

Um Estudo das Reflexões de Sinais de RF em Sistemas RFID de UHF

Sérgio F. Pichorim, Luis C. Vieira, Leonardo H. S. Castilho e Lucas D. Schwendler Vieira

Resumo — Um estudo do comportamento de sinais de RF para sistemas de comunicação de RFID que operam em UHF é apresentado, incluindo resultados experimentais e modelados. É apresentada uma generalização do modelo de radiopropagação *Dielectric Canyon* envolvendo reflexões no solo e/ou outros objetos. O modelo é comparado com medições feitas na prática com leitor RFID e também com um analisador de espectro. Isso explica os pontos “cegos” em que as *tags* não são ativadas, mesmo em distâncias próximas. O estudo é importante para aplicações em ambientes onde as *tags* estão próximas do solo, como por exemplo na agricultura.

Palavras-Chave — RFID, Sinais de UHF, Modelo de reflexão.

Abstract — A study of the behavior of RF signals for RFID communication systems operating in UHF is presented, including experimental and model results. A generalization of the *Dielectric Canyon* propagation model is presented, involving reflections on the ground and/or other objects. The model results are compared with measurements made with a RFID reader and also with a spectrum analyzer. This comparison explains the “blind” spots where tags are not activated, even at close distances. This study is important for applications in environments where tags are close to the ground, such as in agriculture.

Keywords — RFID, UHF signals, reflection model.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se percebido o aumento de tecnologias para monitoramento remoto aplicadas à agricultura, pecuária, ecologia e mesmo segurança urbana [1-5]. Assim, o uso de sistemas de comunicação pode trazer informações mais precisas das condições do solo, das encostas, das plantações, etc. Em especial, as soluções sem fio (*wireless*) entre sensores e uma central de observação são as preferidas, pois permitem monitorar à distância e em tempo real uma grande área.

Dentre as opções de redes de sensores, o sistema de identificação por radiofrequência (RFID, *radio-frequency identification*) tem grande aplicabilidade na medição de parâmetros, como por exemplo, umidade em solo e temperatura [5]. Este sistema utiliza uma unidade remota de baixo consumo, ou mesmo passiva, chamada de *tag* (uma etiqueta eletrônica) e um sistema de excitação/leitura (*reader* ou leitor RFID). *Tags* que operam em LF e HF (125 kHz e 13,5 MHz) utilizam bobinas e campos magnéticos no enlace de comunicação. Já as *tags* de UHF (868 e 915 MHz) utilizam antenas dipolo e ondas eletromagnéticas [6].

A instalação de sensores RFID que trabalham em UHF próximo ao chão pode sofrer interferência das propriedades elétricas do solo (e de sua umidade), causando perdas de eficiência no enlace de comunicação entre a *tag* e o leitor.

Assim, é importante entender esse efeito para o correto dimensionamento de um sistema de RFID em UHF.

Existe na literatura uma grande quantidade de modelos de radiopropagação com foco em sistemas de comunicação de longa distância ou redes locais sem fio (WLANs). A propagação em espaço livre é comumente modelada por meio do modelo de Friis [7]. Porém, este modelo não é válido para distâncias próximas da antena transmissora e não considera as interferências construtivas/destrutivas (ou desvanecimento multipercurso). Apesar disso, o modelo de Friis é utilizado em diversos artigos envolvendo sistemas RFID [8-9].

Modelos com base no traçado de raios (ótica geométrica) são comumente empregados tanto em cenários internos (edificações) como cenários externos de longa distância para modelar o efeito do desvanecimento multipercurso, sendo também utilizados em estudos de enlaces RFID [10-11]. Em ambiente externo e enlaces de visada direta, a combinação entre o raio direto e o raio refletido no solo é considerado o efeito preponderante na determinação do nível de potência na antena receptora. Em ambientes internos, existe uma grande quantidade de caminhos de reflexão da onda eletromagnética tais como em paredes, piso, teto, móveis. Estes diversos raios refletidos podem provocar, em maior ou menor grau, interferências no nível do sinal recebido.

O objetivo desse artigo é apresentar um estudo da propagação de sinais RFID UHF em linha de visada considerando também a reflexão em objetos planos, tais como paredes. Apresenta-se uma generalização do modelo de radiopropagação *Dielectric Canyon* [12] para uma quantidade arbitrária de raios refletidos, sendo os resultados modelados comparados a dados medidos. Além disso, foram realizados testes do alcance de um sistema RFID UHF bem como das variações no nível de potência do sinal detectado pelo leitor RFID em função da distância, cujos resultados são discutidos neste artigo.

II. METODOLOGIA

O modelo aqui utilizado supõe reflexões do sinal no solo e/ou outro obstáculo, ou seja, o sinal recebido é a composição de dois sinais, que tendo percorridos caminhos diferentes, são defasados no tempo. A Fig. 1 apresenta um resumo deste efeito, em que a antena transmissora tem altura h_a em relação ao solo e a *tag* de RFID tem altura h_t . O sinal direto (em vermelho) percorre uma distância x_o , já para o refletido (em azul) a distância é x_i .

Sérgio F. Pichorim, UTFPR, Curitiba, e-mail: pichorim@utfpr.edu.br; Luis C. Vieira, UTFPR, Curitiba, e-mail: vieira@utfpr.edu.br; Leonardo H. S. Castilho, UTFPR, Curitiba, e-mail: leonardohscastilho@gmail.com; e Lucas D. Schwendler Vieira, e-mail: lucas.dsv@hotmail.com. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

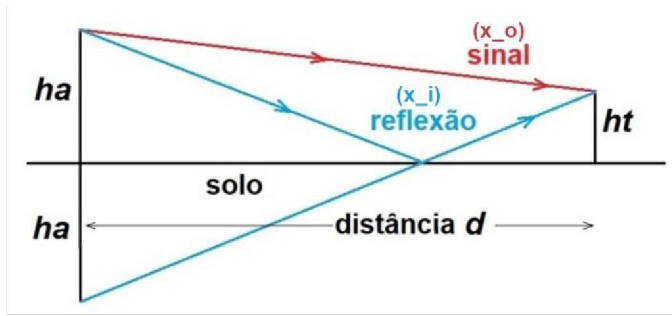


Fig. 1. Definição do raio (x_o) do sinal direto (em vermelho) e do raio (x_i) do sinal refletido no solo (em azul), a partir das alturas da antena transmissora (ha) e da tag RFID (ht) e da distância (d) entre eles.

A partir de uma trigonometria básica, os raios direto e refletido podem ser determinados, respectivamente, por

$$x_o = \sqrt{d^2 + (ha - ht)^2} \quad (1)$$

e

$$x_i = \sqrt{d^2 + (ha + ht)^2}, \text{ em que } i > 0. \quad (2)$$

Dependendo da distância d entre as antenas e suas alturas em relação ao solo esses dois sinais recebidos podem estar em fase ou em contra fase, gerando interferências construtivas ou destrutivas (picos e vales, respectivamente).

O modelo *Dielectric Canyon* [12] é apresentado aqui numa forma mais geral para o cálculo da potência recebida por uma antena incluindo o raio direto, ou *line-of-sight* (LOS), e uma quantidade arbitrária ($N-1$) de raios refletidos, ou seja

$$Pr = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \sum_{i=0}^N \frac{Ri \sqrt{Gi} e^{j\Delta\phi_i}}{xi} \right|^2 Pt \quad (3)$$

em que Pr é a potência recebida, Pt é a potência transmitida pela antena transmissora, λ é o comprimento de onda do sinal, x_i são as distâncias de cada raio traçado. O parâmetro Gi vale $Gir.Git$, com Gir sendo o ganho da antena receptora para raio i e Git sendo o ganho da antena transmissora para o mesmo raio. O parâmetro $\Delta\phi_i = 2\pi(x_i - x_o)/\lambda$ é a diferença de fase entre cada raio traçado e o raio LOS. Ri são os índices de reflexão para cada raio (os índices se multiplicam se houver mais de uma reflexão, que não é o caso). O raio x_o corresponde ao raio LOS, com $R_0 = 1$ e $\Delta\phi_0 = 0$.

Vamos considerar um caso particular em que os objetos de reflexão são planos paralelos ao raio LOS. Isso inclui o solo, as paredes e o teto quando as antenas estão alinhadas ($ht = ha = hi$). Para cada um desses planos, define-se hi como a distância perpendicular entre a antena transmissora e o plano. Neste caso particular, em que $x_o = d$, tem-se

$$x_i = \sqrt{x_o^2 + 4hi^2}, \text{ para } i > 0. \quad (4)$$

Os índices de reflexão são dados pelas equações de Fresnel. Para polarizações do campo elétrico normais ao plano de incidência tem-se

$$Ri_{TE} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_i - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_i - \cos^2 \theta_i}} \quad (5)$$

e para polarizações paralelas ao plano de incidência, tem-se

$$Ri_{TM} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_i - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_i - \cos^2 \theta_i}}, \quad (6)$$

em que θ_i é o ângulo entre o plano e o raio incidente e ϵ_i é a permissividade relativa do plano. Para polarização circular direita, temos dois sinais com defasagem de 90 graus e usamos a combinação complexa $Ri = Ri_{TE} - jRi_{TM}$.

As atividades experimentais da pesquisa foram realizadas com o auxílio do leitor RFID AMS AS3993 para a geração do sinal transmitido e a detecção do sinal de resposta da tag. Este leitor suporta o protocolo ISO 18000-6C (EPC Class1 Gen2), e possui sensibilidade de -83 dBm. O mesmo foi ajustado para a frequência de operação de 915 MHz, código Miller 4, Tari de 25 μ s, *Pilot Tone* e AGC desligados. A potência de transmissão (na entrada da antena) foi ajustada em +26,6 dBm.

Num primeiro experimento, foi medido o nível de potência recebida em função da distância entre as antenas transmissora e receptora. Como dispositivo transmissor foi utilizado o leitor de tag RFID e no lado receptor foi utilizado o analisador de espectro Rohde & Schwarz ETL, 3 GHz. A porta de saída do leitor foi conectada à antena tipo *patch* Keonn ADAN-P11EU-FL-SMA-200, de polarização circular e ganho de 3,4 dBi. Como antena receptora foi utilizada a antena *patch* MACRO260-919 também de polarização circular e com ganho de 6 dBi. A potência recebida foi medida em linha reta entre as antenas numa faixa de 0,4 a 8 m, com intervalos de 10 cm, conforme a configuração exibida na Fig. 2. O analisador de espectro foi ajustado com *span* de 1 MHz, largura de banda de resolução (RBW) e largura de banda de vídeo (VBW) de 10 kHz. A sequência de procedimentos para a realização deste experimento é descrita no diagrama da Fig. 3.

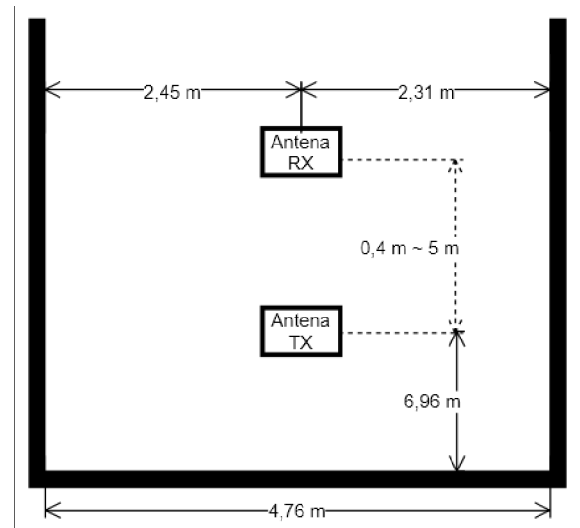


Fig. 2. Ilustração da planta baixa dos testes realizados com o analisador de espectro e as tags RFID. As antenas foram alinhadas e as distâncias foram acrescidas em 10 cm a cada nova medição. Esta configuração foi utilizada para todos os testes realizados nesse artigo.

Num segundo experimento, foi medido o nível de potência do sinal refletido de uma tag RFID SL900A da empresa AMS a qual possui sensibilidade de -15 dBm e foi alimentada por uma bateria de Lítio de 3 V. Esta tag foi escolhida pelo fato de ter entradas sensoras e possibilitar a utilização em futuras pesquisas de medição de umidade do solo. Num primeiro teste, a tag foi posicionada a uma altura de 1,70 m do solo, sendo a mesma

afastada da antena do leitor (também a 1,70 m de altura) em linha reta numa faixa de 0,4 a 4 m. A potência recebida no leitor foi registrada em intervalos de 10 cm, conforme a configuração já apresentada e exibida na Fig. 2, porém, substituindo-se a antena RX pela tag RFID. Um outro teste foi feito seguindo os mesmos procedimentos, porém com a tag posicionada a uma altura de 1,47 m em relação ao solo. A aferição foi realizada através do software AS3993 Reader Suite fornecido pelo fabricante do leitor RFID. A porta de saída do leitor foi conectada à mesma antena patch Keonn ADAN-P11EU-FL-SMA-200 usada anteriormente. A orientação da antena (dipolo) da tag foi mantida na horizontal durante todo o experimento. Os procedimentos para a realização deste experimento são similares aos apresentados na Fig. 3. Entretanto, o analisador de espectro não foi utilizado, sendo a coleta dos dados feita pelo próprio leitor RFID.

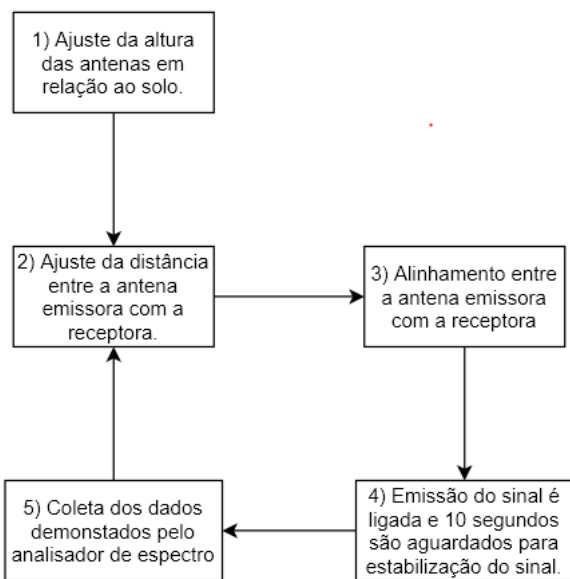


Fig. 3. Metodologia utilizada para a realização do primeiro experimento.

III. RESULTADOS

Modelou-se, com as Eq. (3) a (6), o primeiro experimento envolvendo a transmissão entre o leitor RFID e o analisador de espectro. Considerou-se o caso $N=1$ com uma reflexão do solo, permissividade relativa $\epsilon_1 = 4$ e altura $h_1 = 1,7$ m e também o caso $N=4$, com o teto sendo o plano 2, as paredes sendo o plano 3 e 4 e os valores de distância e permissividade $\epsilon_2 = 10$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 5$, $h_2 = 1$ m, $h_3 = 2,31$ m e $h_4 = 2,45$ m. Foram usados na simulação do modelo os mesmos valores de potência de transmissão e de frequência utilizados nos experimentos. O ganho de cada antena foi automaticamente ajustado na simulação em função do ângulo de incidência θ_i .

Aplicando-se o modelo, para os parâmetros acima citados, obtêm-se os sinais recebidos teóricos mostrados na Fig. 2 (em verde e em laranja), que são comparados aos valores medidos com o analisador de espectro (em azul).

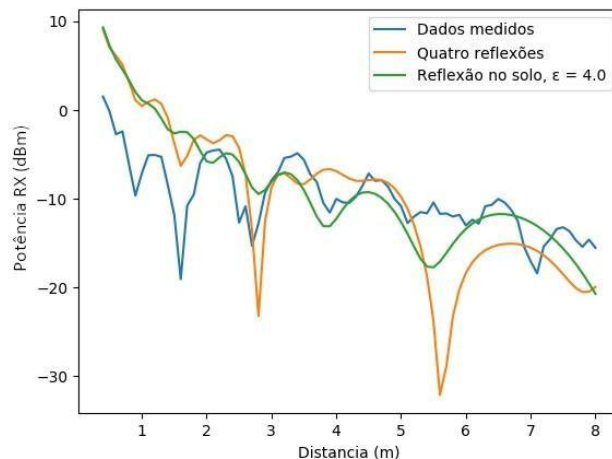


Fig. 4. Comportamento da potência recebida (em dBm) em função da distância (d) no enlace apresentado na Fig. 1 conforme o modelo utilizado. Em azul os valores medidos, em laranja o modelo com quatro reflexões e em verde com apenas a reflexão no solo.

Os dois modelos (1 e 4 reflexões) conseguem prever os acréscimos de potência no sinal (os picos) nas distâncias de 2,2, 3,3 e 4,6 metros, assim como foi observado nas medições.

Observa-se na Fig. 4 que para pequenas distâncias o modelo de 4 reflexões representa melhor a realidade, uma vez que prevê os decréscimos no sinal (os vales) em 1,6 e 2,8 m. Contudo, para longas distâncias (acima de 5 m) o modelo de uma reflexão apresenta menos variações entre os vales e os picos. Contudo, no caso dos resultados experimentais obtidos com a tag de RFID (Figs. 5 e 6), a mesma já não responde nestas longas distâncias.

Ainda em relação à Fig. 4, percebe-se que os resultados modelados se afastam dos valores medidos à medida que a distância tende a zero. Isso se deve a uma limitação intrínseca do modelo *Dielectric Canyon* no qual o nível de potência tende a infinito quando a distância tende a zero. Portanto, este modelo não é adequado para estimar a potência recebida quando a distância de separação entre as antenas é muito pequena.

A Fig. 5 ilustra os dados de potência incidente levantados através do analisador de espectro, bem como os dados da potência refletida pela tag RFID medidos pelo Leitor AS3993, ambos a 915 MHz, para o caso da tag posicionada a 1,70 m do solo e alinhada à antena emissora.

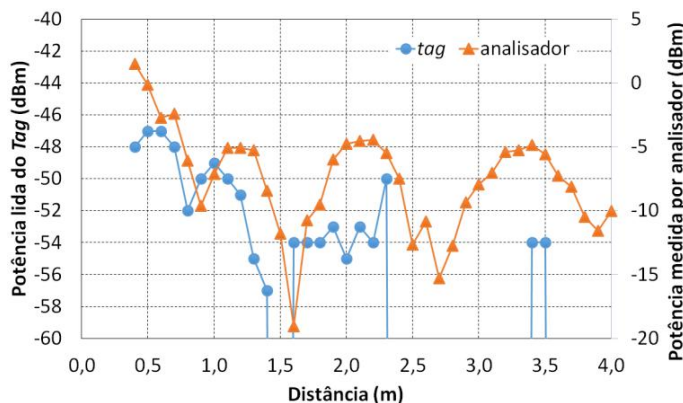


Fig. 5. Comparação entre a potência medida pelo analisador de espectro (triângulos e eixo da direita) e pelo leitor RFID AS3993 (círculos e eixo da esquerda).

Nas Figs. 5 e 6 é possível observar que a potência medida pelo analisador de espectro não decai linearmente em relação à distância, e sim com oscilações entre pontos de pico e vales. As oscilações no nível de potência medida com a variação da distância pode ser explicada pela existência de diversos caminhos de reflexão do sinal de RF, além do raio direto, gerando interferências construtivas/destrutivas, tal como previsto no modelo teórico simulado.

Outro fato importante com relação aos resultados da Fig. 5 é que a curva de potência refletida pela *tag* RFID se assemelha (parcialmente) ao sinal apresentado pelo analisador de espectro. Isso possibilita justificar falhas repentinas na comunicação leitor-*tag*, tal como a observada na distância de 1,5 m ocorrida provavelmente devido à interferência destrutiva existente nesta região, conforme demonstrado pelo experimento com o analisador de espectro. Cabe ainda ressaltar que a grande diferença entre os níveis de sinal medidos com o analisador e com o leitor RFID já eram esperados. Com o analisador detecta-se a perda somente num sentido (transmissor-receptor) enquanto que com o leitor detecta-se a perda em dois sentidos (leitor-*tag* e *tag*-leitor).

A máxima distância alcançada entre a *tag* e o leitor RFID foi de 3,5 m, para a *tag* na altura de 1,7 m (Fig. 5). Porém, a *tag* não foi detectada na região entre 2,4 e 3,3 m, além do descrito anteriormente em 1,5 m. A partir de 3,6 m não houve mais resposta da *tag* para o leitor.

A Fig. 6 mostra os gráficos de leitura da potência refletida pela *tag* nas duas alturas propostas: 1,70 m, alinhada a antena emissora, e outra a 1,47 m (desalinhada). Nesta figura pode-se observar que o nível do sinal fica acima de -54 dBm para distâncias menores que 1,25 m. Para distâncias maiores ocorrem alguns pontos “cegos” onde as *tags* não são detectadas (< -60 dBm). Até a distância de 2 m apresentada na Fig. 6, ocorrem três pontos não detectáveis para o caso da *tag* a 1,47 m e apenas um ponto no caso da *tag* situada a 1,70 m do solo. As grandes flutuações no nível de potência recebida para os dois casos confirmam a ocorrência do efeito de propagação multipercurso. O menor desempenho obtido com a *tag* situada a 1,47 m do solo se deve, principalmente, ao desalinhamento ocorrido entre ela e a antena do leitor.

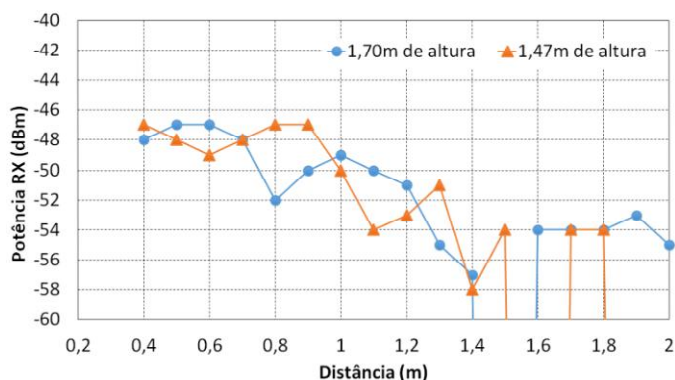


Fig. 6. Potência recebida (RX) medida pelo Leitor de RFID AMS em função da distância entre o leitor e a *tag*. Círculos para a altura da *tag* de $h_t = 1,7$ m do solo e triângulos para altura de $h_t = 1,47$ m.

IV. CONCLUSÃO

A partir dos resultados experimentais e modelados apresentados foi demonstrada a ocorrência de significativas variações na potência recebida pela *tag* ou na potência recebida pelo leitor RFID, para o ambiente de testes específico considerado. Essas variações são devidas principalmente aos múltiplos caminhos de reflexão do sinal de RF propagado no ambiente, provocando interferências tanto construtivas quanto destrutivas ao longo da propagação gerando regiões de melhor e de pior detecção das *tags*. Nesse sentido, o modelo utilizado e as simulações realizadas auxiliaram no entendimento desses efeitos.

Apresentou-se o modelo de radiopropagação *Dielectric Canyon* numa forma generalizada para uma quantidade arbitrária de raios refletidos. O modelo foi simulado para até 5 raios (4 raios refletidos) e comparado com resultados medidos, tendo demonstrado o efeito da propagação multipercurso sobre o nível do sinal recebido na *tag*. Os resultados obtidos com o modelo indicam que o mesmo pode ser utilizado na estimação do nível de potência na antena receptora para outros ambientes com aplicações similares. Por exemplo, ambientes externos com enlaces de visada direta e antenas próximas ao solo, bem como ambientes internos. No entanto, em termos de modelamento da propagação em sistemas RFID, este artigo representa um trabalho preliminar sendo necessários novos experimentos e possíveis melhorias no modelo apresentado.

A eficiência na leitura das *tags*, e o seu alcance, depende do ambiente onde o sistema RFID está inserido. Em um ambiente real, com terrenos não planos, a vegetação em crescimento e as variações das condições climáticas, criam-se áreas de sombra, atenuações e reflexões nos sinais de radiofrequência. Como trabalho futuro, pretende-se realizar uma modelagem mais completa de sistemas RFID, considerando variáveis ambientais e como elas interferem no nível do sinal RFID. Uma adequada modelagem pode ajudar no projeto do sistema, em especial, na definição do espaçamento entre a antena do leitor e as *tags* e na escolha das alturas das antenas [1], prevenindo assim perdas de sinal e melhorando o desempenho do sistema.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro (processo 315078/2018-9).

REFERÊNCIAS

- [1] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, “The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges”, *Comp. & Electro. in Agricul*, v. 79, pp. 42–50, 2011.
- [2] S. N. Daskalakis, G. Goussetis, S. D. Assimonis, M. M. Tentzeris, A. Georgiadis, “A uW Backscatter-Morse-Leaf Sensor for Low-Power Agricultural Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, v. 18, n. 19, pp. 7889–7898, 2018.
- [3] G. Sahitya, N. Balaji, C. D. Naidu, “Wireless Sensor Network for Smart Agriculture”, *2nd Int Conf on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATecT)*, n. 16850794, Julho 2016.
- [4] S. F. Pichorim, A. R. A. Gamba, K. F. Champaoski, L. H. S. Castilho. “Sistemas Telemétricos para Medição da Umidade do Solo.” In: J. G. Aguilera e A. M. Zuffo. (Org.), *Ensaio nas ciências agrárias e ambientais 5*. 1ª ed. Ponta Grossa, v. 5, p. 218-232, 2019.
- [5] S. F. Pichorim, N. J. Gomes, J. C. Batchelor, “Two solutions of soil moisture sensing with rfid for landslide monitoring”, *Sensors*, v. 18, n. 2, pp. 14–16, 2018.
- [6] K. Finkenzerler, D. Müller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. Wiley: New York, NY, USA, 2010.

- [7] T. S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.
- [8] M. Omer, G. Y. Tian, “Indoor distance estimation for passive UHF RFID tag based on RSSI and RCS”, *Measurement*, v. 127, pp. 425-430, 2018.
- [9] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez, H. Heinrich, “Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, v. 53, n. 9, pp. 2721–2725, Setembro 2005.
- [10] A. Lazaro, D. Girbau, D. Salinas, “Radio Link Budgets for UHF RFID on Multipath Environments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 57, n. 4, pp. 1241-1251, Abril 2009.
- [11] A. A. Goes, P. Cardieri, M. D. Yacoub, “Characterization of the RFID deterministic path loss in manufacturing environments,” *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC)*, Sydney, NSW, pp. 647-652, 2012.
- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.