

Análise Estatística da Capacidade de Canais PLC Residenciais Cooperativos Baseada no Modelo *Single Relay Channel*

Mateus L. Filomeno¹, Victor Fernandes¹, Fabricio P. V. de Campos^{1,2}, e Moisés V. Ribeiro^{1,2}

Resumo— Este trabalho tem como principal objetivo analisar, estatisticamente, a capacidade de canais *Power Line Communication* residenciais operando com comunicação cooperativa. Os resultados obtidos comprovam a superioridade do protocolo *decode-and-forward* sobre o protocolo *amplify-and-forward* e a influência da posição do *relay* e da potência total de transmissão nos ganhos de cooperação. Além disso, baseando-se num conjunto significativo de dados de medição, a presente contribuição mostra que na grande maioria dos casos os ganhos da comunicação cooperativa aplicada a sistemas *Power Line Communication* não são significativos.

Palavras-Chave— *Power Line Communication*, Comunicação Cooperativa, Análise Estatística.

Abstract— The main objective of this work is to statistically analyze the channel capacity of cooperative in-home *Power Line Communication* channels. The attained results show the superiority of the *decode-and-forward* protocol over the *amplify-and-forward* protocol and the influence of the relay position and the total transmission power over the gains offered by cooperative protocols. Moreover, the attained results based on a large dataset show that in the majority of the cases the gains offered by protocols cooperative applied to *Power Line Communication* system may not be significant.

Keywords— *Power Line Communication*, Cooperative Communication, Statistical Analysis.

I. INTRODUÇÃO

As demandas da sociedade e das máquinas por conectividade e altas taxas de transmissão levou, nos últimos anos, ao desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação de dados e aprimoramento das já existentes (*internet, machine-to-machine, internet of things, smart grids, smart cities*, etc). Para atender essas demandas existem diversos tipos de tecnologias, dentre as quais destacam-se a comunicação sem fio, a comunicação por cabos telefônicos, a comunicação por fibra óptica e a comunicação via cabos de energia elétrica, mais conhecida como *Power Line Communication* (PLC).

Dentre as tecnologias de comunicação de dados citadas, a PLC se destaca por poder alcançar cerca de 98% da população mundial [1]. Esse e outros fatores incentivaram a realização de pesquisas que resultaram em consideráveis avanços na área de PLC. Dentre outras, se destacam o desenvolvimento de

técnicas de modulação multi-portadora, alocação de recursos, comunicação *multiple-input multiple-output* (MIMO) e comunicação cooperativa.

A comunicação cooperativa há algum tempo vem recebendo uma considerável atenção das pesquisas da área de comunicação sem fio, por conseguinte pesquisadores da área de PLC também enxergaram potencial na técnica de cooperação e seus primeiros resultados mostraram que ela pode ser bastante benéfica para sistemas PLC. Por exemplo, nos trabalhos [2] e [3] foi feita a comparação do desempenho de sistemas PLC com comunicação cooperativa ao de sistemas PLC sem cooperação e foi mostrado que o primeiro é superior para diferentes protocolos de cooperação. Em [4], foi analisado o desempenho de um sistema PLC baseado no esquema *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) com comunicação cooperativa e mostrado que o valor da capacidade fim-a-fim pode aumentar de forma significativa com a inclusão de *relays* (nós retransmissores) no sistema. Finalmente, baseando-se na mesma campanha de medição que este trabalho, [5] apresentou vários resultados analisando o desempenho da comunicação cooperativa em sistemas PLC residenciais quando o modelo *single relay channel* é adotado.

Os resultados apresentados em [5] são de grande valor para a área de PLC, entretanto analisar estatisticamente os ganhos obtidos com a cooperação permite oferecer mais subsídios para uma análise completa do potencial da cooperação para sistemas PLC residenciais.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é calcular a capacidade teórica de canais PLC residenciais cooperativos quando o modelo *single relay channel* é adotado e, através desses valores de capacidade, analisar estatisticamente os ganhos e/ou perdas da comunicação cooperativa quando os protocolos de cooperação são o *amplify-and-forward* (AF) e o *decode-and-forward* (DF), e a posição do *relay* e a potência total de transmissão variam. De acordo com os resultados numéricos obtidos com mais de 32000 estimativas de canais PLC baseados no modelo *single relay channel*, conclui-se que ganhos de capacidade menores que 5%, entre 5% e 10% e maiores que 10% dependem consideravelmente da posição do *relay*, da potência total de transmissão e do tipo de protocolo de cooperação.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O cenário de estudo deste trabalho é o modelo *single relay channel*, visto na Fig. 1. Nesta figura, $\{h_{SD}[n]\}_{n=0}^{L_{SD}-1}$,

¹Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brasil. ²Smarti9 Ltda., Juiz de Fora-MG. E-mails: mateus.lima@engenharia.ufjf.br, victor.fernandes@engenharia.ufjf.br, fabricio.campos@ufjf.edu.br, mribeiro@engenharia.ufjf.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES.

$\{h_{SR}[n]\}_{n=0}^{L_{SR}-1}$ e $\{h_{RD}[n]\}_{n=0}^{L_{RD}-1}$ são representações no tempo discreto da resposta ao impulso dos canais *source-destination* (*SD*), *source-relay* (*SR*) e *relay-destination* (*RD*), respectivamente. Além disso, L_{SD} , L_{SR} e L_{RD} são os respectivos comprimentos dos canais *SD*, *SR* e *RD*.

Para tal formulação considera-se que a comunicação de dados é feita em banda base e que a magnitude das respostas em frequência dos canais e as densidades espectrais de potência (*power spectral density* - PSD) dos ruídos são planas para cada um dos subcanais. Considera-se ainda que a resposta ao impulso dos canais é linear e invariante no tempo (LTI) e que $T_C \gg 2T_S$, em que T_C e T_S representam o tempo de coerência e o período de símbolo de um canal PLC linear, respectivamente.

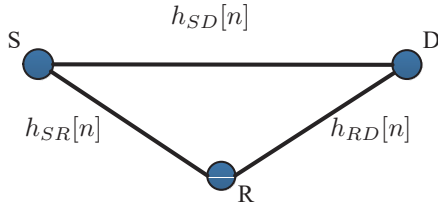


Fig. 1. Modelo *single relay channel*.

O vetor que representa a resposta ao impulso de um dos canais *SD*, *SR* e *RD* no domínio do tempo pode ser escrito da seguinte maneira: $\mathbf{h}_i = [h_i[0]h_i[1]\dots h_i[L_i - 1]]^T$, em que $i \in \{SD, SR, RD\}$. Logo, podemos definir também esse vetor no domínio da frequência: $\mathbf{H}_i = (1/\sqrt{N})\mathbf{W}[\mathbf{h}_i^T \mathbf{0}_{N-L_i}^T]^T$, em que a matriz \mathbf{W} representa a transformada de Fourier discreta (DFT) e tem dimensão $N \times N$. Definidos os vetores de representação dos canais no domínio da frequência, pode-se definir as matrizes diagonais: $\mathcal{H}_i = \text{diag}\{H_i[0]H_i[1]\dots H_i[N-1]\}$, em que $H_i[k]$ denota o k -ésimo coeficiente de \mathbf{H}_i , e $\Lambda_{|\mathcal{H}_i|^2} = \text{diag}\{|H_i[0]|^2|H_i[1]|^2\dots|H_i[N-1]|^2\}$.

O símbolo transmitido pelo nó *S* (*source*), no domínio da frequência, é $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, tal que $\mathbb{E}\{\mathbf{X}\} = 0$ e $\mathbb{E}\{\mathbf{X}\mathbf{X}^\dagger\} = \Lambda_{\sigma_{\mathbf{X}}^2} = \mathbf{I}_N$, no qual \mathbf{I}_N é a matriz identidade de dimensão N , $\mathbb{E}\{\cdot\}$ representa o operador esperança e \dagger representa o conjugado transposto (operador hermitiano). Assume-se que os vetores de ruído no domínio da frequência para os canais *SD*, *SR* e *RD* são \mathbf{V}_{SD} , \mathbf{V}_{SR} e \mathbf{V}_{RD} , respectivamente. Assume-se ainda que $\mathbb{E}\{\mathbf{V}_i \odot \mathbf{V}_j\} = \mathbb{E}\{\mathbf{V}_i\} \odot \mathbb{E}\{\mathbf{V}_j\}$, $\forall i \neq j$, no qual \odot denota o produto de Hadamard e $\mathbb{E}\{\mathbf{V}_i\} = 0$. Logo, $\mathbb{E}\{\mathbf{V}_i \mathbf{V}_i^\dagger\} = \Lambda_{\sigma_{\mathbf{V}_i}^2} = \text{diag}\{\sigma_{V_i}^2[0]\sigma_{V_i}^2[1]\dots\sigma_{V_i}^2[2N-1]\}$.

Ainda, a potência de transmissão total disponível é P . A parcela da potência disponível ao nó *S* denomina-se P_0 e a parcela da potência disponível ao nó *R* denomina-se P_1 , com isso, $P_0 + P_1 = P$. Além disso, cada uma das parcelas da potência de transmissão total é disponibilizada em um *time slot* diferente. No primeiro *time slot* o nó *S* realiza sua transmissão do sinal, enquanto no segundo o nó *R* realiza a sua, sendo que os dois *time slots* tem a mesma duração.

Mediante as definições e considerações feitas, tem-se como objetivo encontrar expressões para a capacidade teórica do modelo *single relay channel* que permitam avaliar, estatisti-

camente, os ganhos da comunicação cooperativa em relação a comunicação ponto-à-ponto.

III. CAPACIDADE TEÓRICA

Nesta seção são apresentadas as expressões para o cálculo da capacidade teórica de um canal PLC ponto-à-ponto e também do modelo *single relay channel*, mostrado na Fig. 1. Para o modelo *single relay channel* considera-se os protocolos AF e DF.

Para demonstrar tais expressões, assim como foi feito em [5], considera-se o número de subcanais $N \rightarrow \infty$. Desta forma, o *single relay channel* pode ser modelado como um *Linear Gaussian Relay Channel* (LGRC) [6].

A. Comunicação ponto-à-ponto

Primeiramente, seja \mathbf{X} e $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ os símbolos enviado e recebido pelos nós *S* e *D*, respectivamente, tal que

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= \mathcal{H}_{SD}\Lambda_{\sqrt{P_0}}\mathbf{X} + \mathbf{V}_{SD} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{V}_{SD} \end{aligned} \quad (1)$$

em que $\Lambda_{\sqrt{P_0}} = \text{diag}\{\sqrt{p_{0,0}}\sqrt{p_{0,1}}\dots\sqrt{p_{0,N-1}}\}$ e $p_{0,i} \geq 0$ para $i = 0, 1, \dots, N-1$, no qual $p_{0,i}$ representa a energia alocada ao subcanal de índice i no nó *S* e $\mathbf{A} = \mathcal{H}_{SD}\Lambda_{\sqrt{P_0}}$.

Sabe-se que a capacidade de um canal pode ser encontrada através do valor máximo da informação mútua entre o símbolo \mathbf{X} (enviado pelo nó *S*) e o símbolo \mathbf{Y} (recebido pelo nó *D*). Desta forma, a informação mútua entre \mathbf{X} e \mathbf{Y} é:

$$\begin{aligned} I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}) &= h(\mathbf{Y}) - h(\mathbf{Y}|\mathbf{X}) \\ &= h(\mathbf{Y}) - h(\mathbf{V}_{SD}) \end{aligned} \quad (2)$$

em que $h(\cdot)$ representa o operador entropia de uma variável aleatória. Agora, partindo do pressuposto que \mathbf{X} e \mathbf{V}_{SD} são vetores gaussianos complexos e independentes, [7] mostra que

$$h(\mathbf{Y}) = \log_2[(\pi e)^N \det(\mathbf{R}_{\mathbf{Y}\mathbf{Y}})],$$

no qual

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\mathbf{Y}\mathbf{Y}} &= \mathbb{E}\{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^\dagger\} \\ &= \mathbf{A}\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}\mathbf{A}^\dagger + \mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Como $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{I}_N$ e $\mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}} = \Lambda_{\sigma_{\mathbf{V}_{SD}}^2}$, então

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Y}\mathbf{Y}} = \Lambda_{|\mathcal{H}_{SD}|^2}\Lambda_{P_0} + \Lambda_{\sigma_{\mathbf{V}_{SD}}^2}. \quad (4)$$

Tem-se ainda que,

$$h(\mathbf{V}_{SD}) = \log_2[(\pi e)^N \det(\mathbf{R}_{\mathbf{V}\mathbf{V}})].$$

Logo, reescrevendo a Equação (2), obtém-se:

$$I(\mathbf{X}; \mathbf{Y}) = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\Lambda_{|\mathcal{H}_{SD}|^2}\Lambda_{P_0}}{\Lambda_{\sigma_{\mathbf{V}_{SD}}^2}} \right) \right]. \quad (5)$$

Desta forma, a equação para a capacidade teórica de um canal PLC linear e invariante no tempo (LTI) é dado por:

$$C_{SD} = \max_{\mathbf{\Lambda}_{P_0}} \frac{B_w}{N} \log_2[\det(\mathbf{I}_N + \mathbf{\Lambda}_{\gamma_{SD}})] \quad (6)$$

sujeito à $\text{Tr}(\mathbf{\Lambda}_{P_0}) \leq P_0$, em que $\text{Tr}(\cdot)$ representa o operador traço de uma matriz e $\mathbf{\Lambda}_{\gamma_{SD}} = \frac{\mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SD}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_0}}{\mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SD}}^2}}$ é a relação sinal-ruído do canal SD . B_w se refere a banda de frequência do sinal e N ao número de subcanais utilizados.

B. Comunicação Cooperativa - Protocolo AF

A expressão da capacidade teórica do modelo *single relay channel* com o protocolo AF no nó R aplicado a canais PLC é, de acordo com [5], expressa por:

$$C_{AF} = \max_{\mathbf{\Lambda}_P} \frac{B_w}{2N} \log_2[\det(\mathbf{I}_{2N} + \mathbf{C}\mathbf{D}^{-1})] \quad (7)$$

sujeito à $\text{Tr}(\mathbf{\Lambda}_P) \leq P$, em que $\mathbf{\Lambda}_P = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_{P_0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_{P_1} \end{bmatrix}$, $\text{Tr}(\mathbf{\Lambda}_{P_0}) = P_0$, $\text{Tr}(\mathbf{\Lambda}_{P_1}) = P_1$ e $P_0 + P_1 = P$. Em que os termos \mathbf{C} e \mathbf{D} são dados pelas Equações (8) e (9), respectivamente:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_{P_0} \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SD}|^2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_{P_0} \mathbf{\Lambda}_{P_1} \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SR}}^2}^{-1} \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SR}|^2} \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{RD}|^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

e

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SD}}^2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{RD}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_1} \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SR}}^2}^{-1} \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SR}}^2} + \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{RD}}^2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

O termo $\mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SR}}^2} = \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SR}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_0} \sigma_X^2 + \sigma_{v_{SR}}^2$ normaliza a energia do sinal recebido pelo nó R antes do processo de amplificação do sinal.

C. Comunicação Cooperativa - Protocolo DF

A expressão da capacidade teórica do modelo *single relay channel* com o protocolo DF no nó R aplicado a canais PLC é, de acordo com [5], expressa por:

$$C_{DF} = \max_{\mathbf{\Lambda}_P, \mathbf{\Lambda}_{\alpha}} \min\{C_{1,DF}, C_{2,DF}\}, \quad (10)$$

no qual

$$C_{1,DF} = \frac{B_w}{2N} \log_2[\det(\mathbf{I}_N + \mathbf{\Lambda}_{\alpha} \mathbf{\Lambda}_{P_0} \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SR}|^2} \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SR}}^2}^{-1})], \quad (11)$$

$$C_{2,DF} = \frac{B_w}{2N} \log_2[\det(\mathbf{I}_N + \mathbf{G})] \quad (12)$$

e

$$\mathbf{G} = \mathbf{\Lambda}_{\sigma_{v_{SD}}^2}^{-1} (\mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SD}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_0} + \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{RD}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_1} + 2\sqrt{\mathbf{\Lambda}_{\alpha} \mathbf{\Lambda}_{|\mathcal{H}_{SD}\mathcal{H}_{RD}|^2} \mathbf{\Lambda}_{P_0} \mathbf{\Lambda}_{P_1}}). \quad (13)$$

$\mathbf{\Lambda}_{\alpha}$ e $\mathbf{\Lambda}_{\bar{\alpha}} = \mathbf{I}_N - \mathbf{\Lambda}_{\alpha}$ são matrizes de correlação e correlação inversa entre os sinais enviados pelos nós S e R , respectivamente.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados os resultados computacionais relacionados às expressões apresentadas na seção III. E, para analisar a capacidade do modelo *single relay channel*, os dados utilizados são medidos, ou seja, foram coletados durante uma campanha de medição [8].

A. Coleta de Dados

Para obter os dados necessários aos cálculos das capacidades, foi realizada uma campanha de medição na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais. Através de dois computadores, placas de aquisição e geração de sinais e acopladores, foram coletadas amostras de canais e ruídos PLC em sete residências, em que os circuitos elétricos tinham uma distância média de 2 a 10 metros. Em seguida, a partir dessas amostras e do emprego do método de estimação proposto em [9], as resposta em frequência dos canais e as PSDs dos ruídos foram estimadas. A Tabela I mostra os principais parâmetros adotados no setup de medição e no método de estimação de canais [10].

TABELA I

Parâmetros do método de estimação.

DESCRIÇÃO	VALOR
Frequência de amostragem	$f_s = 200$ MHz
Comprimento dos canais	$L_i = 256$
Número de subcanais	$N = 2048$
Resolução em frequência	48.83 kHz
Período de símbolo	$T_S = 23.04$ μ s

Durante essa campanha foram feitas diversas medições, as quais podem ser organizadas em quatro casos diferentes de acordo com a localização do nó R , conforme ilustrado na Fig. 2 e discutido em [5]. Quando o nó R está no meio do caminho entre os nós S e D , classifica-se essa medição como pertencente ao Caso #1. Quando o nó R está próximo ao nó D classifica-se por Caso #2 e quando está próximo ao nó S classifica-se por Caso #3. E, quando o nó R está distante dos nós S e D , classifica-se por Caso #4.

A campanha de medição obteve mais de 36000 estimativas de canais e ruídos PLC, considerando os canais SD , SR e RD , porém, foi utilizado um número menor de amostras, pouco mais de 32000. Dessas amostras, 7380 (2460 por canal) são do caso #1, 9648 (3216 por canal) são do caso #2, 9648 (3216 por canal) são do caso #3 e 5586 (1862 por canal) são do caso #4.

B. Cálculo das CDFs

Como este trabalho trata de uma análise estatística da capacidade teórica, é coerente que os resultados sejam apresentados utilizando a função cumulativa de probabilidade (*Cumulative Distribution Function*, CDF). As potências totais de transmissão adotadas são 10 dBm, 20 dBm e 30 dBm e, a faixa de frequência adotada estende-se de 1,7 a 100 MHz.

Para gerar os resultados é considerada a perfeita sincronização e disponibilidade da *Channel State Information*

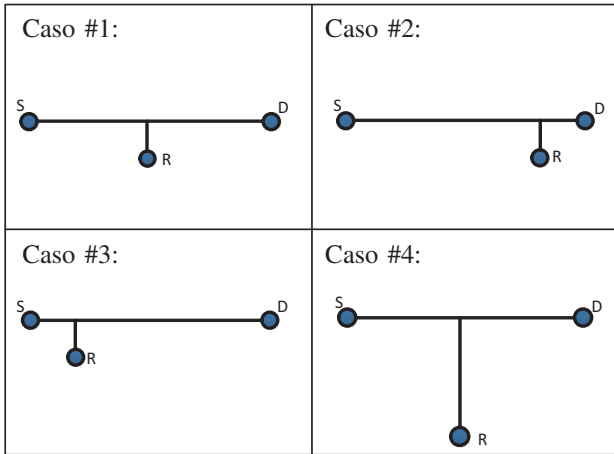


Fig. 2. Casos abordados.

(CSI) no transmissor (nós S e R). A partir do conhecimento da CSI por parte do transmissor utiliza-se a alocação ótima de potência, através da técnica *Water-filling* (WF) [7].

Os resultados são apresentados na forma normalizada, a partir do uso da expressão

$$\rho = \frac{C_a}{C_{SD}},$$

em que $a \in \{AF, DF\}$.

A CDF para o caso #1 é apresentada na Fig. 3, observa-se que o protocolo DF sempre apresenta ganho de cooperação ($\rho > 1$) para as potências totais de transmissão consideradas. Além disso, esse ganho é superior à 5% para todas as amostras e inferior à 10% em somente 10% das amostras quando a potência total de transmissão é 30 dBm. O protocolo AF apresenta ganho de cooperação para quase todas as amostras analisadas. Porém, enquanto esse ganho é superior à 5% em mais de 50% das amostras para a potência total de transmissão com piores resultados, ele é superior à 10% em apenas 30% das amostras para a potência total de transmissão com melhores resultados. Nota-se ainda que, para o caso #1, a diferença entre as curvas é menor para o protocolo AF do que para o protocolo DF, ou seja, o aumento da potência impacta de forma mais significativa o protocolo DF.

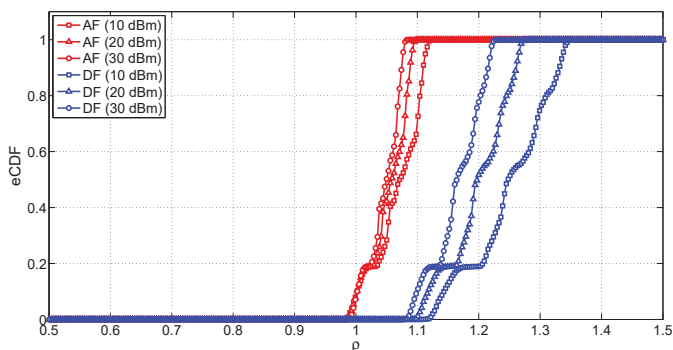


Fig. 3. CDF para o caso #1.

A Fig. 4 apresenta a CDF para o caso #2 e, observa-se que os dois protocolos de cooperação apresentam ganho de cooperação em todas as amostras analisadas, porém esse ganho não é muito expressivo. Para o protocolo AF, o ganho de cooperação não é superior à 10% para todas as potências totais de transmissão e, é superior à 5% em apenas pouco mais de 10% das amostras quando a potência total de transmissão é 10 dBm. Quando analisa-se o protocolo DF, percebe-se que os ganhos continuam baixos. Por exemplo, para a potência total de transmissão com os melhores resultados (10 dBm), menos de 50% das amostras apresenta ganho superior à 5% e para um ganho superior à 10% esse valor se reduz a menos de 20% das amostras.

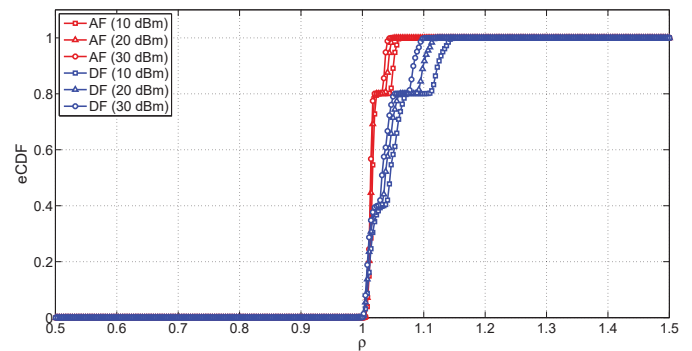


Fig. 4. CDF para o caso #2.

Para o caso #3, nota-se através da Fig. 5 que, assim como nos casos anteriores, os ganhos proporcionados pelo protocolo DF são superiores aos proporcionados pelo protocolo AF. Além disso, observa-se que para o protocolo AF pouco mais de 20% das amostras apresenta ganho de cooperação, entretanto esse ganho não ultrapassa 5% para todas as potências totais de transmissão abordadas. Para o protocolo DF, os resultados apresentados são mais expressivos quando comparados aos resultados do protocolo AF, pois apesar desse ganho ser superior à 10% em menos de 20% das amostras para a potência total de transmissão com melhores resultados (10 dBm), quase 80% das amostras apresentam ganhos de cooperação superiores à 5%.

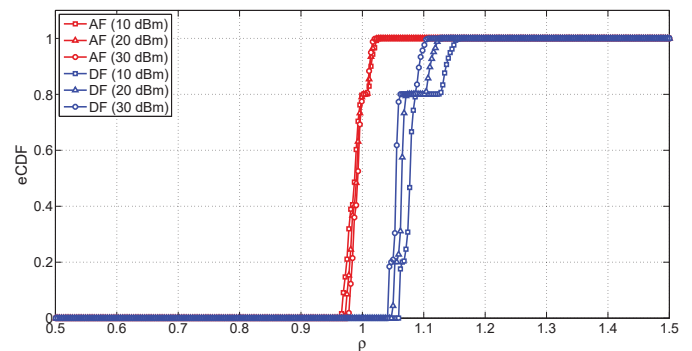


Fig. 5. CDF para o caso #3.

A Fig. 6 mostra a CDF para o caso #4. Através dela, pode-

se notar que esse caso é o único em que os resultados do protocolo AF são superiores aos resultados do protocolo DF. Porém, os dois protocolos de cooperação não possuem valores de $\rho > 1$, indicando que, quando o nó R está distante dos nós S e D , ambos não oferecem ganho de cooperação.

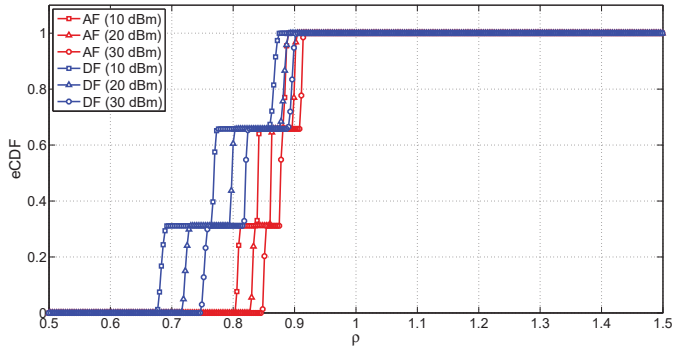


Fig. 6. CDF para o caso #4.

As Tabelas II, III e IV fazem uma síntese da análise realizada para as potências totais de transmissão 10 dBm, 20 dBm e 30 dBm, respectivamente. Nessas tabelas, são dados, para os 4 casos e para os dois protocolos de cooperação, os valores percentuais de amostras que não apresentam ganho ou apresentam ganho inferior à 5% ($\rho < 1,05$), apresentam ganho entre 5% e 10% ($1,05 < \rho < 1,10$) e apresentam ganho superior à 10% ($\rho > 1,10$). Para cada uma das potências totais de transmissão e casos abordados, observa-se que o percentual de amostras que apresenta ganho superior à 5% é maior para o protocolo DF. Além disso, nota-se que para os casos #1 e #3 o percentual de amostras que apresenta ganho superior à 10% é, em geral, maior do que para os casos #2 e #4.

TABELA II
Potência total de transmissão de 10 dBm.

caso	$\rho < 1,05$		$1,05 < \rho < 1,10$		$\rho > 1,10$	
	AF	DF	AF	DF	AF	DF
#1	28,4%	0%	44,2%	0%	27,4%	100%
#2	89,1%	58,3%	10,9%	21,6%	0%	19,9%
#3	100%	0%	0%	80,1%	0%	19,9%
#4	100%	100%	0%	0%	0%	0%

TABELA III
Potência total de transmissão de 20 dBm.

caso	$\rho < 1,05$		$1,05 < \rho < 1,10$		$\rho > 1,10$	
	AF	DF	AF	DF	AF	DF
#1	42,2%	0%	57,8%	0%	0%	100%
#2	100%	71,5%	0%	20,3%	0%	8,2%
#3	100%	4,4%	0%	75,7%	0%	19,9%
#4	100%	100%	0%	0%	0%	0%

V. CONCLUSÕES

Estendendo o que já foi feito em [5] para analisar a capacidade teórica, este trabalho analisou os resultados de

TABELA IV
Potência total de transmissão de 30 dBm.

caso	$\rho < 1,05$		$1,05 < \rho < 1,10$		$\rho > 1,10$	
	AF	DF	AF	DF	AF	DF
#1	50,2%	0%	49,8%	11,0%	0%	89,0%
#2	100%	79,0%	0%	21,0%	0%	0%
#3	100%	20,9%	0%	76,8%	0%	2,3%
#4	100%	100%	0%	0%	0%	0%

capacidade teórica para mais de 32000 amostras de canais PLC residenciais, variando fatores como a localização do *relay*, o protocolo de cooperação e a potência total de transmissão.

Comprovando o que foi visto em [5], os resultados obtidos mostram a superioridade do DF sobre o AF e, além da comprovada influência da posição do *relay* num sistema PLC com cooperação, mostram que a potência de transmissão influencia de forma significativa os ganhos de cooperação. Porém, como principal contribuição, os resultados do presente trabalho mostram que os ganhos da comunicação cooperativa aplicada a sistemas PLC podem não ser tão expressivos como esperado. Isso foi notório porque, dependendo principalmente da localização do *relay*, o percentual de amostras que apresentaram ganhos significativos é baixo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CNPq, CAPES, FAPEMIG, INERGE e Smarti9 Ltda. pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Powerline Communications: Network Design*. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] A. Dubey, R. K. Mallik, and R. S. Schober, "Performance analysis of a multi-hop power line communication system over log-normal fading in presence of impulsive noise," *IET Communications*, vol. 9, no. 1, pp. 1-9, 1 Feb. 2015.
- [3] A. Dubey and R. K. Mallik, "PLC system performance with AF relaying," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 6, pp. 2337-2345, Jun. 2015.
- [4] S. Ezzine, F. Abdelkefi, J. P. Cances, V. Meghdadi, and A. Bouallégué, "Capacity analysis of an OFDM-based two-hops relaying PLC systems," in *Proc. Vehicular Technology Conference*, 81., pp. 1-5, 11-14 Maio 2015.
- [5] M. S. P. Facina, H. A. Latchman, H. V. Poor, and M. V. Ribeiro, "Cooperative in-home power line communication: analyses based on a measurement campaign," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 2, pp. 778-789, Feb. 2016.
- [6] C. Choudhuri, and U. Mitra, "Capacity bounds for relay channels with intersymbol interference and colored gaussian noise," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 9, pp. 5639-5652, Set. 2014.
- [7] T. M. Cover, and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2006.
- [8] T. R. Oliveira, "The Characterization of Hybrid PLC-wireless and PLC Channels in the Frequency Band Between 1,7 and 100 MHz for Data Communication," Tese de Doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- [9] T. R. Oliveira, C. A. G. Marques, W. A. Finamore, S. L. Netto, and M. V. Ribeiro, "A methodology for estimating frequency responses of electric power grids," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 720-731, Dez. 2014.
- [10] G. R. Colen, C. A. G. Marques, T. R. Oliveira, F. P. V. Campos, and M. V. Ribeiro, "Measurement setup for characterizing low-voltage and outdoor electric distribution grids for PLC systems," in *Proc. Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, pp. 1-5, 2013, São Paulo.