

Análise dos efeitos das ondas milimétricas no corpo humano

Felipe Serafini¹

Resumo: Com o rápido crescimento do uso de redes de telecomunicações em todo o mundo, é necessário ampliar o espectro de bandas de frequência eletromagnética para uso doméstico geral, especialmente na telefonia celular móvel. Uma alternativa para viabilizar essa alta taxa de utilização é a utilização de ondas milimétricas, que se caracterizam por suas altas frequências de operação, bem como por suas características de propagação, ou seja, as formas como se alteram ou interagem com a atmosfera durante a viagem as tornam útil para uma variedade de aplicações, incluindo a transmissão de grandes quantidades de dados, comunicações celulares e radar. No entanto, todas essas vantagens de uso podem causar danos aos seres humanos devido à exposição aos efeitos no organismo dessas altas frequências. O objetivo deste trabalho é comparar os níveis de exposição dos usuários em redes de telecomunicações.

Palavras-chave: Ondas Milimétricas; Antenas; Redes de Telecomunicações.

INTRODUÇÃO

As Definições de Antena Padrão IEEE de Antenas (IEEE Std 145–1983) definem a antena ou antena como “um meio de irradiar ou receber ondas de rádio”.

Muitas aplicações requerem características de radiação que podem não ser alcançadas por um único elemento. Pode, no entanto, ser possível que um agregado de elementos radiantes em um arranjo elétrico e geométrico (um arranjo) resulte nas características de radiação desejadas.

A faixa de frequência de onda milimétrica (30 a 300 GHz) oferece uma grande quantidade de espectro a partir do qual um espectro aproximado de 100 GHz está disponível para uso em comunicação móvel.

Para compensar as altas perdas causadas pela frequência de operação, é necessário desenvolver antenas de alto ganho e, devido ao comprimento de onda curto, é possível desenvolver arranjos de antenas de alta ordem com 32 ou mais Elementos.

Esse avanço tecnológico interagirá com quase todos os aspectos de nossas vidas diárias, além de nos expor a um fluxo de dados rico e variado em nossos dispositivos celulares e Wi-Fi. No entanto, para suportar um tráfego de dados tão pesado, será necessário expandir os canais de dados, algo que não é possível nos canais de frequência usados atualmente e uma explosão nas estações base.

O uso rápido e crescente de dispositivos sem fio operando na faixa ISM (*Industrial, Scientific*

¹ Universidade Ritter dos Reis - UniRitter, Porto Alegre, Brasil. E-mail: <eng.serafini@gmail.com>

and Medical) em ambientes como residências e escritórios já está causando preocupação aos usuários. Isso decorre dos possíveis efeitos biológicos gerados pela longa exposição a campos eletromagnéticos de baixa intensidade irradiados por esses dispositivos.

A Seção III abordará alguns conceitos sobre ondas milimétricas e sua usabilidade e empregabilidade em transmissões sem fio.

A Seção IV abordará rapidamente a taxa de absorção específica que o corpo humano pode sofrer.

DESENVOLVIMENTO

Para a elaboração deste documento foram revisadas as normas vigentes no Brasil para elaboração e diagramação de textos técnicos para o ambiente acadêmico. Para entender melhor o escopo de cada norma, uma breve descrição da mesma é apresentada a seguir.

A norma brasileira NBR-14724 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002b) descreve o modelo de apresentação de trabalhos acadêmicos reconhecido nacionalmente.

A NBR-6024 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003) apresenta os procedimentos para a numeração progressiva das seções de um documento.

A NBR-6023 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002c) apresenta o procedimento padrão para elaboração de referências.

Por fim, a norma NBR-10520 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002a) descreve as formas de apresentação de citações em documentos.

A seção de revisão de literatura (ou estado da arte) do aluno deve ser elaborada de forma semelhante ao texto aqui apresentado, citando todos os trabalhos relevantes publicados no escopo de sua proposta e fornecendo uma breve descrição de seu conteúdo.

Os principais impedimentos para a propagação de ondas milimétricas são o aumento da perda de caminho devido à maior frequência da portadora, espalhamento reduzido, que, por sua vez, reduz a diversidade disponível e aumenta o efeito de bloqueio como resultado de caminhos mais fracos sem visão. Além disso, o efeito da potência do ruído é mais evidente devido ao uso de larguras de banda maiores.

Na faixa de 30-300 GHz, por outro lado, há uma ampla faixa de espectro subutilizado. O espectro, nessa faixa, se divide em duas categorias, a saber, a banda de alta frequência (SHF), que vai de 3 a 30 GHz e a de frequência extremamente alta (EHF), ou banda milimétrica, que varia de 30 a 300 GHz.

A indústria assumiu que não haverá riscos à saúde com esse avanço e, portanto, baseou seu planejamento nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP), publicada em 1998 (Guidelines for Limiting Field Exposure), elétrica, magnética e eletromagnética variável no tempo (até 300 GHz) (Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante, 1998).

Esta recomendação limita a exposição na faixa de 5G a uma densidade de potência de 10 W/m² para o público em geral e 50 W/m² para exposição ocupacional (“Diretrizes para limitar a exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis nos 300 GHz. International Comissão de Proteção contra Radiação Não Ionizante, 1998).

Para obter os resultados foi utilizada, nas simulações, uma antena de microfita, ou microstrip. Esse tipo de antena consiste, basicamente, em uma fina cobertura metálica separada do plano de terra por um material dielétrico de baixa perda, com sua radiação de campo distante, normalmente direcionada para a superfície da trilha.

A evolução dos sistemas de micro-ondas e seus circuitos integrados aliada à necessidade do mercado em desenvolver e utilizar antenas de baixo custo deu origem ao surgimento das antenas micro-antenas.

Muito comumente, as antenas microstripe são chamadas de antenas plaquetárias, que vêm do termo inglês patch e são conhecidas como antenas patch.

A partir da década de 1970, as antenas de micro-antenas começaram a receber atenção considerável, embora haja relatos de tais antenas a partir da década de 1950.

As antenas de microfita possuem algumas vantagens em relação às antenas de micro-ondas convencionais, tais como: baixo peso e configuração fina, polarizações lineares e circulares são possíveis com alimentação única, polarização dupla e antenas de frequência são facilmente alcançáveis, podem ser facilmente incorporadas com circuitos integrados de micro-ondas, potência linhas e redes de casamento de impedância podem ser fabricadas simultaneamente com a estrutura da antena.

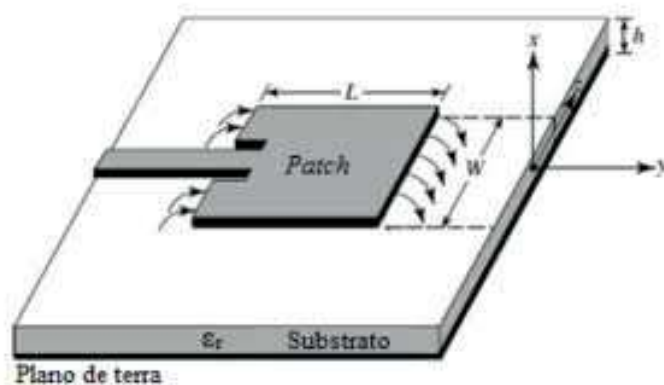
No entanto, as antenas de microfita apresentam algumas limitações em relação às antenas de micro-ondas convencionais: largura de banda limitada, baixo ganho, excitação de onda de superfície, é preferível o uso de substratos com alta constante dielétrica.

Quanto mais espesso o substrato combinado com a menor constante dielétrica (ϵ_r) do material utilizado, melhor o desempenho da antena em termos de largura de banda. A penalidade paga por isso é uma dimensão de antena maior.

Diferentes materiais podem ser usados como substrato no projeto de uma antena microstripe. Normalmente, a constante dielétrica desses materiais tem valores de $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Os substratos mais adequados para antenas de bom desempenho são espessos e possuem baixa constante dielétrica, pois permitem maior eficiência, maior largura de banda e campos mais soltos, facilitando a radiação no espaço.

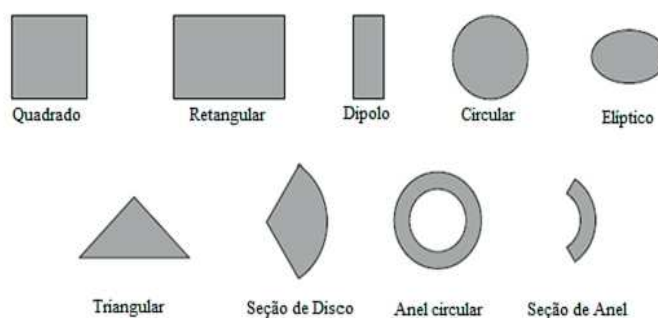
O comprimento da trilha (L) é normalmente dimensionado para ser metade do comprimento de onda guiado, este parâmetro controla sua frequência de operação. A largura da pista (W) controla sua resistência à radiação. Normalmente, W é dimensionado para ser ligeiramente menor que meio comprimento de onda no espaço livre. Essas variáveis são mostradas na Figura 1.

Fig 1. Antena de microfita



O elemento metálico (patch) pode ter diferentes formas geométricas, tais como: quadrado, retangular, circular, elíptico, triangular e outros, como pode ser visto na Figura 2. Porém, dependendo da forma geométrica utilizada no patch, há um recurso de modelagem matemática para análise. Assim, sabe-se que a forma do elemento metálico influencia diretamente na distribuição da corrente e, portanto, na distribuição dos campos na superfície da antena.

Fig 2. Formas geométricas para modelo de patch



O patch pode ser alimentado através de um cabo coaxial, uma linha de microfite, uma linha de slot e assim por diante. O patch, elemento radiante que na Figura 2 acima tem geometria retangular, também pode ter outras formas como geometria quadrada, circular, elíptica, anular, triangular e fractal.

A forma do patch influencia a distribuição da corrente e, portanto, a distribuição do campo na superfície da antena.

A radiação da antena de micro-ondas pode ser determinada pela distribuição de campo entre o patch de metal e o plano de terra. Da mesma forma, a radiação pode ser descrita em termos de distribuição de corrente superficial sobre o elemento metálico.

ONDAS MILIMÉTRICAS

Todo o espectro na faixa de 30 a 300 GHz é considerado banda de comprimento de onda milimétrico, com comprimentos de onda na faixa de 1 a 100 mm, uma vez que as ondas de rádio nessa faixa possuem semelhanças em suas características de propagação. Em um estudo recente, Rappaport demonstrou que

há 1 GHz de largura de banda disponível entre as frequências de 28 a 38 GHz.

Por serem frequências muito altas, seu comprimento de onda diminui. À medida que as frequências aumentam, os comprimentos de onda tornam-se mais curtos e a superfície refletora parece mais áspera. Isso resulta em uma reflexão mais difusa em oposição à reflexão especular.

Existem restrições para um projeto de antena de onda milimétrica.

Uma restrição é que o excesso de perda no canal de 60 GHz é de, aproximadamente, 15 dB/km com perdas por absorção de oxigênio, e essa restrição pode ser amenizada aumentando o ganho da antena transmissora ou receptora.

Outra restrição para sistemas é um forte efeito multipath em um ambiente interno. Quando na diferença de caminho há uma interferência destrutiva entre os sinais, isso causa um entalhe no espectro de frequências. Para minimizar o efeito de multipercurso, uma antena de feixe estreito é, portanto, preferida.

O limite de espaço para dispositivos portáteis, como telefones celulares, também é uma restrição. Para um link sem fio predominantemente na linha de visão, a polarização circular é útil para filtrar o primeiro sinal refletido (multipath).

Há também o problema de ruído e interferência. A confiabilidade do link de comunicação é definida pela relação sinal-ruído. As fontes de ruído são diversas e podem ser decorrentes de radiadores ambientais (passivos ou ativos) e gerados nos transceptores.

Há também a possibilidade de que o link sem fio seja interrompido por um objeto bloqueador (como um corpo humano), o que introduz perda de sombreamento adicional. Para evitar essa perda de sombreamento, uma função de direcionamento de feixe ou antenas multifeixe podem ser consideradas para lidar com essa perda.

Com relação à perda de canal, geralmente, assume-se que o sinal que chega ao receptor consiste em muitas cópias do sinal de transporte de informação e cada caminho possui um atraso específico e os tempos de chegada variam de acordo com o tamanho do ambiente.

A largura do feixe de uma antena é uma medida da diretividade de uma antena e, geralmente, é definida pelos ângulos em que o padrão cai para metade do seu valor de pico e também são conhecidos como pontos de 3 dB. No entanto, quanto mais estreita a largura do feixe da antena, mais complexa a função de rastreamento do feixe precisaria ser.

Além disso, uma antena de feixe estreito tem uma alta diretividade que direciona ou confina a potência ou a recepção em uma direção específica e, assim, estende o alcance da comunicação.

As ligações de ondas milimétricas convencionais podem ser classificadas com base na existência ou não de uma linha de visão ininterrupta (LOS) entre o transmissor e o receptor. Para aplicações internas, cenários sem linha de visão (NLOS), também chamados de “links difusos”, são muito comuns.

Testes realizados em mostram que sinais de rádio nesta faixa de frequência se propagam a uma distância menor, e apresentam muitas perdas quando encontram uma barreira ao longo do caminho.

A propagação em ondas milimétricas sofre grande atenuação em longas distâncias e, portanto, é mais comumente utilizada a curta distância e entre antenas de mira, ou seja, as antenas receptoras e transmissoras são posicionadas em linha reta entre si. No espaço livre, as ondas milimétricas perdem potência na faixa

quadrada do sinal original e se a potência de transmissão for dobrada, o sinal na antena receptora se reduz a um fator de quatro.

Este efeito é devido à dispersão esférica das ondas de rádio à medida que se propagam. A dependência de frequência e distância da perda entre duas antenas isotrópicas pode ser expressa em números absolutos mostrados em (1).

$$L_{\text{espaço livre}} = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{R}{\lambda} \right) \text{ (dB)} \quad (1)$$

Onde:

L espaço livre - perda de espaço livre.

R - distância entre a antena transmissora e receptora.

λ - comprimento de onda.

Quando foi comprovado que para distâncias inferiores a 200 metros, os efeitos da chuva podem ser superados, tornando possível seu uso.

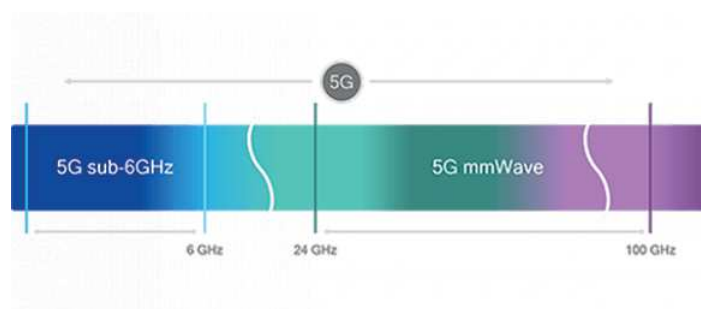
As altas frequências das ondas milimétricas, bem como suas características de propagação (ou seja, as formas como mudam ou interagem com a atmosfera durante a viagem), as tornam úteis para uma variedade de aplicações, incluindo transmissão de grandes quantidades de dados, comunicações, telefones celulares e radar.

Como o espectro LTE (Long Term Evolution) está sobrecarregado com frequências abaixo de 6 GHz, o interesse em bandas de ondas milimétricas está aumentando à medida que o uso desse espectro não utilizado está disponível. Essa nova faixa de frequência acomodaria o número crescente de usuários na rede de telefonia móvel.

Para a telefonia celular em seu uso da tecnologia 5G, algumas frequências foram expressas satisfatoriamente para serem utilizadas, como 28 GHz, 39 GHz e 72 GHz.

A Figura 3 mostra o espectro de frequências possivelmente usado na tecnologia 5G .

Fig 3. Formas geométricas para modelo de patch



Ondas milimétricas podem fornecer um link mais confiável e seguro por meio de antenas direcionais em combinação com formação de feixe e rastreamento de feixe. A frequência das portadoras de ondas milimétricas também permite alocações de largura de banda mais altas e, assim, taxas de transferência de dados mais altas são alcançadas. A latência do tráfego digital também é reduzida, suportando, assim, um acesso à Internet muito melhor e melhorando as ações que exigem latência mínima, como videoconferência e VoIP.

O espectro de ondas mm permite que os provedores de serviços expandam as larguras de banda dos canais além dos atuais canais de 20 MHz usados pelos clientes 4G.

TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA

O dispositivo móvel é uma das fontes de campo eletromagnético (EM) mais questionada devido à sua proximidade com o usuário e sua ampla divulgação junto à população.

Atualmente, no Brasil, existem, aproximadamente, 244 milhões de usuários de telefonia móvel, segundo dados da Agência Reguladora de Telecomunicações Anatel.

A Taxa de Absorção Específica (SAR) é definida como a dissipação de energia por unidade de massa de tecido biológico. [12] De acordo com a norma de 2003 (IEEE 1528), SAR é definida como a taxa de variação temporal da energia incremental (dW) dissipada em uma massa incremental (dm) contida em um elemento de volume (dV) e de densidade (ρ), mostrado em (2).

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad (2)$$

Onde:

dW - energia incremental.

dm - massa incremental.

dV - elemento de volume.

ρ - densidade.

Observa-se que a SAR é diretamente proporcional ao aumento da temperatura local, responsável pelos efeitos térmicos, conforme mostrado em (3).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{SAR}{Cp} \quad (3)$$

Onde:

Cp - calor específico (J/kg*°C)

T - temperatura (°C)

Ao projetar antenas para comunicações móveis, é importante investigar o valor SAR produzido pela radiação dos telefones celulares.

Os valores de SAR dependem de muitos fatores, como frequência de operação, tipo de antena, posição da antena relacionada ao corpo humano e distância relativa entre o corpo humano e a antena.

SAR pode ser relacionado ao campo elétrico em um ponto como mostrado em (4).

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (4)$$

Onde:

σ - condutividade equivalente de tecido (S/m).

ρ - densidade tecidual (kg/m^3).

$|E|$ - módulo de campo elétrico (V/m) [rms].

É o parâmetro para o qual são definidas as recomendações de segurança que leva em consideração o aumento térmico de 1°C produzido pelo depósito de energia em qualquer unidade de massa de 1g ou 10g de tecido biológico. O pico de pico SAR médio espacial (PSSAR) é determinado pela média numérica ou experimental dos valores locais de SAR em cubos de 1 grama ou 10 gramas usando algoritmos de integração e é expresso em W/kg.

A fim de proteger a saúde pública, a Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) publicou, em 1998, um documento fornecendo níveis de referência de exposição para comparação com valores medidos em quantidades físicas usadas para especificar as restrições básicas de exposição. Exposição ao campo eletromagnético.

Os efeitos sobre o corpo humano relacionados à exposição de diferentes frequências, dentre elas principalmente as altas frequências, vêm chamando a atenção da comunidade científica como um todo. No entanto, algumas normas foram criadas pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), como a 2010 IEC 62209-2, que trata da avaliação da exposição a campos eletromagnéticos gerados por dispositivos sem fio próximos ao corpo humano na faixa de frequências de 30 MHz a 300 MHz. GHz.

A norma se aplica a qualquer dispositivo afastado do corpo humano em uma distância de até 200 mm, como quando segurado pela mão, próximo ao rosto ou localizado próximo a qualquer parte do corpo do usuário.

Ao longo dos anos, diferentes métodos têm sido utilizados para reduzir a SAR, como a troca de materiais como a ferrita e, principalmente, o uso da técnica EBG (Electromagnetic Bandgap), pois reduz os valores de SAR em até 75%.

Por outro lado, com base em estudos recentes nessas bandas de ondas milimétricas, as dimensões dos tecidos, como a pele, estão em pé de igualdade com os mesmos comprimentos de onda do sinal de entrada.

Portanto, os tecidos da pele humana não podem ser considerados como uma camada infinita em comparação com os comprimentos de onda do novo sinal regulador de comunicação. Isso reduziria a relevância dos métodos usados pela indústria, hoje, para avaliação de SAR, como o uso de fantasmas, ou SAM (phantoms specific), usados em simulações de radiação de antenas para que suas características se assemelhem às estruturas da pele humana, densidade óssea, órgãos humanos etc.

Os modelos baseados em voxel foram originalmente desenvolvidos para dosimetria de ressonância magnética, onde os comprimentos de onda EM relevantes estão na faixa de GHz. Conseqüentemente, para estruturas de camada de menos de 1 mm, elas são limitadas.

A determinação dos níveis de exposição à radiação eletromagnética apresentada na Tabela 1 é baseada no conhecimento das características dielétricas dos tecidos biológicos. A partir da permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade (σ) é possível estimar, em frequências de RF, os níveis de energia eletromagnética sobrepostos em tecidos biológicos.

Tabela 1

	Europa	EUA	Brasil
SAR médio de corpo inteiro [W/kg]	0,08	0,08	0,08
SAR localizado (cabeça) [W/kg]	2	1,6	2
Tempo de exposição [min]	6	30	6
Unidade de massa [g]	10	1	10

Essas propriedades dielétricas são dependentes da frequência, entre outros fatores, e permitem caracterizar o material para todo o espectro eletromagnético.

A Tabela 2 apresenta os limites recomendados para os valores máximos locais de SAR em um ambiente não controlado definido pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) e ICNIRP (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection).

Na Europa, as recomendações do ICNIRP são as mais seguidas, enquanto os padrões um pouco mais rígidos estabelecidos pelo IEEE são aplicados nos Estados Unidos.

Os limites de SAR são definidos em diferentes períodos de tempo, acima de 6 minutos (ICNIRP 1998) e acima de 30 minutos (IEEE 2005).

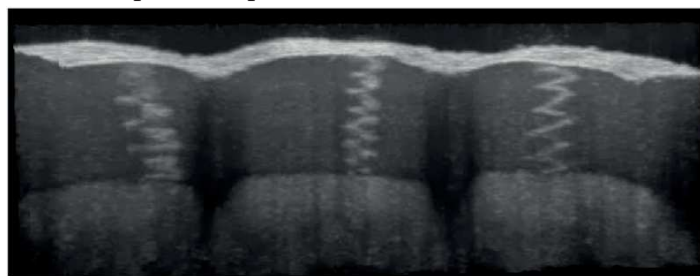
Tabela 2

		Trabalhadores Controlados	Público em geral não controlado
ICNIRP	SAR de corpo inteiro	4 W/kg	0,08 W/kg
	SAR local (média de 10 g)	10 W/kg	2 W/kg
IEEE	SAR de corpo inteiro	4 W/kg	0,08 W/kg
	SAR local (média de 1 g)	8 W/kg	1,6 W/kg

O maior problema é que a interação entre o corpo humano e as ondas eletromagnéticas muda de absorção direta para uma forma mais complexa, pois, devido ao comprimento de onda, atinge o tamanho da estrutura da pele humana e porque os canais de suor da pele são moldados, bobinas, eles podem funcionar como harmônicos de antenas helicoidais de alta frequência. Assim, de certa forma, existe uma frequência ideal definida para ser absorvida pela pele humana.

A Figura 4 mostra que as pontas dos ductos sudoríparos que expõem o suor da glândula para o poro da superfície da pele possuem estrutura helicoidal.

Fig 4. Imagem de tomografia de coerência óptica (OCT) dos ductos sudoríparos na epiderme superior da ponta do dedo humano in vivo



Apesar disso, e como a permissividade dielétrica da derme é maior que a da epiderme, no caso de termos eletromagnéticos, os ductos sudoríparos podem ser vistos como antenas helicoidais imperfeitas com modos axiais e normais.

As frequências características dos modelos dependem das dimensões C e L , respectivamente, conforme (5) e (6).

$$f \sim \frac{1}{C} \times 400 \text{ GHz} \quad (5)$$

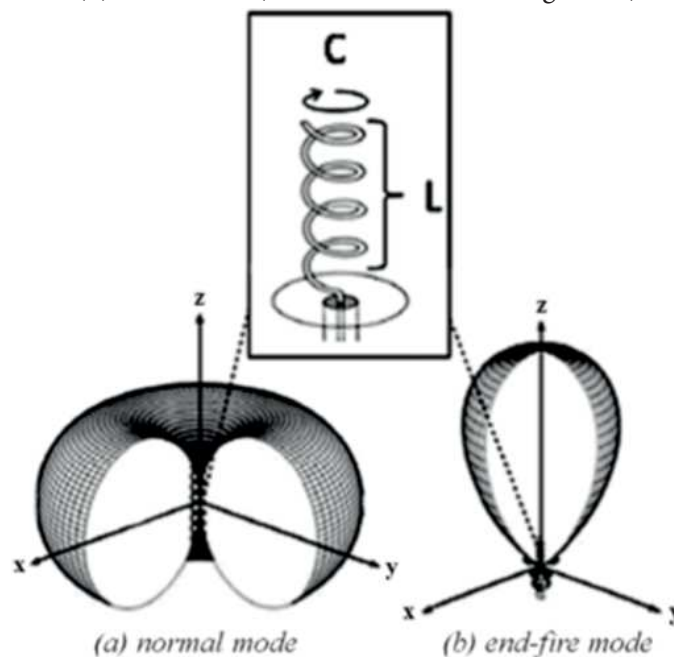
$$f \sim \frac{1}{L} \times 100 \text{ GHz} \quad (6)$$

Aplicando a teoria básica da antena às dimensões típicas do duto, e usando as conhecidas características dielétricas e de condutividade do tecido da pele [21] (Feldman et al., 2009), a largura de banda foi encontrada em ondas milimétricas.

Como o estresse, a emoção, o medo, a dor, a ansiedade e a doença podem induzir a sudorese, e como as glândulas sudoríparas são controladas diretamente pelo Sistema Nervoso Simpático (SNS), pode até haver alterações na composição do suor emitida pela pele.

A Figura 5 ilustra os padrões tridimensionais de energia para a antena helicoidal, sendo (a) modo normal e (b) modo axial (também chamado de fogo final).

Figura 5: Padrões de potência tridimensionais para a antena helicoidal (a) modo normal e (b) modo axial (também chamado de fogo final)



CONCLUSÃO

As simulações foram realizadas pelo software CST Studio e as frequências de operação de 2,4 GHz e 28 GHz foram utilizadas para as antenas.

O motivo da escolha dessas duas frequências específicas foi tentar fazer comparações de valores simulados de SAR em usuários móveis ativos, possivelmente utilizados na tecnologia 5G. Como os aplicativos tendem a permanecer on-line por muito mais tempo e exigirão transmissão de dados em taxas ultra altas de 100 Gbit por segundo e além, incluindo 14 de julho de 2016, a Federal Communications Commission (FCC) adotou novas regras para operações de banda larga sem fio acima de 24 GHz. [16]

Ao longo dos resultados, em comparação com o uso das frequências de operação de 2,4 GHz e 28 GHz, notou-se que o valor da razão de onda estacionária (ROE), ou conforme encontrado na literatura com maior frequência, (VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), que é definida como a razão da tensão máxima sobre a tensão mínima em uma linha de transmissão.

De acordo com, esta relação é mostrada em (7).

Onde:

V_{max} - tensão máxima.

V_{min} - tensão mínima.

I_{max} - corrente máxima.

I_{min} - corrente mínima.

Γ - coeficiente de reflexão.

Nas simulações realizadas na frequência de 28 GHz, notou-se um valor muito superior ao valor

resultante de 2,4 GHz. Porque o VSWR é um indicador do sinal refletido de volta para o transmissor de radiofrequência, e quanto menor esse valor, melhor.

Uma vez que o valor de ROE é sempre representado por um número real positivo, e um valor de ROE pequeno significa maior potência entregue do transmissor para o receptor, ou seja, o valor de ROE é uma quantidade adimensional que pode variar de 1 se não houver reflexão do sinal transmitido em ∞ quando cada onda incidente é refletida.

A largura W da antena patch foi determinada pela equação mostrada em (8) e o comprimento L foi calculado como (9).

Onde:

v_0 - velocidade da luz no espaço livre.

f_r - frequência de ressonância.

μ_0 - permeabilidade magnética no vácuo.

Onde:

f_r - frequência de ressonância.

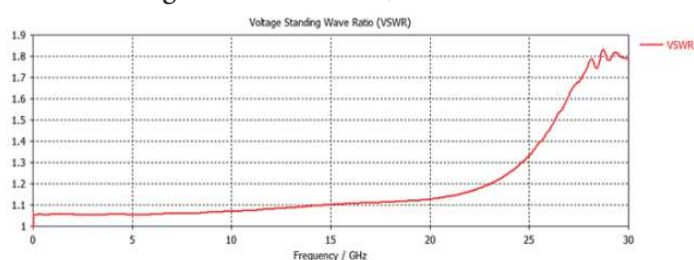
μ_0 - permeabilidade magnética no vácuo.

ϵ_r - constante dielétrica do substrato.

ϵ_{ref} - constante dielétrica efetiva do substrato.

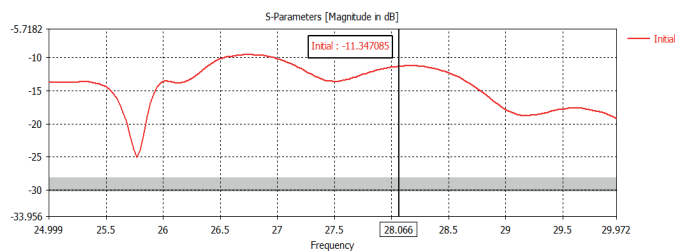
Nas simulações realizadas, o valor de VSWR para a frequência de 2,4 GHz foi de aproximadamente 1,05. Para a frequência de 28 GHz, esse valor aumentou para próximo de 1,75, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6: VSWR de 2,4 GHz e 28 GHz



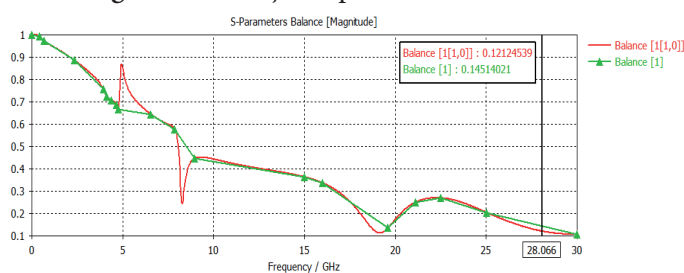
Os resultados referentes aos parâmetros S , sendo medida a magnitude em dB, na frequência de operação de 28 GHz, atingiram -11,347 dB, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7: Parâmetro S em 28 GHz



No entanto, o balanço da magnitude dos parâmetros S, ainda na frequência de operação de 28 GHz, apresentou resultados muito próximos, sendo 0,12 e 0,14, conforme mostra a Figura 8.

Figura 8: Balanço do parâmetro S em 28 GHz



REFERÊNCIAS

GIORDANI, M.; MEZZAVILLA, M. Z. "Acesso inicial em redes celulares 5G mmWave", *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 11, p. 40-47, novembro de 2016.

GE, X.; TU, S.; MAO, G.; WANG, C. X.; HAN, T. **Redes celulares ultra-densas 5G**. *IEEE Wirel. Commun.* n. 23, p. 72-79, 2016.

ISHAK, N. H.; Et al. Efeitos biológicos da radiação eletromagnética Wifi. *IEEE, ICCSCE*, 2011, Penag. **Anais...** [S.1], 2011 p. 551-556.

WU, T.; RAPPAPORT, T. S.; COLLINS, C. M. **Seguro para as próximas gerações**: considerações de segurança para ondas milimétricas em comunicações sem fio. *IEEE Microw. Mag.* 16, 65-84, 2015a

Antenas de microfitas Pozar DM e Schaubert DH – A análise e projeto de antenas e matrizes de microfitas, Nova York, EUA: The IEEE, Inc., 1995.

PUES, H.; VAN DE CAPELLE, A. modelo de linha de transmissão preciso para a antena de microfitas retangular, *IEEE Proceedings*, v. 131, p. H, n. 6, p. 334-339, 1984.

POZAR, D. M., Microstrip Antenas, *Proc. IEEE*, v. 80, n. 1, p. 79-81, janeiro de 1992.

RAPPAPORT, T. S.; SUN, R.; MAYZUS, H.; ZHAO, Y. A. K.; WANG, G. N. W.; JK SCHULZ, M. Samimi E F. Gutierrez, *Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!*, iee acessar soluções abertas de inovações práticas, 2013.

UNO, M. Z.; WANG, V. W.; HUANG, K. 'Communication System and Method', Patentes US2006116092, EP1659813 e JP2006148928, maio de 2006.

HUANG, K-C. *Sistemas de comunicação por ondas milimétricas / Kao-Cheng Huang, Zhaocheng Wang*. pág. cm. ISBN 978-0-470-40462-1 (capa dura), 1968-II.

- ROBERT, S. Elliott, 'Antenna Theory and Design', Series on Electromagnetic Wave Theory, IEEE Press, 2006.
- RAPPAPORT, T. S.; MURDOCK, J. N.; GUTIERREZ, F. "Estado da arte em circuitos e sistemas integrados de 60 GHz para comunicações sem fio", **Proc. IEEE**, v. 99, n. 8, p. 1390–1436, agosto de 2011.
- SULTAN, K. S.; ABDULLAH H. H.; ABDALLAH, E. A.; HAXIXE E. A. Baixa SAR, antena impressa miniaturizada para serviços móveis, ISM e WLAN. **IEEE, Antenas e Cartas de Propagação Sem Fio**. 2013; 12:1106-1109.
- BETZALEL, N.; FELDMAN, Y.; BEN ISHAI, P. A Modelagem da Absorbância da Radiação Sub-THz pela Pele Humana. **Trans. IEEE Terahertz Sci. Technol.** 1–8, 2017.
- COSTA C. P.; FONTGALLAND G.; BARBIN S. E. Avaliação de superposição de radiação de campos próximos em usuários humanos próximos de telefones celulares. Pequim: APEMC; 2010.
- KÜRNER, T.; PRIEBE, S. Towards THz Communications - Status in Research, Standardization and Regulation. **J. Infravermelho Milim. Ondas Terahertz** 35, 53–62, 2014.
- SHADIKU, M. N. O. Elementos de eletromagnetismo, Bookman: 3. ed. 1997.
- MAHAMOUD, Y. S.; AITE, M.; MARTIN, C.; ZHADOBOV, M.; SAULEAU, R.; DRÉAN, Y. L.; HABAUZIT, D. Efeitos aditivos de ondas milimétricas e co-exposição de 2-desoxiglicose no ser humano Transcritoma de queratinócitos. **PLOS ONE** 11, e0160810. <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0160810>>. 2016
- Serup, J., Trier-Mork, T., 2007. Dando mais um passo à frente na Pesquisa e Tecnologia da Pele. **Pele. Res. Tecnol.** 13 (1-1). <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0846.2007.00234.x>>. Stroop, JR, 1935. Estudos de interferência em reações verbais seriais. **J. Exp. Psicol.** 18.643.
- Gabriel, S., Lau, RW, Gabriel, C., 1996. As propriedades dielétricas dos tecidos biológicos: iii. Modelos paramétricos para o espectro dielétrico de tecidos. **Física Med. Biol.** 41, 2271-2293.
- Ohhashi, T., Sakaguchi, M., Tsuda, T., 1998. Medição da transpiração humana. **Fisiol. Medir.** 19, 449-461. <<http://dx.doi.org/10.1088/0967-3334/19/4/001>>.
- Eisenach, JH, Atkinson, JLD, Fealey, RD, 2005. Hiperidrose: terapias em evolução para um fenômeno bem estabelecido. **Mayo Clin. Proc.** 80, 657-666. <<http://dx.doi.org/10.4065/80.5.657>>.