

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

CEATEC  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GERSON ROBERTO LUQUETA

AVALIAÇÃO DE REDE DE SENSORES SEM FIO  
PARA LIBERAÇÃO PARAMÉTRICA DA  
ESTERILIZAÇÃO POR CALOR

CAMPINAS  
2012

GERSON ROBERTO LUQUETA

AVALIAÇÃO DE REDE DE SENSORES SEM FIO  
PARA LIBERAÇÃO PARAMÉTRICA DA  
ESTERILIZAÇÃO POR CALOR

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Redes de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

Ficha Catalográfica  
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e  
Informação – SBI – PUC-Campinas

t621.385  
L966a

Luqueta, Gerson Roberto.

Avaliação de rede de sensores sem fio para liberação paramétrica da esterilização por calor / Gerson Roberto Luqueta. - Campinas: PUC-Campinas, 2012.

123p.

Orientador: Omar Carvalho Branquinho.

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sensoramento remoto. 3. Sistemas de telecomunicação. I. Branquinho, Omar Carvalho. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed.CDD – t621.385

**GERSON ROBERTO LUQUETA**

**AVALIAÇÃO DE REDE DE SENSORES SEM FIO PARA  
LIBERAÇÃO PARAMÉTRICA DA ESTERILIZAÇÃO POR  
CALOR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

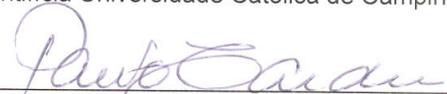
Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho.

Dissertação defendida e aprovada em 06 de dezembro de 2012 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho  
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Paulo Cardieri  
Universidade Estadual de Campinas

Dedico este trabalho à minha esposa Marli e a meus filhos Thiago e Matheus pelo incentivo e, sobretudo, pela paciência durante os longos períodos em que os deixei de lado para me concentrar na pesquisa.

# AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, pela vida e suas oportunidades.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho  
Grande incentivador, mestre e orientador.

À empresa Baumer S.A na pessoa de seu Presidente, Sr. Ruy Baumer  
Pelo apoio técnico e recursos materiais, sem os quais a pesquisa não seria possível.

Aos professores Marcelo Luis Francisco Abbade, Alexandre de Assis Mota, David Bianchini e Eric  
Alberto de Mello Fagotto  
Pela inestimável contribuição ao meu aprendizado.

Aos colegas de turma  
Pela ajuda e companheirismo.

Ao meu aluno da FATEC Gabriel Antonio Marcondes  
Pela ajuda na coleta de dados.

“Dai-me um movimento vibratório tão extenso quanto à distância que nos separa desses outros mundos que rolam sobre nossa cabeça, ou sob nossos pés, e eu farei chegar minha voz até lá”.

Padre Roberto Landell de Moura  
(1861-1928)

## RESUMO

LUQUETA, Gerson Roberto. Avaliação de rede de sensores sem fio para liberação paramétrica da esterilização por calor. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de mestrado profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Campinas, 2012.

A presente dissertação tem por objetivo propor o uso de uma rede de sensores sem fio para monitoração da letalidade de processo de esterilização de materiais biologicamente contaminados que utiliza o calor como agente esterilizante, em substituição a um sistema com fio. A pesquisa avalia também se os sensores poderão ser utilizados como monitores do parâmetro de letalidade térmica teórica do processo, e assim servirem como elemento de auxílio na tomada de decisão para a liberação dos materiais esterilizados em hospitais e laboratórios. Para tanto, uma plataforma com nós sensores foi montada para medição da temperatura de processo, cálculo da letalidade e determinação da qualidade do sinal de rádio e os seus resultados foram comparados com um equipamento comercial com fio.

Palavras chaves: Rede de sensores sem fio, letalidade, monitoração, qualidade de sinal, RSSI, esterilização por calor.

# ABSTRACT

LUQUETA, Roberto Gerson. Evaluation of wireless sensor network for parametric liberation of heat sterilization. 2012. Dissertation (Master in Electrical Engineering). Programa de mestrado profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Campinas, 2012.

This present dissertation aims to propose the use of a wireless sensor network for monitoring the lethality of sterilization process in biologically contaminated materials that uses heat as a sterilizing agent, to replace a wired system. The survey also assesses if sensors could be used as monitors of the parameter in theoretical thermic lethality of the process, and therefore serves as an assistance element in decision making for releasing the materials sterilized in hospitals and laboratories. For this purpose, a platform with sensor nodes was mounted for temperature measurement process, lethality calculation and quality determination of the radio signal and its results were compared with wired commercial equipment.

Keywords: Wireless Sensor Network, lethality, monitoring, signal quality, RSSI, heat sterilization.

# LISTA DE GRÁFICOS

Figura 1 - Diagrama de blocos básico de um nó sensor de RSSF .....	24
Figura 2 – Rede de sensores ponto a ponto ( <i>Polling</i> ). .....	28
Figura 3 - Rede de sensores <i>mesh</i> . .....	28
Figura 4 - Pilha de protocolos da RSSF sem <i>cross-layer</i> . .....	30
Figura 5 - Atenuação do sinal de rádio pelo modelo log distance. ....	35
Figura 6 - Digrama de blocos do CC1101 .....	40
Figura 7 - Valores típicos de RSSI em função da potência de recepção....	41
Figura 8 – Pilha de protocolos do Rádiumo .....	43
Figura 9 - PDC e indicador biológico autocontido - fonte <a href="http://www.gke.de">www.gke.de</a> .....	48
Figura 10 - Curva de temperatura típica de 121°C. ....	51
Figura 11 - Qualificação térmica realizada com <i>data logger</i> com fio. ....	52
Figura 12 - Face traseira do validador com fio - Fonte: GE Kaye Inc. ....	53
Figura 13 - Data loggers sem fio - Fonte: GE Kaye Inc. ....	53
Figura 14 - Exemplo de um CME e a posição dos esterilizadores .....	55
Figura 15 – RSSF utilizada nos testes.....	59
Figura 16 – Hardware da primeira versão da RSSF.....	60
Figura 17 – Telas do analisador de espectro.....	63
Figura 18 - Diagrama do circuito de calibração de potência do Rádiumo...63	
Figura 19 – Montagem do sistema para aferição da potência .....	64
Figura 20 – Tela do analisador de espectro durante a aferição.....	64
Figura 21 – Média obtida na aferição de potência dos transceptores. ....	65
Figura 22 – Forno de calibração .....	66
Figura 23 – Reta de calibração dos sensores de temperatura. ....	66
Figura 24 – Posição dos nós sensores e da base durante os ensaios.....	68
Figura 25 – Disposição dos elementos de teste na Posição 1. ....	69
Figura 26 – Curva de temperatura de um Bier Vessel.....	71
Figura 27 – Fluxograma de operação do validador .....	72
Figura 28 – Fluxograma de operação da coleta de dados pela RSSF. ....	73
Figura 29 – Histogramas posição 2 .....	76
Figura 30 – Histogramas posição 3 .....	76
Figura 31 – Histogramas sensores posição 4.....	77

Figura 32 – Função de distribuição em torno do valor médio na pos. 2. ....	78
Figura 33 - Função de distribuição em torno do valor médio na pos. 3. ....	78
Figura 34 - Função de distribuição em torno do valor médio na pos. 4. ....	79
Figura 35 – Curvas geradas pela RSSF e pelo Validador .....	81
Figura 36 – Gráfico de dispersão RSSF versus validador. ....	83
Figura 37 – Dispersão dos valores de $F_0$ .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de calibração por software para os sensores.....	67
Tabela 2 – Valores para cálculo de atenuação teórica .....	76
Tabela 3 – Média e desvio padrão dos sensores.....	77
Tabela 4 – Margem de fadding para 90% de probabilidade.....	79
Tabela 5 – Desvios padrão entre sensores nos ciclos executados.....	82
Tabela 6 – Resultado do cálculo de $F_0$ enviado pelo Validador .....	84
Tabela 7 - Resultado do cálculo de $F_0$ enviado pela RSSF.....	84
Tabela 8 – $F_0$ calculado pelos dados de temperatura coletados.....	85

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACK – *Acknowledgment*

ADC – *Analog Digital Converter*

AGC – *Automatic Gain Control*

ASK – *Amplitude Shift Keying*

BMS – *Batch Monitoring System*

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CLP – Controlador Lógico Programável

CME – Centro de Materiais e Esterilização

CMOS - *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

CSMA – *Carrier Sense Multiple Access*

CTS – *Clear To Send*

DPCD – *Digital Process Challenge Device*

F<sub>0</sub> – Letalidade

FDC – Função de Distribuição Cumulativa

FDMA – *Frequency Division Multiple Access*

FSK – *Frequency Shift Keying*

GE – *General Electric*

GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying*

GMP – *Good Manufacturing Practices*

ID – *Identification*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

IF – *Intermediate Frequency*

IoT – *Internet of things*

IP – *Internet Protocol*

ISO - *International Organization for Standardization*

LLC – *Logical Link Control*

LNA – *Low Noise Amplifier*

LQI – *Link Quality Indicator*

MAC – *Media Access Control*

MACA – *Multiple Access with Collision Avoidance*

MACAW - *Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless*

MO - *Microrganismo*

MSK – *Minimum Shift Keying*

OOK – *On-off Keying*

PCD – *Process Challenge Device*

PNSU - *Probability of a Non-Sterile Unit*

PTC – *Positive Temperature Coefficient Thermistor*

RF – *Radio Frequency*

RFID – *Radio frequency identification*

RISC - *Reduced Instruction Set Computing*

RSSF – *Rede de Sensores Sem Fio*

RSSI – *Radio Signal Strength Indicator*

RTS - *Request To Send*

SAL - *Sterile Assurance Level*

SIM – *Sensor Interface Module*

SPI - *Serial Peripheral Interface Bus*

SRAM – *Static Random Access Memory*

TDMA – *Time Division Multiple Access*

USB – *Universal Serial Bus*

WSN – *Wireless Sensor Network*

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	As redes de sensores sem fio .....	18
1.2	Situação Problema .....	19
1.3	Hipótese .....	20
1.4	Objetivo .....	20
1.5	Resultado esperado .....	21
1.6	Delimitação da pesquisa .....	21
1.7	Organização do trabalho .....	22
2	RSSF E ESTERILIZADORES .....	23
2.1	Rede de Sensores Sem Fio .....	23
2.2	Esterilizadores.....	43
3	PROPOSTA DE PESQUISA .....	54
3.1	As gerências .....	54
3.2	Propostas existentes .....	57
4	METODOLOGIA .....	59
4.1	Preparação do sistema .....	62
4.2	Calibração da temperatura .....	65
4.3	Caracterização do ambiente .....	68
4.4	Procedimento de simulação de ciclos térmicos.....	70
5	RESULTADOS OBTIDOS .....	75
5.1	Gerência de rede .....	75
5.2	Gerência de dados .....	80
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	86
6.1	Considerações .....	88
6.2	Trabalhos futuros .....	90

7	CONCLUSÃO .....	92
8	REFERÊNCIAS.....	94
9	APÊNDICE A – Código fonte do microcontrolador para o cálculo de $F_0$ .....	100
10	APÊNDICE B – Diagrama eletrônico do sensor da versão inicial. ....	101
11	APÊNDICE C – Artigo publicado no VI Workshop CEETEPS 2011.....	102
12	APÊNDICE D - Artigo publicado no MOMAG 2012 .....	107
13	APÊNDICE E – Diagrama sensor LM-35 no shield.....	112
14	APÊNDICE F – Código Phyton da Aplicação de aquisição de dados. ....	113
15	ANEXO A – Diagramas eletrônicos do <i>shield</i> e do módulo.....	122
16	ANEXO B – Tabelas de valores da distribuição normal.....	123

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 As redes de sensores sem fio

Na sociedade contemporânea a troca de informações entre pessoas em qualquer lugar e a qualquer tempo é uma demanda crescente, assim com a interação de dispositivos de comunicação entre si e com seus usuários. Esta era de plena conectividade se deu em grande parte graças ao advento da computação ubíqua aliada aos avanços em rádio comunicação.

Neste cenário o paradigma da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) vem ganhando cada vez mais espaço no âmbito dos sistemas de telecomunicações modernos (ATZORI, IERA e MORABITO, 2010). Dentre tantas tecnologias que vem emergindo em telecomunicações na direção da IoT, destacam-se as Redes de Sensores sem Fio (RSSF) por serem uma tecnologia que agrega várias áreas do conhecimento, como as especialidades em telecomunicações (rádios, antenas, etc.), tecnologia de microcontroladores, sistemas de controle digital e analógico, entre outros (LOUREIRO, RUIZ, *et al.*, 2003).

As RSSF podem ser aplicadas em praticamente qualquer área do conhecimento onde alguma grandeza possa ser explorada. Existem exemplos destas aplicações em agronomia (BURRELL, BROOKE e BECKWITH, 2004), uso militar (WINKLER, TUCHS, *et al.*, 2008), monitoração de sinais fisiológicos (FU, CHEN, *et al.*, 2011), em ambientes industriais (CONANT, 2011), processos de automação (IKRAM e THORNHILL, 2010) e ambientes de produção farmacêutica e de biotecnologia (NIRAJ, 2009), entre outros. As RSSF podem, ainda, funcionar como atuadores no controle de processos automáticos (AKYILDIZ, SU, *et al.*, 2001).

Na área de saúde humana as RSSF têm um forte apelo, principalmente auxiliando na monitoração de processos nos quais a presença de sensores com fio caracteriza uma dificuldade extra na instalação ou na susceptibilidade de contaminação microbiológica. Além disso, as RSSF podem representar um ganho

em termos de investimento, pois os nós sensores podem ser produzidos em larga escala, serem associados com outras tecnologias, como a identificação por radiofrequência (RFID – *Radio Frequency Identification*) e instalados nos mais inusitados ambientes (BRANDL, GRABNER, *et al.*, 2009).

## 1.2 Situação Problema

No Brasil a maioria das instituições de saúde utilizam as chamadas autoclaves de vapor saturado para a esterilização de artigos médico-hospitalares, tendo como principais parâmetros físicos de controle a temperatura e a pressão. As autoclaves (ou esterilizadores por calor úmido) são equipamentos dotados basicamente de um vaso de pressão (ou câmara) onde é injetada certa quantidade de vapor saturado. O vapor, por sua vez, ao entrar em contato com o material presente no interior da câmara transfere energia e condensa. A transferência de energia que ocorre em todos os materiais também atinge os eventuais microrganismos presentes no meio, desnaturando-os (PERKINS, 1983). Como existe uma relação direta entre a presença do vapor saturado e a temperatura dada em função da lei dos gases ideais (TIPLER e MOSCA, 2009) torna-se possível inferir quão eficiente foi a esterilização em função da temperatura e do tempo de processo.

A liberação do material esterilizado para uso na instituição de saúde se dá através da observação dos resultados físicos da esterilização aliada à comprovação química e microbiológica. Desta forma, a instituição se vale da informação de temperatura e tempo disponibilizado pelo esterilizador como parâmetro físico, faz uso de indicadores de processo químicos que mudam de cor na presença de vapor saturado e comprovam a esterilidade através de ensaios microbiológicos.

De um modo geral a liberação do material para o uso clínico após o processo de esterilização ocorre com a verificação principalmente dos indicadores químicos e da monitoração biológico, gerando custo recorrente para a instituição e geração de resíduo químico e biológico.

Para o acompanhamento do processo de esterilização os equipamentos se valem geralmente de sondas conectadas à câmara que enviam a informação a um registrador de múltiplos canais, o qual armazena os dados ou os transfere via cabos de comunicação a impressoras ou computadores. Em equipamentos mais simples, a informação é enviada via um Controlador Lógico Programável (CLP) para uma impressora para registro dos dados.

Periodicamente (geralmente uma vez ao ano) estes equipamentos devem passar por uma qualificação térmica que faz parte de um processo conhecido como Validação do Processo de Esterilização (ABNT, 2010). No processo de qualificação térmica são utilizados vários sensores distribuídos pela câmara e pela carga para a verificação da temperatura e sua implicância da letalidade do processo de esterilização (PFLUG, 1999). Uma grande parcela destes instrumentos utilizam sistemas cabeados para a coleta de dados e transferência das informações.

Tanto no uso de rotina, quanto no uso no processo de qualificação térmica, os sistemas cabeados representam uma dificuldade adicional de instalação e manutenção que podem inviabilizar, em algumas circunstâncias, o seu emprego pela instituição de saúde.

### **1.3 Hipótese**

Uma RSSF seria a resposta a uma demanda de sistemas de acompanhamento do processo de esterilização por calor de baixo custo e fácil instalação para auxiliar na tomada de decisão, quanto à liberação para uso de artigos estéreis, reduzindo a necessidade de aplicação de indicadores químicos.

### **1.4 Objetivo**

Baseado na diversidade de aplicações das RSSF, o presente trabalho propõe o uso das mesmas para monitorar a relação tempo versus temperatura em esterilizadores a calor úmido e, baseado nestes parâmetros, auxiliar na tomada

de decisão quanto à classificação da esterilidade provável do produto processado. Neste quesito a avaliação realizada é dividida em duas áreas convenientemente classificadas como gerência de rede e gerência de dados.

Na gerência de rede é utilizado o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) observado da base para o nó sensor como preposição de avaliação de qualidade de enlace e realizado o estudo da margem de *fading* para o funcionamento adequado do sistema.

Na gerência de dados considera-se a resposta da rede em função dos dados de temperatura coletados e sua comparação com um equipamento de referência.

Os estudos demonstram que a partir do uso da RSSF é possível determinar-se a letalidade teórica do processo de esterilização por calor úmido e utilizar esta informação para auxiliar na tomada de decisão quanto ao nível de esterilidade provável de um artigo médico-hospitalar. Para alcançar este objetivo são comparadas três fontes de informação: a letalidade da esterilização calculada ( $F_0$ ) e disponibilizada internamente pelo nó sensor, a calculada a partir das informações das temperaturas coletadas e a apresentada pelo instrumento comercial de referência.

## **1.5 Resultado esperado**

Espera-se, como resultado da pesquisa, o desenvolvimento de uma estrutura básica de RSSF que servirá de modelo para a criação de um sistema de monitoração do processo de esterilização por calor capaz de substituir sistemas de monitoração convencionais.

## **1.6 Delimitação da pesquisa**

O trabalho considera uma rede de sensores sem fio operando na frequência de 915 MHz com *pooling* entre a base e os nós sensores. O tipo de modulação e o pacote de dados foram fixados em função do hardware utilizado.

Quanto à gerência de dados a pesquisa concentrou-se exclusivamente na caracterização dos parâmetros de temperatura e tempo baseado em um esterilizador a vapor capaz de controlar todos os atributos necessários para uma esterilização bem sucedida (ACHTERBER, 2005), permitindo a simulação do ciclo de esterilização em bancada com a utilização de fornos de calibração e *Data Logger*.

Deve-se ressaltar o aspecto multidisciplinar do trabalho e a flexibilidade da rede implementada permitem a extrapolação do conceito para outras áreas. O trabalho serve de base para a continuidade de pesquisas de controle microbiológico utilizando as vantagens da RSSF em diferentes sistemas de controle de desenvolvimento microbiano.

## **1.7 Organização do trabalho**

O capítulo 2, intitulado REDE DE SENSORES SEM FIO E ESTERILIZADORES traz o arcabouço teórico dos trabalhos, apresentando os elementos que comporão o projeto e a pesquisa até então publicada a respeito.

O capítulo 3, PROPOSTA DE PESQUISA - apresenta a plataforma sobre a qual os experimentos são desenvolvidos e referenda, como o próprio título sugere, à proposta da pesquisa.

O capítulo 4, intitulado METODOLOGIA, apresenta o desenvolvimento do experimento, define a metodologia de pesquisa e demonstra os resultados obtidos.

No capítulo 5 – RESULTADOS OBTIDOS – são apresentados os resultados dos experimentos executados.

No capítulo 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS – são confrontados os dados obtidos experimentalmente com o produto do delineamento teórico.

Finalmente no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

## **2 REDE DE SENSORES SEM FIO E ESTERILIZADORES**

### **2.1 Rede de Sensores Sem Fio**

#### **2.1.1 Princípios Básicos**

Por vários anos a forma mais comum de processamento de informação tem ocorrido em dispositivos computacionais de propósito geral. Em muitas aplicações estes computadores são usados principalmente para processar algum tipo de informação que é, na sua essência, centrada em torno de um usuário ou, na melhor das hipóteses, indiretamente relacionado ao meio físico onde o sistema está inserido (KARL e WILLIG, 2005).

Mas outra classe de aplicações coloca o ambiente físico no centro da atenção e não o usuário humano, uma vez que os computadores são utilizados para o controle do processo ou simplesmente para sua monitoração, sem interação direta com um indivíduo humano. Neste contexto, estes sistemas embarcados de controle existem em praticamente qualquer dispositivo eletrônico de nosso cotidiano. Estima-se que até 98% de todos os dispositivos computacionais são usados num contexto de eletrônica incorporada (BORIELLO e WANT, 2000). Se adicionarmos a esta visão o aspecto de comunicação sem o uso de condutores, chegamos a um viés da tecnologia das redes de sensores sem fio.

As RSSF consistem em dispositivos individuais (ou nós sensores) capazes de interagir com o seu meio ambiente, detectando ou controlando parâmetros físicos. De um modo geral, esses nós tem que colaborar entre si para cumprir suas tarefas, as quais, geralmente, não seriam capazes de cumprir individualmente, e usam a comunicação sem fio para permitir esta colaboração. Apesar do fato dessas redes também incluírem frequentemente atuadores, o termo Rede de Sensores Sem Fio tornou-se o nome comumente aceito.

As RSSF podem ser compostas desde algumas unidades até milhares de elementos dotados de capacidade de sensoriamento, radiocomunicação e capacidade computacional e que, combinados, formam uma rede local sem fio (WANG e BALASINGHAM, 2010). A Figura 1 ilustra os blocos básicos de um dispositivo da RSSF.

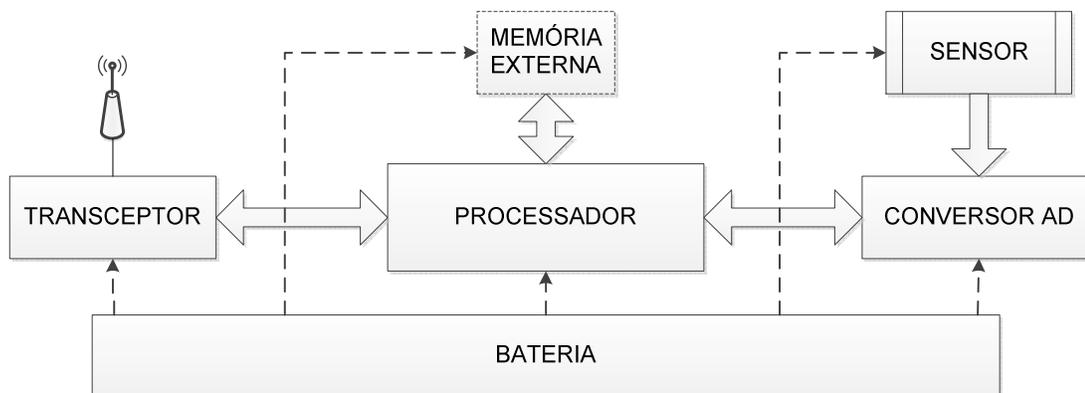


Figura 1 - Diagrama de blocos básico de um nó sensor de RSSF

As RSSF podem ser divididas em um conjunto de três grandes sistemas: o hardware, o software (neste caso o sistema operacional) e a rede, propriamente dita.

#### 2.1.1.1 O hardware

O hardware do nó da RSSF é composto basicamente de um processador embarcado, um transceptor, memória, fonte de energia elétrica e outros dispositivos como sensores, atuadores (relés, *drivers*, etc.), transdutores, sinalizadores (como *leds*, lâmpadas, etc.) ou outros dispositivos de propósito geral.

O sistema de processamento embarcado tem a finalidade de organizar as tarefas, processar dados e controlar outras funcionalidades do hardware. Neste aspecto, são os microcontroladores os dispositivos mais utilizados para a montagem do sistema de controle, graças à sua flexibilidade, capacidade de conexão com outros dispositivos de hardware e baixo custo.

Os transceptores são os dispositivos responsáveis pela comunicação sem fio do nó sensor. Os sistemas de transmissão podem incluir mídias de Rádio Frequência (RF), raios Laser ou infravermelho, sendo que a maioria dos transceptores opera por RF.

Estes transceptores para uso em RSSF devem atender a alguns requisitos (KARL e WILLIG, 2005), como:

- Ser capaz de prover serviços a camadas mais altas da pilha de protocolo como a camada de acesso ao meio (MAC);
- Ter consumo de energia eficiente, já que boa parte da energia da bateria será consumida pelo transceptor;
- Capacidade de operar em múltiplos canais para aliviar o congestionamento em determinadas faixas de frequência;
- Mudar de estado e energia: um transceptor pode operar em modos diferentes para enviar ou receber, utilizar canais diferentes, ou entrar em diferentes estados de conservação de energia. Em qualquer caso, o tempo e a energia necessária para comutar entre dois estados é um mérito importante a ser observado no transceptor. O tempo de resposta entre enviar e receber, por exemplo, é importante para vários protocolos de acesso ao meio;
- Capacidade de mudança da codificação, taxa de transmissão, de modulação e da potência de transmissão para adaptação da rede ao processo, ambiente ou para a conservação de energia;
- Figura de ruído adequada;
- Ganho, eficiência e sensibilidade que permitam a disponibilidade do nó sensor na rede.

Ainda podem ser considerados outros elementos no transceptor como faixa de operação, largura de banda ocupada, espalhamento, sensoriamento da qualidade de frequência da portadora (LQI - *Link Quality Indicator*), da qualidade

do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*), estabilidade da frequência e faixa de tensão de operação.

O sistema de armazenamento de memória pode ou não estar dentro do microcontrolador. Geralmente as memórias são do tipo flash para armazenamento do sistema operacional e variáveis não voláteis e do tipo Acesso Aleatório Estático (SRAM) para o armazenamento temporário.

A energia na RSSF é consumida para o sensoriamento, a comunicação e para o processamento de dados, sendo em geral a comunicação de dados o maior elemento consumidor. As fontes de energia podem ser oriundas de fontes de corrente alternada, baterias ou capacitores. Na maioria das RSSF são as baterias as principais fontes de energia. Outras fontes de energia também vêm sendo estudadas, assim como técnicas de obtenção desta energia no ambiente onde os sensores estão inseridos (técnica conhecida como *energy harvesting*), com a finalidade principal de aumentar o tempo de vida dos sensores no ambiente (SUDEVALAYAM e KULKARNI, 2011).

Os sensores presentes no *hardware* são os dispositivos responsáveis por produzirem o sinal de resposta à mudança das condições físicas do ambiente. Teoricamente qualquer grandeza presente no meio onde o nó sensor estiver inserido, pode ser medida. No processo de medição o sinal analógico proveniente dos sensores é digitalizado a partir de um conversor analógico-digital (ADC) e enviado ao sistema de processamento. A qualidade e precisão da medição do canal analógico, neste caso, estão intimamente ligadas à resolução do ADC.

O *hardware* pode, ainda, contar com outros dispositivos e interfaces de automação como circuitos atuadores, transdutores, sinalizadores e condicionadores que, dependendo do projeto, permitem a interação do nó sensor com o ambiente no qual ele está inserido.

#### **2.1.1.2 O sistema operacional**

O objetivo do sistema operacional em uma RSSF é promover a abstração dos recursos de hardware de forma segura e conveniente (WANG e

BALASINGHAM, 2010, p. 3). Os sistemas operacionais para este tipo de sistema são geralmente simples em função das limitações de recursos dos microcontroladores utilizados na construção das RSSF.

De fato, um sistema operacional para RSSF deve considerar como pontos relevantes a arquitetura do código, o modo de programação, algoritmo de priorização, gerenciamento e proteção dos dados de memória, suporte ao protocolo de comunicação e compartilhamento de recursos (FAROOQ e KUNZ, 2011).

Várias plataformas de sistema operacional surgiram nos últimos anos como, por exemplo, o *TinyOS* (TINYOS, 2012), o *LiteOS* (LITEOS, 2012) e o *Contiki* (CONTIKI, 2012) mas, na maioria das RSSF, no entanto, prevalece ainda o uso de *firmwares* proprietárias.

### **2.1.1.3 Estrutura de rede**

As RSSF podem ser estruturas extremamente heterogêneas e seu projeto é influenciado por vários fatores que incluem desde o meio de transmissão até elementos como tolerância a falhas, ambiente de operação, topologia, limitações de *hardware*, escalabilidade, consumo de energia, custos de produção, latência e precisão (AKYILDIZ, SU, *et al.*, 2001) (CAMILO, RODRIGUES, *et al.*, 2006).

Estas redes podem ser do tipo ponto a ponto, multiponto ou com e sem salto. Uma forma de montagem ponto a ponto é a apresentada na Figura 2. Nesta representação os nós sensores enviam as informações coletadas para um nó central (ou base), não ocorrendo comunicação direta entre os nós sensores adjacentes.

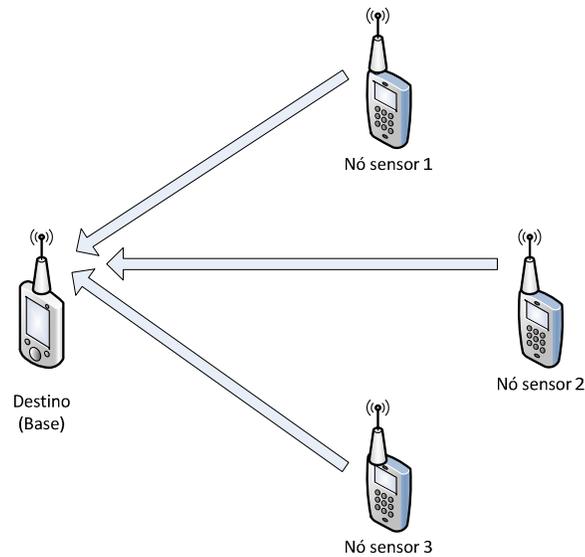


Figura 2 – Rede de sensores ponto a ponto (*Polling*).

Em outras formas construtivas, como nas redes com multi saltos, esta mesma rede pode ser implementada de forma a permitir roteamento (HILL, SZEWCZYK, *et al.*, 2000). Neste caso, ao invés de um único caminho ou apenas um destino, a rede pode se beneficiar de uma variedade de caminhos possíveis, funcionando inclusive com rotas redundantes (Figura 3).

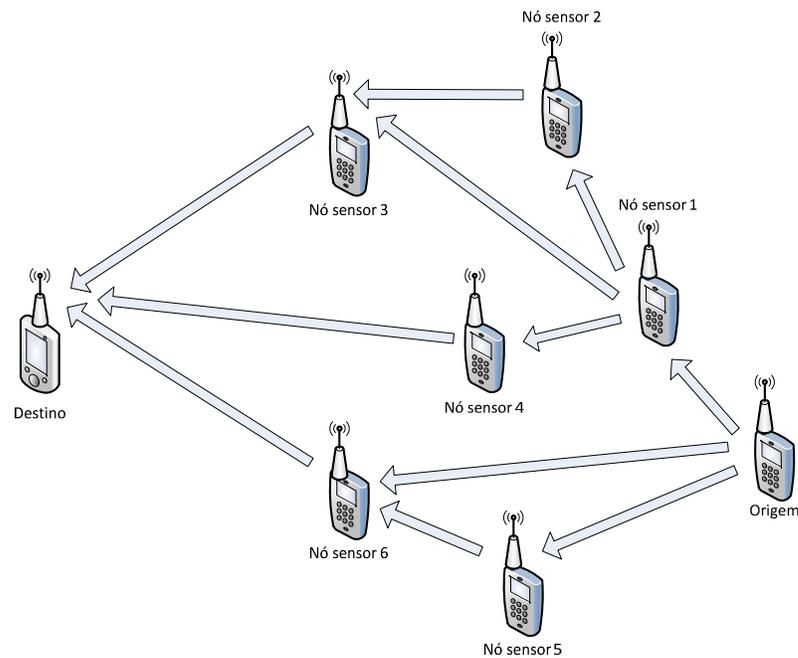


Figura 3 - Rede de sensores *mesh*.

A escolha da forma construtiva vai depender basicamente da finalidade do sistema. Por exemplo, se a finalidade for cobrir uma grande área, uma rede de múltiplos saltos pode ser considerada a mais adequada, já que se poderá cobrir uma grande área e manter a rede funcionando mesmo com a falha de alguns sensores na rede. Por outro lado, uma rede deste tipo demanda maior capacidade de processamento, podendo aumentar o custo da instalação.

Por outro lado, se a área de cobertura for restrita e não houver interesse ou necessidade de economizar energia o projeto de rede considerando o envio direto ao destino pode ser mais econômico e de menor complexidade para o desenvolvimento e instalação.

### **2.1.2 A pilha de protocolos da RSSF**

Ao projetar uma RSSF é adequado que se estabeleça uma pilha de protocolos conveniente para este tipo de rede. Referências recentes (DARGIE e POELLABAUER, 2010) (AKYILDIZ e VURAN, 2010) apontam a estrutura equivalente à pilha TCP/IP como um padrão adequado para a RSSF.

Neste modelo, a pilha de protocolos é segmentada conforme a Figura 4. Cada camada da pilha representa uma funcionalidade que será descrita em seguida em uma abordagem de cima para baixo.

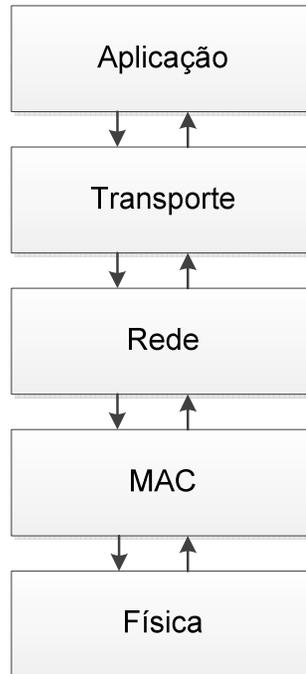


Figura 4 - Pilha de protocolos da RSSF sem *cross-layer*.

#### 2.1.2.1 A camada de Aplicação

Esta é a camada mais alta da pilha e que inclui a aplicação principal, bem como funcionalidades de gestão de vários elementos do sensor. Além do código aplicativo residem nesta camada a capacidade de processamento de consulta das camadas inferiores e a gestão da funcionalidade da rede.

É na camada de aplicação que está implementada a capacidade de interface com os dispositivos sensores e é nela que são tratados os valores enviados pelos conversores analógico-digital (ADC). Outra função desta camada é o tratamento das informações que serão enviadas, como por exemplo, dados periódicos a serem calculados e disparados pelo relógio do controlador.

#### 2.1.2.2 A camada de Transporte

A camada de transporte é responsável pela confiabilidade de transmissão do pacote, que utiliza táticas para garantir a integridade dos dados. É nesta camada que é feita a contagem de pacotes transmitidos e a confirmação do

recebimento de pacote do nó receptor para o nó transmissor (ACK – *Acknowledgment* ). A camada pode ainda fazer o controle de transmissão para dominar o congestionamento de dados ou realizar tarefas de multiplexação e demultiplexação de acordo com a aplicação adotada (AKYILDIZ e VURAN, 2010).

Embora esta camada tome por referência a pilha TCP/IP, na RSSF nos deparamos com algumas limitações a este modelo, uma vez que os nós sensores têm restrições quanto à capacidade de memória disponível e pouca energia (ou ao menos a necessidade de conservação de energia), ou em outras palavras, a implantação de qualquer técnica de controle deve estar condicionada ao tipo de informação a ser transportada.

### **2.1.2.3 A camada de Rede**

A camada de rede é responsável pela identificação do sensor (ID) na rede e pelos algoritmos de roteamento. Aliás, o desenvolvimento de algoritmos de roteamento em RSSF é um dos tópicos mais estudados pela comunidade acadêmica uma vez que trazem desafios em várias frentes, como consumo de energia, atendimento ao nível de aplicação, escalabilidade, endereçamento, robustez, topologia, entre outros (AL-KARAKI e KAMAL, 2004).

### **2.1.2.4 A camada de acesso ao meio (MAC)**

Na pilha TCP/IP convencional a segunda camada (a partir do meio físico) é referenciada como camada de enlace e possui as funções de *Logical Link Control* (LLC) sendo responsável pela conexão da segunda com a terceira camada (IP), e pela função de controle MAC (TANENBAUM, 2003). Como não é utilizado o LLC em RSSF a segunda camada é denominada, geralmente, como camada MAC. Tecnicamente, a subcamada MAC é a parte inferior da camada de enlace de dados.

Em termos de atribuição a camada MAC é responsável pela coordenação da comunicação entre os elementos da rede já que uma RSSF utiliza um canal de multiacesso, ou seja, este canal é compartilhado por todas as estações adjacentes, ocorrendo uma disputa pelo meio de acesso. O controle de MAC é

justamente o mecanismo que permite o compartilhamento do canal e minimiza a probabilidade de colisão das mensagens transmitidas ao mesmo tempo. A classificação dos protocolos MAC pode ser feita da seguinte maneira (DARGIE e POELLABAUER, 2010):

i. Protocolos livres de disputa:

Designação fixa: CDMA, FDMA, TDMA;

Designação dinâmica: *Polling*, *Token passing*, *Reservation-Based*.

ii. Protocolos baseados em disputa:

ALOHA, CSMA, MACA, MACAW.

Protocolos livres de disputa com designação fixa não apresentam colisão, pois estes alocam uma das dimensões (frequência, tempo ou código) e a comunicação ocorre exclusivamente em uma delas.

Na designação dinâmica a base geralmente realiza uma eleição (*polling*) entre os sensores e cada um responde à sua requisição da base não ocorrendo, portanto, colisão. O *polling* é fácil de programar no código da MAC e pode ser bastante útil em RSSF quando não há grandes exigências em termos de tempo de busca de informações. Por outro lado, caso a rede cresça muito esta estratégia pode não ser adequada. As redes baseadas em configurações do tipo mestre-escravo geralmente utilizam *polling* para acesso ao meio.

As outras formas de designação dinâmica são por passagem de um *token* entre as estações que desejam transmitir e a alocação de trechos (*slots*) de tempo estáticos, permitindo aos nós sensores a reserva de *slots* baseado na demanda do sistema.

O protocolo baseado em disputa ALOHA consiste na técnica em que cada nó transmite e espera uma confirmação do sucesso da transmissão. No CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) o transceptor “escutar o meio de comunicação” antes da transmissão. No MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) o transceptor envia uma solicitação de reserva do canal (RTS) e recebe do nó

requisitado a autorização para a transmissão (CTS). Finalmente na estratégia MACAW (MACA para *Wireless*) a estação que recebe o frame transmitido responde com uma confirmação (Acknowledgement – ACK), indicando às demais estações que o meio está livre.

Em RSSF os protocolos baseados em disputa são mais tradicionais, sendo que a estratégia MACAW é a que melhor adere a sistemas sem fio.

Existem trabalhos também que já consideram o suporte de múltiplos canais na RSSF, estendendo a MAC para esta finalidade (LOHIER, RACHEDI, *et al.*, 2011) (ZHOU, HUANG, *et al.*, 2006).

#### **2.1.2.5 A camada Física**

A camada Física é a camada mais próxima do *hardware* e que faz a transcrição do frame para o meio de comunicação que, neste caso, é o sistema sem fio. Nesta camada são ajustados também os parâmetros de modulação do sinal, potência, taxa de transmissão, canal de frequência e eventualmente o ganho da antena.

Os ajustes dos parâmetros da camada física tem relevante importância no desempenho da rede e interferem diretamente na forma com que o nó sensor interage no ambiente. O ajuste de potência, por exemplo, pode ser determinístico para o alcance da rede, enquanto o esquema de modulação tem impacto direto no consumo de energia do nó sensor (SHIH, CHO, *et al.*, 2001).

#### **2.1.2.6 Cross-Layer em RSSF**

Uma observação importante para a pilha de protocolos apresentada em relação à RSSF é que este modelo denota um desafio em termo de consumo de energia em função da interface entre as camadas. Uma das formas de diminuir o consumo de energia em uma RSSF é através ações de *cross-layer* (AKYILDIZ, VURAN e AKAN, 2006). Uma série de estudos recentes aponta o *cross-layer* de protocolo como uma alternativa viável às camadas convencionais para o uso em

RSSF para aumentar a eficiência de comunicação e reduzir o consumo de energia (PONAGANTI, SHEKAR e SAGAR, 2012).

### 2.1.3 Propagação de sinais

O canal de rádio por sua natureza aleatória impõe limitações importantes para o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio. Ao longo da história vários estudos têm sido conduzidos para o desenvolvimento de modelos que possam expressar com certa assertividade o funcionamento dos canais de rádio. Alguns destes modelos se mostram ferramentas clássicas para a exploração dos sistemas de rádio e serão explorados nesta seção.

#### 2.1.3.1 Modelo do Espaço Livre

O modelo do Espaço livre (proposto por Friis em 1946) considera que a potência recebida por um dispositivo é diretamente proporcional à potência transmitida, à abertura das antenas de transmissão e recepção e inversamente à atenuação no espaço livre (em função da distância entre o transmissor e receptor e da frequência de operação) (HAYKIN e MOHER, 2008, p. 37). Matematicamente o modelo pode ser dado pela Expressão (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)

$\lambda$  = comprimento de onda (m)

$d$  = distância entre as antenas (m)

$L_{EL}$  = atenuação no espaço livre (dB)

A mesma equação pode ser apresentada em dBm pela Expressão (2):

$$P_{RX_{dBm}} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dBi}} + G_{RX_{dBi}} - L_{EL_{dB}} \quad (2)$$

### 2.1.3.2 Modelo Log-Distance

O modelo *Log-Distance* é empregado na caracterização de ambientes de propagação internos e externos. Este modelo considera que a potência recebida a uma distância  $d$  pode ser calculada em função de um expoente de perda de percurso (tecnicamente conhecido como *path loss*) e uma potência de referência recebida à distância  $d_0$  próxima da estação base (Figura 5).

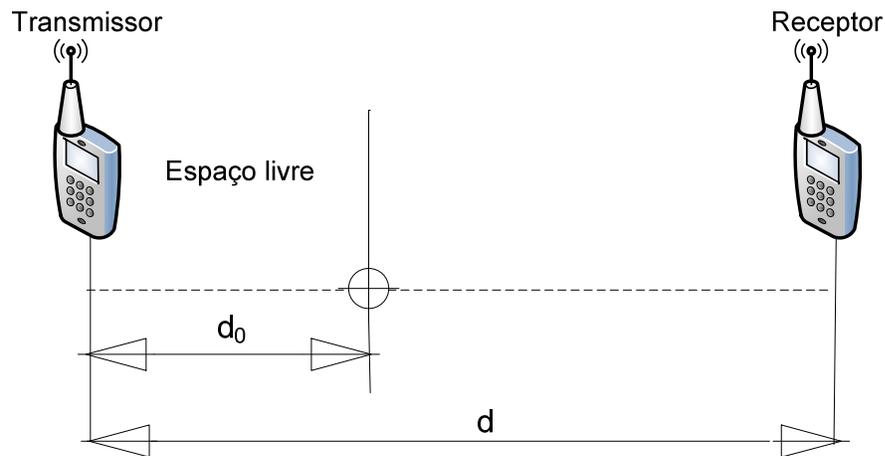


Figura 5 - Atenuação do sinal de rádio pelo modelo log distance.

Assim a Expressão (3) calcula  $P_r(d)$ , onde  $\beta$  é o *path loss* que define o ambiente (RAPPAPORT, 2009).

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

A atenuação até o ponto  $d_0$  é considerada como sendo do espaço livre. A partir das Expressões (2) e (3) obtém-se a Expressão (4) que caracteriza o expoente de perda de percurso (*path loss*):

$$\beta = \frac{P_R(d_0)_{dBm} - P_R(d)_{dBm}}{10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right)} \quad (4)$$

A potência  $P_r(d_0)$  é a potência recebida na distância de referência  $d_0$  e depende do ganho das antenas de transmissão ( $G_{TX}$ ), de recepção ( $G_{RX}$ ), da potência de transmissão ( $P_{TX}$ ) e da atenuação do meio à distância  $d$  conforme Expressão (5).

$$P_r(d_0)_{dBm} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dBm}} + G_{RX_{dBi}} - 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (5)$$

Quando traçada em uma escala logarítmica a perda no caminho (*path loss*) modelada é uma reta com inclinação igual a  $10\beta$  dB por década (RAPPAPORT, 2009, p. 91). O valor de  $\beta$  depende das características do ambiente e quando seu valor é igual a dois temos a atenuação no espaço livre.

### 2.1.3.3 Modelo de fator de atenuação

O modelo *log-distance* quando utilizado em prédios sujeitos a obstáculos apresenta um desvio padrão na ordem de 13dB.

Um modelo mais flexível que considera a presença de obstáculos entre o transmissor e o receptor foi proposto em 1992 por Seidel (SEIDEL e RAPPAPORT, 1992). De acordo com os autores este modelo demonstra um desvio padrão de perda de caminho (medido versus previsto) na ordem de 4dB (RAPPAPORT, 2009, p. 104).

A Expressão (6) apresenta o modelo proposto para determinação da atenuação total  $PL_{dB}$ :

$$PL_{dB} = 10 \log \left( \frac{4\pi \cdot d_0}{\lambda} \right)^2 + 10\beta_F \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + FAF_{dB} + \sum PAF_{dB} \quad (6)$$

Onde:

$\beta_F$  = valor do expoente para medição no mesmo andar

$FAF$  = *Path loss* no andar para um número específico de andares no prédio em dB;

$PAF$  = *Path loss* parcial para uma obstrução específica encontrada por um raio tridimensional desenhado entre transmissor e receptor em dB.

Os valores tabelados de  $\beta_F$ ,  $FAF$  e  $PAF$  podem ser encontrados na literatura de referência (SEIDEL e RAPPAPORT, 1992, p. 210-211).

Considerando que um sinal de rádio sofre variações de intensidade ao longo do tempo, que são caracterizadas como tendo distribuição log-normal, a Expressão (6) pode ser ampliada para um modelo mais completo conforme Expressão (7), que considera também uma variável aleatória normal  $X_\sigma$ (dB) com desvio padrão  $\sigma$ (dB) (RAPPAPORT, 2009).

$$PL_{dB} = 10 \log \left( \frac{4\pi \cdot d_0}{\lambda} \right)^2 + 10\beta_F \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + FAF_{dB} + \sum PAF_{dB} + X_\sigma \quad (7)$$

Expressão (7) é, na verdade, a junção do modelo proposto por Seidel e o modelo de *Shadowing*. Embora a implantação do modelo não descarte uma análise empírica do ambiente, os valores de atenuação já foram estudados e tabelados (RAPPAPORT, 2009, p. 105). O desvio padrão  $\sigma_{dB}$  é o elemento que caracteriza os diversos tipos de ambientes.

### 2.1.3.4 Margem de *fading*

A partir da Expressão (7) é possível determinar a probabilidade de um enlace rádio funcionar ou não, considerando que a distribuição do sinal tem comportamento gaussiano.

Para calcular esta probabilidade devemos determinar a função de distribuição cumulativa (FDC) a partir da densidade de probabilidade ( $p_x$ ).

Em uma distribuição gaussiana, a probabilidade de uma variável  $x$  assumir um determinado valor dentro de um determinado intervalo com desvio padrão  $\sigma$  e média  $\mu$  é dada pela Expressão (8).

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (8)$$

Integrando-se a função de densidade de probabilidade obtém-se a função de distribuição cumulativa gaussiana (FDC) (RIBEIRO e BARRADAS, 1980).

De modo geral a FDC é difícil de ser calculada e por isso costuma-se construir tabelas. Um caso típico de tabelas universais é a função de Gauss normalizada, que possui média nula e desvio padrão unitário.

A tabela da variável aleatória normal padrão  $\Phi$  é apresentada no Anexo B. Para se utilizar esta tabela temos que considerar uma variável aleatória Gaussiana  $X$  com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ , cuja FDC é dada pela Expressão (9) (YNOGUTI, 2011).

$$FDC(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (9)$$

Ajustando a função estatística aos termos de propagação resulta que:

$\Phi$  é variável aleatória normal padrão tabelada;

$x$  é o valor de potência do sinal de rádio;

$\sigma$  é o desvio padrão do sinal estudado;

$\mu$  é a média da distribuição log-normal do sinal estudado.

A partir da tabela de valores de  $\Phi$  do Anexo B podemos determinar a margem de *fading* necessária para garantir a probabilidade de funcionamento do enlace para um determinado valor de sinal de potência e desvio padrão. A probabilidade percentual é dada pela Expressão (10) (RIBEIRO e BARRADAS, 1980, p. 199).

$$Pp(x)\% = (1 - \Phi). 100 \quad (10)$$

Onde:

$Pp(x)$  é a probabilidade da potência estar acima de um determinado valor percentual;

$\Phi$  é variável aleatória normal padrão tabelada, obtida a partir da Expressão (9).

Como a tabela considera valores de  $\Phi$  correspondentes a um  $x$  da função com  $\mu=0$  e  $\sigma=1$  a operação fica simplificada. Sabendo-se a probabilidade esperada obtém-se o  $\Phi$  e encontrando-se o valor de  $x$  na tabela. A margem de fading será, então, o produto de  $x$  pelo  $\sigma$ .

#### **2.1.4 Plataforma RADIUINO para Rede de Sensores sem Fio**

A plataforma RADIUINO (RADIUINO, 2012) foi criada em 2010 através de uma iniciativa do professor Dr. Omar Carvalho Branquinho tomando por base o ambiente de desenvolvimento Arduino (ARDUINO, 2011) e consiste de uma biblioteca preparada para realizar transmissões sem fio na banda de 915MHz utilizando o transceptor CC1101 da Texas Instruments, integrada a um módulo Arduino via SPI e pinos de interrupção.

A estrutura padrão da plataforma utilizada é formada, além do firmware do RADIUINO, por um conjunto de hardware que tem por base o transceptor CC1101, um microcontrolador MegaAVR (ATMEL, 2012) e outros componentes. Mais

especificamente para a realização do trabalho foram utilizados módulos da família RFBee produzidos pela Seeedstudio (RFBEE, 2009).

#### 2.1.4.1 O transceptor

O transceptor utilizado é o CC1101 da Texas Instruments (TEXAS, 2011). Este transceptor opera nas bandas de frequência de 300-348 MHz, 387-464 MHz ou, 779-928 MHz podendo utilizar as modulações *Binary Frequency Shift Keying* (2-FSK), *Quaternary Frequency Shift Keying* (4-FSK), *Gaussian shaped Frequency Shift Keying* (GFSK), *Minimum Shift Keying* (MSK) e *On-Off Keying* (OOK).

O diagrama simplificado do CC1101 é o apresentado na Figura 6:

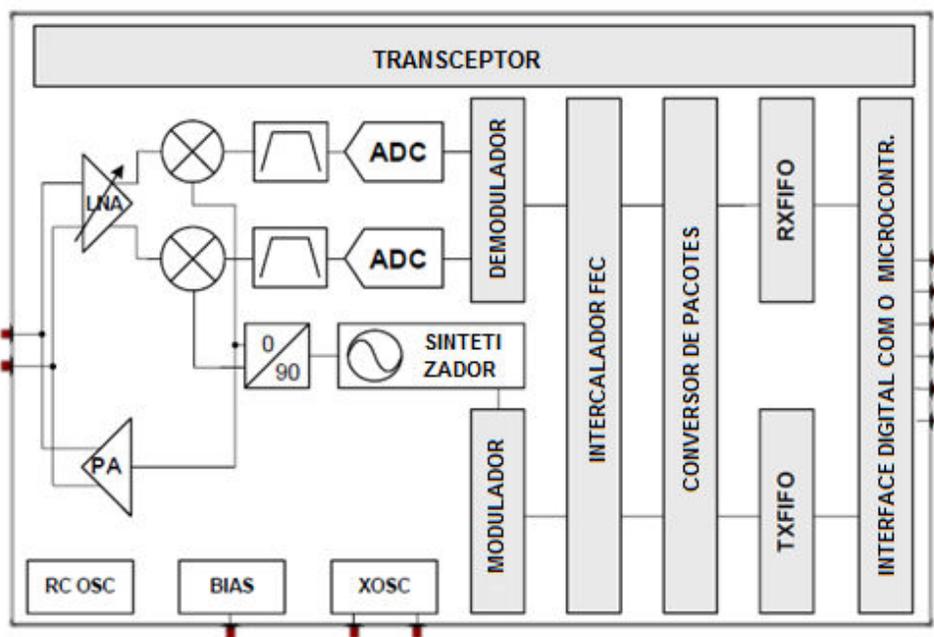


Figura 6 - Diagrama de blocos do CC1101  
Fonte: datasheet do componente – Texas Instruments.

De acordo com o diagrama da Figura 6, O sinal de radiofrequência (RF) recebido é amplificado pelo amplificador de baixo ruído (LNA) e convertido em quadratura (I e Q) para a frequência intermédia (IF). No IF, os sinais I / Q são digitalizados pelos conversores analógico-digital (ADCs).

Tanto o controle automático de ganho (AGC), quanto as etapas de filtragem de canal, demodulação e sincronização de pacotes são realizados digitalmente. A parte transmissora da CC1101 é baseada em sintetizador de RF com elementos conversores diretamente no chip.

A frequência de referência do sintetizador é gerada por um cristal externo ligado aos terminais XOSC\_Q1 e XOSC\_Q2. Este oscilador também gera o clock de referência para o ADC e para a interface digital.

A interface digital é a parte do hardware que permite a troca de dados com o microcontrolador.

Uma característica relevante neste transceptor é a disponibilidade do parâmetro de Indicação da Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication* – RSSI). Este parâmetro pode ser utilizado como métrica em estudos de propagação de sinal, uma vez que guarda relação com a potência do sinal de recepção do canal. No CC1101 o RSSI é dado em dBm com uma resolução de  $\frac{1}{2}$  dB e seu valor é linear em relação a potência de entrada do transceptor, conforme podemos observar na Figura 7.

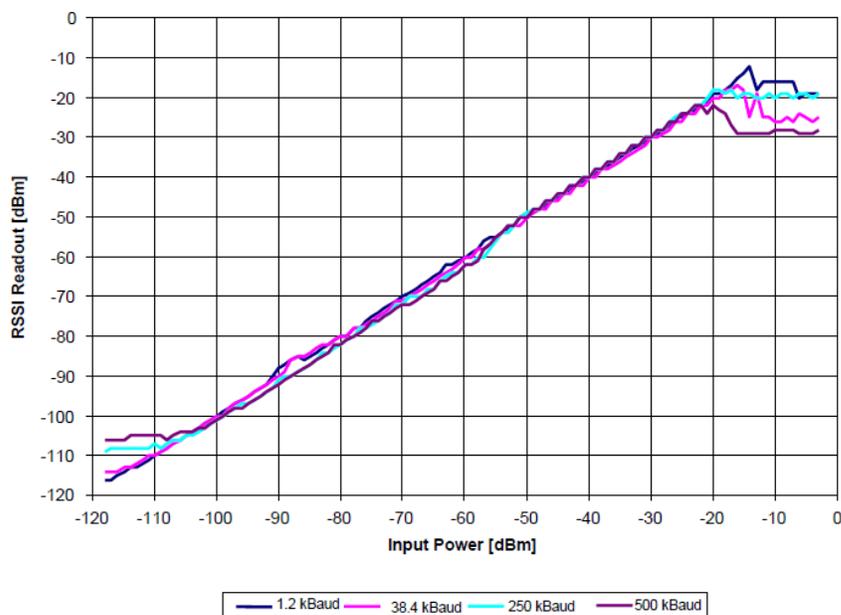


Figura 7 - Valores típicos de RSSI em função da potência de recepção  
Fonte: datasheet do CC1101 - Texas Instruments.

A comunicação entre o transceptor e o microcontrolador ocorre por uma interface serial de quatro fios (SPI) através da qual é possível realizar a configuração do transceptor e o acesso aos dados armazenados.

#### **2.1.4.2 O microcontrolador**

O microcontrolador utilizado na plataforma de trabalho é da família megaAVR produzido pela Atmel. Esta família conta com microcontroladores de 8 bits e com memória flash que vão de 4kB a 128kB dependendo do modelo. O chip de referência para conexão com o transceptor CC1101 na plataforma RFBee é o Atmega168.

O Atmega168 é um microcontrolador CMOS de arquitetura RISC com 16kB de memória para programa, 23 entradas ou saídas digitais e oito entradas analógicas de 10 bits.

#### **2.1.4.3 O firmware**

O firmware do Radiuino está estruturado em pilha de protocolos semelhante às camadas do modelo TCP/IP com suas funcionalidades específicas.

O nó sensor possui todas as camadas da pilha, desde a física até a aplicação. Já o nó da base apresenta somente as camadas física, MAC e rede. A Figura 8 apresenta a distribuição da pilha de protocolos do Radiuino.

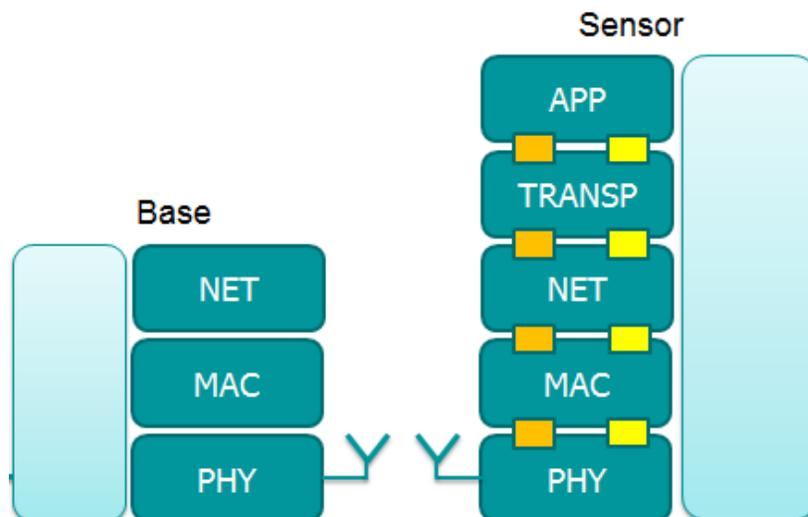


Figura 8 – Pilha de protocolos do Radiuino

Neste exemplo as camadas de Transporte e aplicação podem ser gerenciados por um computador ligado à base, onde também serão armazenados os dados coletados pela rede.

## 2.2 Esterilizadores

### 2.2.1 Esterilização por calor

O processo de esterilização é definido na Farmacopeia Brasileira como *“Método que tem por finalidade remover ou destruir todas as formas de vida, animal ou vegetal, macroscópicas ou microscópicas, saprófitas ou não, presentes no produto considerado, sem garantir a inativação completa de toxinas ou enzimas celulares.”* (ANVISA, 2010, p. 321).

Um artigo pode ser considerado estéril quando a probabilidade de sobrevivência de um microrganismo (MO) alvo em um meio de cultura padrão (onde havia previamente proliferado) é da ordem de 1 por milhão (PFLUG, 1999). Esta probabilidade é conhecida no meio como PNSU (*Probability of a Non-Sterile Unit*) ou, ainda, SAL (*Sterile Assurance Level*).

A acepção do processo de esterilizaço depende da disponibilidade e compatibilidade do artigo a ser processado. As tecnologias de esterilizaço mais empregadas atualmente sã as que empregam como agente esterilizante os seguintes produtos (BOCA, PRETORIUS, *et al.*, 2002):

- Calor seco ou úmido;
- Compostos ou agentes químicos;
- Gases esterilizantes;
- Irradiações ionizantes;
- Filtração esterilizante.

A preferência pela esterilizaço por calor pode ser explicada por apresentar uma série de vantagens, tais como: velocidade, eficácia, fácil validação, boa relação custo/benefício e o baixo impacto ambiental (ACHTERBER, 2005).

O impacto do agente esterilizante (no caso o calor) no MO alvo é explicado pela cinética de morte microbiana, onde assumimos que a morte da maioria dos MO pela ação do calor seja a resultante de uma reação de primeira ordem (RAHN, 1945), conforme e Expressão (11):

$$\frac{dN}{dt} = KN \quad (11)$$

Onde:

N = número de MO sobreviventes após o tratamento;

t = tempo de tratado;

K = constante (taxa de reação).

Rearranjando a Expressão (11) e integrando os dois lados, teremos:

$$\ln N = Kt \quad (12)$$

Considerando que no tempo  $t_0$  a população inicial é igual a  $N_0$  e desde que a equação esteja na forma logarítmica (BIGELOW, 1921), se pode ajustar a Expressão (12) para:

$$\ln N = Kt + \ln N_0 \quad (13)$$

Este é o modelo de curva de sobrevivência semilogarítmica de Kahn. Se adotarmos  $\ln N = y$  e  $t = x$ , teremos uma equação linear, conforme Expressão (14).

$$y = K_x + y_0 \quad (14)$$

Uma vez que:

$$\ln x = 2,303 \log x \quad (15)$$

A Expressão (12) combinada com as Expressões (14) e (15) se transforma na Expressão (16):

$$\log \frac{N_0}{N} = 0,4343 \cdot Kt \quad (16)$$

Onde K representa o grau de inclinação da curva de sobrevivência do microrganismo alvo. É justamente a curva de sobrevivência que demonstra o número de sobreviventes em intervalos de tempos após o início da exposição dos microrganismos ao agente esterilizante.

Em outras palavras, se K é o grau de inclinação da reta podemos rearranjar a Expressão (16) para a Expressão (17).

$$K = \frac{\Delta \log N}{\Delta t} \quad (17)$$

Das Expressões (16) e (17), resulta a Expressão (18) para um ciclo logarítmico unitário.

$$K = \frac{-2,303}{\Delta t} \quad (18)$$

Como a unidade de  $K$  é dada em  $\text{min}^{-1}$ , na prática se adota o valor  $D$  como indicador de inclinação da curva de mortalidade. O valor  $D$  se relacionada com o valor  $K$  conforme a Expressão (19):

$$D = \frac{2,303}{K} \quad (19)$$

Definimos o valor  $D$  como: “O tempo (em minutos) necessário para reduzir, numa determinada temperatura, uma população microbiana a um décimo da população inicial”.

É importante ressaltar que o valor  $D$  varia em função da temperatura. Logo sua notação normalmente é feita na forma  $D_T$ , por exemplo:  $D_{121} = 1 \text{ min}$ .

O valor  $D$  de cada MO define sua resistência à esterilização por calor.

### **2.2.2 Monitoração da esterilização e a liberação paramétrica**

Para que um artigo recém-esterilizado seja destinado ao uso em procedimentos em humanos dentro da instituição de saúde, o processo deve ser monitorado e sua eficiência comprovada. O procedimento de controle (também conhecido como monitoração) considera basicamente três parâmetros para a liberação do material após o processo: o físico, o químico e o biológico (RUTALA, WEBER e HICPAC, 2008).

A monitoração física da esterilização por calor úmido considera o calor, o tempo e a presença do vapor saturado seco como variáveis a serem monitoradas. Adicionalmente a pressão do sistema também pode ser considerada, para comprovação da boa relação entre a temperatura e a presença do agente esterilizante isento de mistura com outros gases como o ar.

A monitoração química é feita por materiais e indicadores especialmente desenvolvidos para este fim, e estes são classificados conforme a aplicação e nível de execução no processo de esterilização conforme norma específica (ISO11140, 2005).

A classificação dos indicadores químicos de acordo com a norma ISO11140 não é hierárquica e seus elementos são divididos em seis níveis:

Indicadores classe 1 - são indicadores de processo usados externamente e são projetados para reagir a uma ou mais variáveis críticas. Demonstram apenas que os pacotes passaram pelo processo, sem garantir sua eficácia.

Indicadores classe 2 - são indicadores para uso em ensaios específicos. O mais usual destes indicadores são o teste conhecido como Bowie & Dick e o teste de lote BMS.

Indicadores classe 3 - São indicadores de uma variável, que geralmente não são utilizados em ambiente hospitalar.

Indicadores classe 4 - são os projetados para reagir a duas ou mais variáveis e são conhecidos como multi-variável ou multi-paramétricos.

Indicadores classe 5 – São integradores de processo. Projetados para reagir a todos os parâmetros críticos do processo de esterilização e para equivaler aos Indicadores biológicos.

Para cada agente esterilizante existe um microrganismo mais resistente ao processo, que é chamado de indicador biológico de esterilização (PFLUG, BEARMAN e JACOBSON, 1972). No caso da esterilização por vapor saturado utiliza-se o *Geobacillus stearothermophilus* como microrganismo alvo. A curva de resposta do indicador classe 5 acompanha a curva de morte do microrganismo alvo do processo.

Frente a tal característica, ele é um simulador biológico e é aceito como liberador de carga.

Indicadores classe 6 – são projetados para reagir a todas as variáveis críticas do processo de esterilização a um determinado ciclo, sem, no entanto, guardar relação com a morte microbiana. Estes indicadores recebem a denominação de emuladores.

A monitoração biológica é executada com o uso de microrganismos previamente selecionados e determinados para cada tipo de agentes esterilizante (PFLUG, BEARMAN e JACOBSON, 1972).

Como a comprovação biológica do processo de esterilização não pode ser executada analisando-se diretamente o material esterilizado o que se faz normalmente é a construção de um dispositivo de desafio que possa representar o desafio microbiológico de todas as cargas, conhecido como 'Dispositivo de Desafio de Processo Microbiológico' ou, em inglês *Biological Process Challenge Device* (Bio PCD). Dentro dos PCDs são inseridas cápsulas esporos inoculados e um meio de cultura, chamadas de indicadores biológicos autocontidos (Figura 9).

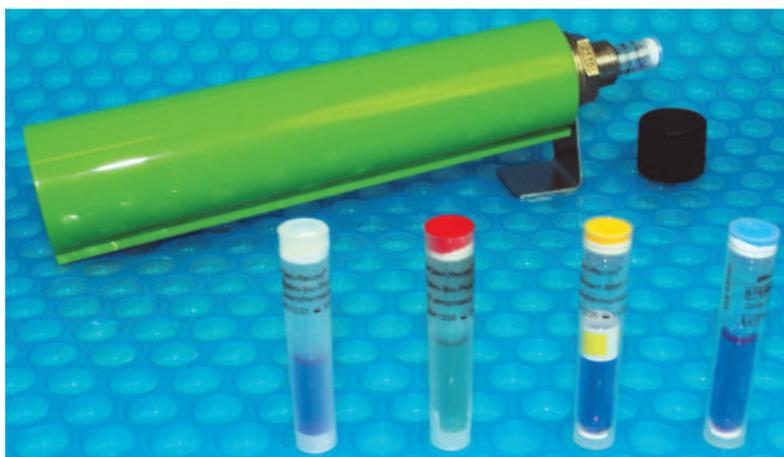


Figura 9 - PDC e indicador biológico autocontido - fonte [www.gke.de](http://www.gke.de)

Considerando que existe relação direta entre os processos de monitoração, em alguns casos, como na produção de medicamentos esterilizados por calor pode-se utilizar um tipo de parâmetro (como o físico ou o químico) para a liberação do material esterilizado sem a necessidade do teste de esterilidade ou de indicadores biológicos. A esta prática se dá o nome de monitoração paramétrica (EMEA, 2001) (BUGNO, 2001).

### 2.2.3 Aproximação matemática da letalidade

Na língua portuguesa, letalidade é a qualidade daquilo que é letal. Em termos de esterilização por calor a letalidade pode ser entendida como a

quantidade de energia a ser transferida a um material a ponto de obtermos o nível de esterilidade requerido.

De acordo com PFLUG (1999) e seus antecessores é possível obter-se a letalidade teórica através de uma função matemática que integra a temperatura no tempo. Esta mesma equação é apresentada e utilizada por uma infinidade de autores para a definição da letalidade de um processo de esterilização por calor.

A aproximação matemática para o cálculo da letalidade de processo para esterilização por vapor saturado, que toma por referência a temperatura de 250°F ou 121,1°C (PFLUG, 1999) é conhecida como equação de Efe Zero ( $F_0$ ) (BOCA, PRETORIUS, *et al.*, 2002). A equação de  $F_0$  é apresentada na Expressão (20):

$$F_0 = \int 10^{\frac{(T-121,1)}{10}} dt \quad (20)$$

Onde:

$F_0$  = Letalidade acumulada (min)

T = Temperatura de operação (°C).

Cada MO apresenta uma determinada resistência ao agente esterilizante. Para determinarmos qual o valor de  $F_0$  para um determinado MO necessitamos conhecer sua população inicial e o seu valor  $D$ . O valor  $D$  representa o tempo necessário para reduzir a população inicial do MO em um  $\log$  a uma dada temperatura. Como o  $F_0$  tem referência em 121°C, o valor  $D$  deve ser o considerado também a esta temperatura. A resultante será a Expressão (21):

$$F_0 = D_{121} \cdot (\log N - \log N_0) \quad (21)$$

Onde:

$D_{121}$  = Valor D do MO alvo (min) para 121°C

N = População inicial de MO

$N_0$  = População final provável de MO

Se considerarmos a expectativa de atingirmos o SAL, a população final pode ser determinada com o valor  $10^{-6}$ .

Em suma, as Expressões (20) e (21) são a base para a determinação da letalidade do processo de esterilização a partir do modelo matemático.

#### **2.2.4 Funcionamento de uma autoclave**

A finalidade básica de uma autoclave é fazer com que o vapor chegue a todas as partes da carga a ser processada e ali permaneça, a certa temperatura e pressão, por um período de tempo pré-determinado. Mas, para que o agente esterilizante possa alcançar todas as partes do material processado deve-se, primeiramente, executar a retirada do ar no interior dos produtos e de suas embalagens. Em alguns casos, ao término do processo de exposição do material ao vapor, faz-se necessário a retirada do condensado gerado, ou em outras palavras, a secagem do material.

Portanto, um processo de esterilização para materiais de superfície pode ser dividido nas seguintes etapas (LUQUETA, 2008):

- 1) Pré-condicionamento (vácuo inicial);
- 2) Rampa de aquecimento;
- 3) Tempo de exposição;
- 4) Rampa de resfriamento;
- 5) Secagem (vácuo final);
- 6) Aeração.

A Figura 10 ilustra o perfil de temperatura em um esterilizador executando um ciclo para materiais de superfície.

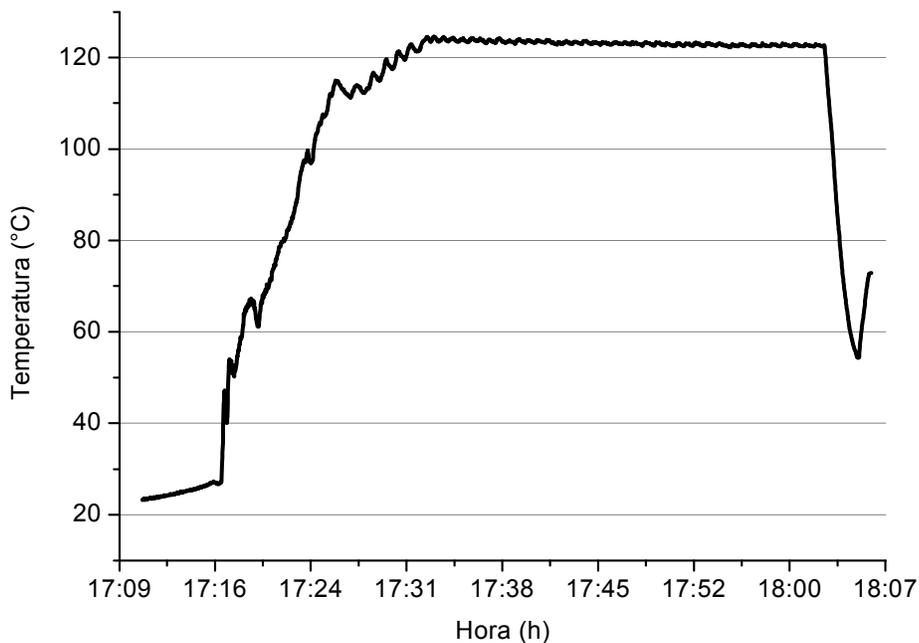


Figura 10 - Curva de temperatura típica de um esterilizador a vapor para um ciclo de materiais com temperatura de processo de 121°C.

Um esterilizador de boa qualidade deve contar com conjunto de instrumentos adequados para controlar eficientemente as variáveis de processo: temperatura, tempo e pressão (considerando-se a presença uniforme do agente esterilizante dentro da qualidade exigida). Desta forma, sensores de temperatura, temporizadores e controladores de pressão são os dispositivos críticos.

### 2.2.5 Qualificação térmica

Todo esterilizador deve, após sua instalação e ao menos uma vez ao ano ao longo de sua utilização, passar por um processo de qualificação térmica (ANVISA, 2012). A qualificação térmica consiste na distribuição de sensores ao longo da câmara da autoclave com a finalidade de verificar a distribuição do calor com a câmara vazia. O equipamento é considerado aprovado ou não em função da norma técnica que for utilizada como referência.

Este procedimento geralmente é realizado por uma empresa especializada e utiliza um *data logger* ou validador dotado de múltiplos sensores para varredura

da temperatura. A Figura 11 apresenta uma imagem do processo de qualificação térmica utilizando sensores com fio.



Figura 11 - Qualificação térmica realizada com *data logger* com fio.

Os *data loggers* disponíveis no mercado podem ser com fio (Figura 12), onde os sensores são inseridos um a um no esterilizador ou sem fio, utilizando rádio para envio dos dados (Figura 13). Em termos gerais os sensores sem fio primam pela capacidade de inserção em ambientes com elevadas temperaturas, sendo dotados de cápsulas protetoras de metal, em detrimento à capacidade de enlace e alcance do rádio. Ainda, em função ao alto custo de aquisição e manutenção destes equipamentos o seu uso continuado é praticamente impeditivo para a realidade das instituições de saúde do Brasil.

Em termos de origem dos equipamentos, até onde a pesquisa apurou, não existem até o momento empresas nacionais para este tipo de sistema.



Figura 12 - Face traseira do validador com fio - Fonte: GE Kaye Inc.



Figura 13 - Data loggers sem fio - Fonte: GE Kaye Inc.

### **3 PROPOSTA DE PESQUISA**

#### **3.1 As gerências**

Como a problemática envolve tanto a coleta de dados pelos nós sensores quanto o enlace de rede, a pesquisa foi dividida em gerências, seguindo a concepção das gerências adotadas em redes (CYRIACO, 2011).

Foram duas gerências consideradas: a primeira consiste na então denominada gerência de rede e a segunda denominada gerência de dados.

##### **3.1.1 Gerência de rede**

Para que o sistema possa ser utilizado de forma conveniente este deve demonstrar que funcionará adequadamente em um ambiente sujeito a várias barreiras e trânsito de pessoas.

A Expressão (7) é a fórmula para demonstrar se o enlace de rádio irá funcionar dentro do ambiente designado. As referências teóricas básicas para o estudo serão os trabalhos de Seidel (SEIDEL e RAPPAPORT, 1992) e parte conceitual do trabalho de Chehri (CHEHRI, MOUFTAH, *et al.*, 2010).

Uma vez que a potência de recepção no transceptor está diretamente relacionada com o RSSI, este será utilizado para o cálculo do *path loss* e o resultado do experimento será comparado com a expectativa teórica.

A intenção é demonstrar que o modelo matemático possa ser aplicado em uma situação real de edificação interna com barreiras e curtas distâncias como o que ocorre em ambientes de Centro de Material e Esterilização (CME).

Um CME é um ambiente que tem algumas especificidades e é dividida em cinco áreas (ANVISA, 2012):

I - Sala de recepção e limpeza (setor sujo);

II - Sala de preparo e esterilização (setor limpo);

III - Sala de desinfecção química, quando aplicável (setor limpo);

IV - Área de monitoramento do processo de esterilização (setor limpo);

V - Sala de armazenamento e distribuição de materiais esterilizados.

Nos projetos de CME, além das áreas operacionais, áreas de apoio também são construídas, tais como vestiários, sala de convívio e sala de gerência. Os esterilizadores ficam alocados na sala de esterilização ou na barreira entre esta e a sala de armazenamento.

Dentro desta compreensão, a RSSF deverá ser capaz de enviar os dados coletados junto aos esterilizadores para a área de monitoramento do processo de esterilização ou para a sala de gerência, onde os dados poderão ser armazenados em um computador. O *link* de rádio deverá ser capaz de prover sinal com alta taxa de confiabilidade (NIRAJ, 2009), vencendo as barreiras entre o esterilizador e a área de destino da informação. O parâmetro de confiabilidade, nesta pesquisa, será justamente a probabilidade de transmissão a partir da margem de *fading* considerada.

Um exemplo de CME contemplando as áreas é o apresentado na Figura 14.



Figura 14 - Exemplo de um centro de materiais e esterilização e a posição relativa dos esterilizadores em relação à sala de supervisão.

O resultado esperado para a gerência de rede é a verificação se o modelo teórico proposto por Seidel e Rappaport (1992), pode ser utilizado como ferramenta inicial para estimar a atenuação sofrida pela RSSF em função dos obstáculos impostos pelo ambiente.

O estudo também deve responder se é possível estimar uma margem de *fading* para garantir a probabilidade de o sistema funcionar acima de 90% sem redundância (KIM, FONSECA e CULLER, 2004).

Os cálculos estatísticos e a obtenção dos resultados serão gerados alimentando-se *software* específico (no caso o *Origin* na versão 8) com os dados obtidos durante a experimentação.

### 3.1.2 Gerência de dados

Em processos de esterilização por calor a monitoração da temperatura e do tempo permite a correlação direta com a letalidade do processo. Tal constatação nos leva a entender que, uma vez conhecidas tais variáveis, é possível prever a esterilidade teórica de um produto através da Expressão (20). Estando esta relação validada pode-se utilizá-la como parâmetro de liberação da carga processada em substituição aos indicadores convencionais (principalmente em relação os químicos), melhorando a qualidade do trabalho, reduzindo custos recorrentes e agregando um viés de sustentabilidade com o fim dos resíduos gerados pelos monitores convencionais.

Na gerência de dados é proposta a instalação de uma RSSF para monitorar o processo de esterilização por calor e determinar a letalidade teórica. Uma vez estabelecido o valor de letalidade mínima a ser atingido (definida na Expressão (21)), pode-se liberar para uso o produto processado, considerando a probabilidade de esterilidade SAL adequado e prescindir do uso de indicadores químicos para esta tomada de decisão.

Como o principal parâmetro é o cálculo de  $F_0$ , deve-se demonstrar que o nó sensor é capaz de realizar esta atividade de forma segura e confiável.

Como critério de aceitação espera-se que o desvio padrão normalizado dos nós sensores para o cálculo de letalidade realizado internamente pelo microcontrolador e o obtido externamente por cálculo numérico seja condizente com o obtido pelo equipamento de referência dentro da faixa de erro de cada instrumento.

Tanto o cálculo  $F_0$  realizado pelo microcontrolador quanto o realizado externamente utilizarão métodos de cálculo numérico (RUGGIERO e LOPES, 1997). O interno do microcontrolador será realizado pelo método de Newton-Cotes, conforme Expressão (22). A fração do código escrito na rotina de interrupção do Radiuino é o apresentado no Apêndice A:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \sum_1^n A_n \cdot f(x_n) \quad (22)$$

Considerando  $x_i \in [a, b]$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ .

O cálculo de  $F_0$  externo ao microcontrolador será pelo método dos trapézios, utilizando a fórmula composta (BARROSO, BARROSO, *et al.*, 1987), conforme Expressão (23):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \left( \sum_1^n y_0 + 2y_n \right) \quad (23)$$

Na verdade, a finalidade de do cálculo externo é a de comprovar a eficiência do cálculo realizado pelo microcontrolador utilizando-se o recurso de interrupção por tempo.

### 3.2 Propostas existentes

A literatura apresenta uma imensa variedade de aplicações para as RSSF e a monitoração de temperatura é um dos termos mais explorados

(BOONSAWAT, EKCHAMANONTA, *et al.*, 2010). Vários trabalhos têm relacionado a monitoração da temperatura como parâmetro para o controle microbiológico ou de produção, como os relacionados às áreas de indústria de pesquisa ambiental (RUNDEL, GRAHAM, *et al.*, 2009), agricultura (BURRELL, BROOKE e BECKWITH, 2004) (HWANG, SHIN e YOE, 2010), bioquímica (DIAMOND, COYLE, *et al.*, 2008) e outros.

No campo médico-hospitalar foi possível encontrar trabalhos relacionando o uso de sensores sem fio ou RSSF em ambientes de produção farmacêutica (NIRAJ, 2009) citando aplicações como a monitoração dos parâmetros físicos de autoclaves (POTDAR, SHARIF, *et al.*, 2009), na monitoração de fenômenos fisiológicos (MILENKOVIC, OTTO e JOVANOVIĆ, 2006) (FU, CHEN, *et al.*, 2011), em equipamentos hospitalares (KIDANE, RAPACIOLI e AGAZZI, 2009), etc.

Especificamente no uso de RSSF para a monitoração de autoclaves os trabalhos relacionados têm maior ênfase na avaliação térmica das autoclaves (UETERA, SHIGEMATSU, *et al.*, 2003), ou como simples data loggers sem fio usado na validação de sistemas térmicos (VANCEA e VIMAN, 2011), não sendo identificada nenhuma literatura acadêmica especificamente para a aplicação de RSSF como elemento de monitoração paramétrica de esterilizadores.

Comercialmente, no entanto, existem alguns produtos conhecidos como Dispositivos de Desafio de Processo Digital (DPCD) (BENOIT, MERGER, *et al.*, 2011) dotados de tecnologia sem fio e que emulam indicadores de processo classe 2 (EBRO, 2012) (INTERSTER, 2012) e são utilizados em outros países para acompanhamento do processo de esterilização com o cálculo de  $F_0$  (3M, 2012) (STERLAB, 2011) ou para validação de processos de esterilização (GE, 2012), sendo que este último inclusive utiliza RSSF de acordo com o padrão IEEE 802.15.4 em uma arquitetura *mesh*.

## 4 METODOLOGIA

Considerando-se o caráter prático da pesquisa e o potencial de desenvolvimento de um sistema real, optou-se pela construção de um conjunto baseado em materiais disponíveis no mercado com finalidade didática e de aplicação genérica e procedimentos de testes em conjunto com sistemas comerciais.

A rede montada foi baseada no hardware discutido no capítulo 2, contando com uma base e três nós sensores operando em *pooling*, conforme Figura 15.

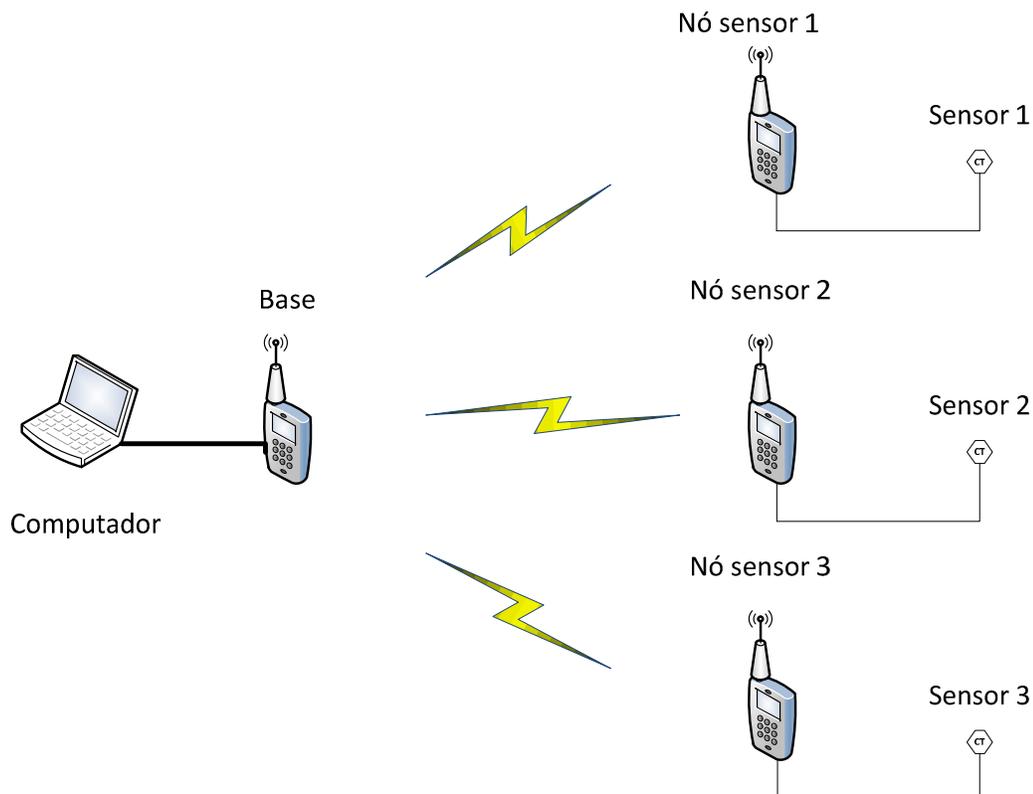


Figura 15 – RSSF utilizada nos testes

O desenvolvimento do conceito passou por uma evolução entre a proposta inicial e a concepção final. Na etapa inicial uma base específica para os testes foi montada, com o uso de sensor de platina tipo PT-100 (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009, p. 102) ligado a uma fonte de corrente externa que

provém um referencial de tensão de resposta linear em função da temperatura (Figura 16). A calibração do sistema é por hardware. O cálculo de letalidade é executado externamente depois da coleta de temperatura. O diagrama desta solução é o apresentado no Apêndice B.

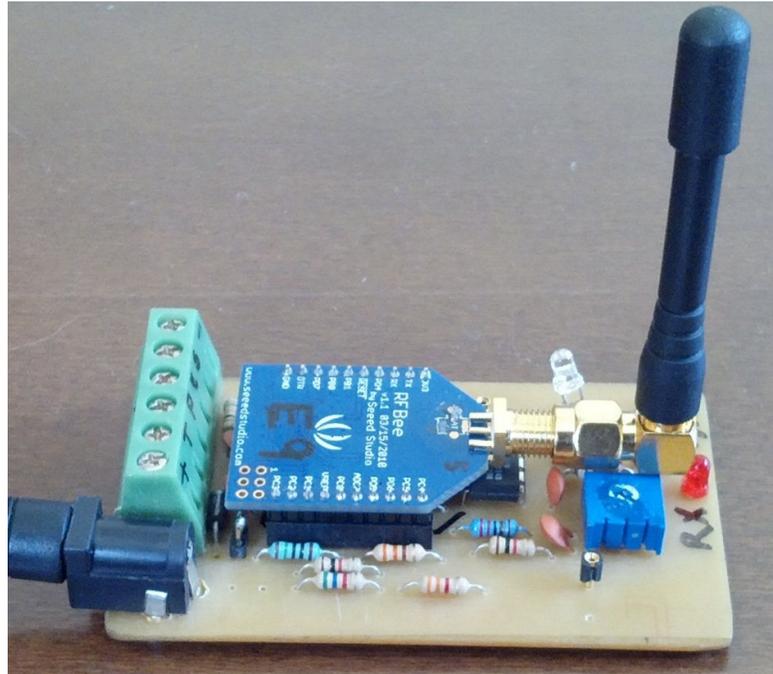


Figura 16 – Hardware da primeira versão da RSSF.

A primeira versão do hardware deu origem a alguns trabalhos, entre eles os artigos apresentados no VI Workshop de Pós-graduação e Pesquisa do Centro Paula Souza ( Apêndice C) e no MOMAG 2012 (Apêndice D).

A despeito da boa qualidade dos dados coletados na caracterização da gerência de redes, esta versão não apresentou repetitividade adequada para a gerência de dados. Embora os sensores de platina tipo PT-100 tenham boa exatidão, na prática o protótipo apresentou considerável desvio de calibração em função da temperatura quando o conjunto estava montado próximo ao esterilizador.

Uma vez que as correções demandariam alterações significativas no projeto com o uso de amplificador operacional de baixo *drift* e *trimpot* de precisão, um novo hardware foi desenvolvido utilizando uma base de I/O disponível comercialmente e sensor de temperatura integrado LM35 (TEXAS,

2011). O diagrama eletrônico com a implantação do sensor é o apresentado no Apêndice E.

No experimento determinou-se que seriam realizadas medidas de temperatura e de RSSI com a base em três pontos diferentes do ambiente que representassem níveis de dificuldade de propagação distintos baseado no leiaute típico de centrais de materiais, conforme o exemplo da Figura 14.

O conjunto experimental conta com os seguintes materiais e recursos:

- I. Quatro plataformas Rádiumo arranjadas especificamente para a aplicação (diagrama eletrônico conforme Anexo A);
- II. Um validador eletrônico modelo Kaye 2000;
- III. Cinco sensores termopar tipo T conectados ao validador via unidade SIM calibrada automaticamente;
- IV. Um forno de temperatura controlada modelo Kaye HTR-400 com bloco isotérmico e um de banho líquido modelo Wika CTB 9100, ambos preparados para a faixa de operação de 40 a 150°C;
- V. Um notebook Dell com sistema operacional Windows® XP conectado via porta serial RS-232 ao validador;
- VI. Um netbook LG com sistema operacional Windows® XP conectado via USB à Base sensora.

Nota: o uso de dois fornos foi uma condição de disponibilidade do hardware dentro do laboratório. Foram tomados os devidos cuidados para que as variações de temperatura entre os dois sistemas não afetassem os resultados. Quando aplicável, na pesquisa, somente o forno Kaye foi considerado.

Os softwares utilizados foram:

- VII. Software de coleta de dados Kaye Validator® 2000 versão 2.23;
- VIII. Aplicação para coleta de dados de temperatura e RSSI desenvolvido em Phyton (Apêndice F).

## 4.1 Preparação do sistema

A preparação do sistema contou com o ajuste dos sistemas eletrônicos para o correto funcionamento da rede. As principais etapas foram o ajuste de *offset* dos transceptores para que todos operassem na frequência central de 915 MHz, a calibração da malha sensor versus microcontrolador e a aferição da curva de potência do transceptor.

No procedimento de ajuste do *offset* de frequência uma portadora foi gerada em cada módulo (via programação) e a frequência central medida através de um analisador de espectro portátil. Com base no desvio apurado em função da frequência central de referência de 915 MHz calculou-se o desvio conforme a Expressão (24) convertendo-se o resultado em hexadecimal e tomando-se, quando necessário, o complemento de dois.

$$Offset_{10} = \frac{(915-ref).1000}{Step} \quad (24)$$

Onde:

$Offset_{10}$  = valor de offset a ser convertido em Hexadecimal

Ref = Frequência da portadora em MHz

Step = Passo de frequência em kHz.

O valor obtido é registrado no módulo e posteriormente inserido no registro FSCTRL0 de parâmetros do transceptor, corrigindo o desvio. Uma nova medição é realizada para verificação da centralização da frequência. A Figura 17 ilustra a tela do analisador de espectro antes e depois da correção.

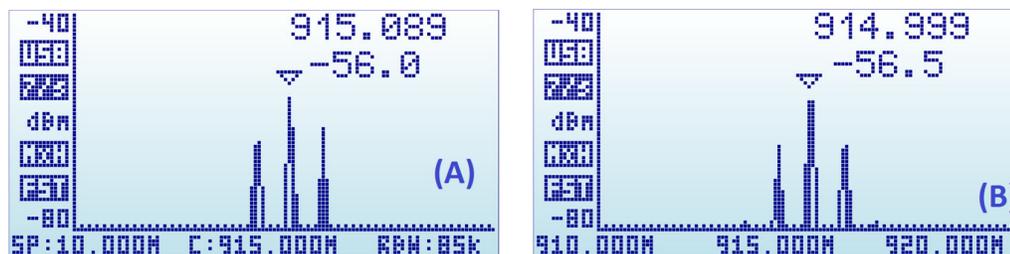


Figura 17 – Telas do analisador de espectro antes do ajuste de offset, (B) depois do ajuste de offset.

A aferição da potência dos transceptores tomou por base a linearidade prevista no datasheet do componente conforme a Figura 7. Para a realização do procedimento foram utilizados os transceptores, um analisador de espectro, cabos e um atenuador de 30dB. O diagrama de montagem é o apresentado na Figura 18. Os pontos de verificação foram executados em -60dBm, -45dBm e -30dBm.

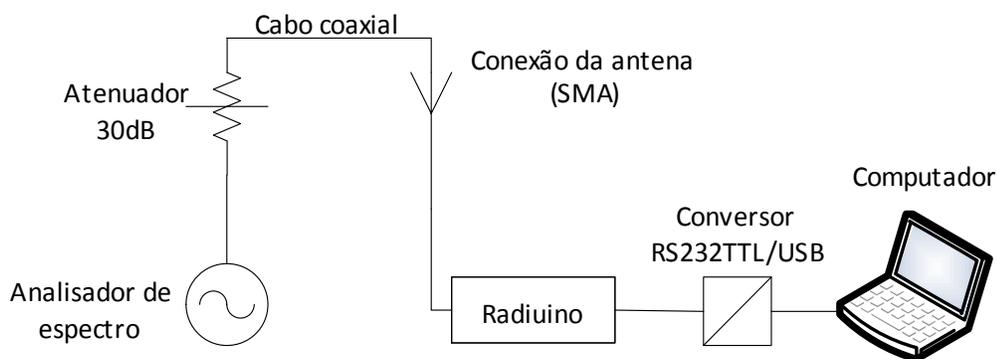


Figura 18 - Diagrama do circuito de calibração de potência do Radiuino

As Figuras 19 e 20 demonstram respectivamente a montagem da aferição de potência e a tela do analisador durante uma das fases.

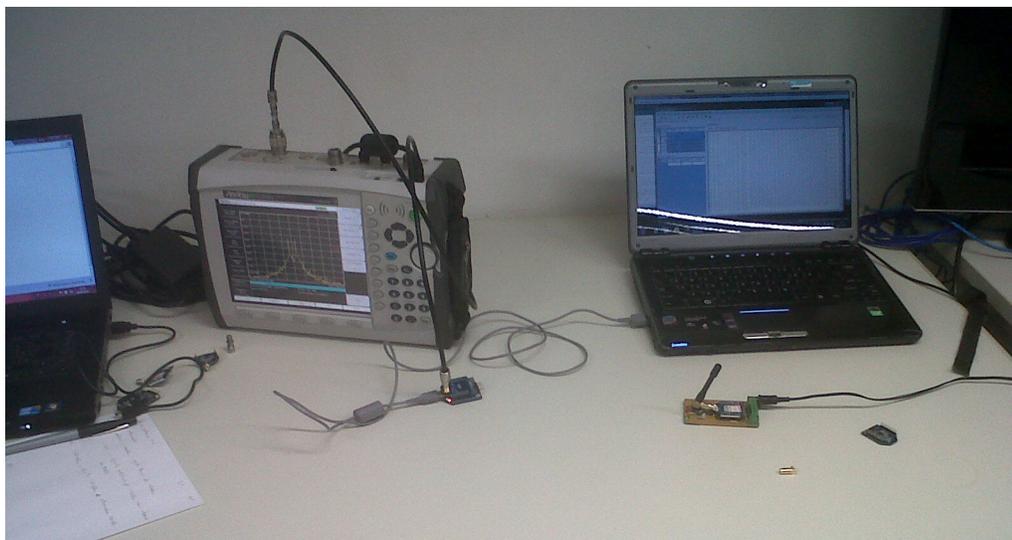


Figura 19 – Montagem do sistema para aferição da potência dos sensores.

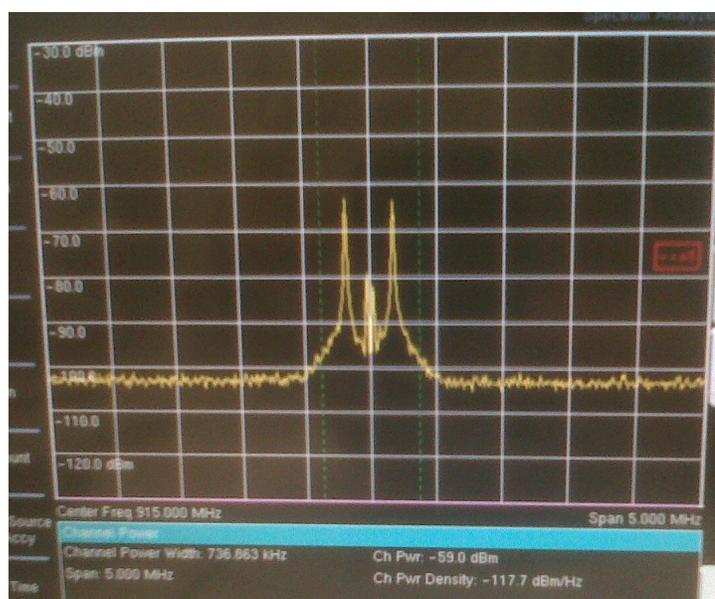


Figura 20 – Tela do analisador de espectro durante a aferição

A Figura 21 demonstra o gráfico de medições de potência média na conexão direta entre o transmissor e o receptor capturados pelo software aplicativo desenvolvido em Python, demonstrando a coerência das especificações do transceptor com os valores obtidos, uma vez que a diferença entre a potência de referência e a obtida foi menor que 2 dB.

É importante ressaltar que os cálculos foram efetuados mW e os gráficos foram gerados com o uso de software específico (Origin).

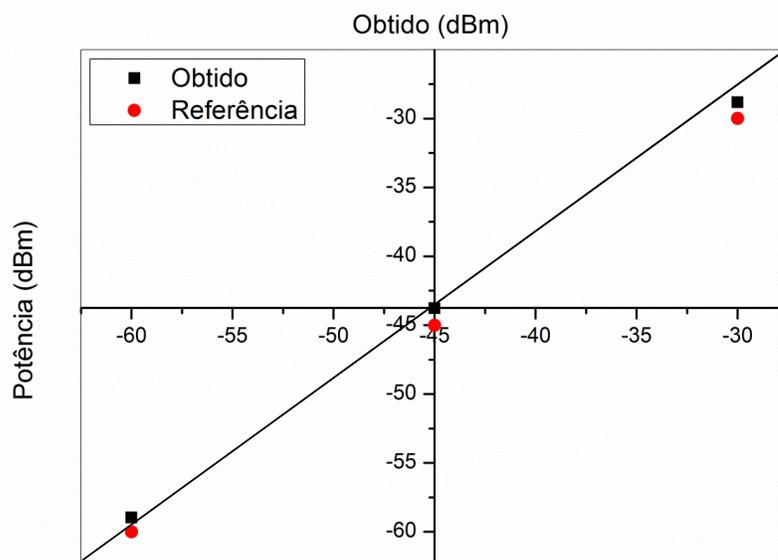


Figura 21 – Média obtida na aferição de potência dos transceptores.

## 4.2 Calibração da temperatura

A calibração da temperatura foi realizada em malha fechada para os três nós sensores com uso de um forno de calibração por imersão a óleo (Figura 22) nas temperaturas de 65°C, 98°C e 130°C para caracterização da curva de resposta, sendo o ajuste por software realizado para a temperatura de referência de 130°C. A resposta linear é em função do sensor integrado LM35, cuja saída representa uma reta com incremento de 10.0 mV/°C. O gráfico da Figura 23 demonstra a reta dos sensores antes da calibração.



Figura 22 – Forno de calibração alcançando o primeiro patamar de calibração.

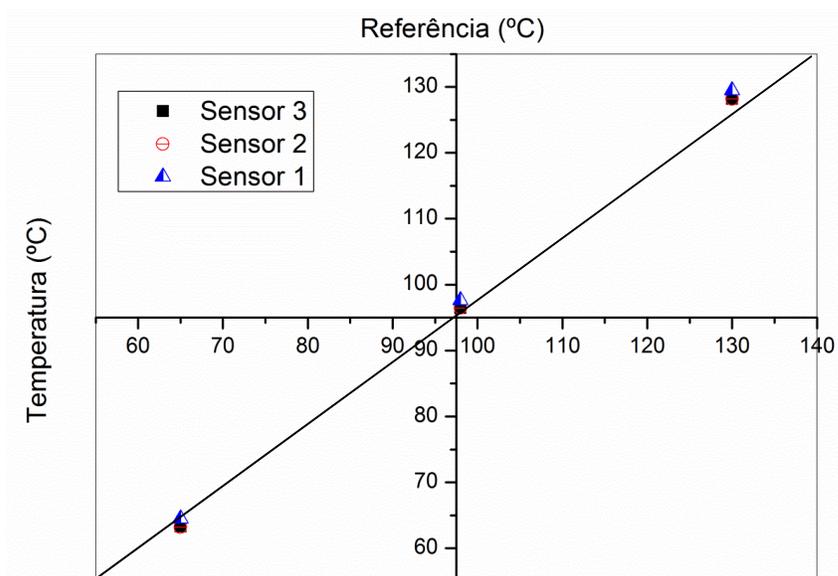


Figura 23 – Reta de calibração dos sensores de temperatura.

Os desvios aferidos foram corrigidos por software conforme a Tabela 1, assumindo-se que em função das características do sensor LM-35 a relação é plenamente linear na faixa escolhida.

Tabela 1 – Valores dos desvios de calibração por software para os sensores.

Sensor	Desvio (°C)
Sensor 1	+0,54
Sensor 2	+1,83
Sensor 3	+1,83

#### 4.2.1 Exatidão e precisão

Exatidão pode ser definida como a diferença entre o valor real e aquele efetivamente apresentado pelo instrumento de medição, enquanto precisão é a faixa na qual o valor é apresentado pelo medidor (SMITH, 1997, p. 33).

No caso do circuito definido na RSSF da pesquisa a precisão foi definida no *software* para um décimo de grau. Já a exatidão é dada em função das características de *hardware*.

De acordo com as especificações do sensor LM35, a exatidão típica na faixa de operação é de  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ , ou seja, uma vez calibrado, o conjunto não pode apresentar uma diferença maior que  $0,8^{\circ}\text{C}$  entre os sensores.

No caso do Validador Kaye, de acordo com as especificações do fabricante, a incerteza na medição depende das condições de calibração do sistema (KAYE, 2009). Uma vez que o equipamento utilizado já estava calibrado dentro das especificações do laboratório, adotou-se a incerteza máxima do sistema de  $\pm 0,078^{\circ}\text{C}$  como critério de exatidão, de tal forma que a diferença máxima esperada entre os sensores será de  $0,156^{\circ}\text{C}$ .

A precisão da Validador é de um milésimo de grau.

### 4.3 Caracterização do ambiente

O ambiente de testes é o mostrado na Figura 24. Os nós sensores foram dispostos na Posição 1 e a base sensora foi colocada para realização das medições nos Posições 2, 3 e 4.

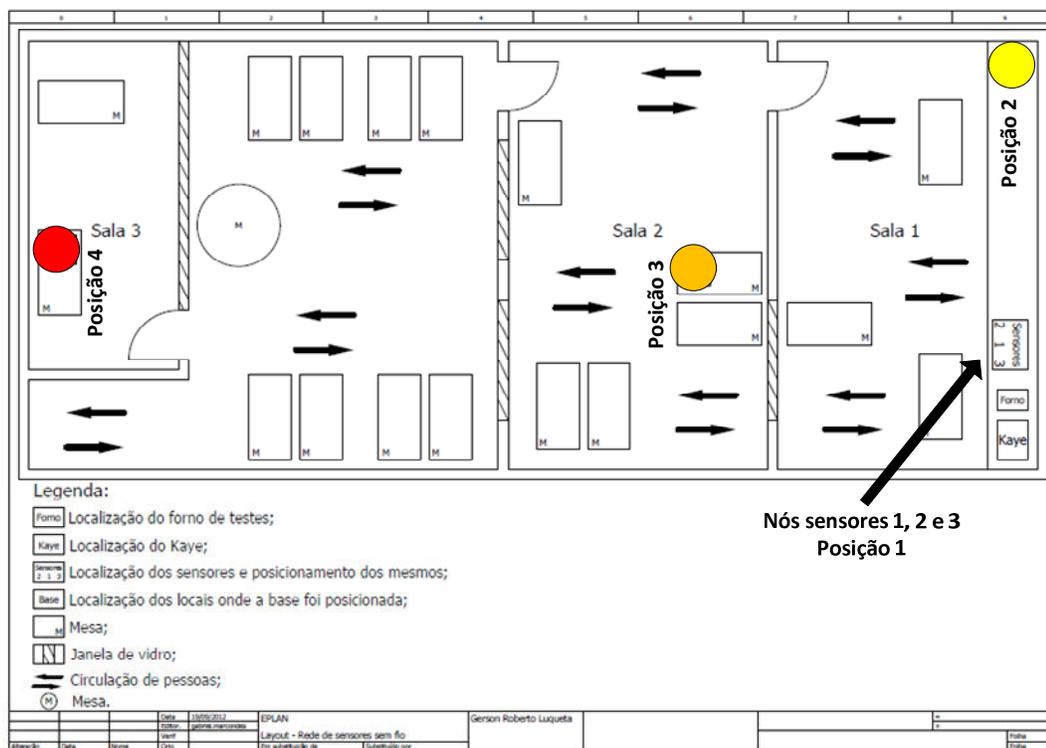


Figura 24 – Posição dos nós sensores e da base durante os ensaios.

A Posição 1 é fixa e nela ficarão os nós sensores, assim como o Forno de temperatura variável, o Validador e o notebook que fará a coleta de dados do sistema validador. A Figura 25 demonstra a disposição dos elementos no local.



Figura 25 – Disposição dos elementos de teste na Posição 1.

A primeira posição de análise da base é a Posição 2 que representa o menor nível de dificuldade de propagação e têm as seguintes características:

- Altura dos sensores e da base em relação ao solo: 83 cm;
- Distancia do sensor 1 em relação à base: 2,185 m;
- Distancia do sensor 2 em relação à base: 2,035 m;
- Distancia do sensor 3 em relação à base: 2,345 m;
- Espaço livre entre os sensores e a base;
- Antenas na posição vertical (perpendicular à superfície de apoio);
- Entre duas e três pessoas na sala.

A segunda posição de análise da base é a Posição 3. Esta posição é provavelmente a mais comum, onde existe apenas um obstáculo entre a sala de esterilização e a área de supervisão. As características deste ambiente são as seguintes:

- Altura dos sensores em relação ao solo: 83 cm;
- Altura da base em relação ao solo: 75 cm;
- Distancia do sensor 1 em relação à base: 5,980 m;

- Distancia do sensor 2 em relação à base: 6,130 m;
- Distancia do sensor 3 em relação à base: 6,280 m;
- Entre os sensores e a base existe uma parede que possui uma porta de madeira e uma janela de vidro;
- Antenas na posição vertical (perpendicular à superfície de apoio);
- Entre 3 e 7 pessoas circulando entre os dois ambientes.

O último ambiente é o representado pela Posição 4. Este ambiente é o de maior desafio, seja pela distância entre a base e os nós sensores, seja pelo número de obstáculos ou ainda pela quantidade de pessoas que representam interferência no processo. As características desta posição são as seguintes:

- Altura dos sensores em relação ao solo: 83 cm;
- Altura da base em relação ao solo: 80 cm;
- Distancia do sensor 1 em relação à base: 20,575 m;
- Distancia do sensor 2 em relação à base: 20,425 m;
- Distancia do sensor 3 em relação à base: 20,725 m;
- Entre os sensores e a base existem duas paredes, sendo que a primeira possui uma porta de madeira e uma janela de vidro e a segunda uma porta de madeira e duas janelas de vidro. Existe também uma divisória após essas duas paredes;
- Antenas na posição vertical (perpendicular à superfície de apoio);
- Entre 7 e 13 pessoas circulando entre os dois ambientes.

#### **4.4 Procedimento de simulação de ciclos térmicos**

O procedimento consiste em simular ciclos térmicos com rampas de aquecimento, estabilização, patamar e rampa de resfriamento conforme Figura 26. Este perfil de ciclo toma por base a curva de um resistômetro para vapor conforme norma ISO (ANSI/AAMI/ISO18472, 2006, p. 6). Esta simulação é executada pelo forno com bloco isotérmico.

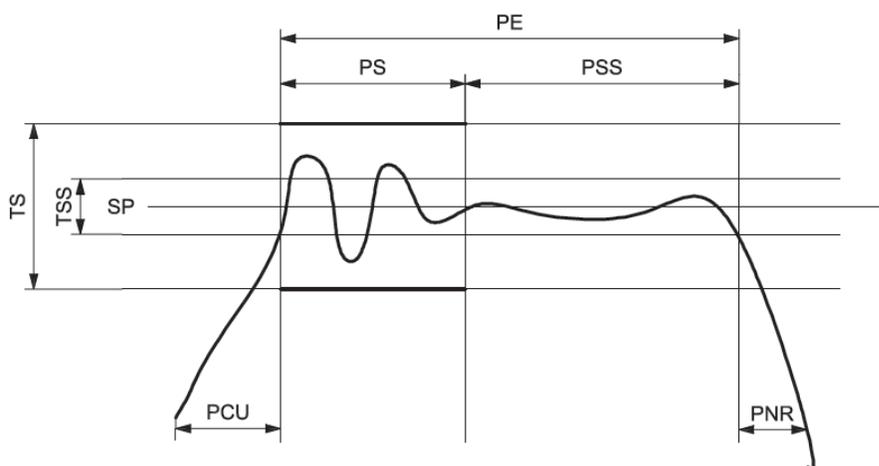


Figura 26 – Curva de temperatura de um Bier Vessel  
 fonte: ISO18472:2006/(R)2010, página 6.

Os três sensores da RSSF e os cinco sensores do validador ficarão imersos no forno para a realização da medição da temperatura. Os dois sistemas executarão o cálculo de  $F_0$  conforme a Expressão (20) quando a temperatura for igual ou superior a 100°C.

O limite temperaturas de 100°C como valor mínimo para integração se justifica pelo fato que em temperaturas inferiores a este nível a letalidade acumulada é tão pequena que não afeta o resultado.

Os dados obtidos pelo validador serão armazenados em um notebook rodando o software de gerenciamento do dispositivo e seus dados serão exportados posteriormente em arquivos no formato “xls”.

A sequência de operação do validador é a demonstrada na Figura 27.

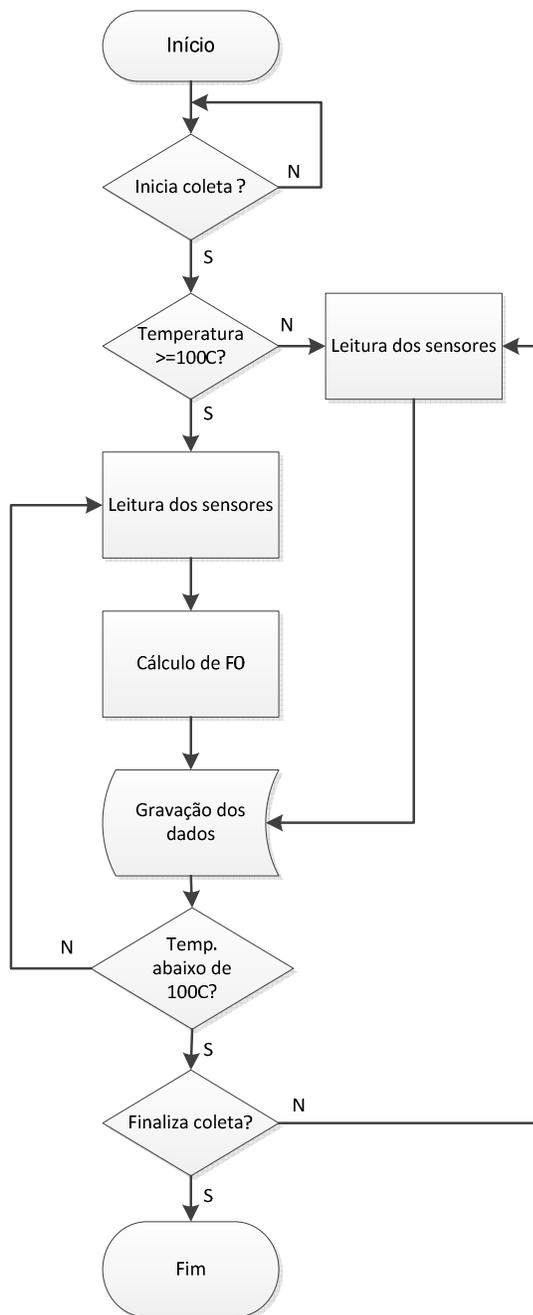


Figura 27 – Fluxograma de operação do validador

A RSSF funciona através do *polling* da base para os sensores. Além dos dados de temperatura e cálculo de letalidade de cada nó sensor, serão também armazenados os dados de RSSI de *uplink*. O gerenciamento e armazenamento ocorrerão através da comunicação da base com um netbook via porta serial RS-232 rodando o aplicativo desenvolvido em Python (Apêndice F). O fluxograma de operação deste sistema é o representado pela Figura 28.

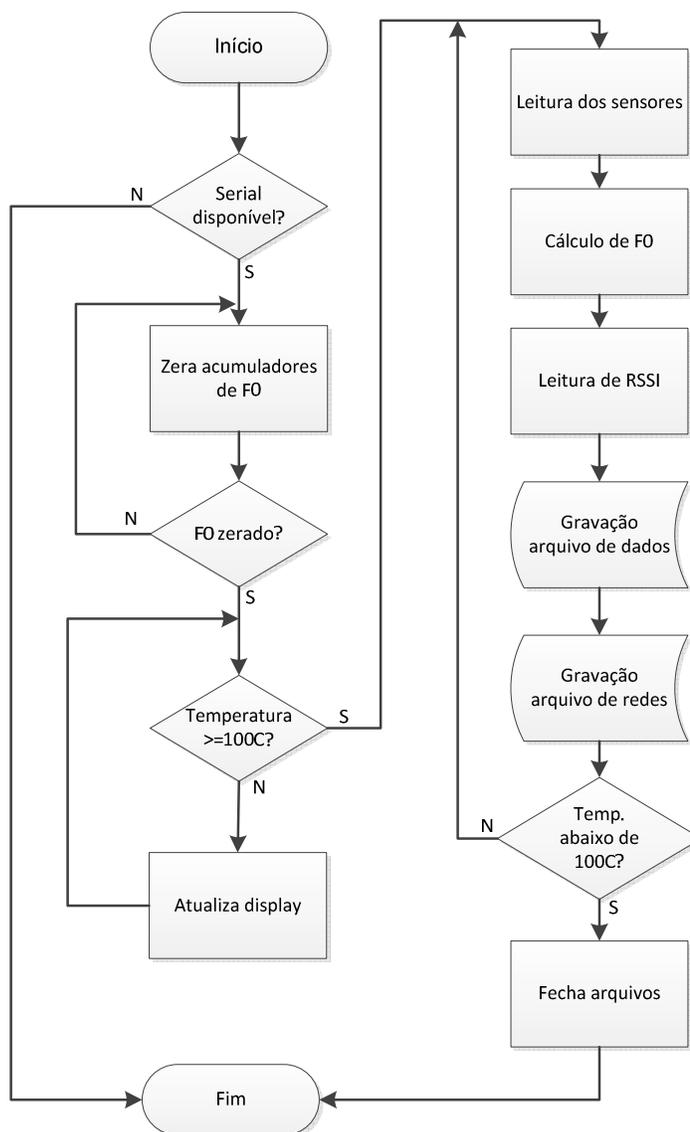


Figura 28 – Fluxograma de operação da coleta de dados pela RSSF.

O procedimento de coleta de dados ocorrerá individualmente nas Posições 2, 3 e 4 tomando por ponto comum a Posição 1 de acordo com o leiaute apresentado na Figura 24.

Os dados obtidos serão divididos em dois grupos designados “gerência de rede” e “gerência de dados”.

Na gerência de rede as informações serão tratadas da seguinte forma:

A média normalizada do RSSI será tratada em cada posição de teste, determinando-se o *log distance* empírico e seus dados serão comparados com o *log distance* teórico da Expressão (6).

Experimentos na primeira fase demonstraram que as potências de *uplink* e *downlink* eram muito próximas durante praticamente todo o experimento e, portanto, será utilizado apenas o *uplink* nos cálculos. Vale ressaltar que em situações em que as potências de *uplink* e *downlink* tenham diferenças significativas, o valor de  $\beta$  para um mesmo ambiente não será único.

Se os dados coletados apresentarem uma distribuição gaussiana será realizado o cálculo da função de distribuição cumulativa e a determinação gráfica da probabilidade em função da potência de recepção.

A comparação entre os dados obtidos e os calculados é o objeto de análise para determinação de um dos critérios para montagem de um sistema dentro da finalidade proposta, calculando-se a margem de *fading* em cada posição.

Na gerência de dados as informações coletadas serão tratadas da seguinte forma:

Distribuição térmica – serão comparadas as médias de distribuição dos sensores da RSSF e do validador. O critério de aceitação será a variação da temperatura em função da exatidão dos sensores. A RSSF deve ser capaz de reproduzir um perfil de ciclo semelhante ao validador. A relação entre os desvios do validador e da RSSF será tratada em uma matriz de dispersão.

$F_0$  acumulado – serão comparados os desvios normalizados dos cálculos realizados pelo validador e pela RSSF e os desvios obtidos calculando-se a letalidade teórica através das informações de temperatura realizadas pela RSSF. O critério de aceitação será o desvio de cada sistema em função da exatidão do sistema.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Para cada posição de experimentação foram considerados sete ciclos com tempo de exposição de 30 minutos cada, mais os tempos de subida e descida da temperatura abaixo de 100°C. Os dados foram coletados a cada 1 segundo, resultando em um universo de aproximadamente 57000 pontos de leitura entre os três nós da RSSF para cada gerência.

### 5.1 Gerência de rede

#### 5.1.1 Atenuação teórica dos ambientes

Tomando por base o artigo de referência (SEIDEL e RAPPAPORT, 1992), teremos:

- O valor de Beta esperado para um mesmo andar será de 2,76;
- O valor de FAF será de 12.9 dB;
- O valor de PAF para a Posição 2 em relação à Posição 1 será nulo.
- O valor de PAF para a Posição 3 em relação à Posição 1 será 2,38 dB.
- O valor de PAF para a Posição 4 em relação à Posição 1 será 6,15 dB (correspondente a duas paredes e uma divisória:  $2,38+2,38+1,39$ ).

Pode-se obter a atenuação teórica conforme Expressão (6). O resumo dos parâmetros adotados no cálculo são os apresentados na Tabela 2, para o qual foi adotado por padrão uma distância  $d_0$  de um metro.

Tabela 2 – Valores para cálculo de atenuação teórica										
Posição	do (m)	d(S1) (m)	d(S2) (m)	d(S3) (m)	$\beta$	FAF (dB)	PAF (dB)	PL(S1) (dB)	PL(S2) (dB)	PL(S3) (dB)
2	1,00	2,18	2,03	2,34	2,76	12,9	0	53,9	53,1	54,8
3	1,00	5,98	6,13	6,28	2,76	12,9	2,38	68,4	68,7	69,0
4	1,00	20,57	20,42	20,72	2,76	12,9	6,15	87,0	86,9	87,1

### 5.1.2 Consolidação dos dados coletados

A Figura 29 apresenta a consolidação dos dados de distribuição de potência de *uplink* de cada sensor para a posição 2. A Figura 30 apresenta os mesmos resultados para a posição 3, enquanto a Figura 31 apresenta os resultados da posição 4.

Em cada histograma observa-se a relação entre a potência *uplink* em dBm (eixo x) pelo número de ocorrências (eixo y).

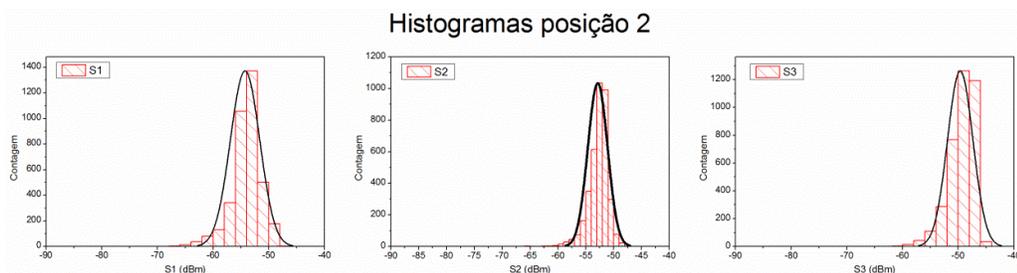


Figura 29 – Histogramas posição 2

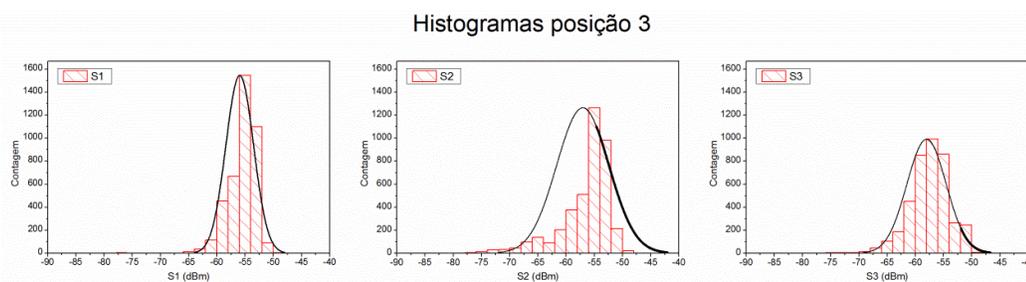


Figura 30 – Histogramas posição 3

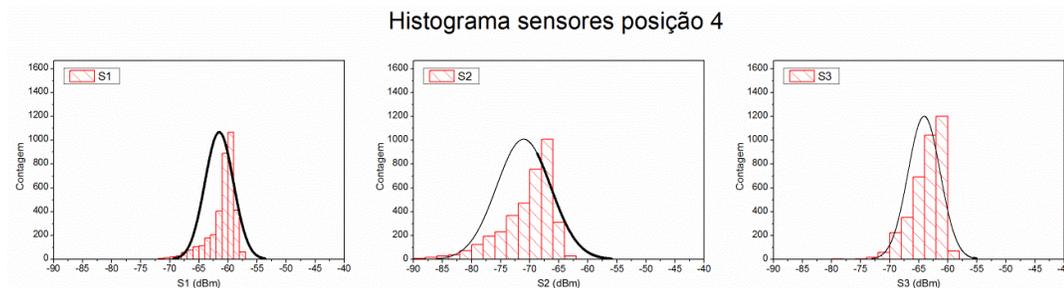


Figura 31 – Histogramas sensores posição 4

Uma forma de inferir-se quanto a distribuição da potência se aproxima de uma distribuição gaussiana é através do cálculo da assimetria e da curtose.

O valor de assimetria indica o grau de distorção da distribuição em relação a uma distribuição simétrica, enquanto que a curtose indica a forma da curva de distribuição em relação ao seu achatamento (CORREA, 2003).

Os resultados desta observação indicam que, exceto pelos histogramas do sensor S2 nas posições 3 e 4, as demais distribuições apresentam assimetria moderada e curtose leptocúrtica (CORREA, 2003, p. 61-64) para os valores de potência em mW.

Aplicando-se as ferramentas estatísticas a partir do software Origin (com os dados convertidos em mW) foram obtidas as médias e desvio padrão para cada sensor em cada posição e os resultados são os apresentados na Tabela 3, já reconvertidos em dBm e dB, respectivamente.

Tabela 3 – Média e desvio padrão dos sensores

Sensor	Posição 2		Posição 3		Posição 4	
	Média (dBm)	$\sigma$ (dB)	Média (dBm)	$\sigma$ (dB)	Média (dBm)	$\sigma$ (dB)
S1	-54,3	2,6	-56,0	2,5	-61,5	2,5
S2	-52,9	1,8	-57,0	4,6	-71,1	4,7
S3	-49,7	2,3	-58,0	3,5	-64,1	2,8

A função de variação em torno do valor médio da posição 2 é apresentada pelo gráfico da Figura 32, que identifica o valor de  $x$  para uma probabilidade de 90% de funcionamento. O mesmo se repete para as posições 3 e 4, que são apresentadas respectivamente pelas Figuras 33 e 34.

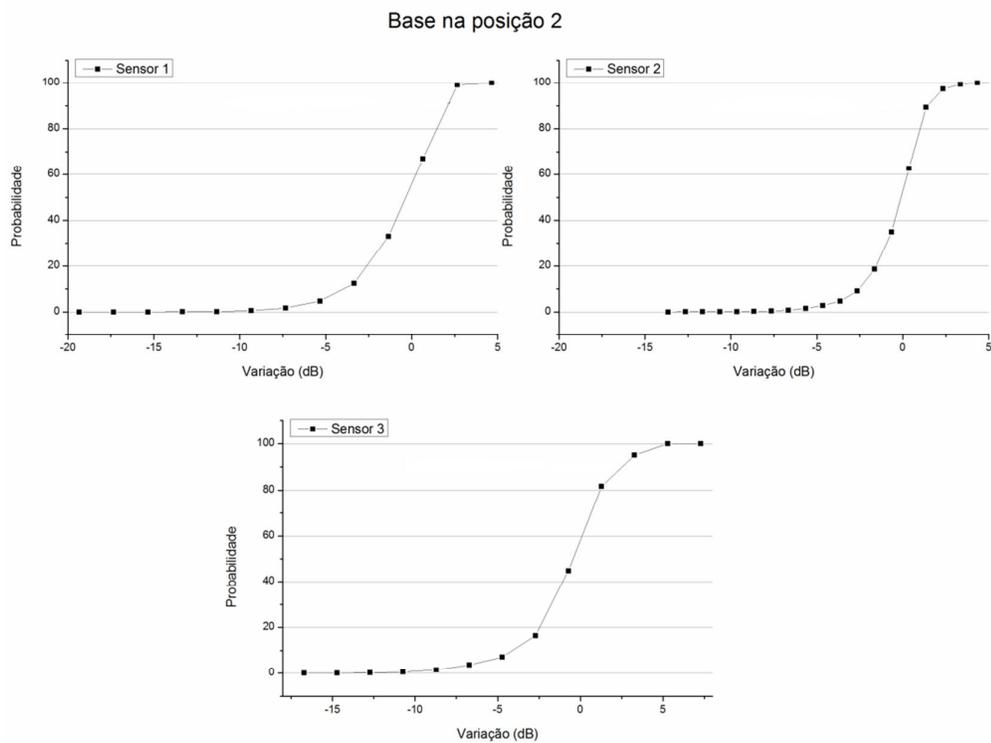


Figura 32 – Função de distribuição em torno do valor médio na posição 2.

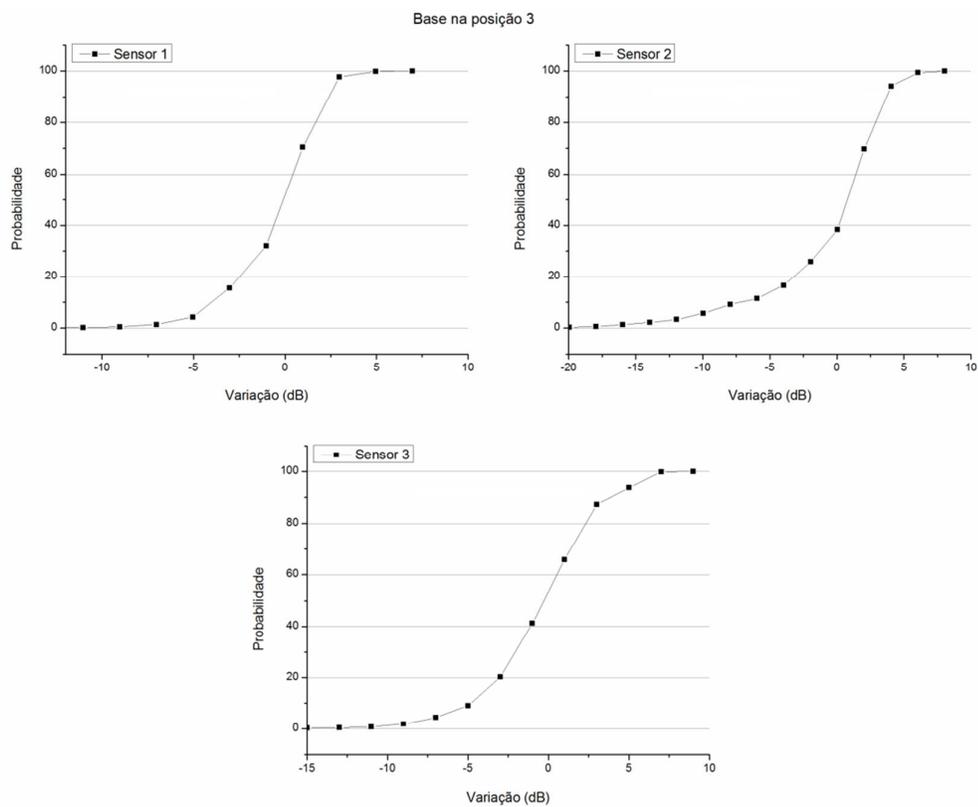


Figura 33- Função de distribuição em torno do valor médio na posição 3.

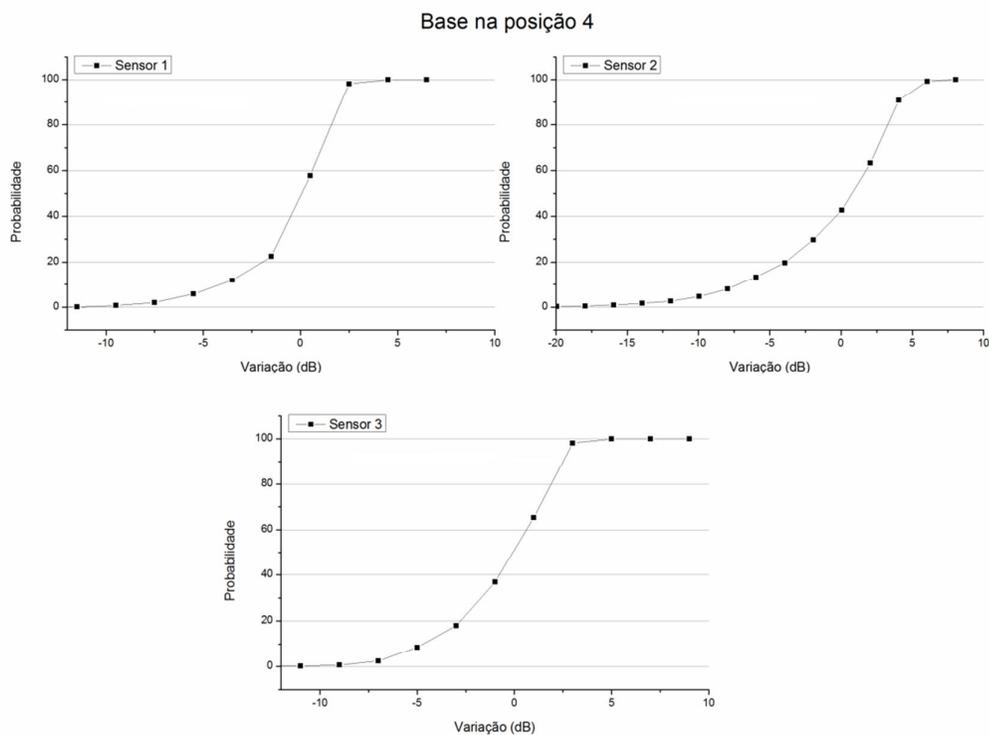


Figura 34 - Função de distribuição em torno do valor médio na posição 4.

Considerando os dados apresentados nos gráficos das Figuras 32, 33 e 34, e utilizando-se a forma de cálculo conforme detalhado junto a Expressão (10) obtemos a margem de *fading* para o pior caso nas três posições, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Margem de fading para 90% de probabilidade

Sensor	Posição 2	Posição 3	Posição 4
	Fading (dB)	Fading (dB)	Fading (dB)
S1	3,5	3,3	3,3
S2	2,4	6,1	6,3
S3	3,1	4,7	3,7

Tomando apenas o resultado mais crítico para cada uma das posições teríamos como padrão as margens de fading de 3,5 dB para a posição 2, de 6,1 dB para a posição 3 e 6,3 dB para a posição 4.

Estes valores são os que deverão ser adicionados à potência de transmissão para que a probabilidade do enlace funcionar seja maior ou igual a 90%.

Com a determinação destes valores obtém-se o rol de resultados esperados para a gestão de redes. Na continuidade do experimento deve-se verificar se a RSSF pode ser utilizada para atingir o objetivo do trabalho, que é a medição da temperatura e cálculo de letalidade.

## **5.2 Gerência de dados**

A curva da Figura 35 apresenta o perfil de temperatura média coletado por um dos nós da RSSF em comparação com o perfil de temperatura médio do validador para uma das amostras. Este perfil se repete em todas as amostras, independente da posição de coleta, demonstrando a plena repetitividade do sistema.

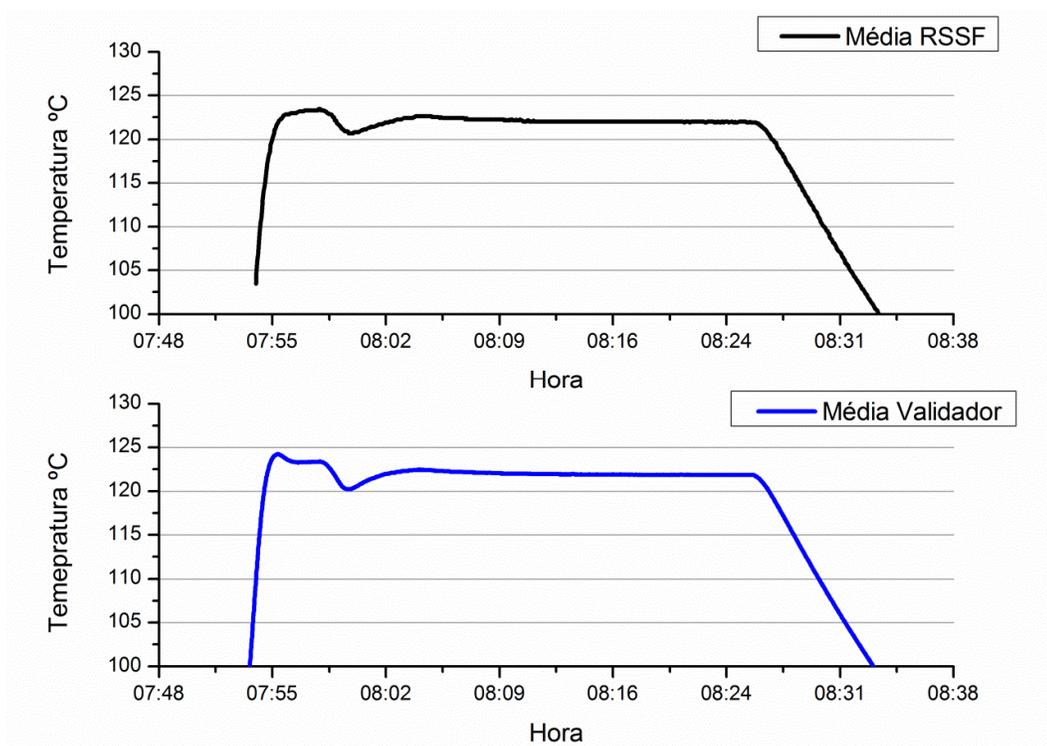


Figura 35 – Curvas geradas pela RSSF e pelo Validador

A Tabela 5 apresenta o desvio médio padrão ( $\sigma$ ) da temperatura durante a fase de exposição (patamar) entre os sensores da RSSF e do Validador.

O desvio de temperatura só é considerado durante a fase de patamar porque é nesta fase que os esterilizadores disparam o temporizador para contagem do tempo de ciclo.

Tabela 5 – Desvios padrão entre sensores nos ciclos executados.

Ciclo	Posição	Forno	RSSF		Validador	
			$\sigma$ médio (°C)	$\sigma$ máximo (°C)	$\sigma$ médio (°C)	$\sigma$ máximo (°C)
1	2	Kaye	0,1196	0,1732	0,085	0,122
2	2	Kaye	0,0855	0,6807	0,105	0,652
3	2	Kaye	0,1674	0,1732	0,105	0,652
4	2	Kaye	0,1406	0,1732	0,086	0,122
5	2	Kaye	0,1690	0,1732	0,101	0,122
6	2	Kaye	0,1667	0,1732	0,090	0,122
7	2	Kaye	0,1399	0,6000	0,097	0,200
8	2	Kaye	0,1674	0,1732	0,099	0,122
9	2	Kaye	0,1409	0,1732	0,094	0,122
10	3	Wika	0,1525	0,1732	0,098	0,122
11	3	Wika	0,1454	0,1732	0,107	0,122
12	3	Wika	0,2577	0,4041	0,177	0,327
13	3	Wika	0,2315	0,4041	0,223	0,604
14	3	Wika	0,0992	0,1732	0,149	0,217
15	3	Wika	0,1724	0,5132	0,417	0,606
16	3	Wika	0,1587	0,5132	0,494	0,782
17	3	Wika	0,1161	0,4583	0,437	0,776
18	3	Wika	0,2619	0,4583	0,045	0,261
19	4	Wika	0,2486	0,4041	0,059	0,152
20	4	Wika	0,2431	0,4583	0,047	0,335
21	4	Wika	0,3363	0,5132	0,089	0,182
22	4	Wika	0,1974	0,6506	0,085	0,195
23	4	Wika	0,2681	0,4583	0,099	0,292
24	4	Wika	0,2060	0,5132	0,104	0,336
25	4	Wika	0,2527	0,6506	0,064	0,148
26	4	Wika	0,2241	0,6807	0,138	0,581
27	4	Wika	0,2432	0,5774	0,071	0,305

Considerando-se somente os valores de desvio máximos, é possível gerar a matriz de dispersão entre a RSSF e o validador que, espera-se, seja menor que a incerteza da temperatura na RSSF. A vantagem de apresentar os gráficos em uma matriz é a facilidade de localizar comportamentos incomuns de casos individuais ou outros padrões (HOCKING, 2003).

A Figura 36 mostra a dispersão entre os desvios máximos na RSSF e no Validador. Neste caso, quanto mais a elipse se aproximar da reta central, menor será a diferença entre os dados obtidos na RSSF e no Validador.

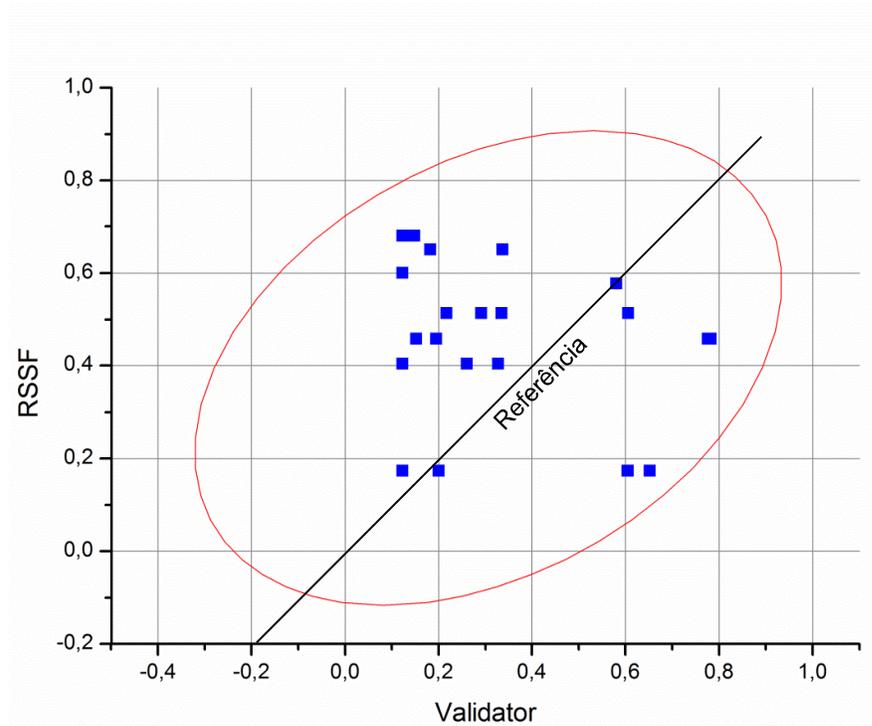


Figura 36 – Gráfico de dispersão RSSF x validador.

O erro quadrático dos sistemas (TABACNIKS, 2003) é dado pela Expressão (25):

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (25)$$

Sendo  $x_i$  o item amostrado e  $\bar{x}$  a média da amostra, resulta que os erros amostrais máximos para a RSSF e para o validador são, respectivamente, 0,036°C e 0,043°C.

No caso do cálculo de  $F_0$  as Tabelas 6 e 7 demonstram, respectivamente, os dados enviados pelo validador e pelos nós sensores da RSSF.

Tabela 6 – Resultado do cálculo de  $F_0$  enviado pelo Validador

$F_0$ - S1 (min)	$F_0$ - S2 (min)	$F_0$ - S3 (min)	$F_0$ - S4 (min)	$F_0$ - S5 (min)	Média (min)	$\sigma$ (min)
40,64	39,79	38,9	39,88	40,66	39,97	0,73
41,93	41,43	40,5	41,61	42,3	41,55	0,68
37,41	37,12	35,93	37,26	38,06	37,16	0,77
37,64	37,17	36,26	37,26	37,99	37,26	0,65
37,24	36,91	35,7	37,06	37,79	36,94	0,77
37,27	36,94	35,92	37,04	37,81	37,00	0,69
37,35	36,85	36,05	37	37,63	36,98	0,60
37,05	36,78	35,53	36,8	37,6	36,75	0,76
37,35	36,89	35,85	37,06	37,66	36,96	0,69
Média das médias					37,84	0,70

Tabela 7 - Resultado do cálculo de  $F_0$  enviado pela RSSF

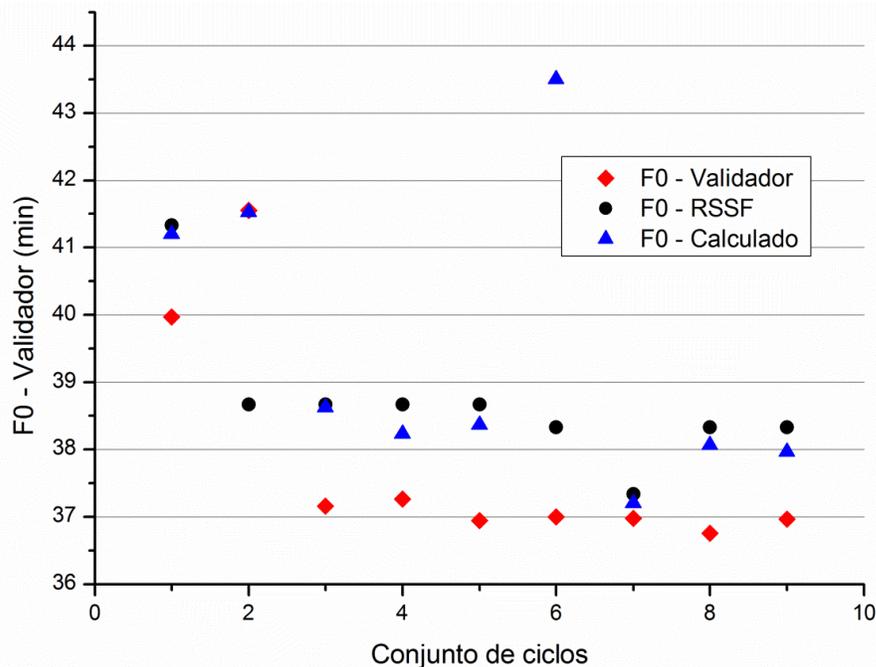
$F_0$ - Nó 1 (min)	$F_0$ - Nó 2 (min)	$F_0$ - Nó 3 (min)	Média (min)	$\sigma$ (min)
42	40	42	41,33	1,15
40	37	39	38,67	1,53
40	37	39	38,67	1,53
40	37	39	38,67	1,53
40	37	39	38,67	1,53
39	37	39	38,33	1,15
38	36	38	37,33	1,15
39	37	39	38,33	1,15
39	37	39	38,33	1,15
Média das médias			38,70	1,32

Finalmente o cálculo da letalidade  $F_0$  através do método matemático apresentado na Expressão (20) que tomou por base os dados de temperatura disponibilizados pelos nós sensores pela aplicação desenvolvida em Phyton é a apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 –  $F_0$  calculado pelos dados de temperatura coletados.

$F_0$ - Nó 1 (min)	$F_0$ - Nó 2 (min)	$F_0$ - Nó 3 (min)	Média (min)	$\sigma$ (min)
41,4	40,8	41,4	41,20	0,35
41,9	40,8	41,9	41,53	0,62
39,4	37,1	39,3	38,62	1,33
38,9	36,9	38,9	38,23	1,15
39,2	36,8	39,1	38,37	1,36
44,2	41,9	44,4	43,50	1,39
37,7	36	37,9	37,20	1,04
38,6	36,6	39	38,07	1,29
38,5	36,7	38,7	37,97	1,10
Média das médias			39,81	1,04

A relação entre os três sistemas de obtenção da letalidade pelo cálculo de  $F_0$  é apresentado no gráfico da Figura 37.

Figura 37 – Dispersão dos valores de  $F_0$ .

Com a determinação destes valores obtém-se o rol de resultados esperados para a gestão de dados.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No tocante às telecomunicações foram verificados os resultados práticos de enlace de rádio em três distâncias diferentes, mantendo-se os nós sensores fixos e deslocando-se a base e os resultados obtidos se aproximam de outros trabalhos relacionados em ambientes internos com obstáculos (TAM e TRAN, 1995).

Pelos resultados obtidos, embora tenhamos assumido que a distribuição do sinal se aproxime de um comportamento gaussiano ao longo do tempo, pode-se observar em determinados momentos a ocorrência de variações na potência que divergem desta tendência, o que é um fenômeno típico deste tipo de rede (ZHOU, HE, *et al.*, 2006).

Analisando a descrição do ambiente, nota-se que existe uma razoável movimentação de pessoas que interferem na propagação do sinal.

Um exemplo da divergência é o comportamento do sensor S2 no histograma da posição 3 (Figura 33) cuja distribuição não se aproxima de uma gaussiana. O estudo deste tipo de comportamento requer maior aprofundamento e pode ser alvo de trabalhos futuros.

Na comparação com os três sensores é possível verificar a repetitividade entre os sensores S1 e S3, ficando o sensor S2 com um comportamento destoante em relação aos outros dois.

O sensor S2 teve comportamento mais estável na menor distância e mais instável nas distâncias maiores, resultando em um desvio padrão bem maior que os outros dois sensores nas posições três e quatro.

Algumas hipóteses foram levantadas para tal comportamento. Uma delas seria o desvio do transceptor ao longo do tempo de uso ou o aquecimento do sistema. Outra possibilidade seria o fato das pessoas que circulavam no ambiente estarem interferindo com mais intensidade na visada deste sensor em relação à base.

Por outro lado, o comportamento do sensor S2 para o cálculo de  $F_0$  e acompanhamento da temperatura permaneceu estável, descartando-se falha no conjunto do Raduino.

Ainda, para efeito de estudo do enlace, o desvio de potência apresentado permitiu a prova do modelo e, portanto, seu efeito foi considerado como aceitável em um ambiente sujeito a interferências diversas.

Confrontando o resultado do cálculo de atenuação teórico pelo método proposto por Seidel (SEIDEL e RAPPAPORT, 1992, p. 92), observa-se que os resultados práticos estiveram dentro do desvio esperado frente aos obtidos pelo modelo.

Tal resultado comprova a tese que o modelo pode ser utilizado como ferramenta para estimar a atenuação do sistema, permitindo assim estimar-se alguns recursos necessários para projeto da RSSF.

O cálculo da margem da *fading* demonstrou a viabilidade do uso do método para garantir a probabilidade mínima de funcionamento do sistema. Para a aplicação proposta, no entanto, verifica-se que mesmo que alguns pacotes se percam ou o sistema caia pouco abaixo da margem pretendida, ainda assim a RSSF pode ser utilizada graças à solução empregada de cálculo da letalidade pelo microcontrolador. Em termos práticos, se o link estiver disponível ao término do processo já será possível inferir sobre a liberação ou não do artigo.

Em se tratando da comparação entre o cálculo de letalidade pelo microcontrolador versus o realizado através dos dados de temperatura armazenados, os resultados demonstram que o cálculo pelo microcontrolador apresenta maior proximidade dos resultados quando comparado com o instrumento de referência.

A análise do cálculo de  $F_0$  e sua comparação com o instrumento padrão pode-se observar que os dois sistemas apresentam resultados semelhantes e dentro do critério de aceitação estabelecido que considere o desvio máximo em cada sistema. O desvio padrão maior na RSSF está coerente com a exatidão do sensor utilizado.

Finalmente a análise da curva de distribuição térmica demonstra que o perfil gerado pela RSSF está coerente com o instrumento de referência e que os desvios apresentados correspondem ao erro imposto pela inexatidão de cada sistema.

## 6.1 Considerações

A hipótese da pesquisa de que uma RSSF seria a resposta a uma demanda de sistemas de acompanhamento do processo de esterilização por calor com suas primícias passa por algumas áreas do conhecimento das quais convém destacar as tecnologias de telecomunicações, de instrumentação e eletrônica e de microbiologia.

Frente aos resultados obtidos e feitas as considerações da análise, alguns pontos podem ser debatidos para contribuir com o aperfeiçoamento do sistema e ajudar na conclusão dos trabalhos.

Na rede pesquisada a variabilidade do meio foi um dos fatores observados e que poderia tornar o sistema indisponível em alguns instantes se o sinal chegar abaixo do limite de sensibilidade do transceptor.

Uma solução prática para melhorar a intensidade do sinal de rádio seria a elevação das unidades que tornaria o sistema menos susceptível aos obstáculos causados pela presença de pessoas circulando no ambiente.

O uso de antenas setoriais ou mesmo direcionais poderia reduzir a potência necessária para garantir a probabilidade do sistema (DAI, NG, *et al.*, 2011) e diminuir a susceptibilidade a interferências eletromagnéticas.

Embora o modelo de estudo tenha considerado a distribuição gaussiana para a potência de *uplink* como parâmetro de avaliação, em alguns pontos a distribuição ficou aparentemente fora desta tendência. Tal diferença deve ser alvo de estudos mais aprofundados, para melhorar o modelo proposto.

A forma de acesso empregada (*polling*) pode ser tornar um fator de risco para a propagação do sinal e confiabilidade do meio. Soluções comerciais apontam que uma rede com topologia *mesh* seria uma solução mais segura e confiável para uma rede deste tipo (GE, 2012).

Todavia, dado o objetivo do projeto o principal elemento a ser considerado é o  $F_0$  e, neste caso, a solução do cálculo diretamente no microcontrolador pode ser uma saída viável dotando o sistema de indicação visual no próprio nó sensor quando a letalidade mínima for alcançada. Assim, mesmo com a queda do *link* ainda seria possível utilizar os sensores como elementos de avaliação emergencial.

Um grande diferencial no projeto foi justamente o uso de rotina de interrupção no microcontrolador para o cálculo da letalidade. Com a implementação da interrupção por *software* o intervalo de tempo de integração foi executado com precisão e com drástica redução do erro de cálculo numérico.

Os intervalos de integração por *hardware* ficaram na ordem de 120 operações por minuto, que é um valor bem superior ao que seria possível de se realizar externamente a partir da leitura e registro das temperaturas utilizando a topologia de *pooling* de sensores.

Em relação à transmissão de dados deve-se observar que não foi imposto nenhum tratamento para a segurança dos dados. Em sistemas mais robustos seria conveniente a identificação de ameaças de segurança e a proposição de mecanismos de combate ou mitigação às mesmas (PATHAN, LEE e HONG, 2006) (WALTERS, LIANG, *et al.*, 2006).

Em aplicações comerciais espera-se que os sensores utilizados sejam tão exatos e mais precisos que os sensores do equipamento analisado (no caso o esterilizador). Nos esterilizadores comerciais os sensores utilizados são geralmente do tipo platina (PT-100) e as placas de conversão analógico-digital têm resolução mínima de 10 bits, conferindo exatidão na ordem de 0,5°C da temperatura de referência em 121°C.

É conveniente que em um projeto de RSSF que vá investigar o desvio de temperatura em sistemas deste tipo o desvio do sistema seja menor que  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Isso pode ser obtido com circuitos que utilizem sensores PTC ou termopares de boa qualidade ligados a conversores ADC de alta resolução.

Em termos de custo, as RSSF demonstram ser bastante viáveis se comparadas aos sistemas convencionais com fio. Pesquisas apontam que o custo do cabeamento (e sua infraestrutura) em uma instalação de sensores convencionais é da ordem de 80% do valor total do projeto enquanto que em sistemas sem fio este valor não é considerado (ZHAO, 2011).

Finalmente temos a questão da conservação de energia: nos estudos realizados os nós sensores estiveram o tempo todo ligados a uma fonte de alimentação externa. Em RSSF um dos fatores que viabilizam este tipo de tecnologia é justamente a mobilidade, ou seja, os nós sensores devem ser capazes de operar com baterias e ter um tempo de vida razoável para realizar os estudos sem desvanecer e este parâmetro em um estudo futuro poderia ser objeto de análise.

## 6.2 Trabalhos futuros

Dada sua abrangência a pesquisa possibilita seu desdobramento e abre espaço para uma série de trabalhos futuros tanto na área de telecomunicações quanto na área de microbiologia.

Em telecomunicações será possível a partir deste trabalho se desenvolver estudos relacionados a outros transceptores, como aqueles que apresentam compatibilidade com padrão para RSSF IEEE 802.15.4 abordando-se, por exemplo, as vantagens dos protocolos da camada física e de acesso ao meio para este padrão.

Algoritmos de roteamento e arquitetura *mesh* são desejáveis para implementações que envolvam ambientes industriais padrão GMP, assim como medidas para segurança de dados validáveis.

Sistemas portáteis que utilizam baterias ou capacitores como fontes de alimentação também são desejáveis neste tipo de aplicação e pesquisas de fontes alternativas e de conservação de energia podem ser conduzidas.

Embora a literatura assuma que nas RSSF a distribuição da potência se aproxime de uma função gaussiana, o que se observa é outras distribuições ocorrem. O estudo destas distribuições e a confrontação de modelos pode ser alvo de várias pesquisas.

Em microbiologia o mesmo projeto pode ser utilizado para o desenvolvimento de RSSF que realizam o controle microbiológico de bactérias e fungos, monitorando as variáveis do ambiente e enviando os dados a um centro de processamento ou controlando atuadores que lancem inseticidas em quantidades controladas.

O projeto pode ainda ser adaptado para a monitoração de outros sistemas de esterilização, com todas as vantagens que a RSSF representa.

## 7 CONCLUSÃO

A pesquisa demonstrou que é possível o uso de RSSF como meio para a monitoração de processos térmicos e cálculo de letalidade em esterilizadores com uma qualidade de resultados adequada e que pode ser melhorada em função de um bom projeto de *hardware* e *software*.

O objetivo da pesquisa que consistia em propor o uso de uma RSSF para monitorar a relação tempo x temperatura em esterilizadores a calor úmido e, baseado nestes parâmetros, auxiliar na tomada de decisão quanto à classificação da esterilidade provável do produto processado demonstrou-se viável.

A aplicação prática do projeto, no entanto, passa pela necessidade de se desenvolver um hardware com características específicas para esta finalidade.

Temos que considerar também que o uso da tecnologia de RSSF é recente e a substituição das tecnologias convencionais (como no caso dos indicadores químicos) deve passar por estudos e alterações normativas.

No Brasil as atividades relacionadas à saúde são reguladas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que determina na legislação pertinente o uso explícito de indicadores químicos como monitores de processos de esterilização (ANVISA, 2012). Já na Europa a Agência de Medicina Europeia admite a liberação paramétrica através da comprovação dos parâmetros físicos do processo e do cálculo de  $F_0$  em sistemas validados (EMEA, 2001).

A RSSF também tem que operar dentro do que estabelece a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e os transceptores utilizados para compor a rede deverão necessariamente estar homologados (ANATEL, 2000).

Se lançarmos o olhar para a tecnologia da RSSF pelo viés da sustentabilidade o apelo pela solução proposta na pesquisa fica evidente: diferentemente dos indicadores químicos que são descartáveis, gerando resíduo e poluindo o ambiente, o sistema eletrônico é de uso permanente, reaproveitável tantas vezes quanto necessário e não deixa resíduo.

Conclui-se, portanto, que o objetivo de desenvolvimento de um modelo de RSSF para a monitoração de esterilização por calor capaz de substituir sistemas convencionais foi alcançado e que, com algum investimento em pesquisa e desenvolvimento, o modelo pode ser transformado em um produto comercial, adaptando-o às exigências regulatórias.

## 8 REFERÊNCIAS

3M. *Digital Monitoring*, 3M Healthcare Solutions 2012. Disponível em: <[http://solutions.3m.co.uk/wps/portal/3M/en\\_GB/oem/MedicalOEM/markets/Sterilization-Equipment/digital-platform/](http://solutions.3m.co.uk/wps/portal/3M/en_GB/oem/MedicalOEM/markets/Sterilization-Equipment/digital-platform/)>. Acesso em: 6 Setembro 2012.

ABNT. NBR-ISO 17665 - *Esterilização de produtos para saúde — Vapor Parte 1: Requisitos para o desenvolvimento, validação e controle de rotina nos processos de esterilização de produtos para saúde*, 22 Janeiro 2010. p.39.

ACHTERBER, D. *Steam Sterilization. Hospital Engineering & Facilities Management*, London, January 2005. 1-4.

AKYILDIZ, I. F. et al. *Wireless sensor networks: a survey*. Computer Networks, Atlanta, n. 38, p. 393-422, December 2001.

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. *Wireless Sensor Networks*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2010.

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C.; AKAN, O. B. *A Cross-Layer Protocol for Wireless Sensor Network*. IEEE - 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 1102-1107.

AL-KARAKI, J. N.; KAMAL, A. E. *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*. IEEE Wireless Communications, v. 11, n. 6, p. 6-28, December 2004.

ANATEL. *Regulamento para certificação e homologação de produtos para telecomunicações*. Agência Nacional de Telecomunicações. Brasília, p. 31. 2000.

ANSI/AAMI/ISO18472. ANSI/AAMI/ISO 18472:2006/(R)2010 - *Sterilization of health care products—Biological and chemical indicators—Test equipment*. American National Standard and Association for the Advancement of Medical Instrumentation. [S.l.], p. 45. 2006.

ANVISA. *Farmacopeia Brasileira - volume 1*. 5ª edição. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Brasília – DF. 2010.

ANVISA. RDC No-15 - *Boas práticas para o processamento de produtos para saúde*. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Brasília - DF, p. 15. 2012. (Publicado no DOU N° 54, de 19 de março de 2012 - Seção 1 - pag. 43, 44, 45 e 46).

ARDUINO. <http://www.arduino.cc>, 2011.

ATMEL. *megaAVR Microcontrollers-* Atmel Corporation. Atmel Corporation, 2012. Disponível em: <<http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/megaavr.aspx>>. Acesso em: Julho 2012.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. *The Internet of Things: A survey*. Computer Networks, Italy, n. 4247, p. 19, 31 May 2010. ISSN 1389-1286.

BARROSO, L. C. et al. *Cálculo Numérico (com aplicações)*. Segunda Edição. ed. São Paulo: Harbra Ltda., 1987.

BENOIT, F. et al. *A comparison of four commercially available electronic steam penetration tests according to ISO 11140 part 4*. Zentral Sterilisation - Central Service, n. 19, p. 174–184, mar. 2011.

BIGELOW, W. D. *The Logarithmic Nature of Thermal Death Time Curves*. The Journal of Infectious Diseases, Washington, D. C., v. 29, n. 5, p. 528-536, November 1921.

BOCA, B. M. et al. *An Overview of the Validation Approach for Moist Heat Sterilization, Part I*. Pharmaceutical Technology, September 2002. 61-70.

BOONSAWAT, V. et al. *XBee Wireless Sensor Networks for Temperature Monitoring*. 2nd ECTI-Conference on Application Research and Development (ECTI-CARD 2010). Thailand: [s.n.]. 2010. p. 1-6.

BORIELLO, G.; WANT, R. *Embedded Computation Meets the World-Wide-Web*. Communications of the ACM, New York, NY, USA, v. 5, n. 43, p. 59–66, May 2000.

BRANDL, M. et al. *A Low-Cost Wireless Sensor System and Its Application in Dental Retainers*. IEEE Sensors Journal, v. IX, n. 3, p. 255-262, March 2009.

BUGNO, A. *Esterilidade: Validação de Metodologia e Propostas de Otimização de Resultados*. Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 33-34. 2001.

BURRELL, J.; BROOKE, T.; BECKWITH, R. *Vineyard Computing: sensor network in agricultural production*. IEEE Pervasive Computing, January-March 2004. 38-45.

CAMILO, T. et al. *Redes de Sensores Sem Fio, considerações sobre a sua instalação em ambiente real*. Conference on Mobile and Ubiquitous Systems. Braga: [s.n.]. 2006. p. 90-94.

CHEHRI, A. et al. *RF Link Budget Analysis at 915 MHz band for Wireless Sensor Networks*. International Journal of Electrical and Computer Engineering, v. 5, n. 5, p. 281-286, 2010. ISSN 2010-3956.

CONANT, R. *Wireless sensor networks: Driving the New Industrial Revolution*. Dust Networks. Hayward, CA, p. 11. 2011.

CONTIKI. <http://www.contiki-os.org/>, 2012.

CORREA, S. M. B. B. *Probabilidade e estatística*. 2ª ed. - Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116 p.

CYRIACO, F. S. *Gerência de redes de sensores sem fio: uma abordagem com SNMP*. Dissertação de Mestrado – Campinas: PUC-Campinas, 119p. 2011.

DAI, H.-N. et al. *An overview of using directional antennas in wireless networks*. International Journal of Communication Systems, 10 November 2011. 1-36.

DARGIE, W.; POELLABAUER, C. *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2010.

DIAMOND, D. et al. *Wireless Sensor Networks and Chemo-Biosensing*. Chemical Reviews, Dublin, v. 108, n. 2, p. 652-679, January 2008.

EBRO. *Ebro Measurement*. EBRO, 2012. Disponível em: <<http://shop.ebro.com/medical/validierung/ebi-15.html>>. Acesso em: 6 Setembro 2012.

EMA. *Note for Guidance on Parametric Release*. The European Agency for the Evaluation of Medicinal Product. London, p. 2-3. 2001.

FAROOQ, M. O.; KUNZ, T. *Operating Systems for Wireless Sensor Networks: A Survey*. Sensors, Basel, v. 11, p. 5900-5930, 31 June 2011. ISSN 1424-8220.

FU, X. et al. *A Wireless Implantable Sensor Network System for In Vivo Monitoring of Physiological Signals*. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, v. XV, n. 4, p. 577-584, July 2011.

GE, M. & C. *GE Valprobe RF SmartMesh*. GE Measurement & Control Solutions, 2012. Disponível em: <[http://www.ge-mcs.com/download/validation/8technical\\_education\\_note.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/validation/8technical_education_note.pdf)>. Acesso em: 12 Setembro 2012.

HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicação Wireless*. Tradução de Glayson Eduardo de Figueiredo e José Lucimar Nascimento. Porto Alegre: Bookman, 2008. 580 p. ISBN 978-85-60031-99-3.

HILL, J. et al. *System Architecture Directions for Networked Sensors*. ASPLOS-IX Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. Cambridge, MA, p. 1-12. 2000. (1-58113-317-0).

HOCKING, R. R. *Methods and Applications of Linear Models Regression and the Analysis of Variance*. Second Edition. ed. [S.I.]: Wiley and Sons, inc, 2003.

HWANG, J.; SHIN, C.; YOE, H. *Study on an Agricultural Environment Monitoring Server System using Wireless Sensor Networks*. Sensors Journal, n. 10, 8 December 2010. 11189-11211. doi:10.3390/s101211189.

IKRAM, W.; THORNHILL, N. F. *Wireless Communication in Process Automation: A Survey of Opportunities, Requirements, Concerns and Challenges*. Control 2010, Coventry. United Kingdom: [s.n.]. 2010. p. 6.

INTERSTER. *Digital Helix System (DPCD)*. Interster Internacional, 2012. Disponível em: <<http://www.interster.nl/international/content/view/60/>>. Acesso em: 1 out. 2012.

ISO11140. *Sterilization of health care products — Part1 - General requirements*. ISO (International Organization for Standardization). Geneva, Switzerland, p. 5-6. 2005.

KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. ISBN: 0-470-09510-5. ed. England: John Wiley & Sons, 2005.

KAYE. *Kaye Validator - Guide to thermal validation and temperature calibration*. General Electric Company. [S.I.], p. 16. 2009. disponível em <http://www.ge-mcs.com/download/validation/BR-146A.pdf>.

KIDANE, F. Y.; RAPACIOLI, G.; AGAZZI, S. *Low-Data-Rate and Low-Power Wireless Sensor Networks in Hospitals and Laboratories*. H&S. Milano, p. 12. 2009.

KIM, S.; FONSECA, R.; CULLER, D. *Reliable Transfer on Wireless Sensor Network*. Sensor and Ad Hoc Communication and Networks Conference on. IEEE SECON 2004. Santa Clara, 2004. P.449-459.

LITEOS. <http://www.liteos.net/>, 2012.

LOHIER, S. et al. *Multichannel Access for Bandwidth Improvement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks*. IFIP/IEEE Wireless Days 2011. Ontario - Canada: [s.n.]. 2011. p. 6.

LOUREIRO, A. A. et al. *Rede de sensores sem fio*. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. Natal - RN: UFMG. Março 2003. p. 48.

LUQUETA, G. R. *Princípio da esterilização por calor úmido - Como funciona uma autoclave*. Controle de Contaminação, São Paulo, n. 113, p. 25-29, Setembro 2008. ISSN 1678-6858.

MILENKOVIC, A.; OTTO, C.; JOVANOVIĆ, E. *Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation*. Elsevier - Computer Communications, v. 29, p. 2521-2533, March 2006. ISSN 2521-2533.

NIRAJ, V. *Use of Wireless Technology in a GMP Environment*. Pharma Bio World, Mumbai, October 2009. 60-63.

PATHAN, A.-S. K.; LEE, H.-W.; HONG, C. S. *Security in wireless sensor networks: issues and challenges*. Advanced Communication Technology, 2006. ICACT 2006. The 8th International Conference. Korea: IEEE. 2006. p. 1043-1048.

PERKINS, J. J. *Principles and Methods of Sterilization in Health Sciences*. 2nd Edition. ed. Springfield, IL: Thomas Publisher Ltd., 1983.

PFLUG, I. J. *Microbiology and Engineering of Sterilization Processes*. Tenth Edition. ed. Minneapolis, MN: Environmental Sterilization Laboratory, 1999.

PFLUG, I. J.; BEARMAN, J. E.; JACOBSON, R. L. *Biological Indicators for Monitoring Sterilization Processes*. Environmental Microbiology as Related to Planetary Quarantine. Washington, DC: Division of Environmental Health School of Public Health & Space Science Center at the University of Minnesota. 1972. p. 67-74.

PONAGANTI, M.; SHEKAR, T. P.; SAGAR, D. *Initiative Determination Procedure of Cross-Layer Protocol in Wireless Sensor Networks*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, v. 2, Issue 4, p. 314-319, April 2012. ISSN 2277 128X.

POTDAR, M. et al. *Applications of Wireless Sensor Networks in Pharmaceutical Industry*. 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. Bradford, United Kingdom: IEEE Computer Society. 2009. p. 642-647.

RADIUINO. <http://www.radiuino.cc>, 2012.

RAHN, O. *Physical Methods of Sterilization of Microorganisms*. Laboratory of Bacteriology, Cornell University. Ithaca, NY, p. 47. 1945.

RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. Tradução de Daniel Vieira. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

RFBEE. RFbee V1.1 - *Wireless arduino compatible node*. Seeedstudio, 2009. Disponível em: <[http://www.seeedstudio.com/depot/rfbee-v11-wireless-arduino-compatible-node-p-614.html?cPath=139\\_140](http://www.seeedstudio.com/depot/rfbee-v11-wireless-arduino-compatible-node-p-614.html?cPath=139_140)>. Acesso em: 17 Outubro 2011.

RIBEIRO, M. P.; BARRADAS, O. C. M. *Telecomunicações: Sistemas Analógico-Digitais*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. ISBN 621.38042 R484TEL.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. D. R. *Cálculo Numérico - Aspectos Teóricos Computacionais*. 2ª Edição. ed. [S.l.]: Pearson - Makron Books, 1997.

RUNDEL, P. W. et al. *Environmental sensor networks in ecological research*. New Phytologist, n. 182, p. 589–607, April 2009. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02811.x.

RUTALA, W.; WEBER, D. J.; HICPAC. *Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities*. CDC - Department of Health and Human Services - USA. Chapel Hill, NC, p. 91. 2008.

SEIDEL, S. Y.; RAPPAPORT, T. S. *914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 40 Issue 2, p. 207 - 217, February 1992.

SHIH, E. et al. *Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy Efficient Wireless Sensor Networks*. Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. New York: [s.n.]. 2001. p. 272-286.

SMITH, S. W. *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing San Diego, CA, USA. 1997. 625 p. ISBN:0-9660176-3-3

STERLAB. *Wiscan Probe*. Sterlab Co., 2011. Disponível em: <[http://www.sterlab.com/en/wiscan\\_sonde.html#>](http://www.sterlab.com/en/wiscan_sonde.html#>). Acesso em: 30 Setembro 2012.

SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. *Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Mumbai, India, v. 13, p. 443-461, Third Quarter 2011. ISSN 1553-877X.

TABACNIKS, M. H. *Conceitos básicos de teoria dos erros*. Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 27. 2003.

TAM, W. K.; TRAN, V. N. *Propagation modelling for indoor wireless communication*. Electronics & Communication Engineering Journal, IEEE, v. 7, n. 5, p. 221-228, October 1995.

TANENBAUM, A. S. *Rede de Computadores*. Tradução de V.D. Souza. 4º edição. ed. Rio de Janeiro: Campus - Elsevier Editora Ltda., 2003.

TEXAS. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors datasheet*. Texas Instruments, 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 28 Janeiro 2012.

TEXAS. *Transceptor CC1101 Datasheet*. Texas Instruments, 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>>. Acesso em: 12 Janeiro 2012.

TINYOS. <http://www.tinyos.net/>, 2012.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*. Tradução de Paulo Machado Mors. 6ª edição. ed. [S.l.]: LTC, v. I, 2009. 577-578 p.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE P. U. B. *Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações*. 6ª edição – São Paulo: Érica, 222 páginas, 2009.

UETERA, Y. et al. *Thermal Evaluations in the Textile Pack Using the Wireless Logger in the Prevacuum Autoclave with a Failing Vacuum Pump Function*. PDA Journal of GMP and Validation in Japan, Tokyo, v. 5, n. 2, p. 102-107, 2003.

VANCEA, C. M.; VIMAN, L. *Wireless data logger for thermal validation systems*. IEEE 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). Timisoara, Romania: [s.n.]. 2011. p. 295-298.

WALTERS, J. P. et al. *Wireless Sensor Network Security: A Survey*. In: XIAO, Y. Security in Distributed, Grid, and Pervasive Computing. Boca Raton, FL: Auerbach Publications, 2006. Cap. 17, p. 1-50.

WANG, Q.; BALASINGHAM, I. *Wireless Sensor Networks - An Introduction*. In: MERRET, G. V.; TAN, Y. K. Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design. Rijeka - Croatia: InTech, 2010. Cap. 1, p. 3-16. ISBN 978-953-307-321-7.

WINKLER, M. et al. *Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks*. Journal of Telecommunications and Information Technology, fev. 2008. 37-45.

YNOGUTI, C. A. *Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos*. Inatel – Instituto Nacional de Telecomunicações. Apostila da disciplina TP501. Santa Rita do Sapucaí, p. 41-43, Janeiro de 2011.

ZHAO, G. *Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey*. Network Protocols and Algorithms, Davis, CA, v. 3, n. 1, p. 46-63, April 2011. ISSN 1943-3581.

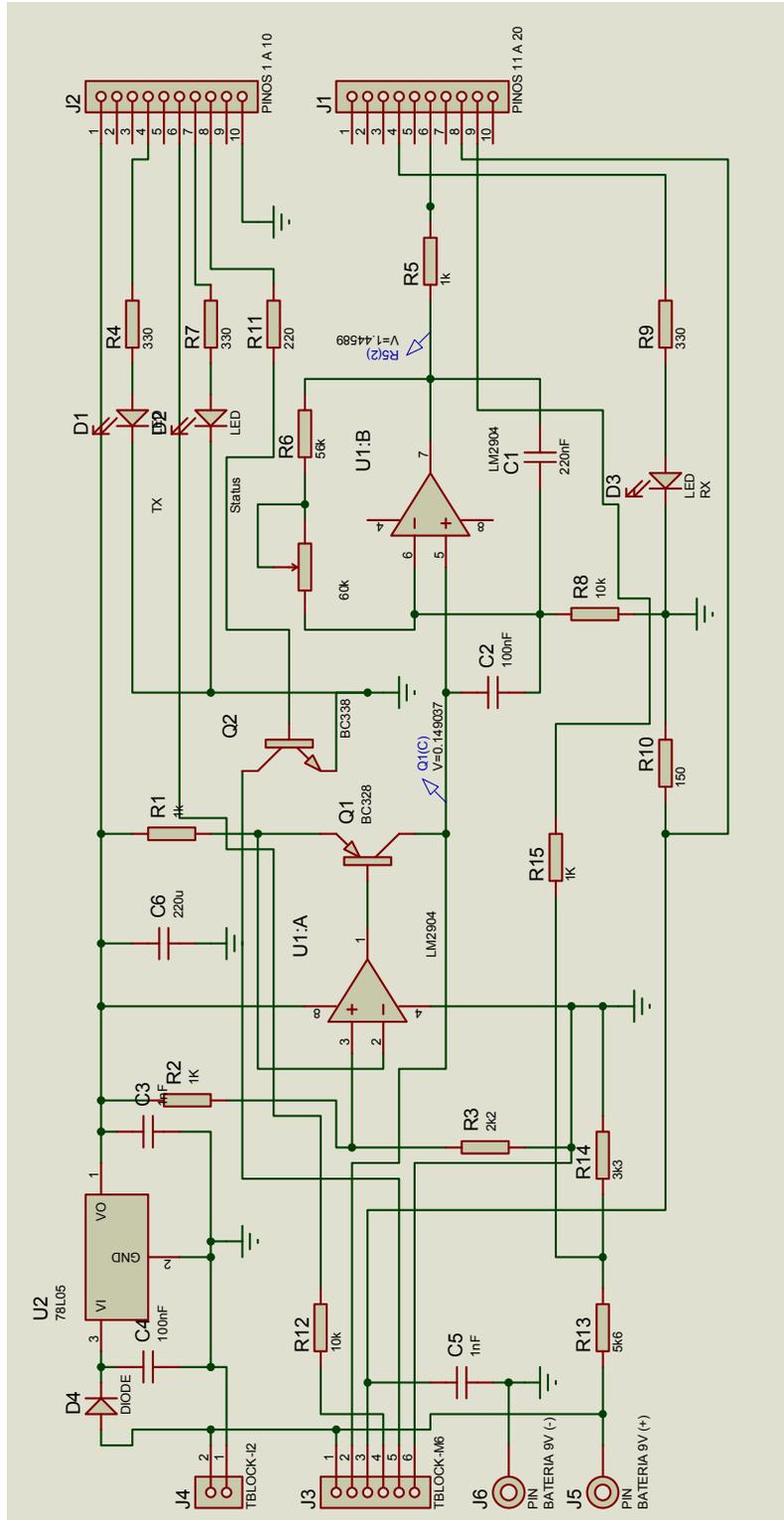
ZHOU, G. et al. *MMSN: Multi-Frequency Media Access Control for Wireless Sensor Networks*. IEEE - 25th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2006). Barcelona: [s.n.]. 2006. p. 1-13.

ZHOU, G. et al. *Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks*. ACM Transactions on Sensor Networks, New York, v. 2, Issue 2, p. 221-262, May 2006. ISSN 10.1145/1149283.1149287.

## 9 APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DO MICROCONTROLADOR PARA O CÁLCULO DE LETALIDADE $F_0$ .

```
void IntTimer1()
{
  /******
  * Calibração do sensor para calculo de F0
  Sensor 1 -> 0.54
  Sensor 2 e 3 -> 1.83
  *****/
  float Cal = 0.54; //Este é o código do sensor S1
  //AD0 - Leitura da temperatura
  AD0 = analogRead(A0);
  Temp =(AD0 * 0.3223) + Cal;
  //AD3 acumula o valor de F0 100C e acima
  if (Temp >= 100)
  {
    F0 = F0 + pow(10,((Temp - 121.1)/10));
    MIN = int(round(F0))/120; //dividido pela base de tempo de 500 us = 120 amostras por minuto.
  }
  else {}
}
```

# 10 APÊNDICE B – DIAGRAMA ELETRÔNICO DO SENSOR DA VERSÃO INICIAL.



## 11 APÊNDICE C – ARTIGO PUBLICADO NO VI WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO PAULA SOUZA EM 2011.

### Uso de redes de sensores sem fio no apoio ao controle do reprocessamento de artigos médico-hospitalares.

GERSON ROBERTO LUQUETA

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de  
Tecnologia Arthur de Azevedo – São Paulo – Brasil /  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Campinas – SP – Brasil  
[gerson.luqueta@fatec.sp.gov.br](mailto:gerson.luqueta@fatec.sp.gov.br)

OMAR CARVALHO BRANQUINHO

Pontifícia Universidade Católica de Campinas – Campinas – SP – Brasil  
[omar.braquinho@gmail.com](mailto:omar.braquinho@gmail.com)

**Resumo:** Este artigo apresenta proposta de uso de redes de sensores sem fio na monitoração das grandezas envolvidas nos processos de limpeza, desinfecção, esterilização e armazenagem de artigos médico-hospitalares dentro de um Centro de Material e Esterilização como ferramenta de apoio ao controle da qualidade do serviço e redundância na segurança do processo.

Palavras chaves: Rede, sensores, desinfecção, esterilização.

**Abstract:** This paper presents a proposal for use of wireless sensor networks in monitoring of the quantities involved in the process of cleaning, disinfection, sterilization and storage of medical products in a center of sterile materials as a support tool for quality control service and redundancy in process safety.

Keywords: Wireless, sensors, disinfection, sterilization.

#### 1) Introdução

As redes de sensores sem fio (RSSF) representam uma fração emergente da tecnologia que envolve várias áreas do conhecimento tais como telecomunicações, microcontroladores, controle analógico e digital, micromecânica, etc. [1]. Em termos de áreas da engenharia, as RSSF representam a união entre a tecnologia de redes de telecomunicação e a mecânica de precisão, com um potencial enorme em termos de aplicabilidade. De fato, as aplicações de RSSF vão desde o uso militar [2] até a aplicação em agronomia e saúde humana [3]. Teoricamente, qualquer grandeza pode ser

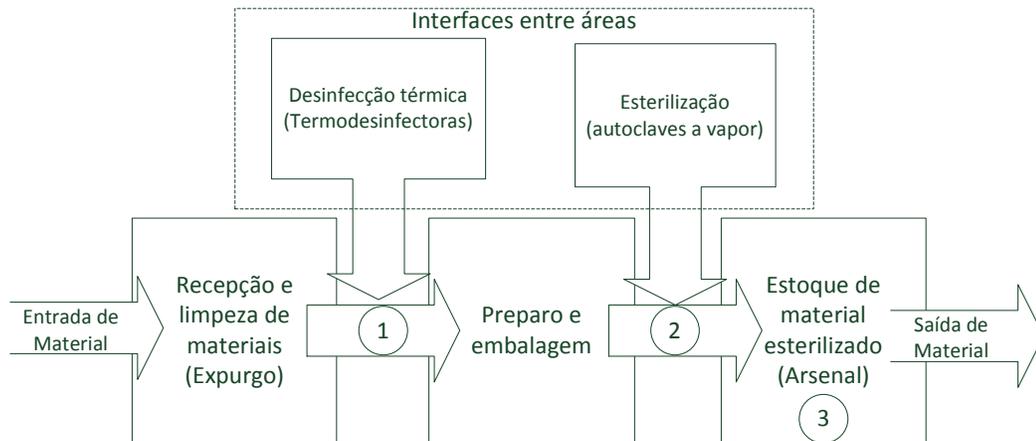
monitorada e em certas circunstâncias controlada por estes dispositivos, permitindo grande abrangência da tecnologia, com a vantagem da integração destas à crescente rede de telecomunicações sem fio em todo o planeta.

As RSSF podem ser compostas desde algumas unidades (chamados “nós sensores”) até milhares de elementos que formam uma rede local sem fio [4] e, com o uso de determinadas interfaces, integradas a outras redes como, por exemplo, a ethernet. Dentro do ambiente de cuidado à saúde humana, mais particularmente junto ao Centro de Materiais e Esterilização<sup>1</sup> (CME) os sensores sem fio podem ser um importante aliado no controle de grandezas essenciais para a obtenção de artigos médico-hospitalares seguramente estéreis como parte das ações para o controle da infecção hospitalar.

A seção 2 apresenta o levantamento dos processos em cada área e a escolha das variáveis a ser monitoradas tanto nos quesitos de grandezas de monitoração do processo quanto das variáveis relativas ao desempenho da rede. A seção 3 apresenta as conclusões da fase anterior e os desdobramentos que culminarão na conclusão do trabalho científico.

## 2) Metodologia

A figura 1 mostra a segmentação de um Centro de Material e Esterilização (CME) e suas respectivas interfaces.



**Figura 1** – Fluxograma unidirecional do processo de limpeza e esterilização dentro de um CME

Baseado no fluxograma operacional unidirecional [5] foi levantado o seguinte processo dentro de um CME [6]: recepção e inspeção de artigos, limpeza mecânica (manual ou automatizada), desinfecção térmica, secagem, inspeção e embalagem, esterilização por vapor saturado e armazenagem.

Com o intuito de garantir a correta esterilização dos materiais, verificou-se que existem três pontos de controle cruciais e que são constantemente monitorados pelo grupo operacional, que são a letalidade da desinfecção, a letalidade de esterilização e

<sup>1</sup> - O termo “Centro de Material e Esterilização” é proposto pela Sociedade Brasileira de Enfermeiros de Centro Cirúrgico, Recuperação Anestésica e Centro de Material e Esterilização (SOBECC) como a denominação adequada às áreas que processam ou reprocessam artigos médico-hospitalares dentro dos estabelecimentos de saúde no Brasil (2009) enquanto a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) denomina o setor como “Central de Esterilização”.

as condições de armazenagem (temperatura e umidade relativa). Estes pontos de controle estão representados na figura 1 pelos círculos 1 a 3, respectivamente. Com base nestas observações ficou estabelecido que a RSSF irá atuar justamente nestes pontos, como elemento de automação e redundância do processo.

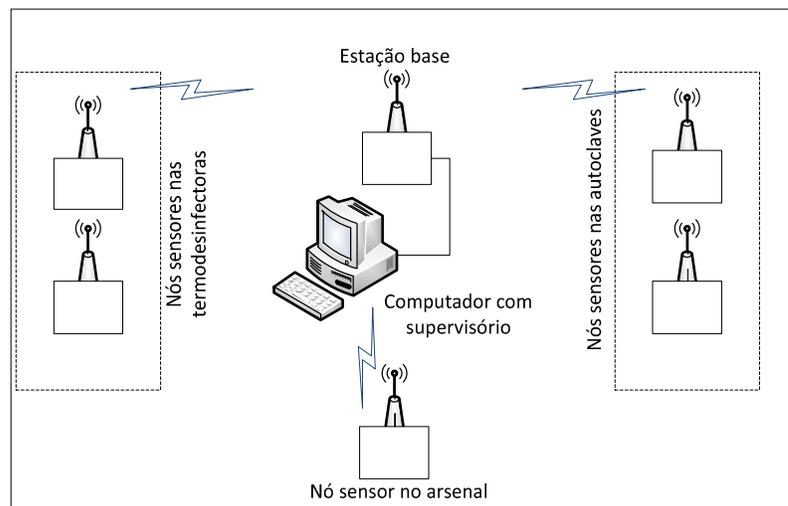
O processo de desinfecção ocorre através da circulação de água aquecida pelo material após um processo de limpeza mecânica, onde as variáveis de processo são a temperatura e o tempo, logo, os sensores utilizados neste sistema demandam apenas a verificação da temperatura e pequena capacidade computacional, de tal forma a coletar e integrar valores de temperatura no tempo, conforme a equação 1 [7]:

$$A_0 = \int_0^t 10^{\frac{(Td-80)}{10}} dt \quad (1)$$

A esterilização considera a exposição do material ao vapor saturado por um determinado intervalo de tempo. Para considerar um artigo estéril, calcula-se, assim como na desinfecção, a integral da temperatura no tempo (equação 2) [8]. Valendo-se da lei dos gases ideais, podemos considerar a relação entre pressão e temperatura como as variáveis a serem monitoradas, já que os demais parâmetros da equação são fixos e relativos ao projeto do esterilizador, dotando o nó sensor de capacidade computacional para calcular o parâmetro de letalidade.

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{(Te-121,1)}{Z}} dt \quad (2)$$

Na área de armazenagem o que se controla é a temperatura (que deve ficar entre 18 e 22°C) e umidade relativa (entre 37 a 70%) [9]. Os nós sensores desta área necessitam somente capacidade de monitoração das variáveis consideradas. Todas estas grandezas, uma vez coletadas, podem ser enviadas a um nó central e deste disponibilizadas na rede da instituição, servindo de métrica para a gestão dos artigos esterilizados. A configuração básica do sistema seria a apresentada na figura 2.



**Figura 2** – Configuração básica da rede de sensores sem fio no CME

Do ponto de vista da rede de sensores, as métricas a serem verificadas são: a disponibilidade do nó sensor (alive), a potência de transmissão de cada nó sensor e o estado de energia (quando em modo de bateria). Estas métricas serão utilizadas

como ferramenta de apoio para a decisão sobre a quantização e disponibilização física dos nós sensores em cada ambiente considerado.

A tabela 1 resume os pontos escolhidos e as métricas a serem monitoradas para o processo e para a qualidade da rede.

**Tabela 1** – Métricas de processo e rede por área monitorada

<b>Ambiente</b>	<b>Métricas de processo</b>	<b>Métricas de rede</b>
Lavadoras termodesinfectoras	Temperatura	RSSI, disponibilidade, estado da bateria.
Autoclaves a vapor	Temperatura e pressão	RSSI, disponibilidade, estado da bateria.
Arsenal (estoque de produtos esterilizados)	Temperatura e umidade relativa	RSSI, disponibilidade, estado da bateria.

### 3) Conclusões

O estudo preliminar demonstrou viabilidade teórica do uso de redes de sensores sem fio dentro do CME (quando se observa a aplicação fim a fim) graças à compatibilidade das grandezas de reprocessamento com a tecnologia disponível. O desdobramento do trabalho consiste na coleta de dados em um ambiente real, comparando as métricas de processo dos nós sensores com os sensores com fio e os indicadores normalmente utilizados nas unidades, a fim de corroborar com as observações preliminares.

No desenvolvimento da etapa de coleta de dados deve-se verificar também se as condições ambientais influenciarão na qualidade da rede e como esta irá se comportar dentro de uma demanda contínua de informações.

Por fim, a implantação da planta piloto irá demandar o desenvolvimento de estrutura de hardware e software compatíveis com o projeto.

### 4) Referências

#### **Artigos em Revistas e Anais e Capítulos de Livros**

- [1] Loureiro, A. A., Ruiz, L. B., Nogueira, J. M. S., and Mini, R. A. (2002). Rede de sensores sem fio - Porto, I. J, editor, *Simpósio Brasileiro de Computação, Jornada de Atualização de Informática*, pages 193 – 234.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “A Survey on Sensor Networks”, *IEEE Communications Magazine*, Ago. 2002.
- [3] 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.
- [4] Geoff V Merret (Editor) and Yen Kheng Tan (Editor-in-Chief), *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*, InTech, Croatia, 2010.
- [5] Práticas Recomendadas SOBECC / Sociedade Brasileira de Enfermeiros de Centro Cirúrgico, Recuperação Anestésica e Centro de Material e Esterilização. – 5ª edição, São Paulo: SOBECC, 2009, pp.186.

- [6] Orientações gerais para Central de Esterilização / Ministério da Saúde, Secretaria de Assistência à Saúde, Coordenação-Geral das Unidades Hospitalares Próprias do Rio de Janeiro. – Brasília : Ministério da Saúde, 2001, pp 37-38.
- [7] ISO15883-1 (2006) “Washer-disinfectors – Part 1: General Requirements, terms and definitions and test”, International standard, Annex B, pp 59-62.
- [8] P. De Santis and V.S. Rudo, “Validation of Steam Sterilization in Autoclaves,” in Validation of Aseptic Pharmaceutical Processes, *F.J. Carleton and J.P. Agalloco*, Eds. (Marcel Dekker, New York, 2d ed., 1986), pp. 279–317.
- [9] Guadagnin SVT, Primo MGB, Tipple AFV, Souza ACS. Centro de material e esterilização: padrões arquitetônicos e o processamento de artigos. *Rev. Eletr. Enf. [Internet]* 2005;7(3):285-94.

### 5) Contato

Gerson Roberto Luqueta

Aluno do curso de Mestrado Profissional em Gestão de redes de Telecomunicação da Pontifícia Universidade Católica de Campinas e Professor Associado I do curso superior Tecnologia em Mecânica de Precisão da Faculdade de Tecnologia Arthur de Azevedo (Fatec Mogi Mirim), Centro Estadual de Educação Tecnológico Paula Souza  
Endereço profissional: Av. Ariovaldo Silveira Franco, 567 - Jardim 31 de Março - Mogi Mirim/SP - Cep: 13801-005. Telefones : (19)3804-5387 / (19)3804-5441  
Email: [gerson.luqueta@fatec.sp.gov.br](mailto:gerson.luqueta@fatec.sp.gov.br)

Artigo disponível para Download em:

<http://www.centropaulasouza.sp.gov.br/pos-graduacao/workshop-de-pos-graduacao-e-pesquisa/anais/2011/trabalhos/servicos-engenharia-e-gestao/uso-de-redes-de-sensores-sem-fio-no-apoio-ao-controle-do-reprocessamento.pdf>

## 12 APÊNDICE D - ARTIGO PUBLICADO NO MOMAG 2012

### 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.

#### 1. 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 ( $\beta$ ) que representa o *path loss* e o desvio padrão ( $\sigma$ ) 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* quanto 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.

## 2. 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.

### 3. 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)
- $\lambda$  = comprimento de onda (m)
- $d$  = distância entre as antenas (m)

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

$$P_{RX_{dBm}} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dBi}} + G_{RX_{dBi}} - L_{EL_{dB}} \quad (2)$$

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

### 4. 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  $\beta$  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  $\beta$  uma vez que conheçamos a potência recebida a uma distância  $d$ , os ganhos das antenas, e a potência transmitida a uma dada frequência.

#### A. 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.

## 5. 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 se incrementará 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.

## 6. METODOLOGIA E COLETA DE DADOS

### 6.1. 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.

### 6.2. 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.

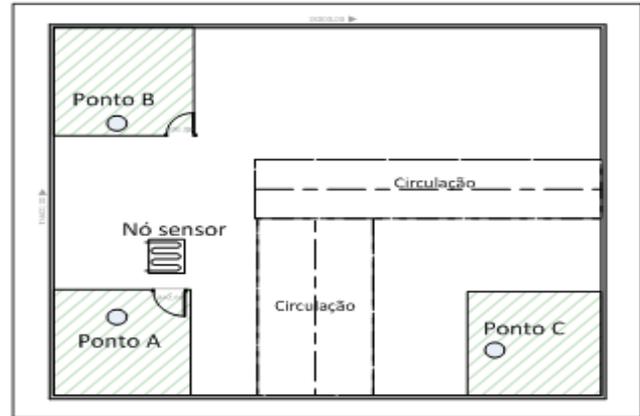


Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de dados

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 (cuja frequência não foi apurada), com a base foi 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.

### 6.3. 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.

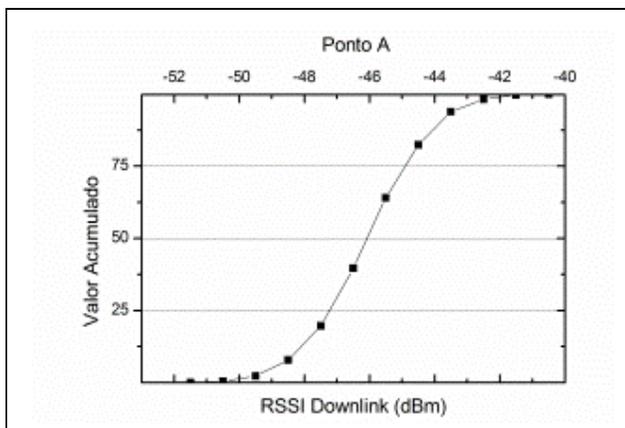


Figura 5 – Probabilidade no ponto A

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.

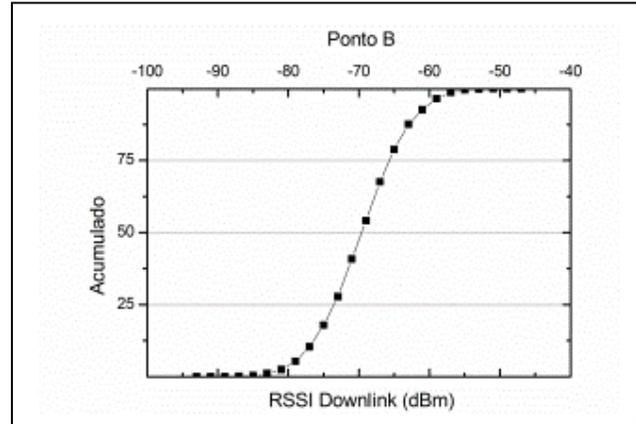


Figura6 – Probabilidade no ponto B

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).

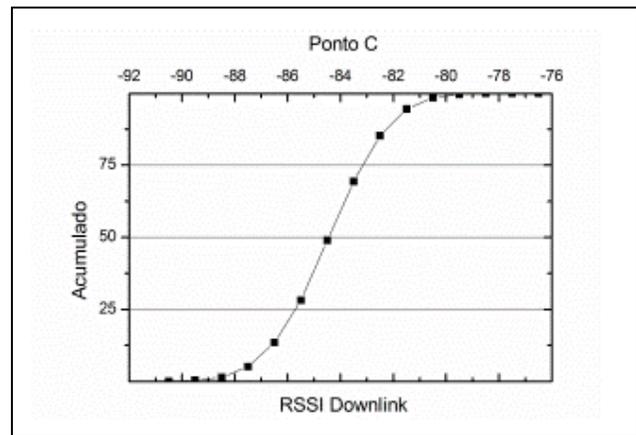


Figura 7 – Distribuição RSSI no ponto a 30 metros – C

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 ( $\beta$ )
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  $\beta$  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].

## 7. 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 ( $\beta$ ), 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.

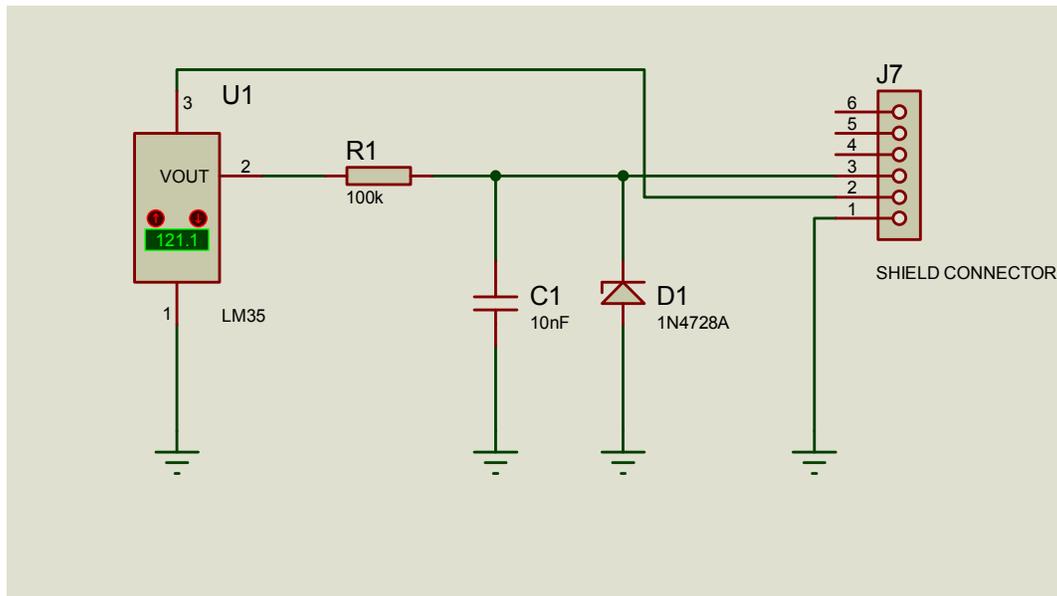
No caso do uso de redes de sensores sem fios em ambientes produtivos para saúde humana (como o caso da produção farmacêutica) deve-se observar não só a viabilidade técnica relativa aos aspectos de telecomunicações, mas também as determinações legais da Agência Nacional de Vigilância Sanitária principalmente 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 Vinaik , “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 José Lucimar do Nascimento, Bookman, Porto Alegre, 2008, 580p.

### 13 APÊNDICE E – DIAGRAMA SENSOR LM-35 NO SHIELD.



## 14 APÊNDICE F – CÓDIGO PHYTON DA APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

```
# PROGRAMA RSSF - POLLING 3 SENSORES
# COLETA DADOS E GRAVA NOS ARQUIVOS ALVO
# BY GERSON ROBERTO LUQUETA

import serial
import math
import time
import struct
from time import localtime, strftime

# Cria o vetor Pacote
Pacote = {}

#subtrair 1 do valor da COM
n_serial1 = 2
ser = serial.Serial(n_serial1, 9600,
timeout=0.5,parity=serial.PARITY_NONE) # seta valores da serial

# Identificação do sensor a ser acessado
ID_sensor1 = 1
ID_sensor2 = 2
ID_sensor3 = 3

# Valores de calibracao dos sensores
cal1 = 0.54
cal2 = 1.83
cal3 = 1.83

# Identificação da base
ID_base = 0

# Cria Pacote de 52 bytes com valor zero em todas as posições
for i in range(1,53): # faz um array com 52 bytes
    Pacote[i] = 0

# Seta temperatura de Start / Stop
Temp_start = 100

#intervalo entre as leituras
int_leituras = 1

while True:
    try:
        #nome do arquivo de dados
        arq_dados = strftime("Dados_%d_%m_%Y_%H-%M-%S.txt")
        arq_redes = strftime("Redes_%d_%m_%Y_%H-%M-%S.txt")
        print "\n Arquivo de log dados: %s" % arq_dados
        print "\n Arquivo de log redes: %s" % arq_redes
        arquivo_dados = open(arq_dados,"w")
        arquivo_redes = open(arq_redes,"w")
```

```

# Imprime na tela o menu de opções
print '\n \n ***** Pressione 1 para iniciar \n Pressione S
para sair + <ENTER> ***** \n'

# Leitura da opção do menu escolhida
Opcao = raw_input()

# Limpa o buffer da serial
ser.flushInput()

# Coloca no pacote o ID_sensor e ID_base
# Pacote[9] = int(ID_sensor1)
Pacote[11] = int(ID_base)

# Envia sinal de reset para os nos sensores 1, 2 e 3
for i in range(1,53):
    Pacote[38] = 1
    Pacote[9] = int(ID_sensor1)
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.5)
    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que
recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:
        print("\n Reset F0 sensor %s - OK" % ID_sensor1)
    else:
        print '\n Erro reset F0'

for i in range(1,53):
    Pacote[38] = 1
    Pacote[9] = int(ID_sensor2)
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.3)
    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que
recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:
        print("\n Reset F0 sensor %s - OK" % ID_sensor2)
    else:
        print '\n Erro reset F0'

for i in range(1,53):
    Pacote[38] = 1
    Pacote[9] = int(ID_sensor3)
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.3)
    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer que
recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:
        print("\n Reset F0 sensor %s - OK" % ID_sensor3)

```

```

else:
    print '\n Erro reset F0'

    # break

#-----Gerencia de dados -----

# Leitura de temperatura e F0
if Opcao == "1":

#***** Leitura sensor 1 antes de 100C *****

    Pacote[9] = int(ID_sensor1)
    Pacote[38] = 0
    for i in range(1,53):
        TXbyte = chr(Pacote[i])
        ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.3)

    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer
que recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:

        # Leitura do AD0
        ad0h = ord(line[17]) # alto
        ad0l = ord(line[18]) # baixo
        ad1h = ord(line[20]) # alto
        ad1l = ord(line[21]) # baixo
        AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
        TEMP1 = (AD0 * 0.3223) + call

#*****Leitura Sensor 2 antes de 100C *****

    Pacote[9] = int(ID_sensor2)
    Pacote[38] = 0
    for i in range(1,53):
        TXbyte = chr(Pacote[i])
        ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.3)

    line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer
que recebe da serial pela COM
    if len(line) == 52:

        # Leitura do AD0
        ad0h = ord(line[17]) # alto
        ad0l = ord(line[18]) # baixo
        ad1h = ord(line[20]) # alto
        ad1l = ord(line[21]) # baixo

```

```

        ADO = (ad0h * 256 + ad0l)
        TEMP2 = (ADO * 0.3223) + cal2

#*****Leitura Sensor 3 antes de 100C *****

        Pacote[9] = int(ID_sensor3)
        Pacote[38] = 0
        for i in range(1,53):
            TXbyte = chr(Pacote[i])
            ser.write(TXbyte)
        # Aguarda a resposta do sensor
        time.sleep(0.3)

        line = ser.read(52) # faz a leitura de 52 bytes do buffer
que recebe da serial pela COM
        if len(line) == 52:

            # Leitura do ADO
            ad0h = ord(line[17]) # alto
            ad0l = ord(line[18]) # baixo
            ad1h = ord(line[20]) # alto
            ad1l = ord(line[21]) # baixo
            ADO = (ad0h * 256 + ad0l)
            TEMP3 = (ADO * 0.3223) + cal3

# -----
        # espera atingir a temperatura de scan definida para qualquer
dos sensores
        while float(Temp_start) > (float(TEMP1) or float(TEMP2)
or float(TEMP3)):
            try:

#***** Leitura sensor 1 antes de 100C *****

                Pacote[9] = int(ID_sensor1)
                Pacote[38] = 0
                for i in range(1,53):
                    TXbyte = chr(Pacote[i])
                    ser.write(TXbyte)
                # Aguarda a resposta do sensor
                time.sleep(0.3)

                line = ser.read(52) # faz a leitura de 52
bytes do buffer que recebe da serial pela COM
                if len(line) == 52:

                    # Leitura do ADO
                    ad0h = ord(line[17]) # alto
                    ad0l = ord(line[18]) # baixo
                    ad1h = ord(line[20]) # alto
                    ad1l = ord(line[21]) # baixo
                    ADO = (ad0h * 256 + ad0l)
                    TEMP1 = (ADO * 0.3223) + cal1

#*****Leitura Sensor 2 antes de 100C *****

```

```

Pacote[9] = int(ID_sensor2)
Pacote[38] = 0
for i in range(1,53):
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(0.3)

line = ser.read(52)
if len(line) == 52:

    # Leitura do AD0
    ad0h = ord(line[17]) # alto
    ad0l = ord(line[18]) # baixo
    ad1h = ord(line[20]) # alto
    ad1l = ord(line[21]) # baixo
    AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
    TEMP2 = (AD0 * 0.3223) + cal2

#*****Leitura Sensor 3 antes de 100C *****

Pacote[9] = int(ID_sensor3)
Pacote[38] = 0
for i in range(1,53):
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(0.3)

line = ser.read(52) # faz a leitura de 52
bytes

if len(line) == 52:

    # Leitura do AD0
    ad0h = ord(line[17]) # alto
    ad0l = ord(line[18]) # baixo
    ad1h = ord(line[20]) # alto
    ad1l = ord(line[21]) # baixo
    AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
    TEMP3 = (AD0 * 0.3223) + cal3

print("\n Aguard.temper. de %s°C" %
Temp_start)
print("Temperatura Sensor 1: %.1f°C" %
TEMP1)
print("Temperatura Sensor 2: %.1f°C" %
TEMP2)
print("Temperatura Sensor 3: %.1f°C" %
TEMP3)

time.sleep(float(int_leituras))

else:
    print ' '
except KeyboardInterrupt:
    break

```

```

# Temperatura de Scan alcançada - inicia gravação do arquivo
while float(Temp_start) <= (float(TEMP1) or
float(TEMP2) or float(TEMP3)):
    try:

# ***** SENSOR 1 *****
for i in range(1,53):
    Pacote[9] = int(ID_sensor1)
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(0.3)
line = ser.read(52)
if len(line) == 52:

# -----Gerencia de dados -----

# Leitura do AD0
# ad0t = ord(line[16]) # está medindo
temperatura

ad0h = ord(line[17]) # alto
ad0l = ord(line[18]) # baixo
ad1h = ord(line[20]) # alto
ad1l = ord(line[21]) # baixo
AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
TEMP1 = (AD0 * 0.3223) + call

# Leitura do AD3 - Valor do F0
# ad3t = ord(line[19]) # está medindo F0
ad3h = ord(line[26]) # alto
ad3l = ord(line[27]) # baixo
F01 = (ad3h * 256 + ad3l)

# ----- Gerência de rede -----
# Leitura RSSI Down
rssid = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
rssiu = ord(line[2]) # RSSI_UpLink

#RSSI Downlink

if rssid > 128:
    RSSID1=((rssid-256)/2.0)-74

else:
    RSSID1=(rssid/2.0)-74

#RSSI Uplink

if rssiu > 128:
    RSSIU1=((rssiu-256)/2.0)-69

else:
    RSSIU1=(rssiu/2.0)-69

#pacotes

```

```

        Pacotes1 = ord(line[12])

# ***** SENSOR 2 *****

    for i in range(1,53):
        Pacote[9] = int(ID_sensor2)
        TXbyte = chr(Pacote[i])
        ser.write(TXbyte)
    # Aguarda a resposta do sensor
    time.sleep(0.3)
    line = ser.read(52)
    if len(line) == 52:

# ----- Gerencia de dados -----

        # Leitura do AD0
        # ad0t = ord(line[16]) está medindo
temperatura

        ad0h = ord(line[17]) # alto
        ad0l = ord(line[18]) # baixo
        ad1h = ord(line[20]) # alto
        ad1l = ord(line[21]) # baixo
        AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
        TEMP2 = (AD0 * 0.3223) + cal2

        # Leitura do AD3 - Valor do F0
        # ad3t = ord(line[19]) está medindo F0
        ad3h = ord(line[26]) # alto
        ad3l = ord(line[27]) # baixo
        F02 = (ad3h * 256 + ad3l)

# ----- Gerência de rede -----

        # Leitura RSSI Down
        rssid = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
        rssi_u = ord(line[2]) # RSSI_UpLink

        #RSSI Downlink

        if rssid > 128:
            RSSID2=((rssid-256)/2.0)-74

        else:
            RSSID2=(rssid/2.0)-74

        #RSSI Uplink

        if rssi_u > 128:
            RSSIU2=((rssi_u-256)/2.0)-69

        else:
            RSSIU2=(rssi_u/2.0)-69

        #pacotes
        Pacotes2 = ord(line[12])

# ***** SENSOR 3 *****

```

```

for i in range(1,53):
    Pacote[9] = int(ID_sensor3)
    TXbyte = chr(Pacote[i])
    ser.write(TXbyte)
# Aguarda a resposta do sensor
time.sleep(0.3)
line = ser.read(52)
if len(line) == 52:

    # ----- Gerencia de dados -----
    # Leitura do AD0
    # ad0t = ord(line[16]) # está medindo
temperatura

    ad0h = ord(line[17]) # alto
    ad0l = ord(line[18]) # baixo
    ad1h = ord(line[20]) # alto
    ad1l = ord(line[21]) # baixo
    AD0 = (ad0h * 256 + ad0l)
    TEMP3 = (AD0 * 0.3223) + cal3

    # Leitura do AD3 - Valor do F0
    # ad3t = ord(line[19]) # está medindo F0
    ad3h = ord(line[26]) # alto
    ad3l = ord(line[27]) # baixo
    F03 = (ad3h * 256 + ad3l)

# ----- Gerência de rede -----

    # Leitura RSSI Down
    rssid = ord(line[0]) # RSSI_DownLink
    rssi_u = ord(line[2]) # RSSI_UpLink

    #RSSI Downlink

    if rssid > 128:
        RSSID3=((rssid-256)/2.0)-74

    else:
        RSSID3=(rssid/2.0)-74

    #RSSI Uplink

    if rssi_u > 128:
        RSSIU3=((rssi_u-256)/2.0)-69

    else:
        RSSIU3=(rssi_u/2.0)-69

    #pacotes
    Pacotes3 = ord(line[12])

    print time.ctime(), ' \n Temp1 = ', TEMP1,
'F01 =', F01, 'Temp2 = ', TEMP2, 'F02 =', F02, 'Temp3 = ', TEMP3,
'F03 =', F03, '\n RSSI Up :', RSSIU1, 'RSSI Down :', RSSID1, 'num.
pacote: ', Pacotes1

```

```

        arquivo_dados.writelines("%8s %8.1f %8.1f
%8.1f %8.1f %8.1f %8.1f \n" %(time.ctime(), TEMP1, F01, TEMP2, F02,
TEMP3, F03))
        arquivo_redes.writelines("%8s %8d %8d
%8d %8d %8d %8d %8d %8d %8d \n" %(time.ctime(), RSSIU1,
RSSID1, Pacotes1, RSSIU2, RSSID2, Pacotes2, RSSIU3, RSSID3,
Pacotes3))

        time.sleep(float(int_leituras))

    else:
        print ' '
    except KeyboardInterrupt:
        break

    arquivo_dados.close()
    arquivo_redes.close()
    ser.close() # fecha a porta COM
    print ("Temperatura abaixo de %s°C ou 'CTRL+C'
pressionado \nFim da Execução" % Temp_start) # escreve na tela
    break
    # Fim da gravacao do arquivo

else:
    print 'erro'
    time.sleep(0.3)
    ser.flushInput()

if Opcao == "s" or Opcao == "S":# caso o caracter digitado
for s
    ser.close() # fecha a porta COM
    print 'Fim da Execução' # escreve na tela
    break

except KeyboardInterrupt:
    ser.close()
    break

```

# 15 ANEXO A – DIAGRAMAS ELETRÔNICOS DO SHIELD E DO MÓDULO DE RF + MICROCONTROLADOR.

Diagrama do Shield

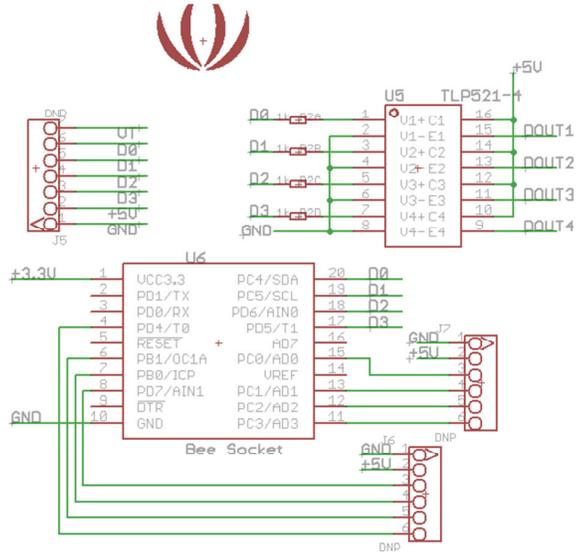
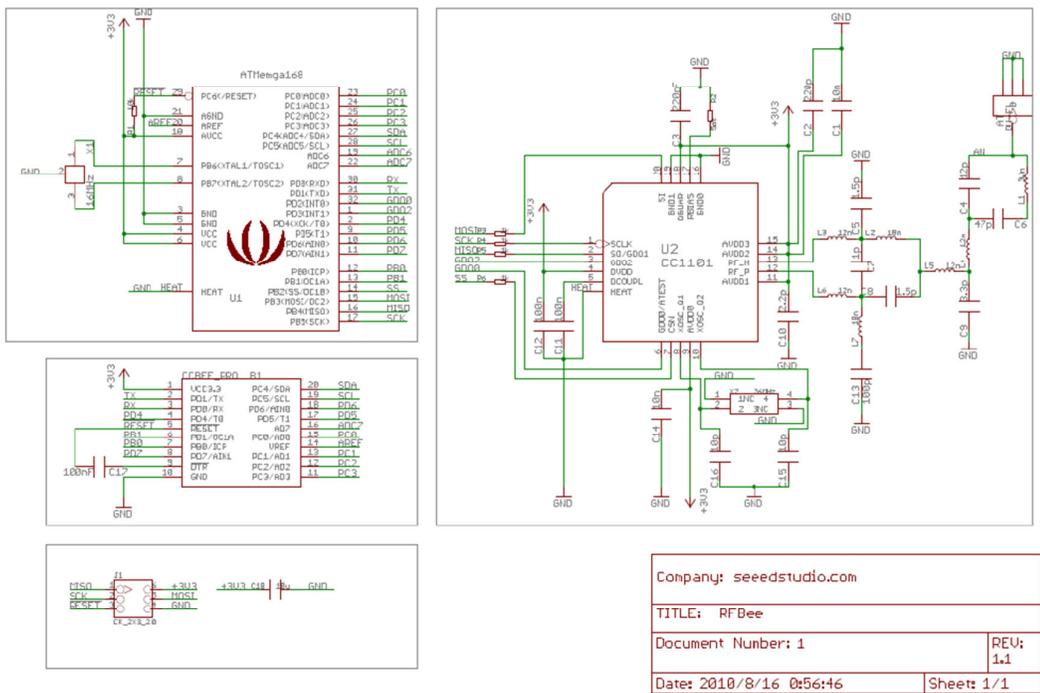


Diagrama do RFBee (Radiuino)



Company: seedstudio.com	
TITLE: RFBee	
Document Number: 1	REU: 1.1
Date: 2010/8/16 05:46	Sheet: 1/1

## 16 ANEXO B – TABELA DE VALORES DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Os valores de -2 a 0 são simétricos entre 0 e 2.

$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
-2.00	0.022750131	-1.50	0.066807201	-1.00	0.158655253	-0.50	0.308537538
-1.99	0.023295467	-1.49	0.068112117	-0.99	0.161087059	-0.49	0.312066949
-1.98	0.023851764	-1.48	0.069436623	-0.98	0.163543059	-0.48	0.315613696
-1.97	0.024419185	-1.47	0.070780876	-0.97	0.166023246	-0.47	0.319177508
-1.96	0.024997895	-1.46	0.072145036	-0.96	0.168527607	-0.46	0.322758110
-1.95	0.025588059	-1.45	0.073529259	-0.95	0.171056126	-0.45	0.326355220
-1.94	0.026189844	-1.44	0.074933699	-0.94	0.173608780	-0.44	0.329968553
-1.93	0.026803418	-1.43	0.076358509	-0.93	0.176185542	-0.43	0.333597820
-1.92	0.027428949	-1.42	0.077803840	-0.92	0.178786379	-0.42	0.337242726
-1.91	0.028066606	-1.41	0.079269841	-0.91	0.181411254	-0.41	0.340902973
-1.90	0.028716559	-1.40	0.080756659	-0.90	0.184060125	-0.40	0.344578258
-1.89	0.029378980	-1.39	0.082264438	-0.89	0.186732943	-0.39	0.348268273
-1.88	0.030054038	-1.38	0.083793322	-0.88	0.189429654	-0.38	0.351972707
-1.87	0.030741908	-1.37	0.085343450	-0.87	0.192150202	-0.37	0.355691245
-1.86	0.031442762	-1.36	0.086914961	-0.86	0.194894521	-0.36	0.359423566
-1.85	0.032156774	-1.35	0.088507991	-0.85	0.197662543	-0.35	0.363169348
-1.84	0.032884118	-1.34	0.090122672	-0.84	0.200454193	-0.34	0.366928263
-1.83	0.033624969	-1.33	0.091759135	-0.83	0.203269391	-0.33	0.370699981
-1.82	0.034379502	-1.32	0.093417508	-0.82	0.206108053	-0.32	0.374484165
-1.81	0.035147893	-1.31	0.095097917	-0.81	0.208970087	-0.31	0.378280478
-1.80	0.035930319	-1.30	0.096800484	-0.80	0.211855398	-0.30	0.382088577
-1.79	0.036726955	-1.29	0.098525329	-0.79	0.214763884	-0.29	0.385908118
-1.78	0.037537980	-1.28	0.100272567	-0.78	0.217695437	-0.28	0.389738752
-1.77	0.038363570	-1.27	0.102042315	-0.77	0.220649946	-0.27	0.393580126
-1.76	0.039203903	-1.26	0.103834681	-0.76	0.223627292	-0.26	0.397431886
-1.75	0.040059156	-1.25	0.105649773	-0.75	0.226627352	-0.25	0.401293674
-1.74	0.040929508	-1.24	0.107487697	-0.74	0.229649997	-0.24	0.405165128
-1.73	0.041815137	-1.23	0.109348552	-0.73	0.232695092	-0.23	0.409045884
-1.72	0.042716220	-1.22	0.111232437	-0.72	0.235762497	-0.22	0.412935577
-1.71	0.043632936	-1.21	0.113139446	-0.71	0.238852068	-0.21	0.416833836
-1.70	0.044565462	-1.20	0.115069670	-0.70	0.241963652	-0.20	0.420740290
-1.69	0.045513977	-1.19	0.117023196	-0.69	0.245097093	-0.19	0.424654565
-1.68	0.046478657	-1.18	0.119000107	-0.68	0.248252230	-0.18	0.428576284
-1.67	0.047459681	-1.17	0.121000484	-0.67	0.251428895	-0.17	0.432505068
-1.66	0.048457226	-1.16	0.123024403	-0.66	0.254626914	-0.16	0.436440537
-1.65	0.049471468	-1.15	0.125071935	-0.65	0.257846110	-0.15	0.440382307
-1.64	0.050502583	-1.14	0.127143150	-0.64	0.261086299	-0.14	0.444329995
-1.63	0.051550748	-1.13	0.129238112	-0.63	0.264347292	-0.13	0.448283213
-1.62	0.052616138	-1.12	0.131356881	-0.62	0.267628893	-0.12	0.452241573
-1.61	0.053698928	-1.11	0.133499513	-0.61	0.270930903	-0.11	0.456204687
-1.60	0.054799291	-1.10	0.135666060	-0.60	0.274253117	-0.10	0.460172162
-1.59	0.055917402	-1.09	0.137856572	-0.59	0.277595324	-0.09	0.464143607
-1.58	0.057053433	-1.08	0.140071090	-0.58	0.280957308	-0.08	0.468118627
-1.57	0.058207555	-1.07	0.142309654	-0.57	0.284338849	-0.07	0.472096829
-1.56	0.059379940	-1.06	0.144572299	-0.56	0.287739718	-0.06	0.476077817
-1.55	0.060570758	-1.05	0.146859056	-0.55	0.291159686	-0.05	0.480061194
-1.54	0.061780176	-1.04	0.149169950	-0.54	0.294598516	-0.04	0.484046563
-1.53	0.063008364	-1.03	0.151505002	-0.53	0.298055965	-0.03	0.488033526
-1.52	0.064255487	-1.02	0.153864230	-0.52	0.301531787	-0.02	0.492021686
-1.51	0.065521712	-1.01	0.156247645	-0.51	0.305025730	-0.01	0.496010643