [12] e roteadores de *Wi-Fi* [13].

O estudo de sistemas utilizando ondas milimétricas está em destaque nos últimos anos, com o aumento da demanda de altas taxas de transferência sem fio devido ao 5G e a Internet das Coisas, *Internet of Things (IoT)*. O desenvolvimento do método de fabricação todo feito no Brasil, o primeiro a ser produzido, possibilitará o avanço dos estudos nessa faixa de frequência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A prova de conceito será feita a partir de uma placa receptora e outra transmissora fabricadas utilizando a infraestrutura disponível no Laboratório de Microeletrônica da USP (LME). A estrutura da solução proposta é mostrado no diagrama de bloco da Figura 3. As entradas e saídas externas do sistema são:

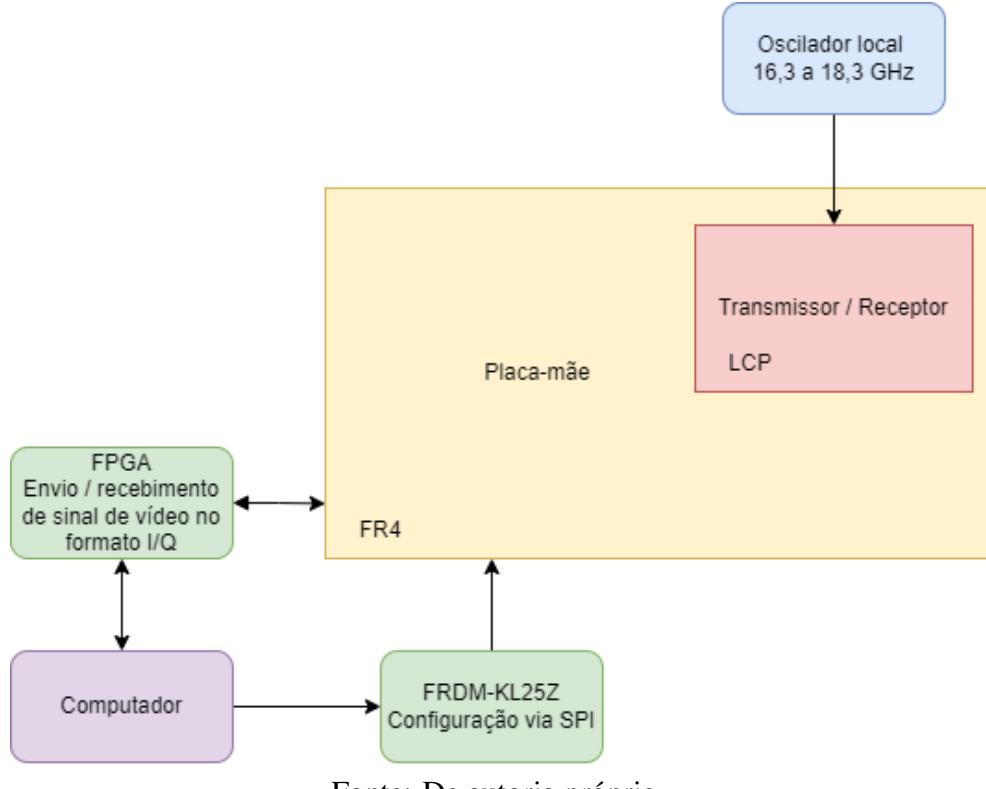
- Oscilador local: Fornecerá um sinal de frequência entre 16,3 GHz e 18,3 GHz que será utilizado para gerar a onda portadora de 60 GHz para o envio dos dados;
- FPGA: Modulação/demodulação do sinal de vídeo no formato I/Q entre o computador e o sistema de transmissão/recepção;
- FRDM-KL25Z: Interface de comunicação serial/SPI entre o computador e o sistema transmissor/receptor utilizado para configuração.

O sistema transmissor/receptor é composto por duas placas de circuito impresso, *Printed Circuit Boards (PCB)*, a placa-mãe e a placa-filha. A placa-mãe será responsável por receber e enviar os sinais para os componentes externos e regular as tensões de alimentação necessárias para a placa-filha. A comunicação entre as placas é feita a partir de um conector placa-placa. A placa-filha será responsável por receber o sinal do oscilador local, modular o sinal de entrada recebido pela placa-mãe e enviar/receber os dados em 60 GHz, utilizando os circuitos integrados HMC6300 e HMC6301 para o transmissor e receptor, respectivamente. A antena utilizada será fabricada na própria placa-filha.

3.1 FABRICAÇÃO DAS PCBs

As placas de circuito impresso são desenhadas em *softwares* como Altium Designer e Ki-CAD. O processo de fabricação das PCBs será feito por uma cortadora a *laser* mostrada na figura 4, fabricado pela LPKF, para os furos, isolamento das trilhas e criação do *stencil* para solda dos componentes. As rotinas para cada processo são criadas pelo *software* CircuitCAM a partir

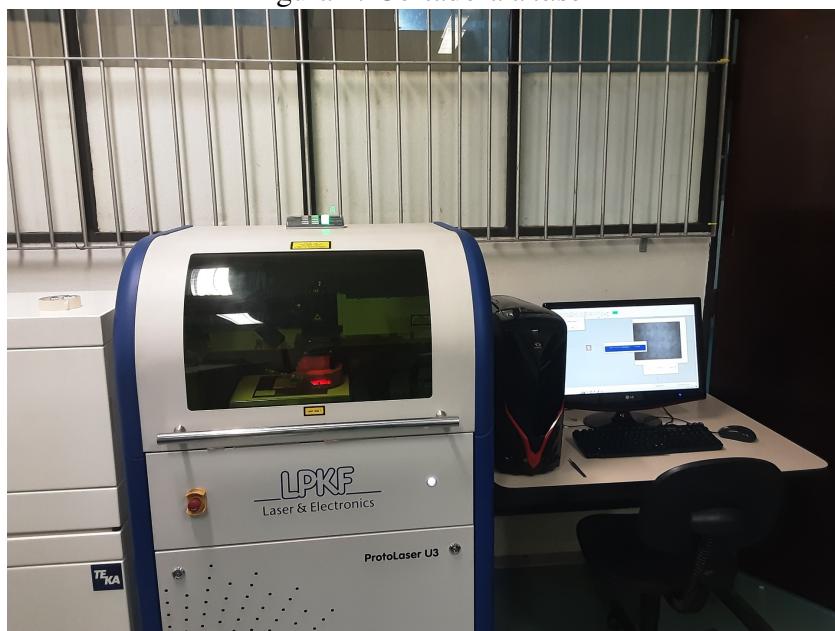
Figura 3: Diagrama de blocos - transmissor/receptor



dos arquivos Gerber gerados pelos *software* de *Electronic Computer-Aided Design (ECAD)*. A sequência dos processos é mostrada a seguir:

1. **Furação:** Os furos são feitos pelo corte a *laser* em múltiplas etapas, alterando a altura do ponto focal para cortar através do material. Nesse processo também são criados os pontos fiduciais para posterior alinhamento;
2. **Metalização das vias:** As vias, que tem a função de ligar as trilhas eletricamente entre a camada superior e a camada inferior, são metalizadas por meio de deposição *electroless* de cobre por meio de um processo industrial, M-Copper Omega [14], desenvolvido pela MacDermid, como mostrado na Figura 5.
Em seguida, é feito uma deposição eletrolítica para aumentar a espessura do cobre na via. Esse processo utiliza uma tensão aplicada no formato *periodic pulse reverse (PPR)* [15], de forma a aumentar a espessura do cobre apenas nas vias;
3. **Isolação das trilhas:** Após o processo de metalização, a placa em produção volta ao corte a *laser*. Utilizando os pontos fiduciais para realinhar e referenciar a máquina. Para remover as áreas de cobre indesejadas no *layout* e criar as trilhas de sinais, o processo é dividido em duas etapas, *rubout* e *heat*.

Figura 4: Cortadora a *laser*



Fonte: De autoria própria

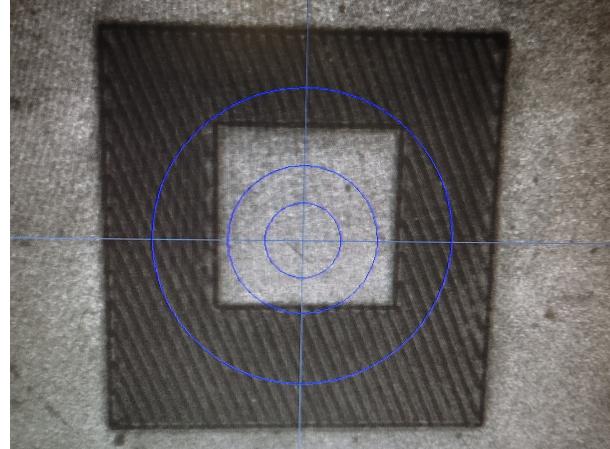
Figura 5: Deposição *electroless*



Fonte: De autoria própria

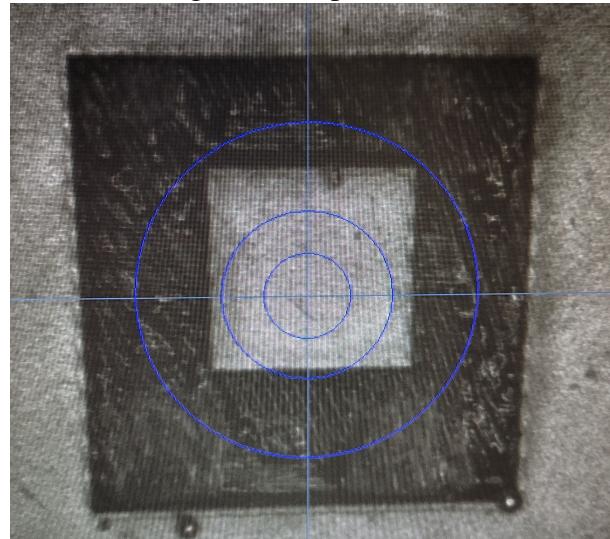
O primeiro separa a região em filetes paralelos, separando termicamente cada linha de cobre, como mostrado na Figura 6. Em seguida, a etapa de *heat* esquenta os filetes, como estão isolados termicamente do restante do cobre da placa, eles esquentam mais e se descolam do substrato, como mostrado na Figura 7, sendo facilmente removidos pelo exaustor da máquina [16].

Figura 6: Etapa de *rubout*



Fonte: De autoria própria

Figura 7: Etapa de *heat*



Fonte: De autoria própria

Os parâmetro da cortadora a *laser* utilizados dependem do material utilizado e da etapa do processo, sendo necessário a calibração no *software* Circuit Master de acordo com o processo. Os processos da placa-mãe e placa-filha serão detalhados nas próximas subseções.

3.1.1 PLACA-MÃE

O substrato utilizado para fabricar a placa-mãe é um material tradicional para a produção de PCBs de uso comum, FR4 de espessura 1,6mm. Perun e Ramassamy[1] conseguiram produzir com sucesso a placa-mãe, apesar de não terem utilizado o processo de metalização de vias descrito. Entretanto, para familiarização com os equipamentos, nesse primeiro semestre foi realizada a calibração dos parâmetros para uma placa de mesmo substrato, realizando todos os processos descritos acima. Os valores otimizados encontrados para os principais parâmetros estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da cortadora a laser para furos, *rubout* e *heat* (FR4 1600 μm)

	Furação			Rubout	Heat
	Task 1	Task 2	Task 3		
Frequência (kHz)	40	40	40	75	60
Potência (W)	6	6	6	4.375	5.2
<i>Jump delay</i> (μs)	1000	1000	1000	1100	1000
<i>Jump Speed</i> (mm/s)	4000	4000	4000	100	1000
<i>Laser off delay</i> (μs)	100	100	100	320	0
<i>Laser on delay</i> (μs)	0	0	0	70	60
<i>Mark delay</i> ($\mu\text{s}/\text{s}$)	300	300	300	600	600
<i>Mark Speed</i> (mm/s)	90	90	90	145	240
<i>Polygon delay</i> (μs)	0	0	0	0	0
Diâmetro do feixe (μm)	15	15	15	-	-
Tipo de círculo	<i>Outer Circle</i>	<i>Outer Circle</i>	<i>Outer Circle</i>	-	-
Número de voltas	5	4	4	-	-
<i>Air pressure</i>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Repetições	300	300	300	1	1
<i>Tool Z-Offset</i> (μm)	0	500	1000	0	3000

Fonte: De autoria própria

Para o processo de furação, o melhor resultado foi obtido com três etapas em pontos focais a 0, 500 e 1000 μm abaixo da superfície da amostra.

3.1.2 PLACA-FILHA

Por conta das altas frequências dos sinais que serão transportados pela placa-filha, há a necessidade do uso de um substrato com menores perdas em alta frequência. O substrato escolhido foi o polímero de cristal líquido, *Liquid Crystal Polymer (LCP)*, devido ao seu bom comportamento em altas frequências e seu baixo custo [17].

O processo de fabricação nesse substrato será estudado no próximo semestre, principalmente em relação à metalização dos furos. Perun e Ramassamy[1] tiveram dificuldades na

criação de vias no substrato *LCP*, pois realizaram a ligação entre camadas a partir de preenchimento manual com estanho. Devido a precisão necessária para a solda dos transceptores, isso resultou em curto-circuitos entre os pinos do componente.

A adesão do cobre pelo processo *electroless* ao substrato é um problema a ser resolvido. Duas possibilidades estão sendo estudadas para a metalização das furos, a partir de furos cônicos e por meio de tratamento de plasma anterior a deposição do cobre:

- Furos cônicos: Uma alternativa à deposição de cobre *electroless* é a partir de deposição por vapor de cobre. Para isso, o furo não poderia apresentar uma superfície vertical e seria necessário fazer um furo com paredes inclinadas. Isso seria feito pela cortadora a laser a partir de furos concêntricos a diferentes alturas;
- Tratamento a plasma: Para melhorar a adesão do cobre pelo processo *electroless*, é possível realizar um tratamento a plasma para limpar os detritos resultantes do furo [18]. Esse processo é chamado *plasma desmear*, feito a partir da formação de plasma de O₂ e CF₄ por meio de excitação em rádio-frequência [19].

3.2 MODULAÇÃO DO SINAL DE VÍDEO

Os chips HMC6300 (receptor) e HMC6301(transmissor) são os responsáveis por fazerem a modulação principal do nosso circuito. Os chips operam numa frequência de 57GHz até 64 GHz possuindo uma largura de banda de até 1.8GHz.

Esses chips suportam uma grande variedade de formatos para a modulação. Algumas modulações opcionais do transmissor são: modulação por chaveamento de frequência (FSK), mínimo chaveamento (MSK) e chaveamento liga-desliga (OOK), que são modulações para um custo baixo e baixa energia.

O chip do transmissor possui um sintetizador que suporta até 64 QAM, sendo que podemos utilizar um oscilador externo para modulações de até 256 QAM.

3.2.1 OPERAÇÃO DO TRANSMISSOR

O chip possui um sintetizador que cria uma frequência entre 16,3GHz e 18,3GHz, podendo ter um passo de tamanho 250 MHz, para um cristal de referência de 71,42857 MHz, um passo de 500 MHz para um cristal de referência de 142,857 MHz e um passo de 540 MHz para um cristal de referência de 154,2857 MHz.

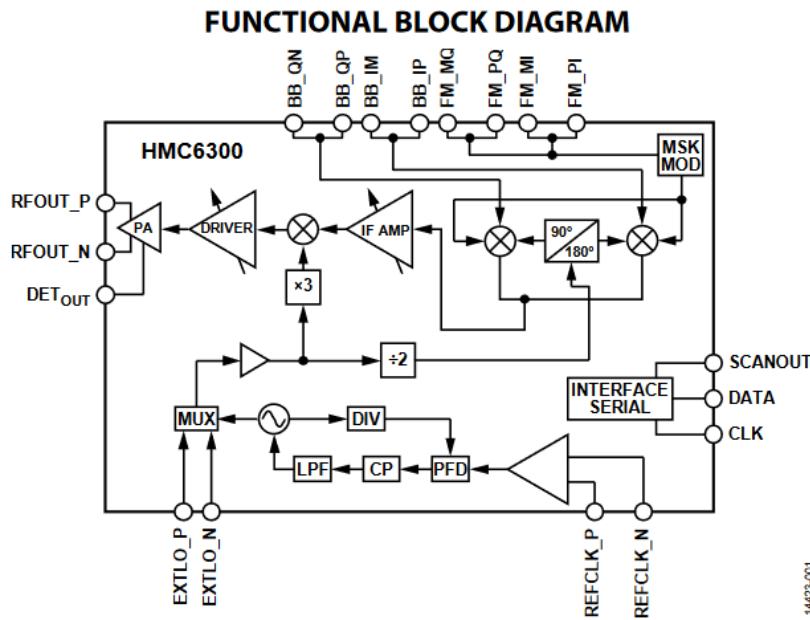
Caso deseje usar uma modulação maior de 64 QAM ou o passo menor que 250 MHz devemos utilizar um cristal de referência externo. No caso do nosso trabalho, deixamos uma saída no cristal externo para podermos gerar a frequencia de referencia através de um gerador.

O chip possui um modulador tanto de I/Q e AM quanto de FM, ficando a critério do usuário decidir qual usar. No caso, utilizaremos a modulação em quadratura.

O chip também possui um amplificador, que amplifica o sinal modulado com um ganho de 14dB produzindo nossa frequência de transmissão entre 57GHz e 64GHz.

Todas essas informações e muito mais podem ser encontradas no datasheet [11].

Figura 8: Diagrama de Bloco Funcional



Fonte: Devices[11] (2016-2017)

3.2.2 ENTRADA

O chip HMC6300 suporta uma frequência de até 900 MHz de largura de banda base. Entretanto, com o nosso objetivo de transmitir um vídeo 4k, teremos que fazer essa modulação em quadratura de 256 QAM para 900 MHz através de uma FPGA.

Primeiramente, para testar se nosso transmissor está funcionando, utilizaremos um gerador de sinais vetoriais ESG, especificamente o E4438C da Agilent[20], para gerar nossos sinais em quadratura 256 QAM e verificar se está transmitindo os sinais desejados.

Assim, com nosso teste concluído, a placa funcionando, partiremos para a transformação do video em 4k para um sinal em 900MHz 256 QAM através de uma FPGA.

Figura 9: Gerador de sinais vetoriais ESG



Fonte: Technologies[20] (2019)

3.3 CRONOGRAMA

O projeto foi pensado em 4 grandes etapas para serem realizadas em 9 meses. São elas: pesquisa, desenvolvimento do hardware, desenvolvimento do firmware e integração. Na parte de pesquisa é onde procuramos as soluções do mercado, estudos, testes de soluções e nosso planejamento. No desenvolvimento de hardware está centrado principalmente na fabricação, pois como mostrado acima é a parte mais desafiadora desta etapa. Na etapa do desenvolvimento do firmware temos tanto o firmware da configuração quanto o da modulação para a placa. Por último a integração, quando juntamos tudo e fazemos funcionar.

Figura 10: Cronograma

NÚMERO DA EAP	TÍTULO DA TAREFA	DATA DE INÍCIO	DATA DE CONCLUSÃO	DURAÇÃO	% DA TAREFA CONCLUÍDA
1	Definição dos Requisitos e Planejamento				
1.1	Pesquisa de Mercado e Detalhamento Objetivos do Projeto	01/04/22	11/04/22	10	100 %
1.1.1	Definição do cronograma	12/04/22	18/04/22	6	100 %
1.2	Detalhamento Técnico	19/04/22	02/05/22	13	80 %
1.3	Estudos de Engenharia	03/05/22	30/07/22	87	70 %
2	Desenvolvimento do hardware				
2.1	Escolha dos Componentes Fundamentais	02/05/22	30/05/22	28	80 %
2.2	Desenvolvimento do Circuito Eletrônico	31/05/22	30/07/22	60	80 %
2.3	Fabricação e Montagem dos Protótipos	01/08/22	31/08/22	30	0 %
2.4	Testes de condutividade e melhorias	01/09/22	06/09/22	5	0 %
3	Desenvolvimento do Firmware Embarcado				
3.1	Programação Freedom para configuração	01/07/22	31/07/22	30	60 %
3.2	Bringup da placa com o gerador de sinais	07/09/22	17/09/22	10	0 %
3.2.1	Programação da modulação e demodulação do vídeo em quadratura	01/08/22	06/09/22	35	0 %
4	Desempenho do projeto / monitoramento				
4.1	Integração Hardware e Firmware	07/09/22	31/10/22	54	0 %
4.2	Testes	01/11/22	18/11/22	17	0 %
4.3	Controle de Custos	19/11/22	25/11/22	6	0 %
4.4	Desempenho do projeto	19/11/22	15/12/22	26	0 %

Fonte: De autoria própria

Figura 11: Cronograma



Fonte: De autoria própria

REFERÊNCIAS

- 1 PERUN, R.; RAMASSAMY, K. H. *Sistema de comunicação sem fio 60 GHz usando transceptores comerciais*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- 2 SEKER, C.; GüNESER, M. T.; OZTURK, T. A review of millimeter wave communication for 5g. In: *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- 3 ICHKOV, A.; ATANASOVSKI, V.; GAVRILOVSKA, L. Potentials for application of millimeter wave communications in cellular networks. *Wireless personal communications*, Springer, v. 92, n. 1, p. 279–295, 2017.
- 4 CHOI, M. et al. Link adaptation for high-quality uncompressed video streaming in 60-ghz wireless networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, v. 18, n. 4, p. 627–642, 2016.
- 5 WU, D. et al. Millimeter-wave multimedia communications: challenges, methodology, and applications. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 1, p. 232–238, 2015.
- 6 PERASO. *MMWAVE 60GHz CHIPSET PRODUCTS*. [S.I.], s.d. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://perasoinc.com/60ghz-hardware/>>.
- 7 GOTMIC. *gTSC0020 B V-band TX MMIC 57 - 66 (52 – 72) GHz*. Göteborg, 2017. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.gotmic.se/documents/gTSC0020B\Rev\%20A01-17.pdf>>.
- 8 PASTERNACK. *60 GHz Transmitter/Receiver Waveguide Modules*. Irvine, s.d. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <https://www.paternack.com/pages/Featured_Products/60-GHz-Transmitter-Receiver-Waveguide-Modules.html>.
- 9 INFINEON. *Infineon rounds off the Backhaul Family with a packaged RF Solution for V-band Radio*. Neubiberg, 2013. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <https://www.infineon.com/dgdl/BGT60_PB.pdf?fileId=db3a30433de4e67f013df36a708267ac>.
- 10 TENSORCOM. *Our Products*. Solana Beach, s.d. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://tensorcom.com/products/>>.
- 11 DEVICES, A. *HMC6300: 60 GHz Millimeterwave Transmitter, 57 GHz to 64 GHz*. [S.I.], 2016–2017. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC6300.pdf>>.
- 12 IOGEAR. *Ultra-Fast 60GHz Wireless 4K UHD Transmitter and Receiver Kit*. Irvine, s.d. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.iogear.com/product/GW4K30GH60/>>.
- 13 TP-LINK. *Talon AD7200 Multi-Band Wi-Fi Router*. Irvine, s.d. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.tp-link.com/us/home-networking/wifi-router/ad7200/>>.

- 14 MACDERMID. *Electroless Copper*. Waterbury, s.d. Acessado em: 15 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.macdermidalpha.com/circuitry-solutions/products-processes/primary-metallization/electroless-copper>>.
- 15 ZHU, Q. S. et al. Void-free copper filling of through silicon via by periodic pulse reverse electrodeposition. *Journal of The Electrochemical Society*, The Electrochemical Society, v. 161, n. 5, p. D263–D268, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1149/2.073405jes>>.
- 16 KMETEC, B. et al. High-speed energy efficient selective removal of large area copper layer by laser induced delamination. *Applied Surface Science*, v. 255, n. 20, p. 8598–8602, 2009. ISSN 0169-4332. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016943320900823X>>.
- 17 DEJEAN, G. et al. Liquid crystal polymer (lcp): a new organic material for the development of multilayer dual-frequency/dual-polarization flexible antenna arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 4, p. 22–26, 2005.
- 18 ZHANG, T. et al. The processing and assembly of liquid crystalline polymer printed circuits. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING; 1999. *Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering*. [S.I.], 2002. p. 1–9.
- 19 C., H. R. et al. Plasma-generated etchback to improve the via-reliability in high-tg substrates used in multilayer pwbs for space electronic packaging. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, v. 6, n. 6, p. 926–932, 2016.
- 20 TECHNOLOGIES, A. *Agilent E4438C ESG Vector Signal Generator*. [S.I.], 2019. Acessado em: 17 Jul. 2022. Disponível em: <<https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01039/data-sheets-archived/5988-4039.pdf>>.