

Smart Fractal Antennas in Transition Projects to 5G

Daniel Luiz Ribeiro and Gilberto Arantes Carrijo

Abstract—This paper proposes the combined use of two promising techniques in the design of 5G systems: fractal antennas and smart antennas. This new arrangement is capable to operating efficiently in multiband while directing the beam to the region of interest, promoting a better use of the spectrum and therefore allowing multiples beamforming to share resources in the time and frequency domain, an essential requirement for the fifth generation. In addition, the proposed array can be availed in projects that still use the previous generation technology, 4G, which would allow a more economically viable transition to 5G, especially for Latin American countries. A new type of smart fractal antenna is simulated for a wide range of frequencies. The parameters chosen for measuring the performance of the structure are the return loss, the radiation diagram and the 3D polar diagram, the most used in the literature. The proposed antenna achieved a return loss of -36 dB for 20.6 GHz and a notable gain of 15 dB, operating in multiband. These values are compared with other works already carried out by other researchers, which allows us to conclude that the proposed antenna is suitable for modern 5G communications.

Index Terms—Adaptive beamforming, fractal antennas, multiband transmission, smart antennas, spectral efficiency

I. INTRODUÇÃO

O crescente aumento de *links* de comunicação entre *hosts* e servidores e a maior demanda por redes com transferência de dados cada vez mais rápidas, levaram ao desenvolvimento da quinta geração para banda larga móvel, o 5G [1]. Essa tecnologia inovadora oferece uma experiência superior aos usuários e uma sólida conectividade entre pessoas, máquinas ou entre pessoas e máquinas, permitindo menor latência na transmissão, melhor aproveitamento do espectro eletromagnético e velocidades de download/upload ultrarrápidas [2].

Entretanto, a transição para a quinta geração não ocorre de forma abrupta. Muitas regiões do mundo, principalmente na América Latina, ainda dependem da rede NSA (*Non-Standalone*) para a disponibilização do 5G, e isso implica projetar dispositivos que aproveitem a estrutura 4G LTE (*Long Term Evolution*) já existente, promovendo uma transição viável para a nova geração [3]. Adicionalmente, os sistemas também devem suportar desde a banda *C* até a banda *mmWave*, de modo que possam se adaptar às características do espectro e à maturidade do terminal, proporcionando assim os requisitos de velocidade de dados da nova geração. Por isso,

esses dispositivos devem, necessariamente, ser capazes de operar em multibanda e, além disso, estarem aptos a direcionar o feixe de radiação de acordo com as exigências do ambiente.

Os sistemas de transmissão e recepção baseados em antenas inteligentes permitem a formação dinâmica de feixes estreitos direcionados ao equipamento do usuário e a criação de nulos nas direções que não são de interesse, proporcionando, desta maneira, uma varredura de todo o espaço tridimensional e garantindo uma cobertura completa da área em torno da estação base [4] [5]. Além disso, a utilização de vários conjuntos de antenas próximos uns aos outros torna possível a formação simultânea de vários feixes, o que melhora ainda mais a cobertura e garante uma maior eficiência no compartilhamento do espectro [6].

Entretanto, cada conjunto de antenas deve ser capaz de transmitir em multibanda, sem alterar significativamente sua impedância, diagrama de radiação e polarização. De acordo com a literatura, antenas independentes da frequência possuem estas características individualmente, atingindo valores práticos de largura de banda da ordem de 10:1 ou mais [7] [8]. Mas quando são dispostas em conjuntos, as antenas independentes da frequência apresentam restrições como limitação do ângulo de varredura, exigência de pouca profundidade (perfil baixo) e diagrama de elemento não balanceado rotacionalmente, para citar os problemas mais importantes [9]. Por isso, projetistas buscaram utilizar antenas cuja geometria fosse capaz de garantir ampla varredura e operação eficiente em multibanda.

As antenas fractais demonstraram ser extremamente adequadas a tais propósitos [10] [11]. Construídas a partir de estruturas auto semelhantes, cujas partes se repetem em escalas maiores, tais antenas foram desenvolvidas inicialmente no final do século XX e os resultados obtidos com os vários testes e simulações, até hoje, abriram um vasto leque de perspectivas em relação às suas potencialidades [12] [13].

O objetivo deste trabalho é apresentar uma técnica que une essas duas abordagens: as antenas inteligentes e as antenas fractais. Após a simulação, o desempenho da antena é analisado tomando-se por base os seguintes parâmetros: perda de retorno, diagrama de radiação e diagrama 3D polar. Ao final, a viabilidade do arranjo é avaliada para potenciais usos tanto em sistemas 5G quanto nos já existentes 4G.

O restante do texto está organizado como segue: Na seção II são discutidas as principais referências teóricas sobre o assunto. Na seção III é feita uma avaliação do estado da arte envolvendo o estudo das antenas fractais inteligentes. A seção IV detalha os parâmetros da antena proposta. Na seção V ela é simulada e os resultados apresentados. A seção VI compara e discute os trabalhos da literatura com os resultados obtidos. Por fim, na seção VII são expostas as devidas conclusões.

D. L. Ribeiro é doutorando no programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. e-mail: danielsocir@gmail.com.

G. A. Carrijo é professor doutor e orientador no curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. e-mail: gilberto@ufu.br.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Os diversos serviços, espectros e implantações suportados pelo 5G dependem intrinsecamente de um conjunto de antenas dinâmico capaz de concentrar o feixe de radiação, direcioná-lo para a região de interesse e transmiti-lo em uma ampla faixa de frequências. A escolha do tipo de estruturas radiantes constitui um fator limitante para toda a rede e pode eventualmente inviabilizar a extraordinária capacidade do sistema, caso o projetista não se atenha aos mínimos requisitos técnicos necessários [2][14].

Os sistemas 5G incluem banda larga móvel melhorada, *eMBB* (*enhanced Mobile Broadband*), comunicações de baixa latência ultra confiáveis, *uRLLC* (*ultra Reliable Low Latency Communications*) e comunicações massivas do tipo máquina, *mMTC* (*massive Machine Type Communications*). Somente as antenas inteligentes podem atender a estes casos de uso emergentes de alto nível [2] [15]. Surgidas há mais de 50 anos, tiveram o seu desenvolvimento viabilizado pelo aperfeiçoamento de várias áreas das quais depende diretamente, tais como processamento digital de sinais, estimativa espectral e microeletrônica, dentre outras [16]. Atualmente, permitem a realização da mais arrojada forma de múltiplo acesso e compartilhamento de recursos em telecomunicações: o Múltiplo Acesso por Divisão Espacial, *SDMA* (*Space Division Multiple Access*) [12], conforme pode ser ilustrado na Fig. 1.

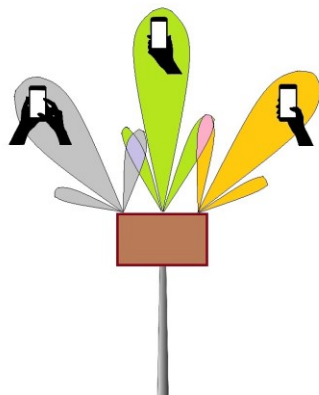


Fig. 1. Sistema SDMA com vários conjuntos de antenas inteligentes. Cada conjunto direciona o feixe para um usuário diferente.

A. Antenas Inteligentes

Antenas inteligentes são arranjos capazes de modificar dinamicamente o diagrama de radiação do conjunto e direcioná-lo para diferentes regiões, concentrando o feixe em pontos específicos do espaço. O princípio físico que permite esse direcionamento de feixe é o mesmo da teoria básica de conjunto de antenas.

Cada elemento é disposto suficientemente próximo um do outro em arranjos diversos, tais como distribuição linear, plana ou circular. Devido às interferências construtivas e destrutivas da região de campo próximo reativo, padrões de radiação de campo distante são formados. Esses padrões dependem do tipo de arranjo do conjunto, da distância entre cada ponto radiante, da geometria de cada elemento individual, da excitação de

cada um e da fase entre um e outro. Alterar as três primeiras variáveis em tempo real é inviável na prática, mas variar as duas últimas é extremamente simples. Em geral, a técnica mais utilizada apenas adiciona uma fase entre cada elemento, bastando defasar no tempo cada fonte de excitação, sucessivamente. O controle sobre este atraso de tempo (ou fase na frequência, que é a mesma coisa) resulta num controle da direção do feixe do diagrama de radiação [9].

O que torna o conjunto formador de feixe um sistema inteligente, é a capacidade do mesmo de interagir dinamicamente com o ambiente, transmitindo e ao mesmo tempo coletando informações do usuário, e controlando desta maneira o desempenho do processo. Para isto, as antenas inteligentes utilizam um processador digital de sinais, o qual calcula a direção de chegada ou a formação do feixe a partir de algoritmos previamente programados, e depois retorna os respectivos pesos a cada elemento individual (Fig. 2).

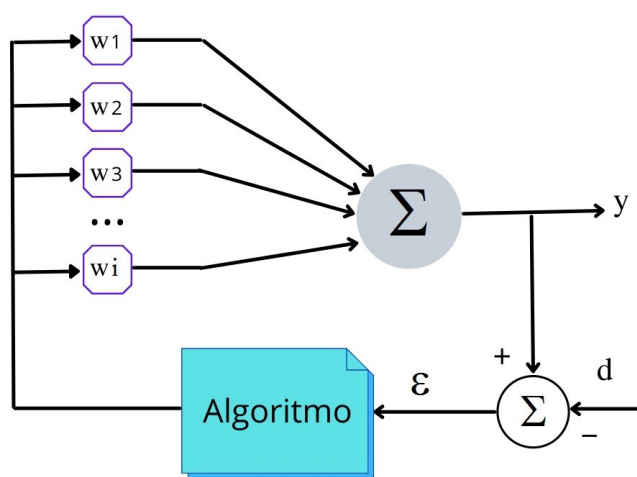


Fig. 2. Formador de feixe com pesos ajustáveis.

Um sinal de referência é utilizado (letra d na Fig. 2). A saída y é comparada com esta referência, e então o erro (ϵ) é retornado ao algoritmo, que utiliza uma matriz de pesos (w_i), calcula os valores correspondentes a cada um e atualiza-os. O processo se repete até que o erro atinja um valor mínimo.

A formação dinâmica de feixe em antenas transmissoras permite que a energia irradiada seja menor, pois provê uma maior diretividade e, conseqüentemente, maior ganho. Isso reduz consideravelmente a exposição dos usuários à radiação eletromagnética. Se os aparelhos celulares utilizarem também um conjunto de antenas inteligentes na recepção e transmissão, então a exposição se torna ainda menor. Além disso, a formação adaptativa de feixe é capaz de minimizar a interferência co-canal entre estações base setorizadas, na telefonia celular, o que torna as antenas inteligentes ideais em ambientes onde muitos usuários necessitem falar ao mesmo tempo [15].

B. Antenas Fractais

As antenas fractais são estruturas radiantes formadas por partes auto semelhantes que se repetem em porções cada vez menores, recursivamente [12], [17] - [19]. Elas se baseiam

fundamentalmente, mas não apenas, nas ideias do matemático Mandelbrot, que definiu essas formas geométricas como um conjunto cujas dimensões topológicas são menores que a dimensão de Hausdorff-Besicovitch [20].

Os exemplos mais comuns de antenas fractais são aqueles baseados no tapete de Sierpinski (Fig. 3), na ilha de

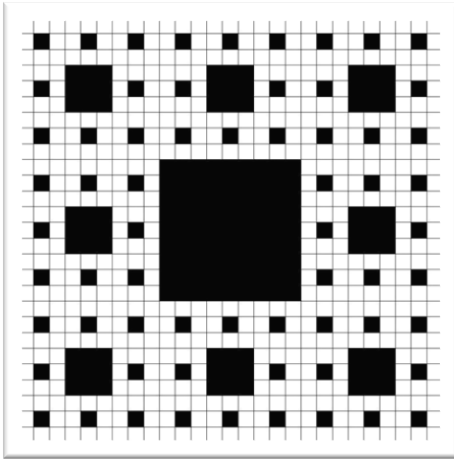


Fig. 3. Tapete de Sierpinski constituído por 3 iterações fractais.

Minkowski e no quadro de Koch, embora vários outros modelos tenham sido criados nas últimas décadas [21] - [24].

A maior parte dos estudos realizados com diversas estruturas fractais destacaram a vantagem de seu emprego na otimização de variados parâmetros como a perda de retorno e o ganho. A perda de retorno (*return loss*) é um importante parâmetro que indica a perda de potência por descasamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão. Já o ganho mede a eficiência de radiação e a capacidade direcional de uma antena. Quanto menor o valor negativo da perda de retorno, menor a perda de potência e tanto melhor o desempenho da antena; isso indica que a onda refletida é muito menor que a onda incidente. Quanto maior o valor do ganho, maior a eficiência da porção de energia concentrada numa determinada região.

As experiências com antenas fractais mostraram que, geralmente, quanto maior o número de iterações, menor a perda de retorno. Além disso, iterações sucessivas muitas vezes resultaram em mais pontos no espectro onde a perda de retorno é baixa. Isto significa que a utilização de estruturas fractais pode formar novas bandas de frequências em que a antena possa operar eficientemente [13] [25].

Segundo a literatura [8] [9] [12], uma antena é considerada como sendo independente da frequência se atender a dois requisitos: 1) sua especificação depender exclusivamente dos ângulos por ela formados, e não de seu comprimento, que teoricamente deveria se estender ao infinito; 2) possuir a característica de auto complementariedade (*self-complementarity*), isto é, se a metade ocupada pelo elemento radiador for igual à outra metade não utilizada. Mas os avanços na área de antenas fractais mostraram que é possível projetar estruturas radiantes independentes da frequência sem que estas, no entanto, atendam aos dois requisitos citados acima. Se a estrutura radiante for auto similar, então

apresentará características próximas das exibidas por antenas independentes da frequência. As antenas fractais se caracterizam exatamente por serem auto similares.

A propriedade de atuar em multibanda torna as antenas fractais candidatas ideais para formarem os elementos radiantes em conjuntos de varredura de feixe inteligente que atuarão em sistemas 5G. A próxima seção ilustra os principais avanços feitos nessa área.

III. ESTADO DA ARTE

Patil e Rohokale [26] partiram de uma estrutura monopolo e, modificando-a com sucessivas iterações fractais, obtiveram frequências de ressonância de aproximadamente 7 GHz e 13 GHz, com perdas de retorno de -31dB e -25dB, respectivamente. Mas a faixa de operação, embora tenha sido incrementada, continuou pequena. Kadhim [27] demonstrou através de várias simulações computacionais que a antena fractal de Sierpinski é adequada para aplicações WLAN, pois proporcionou um incremento no ganho das antenas inteligentes e ampliou a faixa de frequência de operação. Shoab et al. [28] apresentaram uma antena de feixe dirigido composta por 8x8 elementos, alcançando um ganho máximo de 8,73 dB na frequência de ressonância, em torno de 25 GHz. Entretanto, a largura de faixa apresentada foi relativamente pequena, de 23 a 27 GHz, insuficiente para sistemas robustos operando em 5G.

Posteriormente, Arif et al. [29] conseguiram reduzir o tamanho de uma antena para aplicativos WBAN de baixo perfil, e ainda melhorar sua largura de banda, utilizando a geometria fractal de Koch. Ma et al. [30] compararam a comutação de feixe de diferentes geometrias e tipos de antenas, como Yagi-Uda, microfita e dipolo ME (magneto elétrico), fornecendo desta maneira uma ampla referência para valores de ganho em aplicações 5G. Baseando-nos nessas análises, foi possível concluir que uma antena fractal pode apresentar ganhos intermediários entre um dipolo e uma antena de lente, o que torna o seu uso bastante atrativo.

Analisando diferentes tipos de antenas, Kumar et al. [31] destacaram que a utilização de estrutura fractal permite o aumento da largura de banda, melhora o casamento de impedância entre a antena e a linha de transmissão, ajuda no processo de miniaturização e ainda fornece um desempenho consistente em toda a faixa de operação. Em suma, as antenas fractais compõem a lista de antenas que farão parte da quinta geração. Por fim, Rengasamy et. al [32] conseguiram reduzir a frequência de ressonância, utilizando uma estrutura fractal Minkowski modificada e realizando sucessivas iterações. Isso os levou a propor o uso de antenas fractais em aplicações sem fio avançadas, incluindo atuação em multibanda.

Ampliar a largura de faixa, aumentar o ganho do feixe dinâmico e reduzir a perda de retorno têm sido os grandes desafios dos pesquisadores que procuram unir a abordagem de antenas inteligentes com antenas fractais. Mas o foco de tais estudos recaiu sempre na análise da estrutura radiante individual, e não no conjunto como um todo.

Esta é uma das lacunas que o presente trabalho procura preencher. Além disso, buscou-se obter melhores resultados

para o ganho, a perda de retorno e a largura de banda, comparados com os alcançados até hoje. A seção seguinte descreve as novidades da técnica apresentada.

IV. ANTENA PROPOSTA

A antena proposta reúne essas duas promissoras técnicas: antenas inteligentes e antenas fractais. O intuito é projetar sistemas de varredura de feixe dinâmicos cujos elementos individuais sejam constituídos por estruturas fractais. Desta maneira, a antena inteligente será capaz não apenas de direcionar o feixe na direção de interesse e criar nulos em regiões que não são de interesse, como também será adequada para transmissão em multibanda, requisito tão essencial em sistemas 5G.

O aspecto geral do conjunto de antenas fractais proposto é mostrado na Fig. 4, assim como sua orientação tridimensional nos eixos x , y e z .

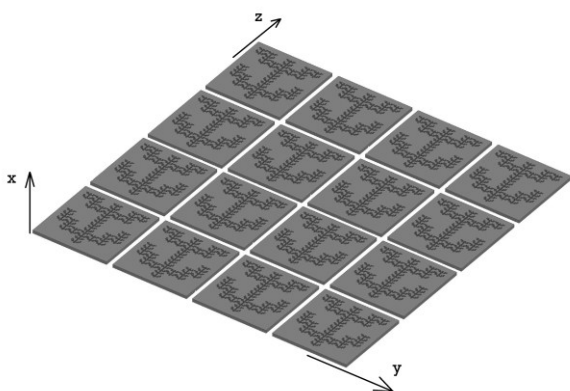


Fig. 4. Antena fractal inteligente proposta, formada por 4x4 elementos.

Cada elemento é uma estrutura fractal radiante disposta sobre uma plaqueta quadrada. O conjunto possui 4 elementos na direção y e 4 elementos na direção z , totalizando 16 elementos. E cada um possui excitação própria. Variando-se a fase entre cada elemento, modifica-se a direção do feixe, sendo possível desta maneira apontá-lo para qualquer localização dentro do espaço tridimensional acima do conjunto.

O espaçamento adotado entre cada elemento é de 1 cm, e cada plaqueta quadrada possui 8 cm de lado. Desta maneira, o tamanho total do conjunto é $4 \times 8 = 32$ cm, mais a soma dos três espaços de 1 cm cada, isto é, $3 \times 1 = 3$ cm, totalizando $32 + 3 = 35$ cm de cada lado.

A Fig. 5 mostra o elemento isoladamente. A antena é do tipo *patch* de microfita, cuja parte radiante está posicionada na superfície de um substrato com espessura de 3,2 cm e composto de material conhecido como *Rogers RT/duroid 5880*, com permissividade elétrica relativa (ϵ_r) igual a 2,2 e permeabilidade magnética relativa (μ_r) igual a 1. Abaixo do substrato considerou-se um plano de terra como sendo infinito. Acima do substrato encontra-se a antena propriamente dita, que é impressa com um material constituído por um condutor de alta condutividade, e por isso mesmo chamado de condutor elétrico perfeito.

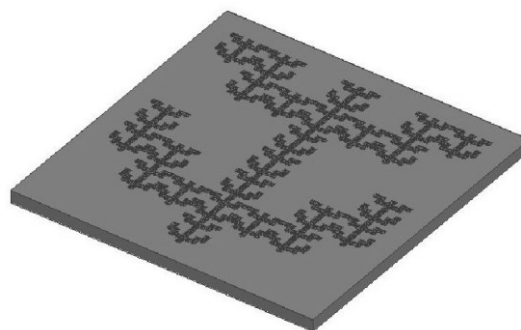


Fig. 5. Elemento isolado do conjunto. O formato é do tipo fractal.

A alimentação foi feita por meio de uma sonda coaxial situada exatamente no centro da estrutura, atravessando o substrato por dentro. O uso de sonda, ao invés de linha de alimentação impressa, isola o circuito de alimentação da face radiante do conjunto, diminuindo seus efeitos de radiação. Além disso, o casamento de impedâncias entre a plaqueta e a fonte é mais fácil de ser realizado com o uso de sonda.

A estrutura fractal foi formada segundo o método iterativo, que consiste na aplicação reiterada de um subconjunto gerador, sucessivas vezes, de modo que no final de várias iterações, o todo se torna semelhante às partes, que é justamente a característica marcante dos fractais. O subconjunto gerador é mostrado na Fig. 6a. É chamado, por convenção, de estrutura de iteração 0.

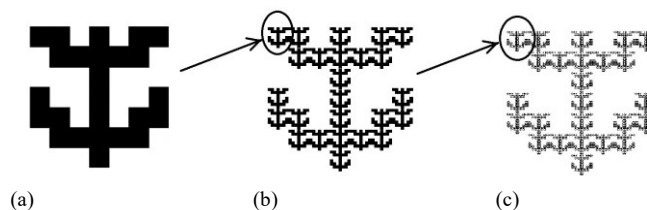


Fig. 6. Processo iterativo de formação da antena fractal. (a) Estrutura de iteração 0. (b) Estrutura de iteração 1. (c) Estrutura de iteração 2.

Este subconjunto gerador possui 25 quadrados destacados na cor preta. São os elementos ativos que serão energizados. Este subconjunto se torna o elemento formador de uma nova estrutura, chamada de estrutura de iteração 1 (Fig. 6b). O formato dessa estrutura é semelhante ao daquela de iteração 0, com a diferença de que, agora, cada um dos 25 quadrados é preenchido com uma mini estrutura, o subconjunto gerador.

A estrutura de iteração 1, por sua vez, servirá de base para a formação da estrutura de iteração 2 (Fig. 6c). Esta estrutura também é semelhante às de iteração 0 e 1, com a diferença de que cada um dos 25 quadrados é preenchido com a mini estrutura de iteração 1. O comprimento total do *patch* é de 6,86 cm na direção y e 6,86 cm na direção z .

Desta maneira, é possível projetar uma estrutura auto semelhante composta de uma sequência de subconjuntos auto similares.

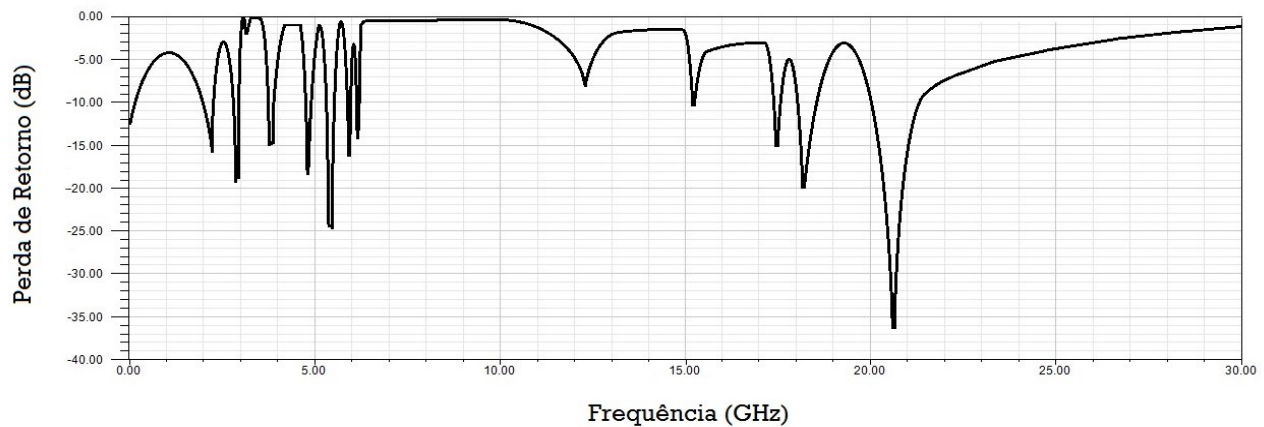


Fig. 7. Perda de Retorno, em dB, para a antena fractal proposta. A faixa de frequências analisada é de 1 GHz a 30 GHz.

Para as finalidades desta análise, serão mostrados os resultados da perda de retorno, do diagrama de radiação e do diagrama 3D polar. Estes parâmetros bastam para que se chegue a importantes conclusões sobre o desempenho do conjunto de antenas fractais proposto.

A perda de retorno é medida entre uma fonte e um terminal energizado por esta; um sistema que possua mais de uma fonte de excitação terá, obviamente, várias perdas de retorno. Como o sistema aqui analisado é constituído por dezesseis fontes de alimentação, mas com todas as antenas idênticas, considerou-se a perda de retorno devida a apenas um elemento.

O diagrama de radiação mostra a variação angular do nível de radiação de campo distante em torno da antena, em função de coordenadas espaciais. A propriedade de radiação mais importante é o ganho, e por isso será priorizada.

Por fim, o diagrama 3D polar permite a visualização tridimensional da radiação de campo distante da antena. Constitui uma importante ferramenta auxiliar, principalmente quando se deseja avaliar o direcionamento do feixe de uma estrutura irradiadora, tornando-se requisito indispensável para a análise de um sistema de antenas inteligentes.

V. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A antena foi simulada por software que utiliza elementos finitos, *HFSS* da Ansoft®. Ele calcula e apresenta os campos elétricos e magnéticos gerados pela estrutura, a partir da solução das equações de Maxwell, as quais são aplicadas a pequenos domínios previamente divididos, que por sua vez são constituídos de uma quantidade finita de elementos discretizados. Cada elemento ou subdomínio tem a forma de um triângulo, de modo que muitos deles formam malhas sob as quais são associadas equações resolvidas por métodos numéricos. Depois, o campo em cada sub-região é determinado através da densidade de corrente local. O campo final é encontrado somando-se os vários campos de cada elemento.

A Fig. 7 mostra o resultado da perda de retorno para um elemento do conjunto, abrangendo uma faixa de frequências de 1 GHz até 30 GHz.

Conforme pode ser observado, existem pontos específicos

em determinadas frequências que correspondem a uma menor perda de retorno. Esses pontos são listados na Tabela I. Os valores foram arredondados para uma casa decimal, considerando-se a frequência, e arredondados para números inteiros, considerando-se a perda de retorno. Somente os pontos mais significativos do gráfico foram listados.

TABELA I
PERDA DE RETORNO NAS FREQUÊNCIAS MAIS SIGNIFICATIVAS

Frequência (GHz)	Perda de Retorno (dB)
2,2	-16
2,8	-19
3,9	-15
4,8	-18
5,3	-25
5,9	-16
6,1	-14
12,2	-8
15,1	-11
17,4	-15
18,1	-20
20,6	-36

A antena fractal apresentou vários pontos com perda de retorno menores, ao longo da varredura de frequências num intervalo entre 1 GHz e 30 GHz. Isto significa que, em frequências específicas, o rendimento da antena é otimizado em relação a vários parâmetros tais como ganho, casamento de impedâncias, polarização e outros. Se a antena pode operar eficientemente em várias bandas de frequência, significa que ela é multibanda.

Além disso, percebeu-se que para determinadas frequências a perda de retorno é muito baixa, o que melhora ainda mais o rendimento da antena. Em 5,3 GHz, a perda de retorno é de aproximadamente -25 dB, e para 20,6 GHz, atinge admiráveis -36 dB. Menor perda de retorno implica em menos potência desperdiçada, melhor eficiência de radiação e maior cobertura para o usuário que esteja recebendo o sinal irradiado.

A seguir, é apresentado o ganho da antena. O diagrama de radiação (Fig. 8a) e o diagrama 3D polar (Fig. 8b) foram colocados lado a lado, a fim de serem visualizados mais facilmente.

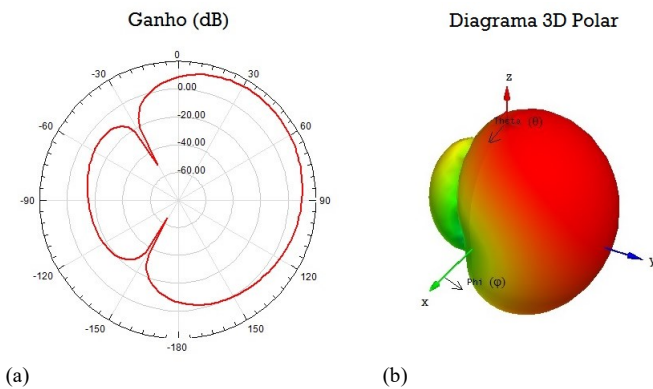


Fig. 8. (a) Diagrama de Radiação para o ganho da antena, em dB, com feixe apontando em $\varphi = 90^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. (b) Diagrama 3D polar esférico.

O diagrama de radiação (Fig. 8a) considera como referência o plano que corta o ângulo $\varphi = 0^\circ$ e uma varredura pelos ângulos θ , de 0 a 2π . O feixe é direcionado em 90° na direção φ e 90° na direção θ . A frequência de análise é de 5GHz. Esta informação é importante, uma vez que um aumento da frequência reduz o comprimento de onda, modificando-se, conseqüentemente, a forma do feixe de varredura, já que este depende da distância entre cada elemento do conjunto, e esta distância é mensurada em comprimentos de onda. Assim, para a frequência de 5 GHz, o comprimento de onda é de 6 cm, e então a distância entre cada elemento, 1cm, é seis vezes menor que o comprimento de onda. Mas para uma frequência de análise de 30 GHz, o comprimento de onda será de 1 cm, e conseqüentemente, a distância entre cada elemento será de 1 comprimento de onda. Esta distância entre cada elemento altera a formação de lóbulos laterais e secundários.

O ganho máximo na direção de interesse é de 15,3 dB. Não existe diferença de fase entre os elementos, tanto os da direção y quanto os da direção z. Mas variando-se essas fases nas duas direções, obtemos a desejada varredura no espaço, controlando o feixe e apontando-o para a direção de interesse.

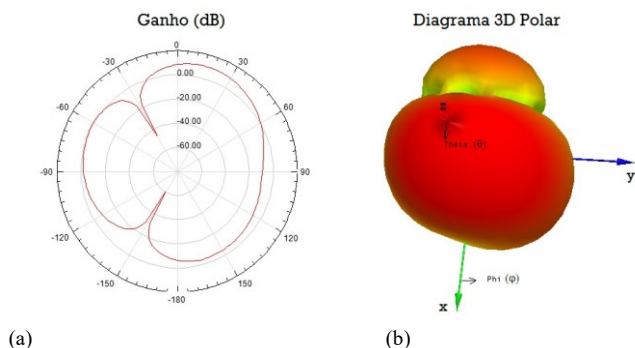


Fig. 9. (a) Diagrama de Radiação para o ganho da antena, em dB, com feixe apontando em $\varphi = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$. (b) Diagrama 3D polar esférico.

Aplicando-se uma fase de -60° entre os elementos no eixo y e 0° entre os elementos no eixo z, o feixe será posicionado em 0° na coordenada φ e 90° na coordenada θ , conforme pode ser visualizado na Fig. 9a e na Fig. 9b. O diagrama da Fig. 9a tem como referência, novamente, o plano $\varphi = 0$ e uma varredura

completa pelos ângulos θ , de 0 a 2π . O ganho total registrado é de 10 dB na direção de interesse.

Para uma fase de $-42,42^\circ$ entre elementos no eixo y e também de $-42,42^\circ$ entre os elementos ao longo do eixo z, o feixe será posicionado em 45° na coordenada φ e 45° na coordenada θ , como pode ser visto na Fig. 10a e na Fig. 10b. Desta vez, o diagrama de radiação da Fig. 10a tem como referência o plano $\theta = 45^\circ$ e uma varredura completa pelos ângulos φ , de 0 a 2π . O ganho total registrado na direção de interesse foi de 12,94 dB.

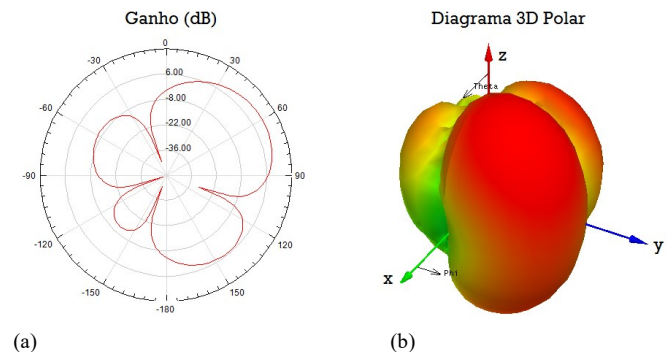


Fig. 10. (a) Diagrama de Radiação para o ganho da antena, em dB, com feixe apontando em $\varphi = 45^\circ$ e $\theta = 45^\circ$. (b) Diagrama 3D polar esférico.

Para outros atrasos de fase nas direções y e z, novos feixes são formados e apontados para direções diversas. Desta maneira, é possível varrer todo o espaço, bastando alterar a fase entre cada elemento individual do arranjo.

VI. TRABALHOS RELACIONADOS E DISCUSSÃO

A antena proposta inova ao utilizar, para o feixe de varredura dinâmico, um conjunto em que cada elemento individual possui o formato fractal. As pesquisas anteriores se concentraram na otimização da estrutura radiante formada por apenas um elemento fractal.

O conjunto de antenas inteligentes 4x4 proposto apresentou resultados satisfatórios para o ganho na direção de interesse, que variaram entre 10 dB e 15 dB, aproximadamente. Esses resultados se mostraram superiores aos de Yogamathi et al. [33], cuja antena constituída por um fractal retangular atingiu um ganho máximo em torno de 3 dB para a frequência de 2,26GHz. A antena fractal proposta também atingiu ganhos superiores aos trabalhos apresentados na seção III.

Varnikha e Jothilakshmi [34] utilizaram uma antena fractal com estrutura decagonal, o que tornou possível a aplicação em banda larga numa faixa de 5,2 GHz até 38,6 GHz. Entretanto, o ganho registrado foi de aproximadamente 3dB para a frequência de 5 GHz. Já a antena fractal inteligente aqui proposta apresentou ganhos da ordem de 10 dB no mínimo, para esta mesma frequência. Além disso, a antena fractal decagonal só alcançou resultados menores de perda de retorno quando operou em frequências elevadas (-25 dB a 27 GHz ou -37 a 33 GHz), enquanto que a antena fractal proposta atingiu -25 dB na frequência de 5,3 GHz e -36 dB em 20,6 GHz.

A antena fractal inteligente apresentada obteve valores de perda de retorno compatíveis aos dos trabalhos da literatura,

alguns deles já analisados na seção III [26]-[32]. Venkatrao et al. [35] realizaram alguns avanços com antenas fractais, conseguindo alcançar perdas de retorno menores que -30dB para frequências específicas (37 GHz, 41 GHz) e perdas de retorno menores que -10 dB para uma ampla faixa de frequências (20 GHz a 50 GHz). Mas o ganho não passou de 4,9 dB, e mesmo assim tal valor foi atingido apenas em estreitas larguras de banda. Já a antena fractal inteligente proposta apresentou resultados que se concentraram entre -15dB e -20dB, para as faixas de frequência entre 2 GHz e 6 GHz, sem no entanto degradar o ganho.

Por utilizar um conjunto de varredura com feixe concentrado e alto ganho, a antena fractal simulada conseguiu suprimir ou pelo menos minimizar os lóbulos nas outras regiões, o que é ideal para sistemas 5G, nos quais se procura evitar interferência e otimizar o processamento espacial, enviando o feixe na direção específica do usuário.

VII. CONCLUSÕES

A quinta geração de comunicação móvel avança rapidamente em diversos países do mundo, promovendo maiores taxas de transmissão de dados e menor latência, e desta maneira viabilizando uma dezena de serviços impensáveis há poucas décadas atrás. Mas a tecnologia 5G ainda possui uma série de obstáculos que precisam ser vencidos, sendo os dois principais deles, operar em múltiplas frequências sem comprometer o desempenho do sistema, e serem capazes de varrer eficientemente o espaço de modo a direcionar o feixe para a região de interesse.

As antenas inteligentes formadas por estruturas fractais demonstraram ser capazes de atender a esses dois requisitos, de maneira versátil e simples. Antenas com geometria fractal podem operar em multibanda, conforme foi verificado neste trabalho, e em muitos outros na literatura especializada, alguns deles citados anteriormente neste artigo. Atuando em multibanda, podem transmitir em várias frequências diferentes, desde a banda *C* até as ondas milimétricas, o que as torna apropriadas para a utilização em comunicações 5G.

Além disso, as antenas fractais se mostraram bastante adaptáveis também aos sistemas 4G instalados, conforme os estudos já analisados na seção III [26]-[32], na seção VI [34][35], e também vários outros, como o trabalho de Kaur et al. [36], que consiste numa antena fractal operando nas frequências de 3,43 GHz, 5,81 GHz, 6,51 GHz, 7,36 GHz e 8,82 GHz; ou ainda, de acordo com as pesquisas de Wang et al. [37], que projetaram uma estrutura circular com ranhuras triangulares em padrão fractal, e desta maneira conseguiram obter uma ampla cobertura que vai de 1,8 GHz a 2,9 GHz, de 3,4 GHz a 4,6 GHz e de 5,0 GHz a 5,6 GHz; e finalmente, conforme a proposta de Abed et al. [38], os quais propuseram uma antena que atende a todas as demandas relacionadas às comunicações sem fio, do 3G ao 5G, passando pelo LTE, WLAN e WiMAX.

A tecnologia 4G ainda opera com bastante vigor em muitos locais da América Latina. A implementação da antena fractal inteligente proposta constitui um importante recurso capaz de auxiliar na transição do 4G para o 5G, tornando os projetos mais

economicamente viáveis e adequados à realidade de cada região.

O modelo fractal apresentado neste trabalho é uma contribuição ao desenvolvimento de antenas fractais com varredura inteligente de feixe, uma área repleta de desafios e perspectivas. Espera-se que a antena sugerida possa servir de referência para futuros projetos que visem otimizar os recursos espectrais e favorecer o desenvolvimento integrado das telecomunicações em toda a sociedade.

REFERÊNCIAS

- [1] G. L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*. 4th ed., Cham, CH: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–29.
- [2] W. Chen, P. Gaal, J. Montojo and H. Zisimopoulos, *Fundamentals of 5G Communications: Connectivity for Enhanced Mobile Broadband and Beyond*. New York: McGraw-Hill Companies, 2021.
- [3] GSMA Latin America, “Infrastructure Deployment in Latin America”, *GSMA Documents*, 2015. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/latinamerica/infrastructure-deployment-in-latin-america>
- [4] M. Chryssomallis, “Smart Antennas”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol.42, no. 3, pp.129-136, June 2000.
- [5] R. H. Roy, “An Overview of Smart Antenna Technology: The Next Wave in Wireless Communications”, *IEEE Aerospace Conference*, vol.3, pp.339-345, May 1998.
- [6] C. Ung and R. H. Johnston, “A Space Division Multiple Access Receiver”, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, vol.1, pp. 422-425, July 2001.
- [7] V. H. Rumsey, “Frequency Independent Antennas”, *IRE National Convention Record*, pt. 1, pp. 114-118, 1958.
- [8] J. D. Kraus, *Antennas*. New York: McGraw-Hill, 1988, pp. 692-710.
- [9] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*. 3rd ed., New York: Wiley, 2013, pp. 332-336.
- [10] C. P. Baliarda, J. Romeu, R. Pous and A. Cardama, “On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 4, pp.517-524, April 1998.
- [11] L. H. Abderrahmane and A. Brahimi, “A New Design of Dual Band Fractal Antenna for LEO Applications”, *The Eighth International Conference on Systems and Networks Communications*, Nov. 2013.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4rd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [13] J. P. Gianvittorio and Y. R. Samii. “Fractal Antennas: A Novel Antenna Miniaturization Technique, and Applications”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 1, pp. 20-36, Feb. 2002.
- [14] S. Ahmadi, *5g NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3gpp New Radio Standards*, Massachusetts: Academic Press, 2019.
- [15] F. Gross, *Smart Antennas for Wireless Communications*. 2nd ed., New York: McGraw-Hill Companies, 2015.
- [16] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. S. Palma and R. J. Bonneau, *Smart Antennas*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [17] N. Cohen, “Fractal Antennas Part 1: Introduction and the Fractal Quad”, *Communications Quarterly*, pp. 7-22, Summer 1995.
- [18] D. H. Werner, R. L. Haupt and P. L. Werner, “Fractal Antenna Engineering: The Theory and Design of Fractal Antenna Arrays”, *IEEE Antennas Propagation Magazine*, vol. 41, no. 5, pp. 37-59, Oct. 1999.
- [19] D. H. Werner and S. Ganguly, “An Overview of Fractal Antenna Engineering Research”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 1, Feb. 2003.
- [20] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. 3rd ed., New York: W. H. Freeman and Company, 1983.
- [21] L. Shu, Q. Jinghui, R. He and Y. Caitian, “A Novel Semi-circle Fractal Multi-band Antenna”, *2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pp. 1268-1271, Dec. 2008.
- [22] A. Reha, A. E. Amri, O. Benhammouch and A. Said, “Fractal Antennas: A Novel Miniaturization Technique for Wireless Networks”, *Transactions on Networks and Communications*, vol. 2, no. 5, pp. 165-193, 2014.

- [23] A. Azari and J. Rowhani, "Ultra Wideband Fractal Microstrip Antenna Design", *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 2, pp. 7-12, 2008.
- [24] S. Chatterjee, A. Majumder, R. Ghatak and D. R. Poddar, "Wide Impedance and Pattern Bandwidth Realization Using Fractal Slotted Array Antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, pp. 4049-4056, 2014.
- [25] D. D. Krishna, M. Gopikrishna and C. K. Aanandan, "Compact Wideband Koch Fractal Printed Slot Antenna", *IET Microwave Antennas Propagation*, vol. 3, no. 5, pp. 782-789, 2009.
- [26] S. Patil and V. Rohokale, "Multiband Smart Fractal Antenna Design for Converged 5G Wireless Networks", *International Conference on Pervasive Computing*, pp.1-5, Jan. 2015.
- [27] M. A. Kadhim, "Increase the efficiency of smart antennas by using fractals", *5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering*, pp. 203-206, 2018.
- [28] N. Shoaib, S. Shoaib, R. Y. Khattak, I. Shoaib, X. Chen and A. Perwaiz, "MIMO Antennas for Smart 5G Devices", *IEEE Access*, vol.6, pp.77014-77021, 2018.
- [29] A. Arif, M. Zubair, M. Ali, M. U. Khan and M. Q. Mehmood, "A Compact, Low-Profile Fractal Antenna for Wearable On-Body WBAN Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.18, no. 5, pp.981-985, May 2019.
- [30] Y. Ma, J. Wang and W. Hou, "Smart Antenna with Capability of Beam Switching for 5G Applications", *IEEE MTT-S International Wireless Symposium*, pp.1-3, 2019.
- [31] S. Kumar, A. S. Dixit, R. R. Malekar, H. D. Raut and L. K. Shevada, "Fifth Generation Antennas: A Comprehensive Review of Design and Performance Enhancement Techniques", *IEEE Access*, vol.8, pp.163568-163593, September 2020.
- [32] R. Rengasamy, D. Dhanasekaran, C. Chakraborty and S. Ponnann, "Modified Minkowski fractal multiband antenna with circular-shaped split-ring resonator for wireless applications", *Measurement*, vol.182, pp.1-9, 2021.
- [33] R. Yogamathi, S. Banu and A. Vishwapriya, "Design of Fractal Antenna for Multiband Applications", *Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies*, pp.1-5, 2013.
- [34] N. Varnikha and P. Jothilakshmi, "Design of Decagonal Wideband Fractal Antenna", *IEEE 6th International Conference on smart structures and systems*, pp.1-4, March 2019.
- [35] K. Venkatrao, S. H. Priya, R. Raghavendra, M. N. S. Kiran and D. Sumanth, "Multi Band Minkowski Fractal Antenna for 5G Applications", *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 3525-3530, March 2020.
- [36] P. Kaur, A. Dee and S. K. Aggarwal, "Design of a Novel Reconfigurable Fractal Antenna for Multi-Band Application", *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol.62, pp.103-112, 2014.
- [37] L. Wang, J. Yu, T. Xie and K. Bi, "A Novel Multiband Fractal Antenna for Wireless Application", *International Journal of Antennas and Propagation*, pp.1-9, 2021.
- [38] A. T. Abed and A. M. Jawad, "Compact Size MIMO Amer Fractal Slot Antenna for 3G, LTE (4G), WLAN, WiMAX, ISM and 5G Communications", *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp.125542-125551, 2019.

sinais, antenas e análise de sistemas digitais, bem como pelo estudo de métodos educacionais na área de robótica e engenharia em geral.



Gilberto Arantes Carrijo é graduado em Engenharia Elétrica (1972) pela Universidade de Brasília (UnB), Mestre em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações (1976) pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação (1983) pelo mesmo instituto.

Alcançou o título de Pós-Doutor (1990) na *University of Western Australia* (UWA). Atua como professor titular na Universidade Federal de Uberlândia, possuindo ampla experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Processamento Digital de Sinais de Voz e Imagens. Realiza pesquisas na área de propagação UHF, compressão de imagem, espalhamento espectral, reconhecimento facial e códigos associados aos respectivos algoritmos.



Daniel Luiz Ribeiro é graduado em Engenharia Elétrica (2013) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Mestre em Engenharia Elétrica (2016) pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU) e atualmente estudante de doutorado, na mesma instituição. Atua como professor no curso de Engenharia

Elétrica da Universidade Estadual de Minas Gerais (UEMG) e como professor de Robótica educacional no ensino fundamental. Realiza pesquisas na área de antenas fractais desde 2014, sendo o tema de sua dissertação de mestrado. Seu principal interesse é pela área de eletrônica, processamento de