

ALDO IVAN CÉSPEDES ARCE

**Redes de sensores sem fio na coleta de dados
fisiológicos de bovinos para aplicações na
zootecnia de precisão**

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Zootecnia.

Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa

Pirassununga

2008

Aos meus pais, que com amor e perseverança, me guiaram, ensinaram, educaram e me mostraram a importância do trabalho educativo.

À minha família, pelo amor, colaboração e incentivo incondicionais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa, pela contribuição à minha formação acadêmica, por sua amizade, exemplo e boa convivência.

À equipe do LAFAC: Ana Carolina de Souza Silva, Adriano Rogério Bruno Tech, Rosana Ferrari, Guilherme Augusto Onody, André Luis Moraes e estagiários pelo trabalho colaborativo e boa convivência.

Aos funcionários do Campus que auxiliaram durante a experimentação.

Aos professores: Prof. Sérgio Paulo e Andrés.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, pela oportunidade e confiança na realização deste trabalho.

À Prefeitura do Campus Administrativo de Pirassununga, pelo empréstimo dos animais.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

“O vôo do homem através da vida é sustentado pela força de seus conhecimentos...”

Santos Dumont

RESUMO

ARCE, A.I.C. **Redes de sensores sem fio na coleta de dados fisiológicos de bovinos para aplicações na zootecnia de precisão.** 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

Este trabalho mostra a aplicação das redes de sensores sem fio na monitoração de variáveis fisiológicas de bovinos. A necessidade de experimentar técnicas de coleta de dados, que causem menos perturbações no comportamento natural dos animais de interesse da zootecnia de precisão, foi a principal motivação deste trabalho. Para testar a aplicabilidade da tecnologia das redes de sensores sem fio neste campo, foi desenvolvida uma infra-estrutura, utilizando técnicas de instrumentação eletrônica e comunicação sem fio via rádio-frequência. A rede foi projetada com o protocolo *floating base sensor network* (FBSN) que implementa uma topologia *ad hoc* com escolha aleatória dos nós. Os protótipos desenvolvidos foram utilizados para efetuar coletas de sinais cerebrais e temperaturas corporais de bovinos adultos. Foram desenvolvidos também os softwares embarcados e de supervisão e um simulador de deslocamento bovino, que foi utilizado como ferramenta de auxílio no projeto da infra-estrutura de monitoramento implementada. O consumo das fontes de energia e a relação custo-benefício do sistema foram os principais itens avaliados. Os resultados obtidos mostraram que é possível utilizar redes de sensores sem fio como técnicas eficientes para coleta de dados fisiológicos de bovinos.

Palavras-chave: Bovinos, EEG, instrumentação, redes de sensores sem fio, simulador.

ABSTRACT

ARCE, A.I.C. **Wireless sensor networks technology applied to bovine physiological data acquisition for precision animal production.** 2008. 86 f. M.Sc. Dissertation – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

This work presents an application of wireless sensor networks technology used for bovine physiological variables monitoring. The main stimulus of this work was the precision animal production researcher's interest in developing and testing new techniques that could allow data acquisition with less interference in animal behavior. In order to test the feasibility of the wireless sensor network technology in this area, an infrastructure was developed using electronic instrumentation and radio frequency wireless communication techniques. The network was projected to support the floating base sensor network protocol that is a special kind of adhoc topology with randomic selection of path nodes. The developed prototypes were used to acquire brain electrical activity and body temperature from bovines. The development of supervisor and embedded software and a bovine's displacement simulator tool was also described here. The energy consumption and the cost-benefit relationship of the network nodes were the main evaluated features. The results obtained prove that the wireless sensor networks can be considered as an efficient technique to be used to acquire bovine's physiological data.

Key-words: Bovines, EEG, instrumentation, simulator, wireless sensor network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de instrumentação.	19
Figura 2 - Modelo de um sensor com dinâmica de primeira ordem.	20
Figura 3 - Respostas características de vários modelos de sensores.	21
Figura 4 - Diagrama de blocos de um módulo de acondicionamento de sinais.	23
Figura 5 - Exemplo de um estágio amplificador que utiliza o amplificador de instrumentação AD620 (AD620..., 1993).	23
Figura 6 - Exemplo de um filtro duplo anti-aliasing que utiliza o amplificador operacional LM358 (LM358..., 2004).	24
Figura 7 - Exemplo de um filtro <i>notch</i> que utiliza o amplificador operacional LM358.	24
Figura 8 - Modelo de um processo de amostragem ideal.	26
Figura 9 - Sinal digital $x^*(t)$ gerado utilizando uma frequência de amostragem (Fa) durante a digitalização de um sinal analógico $x(t)$	26
Figura 10 - Níveis de tensão para os padrões lógicos RS-232.	28
Figura 11 - Transmissão de um byte no modo assíncrono.	29
Figura 12 - Ilustração de um barramento I2C.	30
Figura 13 - Configuração do barramento I2C. Adaptado da <i>Application Note</i> da <i>Philips Semiconductors</i> (2000).	31
Figura 14 - Transição de bits no protocolo I2C. Adaptado da <i>Application Note</i> da <i>Philips Semiconductors</i> (2000).	31
Figura 15 - Condições de <i>Start</i> e <i>Stop</i> do protocolo I2C. Adaptado da <i>Application Note</i> da <i>Philips Semiconductors</i> (2000).	32
Figura 16 - Resposta ACK do dispositivo receptor no protocolo I2C. Adaptado da <i>Application Note</i> da <i>Philips Semiconductors</i> (2000).	33
Figura 17 - Diagrama de transmissão de dados no protocolo I2C. Adaptado da <i>Application Note</i> da <i>Philips Semiconductors</i> (2000).	33
Figura 18 - Exemplo de um nó sensor genérico.	35
Figura 19 - Diagrama esquemático de uma rede com protocolo FBSN. Adaptado de Silva et. al (2005).	38

Figura 20 - Algoritmo de busca da FBSN	38
Figura 21 - Diagrama esquemático da estação rádio base fixa.	41
Figura 22 - Diagrama esquemático do NOE transmissor.	42
Figura 23 - Layout da PCI do módulo sensor.....	43
Figura 24 - Modelo da antena do sensor móvel no ambiente Comsol ®.	44
Figura 25 - Modelo 3D gerado no ambiente Comsol ®	46
Figura 26 - Malha de elementos do modelo	46
Figura 27 - Diagrama de blocos do módulo de acondicionamento de sinais e o amplificador de eletro encefalograma (EEG).....	48
Figura 28 - Diagrama de blocos do dispositivo NOE transceptor.....	48
Figura 29 - Diagrama do circuito de ensaio do amplificador de EEG.	49
Figura 30 - Ilustração do elemento sensor TMP100	50
Figura 31 - Diagrama esquemático do TMP100 mostrando os endereços de configuração. Adaptado do Data Sheet do TMP100 (2003).....	50
Figura 32 - Estrutura de registradores do TMP100. Adaptado do Data Sheet do TMP100 (2003).	51
Figura 33 - Bits de configuração da resolução do sensor. Adaptado do Data Sheet do TMP100.....	52
Figura 34 - Curva típica de descarga de uma bateria alcalina de 9V.....	55
Figura 35 - Curva típica de descarga de uma bateria CR2032 de 3V	55
Figura 36 - Ambiente de desenvolvimento do software para os NOE.	57
Figura 37 - Algoritmo do NOE transmissor.....	57
Figura 38 - Algoritmo do NOE transceptor	58
Figura 39 - Arquitetura do software embarcado	59
Figura 40 - Arquitetura do software supervisor	60
Figura 41 - Pacote de dados enviados e recebidos pelo software supervisor	61
Figura 42 - Diagrama UML das classes do simulador de deslocamento.	65
Figura 43 - Tela do simulador mostrando o rebanho virtual em movimento.	66
Figura 44 - Imagem de uma novilha carregando o NOE.....	67
Figura 45 - Imagem do Cabresto desenvolvido para acondicionamento do NOE transceptor.....	68
Figura 46 - Diagrama elétrico da estação rádio base fixa.....	69

Figura 47 - Imagem da placa de circuito impresso da estação rádio base fixa.	69
Figura 48 - Diagrama elétrico do NOE transmissor.	70
Figura 49 - Imagem da placa de circuito impresso do NOE transmissor.	71
Figura 50 - Diagrama de irradiação da antena dos NOE transmissores.	71
Figura 51 - Tensão sobre resistor relativa ao consumo de corrente do NOE transmissor	73
Figura 52 - Gráfico de temperaturas coletadas através dos NOE transmissores.....	74
Figura 53 - Imagem do protótipo do NOE transceptor.	75
Figura 54 - Senóide de 3,90Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento teste (ET).	77
Figura 55 - Senóide de 3,90Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento controle (EC).....	77
Figura 56 - Gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senóide de 3,90Hz amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC).....	78
Figura 57 - Senóide de 30,20Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento teste (ET).	78
Figura 58 - Senóide de 30,20Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento controle (EC).....	79
Figura 59 - Gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senóide de 30,20Hz amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC).....	79
Figura 60 - Curva de ganho do amplificador de EEG.....	80
Figura 61 - Efeito dos filtros sobre sinais senoidais em várias frequências.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC = conversor analógico/digital.

DC = corrente contínua, do inglês, “direct current”.

EEG = eletroencefalograma.

ERBF= Estação rádio base fixa.

ERBT= Estação rádio base temporária.

FBSN= Protocolo para redes de sensores sem fio, do inglês “floating base sensor network”

I/O= dispositivo de entrada/saída, do inglês, “input/output”.

I2C= Protocolo síncrono de comunicação serial, do inglês, “inter integrated communication”.

kbps = kilo bites por segundo.

Mbps = Mega bites por segundo.

RF= rádio frequência.

RSSF= rede de sensores sem fio.

RX= Recepção.

TX= Transmissão.

USART= periférico de comunicação dos microcontroladores, do inglês, “Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter”.

msb= byte mais significativo, do inglês, “more significative byte”.

lsb= byte menos significativo, do inglês, “less significative byte”.

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu = \times 10^{-6}$, “micro”.

Hz = Hertz, unidade de medida de frequência.

M= $\times 10^6$, “mega”.

mA= mili ampere, unidade de medida de corrente.

pF= $\times 10^{-12}$ pico farádios, unidade de medida de capacitância.

V = Volts, unidade de medida para potencial elétrico.

Ω = Ohm, unidade de medida de resistência.

ξ = Fator de amortecimento.

ω_n = Frequência em radianos por segundo.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Zootecnia de precisão	16
1.2	Instrumentação eletrônica	17
1.2.1	Arquitetura dos instrumentos	18
1.2.2	Sensores e transdutores	19
1.2.3	Sinais e acondicionamento de sinais	22
1.2.4	Conversão analógico-digital de sinais	25
1.2.5	Dispositivos de entrada e saída (I/O).....	27
1.2.5.1	Modo Assíncrono – Protocolo RS-232	28
1.2.5.2	Modo síncrono - Protocolo I2C	29
1.3	Comunicação sem fio.....	33
1.4	Redes de sensores sem fio (RSSF)	34
1.5	Protocolo Floating Base Sensor Network (FBSN)	37
2	Objetivo	39
3	Materiais e métodos.....	40
3.1	Desenvolvimento do Hardware	40
3.1.1	Módulo Estação rádio base fixa (ERBF)	40
3.1.2	Nós embarcados transmissores (NOE transmissores)	41
3.1.3	Nós embarcados transceptores (NOE transceptores).....	47
3.1.4	Integração do Sensor de temperatura digital TMP100 na eletrônica desenvolvida.....	49
3.1.5	Consumo de energia dos nós sensores	52
3.1.6	Bateria	54
3.1.7	Testes de autonomia e desempenho	56

3.2 Software	56
3.2.1 Software embarcado	56
3.2.2 Software supervisor da rede	59
3.2.3 Simulador de deslocamento de rebanho bovino	62
3.3 Experimentação animal	66
4 Resultados e discussão	69
4.1 Estação rádio base fixa (ERBF)	69
4.2 Operação dos NOE transmissores	70
4.3 Operação dos NOE transceptores	74
4.3.1 Ensaio do amplificador de EEG	76
5 Conclusões	81
Referências	83

1 Introdução

Agregar tecnologia à produção agro-industrial brasileira significa investir em pesquisa científica interdisciplinar. Para os produtos da agropecuária brasileira, o valor econômico está relacionado com a sua aceitação no mercado, dessa forma o investimento científico e tecnológico implica o aumento da capacidade dos produtos brasileiros de competirem no mercado externo (YASSU, 2004) e na melhoria da qualidade do produto consumido no mercado nacional.

As normalizações internacionais, com respeito a produtos de origem animal, cada vez mais focam a qualidade do controle do animal antes do abate (AGUIAR; SILVA, 2002). Dentro desse processo de controle de qualidade do animal pré-abate, encontra-se a monitoração de diversos dados fisiológicos bem como o acompanhamento minucioso do bovino, desde seu nascimento até o abate (BARCELLOS; FERREIRA, 2003).

A tecnologia nacional para rastreabilidade e monitoração eletrônica contínua de bovinos, criados em regime de pecuária extensiva, apresenta uma relação custo-benefício abaixo do desejado, o que justifica a pesquisa de novas soluções que possam ser adaptadas às diferentes condições brasileiras, a um custo otimizado. Existem, no Brasil, soluções de monitoramento eletrônico de bovinos (YASSU, 2004), mas nenhuma dessas soluções usa a tecnologia de redes de sensores e, portanto, não podem ser usadas para monitoramento contínuo, dependendo do manejo dos animais para eventual acesso às informações dos sensores.

Nos últimos anos, à medida que os avanços tecnológicos, gerados pela zootecnia de precisão, ganharam mais espaço na pecuária, a eficiência da produção animal aumentou. Em muitos casos, esta eficiência tem alcançado níveis próximos do máximo e, em conseqüência, a possibilidade de avanços na produtividade animal é muito menor e exige maior integração de diversas áreas tecnológicas.

Os produtores brasileiros atualmente experimentam uma necessidade crescente de ter maior controle sobre todos os aspectos produtivos, a fim de aumentar ou pelo menos manter a produtividade. Ter controle sobre a produção implica uma necessidade de obter maior quantidade de informações sobre todo o sistema produtivo. Essas informações são sintetizadas a partir de processos de coleta de dados que tendem, cada vez mais, a serem automatizados devido à necessidade de tornar as tarefas de aquisição de dados muito mais rápidas, mais precisas e com menor possibilidade de erro.

Por outro lado, entre os vários fatores que interferem na produtividade animal, tais como a genética e a nutrição, os fatores bioclimatológicos e ambientais têm chamado especial atenção dos pesquisadores brasileiros, devido às características climatológicas do Brasil, que podem causar estresse ou desconforto térmico aos animais, durante períodos de elevadas temperaturas resultando em perdas na produção, devido à redução da ingestão de alimentos, redução no ganho de peso e, em casos extremos, causando a morte dos animais (BROWN-BRANDL et al., 2003; HAHN, 1999; MADER et al., 2002).

Nesse contexto, os pecuaristas e os cientistas, que estudam a etologia animal, precisam adquirir dados que ajudem a identificar as respostas dos animais às mudanças ambientais, a fim de obter conhecimento que permita formular estratégias para melhorar o sistema produtivo pecuarista.

Alguns dos métodos de estudo do comportamento animal, usam como práticas comuns a coleta de dados de frequências cardíaca e respiratória (BROWN-BRANDL et al., 2003), temperaturas timpânica (MADER et al., 2002; HAHN, 1999), retal (CARVALHO et al., 1995) e corporal (LEFCOURT; ADAMS, 1996) e a coleta de sinais cerebrais (Eletro encefalograma – EEG) (SILVA, 2005). No entanto, a aquisição de sinais fisiológicos em animais apresenta certas dificuldades técnicas com relação ao ambiente de estudo. Normalmente, o animal é retirado da sua área de criação e condicionado no local onde é feita a aquisição dos sinais. Segundo Brockway e Hassler (1993), o uso de métodos de contenção durante a experimentação permite que se faça coleta de dados de animais conscientes, mas pode introduzir artefatos

relativos ao estresse e causar problemas no manejo animal. Esses autores ainda afirmam que minimizar ou eliminar as fontes de estresse externo é crucial para entender o processo a ser avaliado. Por este motivo, faz-se necessário o uso de um sistema telemétrico, pois a rádio-telemetria permite a medida de sinais biológicos de animais conscientes e que podem se mover livremente (BROCKWAY; HASSLER, 1993). A maior vantagem desta metodologia é que o animal não está estressado, nem devido ao confinamento e nem pela presença humana, durante a coleta de dados (GACSALYI; ZABIELSKI; PIERZYNOWSKI, 2000).

O emprego de técnicas de telemetria, na coleta de dados de animais, é viável conforme avaliado por Kettlewell, Mitchell e Meeks (1997) e Silva et al. (2005) e a recente evolução das tecnologias de dispositivos transceptores de rádio-freqüência, microprocessadores, sensores e sistemas eletro-mecânicos, viabilizou o desenvolvimento das redes de sensores sem fio (RSSF) como uma evolução dos sistemas telemétricos. Essas redes são atualmente utilizadas para monitorar e, eventualmente, controlar diversos ambientes inclusive de sistemas biológicos.

Este trabalho mostra uma aplicação das tecnologias de instrumentação eletrônica e comunicação sem fio no desenvolvimento de uma infraestrutura de RSSF, específica para monitorar variáveis fisiológicas de bovinos. A aplicação da tecnologia desenvolvida poderá contribuir no aprimoramento de técnicas de coleta de dados de animais que induzam a menos erros sistemáticos na experimentação.

1.1 Zootecnia de precisão

Pode-se definir zootecnia de precisão como a utilização de técnicas e ferramentas que possibilitem manejos em situações específicas que ocorrem no campo. O uso de tais técnicas é direcionado para a tomada de decisão e

ações mais precisas do que aquelas com base em “valores médios” ou “valores típicos” (BANDEIRA FILHO, 2003). As técnicas utilizadas na zootecnia de precisão demandam o emprego de sensores e atuadores para coletas e inferências de informações inerentes ao ambiente.

1.2 Instrumentação eletrônica

A Instrumentação é definida como a ciência da medição e controle. O termo instrumentação pode ser utilizado para fazer menção à área da ciência que desenvolve e pesquisa métodos e utilizações possíveis para os instrumentos.

Os instrumentos são dispositivos essenciais para medir variáveis físicas em diversas aplicações, tais como: operações industriais, produtos de consumo, monitoramento ambiental, pesquisa e desenvolvimento, etc.

O conjunto de instrumentos, que possibilita a realização de vários tipos de medida, em um processo complexo, é chamado de sistema de instrumentação (EREN, 2006).

Um sistema de instrumentação desenvolvido para aplicações zootécnicas é um conjunto integrado de dispositivos utilizados para medir grandezas físicas e biológicas relacionadas aos animais e ao seu meio ambiente.

Os instrumentos podem ser projetados para comunicarem entre si ou com sistemas de gerenciamento, como programas de computadores e dispositivos microcontroladores. Desta forma, uma rede é capaz de executar monitoramento de ambientes complexos e variados.

As redes de instrumentos tradicionais utilizam conexões físicas por meio de cabos como meio de enlace, mas, a evolução das tecnologias de circuitos integrados, sensores inteligentes, microcontroladores com alto desempenho e baixo consumo e, principalmente, a tecnologia de

comunicação por rádio frequência (RF) viabilizou o uso e permitiu o avanço tecnológico das redes de instrumentos sem fio.

1.2.1 Arquitetura dos instrumentos

A figura 1 ilustra um sistema de medição e controle. Neste sistema as “quantidades sendo medidas” (QSM) representam o universo das variáveis fisiológicas de um animal ou as variáveis físicas de um ambiente. No esquema da figura 1, o sensor converte a grandeza física em tensão ou corrente elétrica. Este sinal elétrico resultante é normalmente de baixa amplitude e contém artefatos originados por interferências eletromagnéticas e mecânicas, portanto, tem que ser pré-processado. Geralmente os instrumentos estão ligados a um sistema de controle qualquer, o que analisa a medição enviada pelo instrumento. A resposta programada no sistema de controle pode ser o acionamento de dispositivos inseridos no processo ou simplesmente o armazenamento dos dados coletados (NORTHROP, 2005).

Os trabalhos de Bishop-Hurley (2006) e Vaughan et al. (1998), por exemplo, mostram o emprego de sistemas de instrumentação para monitorar a posição de animais e desenvolveram dispositivos utilizados para interferir no seu comportamento.

Os dispositivos de controle utilizados são considerados como partes integrantes da instrumentação e, no caso de aplicações embarcadas, são utilizados microcontroladores.

Os instrumentos podem ser classificados, segundo sua arquitetura, em analógicos e digitais. Os mais modernos são do tipo digital, devido às grandes vantagens que a tecnologia digital oferece durante o processamento, no entanto, o “*front end*” desses dispositivos é analógico devido ao fato do mundo real ser analógico.

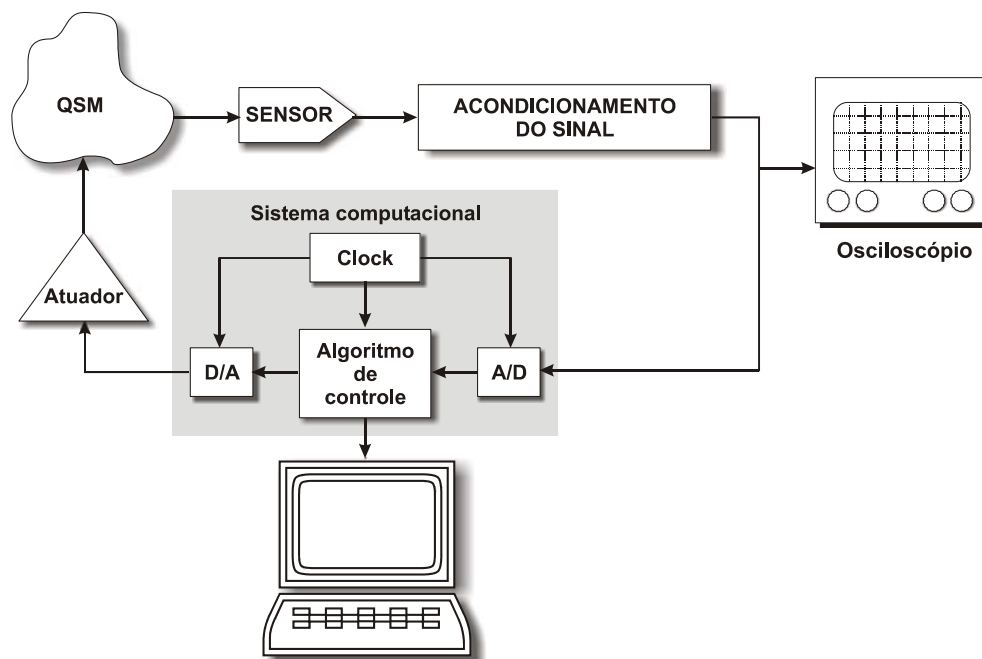


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de instrumentação.

Os instrumentos podem ser também classificados como fixos ou embarcados. Estes últimos carregam sua própria fonte de alimentação e se caracterizam por sua capacidade de mobilidade, tendo sua vida útil altamente dependente da durabilidade da sua fonte de energia.

1.2.2 Sensores e transdutores

Os sensores são as unidades básicas de qualquer sistema de instrumentação.

Um sensor é um dispositivo tecnológico que tem suas propriedades (elétricas, mecânicas, etc.) alteradas na presença de um sinal ou condição física ou química, como por exemplo: temperatura, pressão, umidade, PH, odores, compostos químicos, etc.

Os transdutores são dispositivos que possibilitam a conversão de uma forma de energia em outra e, de certa forma, possuem reciprocidade, ou seja,

a quantidade física na entrada de um transdutor é convertida em um sinal elétrico, e de forma recíproca, ao aplicar um sinal elétrico aos terminais de saída, a grandeza física é gerada na entrada do transdutor. Assim, os transdutores podem ser utilizados como sensores, mas existem sensores que não são transdutores.

Os sensores podem ser classificados, segundo a sua arquitetura, em sensores eletrônicos, mecânicos, bio-sensores, piezo-elétricos, etc. Podem ser de indicação direta (como um termômetro de mercúrio ou um medidor elétrico) ou indireta (como uma termo-resistência ou um sensor digital que devem ser ligados a um sistema de instrumentação, de modo que o valor detectado se torne legível pelo homem).

Segundo sua dinâmica de trabalho, os sensores normalmente podem ser agrupados em três categorias: sensores de primeira ordem passa baixa, sensores de segunda ordem passa baixa e sensores de segunda ordem passa banda.

A eq.(1) é a equação diferencial ordinária que relaciona a voltagem de saída do sensor $V_x(t)$ em relação a uma entrada $x(t)$.

$$\dot{V}_x(t) = -aV_x(t) + Kx(t) \quad (1)$$

onde:

a é a frequência natural do sensor e

K é o fator de ponderação da entrada.

A figura 2 mostra o modelo de um sensor com uma dinâmica de primeira ordem no formato de Laplace, onde $x(t)$ é a quantidade sendo medida, $x(s)$ é sua transformada de Laplace, $V_x(t)$ é a voltagem de saída do sensor, $V_x(s)$ é sua transformada de Laplace. A figura 3 mostra a resposta de vários modelos de sensores.

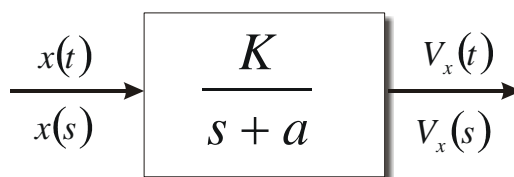


Figura 2 - Modelo de um sensor com dinâmica de primeira ordem.

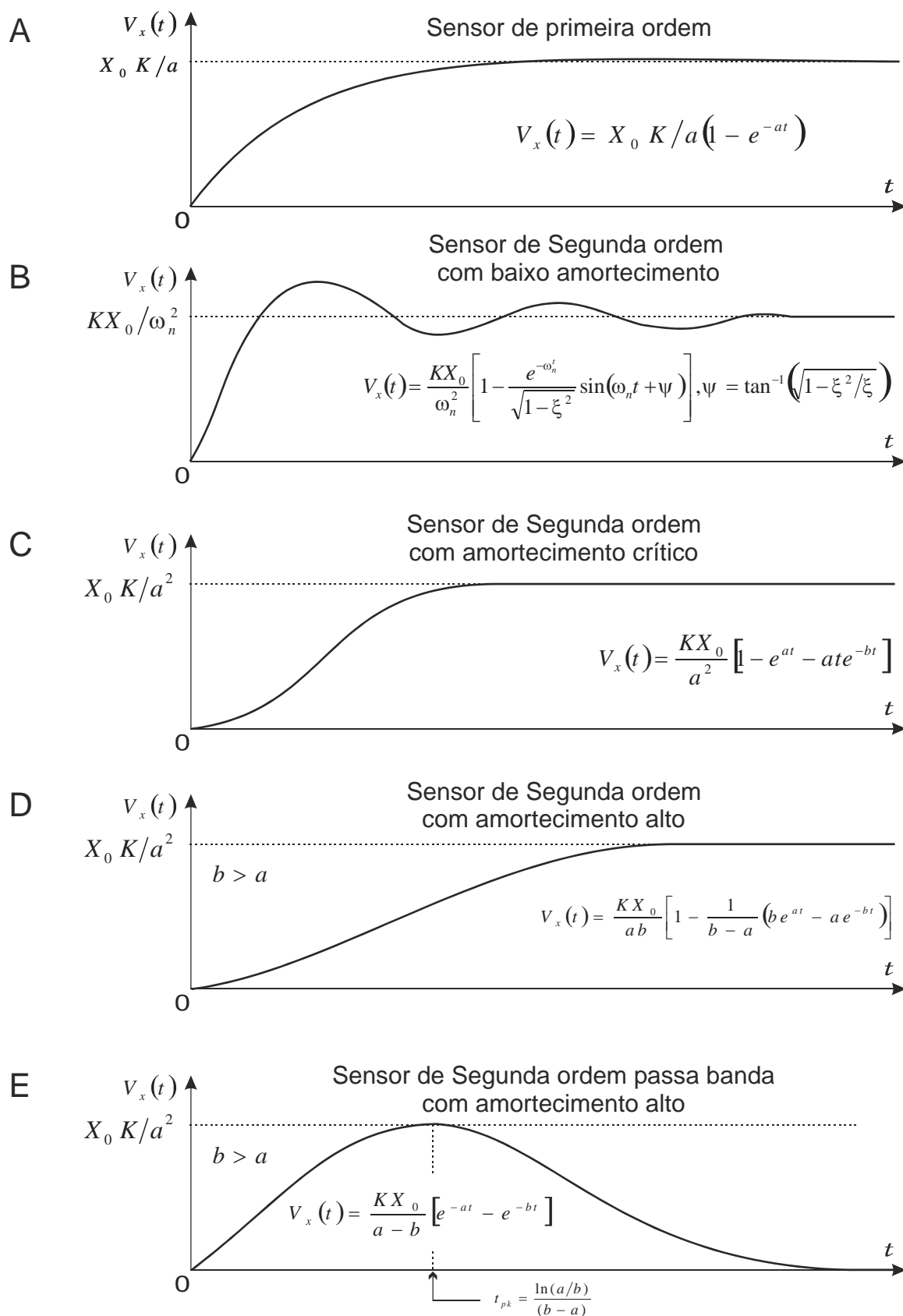


Figura 3 - Respostas características de vários modelos de sensores.

1.2.3 Sinais e acondicionamento de sinais

Um sinal pode ser definido como qualquer quantidade física que varia com o tempo, espaço, ou quaisquer outras variáveis independentes (EREN, 2006).

Normalmente, as saídas dos sensores utilizados para medir variáveis físicas são sinais elétricos como tensões ou corrente.

As tensões ou correntes obtidas diretamente na saída de um sensor são normalmente de amplitudes muito baixas e contêm ruídos adicionais e interferências ambientais.

Os ruídos que entram no sistema de medição podem ser definidos como variações de tensão e de corrente causadas por fenômenos totalmente aleatórios. A média dessas perturbações intrínsecas é igual a zero e, por esta razão, os ruídos não agregam componentes DC ao sistema.

As interferências ambientais são perturbações originadas geralmente por fenômenos periódicos externos ao sistema de instrumentação, tais como a frequência do campo elétrico e magnético da rede de alimentação, transmissões de rádio frequência, equipamentos eletroeletrônicos mal aterrados e o ruído de origem biológico (ou ruído $1/f$).

A fim de eliminar os erros introduzidos pelas perturbações mencionadas, é necessário o emprego de um módulo analógico de acondicionamento de sinais ligado à saída do sensor. Este módulo tem a função de amplificar o sinal elétrico de saída do sensor, proporcionar um casamento de impedância e aplicar uma filtragem linear ao sinal, a fim de reduzir a razão sinal - ruído (RSR) da medida com relação às variáveis medidas.

Os módulos de acondicionamento de sinais são normalmente implementados utilizando amplificadores de instrumentação, seguidos de filtros ativos que usam amplificadores operacionais. A figura 4 mostra um diagrama genérico de um sistema de acondicionamento de sinais composto

de um estágio de amplificação, dois filtros passa baixa ou “*anti-aliasing*” de segunda ordem e um filtro passa banda ou “*notch*”.

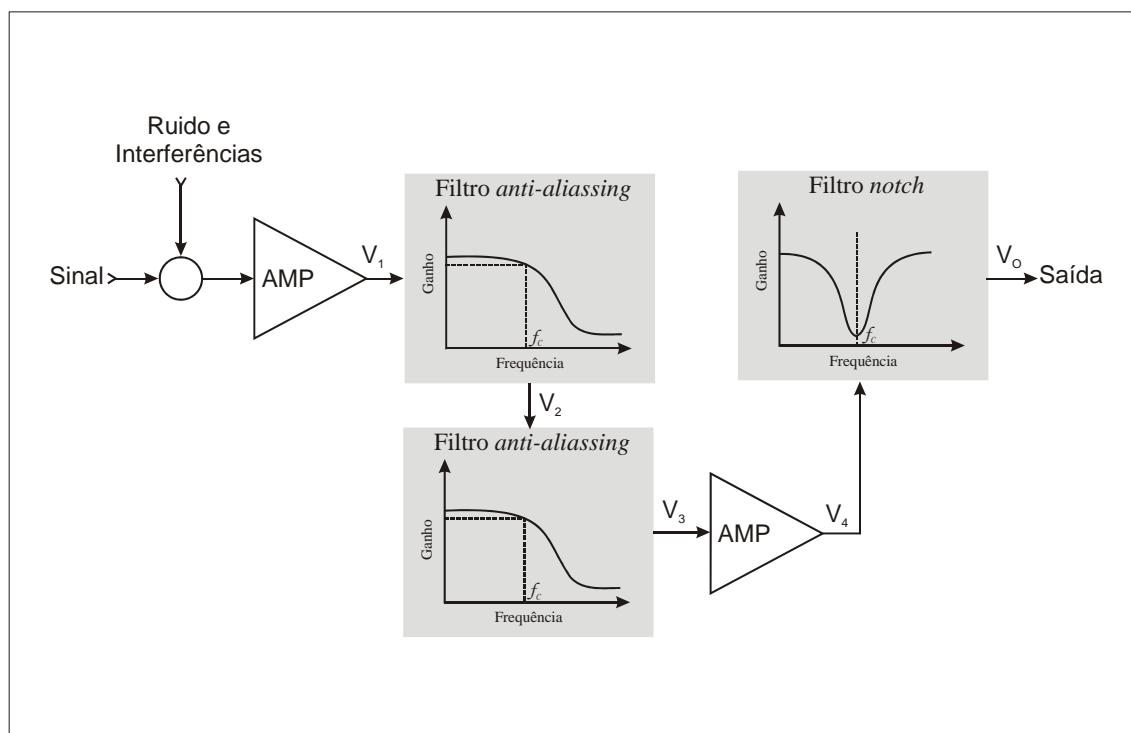


Figura 4 - Diagrama de blocos de um módulo de acondicionamento de sinais.

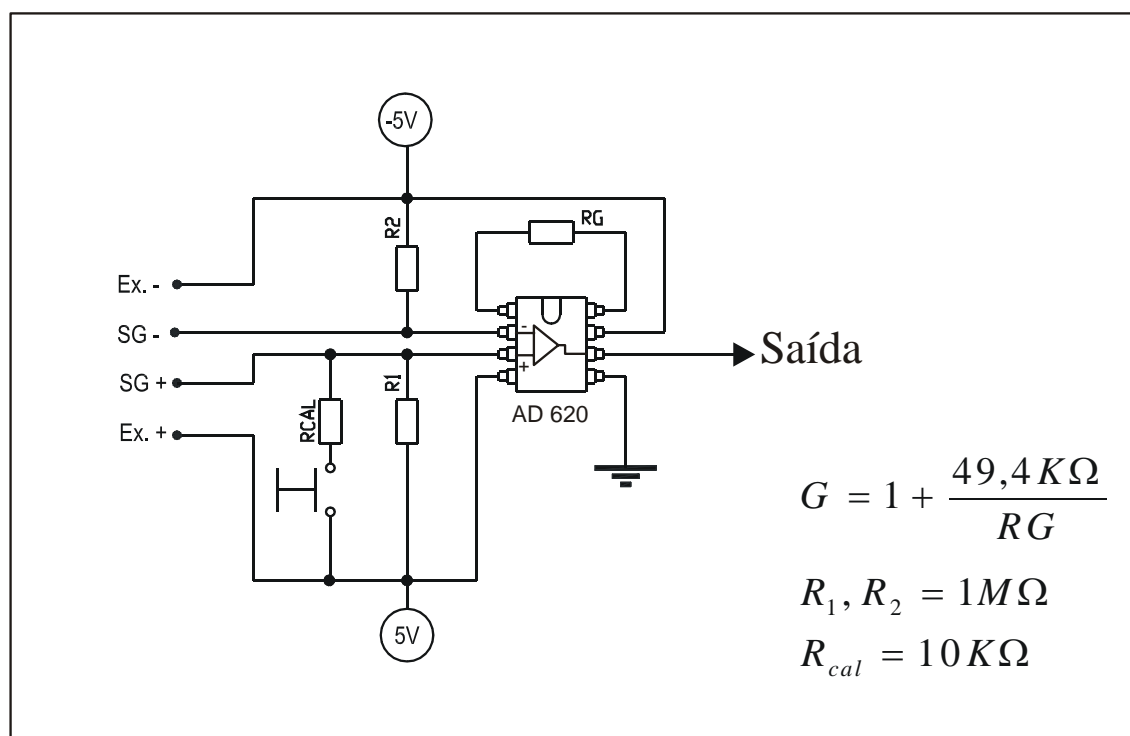


Figura 5 - Exemplo de um estágio amplificador que utiliza o amplificador de instrumentação AD620 (AD620..., 1993).

O ganho do amplificador e a frequência de corte dos filtros podem ser configurados como mostrado nos exemplos das figuras 5, 6 e 7.

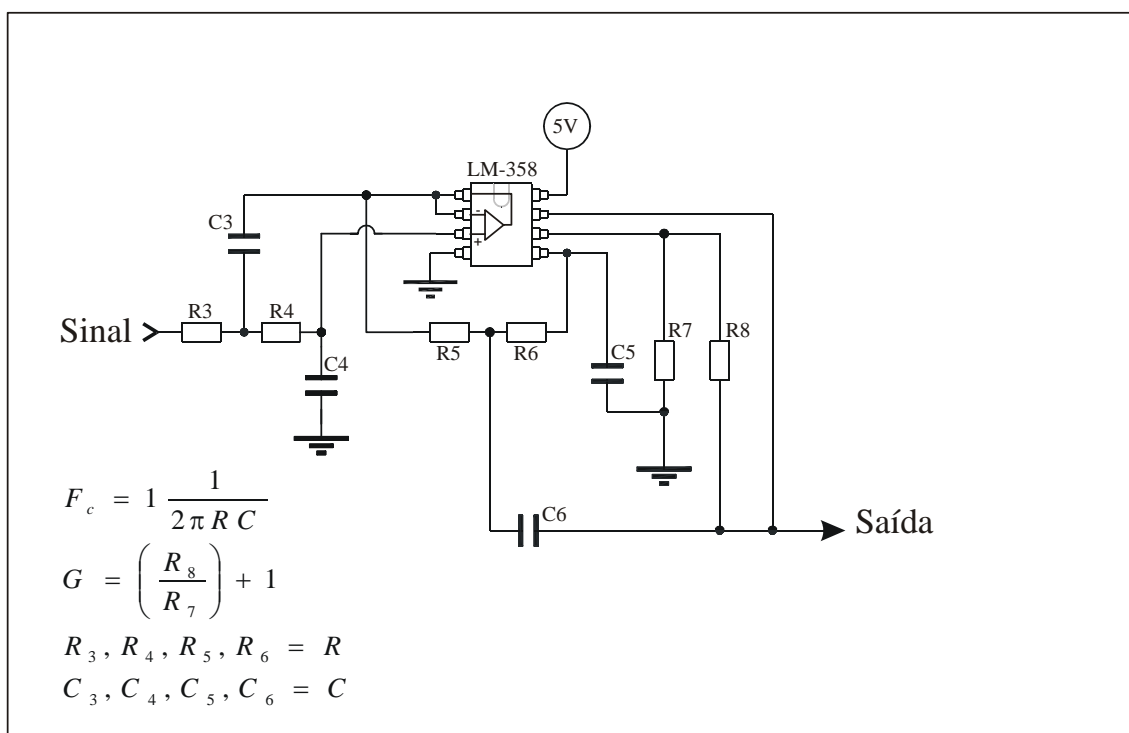


Figura 6 - Exemplo de um filtro duplo anti-aliasing que utiliza o amplificador operacional LM358 (LM358..., 2004).

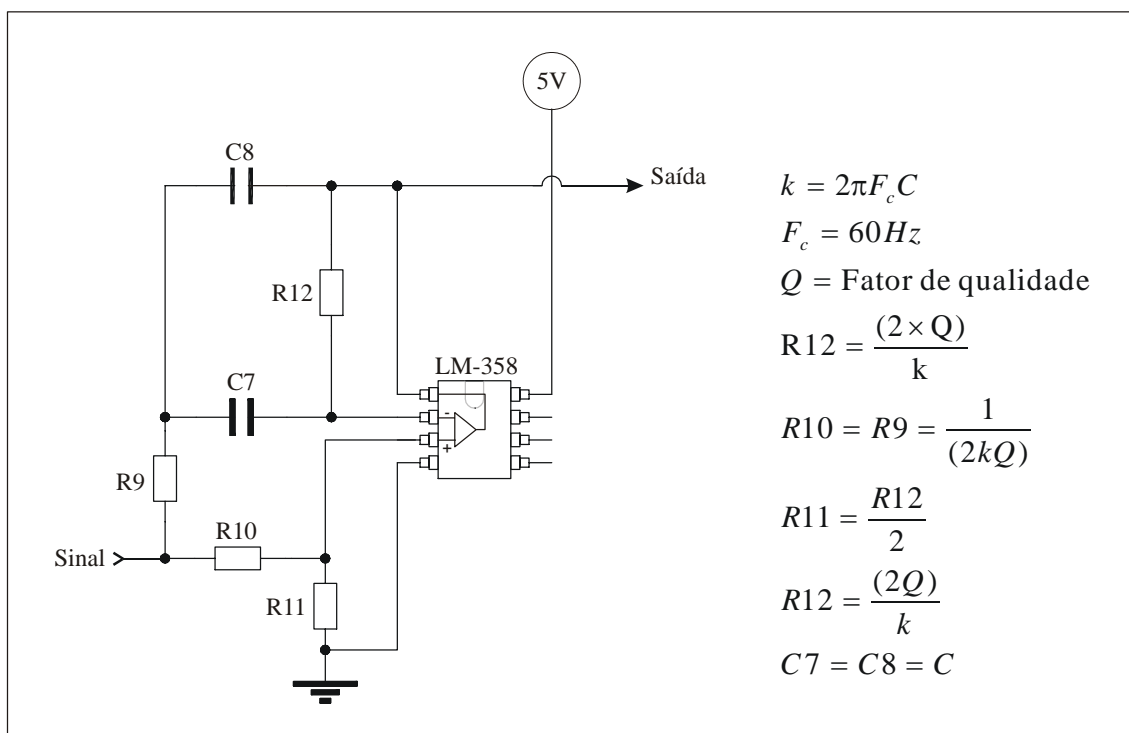


Figura 7 - Exemplo de um filtro notch que utiliza o amplificador operacional LM358.

Uma vez acondicionado o sinal, compensações de não linearidades e algumas correções, tais como as variações de temperatura no ambiente medido, podem ser feitas de forma mais fácil, empregando técnicas de processamento digital de sinais. A saída do sensor, portanto, após passar pelo estágio de condicionamento analógico, é convertido em dado digital, através de um conversor analógico-digital (*Analog to Digital Converter* - ADC).

1.2.4 Conversão analógico-digital de sinais

Como mostrado na figura 1, os modernos sistemas de instrumentação normalmente incluem um computador, um processador digital de sinais (*Digital signal processor* - DSP) ou um microcontrolador que é utilizado para digitalizar, supervisionar, coordenar e controlar as medições e, em algumas aplicações, para armazenar os dados obtidos. Existem, no entanto, problemas de geração de ruído e resolução numérica associados aos processos de digitalização dos sinais analógicos.

Teoricamente, um sinal analógico livre de ruídos possui uma resolução numérica infinita. Este sinal, ao ser convertido ao formato digital, é representado por um número binário com uma quantidade finita de bits que limita a resolução numérica do ponto amostrado a $\frac{1}{2^n - 1}$. Esta operação introduz um erro conhecido como erro de quantização.

Pode-se modelar um processo de amostragem de sinais ideal, como mostrado na figura 8, onde $X(t)$ é o sinal analógico sendo amostrado, T_s é o período de tempo entre as amostragens e $X^*(t)$ é o sinal discreto gerado.

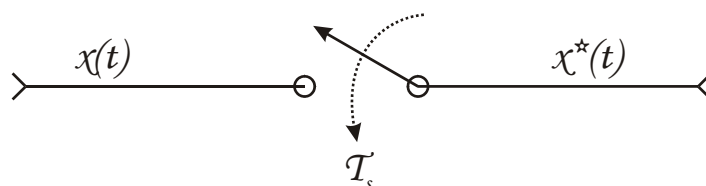


Figura 8 – Modelo de um processo de amostragem ideal.

Ao digitalizar um sinal contínuo, deve ser observada a frequência com que são amostrados pontos do sinal (F_a). A escolha desta frequência segue um critério baseado no teorema da amostragem, conhecido como teorema de Nyquist, segundo o qual o espectro $S_{xx}(f)$ da densidade de potência do sinal analógico $X(t)$, não deve ter potência significativa para frequências superiores à metade da frequência de amostragem. A figura 9 mostra vários sinais amostrados a 1000 Hz e as distorções que podem ser geradas, quando as frequências de amostragem não estão em conformidade com os critérios de Nyquist. Uma forma de garantir que o critério do teorema da amostragem seja cumprido é por meio do uso de filtros “*anti-aliasing*” antes do módulo de conversão ADC.

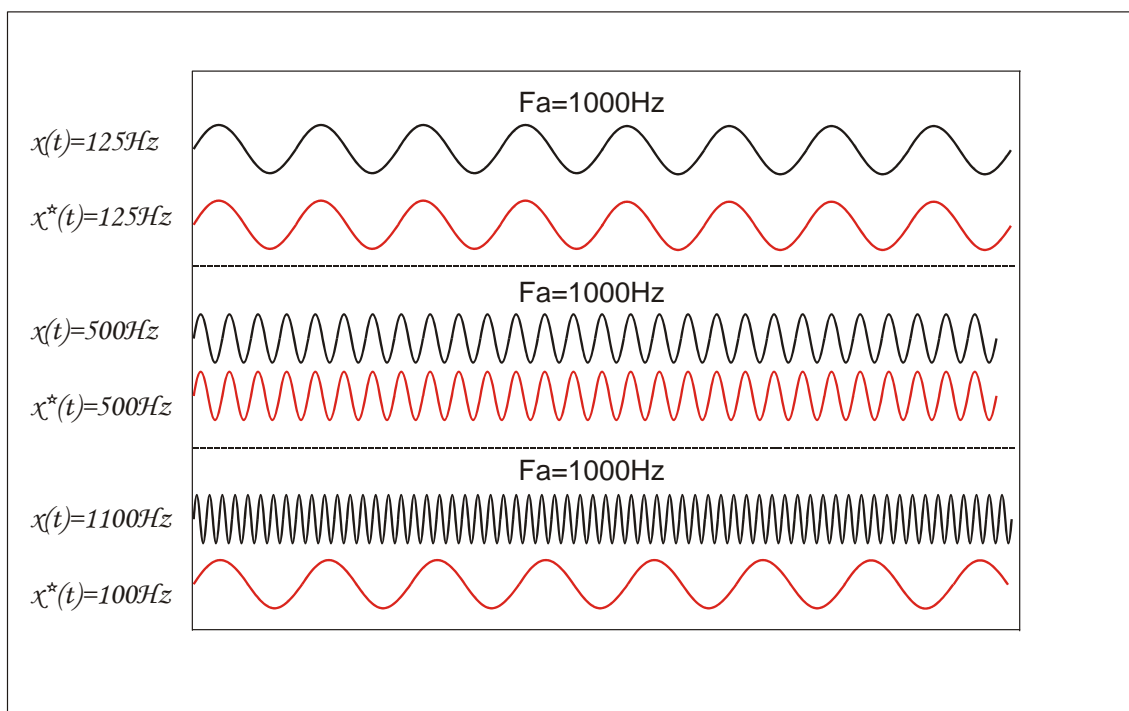


Figura 9 - Sinal digital $x^*(t)$ gerado utilizando uma frequência de amostragem (F_a) durante a digitalização de um sinal analógico $x(t)$.

A velocidade de um conversor ADC é definida pelo tempo necessário para executar a codificação da amostra do sinal analógico em formato digital e limita a frequência máxima de amostragem.

Atualmente, são encontrados sensores que podem ser conectados diretamente a dispositivos digitais, através de portas e protocolos seriais e paralelos. Estes sensores são conhecidos como “*smart sensors*” e encapsulam um circuito completo de acondicionamento de sinais e um dispositivo de entrada e saída (I/O) digital em um único chip, graças à micro e nano tecnologias utilizadas em sua arquitetura.

1.2.5 Dispositivos de entrada e saída (I/O)

Em aplicações embarcadas, é comum o emprego da comunicação serial para a transferência de dados entre seus componentes digitais, devido à sua relativa simplicidade e baixa exigência de hardware. Os protocolos de comunicação serial são muito utilizados na indústria eletrônica e existem vários dispositivos integrados que possuem interfaces deste tipo.

O padrão mais popular de comunicação serial é o EIA/TIA-232-E, mais conhecido como RS-232. Este padrão foi introduzido em 1962 e, desde então, já sofreu quatro atualizações; a letra “E” corresponde a sua quinta atualização (MAXIM, 2001).

O padrão RS-232 reúne um conjunto de especificações que garantem a compatibilidade entre o equipamento servidor e os periféricos a ele conectados.

A figura 10 mostra as especificações dos níveis lógicos do padrão RS-232 onde as tensões de -3V a -15V representam o nível lógico 1 e as de +3V a +15V representam o nível lógico 0.

A comunicação serial pode ser implementada em aplicações que utilizam microcontroladores, através do seu periférico USART (*Universal*

Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter). Este periférico suporta os modos síncrono e assíncrono de operação e vários protocolos.

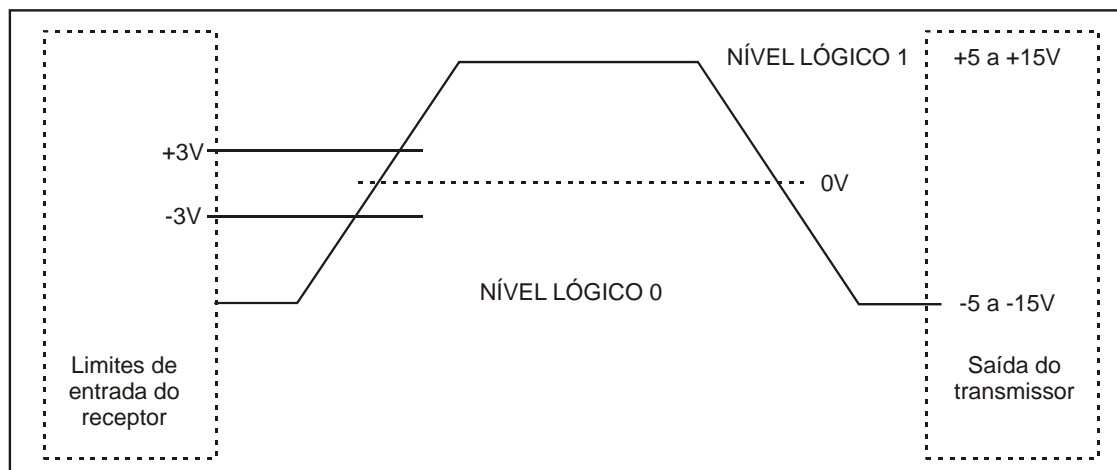


Figura 10 - Níveis de tensão para os padrões lógicos RS-232.

1.2.5.1 Modo Assíncrono – Protocolo RS-232

No modo assíncrono, a comunicação é feita através de duas vias, uma delas para transmissão (TX) e a outra para recepção (RX). Neste modo de operação, a sincronização é feita pelas vias de dados através do *Baud Rate* ou velocidade de transmissão em bits/segundo. O intervalo de cada bit deve ser padronizado e, tanto o transmissor quanto o receptor, deve estar ajustado com os mesmos parâmetros de tempo por bit. A expressão (2) representa a forma de cálculo do tempo por bit (T_{BIT}).

$$T_{BIT} = \frac{1}{BaudRate} \quad (2)$$

As vias possuem seu estado-padrão como sendo o nível alto ou “modo de espera”. Quando um lado inicia uma transmissão, ele força seu TX para o

nível baixo, mantendo-o assim pelo tempo T_{BIT} . Este evento é chamado de Bit de início (S) e é reconhecido pelo lado receptor que dá início ao sincronismo. Na seqüência, são enviados oito bits de dados e finalmente a linha de TX retorna para o nível alto caracterizando o bit de parada (P) como mostra a figura 11.

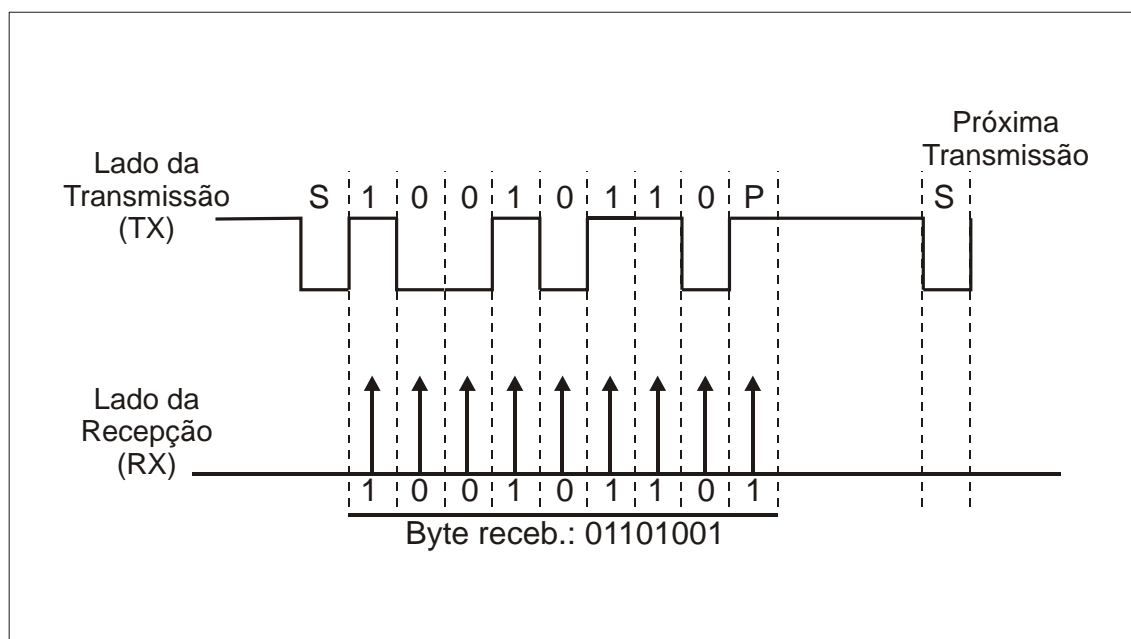


Figura 11 - Transmissão de um byte no modo assíncrono

1.2.5.2 Modo síncrono - Protocolo I2C

Existem vários protocolos de comunicação serial síncrona, todos eles se caracterizam pelo emprego de uma via de sincronismo ou “clock”. Este texto detalha o protocolo I2C, que foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Para maximizar a eficiência da comunicação dos circuitos integrados e simplificar seu projeto, a Philips desenvolveu o “*Inter Integrated Communication*” – I2C (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 2000), um protocolo síncrono que suporta endereçamento de dispositivos e utiliza um

barramento bidirecional simples de duas linhas (Linha de *clock* ou SCL e linha de dados ou SDA). Isto significa que vários circuitos integrados, ligados ao mesmo barramento I2C, podem se comunicar utilizando este protocolo (figura 12).

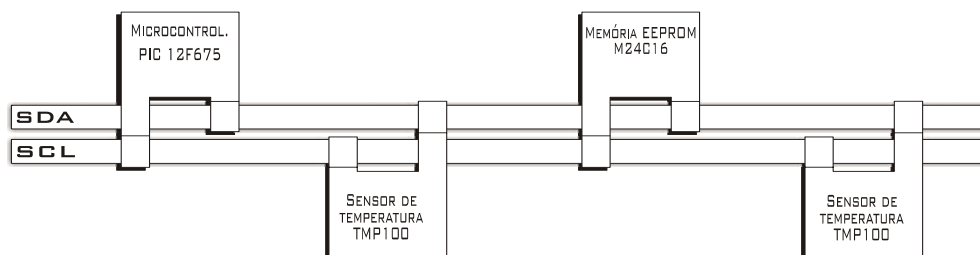


Figura 12 – Ilustração de um barramento I2C.

Cada dispositivo do barramento é reconhecido por um único endereço e pode receber e transmitir dados. Segundo o papel que desempenha um dispositivo no sistema, ele pode operar no modo mestre ou no modo escravo.

No modo mestre, o dispositivo inicia a transferência de dados e gera o sinal de sincronismo (*clock*). No modo escravo, o dispositivo é endereçado e fica dependendo do sinal de *clock* enviado pelo dispositivo mestre.

No mesmo barramento, podem coexistir vários dispositivos operando em modo mestre (característica do barramento conhecida como “*multimastering*”), já que o protocolo garante ausência de erros causados pela colisão de dados. O número máximo de dispositivos ligados ao barramento é limitado pela capacitância máxima admitida, que é de 400 pF.

Inicialmente, o protocolo I2C suportava velocidade de até 100 kbps e 7 bits de endereçamento (hoje conhecido como modo “*Standard*”). Atualmente suporta velocidades superiores a 400 Kbps, operando em modo “rápido” e velocidades superiores a 3,4 Mbps operando em modo “muito rápido”. O endereçamento também foi incrementado para 10 bits, a fim de aumentar o número de endereços disponíveis.

SDA e SCL são linhas bidirecionais conectadas a um nível de tensão alto, por meio de resistores (*pull-up*). Quando o barramento está livre, ambas as linhas se encontram em nível alto (figura 13).

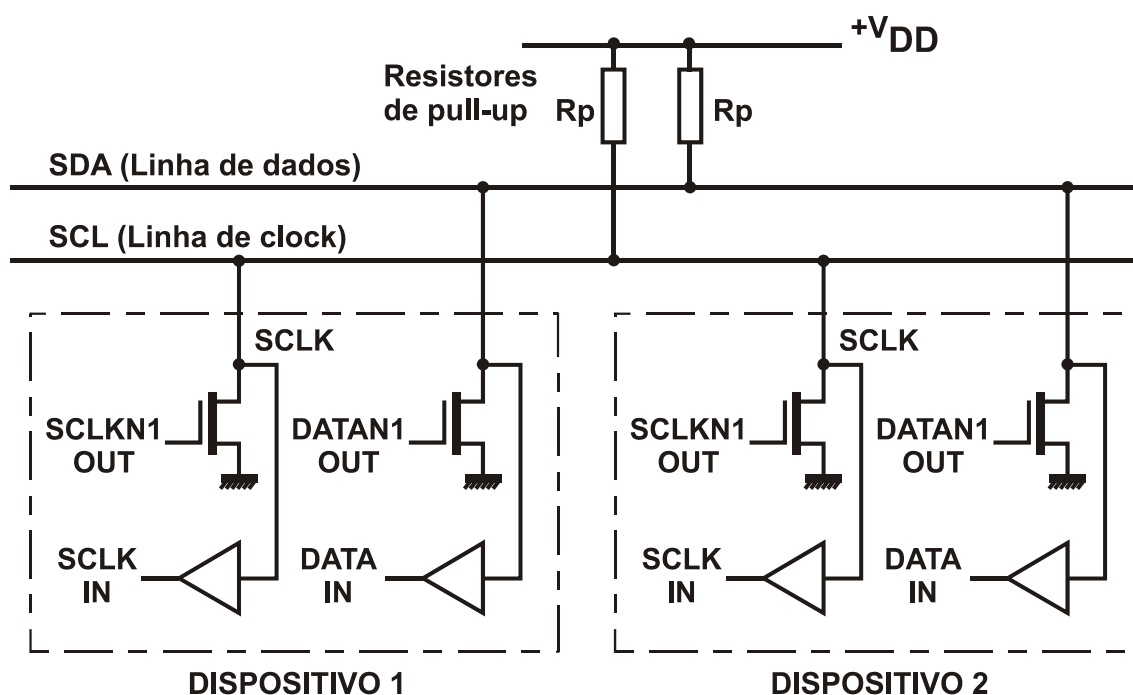


Figura 13 - Configuração do barramento I2C. Adaptado da *Application Note* da Philips Semiconductors (2000).

Os estados “Alto” ou “Baixo” da linha de dados para a transição de bits podem mudar somente quando a linha de *clock* estiver em “Baixo”, como mostra a figura 14.

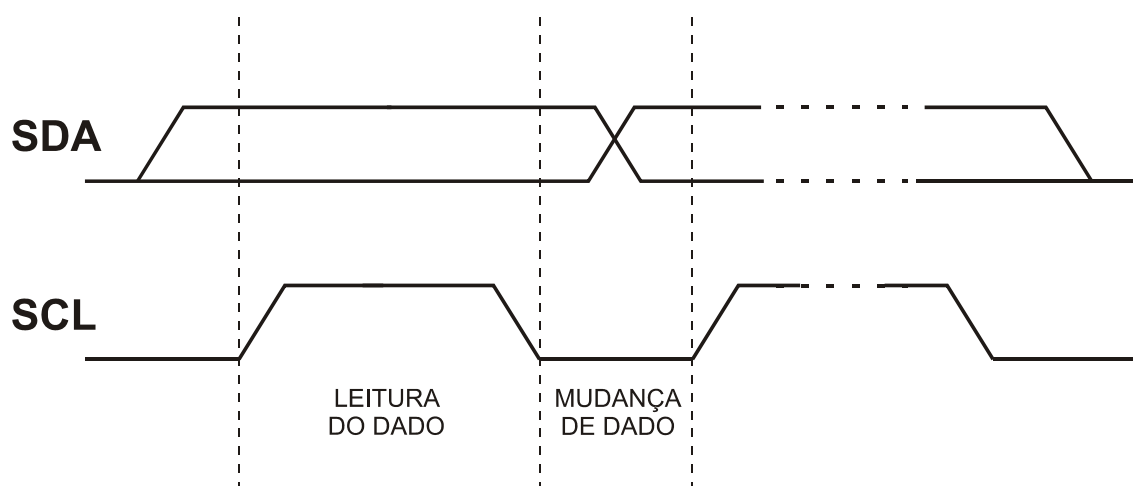


Figura 14 - Transição de bits no protocolo I2C. Adaptado da *Application Note* da Philips Semiconductors (2000).

As condições de “Início” e “Parada” (*Start* e *Stop*) são condições especiais entre as linhas do barramento que servem para marcar o início e

término de uma transmissão de dados. Em barramentos de múltiplos dispositivos “mestres”, essas condições servem também para coordenar o trabalho desses dispositivos. Essas condições são especiais porque a mudança na linha de dados acontece com a linha de *clock* em estado “Alto” e sempre são geradas pelo dispositivo “Mestre”.

A transição de “Alto” para “Baixo” da linha SDA enquanto SCL está em “Alto”, caracteriza uma condição de “*Start*” e a transição de “Baixo” para “Alto” da linha SDA, enquanto SCL está em “Alto”, caracteriza uma condição de “*Stop*” como mostra a figura 15.

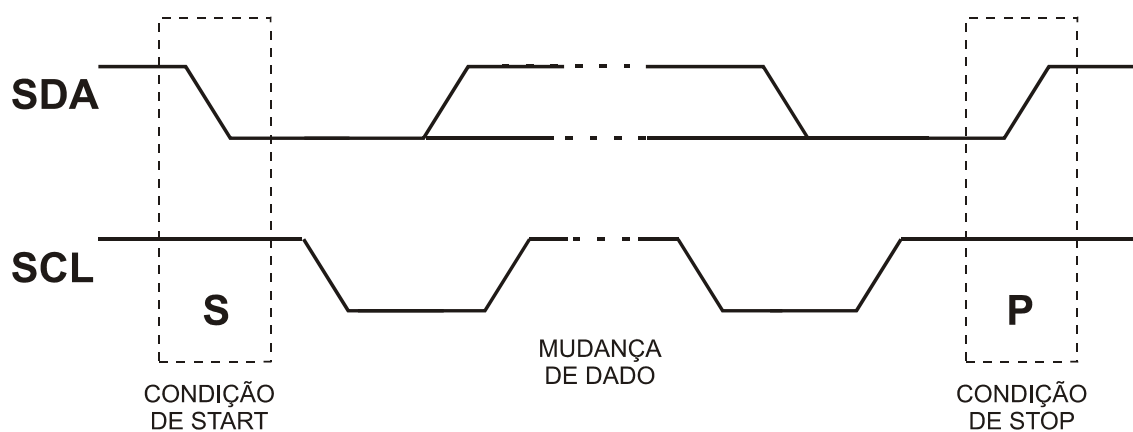


Figura 15 - Condições de *Start* e *Stop* do protocolo I2C. Adaptado da *Application Note* da Philips Semiconductors (2000).

Após a transmissão do byte de dados, uma resposta é dada pelo dispositivo receptor, no lugar do 9º bit, indicando se o dado (*byte*) foi corretamente recebido ou não. Esta resposta é chamada de “*Acknowledge*” (ACK). O estado “alto” da linha SDA no 9º bit indica erro, enquanto o estado “baixo” indica que os dados foram recebidos com sucesso (figura 16).

Toda transferência de dados no protocolo I2C é sempre executada em pacotes de 8 bits. Cada *byte* deve ser seguido sempre por uma condição de ACK e, enquanto qualquer dispositivo escravo está executando alguma operação, a linha de clock é mantida em nível “baixo”, forçando o dispositivo mestre a aguardar a execução desse processo (figura 17).

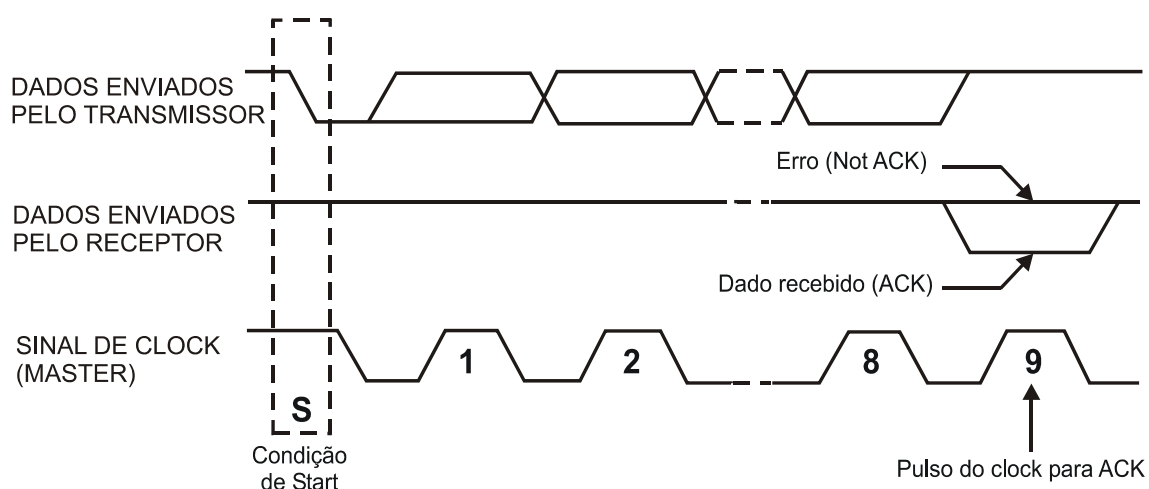


Figura 16 - Resposta ACK do dispositivo receptor no protocolo I2C. Adaptado da *Application Note* da Philips Semiconductors (2000).

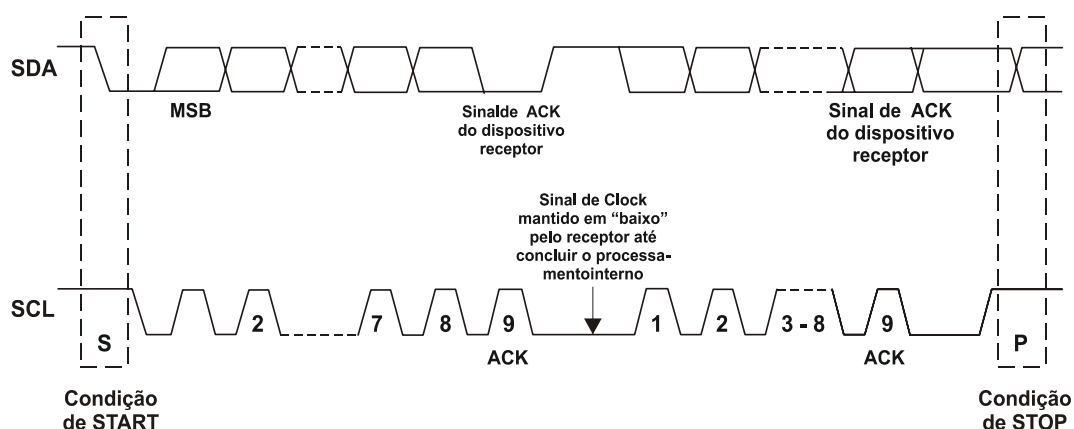


Figura 17 - Diagrama de transmissão de dados no protocolo I2C. Adaptado da *Application Note* da Philips Semiconductors (2000).

1.3 Comunicação sem fio

Comunicação é a transferência de informação de um dispositivo a outro. A comunicação entre instrumentos ocorre através da transmissão de sinais elétricos do transmissor para o receptor. Nos sistemas de comunicação sem fio, a informação é passada do transmissor ao receptor

através de um canal de comunicação. Esta informação é codificada em mensagens que contêm dados que representam a informação, acrescida de criptografia e detalhes de protocolo.

As tecnologias de comunicação sem fio ou “*wireless*” substituem os tradicionais meios de conexão tais como cabos e fios. Os sinais de comunicação que carregam as informações nos sistemas “*wireless*” podem ser sinais eletromagnéticos, magnéticos, ópticos, acústicos, etc. Os dispositivos, que conferem ao sistema de instrumentação a capacidade de comunicação bilateral, são chamados de transceptores.

Entre as várias técnicas de comunicação sem fio, a comunicação via rádio-freqüência é atualmente muito utilizada em diversas aplicações, que vão, desde a integração de sistemas industriais até uma grande variedade de produtos de uso doméstico. Este tipo de comunicação utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas geradas por um dipolo oscilante que converte a energia elétrica em energia eletromagnética. A antena receptora capta a energia eletromagnética e a transforma em sinais elétricos.

1.4 Redes de sensores sem fio (RSSF)

Uma RSSF é uma rede de pequenos nós computacionais com sensores e dispositivos de comunicação telemétricos devidamente acoplados (MIN et al., 2002). Um exemplo de nó sensor em uma RSSF é composto de um microcontrolador, um sistema de transmissão e recepção, usando rádio-freqüência, uma fonte de alimentação e, um ou mais sensores acoplados (ASADA et al., 2000). A figura 18 mostra o diagrama de blocos de um nó sensor.

Do ponto de vista científico, as RSSF apresentam uma grande variedade de novos problemas ainda não estudados; por esta razão, a pesquisa nesta área foi considerada entre as seis áreas de grande desafio de

pesquisa no relatório do workshop sobre pesquisas fundamentais na área de redes, patrocinada pela National Science Foundation (NSF) (2004).

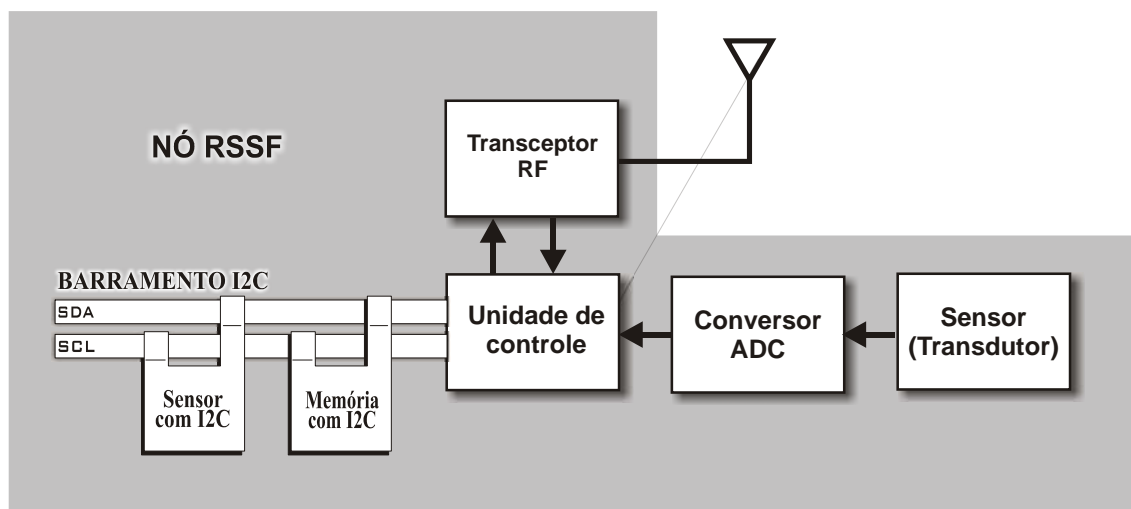


Figura 18 - Exemplo de um nó sensor genérico.

As redes de sensores sem fio foram viabilizadas pela evolução de três tecnologias: microprocessadores, transceptores e micro-sensores. Seu atual estágio tecnológico foi impulsionado pela tecnologia ZigBee, que impulsionou o surgimento de circuitos integrados, desenvolvidos especificamente para serem aplicados em RSSF. Estas redes podem ser usadas para monitorar e, eventualmente, controlar vários tipos de ambientes e propiciaram avanços no paradigma da computação ubíqua, pela presença distribuída, imperceptível, inteligente e altamente integrada de núcleos computacionais ou nós.

As RSSF trabalham com baixas taxas de transmissão e com muita limitação de energia e hardware, mas seguem um paradigma de trabalho altamente colaborativo, resultando em um sistema de alto desempenho (também denominado poeira inteligente). Cada nó da rede é uma entidade autônoma móvel ou fixa, capaz de se auto-gerenciar e de coletar dados do ambiente com que interage e transmiti-los, usando enlaces sem fio diretamente ou através de outros nós até a saída da rede (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003).

Os nós sensores são alimentados, normalmente, por baterias não recarregáveis já que muitas vezes operam em lugares onde há pouco ou nenhum acesso para manutenção, por esta razão o tempo de vida operacional de uma RSSF é limitado em algumas aplicações ao tempo de vida útil das baterias dos nós sensores. Como a maior fonte de consumo de energia dos nós sensores é a transmissão de dados, grande parte das pesquisas em RSSF são voltadas para tornar as tarefas de transmissão de dados mais eficiente. Nesse sentido, existem várias metodologias, cujo objetivo é minimizar o consumo de energia da rede, dentre elas podemos citar:

- Diminuição do tamanho das mensagens transmitidas e a frequência com que essas transmissões são realizadas (BRAGINSKY; ESTRIN, 2002; HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000; INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000).
- Aproveitamento da alta densidade de nós para diminuir a redundância das informações transmitidas por cada nó (PERILLO; HEINZELMAN, 2003a, PERILLO; HEINZELMAN, 2003b).

As RSSF podem ser vistas como um tipo especial de rede móvel ad hoc (MANET – *MóBILE Ad Hoc Network*), mas diferem das redes de computadores em vários aspectos. Normalmente as RSSF operam com um número grande de elementos distribuídos que trabalham de forma autônoma, isto é, sem intervenção humana direta.

Devido às grandes restrições de energia e capacidade computacional, os elementos deste tipo de rede devem possuir mecanismos de auto-gerenciamiento (auto-configuração, auto-manutenção, auto-organização, auto-proteção, etc.).

A topologia das RSSF é dinâmica mesmo quando todos os seus nós são fixos, em consequência da sua natureza corporativa e de tolerância a falhas.

O projeto de uma infra-estrutura de RSSF é influenciado por muitos fatores dependentes da aplicação, tais como: tolerância a falhas, escalabilidade, custo do sistema, ambiente de operação, topologia da rede, consumo de energia, etc. (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003); no entanto, a mais básica escolha que deve ser feita no projeto de uma RSSF é a seleção da frequência de transmissão. Uma opção é o uso de bandas licenciadas em frequências VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High frequency*) que requerem intervenção dos órgãos reguladores de telecomunicações; outra opção é o uso de faixas de frequência destinadas a transmissões de aplicações industriais, científicas e médicas (ISM) com restrições de potência de transmissão. As frequências ISM em diferentes regiões do planeta são: 13,56MHz; 27,55MHz; 303MHz ; 315MHz; 404 MHz; 433MHz; 868MHz (Europa); 915MHz (América); 2,45GHz; 5,2GHz; 5,3GHz e 5,7GHz (América).

1.5 Protocolo Floating Base Sensor Network (FBSN)

O protocolo FBSN proposto por Silva et al. (2005), é um protocolo de comunicação para redes sem fio, cuja principal característica é proporcionar aos nós móveis a capacidade de tornar-se uma estação rádio-base temporária (ERBT). Nesse protocolo, o algoritmo de controle dinamicamente gerencia como os nós irão comunicar-se na rede, elegendo aleatoriamente nós móveis que possam ser configurados como ERBT, fazendo uma ponte do nó objetivo (nó N) a uma das ERBF. A figura 19 ilustra o funcionamento de uma rede FBSN.

O protocolo FBSN demonstrou ser muito útil no monitoramento de rebanhos em que os animais interagem e se deslocam mantendo distâncias curtas entre si, pois isso possibilita a redução do número de ERBF necessárias. A figura 20 mostra o algoritmo de busca desse protocolo.

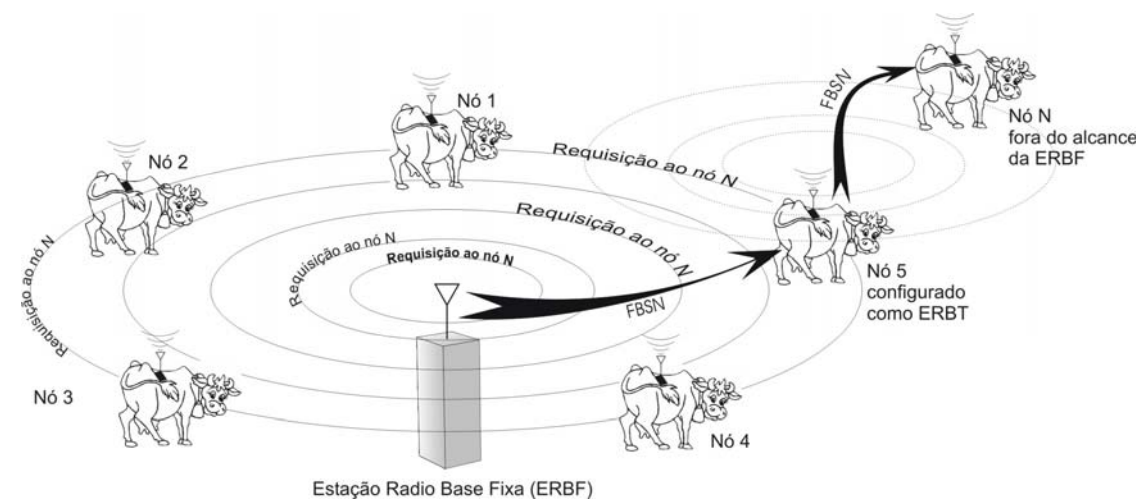


Figura 19 - Diagrama esquemático de uma rede com protocolo FBSN. Adaptado de Silva et. al (2005).

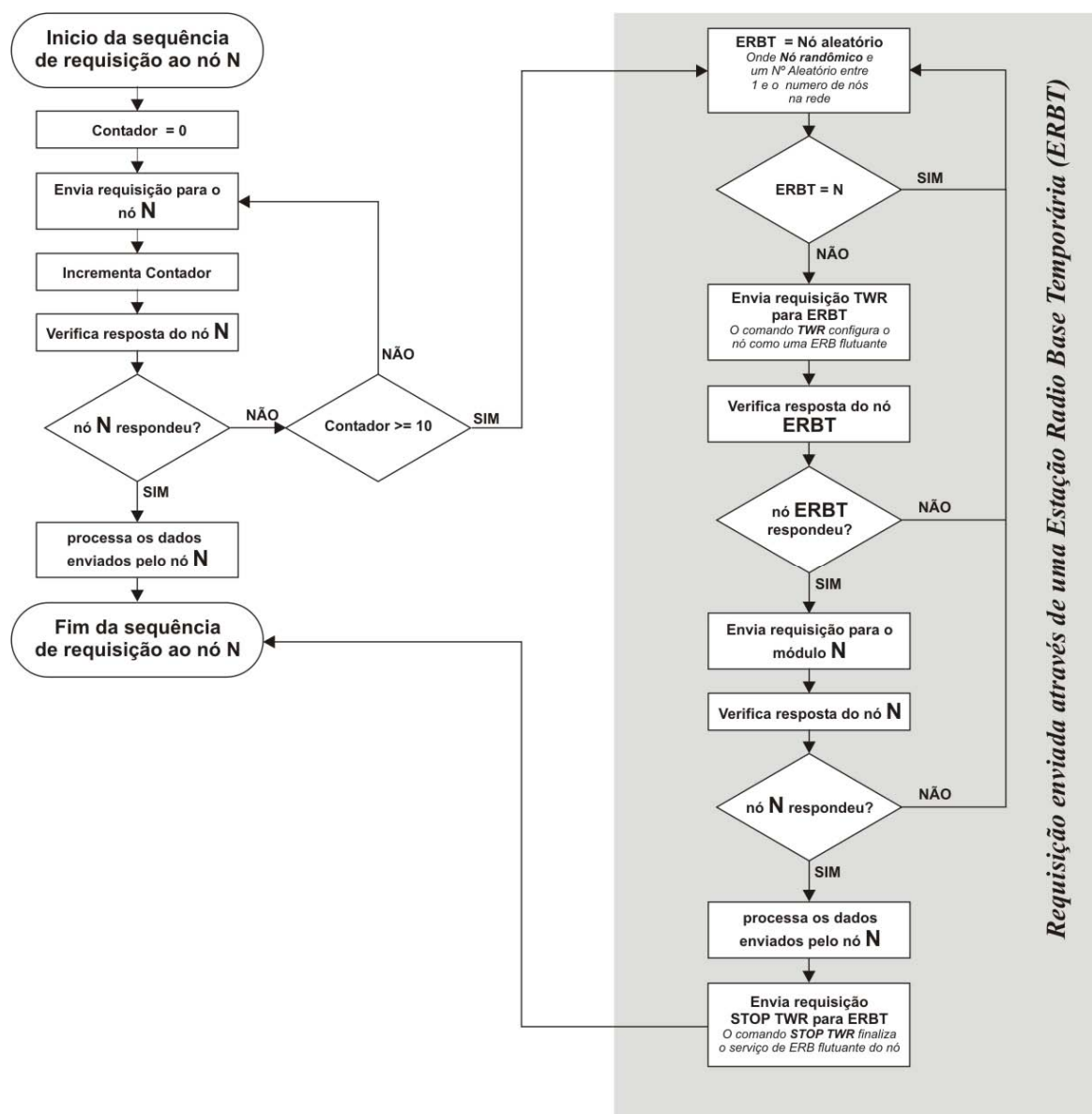


Figura 20 - Algoritmo de busca da FBSN.

2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo testar a seguinte hipótese:

“As redes de sensores sem fio podem permitir a coleta eficiente de dados fisiológicos de bovinos, minimizando a quantidade de erros induzidos pela manipulação dos animais durante a experimentação”.

A fim de testar a aplicabilidade das redes de sensores sem fio na monitoração de bovinos, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Desenvolvimento do hardware da rede de sensores utilizando-se técnicas de instrumentação embarcada.
- Desenvolvimento do software dos módulos embarcados da rede de sensores implementada com o protocolo *“Floating base sensor network”* (FBSN) proposto por Silva et al. (2005).
- Desenvolvimento do software supervisor da rede.
- Desenvolvimento de um simulador de auxílio ao projeto da infraestrutura de antenas da rede.
- Experimentação animal e teste da infra-estrutura.
- Avaliação de diversos métodos de embarque dos módulos de sensores.

3 Materiais e métodos

3.1 Desenvolvimento do Hardware

O sistema desenvolvido é composto de dois módulos de hardware: O módulo estação rádio-base fixa (ERBF) e o módulo móvel ou nó embarcado (NOE).

Foram desenvolvidos dois tipos de NOE: nós embarcados com capacidade de comunicação bilateral (transceptores) e nós embarcados transmissores que coletam e transmitem periodicamente os sinais armazenados.

3.1.1 Módulo Estação rádio base fixa (ERBF)

Este módulo é responsável pelo controle do tráfego de informações entre os nós da rede e pela recepção dos dados. O sistema consta de um microprocessador interligado com um transceptor. Neste dispositivo foi utilizado um transceptor comercial BIM2-160-433 da Radiometrix® (BIM2-433-166..., 2003) operando a 433MHZ. A figura 21 mostra o diagrama de blocos da ERBF desenvolvida.

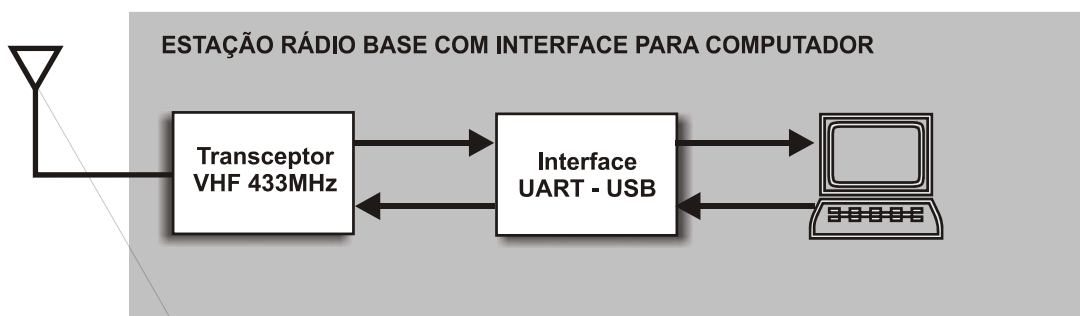


Figura 21 - Diagrama esquemático da estação rádio base fixa.

A interface UART – USB mostrada no diagrama da figura 21, é um estágio que permite a comunicação da estação rádio-base fixa, com um microcomputador através da porta “*Universal Serial Bus*” (USB). Para este fim, foi utilizado o circuito integrado CP2102 da Silicon Laboratories® (CP2102..., 2004) que é uma interface encapsulada em um BGA (*Ball Grid Array*) de 5 x 5mm.

3.1.2 Nós embarcados transmissores (NOE transmissores)

O NOE transmissor é um sistema projetado para ser embarcado no animal. O hardware desse módulo possui um barramento digital I2C, para permitir a instalação de sensores digitais e duas entradas analógicas ligadas a um ADC de 10 bits que permitem a instalação de sensores analógicos. O protótipo foi equipado com um sensor digital de temperatura TMP100 (TMP100..., 2003) da Texas Instruments® e é alimentado por uma bateria tipo button CR2032.

Trata-se de um nó sensor ativo cujo projeto eletrônico usa um transmissor de baixo consumo, integrado a um microcontrolador; o dispositivo é o rPIC-12F675 (RFPIC12F675..., 2003) da Microship®. Como este integrado não tem um receptor na sua arquitetura, para conferir um

mecanismo de sincronização ao projeto, foi adicionado, ao circuito eletrônico, um receptor baseado em um ressonador (circuito RLC) sintonizado na frequência de 125 kHz. Desta forma o sistema pode receber uma requisição de envio de dados da estação rádio-base, usando um circuito simples acoplado ao sistema “*capture and compare*” do microprocessador. Os resultados dos testes em laboratório mostraram que o nó desenvolvido é eficiente quanto a sua operação e consumo de energia da bateria. O sistema foi projetado para economizar energia da bateria e para isto o rPIC-12F675 e o TMP100 trabalham em modo de “espera”, enquanto não houver uma requisição da estação rádio-base. A figura 22 mostra o diagrama esquemático do nó embarcado.

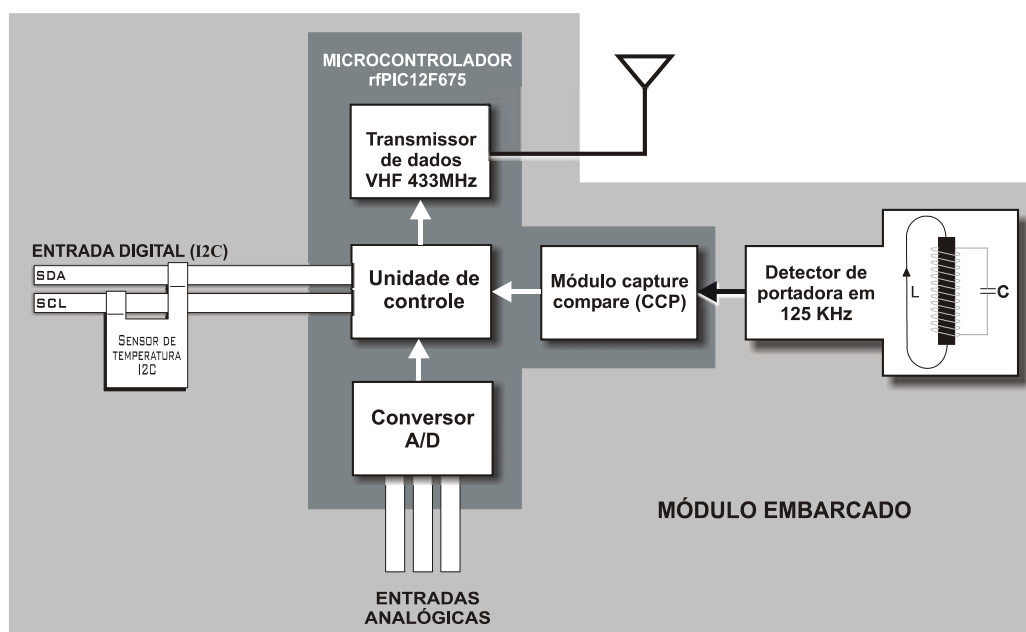


Figura 22 - Diagrama esquemático do NOE transmissor.

Na fase de desenvolvimento da placa de circuito impresso (PCI), uma simulação da antena impressa foi realizada usando um programa de computador.

Foram simuladas as propriedades da antena impressa, projetada para o módulo sensor, a fim de estimar sua eficiência e impedância para a

freqüência de 433MHz, bem como para analisar a forma de propagação do sinal.

Na simulação, foi utilizada a ferramenta Comsol da Multiphysics ®. Este programa baseia-se na transformação de equações diferenciais parciais em formas apropriadas para análise numérica e na resolução das mesmas utilizando o método dos elementos finitos com várias modalidades de algoritmos numéricos de alta performance.

A figura 23 mostra o layout da PCI desenvolvida para o sensor móvel e a antena impressa na parte superior da placa.

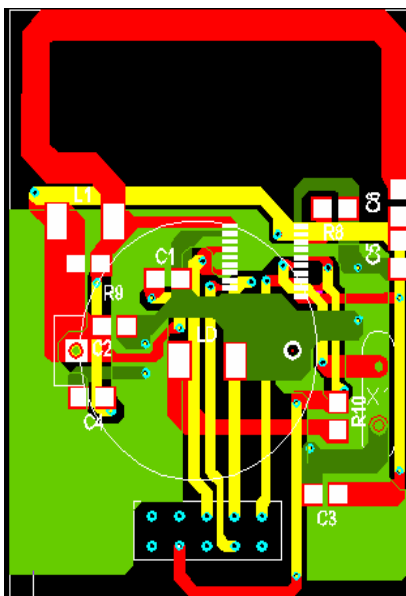


Figura 23 - Layout da PCI do módulo sensor

A fim de simplificar o modelo e focalizar unicamente a análise das propriedades da antena, foi desconsiderado o efeito que os componentes do circuito têm no desempenho final do conjunto, limitando, assim, o modelo ao desenho da antena em que o sinal é injetado através de 2 cabos coaxiais.

A figura 24 mostra o modelo criado no ambiente da ferramenta Comsol®.

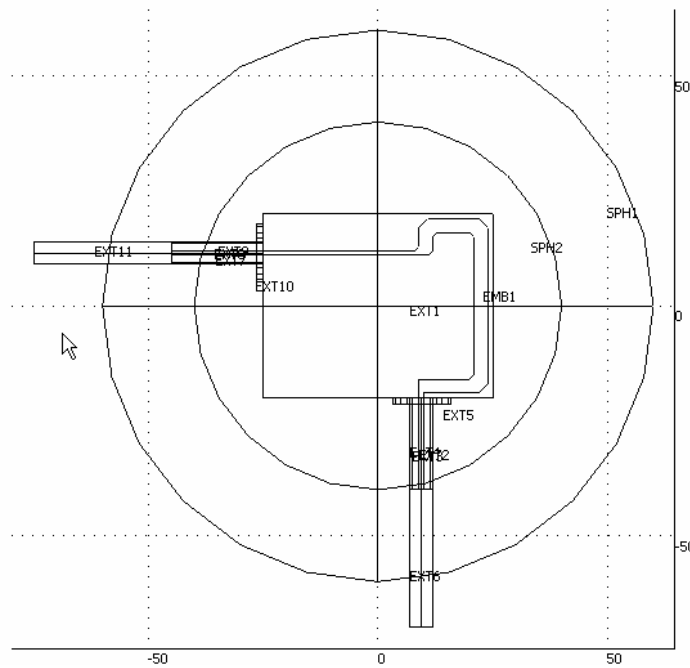


Figura 24 - Modelo da antena do sensor móvel no ambiente Comsol ®.

As equações (3), (4) e (5) foram utilizadas para modelar os campos incidentes nos limites de entrada de ambos cabos.

$$E_0 = e_r \frac{E_m}{r} e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$E_0 = e_\varphi \frac{H_m}{r} e^{j\omega t} = e_\varphi \frac{E_m}{r\eta} e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} E_0 \times H_0^* = e_\varphi \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{r\eta^2} \quad (5)$$

Onde:

E = Campo elétrico

H= Campo magnético

P= Potência

r= Vetor de posição

n= Número de entrada

Para a solução deste problema foi utilizada a predefinição de fenômenos de propagação harmônica de ondas eletromagnéticas. Essa propagação é baseada na equação do vetor de Helmholtz eq.(6), cuja forma adequada ao problema de ondas eletromagnéticas é mostrada na eq.(7).

$$(\nabla^2 + K^2)A = 0 \quad (6)$$

onde:

K= constante

A =função desconhecida

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \varepsilon_r E = 0 \quad (7)$$

onde:

μ =coeficiente de permissividade

ε = permeabilidade

Foi introduzido no modelo um subdomínio representando uma camada de absorção com propriedades não isotrópicas, modeladas pelas eq.(8) e eq.(9) para simular o ambiente de propagação do sinal. A figura 25 mostra a simulação do modelo 3d da antena onde as esferas representam camadas de subdomínio não isotrópicas.

$$\mu = \mu_0 \mu_r L \quad (8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r L \quad (9)$$

onde:

μ = permissividade do material.

ε = permeabilidade do material.

L= tensor de *rank* 2 para representar a posição espacial das camadas não isotrópicas.

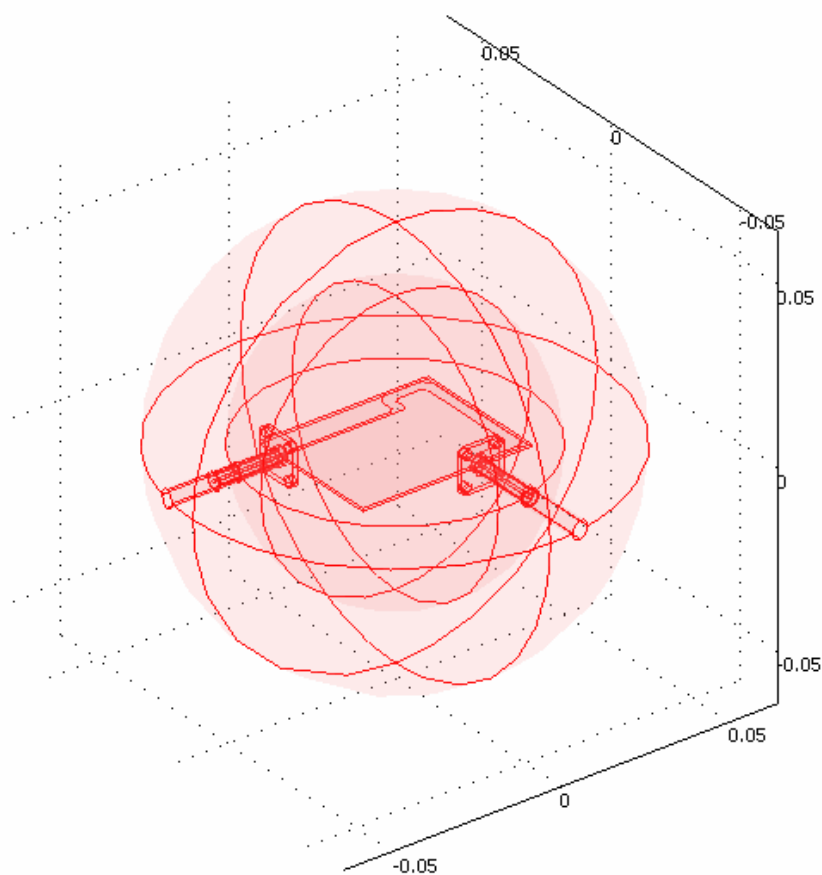


Figura 25 - Modelo 3D gerado no ambiente Comsol ®

A figura 26 mostra a malha de elementos criada pelo Comsol ® após a configuração das variáveis do solver.

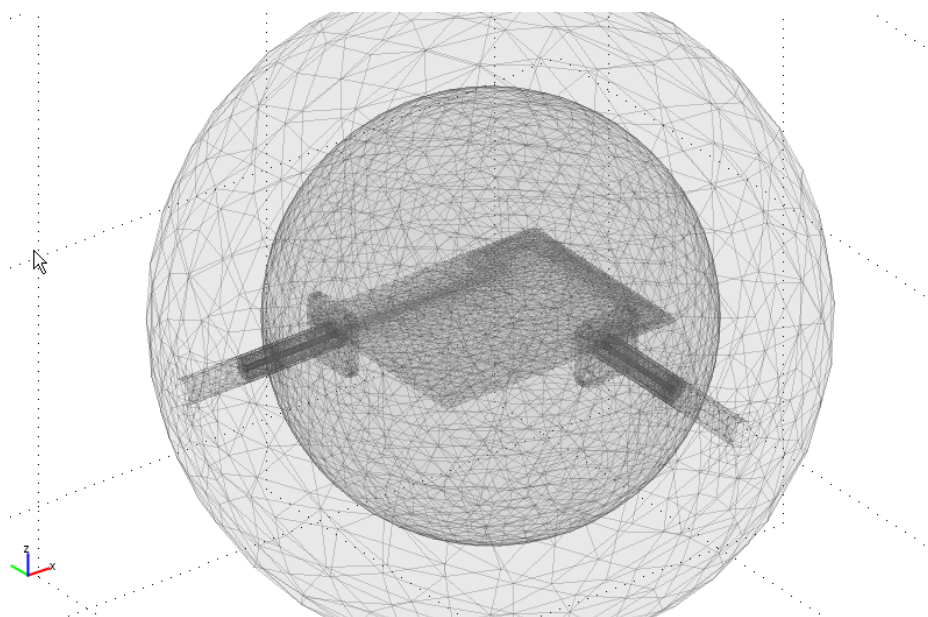


Figura 26 - Malha de elementos do modelo

3.1.3 Nós embarcados transceptores (NOE transceptores)

Estes módulos também foram projetados para serem carregados pelos animais e possuem capacidade de comunicação bilateral. São constituídos por quatro partes: acondicionamento de sinais, conversão analógico-digital, transmissão de dados digitais e um barramento I2C para conexão de sensores digitais diversos.

Esse tipo de nó foi equipado com um amplificador de sinais cerebrais acoplado à entrada do estágio de acondicionamento de sinais, que foi projetado especificamente para este tipo de aplicação. O diagrama de blocos do amplificador, com o estágio de acondicionamento, é mostrado na figura 27. A figura 28 mostra o diagrama de blocos do NOE transceptor

O estágio de conversão analógico-digital foi implementado utilizando-se o ADC de 10 bits de um microcontrolador PIC-16F877A (PIC16F87X..., 1999) fabricado pela Microchip® que também é responsável pelo gerenciamento do sistema e do algoritmo FBSN.

O transceptor BIM2-433-160 da Radiometrix® foi escolhido para estabelecer o enlace sem fio por seu baixo consumo e tamanho reduzido e foi acoplado aos pinos da USART, do microcontrolador PIC-16F877A, com quem se comunica utilizando o protocolo RS-232 e opera em FM a 433MHz.

Foi implementado um barramento digital I2C em dois pinos I/O digitais do microcontrolador. O protótipo foi equipado também com um sensor digital de temperatura TMP100 ligado a este barramento.

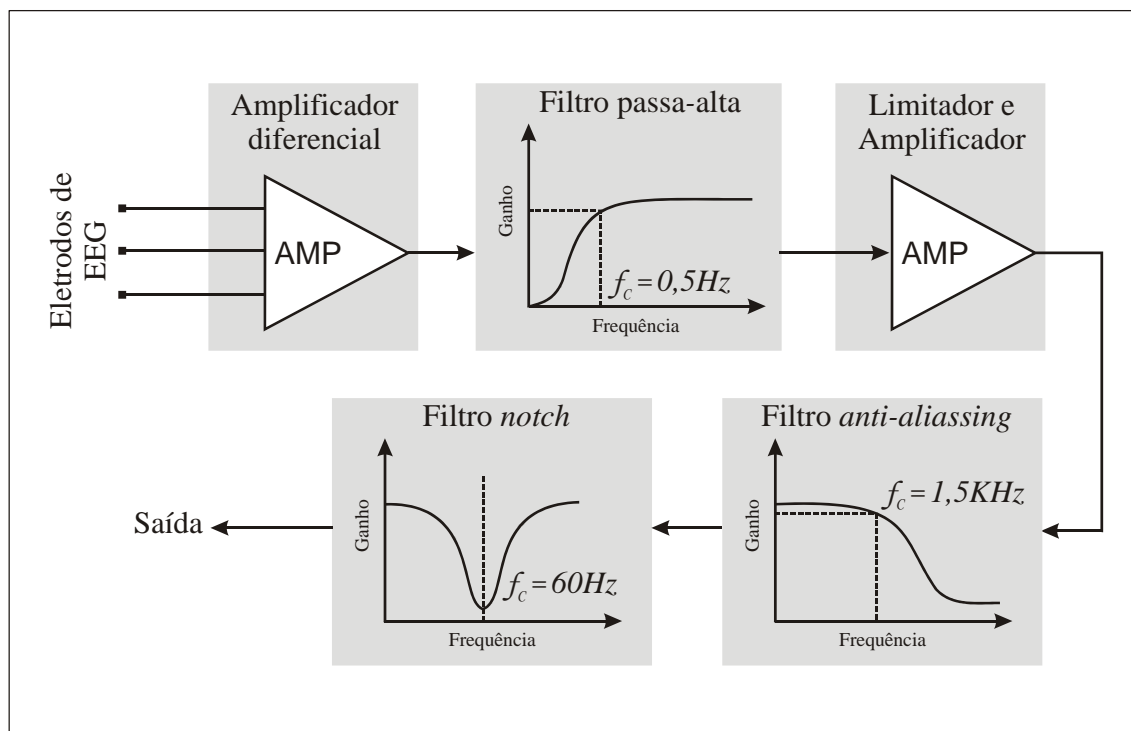


Figura 27 - Diagrama de blocos do módulo de condicionamento de sinais e o amplificador de eletroencefalograma (EEG).

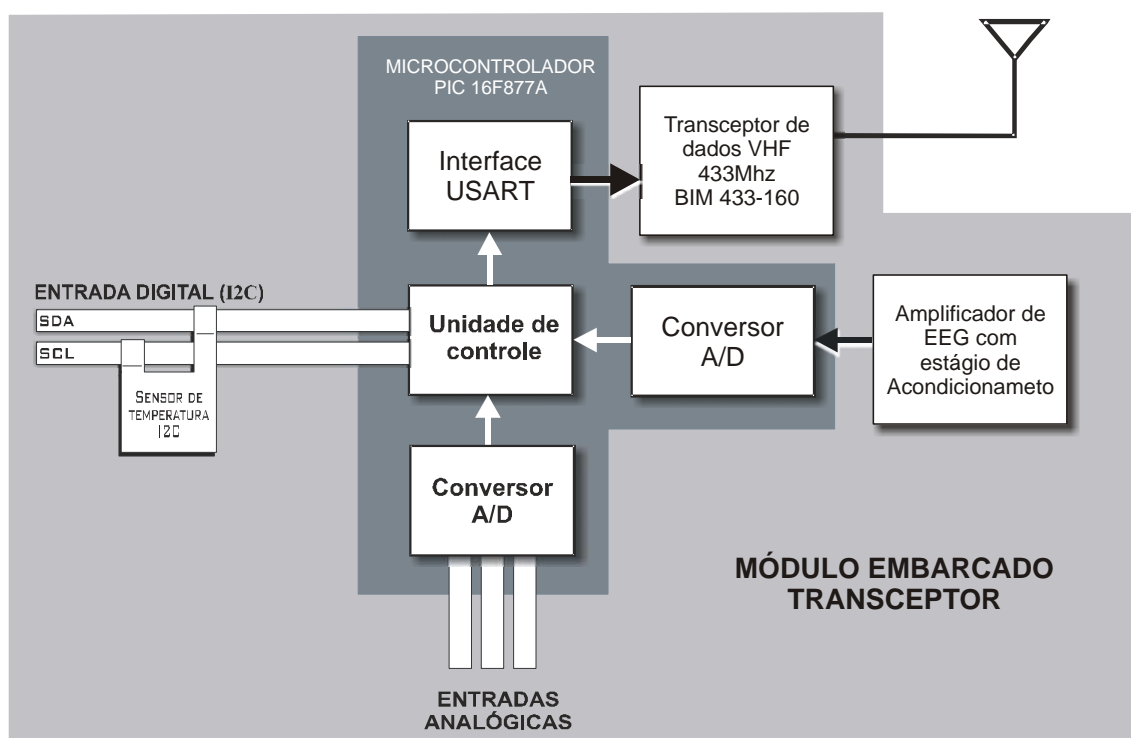


Figura 28 - Diagrama de blocos do dispositivo NOE transceptor.

A fim de testar em laboratório o amplificador de sinais cerebrais desenvolvido, foi montado o circuito de teste mostrado na figura 29. Esse circuito foi alimentado com um sinal senoidal, obtido a partir de um gerador de funções com uma amplitude controlada de 2V. Na saída do circuito obteve-se um sinal reduzido de aproximadamente $20,34\mu\text{V}$ que foi introduzido ao circuito de coleta de um NOE transceptor ou equipamento teste (ET). Os dados obtidos foram comparados com os dados coletados por um equipamento controle (EC).

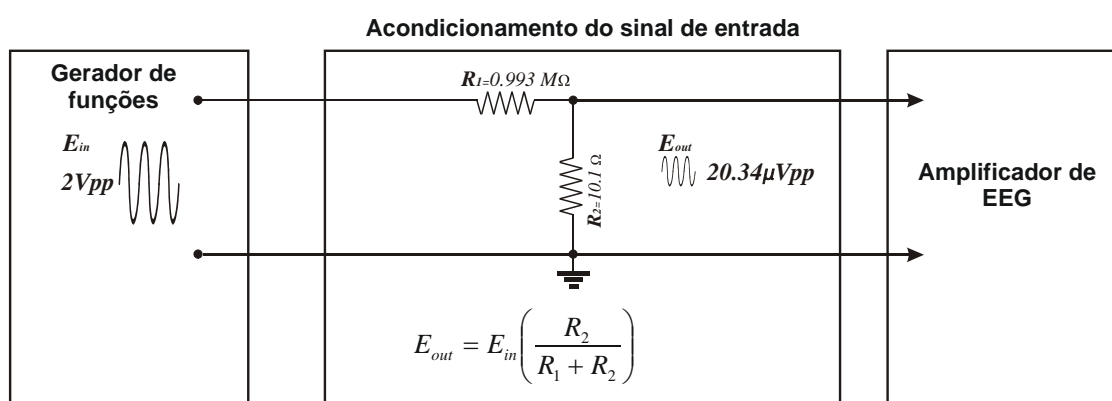


Figura 29 – Diagrama do circuito de ensaio do amplificador de EEG.

3.1.4 Integração do Sensor de temperatura digital TMP100 na eletrônica desenvolvida

O sensor de temperatura TMP100 (TMP100..., 2003), fabricado pela Texas Instruments®, é um integrado com 1,5 mm de largura e 3,0 mm de comprimento (figura 30), que opera na faixa de -55°C a 125°C . A comunicação entre este dispositivo e a eletrônica que o controla é feita através do protocolo I2C. Com uma resolução programável de 9 a 12 bits

(0,5000°C a 0,0625°C), encapsulamento reduzido e baixo custo, é amplamente utilizado em instrumentação.

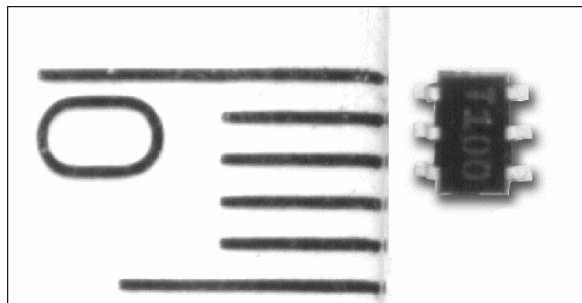


Figura 30 - Ilustração do elemento sensor TMP100

O acesso ao dispositivo é feito através de um endereço de 8 bits, sendo que 3 bits desse endereço são configurados fisicamente através dos pinos ADD0 e ADD1 do integrado e o oitavo bit define o tipo de acesso a ser efetuado (R/W “0” para escrita “1” para leitura). A figura 31 mostra a tabela de configuração dos bits e um diagrama esquemático do TMP100.

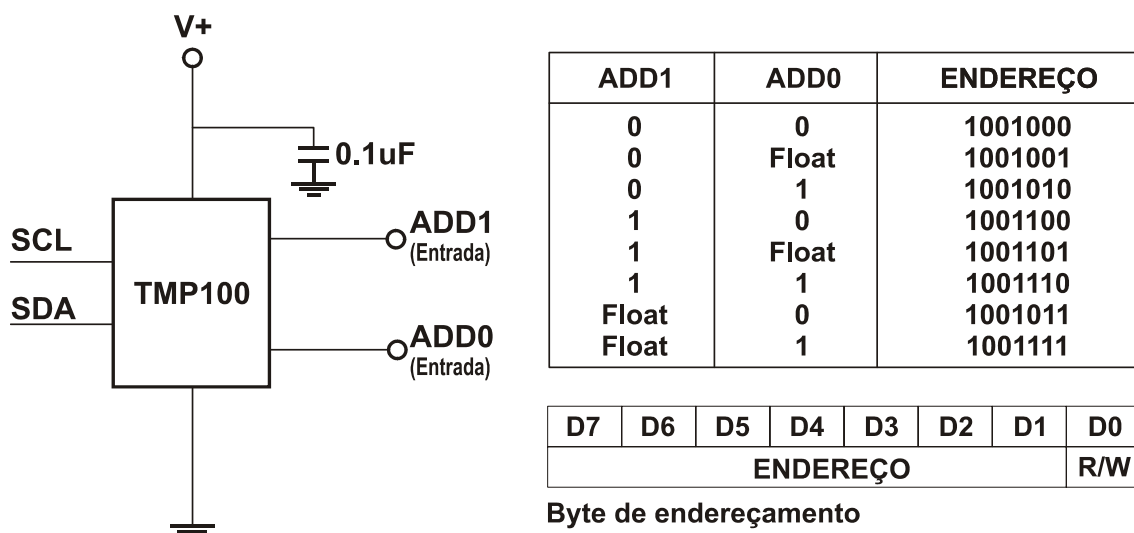


Figura 31 - Diagrama esquemático do TMP100 mostrando os endereços de configuração. Adaptado do Data Sheet do TMP100 (2003).

O TMP100 trabalha com uma estrutura de registradores que permite acessar suas funções, conforme mostrado na figura 32.

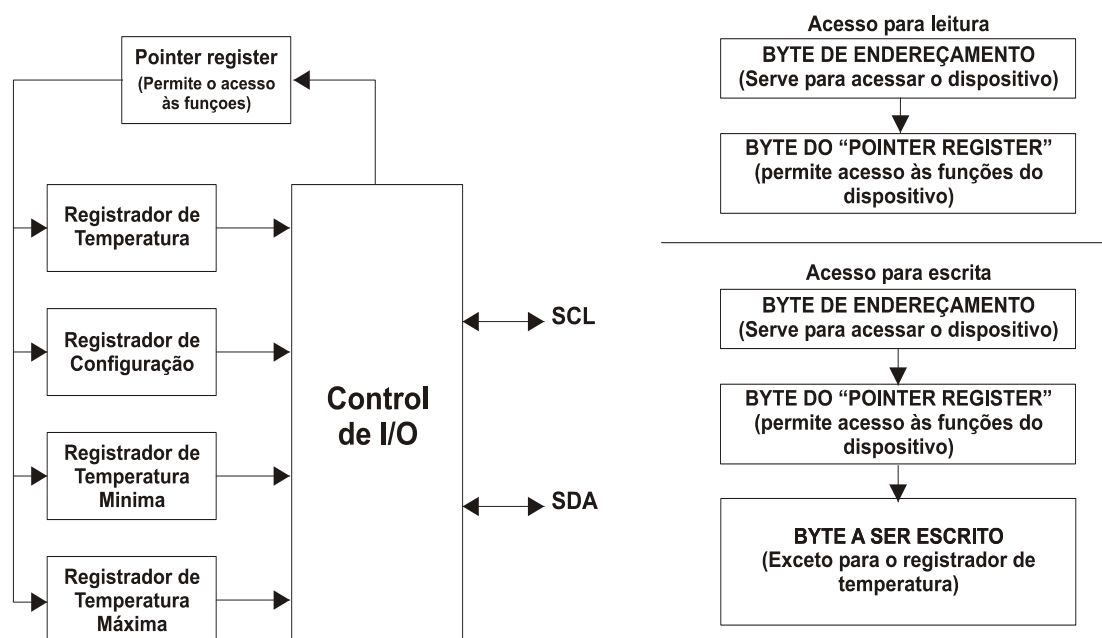


Figura 32 - Estrutura de registradores do TMP100. Adaptado do Data Sheet do TMP100 (2003).

O sensor TMP100 é automaticamente calibrado, durante a sua fabricação, nas diversas faixas de resolução de temperatura. Se nenhuma configuração for feita, o sensor TMP100 opera com a resolução padrão de 9 bits, mas pode ser programado para trabalhar com até 12 bits de precisão, sendo que, nesta configuração, a resolução da temperatura será de $0,0625^{\circ}\text{C}$. Para isto, é necessário apenas acessar o registrador de configuração e escrever o novo byte. O 6° e 7° bits de configuração correspondem à resolução do sensor e podem ser combinados, conforme mostrado na figura 33.

R1	R0	RESOLUÇÃO	TEMPO DE CONVERSÃO
0	0	9 Bits (0.5 °C)	40 ms
0	1	10 Bits (0.25°C)	80 ms
1	0	11 Bits (0.125°C)	160 ms
1	1	12 Bits (0.0625°C)	320 ms

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
OS/ALERT	R1	R0	F1	F0	POL	TM	SD

Byte de configuração

Figura 33 - Bits de configuração da resolução do sensor. Adaptado do Data Sheet do TMP100.

A leitura do sensor é feita através do registrador de temperatura no TMP100 que é um registrador de 12 bits de acesso exclusivamente para leitura. Para obter a última temperatura armazenada no registrador, devem ser lidos dois bytes. Os primeiros 12 bits correspondem à última conversão de temperatura armazenada no registrador.

3.1.5 Consumo de energia dos nós sensores

O consumo de energia característico do NOE transceptor pode ser considerado em três partes: o consumo do circuito amplificador de EEG, o consumo do processamento digital e o consumo do estágio transmissor.

O estágio do amplificador de EEG e o conversor ADC requerem energia para a polarização dos seus circuitos, assim como para efetuar o trabalho de amplificação e filtragem analógica. A dissipação de energia nestes estágios é relativamente constante enquanto estão em operação; qualquer melhoria destinada a incrementar a eficiência na utilização da energia depende, portanto, do aumento da integração e otimização do projeto do circuito.

No módulo NOE transceptor, circuitos de processamento digital foram usados para promover o processamento de sinais dos dados coletados e para a implementação dos protocolos de comunicação. A energia consumida pelos circuitos digitais se dá em forma de dissipação dinâmica e estática. O fluxo de corrente para terra (*leakage current*) eq.(10) causa a dissipação estática e foi descrita por (MIN et al.,2002).

$$I_l = (tVDD)I_0eVDD = nVth \quad (10)$$

onde:

Vth = Tensão limite dos transistores (*Thersold*);

VDD = Tensão de alimentação;

I₀, e, n = Constantes da tecnologia de processamento utilizada.

A energia dinâmica é a energia requerida para carregar capacitores dos circuitos integrados de zero volt até a tensão de alimentação e é descrita pela expressão (11).

$$D_{energy} = CV^2DD \quad (11)$$

onde:

C = capacitância do circuito

Somando as equações (10) e (11) resulta a expressão (12) que representa a energia necessária para o processo computacional que aciona uma capacitância total C.

$$E = (tVDD)I_0eVDD + nVth + CV^2DD \quad (12)$$

Os equipamentos desenvolvidos reduzem as perdas de energia através do gerenciamento da alimentação nos componentes que não precisam fazer trabalhos contínuos.

O consumo de energia do transceptor de rádio se dá em forma de dissipação estática nos componentes analógicos e a energia eletromagnética irradiada. A energia (W) necessária para um processo de comunicação, via rádio-freqüência, é descrita pela expressão (13) (SILVA et al., 2005).

$$W = W_{tx}(T_{trans} + T_{start}) + W_{outTon} \quad (13)$$

onde:

W_{tx} = potência da eletrônica do transmissor;

T_{trans} = tempo de transmissão;

T_{start} = tempo de início (tempo de acomodação do circuito);

W_{outTon} = energia irradiada.

Alguns equipamentos transceptores requerem um tempo inicial de alguns microssegundos para acomodação. O transmissor BIM2-433-160 possui um custo por bit transmitido razoável e precisa de um tempo de acomodação de 423 μ s.

3.1.6 Bateria

Como a bateria é um componente importante neste tipo de sistema, o seu consumo é uma das grandes preocupações. Foram realizados testes com baterias de 9V alcalinas não recarregáveis, para os NOE transceptores e baterias de 3V CR2032, para os NOE transmissores.

As figuras 34 e 35 mostram as curvas de descarga típicas das baterias de 9V e 3V, respectivamente.

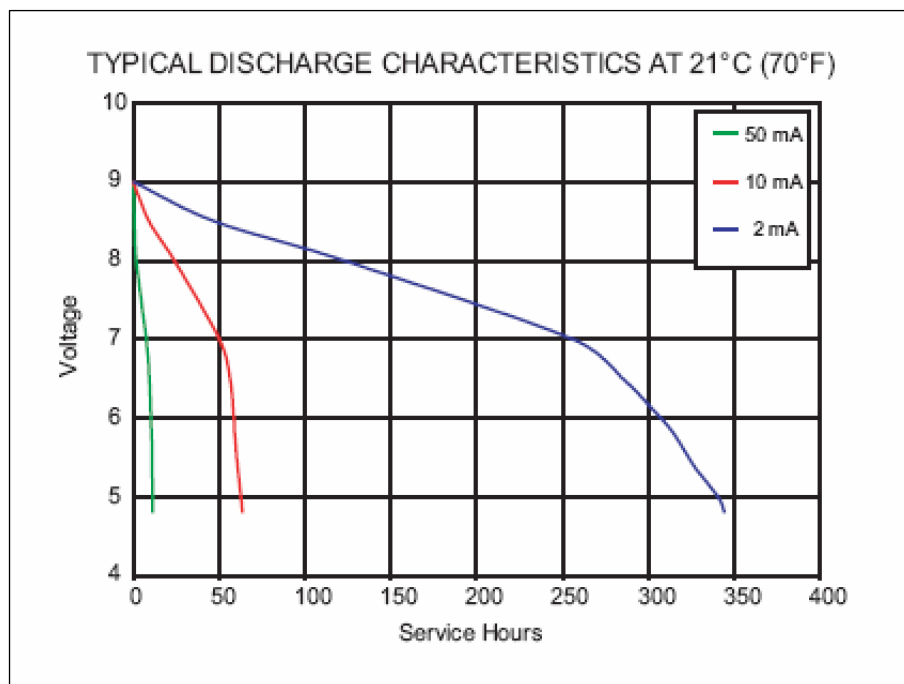


Figura 34 - Curva típica de descarga de uma bateria alcalina de 9V
 Fonte: www.duracell.be/oem/pdf/MN1604_US_CT.pdf

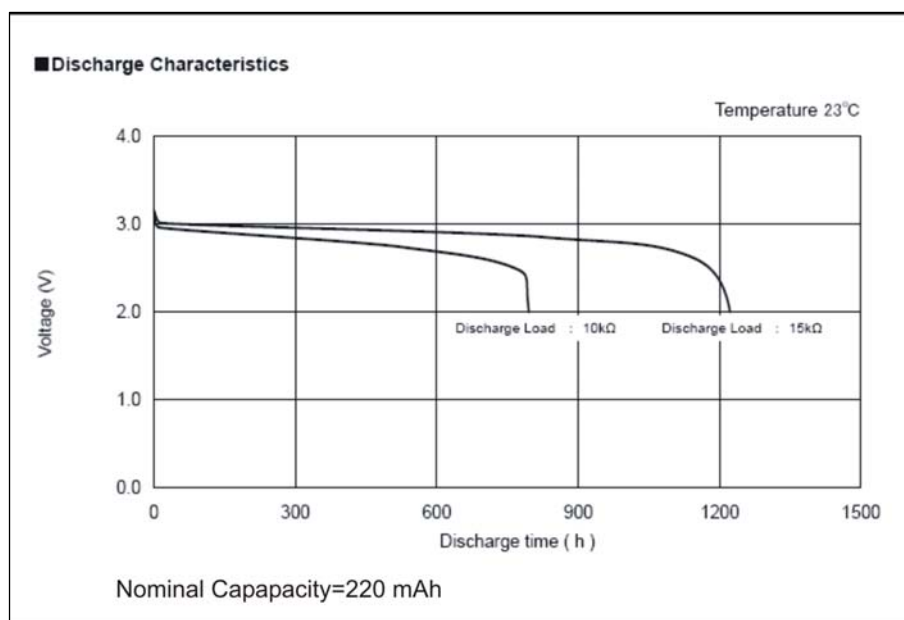


Figura 35 - Curva típica de descarga de uma bateria CR2032 de 3V
 Fonte: www.sony.net/Products/MicroBattery/cr/cr2032.pdf

No caso da bateria de 9V, pode-se estimar uma autonomia de 15 dias, para consumos próximos a 2mA.

Para as baterias de 3 V, pode-se estimar um tempo de vida de 7 dias para cargas próximas a $2K\Omega$.

3.1.7 Testes de autonomia e desempenho

Foram efetuados testes em laboratório com os protótipos mostrados e a análise de desempenho ficou restrita aos transceptores e transmissores dos NOE; o amplificador de EEG e o sensor de temperatura TMP100.

Para medir o consumo de energia dos NOE, a corrente da bateria foi medida através da queda de tensão em um resistor de $1,2 \Omega$ em série com o circuito utilizando um osciloscópio digital.

Foram transmitidos dados de, aproximadamente, 600ms com um tamanho de 16 bytes. O tempo de acomodação dos transmissores foi de $200\mu s$. O intervalo entre transmissões foi de 5s.

3.2 Software

3.2.1 Software embarcado

Os softwares para os NOE foram desenvolvidos utilizando o ambiente MPLAB da Microchip® e o compilador PICC da CCS® . As etapas que envolvem o desenvolvimento de uma aplicação neste ambiente são as mostradas na figura 36.

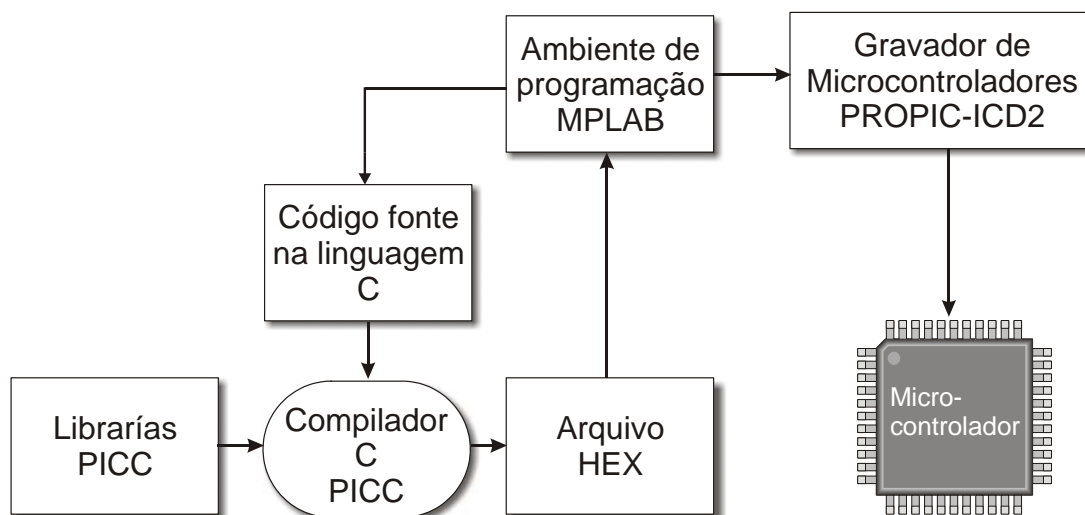


Figura 36 - Ambiente de desenvolvimento do software para os NOE.

A figura 37 mostra o algoritmo utilizado no NOE transmissor e a figura 38 mostra o algoritmo do NOE transceptor.

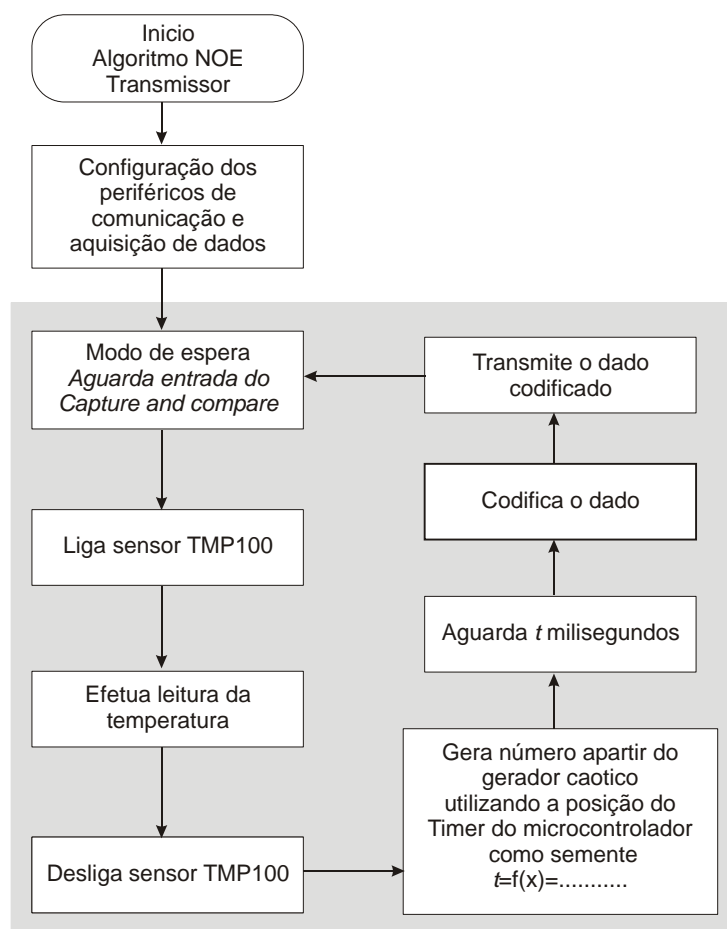


Figura 37 - Algoritmo do NOE transmissor

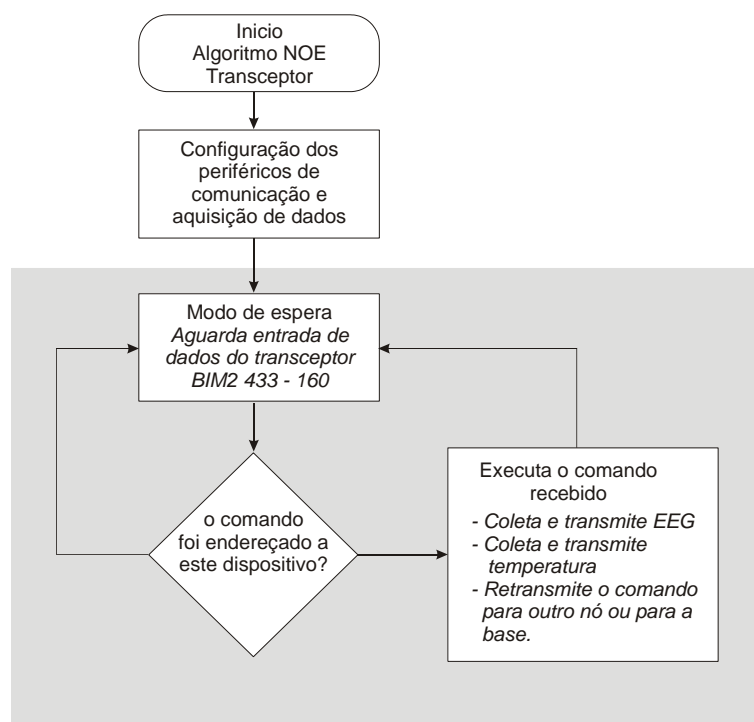


Figura 38 - Algoritmo do NOE transceptor

O software dos NOE é responsável por controlar a aquisição de dados dos sensores digitais e analógicos do nó e monitorar o funcionamento dos mesmos. Este software é capaz de determinar possíveis falhas do hardware dos nós e informar ao software supervisor da ocorrência de problemas.

Como o software embarcado tem um comportamento ativo, ele foi modelado como um sistema de multi-agentes, com três agentes com papéis distintos: o agente “sensor”, o agente “comunicador” e o agente “guardião” ou “*watchdog*”.

A figura 39 mostra a arquitetura do software embarcado desenvolvido que possui três camadas: camada de comunicação, camada de controle do sistema e a camada de controle dos sensores.

A camada de comunicação é responsável pela comunicação entre o software embarcado, o software supervisor e outros nós da rede. Esta camada gerencia os protocolos de comunicação e controla as funcionalidades do transceptor BIM2-433-160.

A camada de controle do sistema gerencia o funcionamento das outras camadas e do hardware.

A camada de controle dos sensores é responsável pela leitura de dados dos sensores digitais ligados ao barramento I2C e a conversão analógica digital das entradas ligadas a sensores analógicos. Esta camada também efetua as tarefas de gerenciamento do consumo de energia dos sensores e a multiplexação dos sinais, quando utilizada mais de uma entrada analógica.

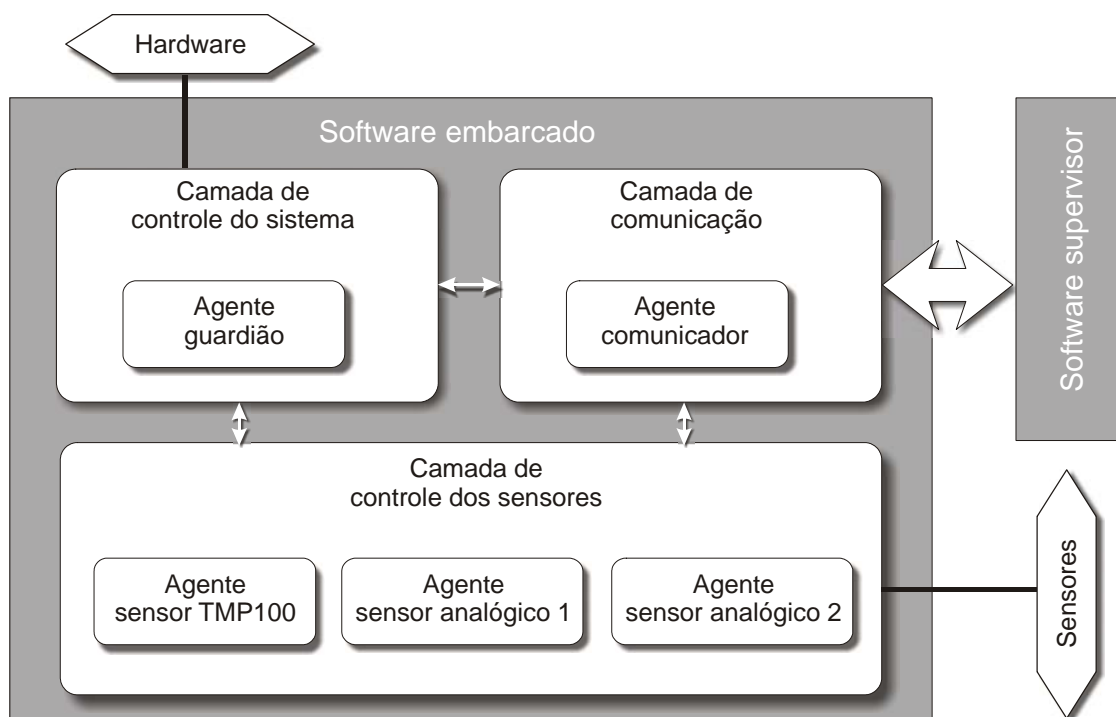


Figura 39 – Arquitetura do software embarcado

3.2.2 Software supervisor da rede

O software supervisor é a interface, através da qual o usuário pode gerenciar a rede e que permite efetuar requisições aos nós, receber respostas, armazenar os dados enviados pelos nós e efetuar inventário dos nós ativos da rede. O ambiente de execução deste software é um computador pessoal.

A fim de armazenar informações oriundas dos nós sensores (tais como dados de temperatura e EEG) o software supervisor utiliza uma base de dados Access®.

O software supervisor foi modelado como um sistema multi-agentes composto por três agentes: o agente “comunicador”, o agente “interpretador” e o agente “documentador”. Além destes agentes, o software possui módulos acessórios que fornecem serviços de alto nível para os agentes. A figura 40 mostra a arquitetura do software supervisor.

O software supervisor foi estruturado em quatro camadas: camada de comunicação, camada de visualização, camada de análise de dados e camada de persistência.

A camada de comunicação possibilita a comunicação entre o software supervisor e os softwares embarcados através da ERBF acoplada à porta USB do computador. A camada de visualização implementa a interface gráfica do sistema. A análise da coerência dos dados recebidos (enviados pelos nós sensores) é realizada pela camada de análise de dados e a camada de persistência é responsável pelo armazenamento dos dados recebidos.

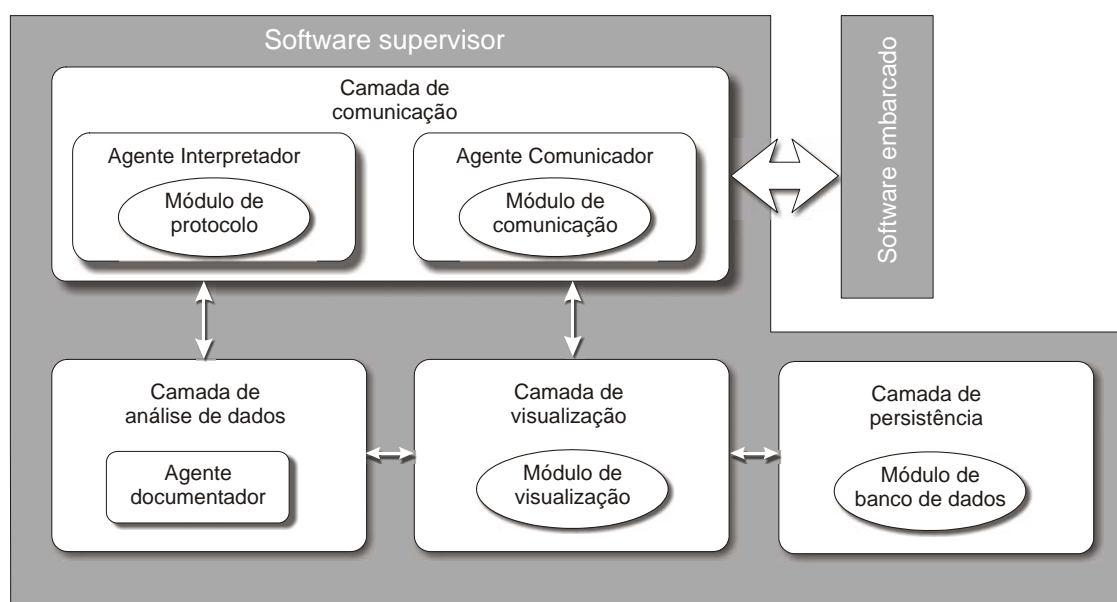


Figura 40 – Arquitetura do software supervisor

Para o agente interpretador foi desenvolvido um protocolo que padroniza os comandos enviados e respostas recebidas pelo software supervisor. Trata-se de um pacote composto por 16 bytes. A figura 41 mostra o protocolo de dados implementado.

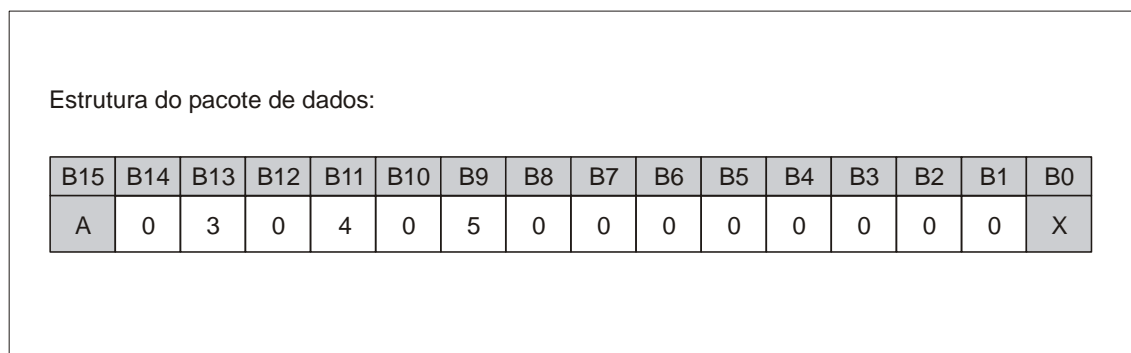


Figura 41 - Pacote de dados enviados e recebidos pelo software supervisor

onde:

Byte 15 – É sempre “A” e serve para identificar o início do pacote.

Byte 13 e 14 - Representam o código do dispositivo gerador do pacote.

Byte 11 e 12 - Código do dispositivo alvo ao que se destina o pacote.

Byte 9 e 10 - Código do comando a ser executado pelo dispositivo alvo. Os comandos utilizados são os seguintes:

- “00” - Requisita ACK. Este comando é usado para fazer um inventário dos dispositivos próximos. O dispositivo responde com o comando “09” e inclui a temperatura no pacote nos bytes 4 a 6 (msb – 0 a 256 ASCII) e 1 a 3 (lsb – 0 a 256 ASCII).
- “01” - Coleta EEG. O tempo, em minutos, deve ser incluído nos bytes 1 a 4 em representação ASCII. Exemplo: A03040100000010X coletará 10 minutos de EEG do dispositivo 04.
- “02” - Coleta EEG. O tempo, em segundos, deve ser incluído nos bytes 1 a 4 em representação ASCII. Exemplo: A03040200000010X coletará 10 segundos de EEG.
- “03” - Configura o dispositivo como ERBT, para fazer a ponte com outro. O código do dispositivo alvo deve ser incluído nos bytes 3 e 4 e o

comando para o nó alvo deve ser incluído nos bytes 1 e 2. Exemplo: No pacote “A00010300000205X”, o dispositivo “00” pede para o dispositivo “01” retransmitir o comando “05” (requisição de temperatura) para o dispositivo “02”.

- “05” - Coleta temperatura. O dispositivo responde com o comando “06” e inclui a temperatura no pacote nos bytes 4 a 6 (msb – 0 a 256 ASCII) e 1 a 3 (lsb – 0 a 256 ASCII).
- “06” - Identifica um pacote de resposta ao comando de temperatura.
- “08” – Requisição de inventário de nós próximos enviada ao dispositivo alvo.
- “09” - Identifica um pacote de resposta ao comando de requisição de ACK (inventario).
- “10” - Requisita ao nó-alvo que transmita o inventário de nós próximos.

Byte 1 a 8 – Bytes destinados a transportar os dados de temperatura, código do nó alvo e o caminho utilizado.

Byte 0 – É o byte de verificação de integridade do pacote. Este byte é igual ao último dígito da somatória dos bytes 1 ao 15.

O software foi desenvolvido no ambiente Visual Studio 7.0 na linguagem Visual Basic.

3.2.3 Simulador de deslocamento de rebanho bovino

Uma infra-estrutura de RSSF pode representar um investimento muito elevado, dado o atual custo desse tipo de tecnologia. Considerou-se necessário então o desenvolvimento de uma ferramenta que auxiliasse na otimização da estrutura física da rede, a fim de torná-la mais eficiente com o menor custo envolvido.

A ferramenta descrita nesta seção utiliza um modelo de deslocamento de rebanhos bovinos e implementa o protocolo FBSN em um simulador que permite dimensionar a quantidade de estações rádio-base fixas (ERBF), homoganeamente distribuídas na área experimental, necessárias para monitorar, de forma contínua, um rebanho de uma quantidade variável (N) de indivíduos.

O emprego de modelos computacionais na simulação de atividades animais é encontrado na literatura e reproduz de forma realística o comportamento animal.

O simulador desenvolvido implementa o modelo representado pela equação (14) para o comportamento do rebanho tanto em situação de pastagem, quanto em deslocamento.

$$d_{n-z} = \sqrt{((x_n - x_z)^2 + (y_n - y_z)^2)}; \quad (14)$$

$$d_{i_z} \leq d_{n-z} \geq d_{i_n}; d_{n-z} \leq ds_n \Leftrightarrow z \text{ é líder}$$

onde:

d_{n-z} = Distância euclidiana do animal n ao animal z;

d_{i_n}, d_{i_z} = Distâncias individuais;

ds_n = Distância social do animal n;

x_n, y_n = Coordenadas cartesianas do animal n;

x_z, y_z = Coordenadas cartesianas do animal z.

A distância individual (di) define o espaço individual que representa o espaço físico de que o animal precisa para realizar movimentos básicos, enquanto a distância social (ds) é a distância originada por uma força coesiva que tende a ajuntar os animais socialmente e está relacionada aos diferentes níveis de associação dos animais (casais, gêmeos, grupos filiais, etc).

Para simular o deslocamento do rebanho, o simulador foi implementado com dois tipos de modelos: o modelo *random walk* e o pseudo-browniano.

No modelo *random walk*, o deslocamento do bovino líder é descrito utilizando um processo estocástico simples de seleção de nós aleatórios, dentro de uma rede simétrica. Pode-se compreender rede simétrica como sendo uma base de referência por onde o “líder” se movimentará.

O algoritmo *random walk* segue as regras das equações (15) e (16).

$$x_n = x_{(n-1)} + d \times \sin(\theta); \quad (15)$$

$$y_n = y_{(n-1)} + d \times \cos(\theta); \quad (16)$$

onde:

(x_n, y_n) = Coordenadas cartesianas do próximo ponto.

θ = Ângulo gerado de forma randômica (0-360°).

d = Tamanho do passo definido na configuração dos parâmetros.

Durante seu deslocamento, o líder, ocasionalmente, se aproxima de alguns dos membros do rebanho, penetrando a área definida pela distância individual destes e conferindo-lhes um estímulo de fuga. Da mesma forma, ao se afastar além da distância social do rebanho, o líder estimula o restante do rebanho a segui-lo.

O modelo pseudo-browniano é uma adaptação do modelo proposto por Albert Einstein (1905) em que, no lugar do choque das moléculas contra um corpúsculo macroscópico, tem-se o estímulo proveniente do ambiente externo a um animal em forma de outros animais ou características da área de criação tais como: detalhes do relevo, obstáculos, áreas já pastadas, etc. O líder recebe um estímulo inicial, movimentando-se em uma direção aleatória. Sua trajetória é alterada, então, pelos obstáculos desenhados no

simulador e a interferência do restante do rebanho nas suas distâncias individual e social.

A figura 42 mostra o diagrama UML (*Unified Modelling Language*) das classes implementadas no simulador.

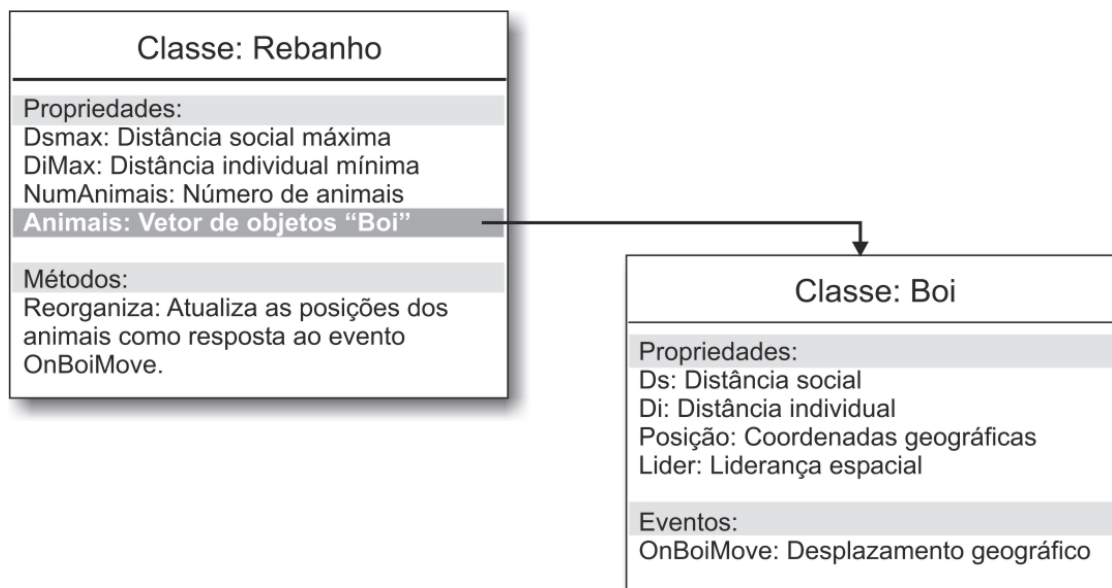


Figura 42 - Diagrama UML das classes do simulador de deslocamento.

O software desenvolvido inclui, também, uma simulação de uma RSSF implementada com o algoritmo FBSN. A associação destes dois simuladores compõe uma ferramenta muito útil para auxílio no planejamento da infraestrutura de ERBFs, já que através dela é possível prever os locais da área de criação mais freqüentados pelos animais e portanto a quantidade ótima de ERBFs necessária para o monitoramento destes. A figura 43 mostra um *screenshot* da tela do simulador, com o rebanho virtual em movimento.

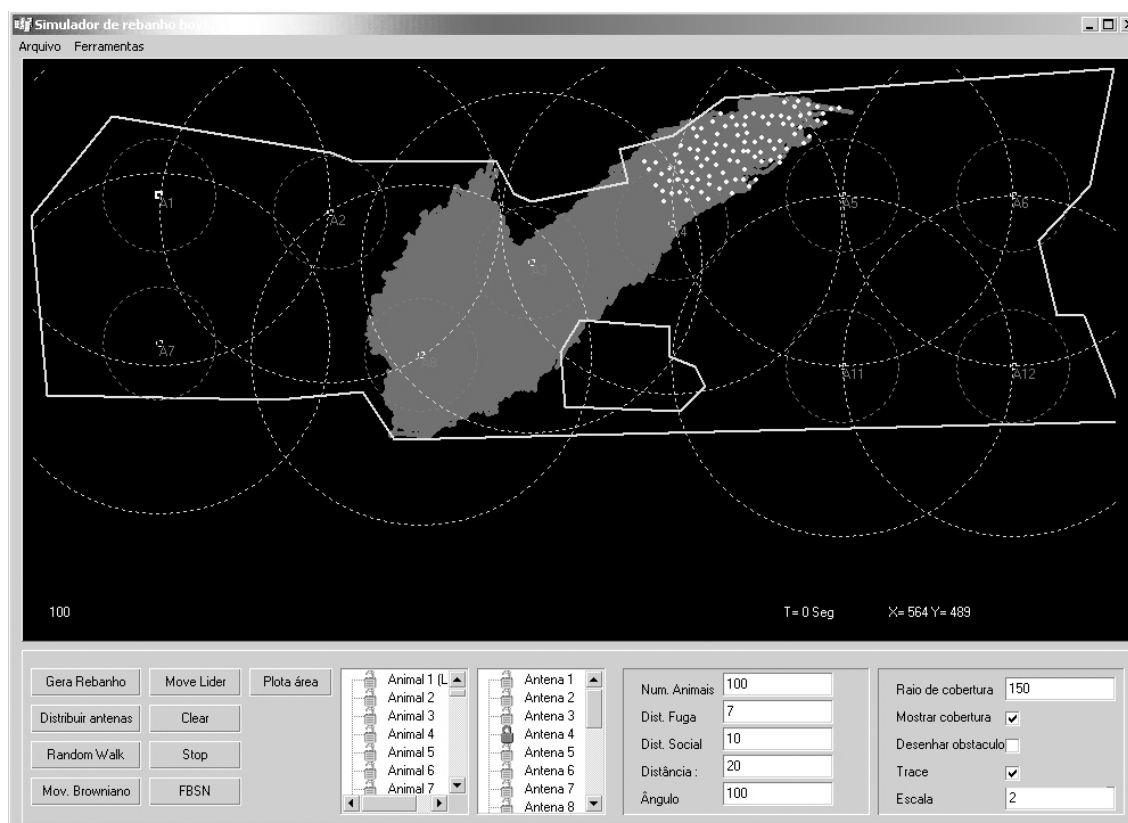


Figura 43 - Tela do simulador mostrando o rebanho virtual em movimento.

3.3 Experimentação animal

Foram realizados dois experimentos, no Campus da USP de Pirassununga, no Interior do Estado de São Paulo, de janeiro de 2006 a novembro de 2007. Foram utilizadas seis novilhas da raça Holandesa, com (528 ± 28) kg e, com aproximadamente 2,5 anos, em condições normais de saúde. O experimento foi realizado de acordo com a bioética do Campus de Pirassununga e todo o procedimento foi acompanhado pelo médico veterinário da prefeitura do Campus.

No primeiro experimento, os equipamentos foram embarcados nos animais, seguindo os métodos utilizados por Silva (2005). Com os animais contidos, utilizando um “tronco”, foram colados envelopes no dorso destes onde foram alocados os NOE.

Os eletrodos para coleta de sinais cerebrais foram implantados seguindo os procedimentos descritos por Silva (2005). A figura 44 mostra uma das novilhas carregando o equipamento no primeiro experimento.



Figura 44 - Imagem de uma novilha carregando o NOE.

Para o segundo experimento, foi desenvolvido um cabresto provido de um envelope onde os NOE foram acondicionados dentro de bolsas impermeáveis.

Os NOE transceptores foram programados para efetuar coletas de EEG a uma frequência de 120Hz e os NOE transmissores efetuaram coleta de temperatura no dorso dos animais, em intervalos de 1 minuto. A figura 45 mostra a imagem de um animal equipado com um NOE transceptor no segundo experimento.

Em ambos os experimentos, imediatamente após a implantação dos equipamentos, os animais foram soltos em um piquete experimental de 50x100m² e foram feitas coletas de trechos de EEG de duração de 1 minuto, em intervalos de 15 minutos (um animal por vez).



Figura 45 – Imagem do Cabresto desenvolvido para condicionamento do NOE transceptor.

4 Resultados e discussão

4.1 Estação rádio-base fixa (ERBF)

A figura 46 mostra o diagrama elétrico desenvolvido utilizando o transceptor BIM2-160-433 e a interface CP2102.

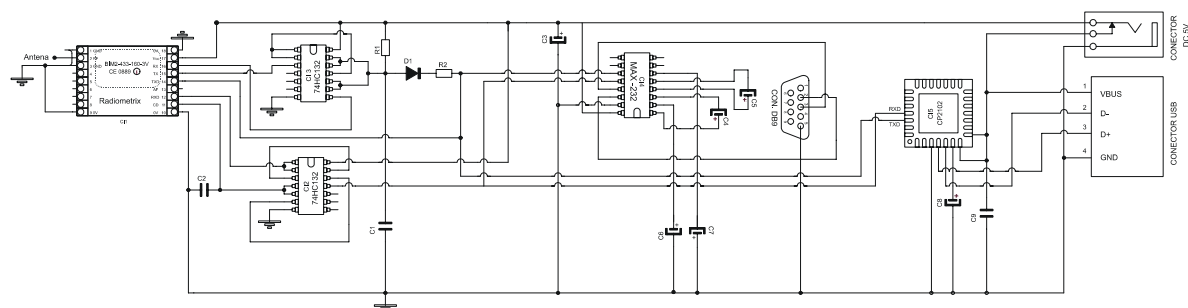


Figura 46 - Diagrama elétrico da estação rádio base fixa.

A figura 47 mostra uma foto da placa de circuito do módulo ERBF desenvolvido para funcionar acoplado a um microcomputador.

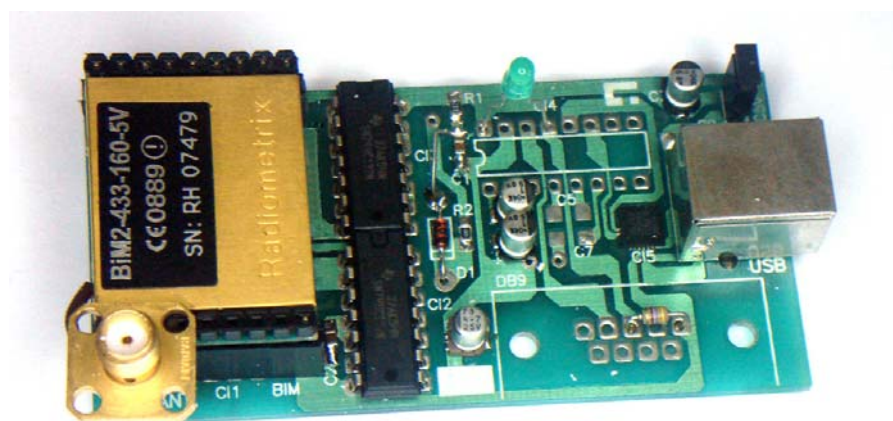


Figura 47 - Imagem da placa de circuito impresso da estação rádio-base fixa.

4.2 Operação dos NOE transmissores

A figura 48 mostra o diagrama elétrico desenvolvido e a figura 49 mostra uma imagem do protótipo produzido.

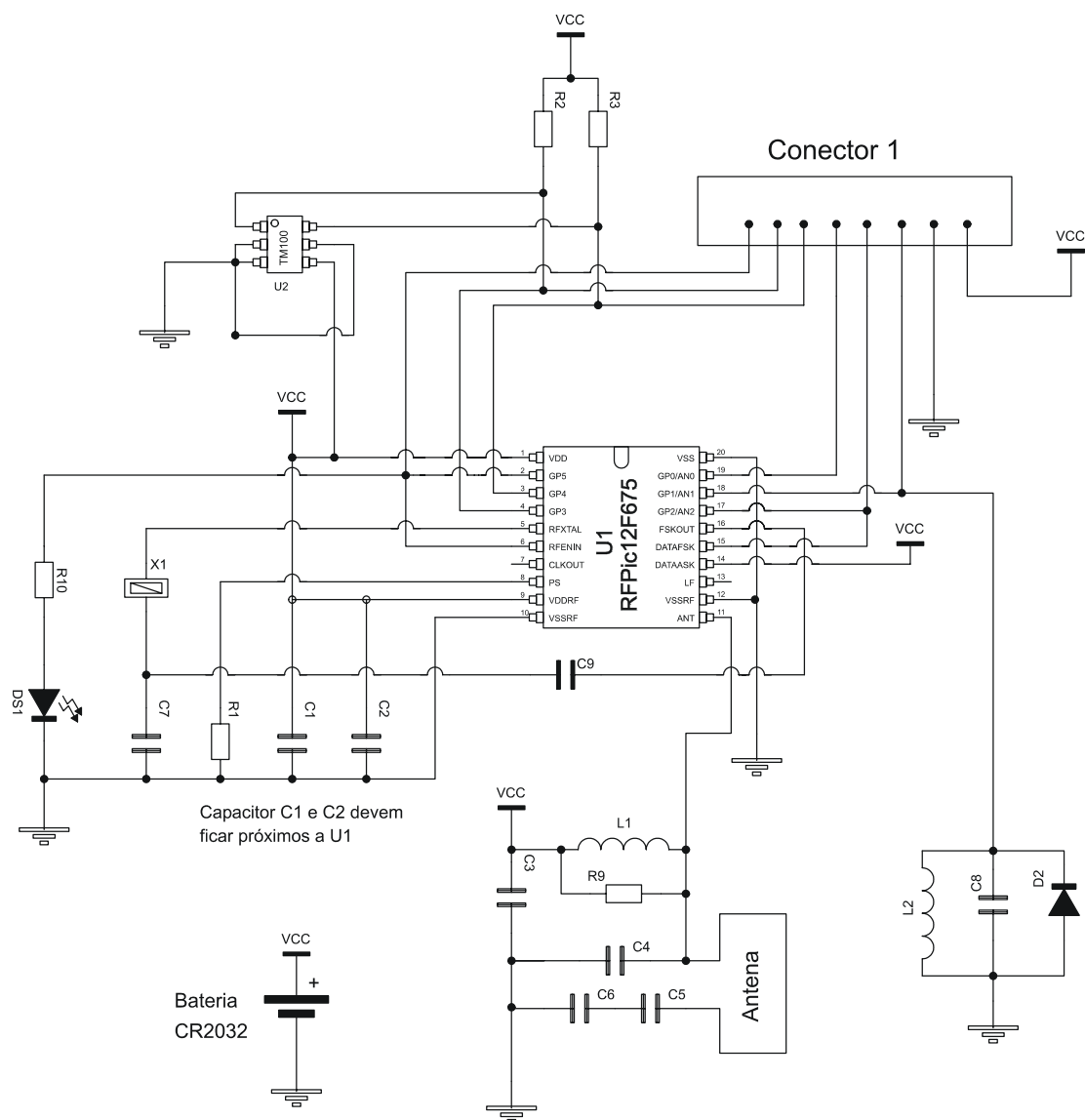


Figura 48 - Diagrama elétrico do NOE transmissor.

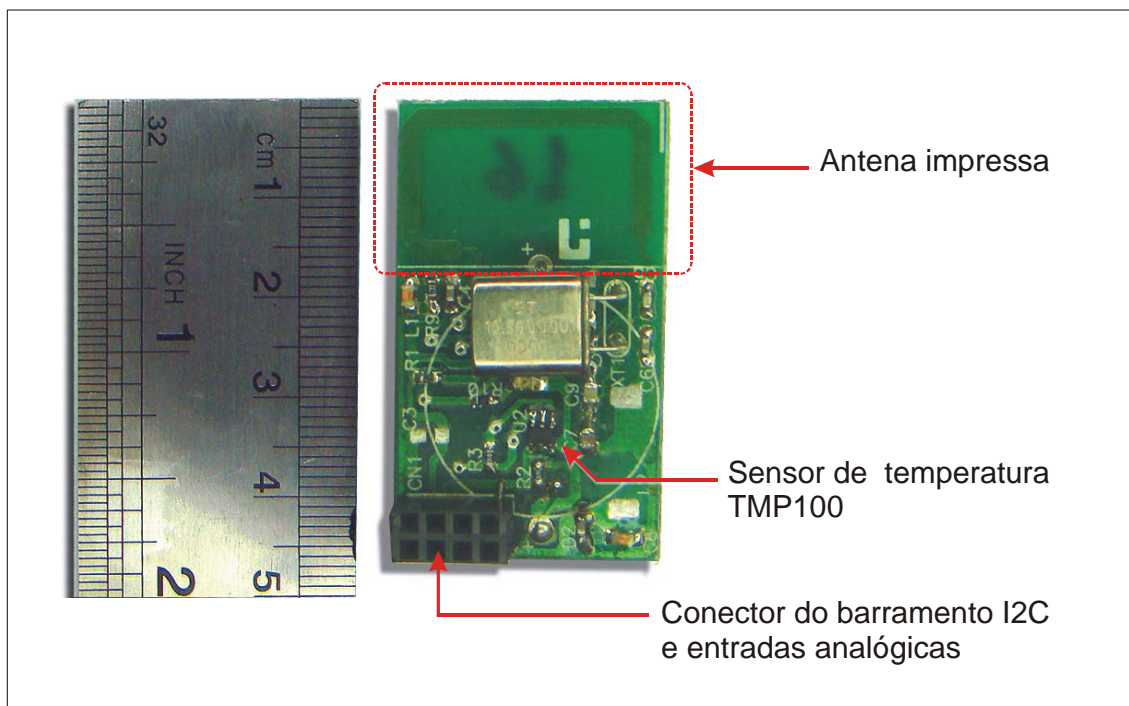


Figura 49 - Imagem da placa de circuito impresso do NOE transmissor.

A figura 50 mostra o diagrama de irradiação da antena do nó transmissor na forma polar.

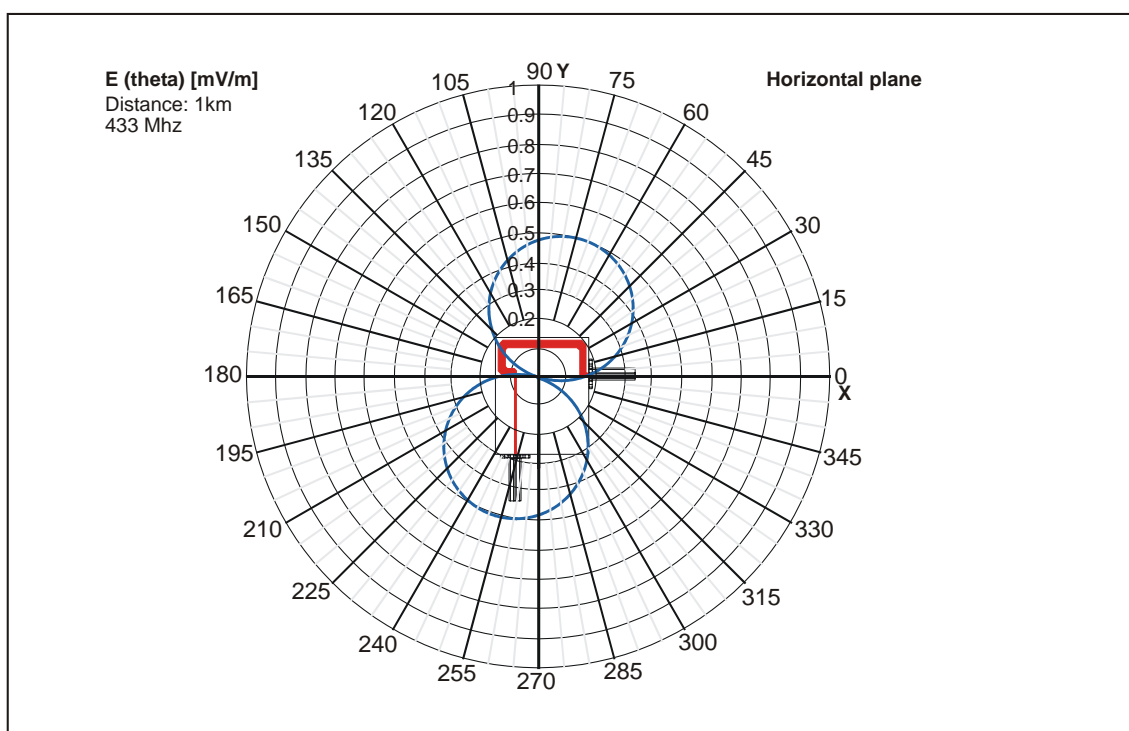


Figura 50 – Diagrama de irradiação da antena dos NOE transmissores.

O funcionamento básico destes nós, foi descrito na figura 37. A transmissão neste equipamento é unilateral e foi programada para ser feita em intervalos de 5 segundos.

Em um teste com um único NOE transmissor, não foram detectadas falhas de comunicação, para distâncias inferiores a 20m, mas estas falhas devem ser previstas em operações normais.

Durante os testes, foram observados problemas de colisão de dados. Isto se dá pelo fato de que todos os nós recebem a requisição praticamente ao mesmo tempo. Para resolver este problema, foi implementado um algoritmo TDMA (*Time Division Multiple Access*) nestes nós que permite que o tempo de envio da informação de cada nó ocorra em intervalos de tempo diferentes, após o recebimento da requisição. Testes preliminares foram feitos usando um gerador caótico no software do nó que gerencia o tempo de disparo, após o recebimento da requisição da estação-base, fazendo que o tempo de disparo de cada nó ocorra em intervalos de tempo diferentes, reduzindo, desta forma, a colisão de dados no sistema.

A situação de colisão foi analisada com o intervalo de transmissão do protótipo. Este intervalo é de 600 ms relativos a 2 bytes de dados. A probabilidade de colisão ($P_{colisão}$) entre dois transmissores pode ser calculada pela equação 17.

$$P_{colisão} = \frac{600ms}{5,6s} = 0,107 \quad (17)$$

A figura 51 mostra a queda de tensão no resistor de $1,2\Omega$ relativa à corrente consumida pelo circuito. A corrente média foi calculada através das equações 18 e 19.

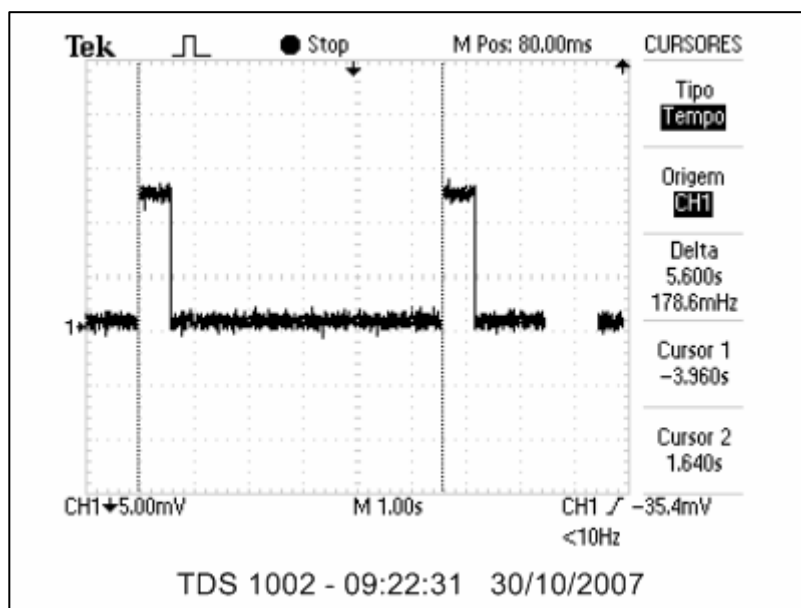


Figura 51 - Tensão sobre resistor relativa ao consumo de corrente do NOE transmissor

$$V_m = \frac{\sum v_i \cdot t_i}{t} = \frac{250 \times 10^{-6} \times 5 + 13,2 \times 10^{-3} \times 600 \times 10^{-3}}{5,600} = 1,637mV \quad (18)$$

$$I_m = \frac{1,637}{1,2\Omega} = 1,364mA \quad (19)$$

Com a corrente calculada de $1,364mA$, pode-se estimar que o tempo de uso, em funcionamento contínuo, da bateria será de aproximadamente 7 dias conforme eq.(20).

$$Autonomia = \frac{220mA \cdot h}{1.364mA} = 161h = 6,7dias \quad (20)$$

Este tempo pode ser aumentado utilizando baterias de 9V alcalinas. Nossa opção pelas baterias CR2032 foi em função do tamanho final do equipamento.

A Figura 52 mostra o gráfico das temperaturas de ambiente coletadas por 8 NOE transmissores.

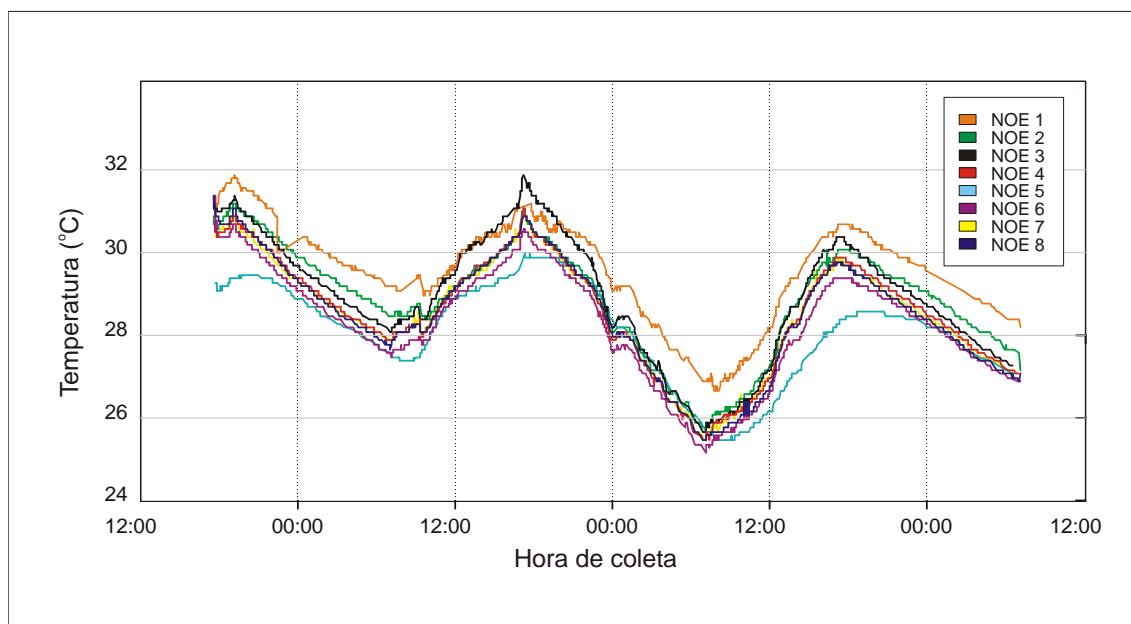


Figura 52 - Gráfico de temperaturas coletadas através dos NOE transmissores.

4.3 Operação dos NOE transceptores

Os NOE Transceptores, diferentemente dos transmissores, recebem comandos do software de supervisão através das ERBF. Cada NOE tem seu endereço na rede e pode ser ligado e colocado em modo de espera pelo software supervisor.

A figura 53 mostra uma imagem do protótipo de NOE transceptor desenvolvido.

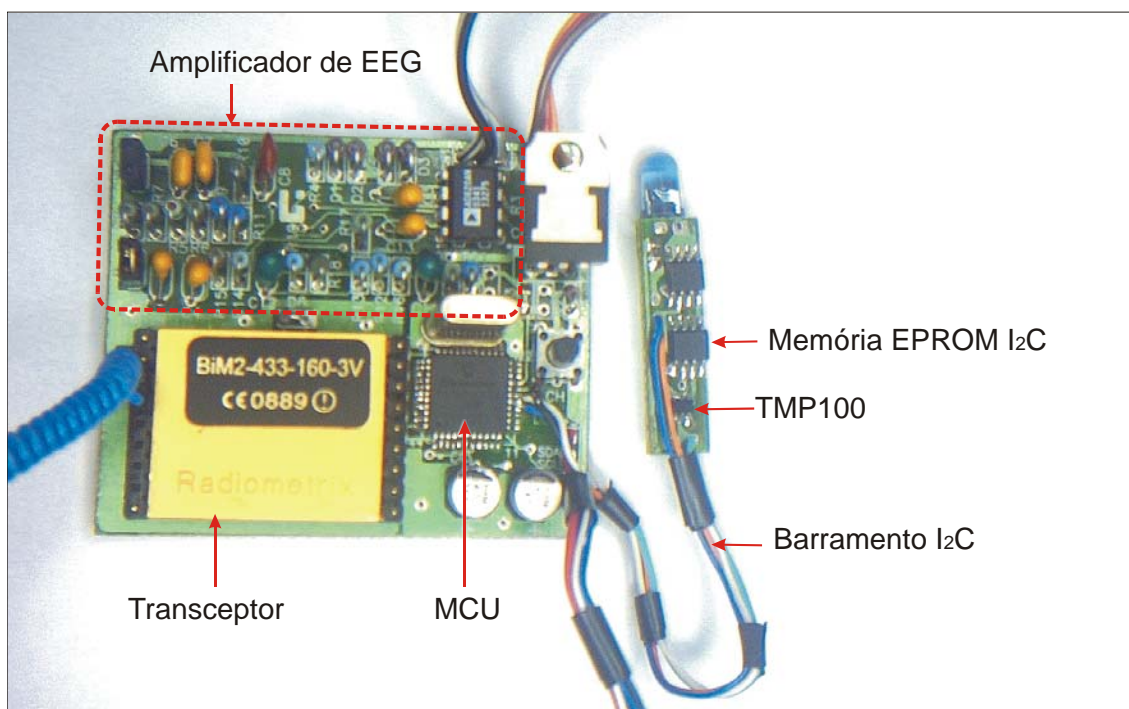


Figura 53 - Imagem do protótipo do NOE transceptor.

Basicamente, a comunicação com os NOE transceptores opera segundo o algoritmo mostrado na figura 38 e para um comando de requisição de temperatura funciona da seguinte maneira:

- Inicialmente todos os NOEs estão em modo de escuta (aguardando receber comandos);
- O software supervisor envia um comando requisição de dados através da ERBF endereçado para o nó N;
- Todos os NOEs recebem o comando, mas somente o nó N reconhece;
- O NOE ativa o sensor de temperatura TMP100 e lê a temperatura e a transmite para a ERBF;
- O NOE coloca o sensor de temperatura em modo de espera;
- A ERBF recebe a resposta;
- O ciclo se repete para todos os nós.

A principal desvantagem destes módulos é o excessivo consumo de energia dos transceptores. O principal motivo deste elevado consumo é que, na maior parte do tempo, os NOE estão em modo de escuta, ou seja, com seu módulo de RF ligado, gerando um consumo de 21mA (BIM2-433-160..., 2003). Com esse consumo, a duração das baterias de 9V pode ser estimado em apenas 2 dias. Para diminuir o consumo de energia, pode ser implementado um algoritmo de sincronização que permita aos NOE ficarem no modo de escuta por períodos menores.

Este modo de transmissão exige que os endereços dos NOE estejam cadastrados para que possam ser requisitados pelo sistema, isto torna o sistema mais confiável e tolerante a falhas, tais como respostas indevidas de dispositivos não cadastrados.

Durante a experimentação animal, a comunicação entre os NOE transceptores ficou limitada a uma distância de aproximadamente 30m, em consequência da altura com relação ao terreno em que foram instalados os equipamentos (aproximadamente 1,5m).

O consumo do equipamento, durante a transmissão de EEG, foi medido seguindo os mesmos procedimentos utilizados para os NOE transmissores e é de aproximadamente 65mA.

4.3.1 Ensaio do amplificador de EEG

As figuras 54 e 55 mostram os gráficos da senóide de 3,90Hz, amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC), respectivamente.

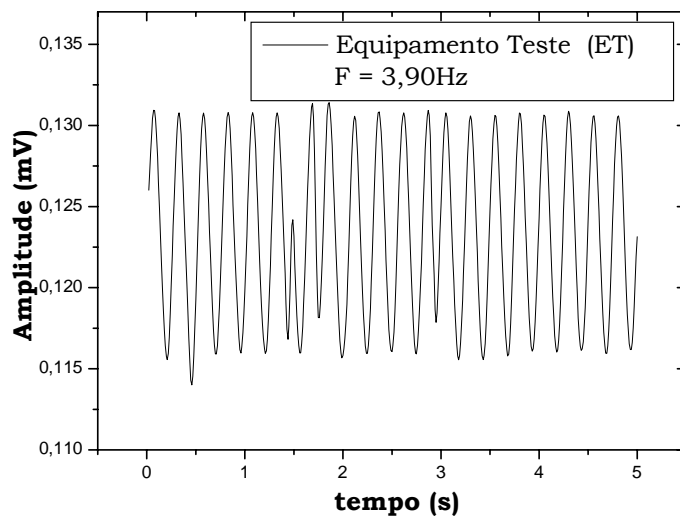


Figura 54 - Senóide de 3,90Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento teste (ET).

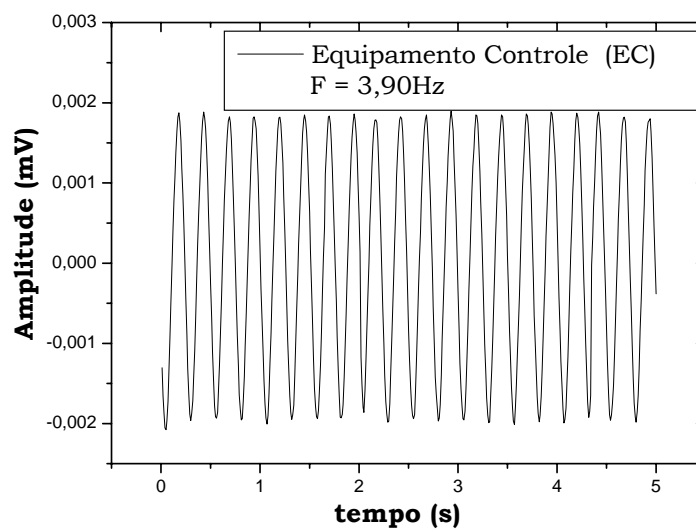


Figura 55 - Senóide de 3,90Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento controle (EC).

A razão sinal-erro para a senóide de 3,90Hz foi de 39,35 db.

A figura 56 mostra o gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senóide de 3,90Hz (figuras 54 e 55) amostrada pelo equipamento teste e pelo equipamento controle.

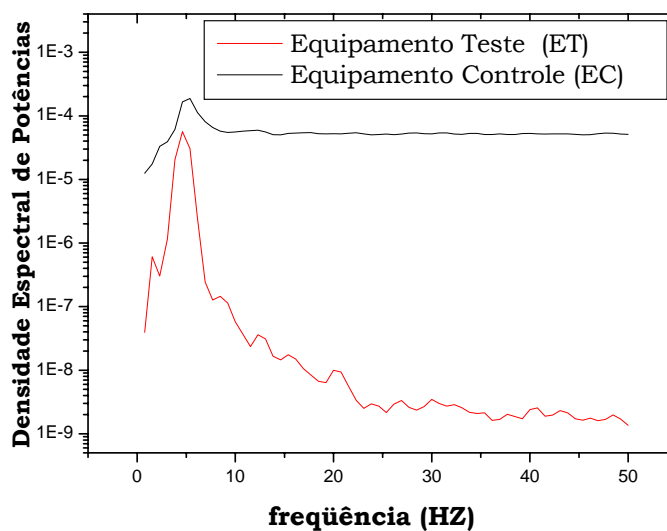


Figura 56 - Gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senóide de 3,90Hz amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC).

As figuras 57 e 58 mostram os gráficos da senóide de 30,20Hz, amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC), respectivamente.

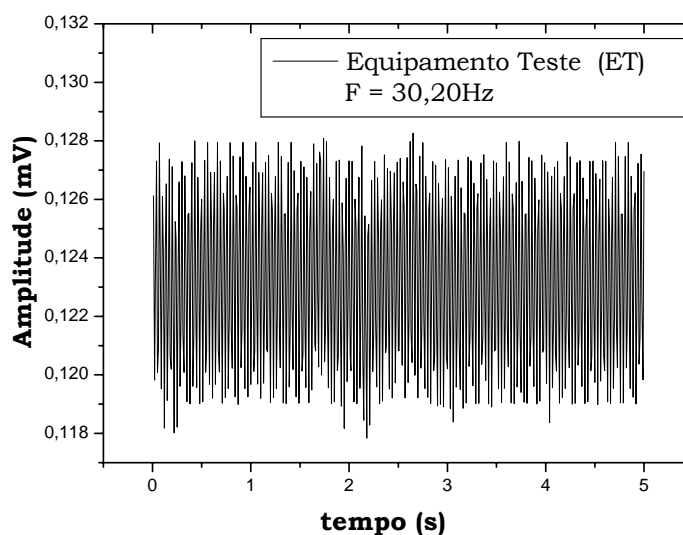


Figura 57 - Senóide de 30,20Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento teste (ET).

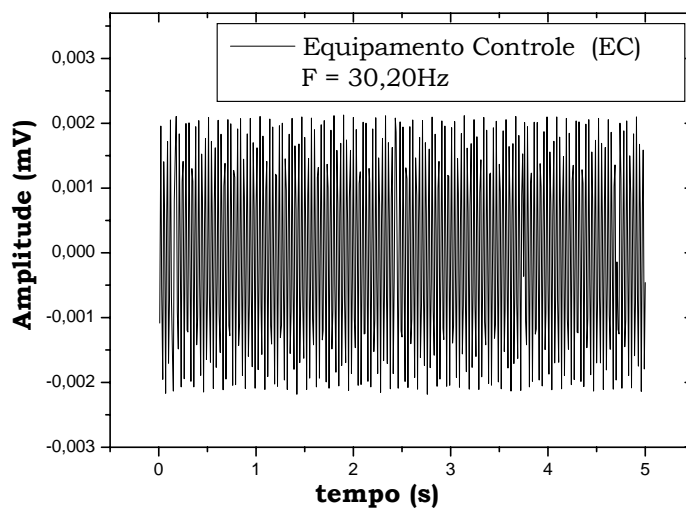


Figura 58 - Senóide de 30,20Hz, amostrada a 100Hz, pelo equipamento controle (EC).

A razão sinal-erro para a senoide de 30,20Hz foi de 38,36 db.

A figura 59 mostra o gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senoide de 30,20Hz (figuras 57 e 58) amostrada pelo equipamento teste e pelo equipamento controle.

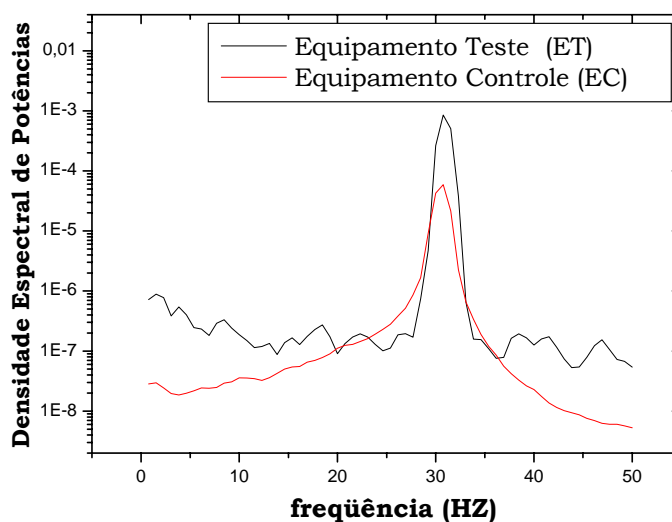


Figura 59 - Gráfico comparativo da densidade espectral de potências para a senoide de 30,20Hz amostrada pelo equipamento teste (ET) e pelo equipamento controle (EC).

As figuras 60 e 61 mostram a curva de ganho e o efeito dos filtros implementados no estágio de acondicionamento de sinais do NOE transceptor.

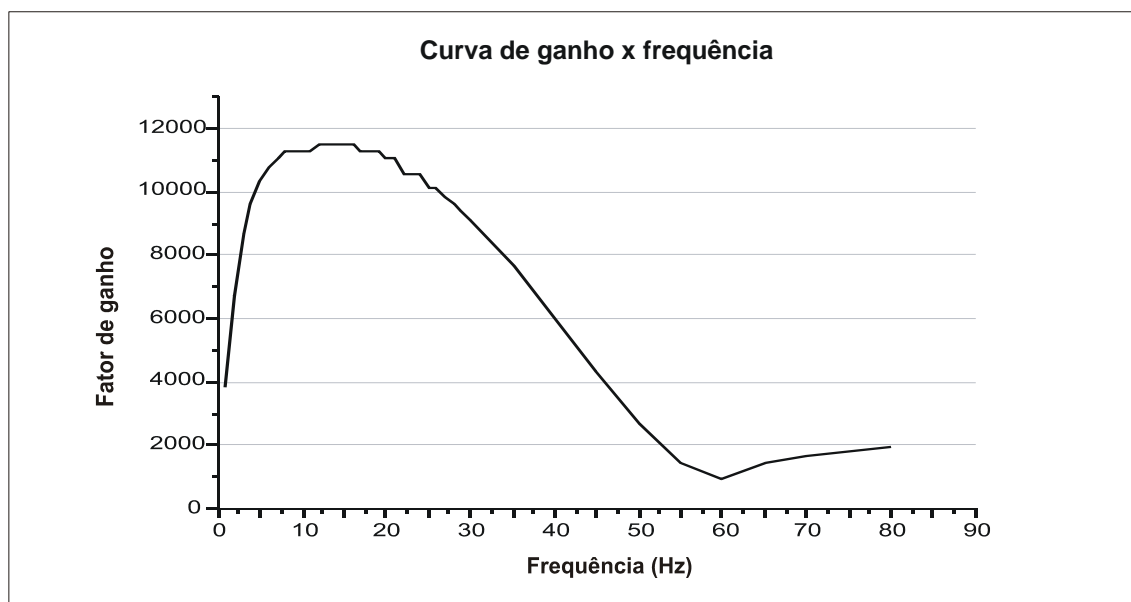


Figura 60 - Curva de ganho do amplificador de EEG.

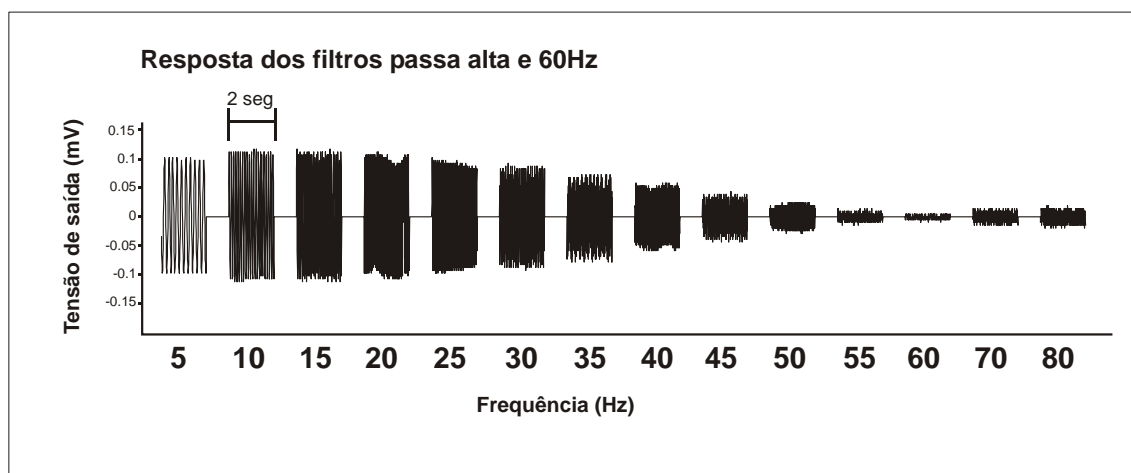


Figura 61 - Efeito dos filtros sobre sinais senoidais em várias frequências.

5 Conclusões

Os resultados deste trabalho devem ser interpretados levando-se em conta a minimização de uma função cujos parâmetros são: o consumo de energia, custo, tamanho dos nós embarcados e a tolerância dos animais aos equipamentos.

Dentro deste foco, face à hipótese apresentada, pode-se concluir que:

- Os protótipos desenvolvidos apresentaram pouca autonomia devido ao tipo de componentes utilizados e à complexidade dos circuitos sensores de EEG.
- Foi verificado, nos experimentos com animais, que estes toleraram bem a presença dos equipamentos, principalmente após o desenvolvimento do cabresto e pode-se observar que não modificaram seus hábitos normais de alimentação e ruminação durante o experimento.
- Na experimentação a campo, foi possível observar que o alcance dos NOE transceptores é de aproximadamente 50m e os transmissores de até 20m. Todos os testes de desempenho em laboratório foram realizados em ambientes fechados com uma distância máxima de 10m entre os nós. A influência de obstáculos na atenuação dos sinais dos nós não foi testada.
- O custo da matéria-prima utilizada na fabricação dos protótipos de NOE transceptores foi de aproximadamente R\$ 300,00, enquanto os NOE transmissores custaram apenas R\$ 25,00. Considerando que estes custos são estimados para os protótipos, pode-se esperar uma grande redução desses em uma produção em série.

A partir de testes em laboratório, foi possível acompanhar o funcionamento do algoritmo de busca FBSN até alcançar o nó-alvo na RSSF. Considerando a topologia altamente dinâmica da rede, devido à mobilidade dos nós, este algoritmo que utiliza busca aleatória demonstrou ser muito eficiente e tolerante a falhas, já que ele cria um caminho diferente até o nó-alvo toda vez que é feita uma requisição.

O resultado dos experimentos mostra que as redes de sensores sem fio são soluções eficientes, aplicáveis à zootecnia de precisão e podem ser usadas para o monitoramento de sinais fisiológicos de bovinos, o que permite aceitar a hipótese apresentada.

Como propostas de trabalho futuro, poderiam ser desenvolvidos equipamentos, utilizando-se tecnologias que surgiram posteriores ao início deste trabalho, tais como ZigBee e NanoWatt, no desenvolvimento de nós sensores, com a possibilidade de reduzir muito o consumo de energia do sistema e acrescentar-se, inclusive, o monitoramento da posição geográfica de cada nó ao sistema. Essa técnica poderia ser utilizada também para monitorar e controlar variáveis do ambiente de criação e para coletar dados fisiológicos de outros animais, desde que adequações sejam feitas levando-se em conta as características de cada espécie.

Referências

AGUIAR, D.R.D.; SILVA, A.L. Changes in beef consumption and retailing competitiveness in Brazil: a rapid appraisal. **Agribusiness**, New Jersey, v.18, n.2, p.145-161, 2002.

AD620 Data Sheet. Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier Datasheet. Analog Devices (1993). Disponível em: <http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD620.pdf>. Acesso em: 21 maio 2004.

ASADA, G. et al. Wireless Integrated Network Sensors (WINS). In: SPIE-THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 1999, USA. **Proceedings...** USA:SPIE, 1999. p.11-18.

BARCELLOS, M.D.; FERREIRA A.G.C. Análise de marcas em carne bovina. **Agroanalysis**, São Paulo, v.23, n.4, p.27-30, 2003.

BANDEIRA FILHO, J.J. **Sistema de interconexão de equipamentos eletro/eletrônicos para zootecnia de precisão**. 2003. 92 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BIM2-433-160 Data Sheet. 433MHz high speed FM radio transceiver module. Radiometrix Co. (2003). Disponível em: <<http://www.radiometrix.co.uk/dsheets/bim2.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2005.

BISHOP-HURLEY, G.J. et al. Virtual fencing applications: implementing and testing an automated cattle control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.56, p.14-22, 2007.

BRAGINSKY, D.; ESTRIN, D. Rumor routing algorithm for sensor networks. In: FIRST ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS SENSOR NETWORKS AND APPLICATIONS (WSNA), 2002, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: ACM, 2002, p.22-31.

BROCKWAY, B.P.; HASSLER, C.R. Application of radiotelemetry to cardiovascular measurements in pharmacology and toxicology. In: SALEM, H.; BASKEN, S.I. (Ed.). **New technologies and concepts for reducing drug toxicities**. Boca Raton: CRC Press, c1993. p.109-132.

BROWN-BRANDL, T.M. et al. Thermoregulatory responses of feeder cattle. **Journal of Thermal Biology**, Oxford, v.28, n.2., p.149-157, 2003.

CARVALHO, F.A. et al. Breed affects thermoregulation and epithelial morphology in imported and native cattle subjected to heat stress. **Journal of Animal Science**, Savoy, v.73, n.12, p.3570-3573, 1995.

CP2102 Data Sheet. Single-Chip USB to UART Bridge. Silicon Laboratories. (2004). Disponível em:
<http://www.silabs.com/public/documents/tpub_doc/dsheet/Microcontrollers/Interface/en/CP2102.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2005.

EREN, H. **Wireless sensors and instruments**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

GACSALYI, U.; ZABIELSKI, R.; PIERZYNOWSKI, S.G. Telemetry facilitates long-term recording of gastrointestinal myoelectrical activity in pigs. **Experimental Physiology**, New York, v.85, n.2, p.239-241, 2000.

HAHN, G.L. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. **Journal of Animal Science**, Savoy, v.77, n.2, p.10-20, 1999.

HEINZELMAN, W.R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: 33RD HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES (HICSS '00), 2000, Hawaii. **Proceedings...** Hawaii: IEEE, 2000, v.8, p. 8020.

INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: ACM/IEEE MOBICOM, 2000, Boston. Proceedings... New York: ACM, 2000, p. 56-67.

KETTLEWELL, P.J.; MITCHELL, M.A.; MEEKS, I.R. An implantable radiotelemetry system for remote monitoring of heart rate and deep body

temperature in poultry. **Computers and Electronics In agriculture**, v.17, p. 161-175, 1997.

LEFCOURT, A.M.; ADAMS, W.R. Radiotelemetry measurement of body temperatures of feedlot steers during summer. **Journal of Animal Science**, Savoy, v.74, n.11, p.2633-2640, 1996.

LM358 Data Sheet. Dual Operational Amplifiers SLOS068P. Texas Instruments (2004). Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2006.

MADER, T.L. et al. Feeding strategies for managing heat load in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, Savoy, v.80, n.9, p.2373-2382, 2002.

MAXIM. Fundamentals of RS-232 Serial Communications Application Note, 2001. Disponível em: <<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN83.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2004.

MIN, R. et al. Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks. **IEEE Wireless Communications**. USA, v.9, n.4, p. 28-37, 2002.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. Report of the National Science Foundation Workshop on Fundamental Research in Networking (2004). Disponível em: <<http://www.cs.virginia.edu/~jorg/workshop1>>. Acesso em: 12 fev. 2007.

NORTHROP, R.B. **Instrumentation and Measurements**. 2th. ed. USA: Taylor & Francis Group, 2005.

PERILLO, M.; HEINZELMAN, W. Providing Application QoS Through Intelligent Sensor Management. In: 1ST IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON SENSOR NETWORK PROTOCOLS AND APPLICATIONS, 2003, Alaska. **Proceedings...** New Jersey:IEEE, 2003, p.93-101.

PERILLO, M.; HEINZELMAN, W. Optimal sensor management under energy and reliability constraints. In: IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (WCNC '03), 2003, New Orleans. **Proceedings...** New Jersey: IEEE, 2003, v.3, p.1621-1626.

PIC16F87X Data Sheet. PIC16F87X 28/40-pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers. Microchip (1999). Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2004.

PHILIPS SEMICONDUCTORS. The I2C-bus specification version 2.1, 2000. Disponível em: <http://www.semiconductors.philips.com/acrobat_download/literature/9398/39340011.pdf>. Acesso em 3 fev. 2006.

RFPIC12F675F Datasheet. 20-Pin FLASH-Based 8-Bit CMOS Microcontroller with UHF ASK/FSK Transmitter. Microchip (2003). Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70091a.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2005.

RUIZ,L.B.; NOGUEIRA, J.M.S.; LOUREIRO, A.A.F. MANNA: A management architecture for wireless sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, Dallas, v.41(2), p.116-125, 2003.

SILVA, A.C.S. **Aplicação de técnicas de processamento digital de sinais na caracterização de sinais cerebrais de bovinos**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2005.

SILVA, A.C.S.; ARCE, A. I. C.; SOUTO, S. A.; COSTA, E.J.X. A wireless floating base sensor network for physiological response to livestock. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.49, n.2, p.246-254, 2005.

TMP100 Data Sheet. Digital Temperature Sensor with I2C Interface. Texas Instruments. (2003). Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tmp100.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2004.

VAUGHAN, R. et al. Robot sheepdog project achieves automatic ock control. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION OF ADAPTIVE BEHAVIOR ON FROM ANIMALS TO ANIMATS , 1998, Zurich. **Proceedings...** Cambridge: MIT Press, 1998, p. 489-493.

YASSU, F. Brasil assume liderança mundial. **DBO Rural**, São Paulo, v. 280, p.30, 2004.