



Caracterização da propagação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais utilizando a RSSI como parâmetro de avaliação.

Gerson Roberto Luqueta
Centro de Ciências Exatas,
Ambientais e de Tecnologias.
Pontifícia Universidade
Católica de Campinas
Campinas – SP – Brasil.
gerson@luqueta.com

Omar Carvalho Branquinho
Centro de Ciências Exatas,
Ambientais e de Tecnologias.
Pontifícia Universidade
Católica de Campinas.
Campinas – SP - Brasil
omar.branquinho@puc-campinas.edu.br

David Bianchini
Centro de Ciências Exatas,
Ambientais e de Tecnologias
Pontifícia Universidade
Católica de Campinas.
Campinas – SP - Brasil
davidb@puc-campinas.edu.br

Resumo - Este artigo discute o uso de redes de sensores sem fio em ambientes industriais e propõe o uso da RSSI e do fator beta como parâmetros de avaliação. A proposta foi testada em uma indústria para verificar a atenuação do sinal e os efeitos na intensidade sobre tempo para salientar a importância de caracterizar o ambiente e a análise de suas condições de variabilidade para planejar e implantar este tipo de rede na indústria.

Abstract - This paper discusses the use of wireless sensor networks in industrial environments and proposes the RSSI and the beta factor as evaluation parameters. The proposal was tested in an industry to check the signal attenuation effects in intensity over time to emphasize the importance of characterizing the environment and analysis of variability of its conditions to plan and deploy such a network in the industry.

Keywords: path loss, beta factor, wireless sensor network, industrial application.

Palavras chaves: fator de atenuação, fator beta, rede de sensores sem fio, indústria.

I. INTRODUÇÃO

Uma tecnologia que vem emergindo na área de telecomunicações é a das redes de sensores sem fio (RSSF), indo em direção da Internet das Coisas [1]. Esta tecnologia envolve várias áreas do conhecimento agregando tópicos de telecomunicações (rádios, antenas, etc.), uso de microcontroladores, sistemas de controle analógico e digital, entre outros [2]. Em termos de aplicações de RSSF, estas vão desde o uso em agronomia [3] e militar [4] até a aplicação em saúde humana [5]. Na área de saúde humana as RSSF têm um forte apelo, principalmente auxiliando na monitoração de processos, onde a presença de sensores com fio pode representar uma dificuldade extra na instalação ou na susceptibilidade de contaminação microbiológica, como no caso da indústria farmacêutica ou de equipamentos médico-hospitalares.

Considerando que as RSSF podem ser compostas desde alguns poucos elementos (ou “nós sensores”) até milhares de unidades que formam uma rede local sem fio [6], a caracterização das condições de instalação e aplicação destas unidades em ambientes industriais é fator crítico de sucesso. Portanto é de grande interesse que exista a criação de uma sistemática de planejamento que compreenda a caracterização do ambiente onde será instalada a rede.

De um modo geral a caracterização do ambiente é um assunto que abrange a combinação de modelos analíticos e métodos empíricos e a literatura apresenta uma série de propostas que vão desde trabalhos envolvendo processos estocásticos até elaborados modelos baseados em observações e medições estratégicas. Entretanto, estes modelos foram desenvolvidos para atender outros tipos de sistemas, como, por exemplo, os sistemas celulares.

O foco deste trabalho é a caracterização do ambiente tanto para a determinação da perda de percurso (path loss), que compõe o modelo *Log-distance* [7], quanto à avaliação da variabilidade do meio. O trabalho procura identificar técnicas que permitam a disponibilização da RSSF com o máximo de desempenho. Com base no modelo é verificado o fator beta (β) que representa o *path loss* e o desvio padrão (σ) que quantifica a variabilidade do meio.

Um ponto importante a ser considerado em RSSF é a possibilidade de medida do *Received Signal Strength Indication* (RSSI), tanto de *uplink* quando de *downlink*. Nas diversas redes sem fio esta medida não é utilizada para caracterizar o meio de comunicação, sendo utilizada, por exemplo, em sistemas celulares, para fazer *handoff* [8]. Nem mesmo em redes WiFi esta informação é usada para mudança de taxa de comunicação, que é realizada considerando a perda de ACK na camada MAC (*Medium Access Control*). Portanto, o trabalho propõe uma monitoração da RSSI nos dois sentidos da comunicação como um parâmetro para gerência deste tipo de rede motivado pela facilidade de obtenção da grandeza, pois muitos dispositivos eletrônicos possibilitam o acesso a tal variável diretamente no *hardware*, como no caso dos transceptores utilizados em RSSF.

Este enfoque, no melhor de nosso conhecimento, não foi utilizado para gerência deste tipo de rede.

O trabalho está assim dividido: a Seção II apresenta o enfoque teórico relativo à propagação de sinal rádio e os meios para sua caracterização. A Seção III apresenta a proposta de trabalho para planejamento e implantação de RSSF. A Seção IV apresenta a descrição do ambiente de teste para validação da proposta. A Seção V apresenta os resultados e sua análise. Finalmente a seção VI apresenta as conclusões do trabalho.

II. CARACTERIZAÇÃO DO FATOR DE ATENUAÇÃO

Nesta seção é feita uma análise dos modelos de propagação básicos que dão um embasamento para a proposta



do trabalho. Embora estes modelos sejam de conhecimento geral, sua aplicação em RSSF carece de investigação em função das peculiaridades deste tipo de rede. Por exemplo, em [9] foi verificado que para sensores próximos ao solo, fato possível neste tipo de rede, existem características diferentes daquelas tradicionalmente encontradas para redes sem fio empregadas para comunicação entre seres humanos. Neste sentido é oportuno avaliar os modelos tradicionais e sua aderência com as aplicações em RSSF.

A. Modelo do Espaço Livre

O modelo do Espaço livre foi proposto por Harald T. Friis em 1946 [10]. Seu modelo considerou que a potência recebida por um dispositivo seria diretamente proporcional à potência transmitida, à abertura das antenas de transmissão e recepção e a atenuação no espaço livre (em função da distância entre o transmissor e receptor e a frequência de operação). Originalmente a expressão considerava a abertura efetiva das antenas, mas em termos de resultados, consideram-se os ganhos das antenas (1).

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{L_{EL}} \quad (1)$$

Onde:

- P_{RX} = Potência no receptor (W)
- P_{TX} = Potência no transmissor (W)
- G_{TX} = Ganho da antena de transmissão (W)
- G_{RX} = Ganho da antena de recepção (W)
- λ = comprimento de onda (m)
- d = distância entre as antenas (m)

A mesma expressão pode ser representada em termos de dBm (2):

$$P_{RX, dBm} = P_{TX, dBm} + G_{TX, dB} + G_{RX, dB} - L_{EL, dB} \quad (2)$$

Onde L_{EL} é a atenuação no espaço livre.

B. Modelo Log-Distance e a determinação do fator de atenuação

O modelo de *Log-Distance* é utilizado para caracterizar ambientes de propagação internos e externos [9].

O modelo considera que a potência recebida a uma dada distância d pode ser calculada em função de um fator de atenuação e uma potência de referência recebida a certa distância d_0 , próxima da estação base [Fig.1].

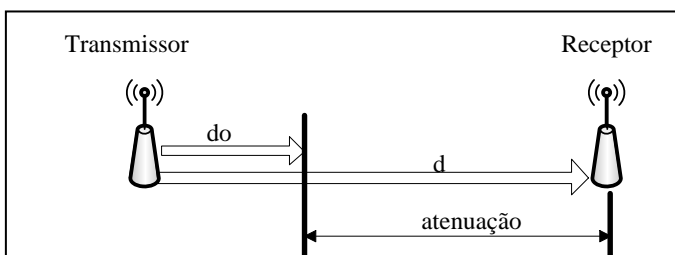


Figura 1 – O modelo considerado de log-distance

Desta forma, a potência a uma distância d pode ser determinada considerando a potência recebida P_r a uma

distância d_0 onde β é o fator de atenuação que define o ambiente (3).

$$\left| \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right|_{dB} = -10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

A potência $P_r(d_0)$ é a potência recebida na distância de referência d_0 . A atenuação até este ponto é considerada como sendo do espaço livre. De (3) e (2) obtemos o fator de atenuação (4):

$$\beta = \frac{P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 10 \log\left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda}\right)^2 - P_{RX}(d)}{10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right)} \quad (4)$$

A partir de (4) podemos também determinar o valor de β uma vez que conheçamos a potência recebida a uma distância d , os ganhos das antenas, e a potência transmitida a uma dada frequência.

C. Variabilidade do Meio

O sinal sofre variações de intensidade ao longo do tempo, que são caracterizadas como tendo distribuição log-normal.

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10\beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (5)$$

A intensidade de variação é medida através da análise do desvio padrão da distribuição. Portanto, para análise das condições do ambiente é necessário considerar a variação do ambiente.

III. PROPOSTA DE TRABALHO

A instalação de RSSF e outros dispositivos sem fio têm sido alvo de intensos estudos nos últimos anos. Fatores que justificam esta escolha envolvem fator econômico das instalações (já que se dispensa a instalação do cabeamento entre as estações) e a facilidade de instalação, reconfiguração e expansão [11].

Por outro lado a implantação demanda a observação da disponibilidade do sistema, que em muitos ambientes industriais deve ser maior que 99,99% [12], a adaptabilidade ao ambiente proposto e a escalabilidade. Como a adaptabilidade e a escalabilidade são inerentes das RSSF, o fator a ser observado como variável é a disponibilidade do sistema, que considera a perda de percurso, a interferência de RF e potência de transmissão [13]. Controlando-se a potência de transmissão o *path loss* torna-se a variável de interesse para avaliação da disponibilidade do enlace.

Dentro deste quadro a proposta de trabalho consiste em coletar a intensidade de sinal RSSI de *uplink* e *downlink*, tratar estatisticamente a amostra e verificar a normalidade para uma distribuição gaussiana aplicável a Equação (5). Para a verificação da normalidade foi utilizado o modelo de *Shapiro-Wilk* [14]. De acordo com a Equação (5) o desvio padrão obtido em cada ambiente representará a variável probabilística com a qual incrementar-se-á o sinal para a determinação do



link budget. Para corroborar com os estudos pode-se calcular também o valor da atenuação sofrida pela conformidade geométrica do meio através da Equação (4) comparando-a com a literatura.

IV. METODOLOGIA E COLETA DE DADOS

A. Configurações dos nós sensores

Para coleta de dados tanto o nó sensor quanto a base foram ajustados para uma potência de transmissão de 10dBm, modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) a uma taxa de 4.8kbps e frequência central de 915MHz. A escolha desta frequência de operação levou em conta parâmetros como alcance, dimensionamento de antenas, consumo de energia [15] além de possibilitar futuras implementações homologáveis [16]. Para efeito de estudo foram utilizadas antenas *omnidirecionais* com ganho teórico de 0 dBi. A sensibilidade do receptor era de -95 dBm. O hardware básico contou com duas unidades transceptoras baseadas no chip CC1101 e microcontrolador Atmega168 dispostos em uma base de interface para sensores de temperatura e pressão e alimentação externa em corrente contínua [Fig. 2].



Figura 2 – Circuito sensor utilizado para aquisição de dados.

B. Preparação do ambiente e amostragem

A coleta de dados ocorreu em um ambiente industrial utilizando-se um nó sensor e uma estação base. O nó sensor foi instalado em um equipamento esterilizador para coleta de dados de temperatura através de uma entrada analógica do microcontrolador e foram realizadas medidas de RSSI de *uplink* e *downlink*. Para determinação das faixas de atenuação a base foi deslocada para três pontos diferentes dentro da estrutura fabril. Em cada ponto [Fig.3] foram realizadas medições em um dia de atividade produtiva.

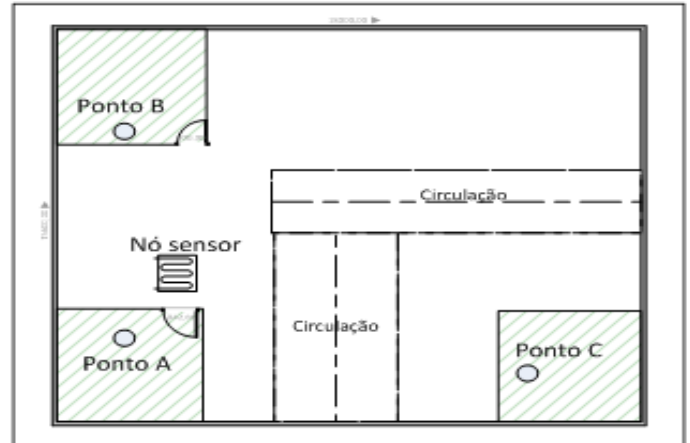


Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de dados

Em cada ciclo de equipamento também foram coletados os dados de rede. A distância entre o *Nó sensor* e o *Ponto A* é de 2 metros lineares altura de 1 metro do piso. A distância entre o *Nó sensor* e o *Ponto B* é de 10 metros lineares a 1 metro do piso e a distância entre o *Nó sensor* e o *Ponto C* é de aproximadamente 30 metros lineares a uma altura de 4 metros do piso, conforme se observa na [Fig. 4].

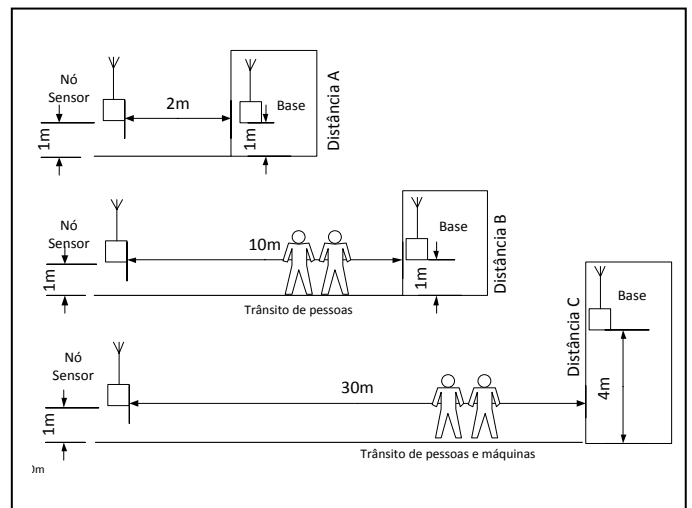


Figura 4 – Representação das distâncias entre o Nó Sensor e a Base nos pontos A, B e C.

Entre o *Nó sensor* e o *Ponto A* não existe circulação de pessoas. Já entre o *Nó sensor B* e a base, existem pessoas transitando a uma frequência média de um indivíduo a cada 4 minutos. Entre o *Nó sensor C* e a base existe um corredor que apresenta tráfego intenso de pessoas e empilhadeiras (cujas frequências não foram apuradas), com a base instalada no piso superior (a uma altura de 4 metros relativa ao *Nó sensor*), com visada direta com o equipamento

Este ambiente proporciona uma ótima relação entre três cenários, sendo um de pequena distância e baixa alteração das conformações geométricas, um ambiente de média distância e significativa taxa de mudanças e um ambiente distante com movimentação abaixo da visada.

Quanto à distância d_0 , embora a literatura considere a referência de um metro para ambientes internos como um valor prático [10], utilizou-se o valor de 0,4m que foi a



distância entre a base transceptora e a divisória nos ambientes fechados testados.

A amostragem ocorreu em intervalos de um segundo. Cada ciclo de máquina em um ponto específico de análise teve duração de 30 minutos em média. O número de amostras considerou um intervalo de confiança de 99%. As coletas foram realizadas em dias diferentes e em horários próximos para que o comportamento do ambiente fosse correspondente à realidade do período. As curvas foram ajustadas pela média móvel e normalizadas [17] com o auxílio de um software comercial para análise de dados.

C. Resultados da coleta de dados

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos em relação à média e o desvio padrão para cada ambiente coletado.

TABELA 1 – média e desvio padrão obtidos na coleta de dados dos diferentes ambientes.

| Local | Média (dBm) | Desvio padrão |
|--------------|-------------|---------------|
| A - Uplink | -40,4 | 1,6 |
| A - Downlink | -45,6 | 1,7 |
| B - Uplink | -63,6 | 5,7 |
| B - Downlink | -68,7 | 5,8 |
| C - Uplink | -78,5 | 1,8 |
| C - Downlink | -83,9 | 1,9 |

Os Gráficos cumulativos de *Downlink* dos locais podem ser observados nas [Fig. 5] para o Ponto A, na [Fig.6] para o Ponto B e na [Fig.7] para o Ponto C.

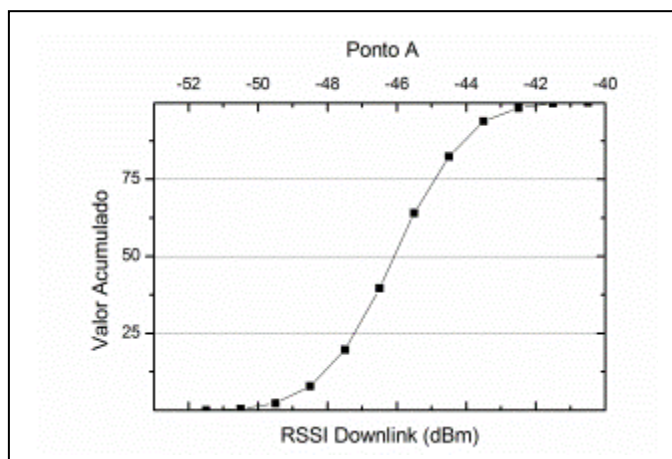


Figura 5 – Probabilidade no ponto A

Nota-se que o Ponto B é o que sofre o maior desvio padrão dos três locais analisados, como era de se esperar uma vez que existe a circulação de pessoas na altura dos sensores, obstruindo o sinal do rádio.

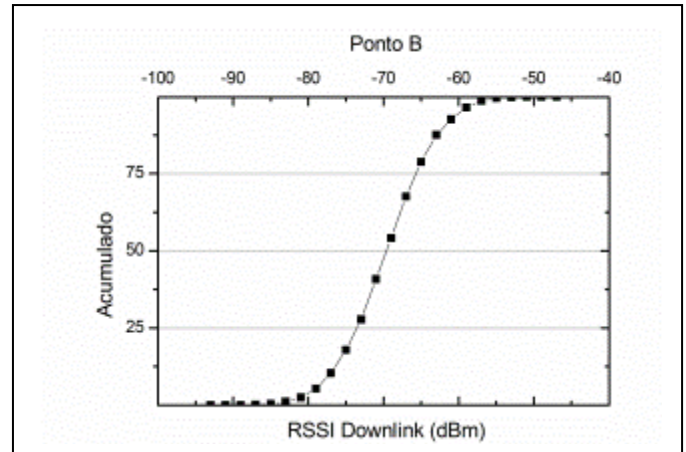


Figura6 – Probabilidade no ponto B

Por outro lado, o Ponto C que está mais distante do Nó Sensor apresentou um desvio padrão relativamente baixo, promovido pela altura na qual a base foi colocada (2º piso).

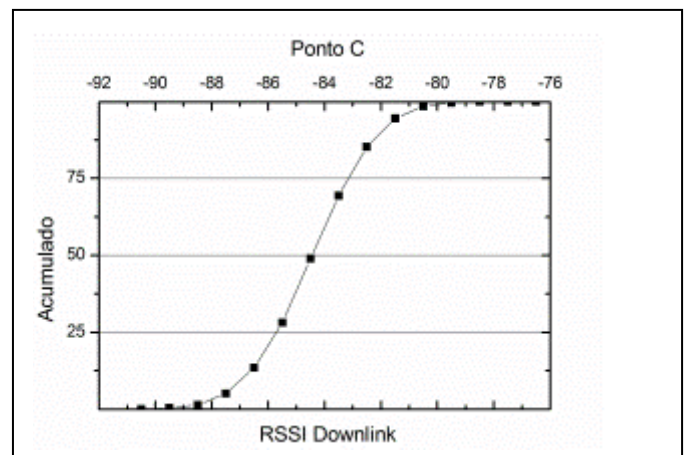


Figura 7 – Distribuição RSSI no ponto a 30 metros – C

A distribuição dos valores mostra que as condições de distância e tráfego de pessoas e equipamentos influenciam diretamente nos parâmetros de qualidade do sinal. Os dados obtidos sugerem que, ao invés de se referir a valores de atenuação, temos que considerar, na verdade, bolsões em torno dos pontos de referência, graças à dinâmica do ambiente industrial. A Tabela 2 apresenta os resultados do cálculo de Fator beta para os pontos considerados, no pior caso.

Tabela 2 – Resultados obtidos para Fator beta

| | P_{rx} (dBm) | Atenuação (dB) | Beta (β) |
|---------|----------------|----------------|------------------|
| Ponto A | -48,3 | 34,6 | 4,95 |
| Ponto B | -74,5 | 60,8 | 4,35 |
| Ponto C | -85,8 | 72,1 | 3,84 |

O valor do expoente β foi calculado para os três pontos com a finalidade de determinar sua dependência em função das características específicas do ambiente de propagação que, no caso, não é o de espaço livre. Comparando com a literatura verifica-se que os expoentes relacionados com a perda de percurso nos pontos B e A se aproximam



respectivamente de ambiente tipo suburbano plano e urbano denso [18].

V. CONCLUSÕES

À medida que nos distanciamos do nó sensor em uma rede de sensores sem fio, como é de se esperar, a atenuação provocada pelo meio aumenta de forma considerável. Também foi possível observar que o tráfego de pessoas influencia não só na variabilidade do sinal, mas também no valor do fator beta (β), uma vez que altera as características geométricas do ambiente. Por outro lado, um posicionamento mais estratégico dos elementos de rede (como a elevação da base fora do alcance do tráfego de pessoas) pode melhorar em muito a qualidade do enlace.

Comparando-se com a literatura [7] observou-se que a variação está dentro dos limites para ambientes obstruídos em prédios e fábricas. O mesmo pode-se dizer em relação ao *path loss*.

Com base nos resultados obtidos concluímos que a RSSI pode ser utilizado como uma métrica prática e simples para a determinação da localização dos nós sensores em um ambiente industrial uma vez que sejam considerados os seguintes fatores para dimensionamento do enlace de rádio:

- Distância entre os nós sensores;
- Sensibilidade do rádio;
- Altura dos elementos em relação aos pontos de maior tráfego;

- Uso de antenas setoriais nos pontos mais distantes;

- Proximidade com divisórias;

- Limite de sensibilidade dos nós sensores;

- Potências de transmissão e ganho das antenas compatíveis com o meio.

Receptores instalados em alturas elevadas foram menos susceptíveis às variações ocasionadas pelo tráfego, o que pode determinar uma recomendação prática em ambientes com movimentação de pessoas e equipamentos.

Com a observação de modelos de probabilidade pode-se dimensionar o *Link Budget* de forma rápida e simples sem a necessidade de uso de métodos mais complexos, já que o sistema proposto tem por características o uso em ambientes internos com estações alocadas em pontos fixos. No projeto o que se deve garantir é a disponibilidade dos dados, uma vez que estes podem ser utilizados na parametrização de processos produtivos.

No caso do uso de redes de sensores sem fios em ambientes produtivos para saúde humana (como o caso da produção farmacêutica) deve-se observar não só a viabilidade técnica relativa aos aspectos de telecomunicações, mas também as determinações legais da Agência Nacional de Vigilância Sanitária principalmente quanto à validação de sistemas computadorizados, na qual a rede de sensores sem fio pode estar inserida. Nestes ambientes as comunicações voltadas para viabilizar a Internet das Coisas exigirão atenção especial, e as aplicações pedirão critérios de qualidade ainda maiores que os tradicionais.

A pesquisa finalmente aponta para a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia que combine técnicas analíticas e métodos empíricos com a finalidade de viabilizar a rápida implantação de redes de sensores sem fio no ambiente industrial.

REFERÊNCIAS

- [1] International Telecommunication Union - ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things – Geneva, Switzerland – 2005.
- [2] Loureiro, A. A., Ruiz, L. B., Nogueira, J. M. S., and Mini, R. A. Rede de sensores sem fio - Porto, I. J, editor, *Simpósio Brasileiro de Computação, Jornada de Atualização de Informática*, p. 193–234, 2002.
- [3] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith. Vineyard. Computing: sensor networks in agricultural production. *IEEE Pervasive Computing*, 3(1):38–45, Jan-Mar 2004.
- [4] Michael Winkler, Klaus-Dieter Tuchs, Kester Hughes, and Graeme Barclay. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, p. 37-45, Feb-2008.
- [5] V. A. Kottapalli, A. S. Kiremidjian, J. P. Lynch ; E. Carryer, T. W. Kenny, K. H. Law, Y. Lei, “ Two-tiered wireless sensor network architecture for structural health monitoring”, *Internat. Symp. Smart Structures and Materials*, Mar. 2003.
- [6] Geoff V Merret (Editor) and Yen Kheng Tan (Editor-in-Chief), *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*, InTech, Croatia, 2010.
- [7] Rapport, Theodore S. “Wireless Communications – Principles and Practice”. Prentice Hall PTR – p.69-133, USA, 1996.
- [8] Branquinho, Omar Carvalho, Yacoub, Michel Daoud, “Metodologia de dimensionamento de canais para soft handoff em sistemas CDMA”, Campinas, SP, 2001.
- [9] Chong Liu – “Fundamental Service Support for Wireless Sensor Networks”, University of Victoria (Canada), 2006.
- [10] Friis, Harald T. – “A Note on a Simple Transmission Formula”, Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons, Fellow, May 1946.
- [11] Robert Poor, Brent Hodges, “Reliable Wireless Networks for Industrial Applications” – MIT’s Media Lab., Boston, MA – 2003.
- [12] Niraj Vanaik , “Use of Wireless Technology in a GMP Environment”, *Pharma Bio World*, pages 60-63, October 2009.
- [13] W. Ikram & N. F. Thornhill, “Wireless Communication in Process Automation: A Survey of Opportunities, Requirements, Concerns and Challenges”, *Control* 2010, Coventry, UK, September 2010.
- [14] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, “An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)”, *Biometrika*, Vol. 52, No. 3/4, pp. 591-611, December, 1965.
- [15] Key Priorities for Sub-GHz Wireless Deployment - *Silicon Laboratories Inc.*, Austin, Texas.
- [16] Kristian Skogvang and Sverre Hellan - CC11xx Settings for FCC 15.247 Solutions, *Texas Instruments Incorporated*, Dallas, Texas, 2010.
- [17] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, "Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros", 4a edição, LTC - Grupo Gen - 2009, 514p.
- [18] Haykin Simon , Moher Michael – “Sistemas modernos de comunicações wireless”; tradução de Glayson Eduardo de Figueiredo e José Lucimar do Nascimento, Bookman, Porto Alegre, 2008, 580p.