

# Análise de Desempenho Assintótica das Técnicas EGC e SC com Múltiplos Ramos sob Desvanecimento Generalizado

Francisco Raimundo Albuquerque Parente, Flavio du Pin Calmon  
e José Cândido Silveira Santos Filho

**Resumo**— Em sistemas de comunicação sem fio, a análise de desempenho de técnicas de diversidade se baseia comumente em métricas essenciais como taxa de erro de símbolo e probabilidade de interrupção. Sob canais generalizados de desvanecimento, essas métricas possuem formulação analítica exata bastante complicada, senão inviável, o que tem motivado a busca por soluções aproximadas mais simples. Neste trabalho, é proposta uma análise de desempenho assintótica de duas técnicas de combinação com múltiplos ramos sob desvanecimento generalizado, a saber, combinação por ganho igual e combinação por seleção. Expressões assintóticas em forma fechada são obtidas, fornecendo-se um entendimento claro acerca do desempenho do sistema em termos de parâmetros físicos para o regime de alta relação sinal-ruído. A análise é ilustrada com resultados numéricos representativos e uma discussão intuitiva, revelando-se como cada parâmetro do desvanecimento impacta as duas técnicas de combinação analisadas.

**Palavras-Chave**— Análise de desempenho assintótica, canais de desvanecimento, combinação por ganho igual, combinação por seleção.

**Abstract**— In wireless communications systems, the performance analysis of diversity techniques is commonly based on essential metrics such as symbol-error rate and outage probability. Under generalized fading channels, these metrics have an exact analytical formulation that is quite complicated, if not unfeasible, which has motivated the search for simpler approximate solutions. In this work, it is proposed an asymptotic performance analysis of two multibranch combining techniques subject to generalized fading, namely, equal-gain combining and selection combining. Asymptotic closed-form expressions are obtained, providing a clear understanding of the system performance in terms of physical parameters for the high signal-to-noise ratio regime. The analysis is illustrated with representative numerical results and an insightful discussion, revealing how each fading parameter impacts the two combining techniques under study.

**Keywords**— Asymptotic performance analysis, equal-gain combining, fading channels, selection combining.

## I. INTRODUÇÃO

O canal de comunicação sem fio entre transmissor e receptor pode distorcer drasticamente o sinal propagado. Ao

longo do percurso, fenômenos como reflexão, difração e espalhamento acontecem a todo momento, causando em última instância alterações aleatórias de amplitude e fase no sinal recebido, um efeito conhecido como desvanecimento [1]. A fim de mitigar o impacto do desvanecimento e de seus efeitos nocivos sobre o desempenho dos sistemas, técnicas de diversidade como combinação por ganho igual (do inglês, *equal-gain combining* – EGC), combinação por seleção (do inglês, *selection combining* – SC) e combinação por razão máxima (do inglês, *maximal-ratio combining* – MRC) têm sido empregadas amplamente em diversos contextos, como em sistemas de quinta geração (5G) e suas tecnologias [2]–[4]. Ao combinar múltiplas réplicas de sinal recebidas, essas técnicas são capazes de oferecer na saída do receptor um sinal resultante de melhor qualidade, melhorando assim o desempenho do sistema e a qualidade de serviço [5].

Em contrapartida, a análise de desempenho exata de técnicas de diversidade em termos de métricas importantes como probabilidade de erro de símbolo (do inglês, *symbol-error probability* – SEP) e taxa de interrupção (do inglês, *outage probability* – OP) é em geral complicada [6]. Esse empecilho se torna ainda mais evidente quando se consideram canais de desvanecimento generalizados, em que métricas como a SEP e a OP podem não possuir solução em forma fechada. Em casos assim, a formulação exata é expressa em termos de integrais multidimensionais, cuja implementação via rotinas numéricas se mostra por vezes inviável devido ao custo computacional envolvido [7]. Inerente à análise exata, esse problema pode ser contornado empregando-se uma abordagem assintótica em regime de alta relação sinal-ruído (do inglês, *signal-to-noise ratio* – SNR), uma região de grande interesse prático para diversas aplicações, como em sistemas de radiofrequência [6] e em comunicações ópticas sem fio [8]. Alguns trabalhos têm explorado essa abordagem, mas apenas caso a caso [7], [9], [10]. Nesse contexto, foi proposta em [11] uma análise assintótica baseada em um modelo generalizado de canal, capaz de incluir — como casos particulares — uma ampla gama de distribuições existentes. Essa análise considerou, entretanto, um único enlace entre fonte e destino, sendo oportuna sua extensão para cenários de enlaces múltiplos, como é o caso de técnicas de diversidade. Em particular, o trabalho em [12] aplica os resultados de [11] para o esquema MRC, cuja SNR resultante na saída é a soma das SNR's por ramo. Embora seja o esquema linear ótimo de combinação, o MRC apresenta uma complexidade maior de

F. R. A. Parente e J. C. S. Santos Filho, Departamento de Comunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP 13083-852, Brasil (e-mails: {parente, candido}@decom.fee.unicamp.br); F. P. Calmon, School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA 02138, Estados Unidos (e-mail: fcalmon@g.harvard.edu). Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) com Processo 2018/25009-4.

implementação do que esquemas como o EGC e o SC, que são mais simples na prática [1], [5]. Ainda assim, não se conhece na literatura uma análise assintótica de desempenho para o EGC e o SC com múltiplos ramos que contemple canais de desvanecimento generalizados de forma unificada.

Com o intuito de preencher essa lacuna, obtém-se neste trabalho uma caracterização assintótica geral de desempenho das técnicas EGC e SC com múltiplos ramos. Para isso, a análise de enlace único proposta em [11] é estendida, derivando-se novas expressões em forma fechada para os ganhos de diversidade e de codificação, os quais determinam a SEP e a OP em regime de alta SNR [6]. As expressões são obtidas em termos do número de ramos do combinador e dos vários parâmetros físicos que caracterizam o fenômeno de desvanecimento, como clusterização, presença ou ausência de linha de visada, potência das ondas espalhadas e não linearidades do meio de propagação. Além disso, a análise considera o modelo de desvanecimento generalizado proposto em [11], capaz de abranger desde modelos mais simples, como o Rayleigh, até mais sofisticados, como o  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  [13]. Conforme será demonstrado, os ganhos de diversidade resultantes na saída do EGC e do SC dependem apenas do número de ramos de entrada, da clusterização e da não linearidade do meio, enquanto os ganhos de codificação correspondentes dependem de todos os parâmetros considerados. Esses resultados permitem uma análise detalhada e intuitiva sobre como o número de ramos e cada aspecto do desvanecimento afetam a SEP e a OP das técnicas em estudo, uma análise importante para caracterizar e otimizar o desempenho de sistemas emergentes de comunicação.

No texto a seguir,  $f_{(\cdot)}(\cdot)$  representa função densidade de probabilidade (do inglês, *probability density function* – PDF);  $\mathbb{E}[\cdot]$ , valor esperado;  $\mathbb{V}[\cdot]$ , variância;  $\Gamma(\cdot)$ , a função gama;  $Q(x) \triangleq \int_x^\infty (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-t^2/2) dt$ , a função  $Q$ ; “ $\sim$ ”, assintoticamente igual a (em torno de zero), ou seja,  $f(x) \sim g(x) \iff \lim_{x \rightarrow 0} f(x)/g(x) = 1$ .

## II. ANÁLISE PARA ENLACE ÚNICO REVISITADA

O desempenho de sistemas de comunicação sujeitos a desvanecimento de multipercurso é afetado por fatores como clusterização, espalhamento de ondas, linha de visada e não linearidades do meio de propagação. Para analisar o impacto desses fatores sobre a SEP e a OP do sistema, foi proposta em [11] uma análise assintótica considerando-se um único enlace entre fonte e destino. Como essa análise será estendida para o caso de receptores EGC e SC, é oportuno inicialmente revisar os principais resultados já obtidos.

Seguindo-se uma prática comum adotada na literatura para a classe de canais de desvanecimento gaussianos [13], seja  $B$  a potência de canal expressa por

$$B^{\frac{\alpha}{2}} = \sum_{i=1}^M X_i^2, \quad (1)$$

em que  $\alpha > 0$  denota a não linearidade do meio [13],  $M$  é o número de variáveis aleatórias (VAs) representando *clusters* de multipercurso, e  $\{X_i\}_{i=1}^M$  é um conjunto de VAs gaussianas independentes de média  $\mathbb{E}[X_i] = m_i$  e variância  $\mathbb{V}[X_i] = \sigma_i^2$ ,

$\forall i \in \{1, \dots, M\}$ . Em particular,  $m_i^2$  e  $\sigma_i^2$  denotam a potência das ondas dominantes e a potência das ondas espalhadas, respectivamente, no  $i$ -ésimo *cluster*. Assim, a PDF assintótica de  $B$  pode ser expressa como [6]

$$f_B(\beta) \sim a_{B,0} \beta^{b_{B,0}}, \quad (2)$$

em que  $a_{B,0}$  e  $b_{B,0}$  são constantes obtidas a partir da expansão em série de Maclaurin de  $f_B(\cdot)$  e expressas em termos dos vários parâmetros de desvanecimento (veja [11, eq. (18)]). A SNR instantânea no receptor pode ser dada por  $\gamma = B\bar{\gamma}$ , em que  $\bar{\gamma}$  é a SNR média quando  $\mathbb{E}[B] = 1$ . Considera-se que a comunicação ocorre sob ruído gaussiano branco aditivo, com uma SEP instantânea na forma de  $Q(\sqrt{\nu B \bar{\gamma}})$ , em que  $\nu > 0$  é uma constante que depende da modulação utilizada. Assim, a SEP média ( $P_E$ ) pode ser expressa assintoticamente em termos dos ganhos de diversidade  $G_d$  e de codificação  $G_c$  como [6]

$$P_E \sim (G_c \bar{\gamma})^{-G_d}. \quad (3)$$

De forma análoga, a OP ( $P_{\text{out}}$ ) pode ser expressa assintoticamente em termos dos ganhos de diversidade  $O_d$  e de codificação  $O_c$  como [6]

$$P_{\text{out}} \sim (O_c \bar{\gamma})^{-O_d}. \quad (4)$$

Com o intuito de revelar o impacto de cada parâmetro do desvanecimento na SEP e na OP em regime de alta SNR, foi mostrado que os ganhos de diversidade e de codificação acima são dados por [11]

$$G_d = O_d = \frac{\alpha M}{4} \quad (5a)$$

$$G_c = \nu \left\{ M \pi^{\frac{1}{2}} 2^{\frac{M}{2}(1-\frac{\alpha}{2})} \Gamma\left(\frac{M}{2}\right) \left[ \Gamma\left(\frac{\alpha M}{4} + \frac{1}{2}\right) \right]^{-1} \right. \\ \left. \times \exp\left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M k_i \right] \prod_{i=1}^M \sigma_i \right\}^{\frac{4}{\alpha M}} \quad (5b)$$

$$O_c = \frac{1}{\gamma_{\text{th}}} \left\{ M 2^{\frac{M}{2}-1} \Gamma\left(\frac{M}{2}\right) \exp\left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M k_i \right] \prod_{i=1}^M \sigma_i \right\}^{\frac{4}{\alpha M}}, \quad (5c)$$

em que  $k_i \triangleq m_i^2/\sigma_i^2$ , e  $\gamma_{\text{th}}$  é um limiar de SNR especificado.

Note que (5) descreve o comportamento assintótico do canal em termos dos vários parâmetros do modelo de enlace único definido em (1). Conforme detalhado em [11], esse modelo abrange desde distribuições simples, como Rayleigh, a distribuições mais sofisticadas, como  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$ . A seguir, o resultado em (5) é expandido para o EGC e o SC com múltiplos enlaces a fim de analisar o impacto assintótico dos vários aspectos do desvanecimento sobre ambos os combinadores.

## III. COMBINAÇÃO POR GANHO IGUAL

A primeira técnica analisada é a EGC, que consiste em combinar com um ganho comum as múltiplas réplicas recebidas do sinal transmitido. Nesse caso, considerando-se um receptor com  $L$  ramos de entrada mutuamente independentes,

a envoltória do sinal resultante na saída do combinador  $R_{\Sigma}^{(\text{EGC})}$  pode ser expressa por [1]

$$R_{\Sigma}^{(\text{EGC})} = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L R_l, \quad (6)$$

em que  $R_l$  é a envoltória no  $l$ -ésimo ramo. A partir de (6), obtemos a SNR de saída correspondente como [1]

$$\gamma_{\Sigma}^{(\text{EGC})} = \frac{1}{L} \left( \sum_{l=1}^L \sqrt{\gamma_l} \right)^2, \quad (7)$$

em que  $\gamma_l$  é a SNR no  $l$ -ésimo ramo. Uma vez caracterizada a SNR de saída do EGC, determinam-se agora os ganhos de diversidade e de codificação correspondentes para a SEP e a OP.

A partir do resultado em (7), é possível mostrar que o ganho de diversidade resultante na SEP,  $G_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$ , e o ganho de diversidade resultante na OP,  $O_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$ , são expressos por [6]

$$G_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \sum_{l=1}^L G_{d_l} \quad (8)$$

$$O_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \sum_{l=1}^L O_{d_l}, \quad (9)$$

em que  $G_{d_l}$  e  $O_{d_l}$  denotam os ganhos de diversidade na SEP e na OP para o  $l$ -ésimo ramo de entrada do combinador, respectivamente. Em particular, note a partir de (5a) que  $G_{d_l}$  e  $O_{d_l}$  são idênticos, dados por  $G_{d_l} = O_{d_l} = \frac{\alpha_l M_l}{4}$ , em que  $\alpha_l$  e  $M_l$  denotam a não linearidade e o número de *clusters* de multipercurso no  $l$ -ésimo ramo, respectivamente. Portanto, substituindo-se (5a) em (8) e (9), os ganhos na saída do EGC são obtidos como

$$G_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = O_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l. \quad (10)$$

De maneira similar, sejam  $G_{c_l}$  e  $O_{c_l}$  os ganhos de codificação na SEP e na OP para o  $l$ -ésimo ramo de entrada do combinador, respectivamente. Usando mais uma vez o resultado em (7), o ganho de codificação resultante na SEP,  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$ , e o ganho de codificação resultante na OP,  $O_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$ , são obtidos como [6]

$$G_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \left\{ \frac{2^{2L-2} \pi^{\frac{L-1}{2}} L \left( \sum_{l=1}^L G_{d_l} \right) \Gamma \left( \frac{1}{2} + \sum_{l=1}^L G_{d_l} \right)}{\left( \sum_{l=1}^L G_{d_l} \right) \Gamma \left( 2 \sum_{l=1}^L G_{d_l} \right)} \times \left[ \prod_{l=1}^L \frac{G_{d_l} \Gamma(2G_{d_l})}{G_{c_l}^{G_{d_l}} \Gamma(G_{d_l} + \frac{1}{2})} \right] \right\}^{-\frac{1}{\sum_{l=1}^L G_{d_l}}} \quad (11)$$

$$O_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \left\{ \frac{2^{L-1} L \left( \sum_{l=1}^L O_{d_l} \right) \prod_{l=1}^L O_{d_l} \Gamma(2O_{d_l})}{\left( \sum_{l=1}^L O_{d_l} \right) \Gamma \left( 2 \sum_{l=1}^L O_{d_l} \right) \prod_{l=1}^L O_{c_l}^{O_{d_l}}} \right\}^{-\frac{1}{\sum_{l=1}^L O_{d_l}}}. \quad (12)$$

Logo, considerando-se que  $\sigma_{l,i}$  e  $k_{l,i}$  denotam o desvio padrão e a razão de potências, respectivamente, para o  $i$ -ésimo *cluster* do  $l$ -ésimo ramo, pode-se reescrever (5b) e (5c) da seguinte forma:

$$G_{c_l} = \nu \left\{ M_l \pi^{\frac{1}{2}} 2^{\frac{M_l}{2} (1 - \frac{\alpha}{2})} \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) \left[ \Gamma \left( \frac{\alpha_l M_l}{4} + \frac{1}{2} \right) \right]^{-1} \times \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i} \right\}^{\frac{4}{\alpha_l M_l}} \quad (13)$$

$$O_{c_l} = \frac{1}{\gamma_{\text{th}}} \left\{ \frac{M_l}{2^{1 - \frac{M_l}{2}}} \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i} \right\}^{\frac{4}{\alpha_l M_l}}. \quad (14)$$

Assim, substituindo-se (13) e (14) em (11) e (12), respectivamente, e sabendo-se que  $G_{d_l} = O_{d_l} = \frac{\alpha_l M_l}{4}$ , obtêm-se finalmente os ganhos de codificação em (15) e (16) para a saída do EGC, mostrados na parte superior da próxima página. Essas expressões em forma fechada são originais e descrevem os ganhos de codificação do combinador em termos do número de ramos ( $L$ ) e dos vários parâmetros físicos de desvanecimento ora considerados, a saber, número de *clusters* de multipercurso ( $M$ ), não linearidade ( $\alpha$ ), potência de ondas espalhadas ( $\sigma^2$ ) e potência de ondas dominantes ( $m^2$ ).<sup>1</sup>

A partir desses resultados, é possível caracterizar o desempenho assintótico do EGC em termos dos parâmetros e compará-lo com outros combinadores de diversidade, como o SC, por exemplo, cuja análise é realizada a seguir.

#### IV. COMBINAÇÃO POR SELEÇÃO

A segunda técnica abordada é a SC, que consiste em selecionar o ramo de entrada do combinador que oferece a maior SNR instantânea. Assim, para um receptor com  $L$  ramos de entrada mutuamente independentes, a SNR de saída do combinador pode ser expressa como [1]

$$\gamma_{\Sigma}^{(\text{SC})} = \max_{1 \leq l \leq L} \gamma_l. \quad (17)$$

Conforme mostrado por Wang e Giannakis [6], a técnica SC atinge o mesmo ganho de diversidade da técnica EGC. Portanto, usando o resultado obtido em (10), obtêm-se

$$G_{d_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = O_{d_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l. \quad (18)$$

Por outro lado, o ganho de codificação resultante na SEP,  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$ , e o ganho de codificação resultante na OP,  $O_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$ , são diferentes dos ganhos correspondentes na saída do EGC. De fato, têm-se [6]

$$G_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = \left\{ \frac{2^{L-1} \pi^{\frac{L-1}{2}} \Gamma \left( \frac{1}{2} + \sum_{l=1}^L G_{d_l} \right)}{\prod_{l=1}^L G_{c_l}^{G_{d_l}} \Gamma(G_{d_l} + \frac{1}{2})} \right\}^{-\frac{1}{\sum_{l=1}^L G_{d_l}}} \quad (19)$$

$$O_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = \left( \prod_{l=1}^L O_{c_l}^{O_{d_l}} \right)^{\frac{1}{\sum_{l=1}^L O_{d_l}}}. \quad (20)$$

<sup>1</sup>Note que  $\nu$  e  $\gamma_{\text{th}}$  são parâmetros de sistema.

$$G_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \frac{\nu}{L} \left\{ \frac{2\pi^{\frac{1}{2}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l \right) \prod_{l=1}^L 2^{\frac{M_l}{2} (1 - \frac{\alpha_l}{2})} \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) [\alpha_l \Gamma \left( \frac{\alpha_l M_l}{2} \right)]^{-1} \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i}}{\Gamma \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l \right)} \right\}^{\frac{4}{\sum_{l=1}^L \alpha_l M_l}} \quad (15)$$

$$O_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = \frac{1}{\gamma_{\text{th}} L} \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l \right) \prod_{l=1}^L 2^{\frac{M_l}{2}} \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) [\alpha_l \Gamma \left( \frac{\alpha_l M_l}{2} \right)]^{-1} \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i} \right\}^{\frac{4}{\sum_{l=1}^L \alpha_l M_l}} \quad (16)$$

Perceba que os ganhos de diversidade e de codificação por ramo fornecidos em (13) e (14) são genéricos e podem, portanto, ser aplicados tanto para o EGC quanto para o SC. Assim, substituindo-se (13) e (14) em (19) e (20), respectivamente, e usando-se novamente  $G_{d_l} = O_{d_l} = \frac{\alpha_l M_l}{4}$ , obtêm-se os ganhos de codificação em (21) e (22) para a saída do SC, mostrados na parte inferior desta página. Essas expressões em forma fechada são novas na literatura, possibilitando-se caracterizar o desempenho assintótico do SC, conforme detalhado a seguir.

## V. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, investiga-se como os parâmetros de desvanecimento ( $M$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$  e  $k$ ) e o número de ramos ( $L$ ) alteram o desempenho do EGC e do SC em termos da SEP e da OP. Para fins de ilustração, considera-se o cenário em que os múltiplos *clusters* de multipercurso  $\{X_i\}_{i=1}^M$  são VAs intercambiáveis [14], outrora denominado cenário comutativo [11]. Nesse cenário, a PDF conjunta  $f_{X_1, \dots, X_M}(\cdot, \dots, \cdot)$  é uma função comutativa, assumindo a mesma forma funcional para as  $M!$  permutações de  $X_1, \dots, X_M$ . Por simplicidade, assume-se também que os ramos de entrada dos combinadores estão sujeitos a um mesmo tipo de desvanecimento. Essas considerações permitem eliminar os índices dos parâmetros de forma que  $M_l = M$ ,  $\sigma_{l,i} = \sigma$ ,  $k_{l,i} = k$  e  $\alpha_l = \alpha, \forall i \in \{1, \dots, M\}$  e  $\forall l \in \{1, \dots, L\}$ , em que faz-se  $\gamma_{\text{th}} = \nu = 1$  por conveniência. Vale salientar que, nas figuras,  $M = 2$  denota modelos de desvanecimento bem conhecidos, como Rayleigh, Rice, Weibull e Hoyt;  $\alpha = 2$  e  $\alpha \neq 2$ , meios de propagação linear e não linear, respectivamente;  $\sigma = 1$ , ondas espalhadas de potência unitária; e  $k = 0$ , ausência de componentes dominantes. Como as expressões obtidas para os ganhos de diversidade são simples, são apresentadas apenas curvas dos ganhos de codificação, evitando-se sobrecarregar demasiadamente as figuras. A análise assintótica proposta foi validada extensivamente comparando-a com a solução exata correspondente, obtida via integração numérica usando-se o *software Mathematica*.

A partir dos resultados obtidos em (10) e (18), note que os ganhos de diversidade para a saída do EGC e do SC em termos da SEP e da OP são idênticos, se reduzindo a  $\frac{\alpha M L}{4}$  no cenário comutativo. Assim, esses ganhos são funções monotonicamente crescentes do número de *clusters* de multipercurso ( $M$ ), da não linearidade do meio de propagação ( $\alpha$ ) e do número de ramos de entrada no combinador ( $L$ ), os quais aumentam a inclinação das curvas de SEP e OP. Logo, essas métricas diminuem à medida que  $M$ ,  $\alpha$  ou  $L$  crescem, conforme pode ser observado a partir de (3) e (4), melhorando portanto o desempenho do sistema em regime de alta SNR.

No caso dos ganhos de codificação para o EGC e o SC, a análise depende de todos os parâmetros considerados. As Figs. 1–4 mostram as variações em  $G_{c_{\Sigma}}$  e  $O_{c_{\Sigma}}$  em termos de  $M$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$  e  $k$ , respectivamente, para diferentes valores de  $L$ . Note a partir da Fig. 1 que valores crescentes de  $M$  implicam em aumento de  $O_{c_{\Sigma}}$  e em diminuição de  $G_{c_{\Sigma}}$  para ambas as técnicas, independentemente do número de ramos. Essa diminuição em  $G_{c_{\Sigma}}$ , porém, não implica necessariamente em uma perda de desempenho em última instância, pois  $G_{d_{\Sigma}}^{(\text{EGC})} = G_{d_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$  também é função de  $M$ , o qual domina a SEP em alta SNR, conforme já mencionado. Um comportamento similar ocorre na Fig. 2, em que  $G_{c_{\Sigma}}$  decresce de maneira ainda mais proeminente: note que os ganhos de diversidade também são função de  $\alpha$ , os quais têm impacto determinante sobre o desempenho da SEP e da OP. Em ambas as figuras, (i)  $O_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$  não apresenta melhora com relação ao receptor de ramo único, diferentemente de  $O_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$ , e (ii)  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$  diminui de forma mais acentuada do que  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$  para o mesmo número de ramos, um comportamento que se realça à medida que  $L$  cresce. Isso evidencia um desempenho superior do EGC com relação ao SC em regime de alta SNR. Essa vantagem do EGC também pode ser observada a partir das Figs. 3 e 4. Perceba que, apesar de  $O_{c_{\Sigma}}$  e  $G_{c_{\Sigma}}$  aumentarem para ambas as técnicas à medida que  $\sigma$  ou  $k$  aumenta, os ganhos no EGC se sobressaem com relação aos ganhos correspondentes do SC para uma mesma quantidade de ramos de entrada. Além disso, à medida que  $L$  cresce,  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{EGC})}$  e  $G_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})}$  diminuem, enquanto

$$G_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = \nu \left\{ \pi^{\frac{1}{2}} 2^{1-L} \left[ \Gamma \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \alpha_l M_l \right) \right]^{-1} \prod_{l=1}^L 2^{\frac{M_l}{2} (1 - \frac{\alpha_l}{2})} M_l \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i} \right\}^{\frac{4}{\sum_{l=1}^L \alpha_l M_l}} \quad (21)$$

$$O_{c_{\Sigma}}^{(\text{SC})} = \frac{1}{\gamma_{\text{th}}} \left\{ \prod_{l=1}^L 2^{\frac{M_l}{2} - 1} M_l \Gamma \left( \frac{M_l}{2} \right) \exp \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_l} k_{l,i} \right] \prod_{i=1}^{M_l} \sigma_{l,i} \right\}^{\frac{4}{\sum_{l=1}^L \alpha_l M_l}} \quad (22)$$

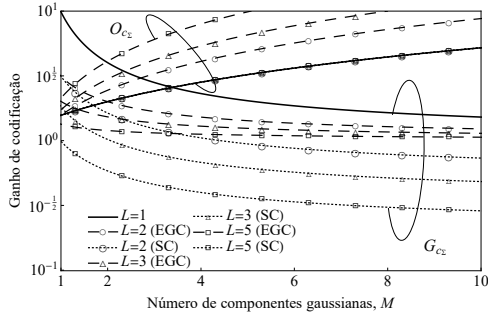


Fig. 1. Ganhos de codificação em termos do número de componentes gaussianas para  $\sigma = 1$ ,  $k = 0$  e  $\alpha = 2$ .

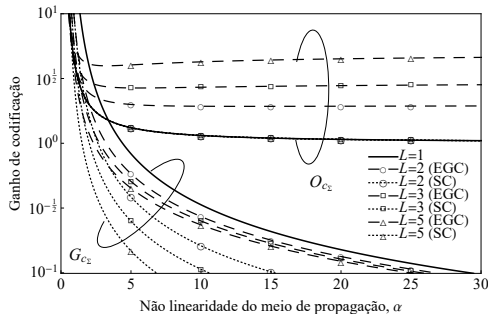


Fig. 2. Ganhos de codificação em termos da não linearidade do meio de propagação para  $M = 2$ ,  $\sigma = 1$  e  $k = 0$ .

$O_{CS}^{(EGC)}$  aumenta e  $O_{CS}^{(SC)}$  se mantém constante. De forma geral, a melhora de desempenho observada nas Figs. 3 e 4 são coerentes com o fato de que valores crescentes de  $\sigma^2$  e  $m^2$  (diretamente proporcional a  $k$ ) significam mais potência de sinal chegando ao receptor, diminuindo assim métricas como a SEP e a OP.

## VI. CONCLUSÕES

A análise assintótica de sistemas de comunicação em regime de alta SNR é capaz de oferecer um entendimento mais intuitivo acerca do impacto de cada aspecto do desvanecimento sobre métricas de desempenho. Neste trabalho, investigou-se como diferentes parâmetros físicos de modelos generalizados afetam os esquemas populares de combinação EGC e SC. Expressões novas em forma fechada foram obtidas para os ganhos de diversidade e de codificação na SEP e na OP, a partir dos quais foi possível comparar o desempenho dos esquemas analisados. Resultados numéricos representativos evidenciaram a vantagem do EGC sobre o SC em termos de diferentes aspectos físicos do canal. Em trabalhos futuros, almeja-se estender ainda mais a análise, avaliando-se como correlação intracanal, presente em alguns cenários de desvanecimento, pode impactar o desempenho das técnicas de diversidade.

## REFERÊNCIAS

[1] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.  
 [2] H. Hashemi, J. Haghghat, M. Eslami, and W. A. Hamouda, "Analysis of equal gain combining over fluctuating two-ray channels with applications to millimeter-wave communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1751–1765, Feb. 2020.

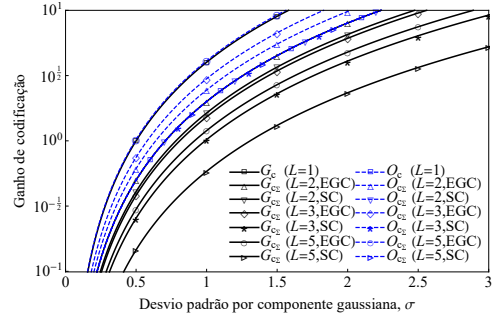


Fig. 3. Ganhos de codificação em termos do desvio padrão por componente gaussiana para  $M = 2$ ,  $k = 0$  e  $\alpha = 2$ .

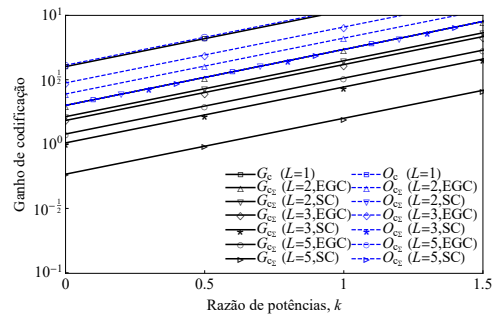


Fig. 4. Ganhos de codificação em termos da razão de potências entre componentes dominantes e componentes espalhadas para  $M = 2$ ,  $\sigma = 1$  e  $\alpha = 2$ .

[3] G. R. MacCartney and T. S. Rappaport, "Millimeter-wave base station diversity for 5G coordinated multipoint (CoMP) applications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 7, pp. 3395–3410, Jul. 2019.  
 [4] A. M. Shteiman, S. Galli, L. Mailänder, and X. F. Qi, "The effect of diversity combining on ISI in massive MIMO," in *2018 IEEE 88th Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Aug. 2018, pp. 1–6.  
 [5] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York: Cambridge University Press, 2005.  
 [6] Z. Wang and G. B. Giannakis, "A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1389–1398, Aug. 2003.  
 [7] X. Song, J. Cheng, and N. C. Beaulieu, "Asymptotic analysis of different multibranch diversity receivers with arbitrarily correlated Rician channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 10, pp. 5676–5689, Oct. 2014.  
 [8] A. Chaaban, Z. Rezk, and M. Alouini, "Capacity bounds and high-SNR capacity of MIMO intensity-modulation optical channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 3003–3017, May 2018.  
 [9] B. Zhu, J. Yan, Y. Wang, L. Wu, and J. Cheng, "Asymptotically tight performance bounds of diversity receptions over  $\alpha$ - $\mu$  fading channels with arbitrary correlation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 9, pp. 7619–7632, Sep. 2017.  
 [10] B. Zhu, F. Yang, J. Cheng, and L. Wu, "Performance bounds for diversity receptions over arbitrarily correlated Nakagami- $m$  fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 699–713, Jan. 2016.  
 [11] F. R. A. Parente, F. P. Calmon e J. C. S. Santos Filho, "Unified asymptotic performance of communication systems in fading channels," in *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT'19)*, Petrópolis, RJ, Brasil, Set./Out., 2019, doi: 10.14209/SBRT.2019.1570559219.  
 [12] F. R. A. Parente, F. P. Calmon, and J. C. S. Santos Filho, "Asymptotic system performance over generalized fading channels with application to maximal-ratio combining," *J. Commun. Inf. Systems*, vol. 35, no. 1, pp. 171–180, Jul. 2020.  
 [13] M. D. Yacoub, "The  $\alpha$ - $\eta$ - $\kappa$ - $\mu$  fading model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 8, pp. 3597–3610, Aug. 2016.  
 [14] R. K. Mallik, "On multivariate rayleigh and exponential distributions," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 6, pp. 1499–1515, Jun. 2003.