

Acesso Inicial Utilizando Algoritmos Genéticos para Redes Celulares 5G mmWave

Victoria Dala Pegorara Souto, Richard Demo Souza, Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo—Um Algoritmo Genético (GA) é proposto para o projeto de *beamforming* baseado em *codebook* para Acesso Inicial (IA, *do inglês, Initial Access*), considerando um sistema com um grande número de antenas transmissoras na Estação Base e um usuário com uma única antena receptora, operando na faixa de ondas milimétricas. A eficiência do GA proposto é investigada e comparações são realizadas. Adicionalmente, são investigados os efeitos de diversos parâmetros, como o número de antenas transmissoras, o tamanho do *codebook* e a potência de transmissão. O GA proposto apresenta desempenho superior e, nos casos em que foi possível avaliar, os resultados se aproximaram daqueles obtidos com busca exaustiva, com uma complexidade de implementação consideravelmente reduzida. Desse modo, este método pode ser considerado como um bom candidato para as futuras redes de comunicação sem fio.

Palavras-Chave—5G, Ondas Milimétricas, Beamforming, Algoritmos Genéticos.

Abstract—A Genetic Algorithm (GA) is proposed for Initial Access (IA) beamforming schemes based on codebook, considering a system with a large number of transmit antennas in the base station and a single-antenna user, operating on the millimeter wave band. The efficiency of the proposed GA is investigated and comparisons are realized. Additionally, the effect of several parameters, such as the number of transmit antennas, codebook size and transmission power are investigated. The proposed GA presents a superior performance and, in the case of small parameters, it was possible to show that the GA-based results approach the exhaustive search results with considerably reduced implementation complexity. In this way, we can say that the proposed GA-based algorithm is a good candidate for future wireless networks.

Keywords—5G, mmWave, Beamforming, Genetic Algorithm.

I. INTRODUÇÃO

Comunicações de ondas milimétricas (*mmWave*) têm despertado grande interesse de pesquisadores e empresas de telecomunicações devido ao abundante espectro de frequências disponível, diferentemente das bandas congestionadas nas frequências UHF convencionais e de microondas abaixo de 3GHz [1]. Devido a isto, as bandas *mmWave* são consideradas como candidatas para as comunicações celulares da próxima geração (5G). Além disso, os avanços nos circuitos de RF CMOS em conjunto com os pequenos comprimentos de ondas das frequências de *mmWave* permitem o uso de arranjos de antenas formados por um grande número de elementos na Estação Base (BS) e no Equipamento do Usuário (UE) [2][3], permitindo a realização de *beamforming*, que reduz a perda

de percurso severa existente nas bandas de *mmWave* [4], além de fornecer maior alcance, maior diretividade e multiplexagem espacial, obtendo assim uma grande capacidade [5][6].

Entretanto, a utilização do *beamforming* na BS e/ou no UE é considerada um desafio para o Acesso Inicial (IA), pelo qual o equipamento do usuário estabelece um link físico com a estação base [7]. Como a transmissão omnidirecional pode não ser aplicada e o melhor par de feixes entre BS e UE não é conhecido neste estágio, a duração total da busca direcional IA pode ser muito longa, uma vez que múltiplos preâmbulos devem ser transmitidos repetidamente para todos os pares de feixes de transmissão e recepção. O atraso causado pela busca direcional no IA deve ser reduzido para alcançar os objetivos da 5G, que requer uma latência fim-a-fim de até 1ms [8].

Visando reduzir este atraso e estudar técnicas de IA, diversos trabalhos têm apresentado estudos comparativos: busca exaustiva é discutida em [4][7]; a técnica de Busca Iterativa é apresentada em [7][9] e a Pesquisa Baseada em Informação de Contexto é considerada em [8]. No entanto, nestes trabalhos as técnicas de IA (*do inglês, Initial Access*) são projetadas considerando modelos de canais e métricas de desempenho específicas, além de não considerarem o tempo de execução do algoritmo, que aumenta consideravelmente o atraso do IA. Devido a isso, em [10] foi proposto um método baseado em Algoritmos Genéticos (GA), o qual considera a utilização de *beamforming* apenas na BS e avalia o desempenho com e sem atraso de execução. A partir dos resultados obtidos é possível verificar que o GA proposto em [10] apresenta um desempenho próximo ao encontrado pela busca exaustiva para um número pequeno de iterações. Mas, o algoritmo proposto em [10] não faz uso de conceitos básicos dos GAs, tais como o processo de seleção e reprodução dos elementos melhores avaliados, fato este que impede que o algoritmo apresentado em [10] explore de forma ampla o espaço de busca do problema proposto, reduzindo o seu desempenho.

Como solução, o presente trabalho propõe a utilização de um algoritmo baseado em GA, considerando de fato suas principais propriedades. É sabido que os GAs apresentam uma grande popularidade na comunidade científica, devida a sua eficiência na resolução de problemas que não possuem soluções analíticas praticáveis, como por exemplo, problemas eletromagnéticos [11], projetos de antenas mais eficientes [12], melhoria dos sistemas de comunicação [10], dentre muitas outras. O seu desempenho é considerado elevado quando comparado a algoritmos clássicos existentes. O algoritmo proposto é genérico, ou seja, pode ser implementado para diferentes modelos de canal e configurações de *codebook*. A partir dos resultados apresentados temos que: 1) O GA proposto

neste trabalho alcança o mesmo desempenho que a técnica de busca exaustiva em casos nos quais a busca exaustiva pode ser aplicada e nos demais casos foi possível verificar que o GA proposto apresenta bom desempenho com um número pequeno de iterações e complexidade relativamente baixa; 2) Além disso, o GA proposto mostrou-se superior ao GA apresentado em [10] em todas as simulações realizadas, alcançando resultados consideravelmente melhores; 3) O GA proposto, da mesma forma que em [10], leva em consideração o tempo de execução do algoritmo de modo que o desempenho do sistema não é necessariamente melhorado com o aumento do número de iterações. Em vez disso, o *throughput* máximo é obtido com um número pequeno de iterações.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção II descreve o modelo do sistema utilizado; a Seção III descreve o Algoritmo Genético proposto; a Seção IV descreve os resultados obtidos a partir das simulações realizadas e a Seção V apresenta as conclusões obtidas no decorrer deste trabalho.

II. MODELO DO SISTEMA

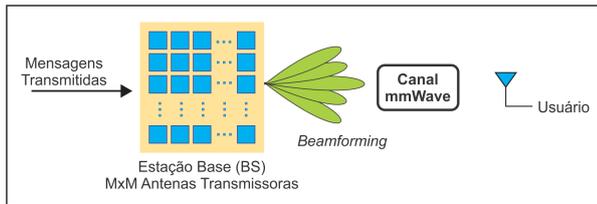


Fig. 1. Modelo do sistema MIMO *mmWave* com um usuário.

Considere inicialmente um modelo geral de um sistema MIMO, no qual a BS está equipada com um arranjo planar de $M \times M$ antenas transmissoras e um usuário com uma antena, mostrado na Fig. 1. No instante t , o sinal recebido é dado por [10]:

$$\mathbf{Y}(t) = \sqrt{\frac{P}{M}} \mathbf{h}(t) \mathbf{V}(t) \mathbf{X}(t) + z(t), \quad (1)$$

em que P é a potência total, M é o número de antenas na BS, $\mathbf{h}(t) \in C^{1 \times M}$ é o vetor linha do canal, $\mathbf{V}(t) \in C^{M \times 1}$ é o vetor linha de *beamforming*, $\mathbf{X}(t) \in C^{M \times 1}$ é o vetor de mensagem transmitido e $z(t)$ representa o ruído Gaussiano com componentes independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), de média zero e variância $N_0/2$ por dimensão.

O *codebook*, baseado na DFT [13], é o conjunto de matrizes $\mathbf{V}(t) \in C^{M \times M}$ com colunas retiradas da matriz $\mathbf{W} \in C^{M \times N_{\text{vec}}}$, cujo elemento (m, u) , para $m = 1, \dots, M$ e $u = 1, \dots, N_{\text{vec}}$ é dado por:

$$\mathbf{W}(m, u) = e^{j2\pi(m-1)(u-1)/N_{\text{vec}}}. \quad (2)$$

Com um abuso de terminologia, eventualmente nos referimos a \mathbf{W} como o *codebook*, e dizemos que N_{vec} ($N_{\text{vec}} \geq M$) representa o número de vetores de *codebook*.

Para a implementação de um GA é necessário definir uma função aptidão que, neste caso, representa uma métrica de desempenho do sistema. Neste trabalho, considerou-se como métrica de avaliação de desempenho a vazão (ou *throughput*) relativa do sistema, dada por:

$$R(K) = (1 - \alpha K) \log_2(1 + \text{SNR}(K)). \quad (3)$$

em que K representa a iteração do GA proposto ($K = 1, \dots, N_{\text{it}}$), α representa o custo do atraso para executar cada iteração do algoritmo ($\alpha N_{\text{it}} < 1$) e a SNR da K -ésima iteração pode ser descrita por:

$$\text{SNR}(K) = \frac{P}{M} |\mathbf{h} \mathbf{V} \mathbf{V}^* \mathbf{h}^*| \quad (4)$$

em que $(\cdot)^*$ representa o transposto Hermitiano da matriz.

Este trabalho considerou para fins de comparação o método baseado em Algoritmos Genéticos proposto em [10]. Em [10], da mesma forma que no presente trabalho, são realizadas avaliações de diversos parâmetros do sistema proposto, tal como, M , N_{vec} e P . Além disso, também foi considerado o custo da execução de cada iteração. A partir dos resultados apresentados em [10] foi possível verificar que o mesmo apresenta um bom desempenho quando comparado aos resultados obtidos a partir de uma busca exaustiva. No entanto, o método proposto em [10] apesar de ser referenciado como um método baseado em GAs não faz uso de qualquer princípio básico desta classe de métodos de otimização. Ao contrário, o mesmo utiliza-se de operações realizadas de maneira aleatória para tentar garantir a convergência do seu algoritmo, fato este que reduz o seu desempenho e faz com que o mesmo necessite de mais iterações para alcançar o mesmo desempenho obtido com o GA clássico. Visando reduzir a perda de desempenho causada pela aleatoriedade do algoritmo proposto em [10], neste trabalho foi proposto um novo método baseado em conceitos clássicos de GA, o qual mostrou-se superior ao apresentado em [10] e é descrito a seguir.

III. ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO

O algoritmo proposto é apresentado no Algoritmo 1.

Todas as operações (Cruzamento e Mutação) realizadas sobre cada indivíduo consideram a alteração de uma coluna completa da matriz \mathbf{V} , considerando o espaço de busca definido pelos vetores coluna do *codebook* \mathbf{W} . Devido a limitações de espaço a abordagem sobre Algoritmos Genéticos apresentada até aqui foi a mais simples possível. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em [14] e [15].

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os resultados apresentados nesta sessão foi considerado o modelo de canal, dado por $\mathbf{h} = \mathbf{h}_{\text{NLOS}}$, em que os elementos de \mathbf{h}_{NLOS} são modelados como variáveis Gaussianas complexas i.i.d. com média zero e variância unitária [10]. O IA *beamforming* é realizado com base no *codebook* definido por (2). Em todas as figuras apresentadas o GA foi executado para um número suficientemente grande de iterações para garantir a sua convergência. Em todos os resultados foram consideradas 10^3 realizações do canal, $N_{\text{it}} = 10^3$ e populações formadas por $N_{\text{pop}} = 10$ indivíduos. Todos os resultados obtidos consideram o valor médio encontrado em cada iteração do GA para as 10^3 realizações do canal.

A seguir são exibidos os resultados obtidos considerando, $M = 2, 3, 4, 32$ ou 64 , antenas transmissoras na BS e um

Algorithm 1 Algoritmo Genético Proposto

Em cada intervalo de tempo para a realização instantânea do canal $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ faça:

1. Selecione $N_{pop} = 10$ matrizes de *beamforming* ("Indivíduos") aleatoriamente do codebook pré-definido \mathbf{W} (Determinar a Primeira Geração).
2. Avalie cada indivíduo através da Equação (3) (Determina a Aptidão de cada Indivíduo).
3. A partir do Método de Seleção de Torneio [14] com $T = 2$, selecione os Pais que serão utilizados no Operador de Cruzamento.
4. Com uma probabilidade de cruzamento $p_c = 0.5$ e utilizando o Operador de Cruzamento Discreto [14], determine os filhos desta geração;
5. Considerando uma probabilidade de mutação $p_m = 0.08$, se $rand < p_m$ gere um novo filho formado pela Rainha, substituindo 10% de suas colunas por colunas de \mathbf{W} selecionadas aleatoriamente e para $rand > p_m$ submeta os filhos gerados no passo anterior ao operador de mutação real com uma probabilidade $p_m = 0.08$.
6. Defina a nova população considerando o conceito de Elitismo [14], ou seja, os $N_{elite} = 2$ melhores indivíduos da geração atual devem ser mantidos na próxima geração e os demais são formados pelos indivíduos gerados no passo 5.
7. Verifique o critério de parada, caso não tenha sido satisfeito retorne ao passo 2. Caso o critério de parada tenha sido satisfeito, retorne o melhor indivíduo encontrado (Critério de Parada: $N_{it} = 10^3$).

usuário com apenas uma antena, $N_{vec} = 5, 10, 80, 100, 120$ ou 140 e $\alpha = 0$ ou 0.001. Além disso, para todos os resultados apresentados neste trabalho foi considerada a normalização a partir do máximo *throughput* obtido em cada figura, visando melhorar a visualização da influência do aumento ou redução de cada parâmetro avaliado. Inicialmente foram realizadas simulações supondo um número pequeno de antenas na BS, tornando possível a realização de uma Busca Exaustiva para fins de validação dos resultados obtidos. Além disso, todos os resultados foram confrontados aos apresentados em [10].

A. Resultados obtidos para $\alpha = 0$:

Inicialmente, para validar o GA proposto obtivemos o *throughput* relativo para $M = 2, 3$ e 4, $\alpha = 0$, $P = 10dB$ e $N_{vec} = 10$. Dado que para uma busca exaustiva existem N_{vec}^M combinações possíveis das colunas de \mathbf{W} , foi necessário escolher valores pequenos de M . A Fig. 2 apresenta os resultados encontrados através da busca exaustiva, GA proposto e do GA apresentado em [10]. Verifica-se que o GA proposto obteve os mesmos resultados que a busca exaustiva em todos os casos, porém o GA de [10] alcança o mesmo desempenho apenas para $M \leq 3$, pois aumentando M não foi atingido o valor ótimo com apenas 10^3 iterações. Além disso, nota-se que aumentando o número de antenas na BS aumenta-se também o *throughput* relativo, pois aumentando o número de antenas ampliamos, conseqüentemente, o ganho do arranjo.

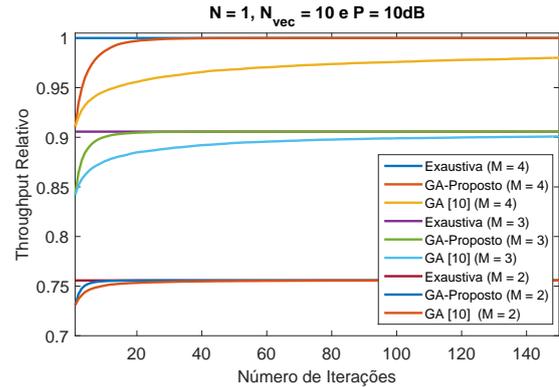


Fig. 2. Variação de M para $\alpha = 0$, $N_{vec} = 10$ e $P = 10dB$

Uma nova análise realizada considera a variação de N_{vec} , ou seja, variando o número de vetores de *codebook* \mathbf{W} em (2). Quando ampliamos o tamanho de \mathbf{W} diminuímos o intervalo entre os elementos, proporcionando uma matriz de pré-codificação \mathbf{V} mais sensível e conseqüentemente um maior ganho de arranjo, obtendo valores de *throughput* superiores. A Fig. 3 apresenta esta análise.

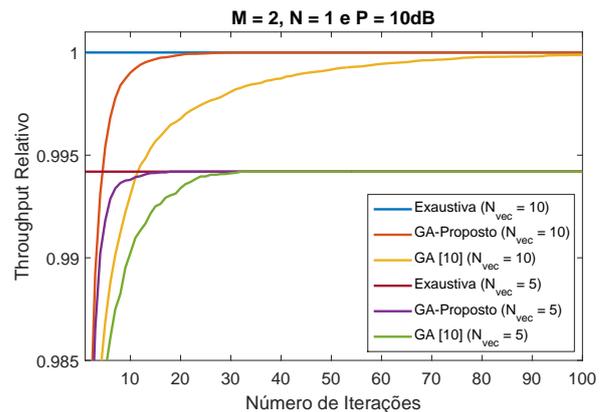
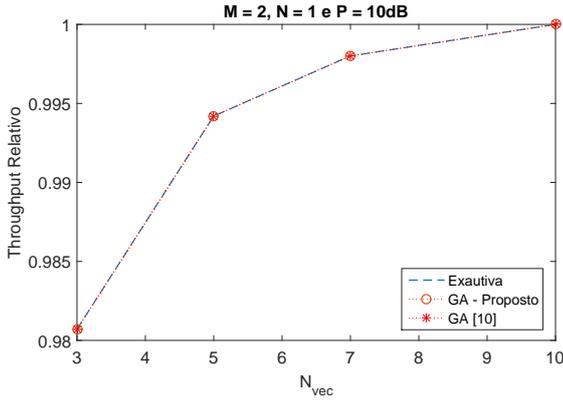
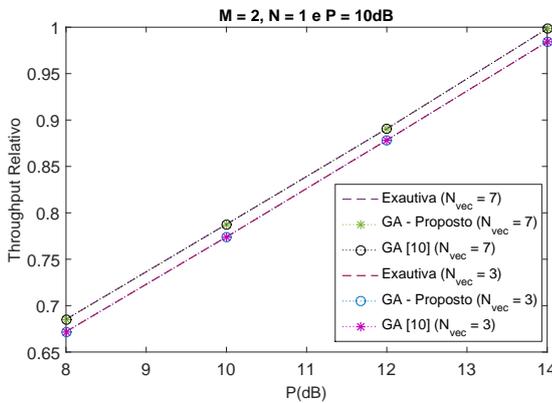


Fig. 3. Variação de N_{vec} para $\alpha = 0$, $M = 2$ e $P = 10dB$.

Além disso, Fig. 4 e Fig. 5 apresentam o *Throughput* Relativo *versus* N_{vec} e o *Throughput* Relativo *versus* P , respectivamente. Através destas figuras é possível observar que ambos os GAs obtiveram os mesmos valores que a busca exaustiva, pois nestas análises foi considerado apenas $M = 2$ antenas transmissoras na BS. Além disso, verificamos que aumentando N_{vec} ou P obtém-se um aumento no *throughput*. Isto pode ser verificado a partir de (4), pois aumentando P aumenta-se a SNR e conseqüentemente R aumenta.

Para todos os resultados descritos anteriormente consideramos um número pequeno de antenas transmissoras na BS, tais análises foram realizadas com o objetivo de validar o GA proposto. Como podemos notar o objetivo foi alcançado pois, para valores pequenos de M ambos os GAs alcançam o valor ótimo encontrado com a busca exaustiva. Porém, quando aumentamos significativamente o número de antenas transmissoras na BS não é possível fazer uso da técnica de busca exaustiva, pois a mesma exigiria um tempo de


 Fig. 4. *Throughput Relativo versus N_{vec} , para $M = 2$ e $P = 10dB$.*

 Fig. 5. *Throughput Relativo versus P , para $M = 2$ e $P = 10dB$.*

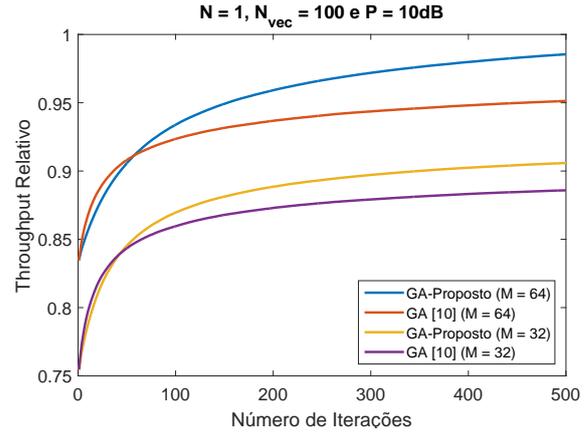
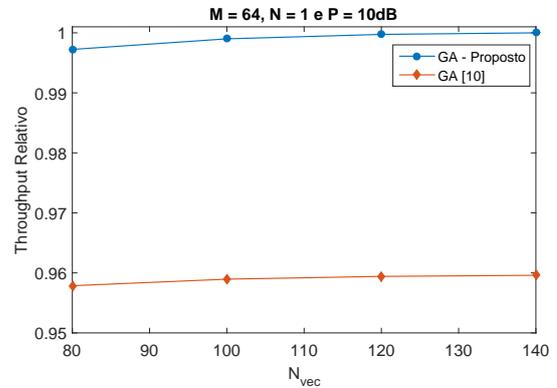
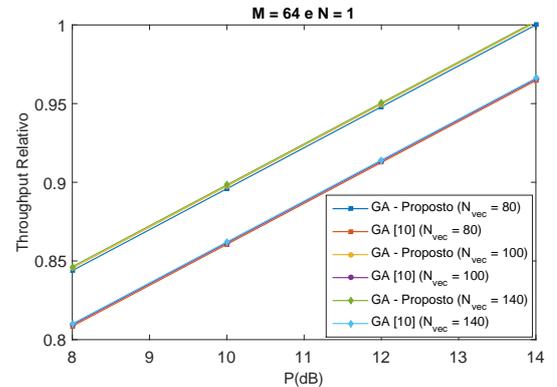
simulação impraticável. Devido a isso, foram feitas novas análises considerando $M = 32$ ou 64 antenas na BS e $N_{vec} = 80, 100, 120, 140$, apenas para os GAs apresentados nas análises anteriores.

A Fig. 6 mostra o throughput relativo para $M = 32$ e $M = 64$, quando $N_{vec} = 100$ e $P = 10dB$. Através desta figura verificamos a superioridade do GA proposto quando comparado aos resultados obtidos pelo GA de [10]. Além disso podemos confirmar que quando aumentamos M essa superioridade aumenta, evidenciando que o GA de [10] não possui a mesma capacidade de exploração do espaço de busca que o GA proposto, ou seja, quanto maior o espaço de busca pior será o desempenho do GA-Artigo.

As Figuras 7 e 8 apresentam o efeito da variação do tamanho do *codebook* N_{vec} e da potência de transmissão, respectivamente. A partir dos resultados obtidos constatamos que a partir de $N_{vec} \simeq 120$ não há uma variação significativa do *throughput*. Além disso, notamos que aumentando a potência há um aumento significativo no *throughput* obtido, isto pode ser explicado a partir de (4), pois é possível verificar que aumentando a potência aumenta-se também a SNR e consequentemente há um aumento em R .

B. Resultados Obtidos Considerando $\alpha = 0.001$:

Os resultados expostos anteriormente não consideram o custo de execução de cada iteração do algoritmo. Ou seja,


 Fig. 6. *Variação de M ($M = 32$ e 64) para $\alpha = 0$, $N_{vec} = 100$ e $P = 10dB$.*

 Fig. 7. *Throughput Relativo versus N_{vec} , para $M = 32$ e $P = 10dB$.*

 Fig. 8. *Throughput Relativo versus P , para $M = 64$ e $P = 10dB$.*

quanto maior o número de iterações, melhor o desempenho do sistema. Porém, isto não é válido na prática, devido ao atraso significativo no processo de IA. Assim, foram realizadas simulações considerando $\alpha = 0.001$ para $N_{it} = 10^3$, e notamos que o desempenho do GA cai com o aumento do número de iterações, como esperado. Porém também verificou-se que são necessárias poucas iterações para obter um valor (sub)ótimo, o que mostra que o GA proposto pode ser utilizado em aplicações práticas com um atraso de execução consideravelmente baixo.

Além disso, novamente o GA proposto apresentou um desempenho superior ao apresentado pelo método proposto em [10]. As Figuras 9-11 mostram os resultados obtidos, das quais se nota que ambos os GAs atingiram, novamente, o valor ótimo encontrado através da busca exaustiva com M pequeno.

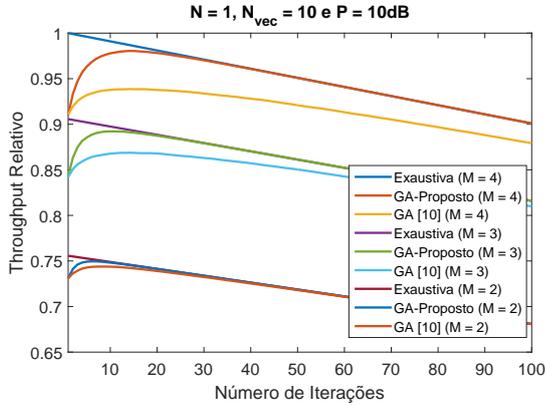


Fig. 9. Variação de M para $\alpha = 0.001$, $N_{vec} = 10$ e $P = 10dB$.

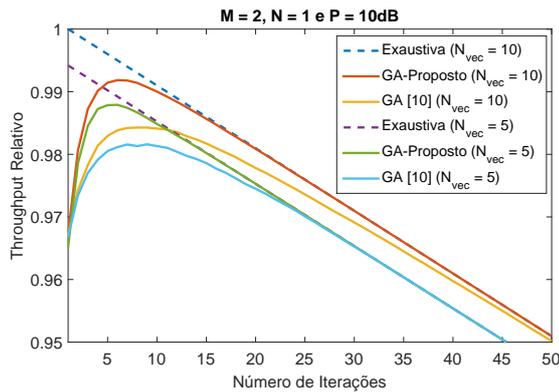


Fig. 10. Variação de N_{vec} para $\alpha = 0.001$, $M = 2$ e $P = 10dB$.

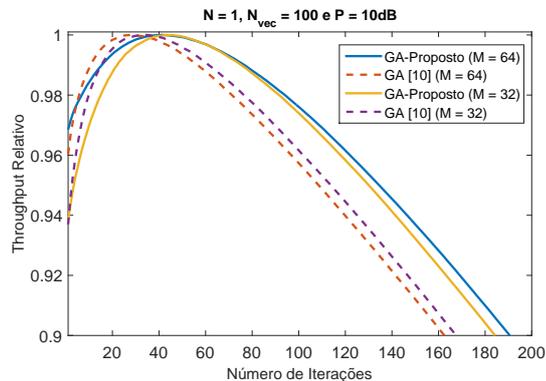


Fig. 11. Variação de M ($M = 32$ e 64) para $\alpha = 0.001$, $N_{vec} = 100$ e $P = 10dB$.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre o *beamforming* de IA, considerando cenários com e sem restrições de atraso. Em

ambos os casos foi avaliado o *throughput* relativo do sistema. Através dos resultados obtidos foi possível verificar que o GA proposto apresenta um desempenho superior ao do método apresentado em [10] e também obteve valores extremamente próximos aos obtidos com Busca Exaustiva, para os casos em que a busca exaustiva poderia ser utilizada. Além disso, o algoritmo proposto pode ser aplicado a diferentes modelos de canais, métricas de desempenho e esquemas de *beamforming*. Tal fato mostra que o algoritmo proposto pode ser utilizado na prática. Como trabalhos futuros, seria interessante realizar uma comparação entre diferentes técnicas de acesso inicial ampliando o nosso cenário, considerando *beamforming* na estação base e no usuário. Além disso, um estudo mais detalhado em projetos de *codebook* seria de extremo interesse para determinar o tamanho e configuração do *codebook* ótimo a ser utilizado. Ademais pode-se citar como trabalhos futuros a aplicação de Algoritmos Genéticos sobre o *beamforming* de IA considerando arquiteturas de *beamformig* digitais e híbridas.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Yong e C. Chong, "An Overview of Multigigabit Wireless through Millimeter Wave Technology: Potentials and Technical Challenge," EURASIP J. Wireless Commun. and Networking, vol. 2007, no. 1, pp. 1-10, Junho 2006.
- [2] Z. Pi e F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Junho 2011.
- [3] S. Sun, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, S. Nie e T. S. Rappaport, "Millimeter wave multi-beam antenna combining for 5G cellular link improvement in New York City," 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, NSW, 2014, pp. 5468-5473.
- [4] C. Jeong, J. Park e H. Yu, "Random access in millimeter-wave beamforming cellular networks: issues and approaches," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 180-185, Janeiro 2015.
- [5] M. R. Akdeniz et al., "Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1164-1179, Junho 2014.
- [6] T. Bai e R. W. Heath, "Coverage and Rate Analysis for Millimeter-Wave Cellular Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 2, pp. 1100-1114, Fevereiro 2015.
- [7] M. Giordani, M. Mezzavilla, C. N. Barati, S. Rangan and M. Zorzi, "Comparative analysis of initial access techniques in 5G mmWave cellular networks", proc. Annual Conf. Info. Science and Systems (CISS), NJ, USA, Mar. 2016.
- [8] M. Giordani, M. Mezzavilla e M. Zorzi, "Initial Access in 5G mmWave Cellular Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 11, pp. 40-47, Novembro 2016.
- [9] J. Kim e S. N. Hong, "Dynamic two-stage beam training for energy-efficient millimeter-wave 5G cellular systems", Telecommunication Systems, vol. 59, no. 1, pp 111-122, Maio 2015.
- [10] H. Guo, B. Makki e T. Svensson, "A genetic algorithm-based beamforming approach for delay-constrained networks," 2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), Paris, 2017, pp. 1-7.
- [11] J. M. Johnson e Y. Rahmat-Sami, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics." IEEE Antennas and Propagation Magazine, Ago. 2005.
- [12] K. K. Suman, P. Ashwin, A. V. Miranda, V. S. Gangwar e R. K. Gangwar, "An optimization technique utilizing genetic algorithm for the synthesis of large thinned planar antenna array with low peak side lobe level," 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), Dhanbad, 2018, pp. 1-2.
- [13] Lei Wan, Xiaofeng Zhong, Youxi Zheng e Shunliang Mei, "Adaptive codebook for limited feedback MIMO system," 2009 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, Cairo, 2009, pp. 1-5.
- [14] R. Linden, "Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional", Brasport, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] D. R. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley Longman Inc., New York, 1989.