

Análise Paramétrica de um Arranjo Linear com Direcionamento de Feixe no Campo Próximo

Wêndria C. da Silva, João C. Weyl A. Costa, André M. Cavalcante e Karlo Q. da Costa

Resumo— Este artigo apresenta uma análise paramétrica de um arranjo linear de dipolos para comunicação na região de campo próximo na frequência de 28 GHz. Inicialmente descreve-se o modelo numérico de simulação e o método de confinamento do campo próximo baseado em casamento de fase. Em seguida é feita uma análise da variação do campo próximo e da corrente de excitação dos elementos em função da posição e quantidade de usuários. Apresenta-se também a influência do tamanho do arranjo sobre o grau de confinamento do campo próximo. Os resultados mostram que o arranjo tem potencial aplicação para as próximas gerações de comunicações móveis.

Palavras-chave— arranjo linear de dipolos, tecnologia 6G no campo próximo, Método dos Momentos.

Abstract— This paper presents a parametric analysis of a linear array of dipoles for communication in the near-field region at a frequency of 28 GHz. Initially, the numerical simulation model and the near-field confinement method based on phase matching are described. Next, an analysis of the variation of the near field and the excitation current of the elements as a function of the position and number of users is carried out. The influence of the size of the array on the degree of confinement of the near field is also presented. The results show that the array has potential application for the next generations of mobile communications.

Keywords— linear array of dipoles, 6G technology in the near field, Method of Moments.

I. INTRODUÇÃO

As futuras redes de comunicações sem-fio de sexta geração (6G) terão um papel indispensável para suportar taxas de dados mais elevadas, eficiência energética aprimorada, menor latência e uma base de usuários mais diversificada em comparação com os sistemas de quinta-geração (5G). Para atender a essas novas demandas, arranjos de antenas com grandes dimensões são identificados como uma das tecnologias decisivas de camadas física. Como resultado, prevê-se que uma parcela das futuras comunicações sem fio 6G ocorra na região de campo próximo radiante (região de Fresnel), complementando a operação convencional de campo distante (Zona de Fraunhofer), característica das tecnologias sem fio atuais. Essas regiões de campo próximo e a região de campo distante são ditadas pela distância chamada de Fraunhofer ou distância de Rayleigh, dada por $d_F = 2D^2/\lambda$, sendo D a maior dimensão da antena e λ o comprimento de onda de operação [1].

Essa mudança de paradigma de campo distante para o campo próximo vem impulsionando o desenvolvimento de novas pesquisas em arranjos de antenas. Enquanto as redes

atuais 5G operam em geral na faixa abaixo de 6 GHz, e em alguns casos na faixa de ondas milimétricas (mmWave), as redes 6G buscam explorar novas fronteiras, inclusive na faixa de THz. A restrição física das antenas e a relação entre o espaçamento dos elementos e o comprimento de onda nessas faixas de frequência resultam em alcances limitados para a comunicação em campo próximo, desafiando assim os pressupostos tradicionais baseados no campo distante [2].

Nas comunicações sem fio tradicionais, quando as antenas irradiam ondas eletromagnéticas (EM) no espaço livre, a frente de onda pode ser bem aproximada como sendo plana devido às grandes distâncias envolvidas em relação ao comprimento de onda operacional. No entanto, tal aproximação não é mais válida em condições de campo próximo e, conseqüentemente, a frente de onda que incide no receptor é esférica.

Essa característica sugere que mais informações podem ser associadas a uma onda esférica em comparação com ondas planas no campo distante. Abrindo assim a possibilidade de aprimorar o desempenho das comunicações ou de permitir outras aplicações que dependam da radiação eletromagnética, devido à disponibilidade de uma variedade maior de padrões de radiação. Nas frentes de onda esféricas incidentes, não apenas as informações angulares são transportadas, como é comum no campo distante, mas também informações de distância. Esse reconhecimento da posição do usuário afeta o modelo de canal para comunicações sem fio em campo próximo [3].

A frente de onda esférica apresenta diferenças fundamentais em comparação com a observada em configurações convencionais de onda plana. Portanto, os modelos, esquemas e resultados existentes, baseados na operação em campo distante, podem não ser aplicáveis. Ressaltando assim a importância de investigar as propriedades, benefícios potenciais e desafios de projeto emergentes da operação em arranjos de antenas em campo próximo.

Neste artigo, é apresentada uma análise paramétrica de arranjos de dipolos no campo próximo, com o objetivo de identificar a influência da posição dos usuários e da quantidade de elementos do arranjo sobre as características de confinamento de campo próximo e as correntes de excitação do arranjo, na faixa de frequência 28 GHz. Esses critérios de análise de desempenho são essenciais para impulsionar as novas tecnologias habilitadoras para o 6G. Além disso, esse estudo busca explorar e otimizar a capacidade do direcionamento de feixe (do inglês *beamforming*), permitindo assim uma utilização mais eficiente e confiável da radiação das antenas.

II. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

A. Descrição do Arranjo de Campo Próximo

Este trabalho apresenta a otimização da radiação de um arranjo linear de dipolos no campo próximo, com ênfase no direcionamento de feixe. O direcionamento do feixe é uma técnica importante em futuras aplicações do 6G, pois a capacidade de direcionar o feixe para um lugar específico é fundamental, pois além de proporcionar uma melhora na qualidade do sinal recebido, é importante também em questões de segurança. O objetivo é direcionar o feixe de maneira precisa, especialmente no campo próximo da antena, para permitir uma interação mais direta e controlável com os usuários alvo.

O principal desafio é garantir uma distribuição uniforme da potência radiada e evitando a formação de lóbulos secundários ou distorções na forma do feixe, portanto o maior espaçamento entre os elementos deve ser inferior a um comprimento de onda ($d_{max} < \lambda$), para o campo distante [4]. Isso requer uma compreensão aprofundada das propriedades do dipolo individual, bem como do arranjo como um todo, incluindo sua geometria, padrões de excitação e espaçamento entre os elementos.

Além disso, o problema aborda a implementação do conceito de casamento de fase para otimizar o direcionamento. O que envolve o ajuste preciso das fases das fontes de tensão que alimentam os dipolos individuais, de modo a controlar a direção e o padrão de radiação resultante. Isso requer um estudo das relações de fase entre os elementos do arranjo e a aplicação de técnicas adequadas para garantir a coerência de fase desejada.

Para o campo próximo, é analisado e posicionado os elementos ao longo de uma linha (para formar um arranjo linear). A Fig. 1 mostra os dipolos posicionados ao longo de uma grade retangular para formar um arranjo planar, porém por questões de menor custo computacional, é analisado primeiramente um arranjo linear, para validação do método. Neste contexto, o direcionamento de feixe foi realizado aplicando uma fonte de tensão em cada dipolo, $V_s(m, n) = 1e^{j\phi_{m,n}}$, sendo $\phi_{m,n}$ a fase de cada dipolo. Como resultado, cada dipolo emite um campo eletromagnético próprio, determinado pela fase específica da fonte aplicada. Utilizando o princípio da superposição, o campo total em qualquer ponto do espaço é calculado como a soma vetorial dos campos radiados por cada antena individualmente.

A diferença de fase entre os dipolos resulta em interferência construtiva ou destrutiva, dependendo da fase relativa entre eles. Portanto, pontos onde as ondas irradiadas pelos dipolos estão em fase experimentam interferência construtiva, amplificando assim o campo total. Em contrapartida, pontos onde as ondas estão fora de fase sofrem interferência destrutiva, diminuindo o campo total. Essa aplicação do princípio da superposição nos permite entender como a diferença de fase entre os dipolos pode ser utilizada para direcionar e controlar o padrão do feixe de radiação, influenciando assim a distribuição do campo eletromagnético no espaço ao redor das antenas [2].

Considerando P_u a posição arbitrária de um usuário próximo do arranjo onde se deseja direcionar o campo (Fig. 1), as fases dos dipolos são ajustadas da seguinte forma para garantir o casamento de fase neste ponto. Escolhendo-se o dipolo $m=1$ e $n=1$ como referência, ou seja, $\phi_{1,1} = 0$, as fases dos outros dipolos são calculadas por:

$$\phi_{m,n} = -k \times \Delta_{m,n} \quad (1)$$

onde $k=2\pi/\lambda_0$ é a constante de fase do meio, $\Delta_{m,n} = |\vec{r}_{ref}| - |\vec{r}_{m,n}|$ a diferença de distâncias, $|\vec{r}_{ref}|$ a distância do elemento de referência ao usuário e $|\vec{r}_{m,n}|$ a distância de um elemento genérico ao usuário (Fig. 1). Portanto, pelo princípio da superposição, este casamento de fase resulta em uma interferência construtiva que maximiza a intensidade do sinal no local onde o usuário está posicionado.

Dados a geometria do arranjo (Fig. 1) e o esquema de alimentação dos dipolos descrito acima, utilizou-se o Método dos Momentos (MoM) para solução do problema eletromagnético e cálculo dos campos [5]. Uma das principais vantagens deste método reside no fato de que ele considera a interação mútua entre as antenas, possibilitando assim a validação de modelos mais realísticos. Ele discretiza apenas os condutores, o que implica em um número reduzido das variáveis desconhecidas em todo o problema [5]. Isso, por sua vez, leva a uma redução significativa na exigência de memória e no tempo de processamento. A próxima seção apresenta um resumo deste método.

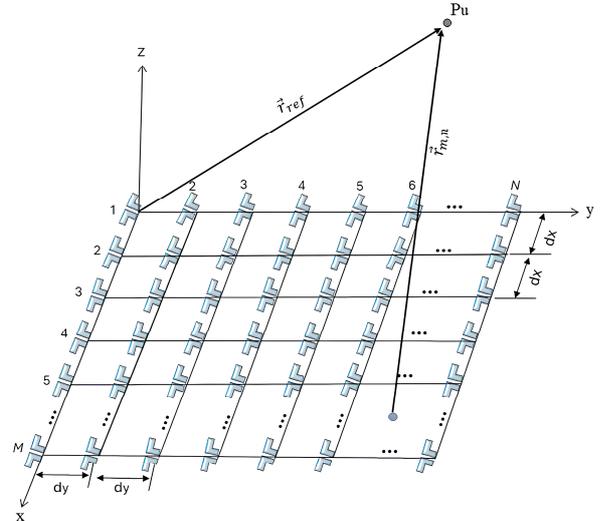


Fig. 1. Geometria do arranjo planar com M por N dipolos alinhados em x . O vetor de referência (r_{ref}) é definido do elemento $m=1$ e $n=1$ ao ponto P_u e $r_{m,n}$ é o vetor distância geral entre o elemento mn ao ponto P_u .

B. Solução Numérica pelo Método dos Momentos

O MoM, também conhecido como método dos resíduos ponderados, é uma técnica utilizada para resolver equações integrais no domínio da frequência. Ao focar nas fontes eletromagnéticas como as quantidades de interesse, o MoM torna-se muito eficaz na resolução de problemas de radiação e espalhamento. O método resolve equações integrais complexas

ao reduzi-las a um sistema de equações algébricas simples, que podem ser resolvidas numericamente utilizando ferramentas computacionais [6].

O MoM visa determinar aproximadamente uma função resposta, representada como f , a partir de um operador integral-diferencial linear L e uma função de excitação g , conforme a equação não homogênea:

$$L(f) = g \quad (2)$$

A função f é aproximada por uma combinação linear de Ne termos \hat{f}_n , como mostrado abaixo:

$$f(z') \cong \hat{f}(z') = a_1 \hat{f}_1(z') + a_2 \hat{f}_2(z') + \dots + a_n \hat{f}_n(z') = \sum_{n=1}^N a_n \hat{f}_n(z') \quad (3)$$

onde a_n são constantes desconhecidas e $\hat{f}_n(z')$ são funções conhecidas chamadas funções base, em geral, conseguem representar com precisão a função desconhecida. Onde o domínio dessas funções é o mesmo de $f(z')$. Ao utilizar a linearidade de L e substituir a equação 3 em 2, obtém-se:

$$L(f(z')) \cong L(\hat{f}(z')) = \sum_{n=1}^N a_n L(\hat{f}_n(z')) \cong g \quad (4)$$

Desta última equação pode-se concluir que as incógnitas são agora os escalares a_n . Se por hipótese, considerar-se a solução aproximada, isto é, com Ne funções de base, a resolução da equação não é possível, visto que possui maior número de incógnitas Ne do que equações. De forma a determinar as grandezas escalares a_n , efetua-se o produto interno (integração) com um conjunto de funções conhecidas w_m denominadas por funções de teste ou peso, sendo que os elementos w_m devem ser linearmente independentes, de forma que as Ne equações também sejam. Assim, para cada função de teste w_m tem-se [7]:

$$\langle g, w_m \rangle = \left\langle \sum_{n=1}^N a_n L(\hat{f}_n), w_m \right\rangle = \sum_{n=1}^N a_n \langle L(\hat{f}_n), w_m \rangle \Leftrightarrow \sum_{n=1}^N a_n \langle w_m, L(\hat{f}_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle, \quad (5)$$

onde $m = 1, 2, 3, \dots, Ne$, portanto um conjunto de equações lineares que podem ser representadas matricialmente, ou seja, $[Z_{mm}][I_n] = [V_m]$, sendo $[Z_{mm}] = \langle w_m, L(\hat{f}_n) \rangle$, $I_n = a_n$ e $[V_m] = \langle w_m, g \rangle$. A solução aproximada pode ser obtida se a matriz $[Z_{mm}]$ resultante for não singular, a sua inversa existe e os escalares I_n são:

$$[I_n] = [Z_{mm}]^{-1} [V_m], \quad (6)$$

e a solução aproximada é dada por:

$$\hat{f} = \sum_n a_n \hat{f}_n \quad (7)$$

A convergência da solução depende das funções base \hat{f}_n e das funções de teste w_m , que influenciam a complexidade na determinação dos elementos da matriz $[Z_{mm}]$ do MoM.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Baseado no método apresentado na seção anterior, desenvolveu-se um programa MoM em Matlab [8] para calcular a distribuição de corrente do arranjo e o campo elétrico próximo do arranjo genérico da Fig. 1. O elemento do arranjo utilizado é um dipolo de meia onda com comprimento total $l=2h+d=\lambda_0/2$ (λ_0 é o comprimento de onda no ar para 28 GHz), sendo $h=2,3$ mm o comprimento de um braço do dipolo, $d=0,4$ mm o gap da fonte de tensão e $a_d=0,1$ mm o raio do condutor. No MoM este dipolo foi modelado com um número de segmentos em cada braço $N_h=2$.

A. Variação com a Posição do Usuário

Esta seção apresenta a análise da resposta do arranjo quando o usuário encontra-se em diferentes pontos dentro da área de cobertura. Considerou-se nestes cálculos um arranjo com $N=40$, $dy=0,75\lambda_0$. Neste caso o comprimento do arranjo é $L_y=(N-1) \times dy$. Foram considerados três usuários em diferentes pontos no plano yz ($x=0$), conforme os dados da Tabela 1.

TABELA I. PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Parâmetro	Valor	
Posição do usuário 1 (Pu1)	$y_{u1}=1,5L_y$	$z_{u1}=2L_y$
Posição do usuário 2 (Pu2)	$y_{u2}=0,5L_y$	$z_{u2}=4L_y$
Posição do usuário 3 (Pu3)	$y_{u3}=-0,5L_y$	$z_{u3}=3L_y$

As Figs. 2, 3 e 4 mostram os resultados de campo próximo no plano yz e as distribuições do módulo corrente dos arranjos para os casos com os usuários 1, 2 e 3, respectivamente. Já a Fig. 5 mostra os resultados para o caso com os três usuários simultaneamente, ou seja, as fontes utilizadas nas Figs. 2, 3 e 4 foram somadas e aplicadas para obter os resultados da Fig. 5.

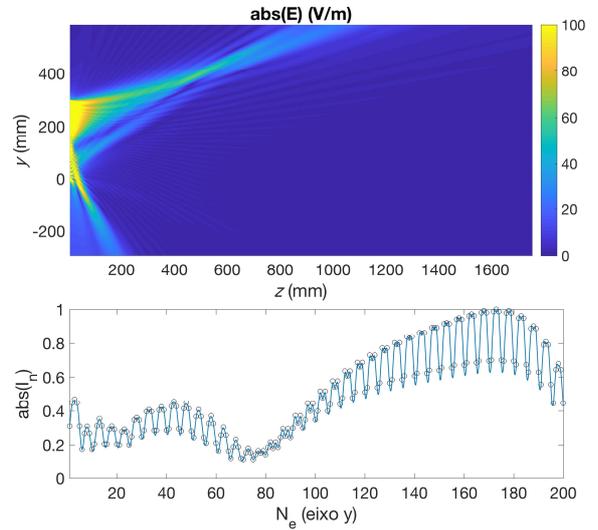


Fig. 2. Plot do campo elétrico próximo (figura superior) e corrente dos dipolos (figura inferior) para um arranjo com $N=40$, $dy=0,75\lambda_0$ e um usuário localizado em $(y_{u1}=1,5L_y; z_{u1}=2L_y)$ onde $L_y=(N-1) \times dy$.

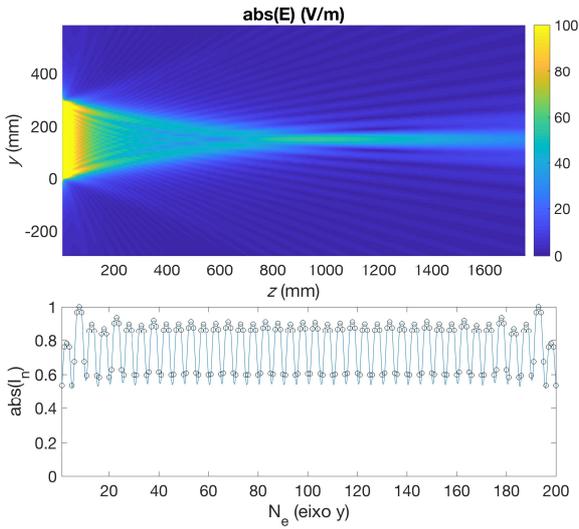


Fig. 3. Plot do campo elétrico próximo (figura superior) e corrente dos dipolos (figura inferior) para um arranjo com $N=40$, $dy=0,75\lambda_0$ e um usuário localizado em $(y_{u2}=0,5L_y; z_{u2}=4L_y)$ onde $L_y=(N-1)\times dy$.

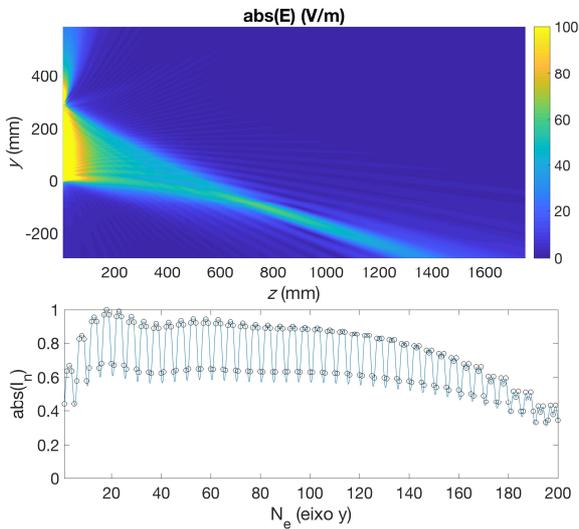


Fig. 4. Plot do campo elétrico próximo (figura superior) e corrente dos dipolos (figura inferior) para um arranjo com $N=40$, $dy=0,75\lambda_0$ e um usuário localizado em $(y_{u3}=-0,5L_y; z_{u3}=3L_y)$ onde $L_y=(N-1)\times dy$.

Primeiramente se observa destes resultados que o método de direcionamento do campo por casamento de fase é eficiente para realizar o escaneamento do feixe em uma boa área de cobertura, com os usuários acima (Fig. 2), abaixo (Fig. 4) e em frente ao arranjo (Fig. 3). Onde nos casos dos usuários 1 e 3, se observou uma pequena radiação indesejada em uma direção próxima e oposta ao eixo do arranjo. Estas radiações são devido aos *grating lobes* que podem ser reduzidos com a diminuição de dy ou utilizando também um controle das amplitudes de V_s de cada dipolo [4]. Também se observou que em geral a distribuição da magnitude da corrente é não uniforme, com exceção para os casos quando os usuários estão na direção central do arranjo (Fig. 3). Isto ocorre devido ao acoplamento mútuo considerado pelo MoM, ou seja, se este

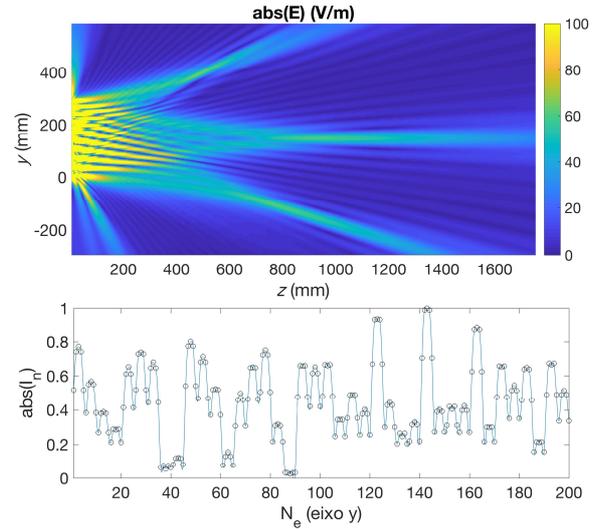


Fig. 5. Plot do campo elétrico próximo (figura superior) e corrente dos dipolos (figura inferior) para um arranjo com $N=40$, $dy=0,75\lambda_0$ e três usuários em $(y_{u1}=1,5L_y; z_{u1}=2L_y)$, $(y_{u2}=0,5L_y; z_{u2}=4L_y)$ e $(y_{u3}=-0,5L_y; z_{u3}=3L_y)$, onde $L_y=(N-1)\times dy$.

efeito não fosse considerado, todos os dipolos iriam possuir a mesma magnitude de corrente, resultando em erros consideráveis no cálculo do campo total, o qual é diretamente relacionado com as correntes induzidas nos dipolos. E por fim, o resultado da Fig. 5 comprova o princípio de superposição de usuários devido a linearidade de (6). Esta situação é particularmente interessante em sistemas de comunicação multiusuários.

B. Variação com o Número de Elementos do Arranjo

Para analisar a dependência do direcionamento do arranjo em função do número de elementos do arranjo, a simulação para o caso da Fig. 5 foi repetida para diferentes valores de N ($N=20, 60$ e 100). Os resultados são apresentados na Fig. 6, onde manteve-se a distância proporcional das posições dos usuários conforme a Tabela 1.

Nota-se que quanto maior N menor é a área de confinamento do campo próxima do usuário, ou seja, melhor será a resolução espacial do direcionamento. Isto acontece, pois quanto mais elementos, mantendo a mesma distância proporcional dos usuários, menor será a diferença de fase entre dipolos consecutivos do arranjo. Isto causa uma redução da distância angular entre as interferências construtivas e destrutivas, e reduzindo, conseqüentemente, a área angular de interferência construtiva máxima localizada nos usuários. Este fenômeno de redução da largura de feixe com aumento de N é similar aquele que acontece no campo distante [4].

C. Campo Distante

Em geral, a direção angular dos máximos no campo distante de um arranjo com direcionamento no campo próximo é a mesma dos máximos no campo próximo sobre uma esfera de raio constante igual a $|Pu|$. Em outras palavras, os máximos no campo próximo e no campo distante estão alinhados na mesma direção. A principal diferença é que o lóbulo com maior intensidade é aquele que está na direção do usuário que

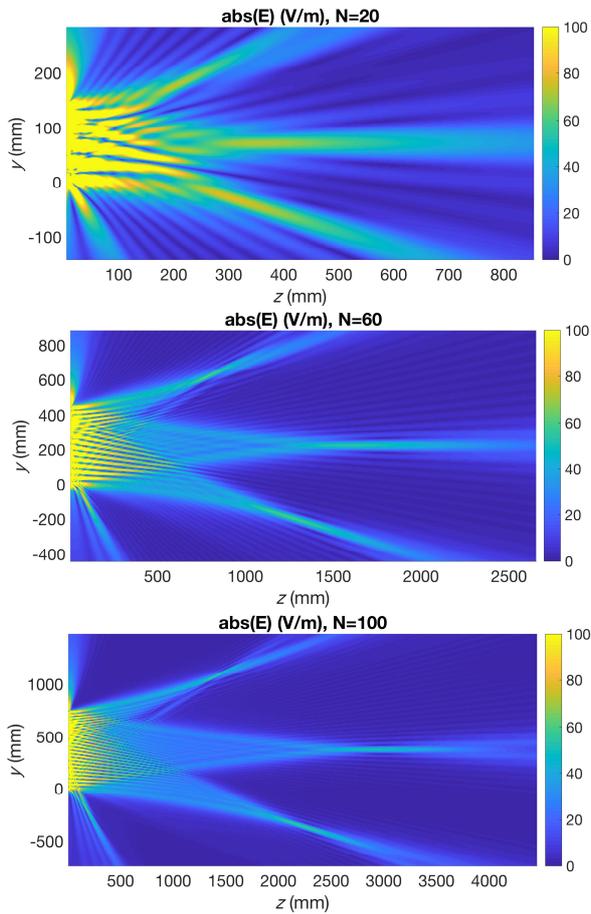


Fig. 6. Plot do campo elétrico próximo em função de N : (a) $N=20$, (b) $N=60$ e (c) $N=100$. Dados: $dy=0,75\lambda_0$ e três usuários em $(y_{u1}=1,5L_y; z_{u1}=2L_y)$, $(y_{u2}=0,5L_y; z_{u2}=4L_y)$ e $(y_{u3}=-0,5L_y; z_{u3}=3L_y)$, onde $L_y=(N-1)\times dy$.

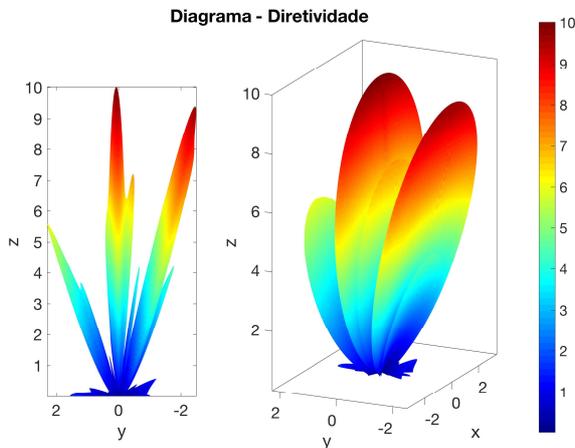


Fig. 7. Diagrama de campo distante de diretividade do arranjo da Fig. 6 (figura superior), com $N=20$, $dy=0,75\lambda_0$ e três usuários em $(y_{u1}=1,5L_y; z_{u1}=2L_y)$, $(y_{u2}=0,5L_y; z_{u2}=4L_y)$ e $(y_{u3}=-0,5L_y; z_{u3}=3L_y)$, onde $L_y=(N-1)\times dy$.

está mais distante do arranjo, ou seja, neste caso o feixe do campo próximo se aproxima mais do campo distante que os outros casos. Isto pode ser visto na Fig. 7, a qual mostra o diagrama de campo distante do arranjo da Fig. 6 com $N=20$,

onde observamos o lóbulo maior correspondente ao usuário 2, no centro entre os lóbulos dos usuários 1 e 3 (Fig. 7).

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma análise paramétrica de um arranjo linear de dipolos com direcionamento do campo próximo na frequência de 28 GHz. Particularmente este arranjo é relevante para aplicações em redes 6G. Inicialmente foram descritas a geometria do arranjo e o método de direcionamento de campo próximo baseado em casamento de fase. Em seguida foi apresentado um resumo do MoM, o qual foi utilizado para cálculo do campo próximo, distribuição de corrente e campo distante. A vantagem deste método é que ele considera automaticamente o efeito de acoplamento mútuo entre os dipolos, necessário para uma boa descrição do arranjo.

Os resultados demonstraram que o arranjo proposto é eficaz em direcionar simultaneamente feixes para diferentes usuários, cobrindo uma ampla área angular. Além disso, observou-se que a área de confinamento do campo próximo em cada usuário pode ser significativamente reduzida com o aumento do número de elementos do arranjo. Essa maior resolução de confinamento permite aumentar a quantidade de usuários conectados ao arranjo sem causar interferência. Por fim, foi verificado que no campo distante, os lóbulos principais do arranjo são direcionados precisamente aos usuários, de maneira proporcional às suas distâncias em relação ao arranjo. Esta precisão no direcionamento dos feixes não só melhora a eficiência da comunicação, mas também amplia o potencial de utilização do arranjo em ambientes densamente povoados. Futuras pesquisas se concentrarão em avaliar o desempenho desses arranjos em termos das potências recebidas pelos usuários, abrindo caminho para novas descobertas e inovações na área.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Centro de Inovação, Ericsson Telecomunicações Ltda., Brasil e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] P. Nepa and A. Buffi, "Near-field-focused microwave antennas: Nearfield shaping and implementation." *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 3, pp. 42–53, 2017.
- [2] Zhao, Yajun, et al., "6G near-field technologies white paper.," *Future Forum*, pp. 13-77, 2024.
- [3] Zhang, Haiyang et al, "6G wireless communications: From far-field beam steering to near-field beam focusing," *IEEE Communications Magazine*, pp 1-3, 2023.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & sons, 4rd ed, Inc., Hoboken: New Jersey, 2016.
- [5] W. C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman and Hall/CRC, 3rd ed, 2021.
- [6] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 3rd ed, Reino Unido: Wiley, 2024.
- [7] D. G. Dudley, *Mathematical Foundations for Electromagnetic Theory*, New York: IEEE Press, 1994.
- [8] Matlab software. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [9] K. Q. Costa, "Simple and Efficient Computational Method to Analyze Cylindrical Plasmonic Nanoantennas," *International Journal of Antennas and Propag.*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/675036>.