

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

**TÉCNICAS DE TAXA DE TRANSMISSÃO ADAPTATIVA
PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

**Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de
MESTRE EM METROLOGIA**

ALEXANDRE MARCONDES

Florianópolis, fevereiro de 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL**

**TÉCNICAS DE TAXA DE TRANSMISSÃO ADAPTATIVA
PARA REDES DE SENSORES SEM FIO**

ALEXANDRE MARCONDES

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM METROLOGIA
sendo aprovada em sua forma final.**

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.
Presidente

Eng. Daniel Távora de Queiroz Cobra, Ph. D.
Membro

Prof. Sérgio Luciano Avila, Dr. Ing.
Membro

“As pessoas podem fazer planos, porém é o Senhor Deus quem dá a última palavra. Peça a Deus que abençoe seus planos, e eles darão certo.”

Provérbios 16:1 e 3.

RESUMO

A utilização de redes de sensores sem fio, nos últimos anos, vem ganhando espaço, tornando-se uma tendência para a área de metrologia. A Fundação CERTI, visto a potencialidade de tais redes, está desenvolvendo o Projeto SensIIInt, fundamentado na conceituação, modelagem e prototipagem de um “Sistema Modular de Sensores Inteligentes e Integráveis”. Apesar do avanço expressivo na área, tais redes apresentam uma série de desafios, dentre os quais: aumentar a eficiência energética e diminuir custos da rede. Assim sendo, este estudo atuará nas soluções destas questões, focando para isso na redução das transmissões. Agora, entretanto, o problema é como reduzir o número de transmissões e o volume de dados transmitidos sem causar grandes impactos na incerteza de medição. Para alcançar os objetivos almejados, foi proposto o uso de técnicas de taxa de transmissão adaptativa. Tais técnicas foram testadas e avaliadas dentro da aplicação-teste do Projeto SensIIInt, monitoramento ambiental, por meio de simulações computacionais. Os resultados são realmente favoráveis, já que as técnicas propostas ofereceram uma economia de mais de 90% no número de transmissões, sem aumentar a incerteza de medição final. Para o Projeto SensIIInt a utilização de técnicas de taxa de transmissão adaptativa resulta no aumento da eficiência energética da rede e no corte de custos, possibilitando a otimização do sistema.

Palavras-chave: redes de sensores sem fio; sensores inteligentes; taxa de transmissão adaptativa; eficiência energética; redução de custo; incerteza de medição.

ABSTRACT

The use of wireless sensor networks in recent years has been gaining ground, becoming a tendency for the metrology area. The CERTI Foundation, in view of the capability of such networks, is developing the SensIIInt Project based on conceptualization, modeling and prototyping of a “Modular System of Integrable and Smart Sensors”. Despite the significant advance in this area, the wireless sensor networks have a number of challenges, such as to enhance energy efficiency and cost reduction of the network. Consequently, this study will act on the solutions of these issues, focusing on the reduction of the transmissions. Nevertheless the main challenge now is how to reduce the number of transmissions and the volume of data transmitted without causing major impacts on the measurement uncertainty. To achieve the desired goals, it was proposed the use of techniques of adaptive transmission rate. These techniques were tested and evaluated within the test application of SensIIInt Project, environmental monitoring, through computer simulations. The results are highly favorable, since the proposed techniques offer savings of more than 90% in the number of transmissions without increasing the measurement uncertainty. Within the Project SensIIInt, the use of techniques of adaptive transmission rate results in increased energy efficiency and costs reduction, allowing the optimization of the system.

Key words: wireless sensor networks; smart sensor; adaptive transmission rate; energy efficiency; cost reduction; measurement uncertainty.

LISTA DE ABREVIATURAS

CERTI - Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

GPRS - General Packet Radio Service

GPS - Global Position System

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

MIT - Massachusetts Institute of Technology

RSSFs - Redes de Sensores Sem Fio

SOD - Send-On-Delta

SOD+t - Send-On-Delta com controle temporal

SOD+t+f - Send-On-Delta com controle temporal, com transmissão da função

SOD+t+ff - Send-On-Delta com controle temporal, com predição baseada na função anterior com transmissão da função

SOD+t+ fmd - Send-On-Delta com controle temporal, com predição linear baseada no valor anterior da função com transmissão da função

SOD+t+ftx - Send-On-Delta com controle temporal, com predição linear baseada no último valor transmitido da função, com transmissão da função

SOD+t+md - Send-On-Delta com controle temporal, com predição linear baseada no valor anterior medido

SOD+t+pp - Send-On-Delta com controle temporal, com transmissão de ponto adicional

SOD+t+tx - Send-On-Delta com controle temporal, com predição linear baseada no último valor transmitido

TEDS - Transducer Electronic Data Sheet

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	PROPOSTA DO TRABALHO.....	18
1.2.1	<i>Elementos motivadores</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos</i>	19
1.2.3	<i>Método de abordagem</i>	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	CONCEITO DE REDES DE SENSORES SEM FIO.....	22
2.1	VISÃO GERAL SOBRE REDES DE SENSORES SEM FIO	22
2.2	SENSORES INTELIGENTES.....	25
2.2.1	<i>Microprocessador</i>	27
2.2.2	<i>Memória</i>	28
2.2.3	<i>Transceptor</i>	29
2.2.4	<i>Transdutor de medição</i>	31
2.2.5	<i>Fonte de energia</i>	33
2.3	REQUISITOS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO	36
2.3.1	<i>Mobilidade</i>	37
2.3.2	<i>Robustez da rede</i>	37
2.3.3	<i>Segurança</i>	40
2.3.4	<i>Tempo de resposta</i>	40
2.3.5	<i>Taxa de transmissão</i>	40
2.3.6	<i>Consumo de energia</i>	41
2.3.7	<i>Custo</i>	42
2.3.8	<i>Qualidade da informação</i>	42
2.4	DESAFIO IMPOSTO PELAS REDES DE SENSORES SEM FIO43	
3	TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO ADAPTATIVA44	
3.1	TÉCNICAS EXISTENTES	47
3.1.1	<i>Send-On-Delta</i>	47
3.1.2	<i>Send-On-Delta com controle temporal</i>	49
3.1.3	<i>Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anteriormente medido</i>	51
3.2	AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS	53
3.2.1	<i>Suposições</i>	53
3.2.2	<i>Coefficiente de determinação (R^2)</i>	53

3.2.3	<i>Histograma do resíduo</i>	54
3.2.4	<i>Autocorrelação do resíduo</i>	55
3.2.5	<i>Gráfico da dispersão do resíduo</i>	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1	PROJETO SENSIIINT.....	58
4.1.1	<i>Monta-SMIR</i>	58
4.1.2	<i>Aplicação do Projeto SensIInt</i>	61
4.2	PROCESSO DE SIMULAÇÃO	65
4.2.1	<i>Dados utilizados</i>	65
4.2.2	<i>Reconstrução do modelo</i>	66
4.2.3	<i>Geração de gráfico e calculo de valores</i>	68
5	APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS NOVAS TÉCNICAS	69
5.1	APRESENTAÇÃO DAS NOVAS TÉCNICAS	69
5.1.1	<i>Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anterior transmitido</i>	70
5.1.2	<i>Send-On-Delta com ponto adicional</i>	72
5.1.3	<i>Send-On-Delta com transmissão da função do modelo</i>	75
5.2	AVALIAÇÃO DO AJUSTE DO MODELO AOS DADOS	79
5.2.1	<i>Histogramas do resíduo</i>	79
5.2.2	<i>Autocorrelação do resíduo</i>	81
5.2.3	<i>Gráfico da dispersão do resíduo</i>	83
5.2.4	<i>Avaliação final do ajuste do modelo</i>	86
5.3	ESTUDO COMPARATIVO	87
5.4	AVALIAÇÃO DENTRO DO PROJETO SENSIIINT	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
6.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	97
6.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	98
7	REFERÊNCIAS	99
	ANEXO A	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Medição é, praticamente, uma necessidade para qualquer ramo da atividade humana que tenha por finalidade básica monitorar, controlar e/ou investigar processos ou fenômenos físicos (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008). A fim de se obter resultados de medição mais exatos que os proporcionados pelas técnicas tradicionais de instrumentação, há hoje tecnologias inovadoras cada vez mais acessíveis que permitem a evolução da metrologia e a abertura de novos campos de aplicação (AKILIDIZ, 2002).

Um desses avanços tecnológicos é o uso de rede de sensores, que, dentre várias vantagens, possibilita a redução da incerteza da medição. Medições são afetadas por grandezas de influência; se forem conhecidas, é possível estimar seu impacto sobre o resultado da medição. Conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), grandeza de influência não é a do mensurando, mas a que afeta o resultado de medição (JCGM, 2008). Quando se têm uma rede de sensores, medindo tanto o mensurando quanto as grandezas de influência, existem meios que permitem compensar essa influência, obtendo-se, como consequência, uma medição mais exata (KANOUN e TRANKLER, 2004).

Outra vantagem do uso de rede de sensores é a possibilidade de um melhor entendimento do processo, ou fenômeno físico a ser observado. Transdutores de medição interconectados, distribuídos em lugares diferentes e medindo a mesma grandeza ou grandezas distintas, proporcionam uma melhor reconstrução do processo ou fenômeno que se deseja mensurar (KANOUN e TRANKLER, 2004; MITCHELL, 2007). Um exemplo comparativo desse tipo de aplicação são os cinco sentidos do corpo humano. Quando se usam a audição, o olfato, o paladar, o tato e a visão, a reconstrução do espaço em que uma pessoa se encontra é fácil e natural. Porém, quando falta um dos cinco sentidos ou, pior, quando a pessoa está limitada ao uso de apenas um deles, torna-se muito mais difícil reconstruir o ambiente em volta.

O processamento para a reconstrução do ambiente em que um ser humano se encontra acontece no cérebro, que tem a capacidade de cruzar as informações dos cinco sentidos, conforme ilustrado na figura 1. Este tipo de prática é chamado, na engenharia, de fusão de dados, em que diferentes técnicas são empregadas no intuito de melhorar a qualidade da informação (KLEIN, 2007; MITCHELL, 2007), disseminada graças aos avanços tecnológicos em redes de sensores.

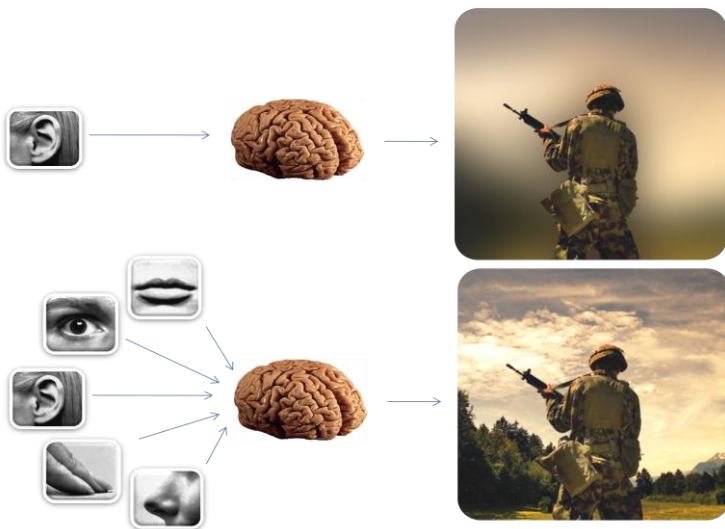


Figura 1: Exemplo comparativo com fusão de dados

Fonte: Autor.

Apesar de as técnicas de transdutores de medição distribuídos em rede serem utilizadas em aplicações militares e industriais desde os anos 70, é bom deixar claro que os primeiros sistemas tinham sua comunicação baseada em cabos e fios, o que limitava sua utilização em muitas aplicações (KRISHNAMACHARI, 2005). Devido a essas restrições, (determinadas pela necessidade de cabos e fios), começou-se a investigar a possibilidade do uso de comunicação *wireless* em redes de sensores.

As vantagens das redes de sensores sem fio (RSSFs), frente às redes baseadas em cabos, são muitas (XIA e ZHAO, 2007). Um grande número de conexões e longas distâncias de cabos representam um custo significativo de instalação e de manutenção. Para transdutores de medição de baixo custo, como, por exemplo, transdutores de temperatura ambiente, o custo do cabeamento pode representar até 90% do investi-

mento total de instalação em edifícios comerciais (RABAEY *et al.*, 2000). Em indústrias de energia nuclear, estima-se um gasto na instalação de 6500 dólares por metro, preço que justifica o uso de comunicação sem fio (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

Um das implicações do gasto com cabeamento é o aumento do custo final da rede, que limita o investimento em pontos de medição e, conseqüentemente, reduz a qualidade do resultado da medição das variáveis desejadas, isto sem levar em conta que fios e cabos estão sujeitos a danos - como rompimentos, falhas em seus conectores e ruídos -, com evidente prejuízo sobre o resultado da medição (WILSON, 2005). O emprego da comunicação sem fio, além de facilitar e baratear a instalação dos transdutores de medição, melhora a mobilidade do sistema de medição e facilita o monitoramento de lugares remotos (BULUSU e JHA, 2005). Este conjunto de características permite o emprego de redes de sensores em aplicações que necessitam exatamente dessas peculiaridades, como, por exemplo (ZHAO e GUIBAS, 2004; WILSON, 2005):

- controle e mapeamento do meio ambiente e da biodiversidade;
- agricultura de precisão;
- medicina e monitoramento de pacientes;
- logística;
- controle e monitoramento industrial;
- automação de edificações;
- segurança e sensoriamento militar.

Nos últimos anos, as redes de sensores sem fio conquistaram expressivo destaque. Uma publicação ligada ao MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) classificou as redes de sensores sem fio como uma das dez tecnologias que irão revolucionar o planeta (MIT, 2003). Além da previsão acima mencionada, existe uma projeção de investimentos da ordem de 1,3 bilhão de dólares em pesquisas e desenvolvimento nessa área para o ano de 2012, muito superior ao gasto em 2007, de 522 milhões de dólares (ON WORLD, 2009).

Devido à potencialidade das redes de sensores sem fio, a Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI), sob encomenda do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), iniciou o Projeto SensInt, que tem como objeto central a conceituação, modelagem e prototipagem de um “Sistema modular de sensores inteligentes e integráveis” (FUNDAÇÃO CERTI, 2007). É no contexto desse projeto que surge o estudo objeto da presente dissertação: enfrentar os desafios

do campo das redes de sensores sem fio em busca de soluções no âmbito da metrologia.

1.2 PROPOSTA DO TRABALHO

A comunicação *wireless*, da mesma forma que oferece vantagens, também apresenta desafios a serem resolvidos. Dois fatores primordiais a se considerar em redes de sensores sem fio são o consumo de energia e a qualidade da informação (POTTIE e KAISER, 2005). Entretanto, ambos são, de modo geral, inversamente correlacionados, ou seja, quanto mais dados forem medidos, processados e transmitidos, melhor será a informação; porém, gastar-se-á mais energia para isso.

Uma das características da energia consumida pelos sensores inteligentes é que ela pode ser decomposta em três grandes grupos: sensoriamento, processamento e comunicação, sendo este último grupo responsável pelo maior percentual de consumo de energia (WILSON, 2005; POTTIE e KAISER, 2005; KRISHNAMACHARI, 2005). Em virtude de o consumo mais elevado acontecer no momento da transmissão, é energeticamente mais econômico o processamento local dos dados, a fim de diminuir o volume de dados enviados, transmitindo apenas as informações cruciais exigidas pela aplicação (AKILIDIZ, 2002; KARL e WILLIG, 2007).

Além da economia energética, a redução do volume de dados transmitidos abate custos de transmissão. Tais custos devem ser considerados, pois, para alguns casos, podem inviabilizar o mantimento da rede. Resumindo, a proposta do presente trabalho é utilizar algoritmos locais de processamento que diminuam o número de transmissões em rede de sensores sem fio, a fim de economizar energia e custos de transmissão, com o menor acréscimo de incerteza no resultado de medição.

1.2.1 Elementos motivadores

Um dos principais elementos motivadores é a potencialidade das redes de sensores sem fio, impulsionada pela falta de estudos metrológicos na área até o momento. Apesar de as redes de sensores terem como

objeto principal o sensoriamento, pouco se fala em metrologia e incerteza de medição.

O segundo fator motivador é que as técnicas normalmente utilizadas para gerenciamento da energia em redes de sensores sem fio têm como métrica parâmetros de rede (SANTI, 2005) e *hardware* (RAGHUNATHAN *et al.*, 2002), não as características da grandeza monitorada. Já as técnicas que levam em conta as características da grandeza ainda são pouco exploradas, além de, em sua maioria, serem baseadas em valores simulados sem a presença de ruído e não considerarem a incerteza adicionada ao resultado final.

Outro fator motivador é a possibilidade de implementação das técnicas estudadas em uma rede real de sensores inteligentes dentro do Projeto SensInt, na busca por economia, tanto no consumo de energia como nos gastos no mantimento da rede, que é terceirizada. Além do corte de gastos, com a redução do tamanho da bateria, com diminuição da célula de carga e com a manutenção da rede, que podem ser remanejados para outros setores mais significativos no processo de medição, como, por exemplo, a compra de transdutores que possibilitem medições mais exatas.

1.2.2 Objetivos

Objetivo geral do presente trabalho é propor técnicas de processamento local em redes de sensores sem fio que diminuam o número de transmissões para economizar energia e custos de transmissão, com o mínimo acréscimo de incerteza no resultado de medição. Para alcançar o objetivo geral, uma série de objetivos específicos foram traçados:

- esclarecer os conceitos de redes de sensores sem fio;
- diagnosticar os principais desafios em rede de sensores sem fio que sejam inerentes ao campo da metrologia;
- buscar técnicas já existentes de taxa de transmissão adaptativa;
- analisar as técnicas conhecidas e selecionar as que se enquadram nas especificações gerais de redes de sensores sem fio;
- desenvolver um simulador computacional para avaliar as diversas técnicas;
- desenvolver novas técnicas ainda não contempladas;

- estabelecer as vantagens e desvantagem de cada técnica;
- analisar e selecionar a técnica que melhor se enquadre nas necessidades do Projeto SensIIInt;
- quantificar as vantagens e desvantagens do uso da técnica dentro do Projeto SenIIInt.

1.2.3 Método de abordagem

O primeiro passo é sistematizar os conceitos de redes de sensores sem fio extraídos de bibliografia consolidada. O objetivo é entender do que se trata e como funcionam tais redes, permitindo fazer um levantamento das principais limitações apresentadas pela tecnologia.

Encontradas as limitações, o próximo passo é analisar quais são passíveis de solução no âmbito da metrologia. Como já anteriormente referido, o consumo de energia e o custo da rede são as principais limitações e um grande responsável por isso é a comunicação dos dados. O desafio é encontrar técnicas que diminuam o número de transmissões, com o menor acréscimo possível na incerteza do resultado de medição.

Decidido o objetivo da pesquisa, o passo seguinte é fazer um levantamento das técnicas já existentes. As técnicas encontradas são analisadas com ferramentas estatísticas gráficas a fim de identificar se proporcionam um modelo que reflita o comportamento do mensurando. Encontradas as limitações nas técnicas existentes, propõem-se novas técnicas, que também são analisadas.

Analisadas e escolhidas as técnicas que proporcionam modelos que se ajustam aos dados de medição, o próximo passo é definir qual apresenta melhor relação entre influencia na incerteza no resultado de medição e desempenho na redução do número de transmissões. Para isso, se utilizou um simulador computacional baseado no princípio de Monte Carlo.

Concluído o estudo do simulador, passa-se à aplicação das técnicas nos dados coletados pela rede de sensores sem fio do Projeto SensIIInt. Este estágio servirá para quantificar os benefícios das técnicas dentro do projeto.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2, são apresentados os conceitos de redes de sensores sem fio e de sensores inteligentes, as aplicações em que essas tecnologias podem ser úteis e os principais desafios a serem resolvidos.

No capítulo 3, faz-se a exposição das técnicas de taxa de transmissão adaptativa existentes e dos parâmetros de avaliação das técnicas.

No capítulo 4, são apresentados o Projeto SensInt e o simulador para avaliação das técnicas.

No capítulo 5, faz-se a apresentação das novas técnicas propostas. Também é realizada uma avaliação das técnicas para definir qual melhor se ajusta aos dados. O capítulo se fecha com a análise da técnica que possibilita a maior eficiência no número de transmissões com o menor acréscimo na incerteza final do resultado de medição.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões deste estudo. Nele se discutem as conseqüências do uso das técnicas sobre a incerteza final do sistema de medição e os benefícios sobre a economia de energia e de custos de transmissão. Também são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2 CONCEITO DE REDES DE SENSORES SEM FIO

O uso de transdutores de medição para monitoramento de edificações, de máquinas, do meio ambiente e até mesmo de seres vivos gera uma série de dados que, se tratados e analisados de forma integrada, podem proporcionar grandes benefícios à sociedade e ao meio ambiente. Alguns desses benefícios são: previsão de catástrofes naturais, identificação de falhas estruturais em edificações, preservação dos recursos naturais, incremento na produtividade industrial, agilidade nos serviços de emergência, melhoria nos sistemas de segurança, etc. No entanto, muitas dessas aplicações, que apresentam potencial para uso de rede de sensores, mostram-se impraticáveis se houver a necessidade de utilizar cabos e fios na comunicação (WILSON, 2005).

A impossibilidade e/ou a dificuldade de implantar redes de sensores dependentes de fios obriga os pesquisadores a desenvolver sistemas alternativos para beneficiar e viabilizar tais aplicações. Com o advento das redes de sensores e seus benefícios, surge um novo conceito tecnológico: o de redes de sensores sem fio.

O presente capítulo tratará desta tecnologia. Pretende-se apresentar uma visão geral das redes de sensores sem fio, descrever os sensores inteligentes e seus principais componentes, expor os requisitos exigidos pela tecnologia e os desafios para alcançá-los. No decorrer do capítulo, serão expostos alguns conceitos de extrema importância para o entendimento dos capítulos subsequentes.

2.1 VISÃO GERAL SOBRE REDES DE SENSORES SEM FIO

As redes de sensores sem fio combinam sensoriamento distribuído, com computação embarcada e comunicação *wireless* (ARAMPATZIS e LYGEROS, 2005). A soma desses elementos permite que tais redes representem um dos primeiros exemplos, aquele com o qual o mundo da tecnologia da informação cria uma ponte direta com o mundo físico real (KRISHNAMACHARI, 2005). Numa concepção extrema, as redes de sensores sem fio seriam formadas por componentes tão baratos e pequenos que poderiam ser pulverizados sobre uma área ou objeto, criando uma “pele digital”. Esta película de dispositivos sentiria e

transmitiria as variações do fenômeno, como representado na figura 2 (ZHAO e GUIBAS, 2004; BULUSU e JHA, 2005). No atual estado da arte, esta concepção extrema ainda não é viável, porém já existem dispositivos de dimensões bastante reduzidas (alguns milímetros cúbicos).

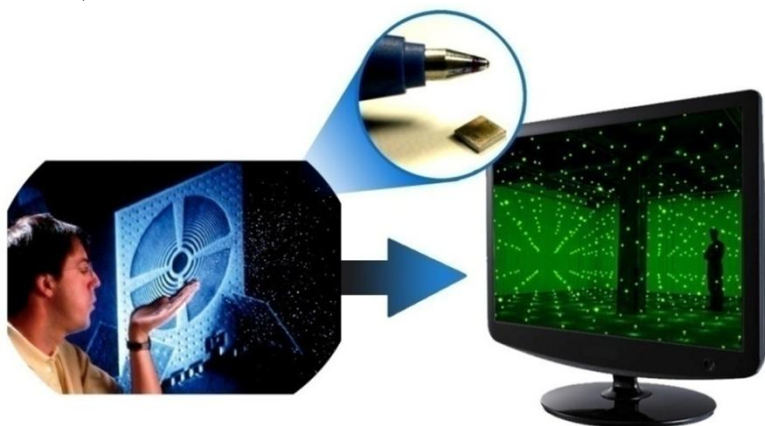


Figura 2: Ideologia das RSSFs

Fonte: Autor.

Os principais componentes das redes de sensores sem fio são os sensores inteligentes, também chamados de “nós sensores”. Tais dispositivos são compostos basicamente de três módulos (ANANDA, CHAN e OOI, 2006; STOJMENOVIC, 2005; ANASTASI, 2008; ENZ *et al.*, 2004):

- módulo de sensoriamento, responsável por medir o mensurando;
- módulo de processamento, responsável por processar localmente os dados e armazená-los;
- módulo de comunicação, responsável pela transmissão da informação.

Para que todo esse sistema se mantenha em atividade, entretanto, é preciso uma fonte de alimentação. Pelo fato de o estudo tratar de sensores sem fio, esta fonte precisará estar alinhada com essa tecnologia, devendo prover energia a partir de uma bateria ou de algum outro sistema que colete a energia do ambiente ou de sistemas próximos, como, por exemplo, painéis de energia solar.

Para a construção de uma rede, é preciso que os sensores inteligentes sejam espalhados sobre a área que se pretende monitorar, seja ela

uma plantação, uma cidade, uma rodovia ou um lago. Podem também ser acoplados a objetos, como máquinas, carros, navios, contêineres, ou até mesmo atrelados a seres vivos, como animais, plantas ou mesmo pessoas.

Cada sensor inteligente realiza a medição das grandezas que lhe foram designadas para atender à análise preconizada, processa os dados localmente e então transmite para o “nó sensor” vizinho, até a informação chegar à estação-base. A estação-base disponibiliza essa informação para o usuário final, seja em uma rede local, seja na internet (VERDONE *et al.*, 2007; ANASTASI, 2008; ILYAS e MAHGOUB, 2005; ANANDA, CHAN e OOI, 2006; STOJMENOVIC, 2005). A figura 3 representa uma rede de sensores sem fio, em uma visão largamente abordada na literatura atual. No decorrer do trabalho serão abordadas outras topologias que a rede pode apresentar.

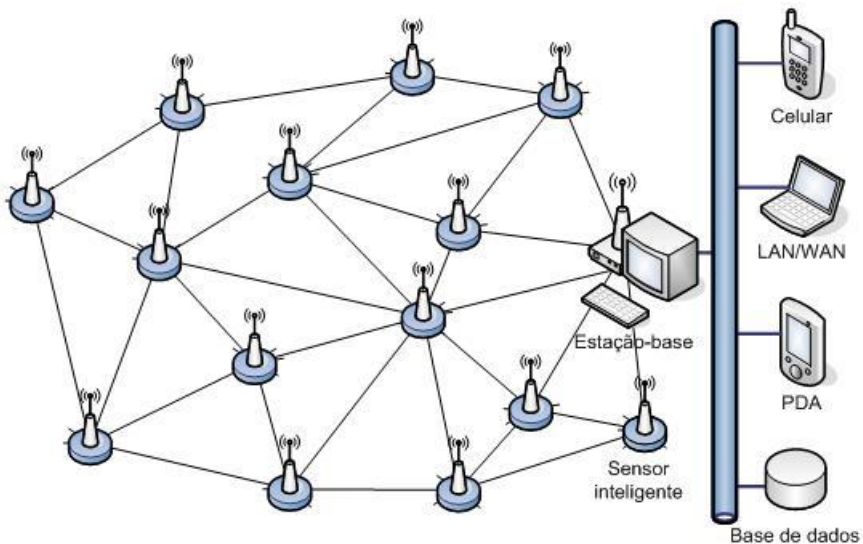


Figura 3: Rede de sensores sem fio

Fonte: Adaptado de Ilyas e Mahgoub, 2005.

Para o sucesso da adoção desse tipo de rede, é essencial que os custos de transmissão não sejam elevados, pois uma rede com muito tráfego de informações pode gerar gastos expressivos com o passar dos anos. Além de que, é fundamental que os sensores inteligentes sejam autônomos e que exijam um baixíssimo consumo de energia, objetivan-

do eliminar a necessidade de troca ou re-carregamento das baterias, pois, dependendo da quantidade de “nós sensores” que compõem a rede ou das características do ambiente em que os nós se encontram, esse tipo operação se torna impraticável (RABAEY *et al.*, 2000; CALLAWAY JR, 2003; ALIPPI *et al.*, 2000).

2.2 SENSORES INTELIGENTES

Como já visto anteriormente, os principais componentes das redes de sensores sem fio são os “nós sensores”, também chamados de sensores inteligentes. Não se pretende aqui adotar uma definição filosoficamente rigorosa do que é inteligência, buscando-se, em vez disso, uma definição prática baseada na literatura da área em questão. Esta apresenta diversas definições para sensores inteligentes, como as encontradas em Yick, Mukherjee e Ghosal (2008), Spencer Jr. (2004), Ruiz-Sandoval e Kurata (2004), Morris (2001) e Betts (2006). Uma fonte consolidada do assunto é a família das normas IEEE 1451 - Padrão para Interface de Transdutores Inteligentes para Sensores e Atuadores -, que define por sensor inteligente¹: “Um transdutor capaz de prover funções além das necessárias para gerar uma representação correta de uma quantidade medida ou controlada. Esta funcionalidade simplifica a integração do transdutor em aplicações em um ambiente de rede (IEEE, 1997; IEEE, 2003).”

Para deixar mais claro o que tratam estas funções adicionais que um sensor inteligente pode possuir, Mitchell (2007), em harmonia com as normas IEEE 1451, define sensor inteligente: “Um equipamento que contemple um módulo de sensoriamento, de processamento e de comunicação. Esta estrutura física deve estar associada a um *software* que tem por funções controlar a parte de condicionamento do sinal, fazer o ajuste da curva de correção, aplicar testes de diagnósticos e empacotar os dados para a comunicação. Em operação, o sensor inteligente transforma o sinal de saída analógico do transdutor em um sinal digital padronizado equivalente; checa e ajusta o sinal conforme a curva de correção e transmite este sinal digitalizado para a rede, utilizando uma

¹ As normas IEEE 1451.2 e 1451.3 tratam o termo transdutor como um dispositivo que converte energia de um domínio para outro, podendo ser tanto um transdutor de medição (JCGM, 2008), quanto um atuador. Assim, as normas diferenciam o termo sensor inteligente, de transdutor inteligente, como a versão do transdutor inteligente equipada com transdutores de medição. Neste trabalho, a nomenclatura utilizada se baseia nas normas da família IEEE 1451.

interface padronizada que usa um protocolo de comunicação, também padronizado.”

A figura 4 é uma esquematização básica da arquitetura dos sensores inteligentes, segundo Krishnamachari (2005), Anastasi (2008), Karl e Willig (2007), Mitchell (2007) e Callaway Jr. (2003). Nem todos os sensores inteligentes têm a comunicação baseada em tecnologia *wireless* (IEEE, 1999), porém, como o intuito do presente trabalho é o estudo da otimização de desempenho em redes sem fio, apenas serão apresentadas tecnologias que contemplem esse tipo de comunicação.

A escolha dos elementos que irão compor os “nós sensores” de uma rede de sensores sem fio é de extrema relevância. Um bom sistema de comunicação, processamento e sensoriamento é fundamental para a qualidade da medição, devendo ser definidos em função da aplicação a que a rede deve atender. Mesmo assim, a métrica principal de seleção dos componentes para os sensores inteligentes tem como quesitos-chave, segundo Pottie e Kaiser (2005), Raghunathan (2003), Alippi *et al.* (2009): tamanho reduzido, baixo custo e baixo consumo energético.

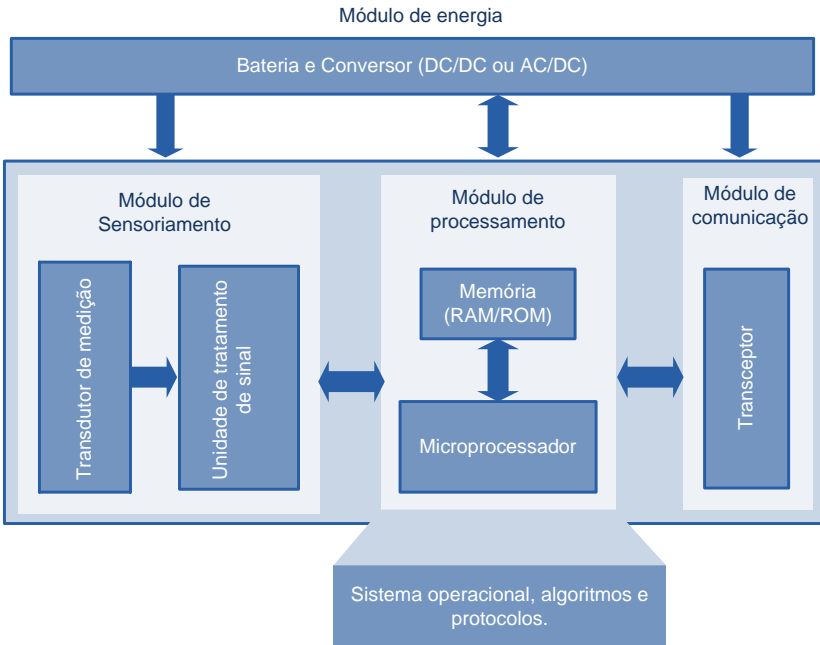


Figura 4: Arquitetura do sensor inteligente
 Fonte: Adaptado de Enz *et al.*, 2004; Akilidiz, 2002.

As características dos sensores inteligentes podem ter grande variabilidade. Em alguns casos, o “nó sensor” pode ter um volume menor que 1 cm^3 , ser mais leve que 10 g, custar menos de 1 dólar e dissipar menos de $100 \text{ }\mu\text{W}$ de energia (RABAEY *et al.*, 2000). Em aplicações mais realistas, entretanto, o tamanho dos sensores inteligentes frequentemente não é o fator mais crítico frente à necessidade de sistemas mais baratos e de alta eficiência energética (KARL e WILLIG, 2007). A seguir será descrito cada um dos elementos que compõem um sensor inteligente, enfatizando seu consumo energético.

2.2.1 Microprocessador

As tarefas realizadas por um microprocessador de sensores inteligentes são basicamente: controlar leituras dos transdutores de medição; executar algoritmos locais e implementar protocolo de comunicação. Além disso, o processador tem por função gerenciar todos os outros componentes do “nó sensor”, como a memória, a fonte de energia, o condicionador de sinal, etc. (KRISHNAMACHARI, 2005; RAGHUNATHAN *et al.*, 2002).

O processamento dos dados tem influência direta sobre a qualidade da medição, razão pela qual a execução de algoritmos confiáveis sobre os dados coletados é de extrema importância para a redução da incerteza do resultado de medição (KANOUN e TRÄNKLER, 2004; WEBSTER, 1999). Neste sentido, uma das correções que podem ser realizadas é a compensação da leitura com relação à curva de correção de uma calibração, ou um ajuste quando o transdutor de medição apresenta uma sensibilidade não-linear (BETTS, 2006). Outra opção é o cálculo da média de uma série de valores, a fim de reduzir a influência de erros aleatórios sobre o sistema, além da compensação das variações adicionadas ao valor de leitura devido à presença de grandezas de influência (INMETRO, 2003; ALBERTAZZI e SOUZA, 2008). Existem diversas técnicas que podem ser usadas com o objetivo de reduzir a incerteza. Alguns exemplos serão apresentados ao longo do trabalho, além das citadas por Mitchell (2007), Klein (2007) e Webster (1999).

O desempenho energético em microprocessadores para redes de sensores sem fio tem sido estudado intensamente. Inúmeras técnicas foram propostas para estimar o consumo de energia em aplicações de processamento embarcado. A capacidade do microprocessador é ditada pela complexidade dos algoritmos que se deseja rodar no módulo de

processamento. Entretanto, a grande preocupação é que um aumento na capacidade de processamento possa causar impactos consideráveis no consumo de energia do sistema.

Os microprocessadores normalmente utilizados em sensores inteligentes possuem vários modos de operação. O StrongARM SA-1100 (fabricado pela empresa Intel Corporation de Santa Clara, CA, USA), por exemplo, apresenta a possibilidade de funcionamento em três modos, que acabam por determinar consumos diferenciados (KARL e WILLIG, 2007):

- modo normal: quando todas as partes e funcionalidades do processado estão ativas (o consumo de energia é superior a 400 mW);
- modo desocupado: o processador fica em *stand by*, quando ocorre alguma interrupção, o processador volta a trabalhar no modo normal (o consumo é em torno de 100 mW);
- modo dormindo: o processador fica em *stand by*; depois de um tempo pré-determinado, volta ao modo normal, executa as tarefas necessárias e retorna a ficar em *stand by* (o consumo, neste caso, é cerca de 50 μ W).

A escolha do processador deve ser ditada pela aplicação em questão, buscando sempre um equilíbrio entre a capacidade de processamento e a demanda exigida pelos algoritmos necessários à implementação da aplicação (RAGHUNATHAN *et al.*, 2002)

2.2.2 Memória

Para realizar algum tipo de cálculo em um sensor inteligente, por mais simples que seja, como tirar a média de um conjunto de valores, por exemplo, é preciso um circuito de memória, no qual armazenamento e leitura dos valores contidos na memória são função do processador (KRISHNAMACHARI, 2005). É necessária uma memória RAM (*Random Access Memory*) para armazenar imediatamente os valores medidos pelo sensor inteligente. Apesar de esta memória ser muito rápida, tem a desvantagem de precisar ser interruptamente alimentada, diferentemente das memórias ROM (*Read-Only Memory*) e EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), nas quais normalmente são salvos os códigos de programas. Nos casos para os

quais a memória RAM não seja suficiente ou a alimentação precise ser cortada por algum tempo, é comum utilizar memórias flash, que é um tipo específico de memória EEPROM mais rápida (KARL e WILLIG, 2007).

Olhando desde a perspectiva do consumo de energia, os tipos de memórias mais relevantes são a memória interna do microprocessador e a memória flash. De fato, o consumo de energia da memória interna do microprocessador já está incluído no balanço energético do microprocessador. Assim, a memória flash passa a requerer mais atenção, pois seu uso, quando demasiado, pode diminuir drasticamente o tempo de vida dos dispositivos da rede (KARL e WILLIG, 2007).

O parâmetro mais significativo para o consumo de energia é o tempo de leitura e de escrita na memória (KARL e WILLIG, 2007). A energia gasta para ler um valor na memória flash nem sempre é a mesma para escrever ou apagar. Como exemplo, citam-se os “nós sensores” Mica (fabricados pela empresa Crossbow Technology, Inc., de San Jose, CA, USA), que consomem 1,11 nA/h para realizar leitura na memória, contra 83,33 nA/h para escrever ou apagar (MANWARING, 2002).

Normalmente, a quantidade de memória em sensores inteligentes é limitada por questões econômicas, pois influi diretamente no custo de fabricação. Entretanto, conforme visto anteriormente, escrever ou ler um valor da memória também tem impacto em relação ao consumo de energia, sendo indicado que se procure reduzir tanto quanto possível o número e o tempo de acesso a memórias (KARL e WILLIG, 2007).

2.2.3 Transceptor

O transceptor é o responsável pela comunicação dos dados com os “nós sensores” vizinhos ou com a estação-base. Nem sempre a comunicação em uma rede de sensores é feita por tecnologia *wireless*. Existem padrões de comunicação para esse tipo de rede baseados em cabos e fios, como, por exemplo, padrão Profibus, LON, CAN e muitos outros, que podem ser encontradas em Webster (1999). Entretanto, devido à linha de interesse, este estudo se concentrará apenas na parte de comunicação sem fio.

Dentre os tipos de comunicação sem fio, este estudo dará maior enfoque à rádio-frequência, por ser a mais disseminada em aplicações de redes de sensores sem fio. Existem, porém, outras formas de comunicação sem fio utilizadas em redes de sensores, como a comunicação óptica

e por ultra-som. A comunicação óptica usa feixes de luz entre o transmissor e o receptor para fazer a troca de informações. Suas principais vantagens são o baixo consumo de energia por bit recebido/transmitido, o circuito exigido para a comunicação é de implementação simples e normalmente de menor tamanho do que os dos circuitos de rádio-frequência. As desvantagens são a necessidade de uma linha de visada direta para o trânsito da informação ponto-a-ponto e a forte dependência das condições ambientais. Em alguns cenários, o uso de comunicação óptica ou por rádio-frequência são inviáveis devido ao tipo de meio em que a comunicação é realizada. Um desses meios é a água, na qual as ondas não conseguem penetrar. Para esse tipo de aplicação, é mais indicada a comunicação baseada em ultra-som, porém o consumo energético e o custo de fabricação em média são mais elevados (KARL e WILLIG, 2007).

Quando se trata de comunicação por rádio-frequência, a seleção do tipo de rádio-transceptor depende de uma série de características, regidas por parâmetros da aplicação, como alcance, interferência a ruídos, ganho e muitas outras; no entanto, em RSSFs, uma característica fundamental é o desempenho energético. O consumo de energia em rádio-transceptores é função de uma série de variáveis, dentre as quais se destacam a distância da transmissão e o tempo durante o qual a comunicação fica estabelecida. É importante lembrar também que os sensores inteligentes consomem energia para receber informações, e não apenas para transmiti-las. A tabela 2.1 mostra o consumo para transmissão e recepção do sinal para alguns modelos de rádio-transceptores utilizados em RSSFs (ALIPPI *et al.*, 2009).

Tabela 2.1: Consumo energético de rádio-transceptores

Rádio	Fabricante	Transmissão	Recepção
CC2420	Texas Instruments	35 mW (0 dBm)	38 mW
CC1000	Texas Instruments	42 mW (0 dBm)	29 mW
TR1000	RF Monolithics	36 mW (0 dBm)	9 mW
JN-DS-JN513x	Jennic	111 mW (1 dBm)	111 mW

Fonte: Adaptado de Alippi *et al.*, 2009.

Surge a questão se é mais vantajoso transmitir todos os valores medidos ou se é melhor processá-los localmente. Claro que esta relação

depende de uma série de fatores, mas tipicamente para executar uma simples operação em um microprocessador é requerido 1 nJ; para transmitir um bit, podem-se estimar cerca de 100 nJ. Em alguns sensores inteligentes, esta relação entre a transmissão de um bit e a execução de uma simples instrução chega à ordem de mil para um (ANASTASI, 2008). Para se ter uma idéia um pouco mais clara, a transmissão de 1 kB por uma distância de 100 m consome uma energia suficiente para o processamento de três milhões de instruções (KARL e WILLIG, 2007). Estes fatores justificam o uso de algoritmos locais voltados à redução do número de transmissões e do tamanho da informação. Conforme a literatura, o módulo de comunicação é o maior responsável pelo consumo de energia em redes de sensores sem fio (ANASTASI, 2008; CALLAWAY JR, 2003; KRISHNAMACHARI, 2005).

2.2.4 Transdutor de medição

Convém explicitar a diferença entre sensor e transdutor de medição, usando para isso o VIM como referência absoluta. A definição do VIM para sensor é: “Elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida.” E a definição do VIM para transdutor de medição é: “Dispositivo, utilizado em medição, que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com uma grandeza de entrada.”

O VIM não define se o termo correto é rede sensores ou rede de transdutores de medição. Este trabalho adotou o termo rede de sensores por ser largamente seguido pela literatura e aparentemente não apresentar nenhuma discordância direta com o VIM, já que todo transdutor de medição possui um sensor.

Algumas vezes, o sensor e o transdutor de medição são o mesmo elemento, por exemplo, um termopar, que gera como sinal de saída uma tensão elétrica que é função da temperatura medida. Nem sempre o sinal de saída de um transdutor é um estímulo elétrico, mas em aplicações de redes de sensores inteligentes isso é essencial para facilitar a automatização.

O consumo de energia no módulo de sensoriamento varia conforme o tipo de transdutor utilizado. É possível, por exemplo, usar um transdutor auto-gerador, que não requer alimentação ou um transdutor que requer alimentação, que conseqüentemente consome mais energia

(FLESCH, 2003). No módulo de sensoriamento, além do transdutor de medição, existem outros elementos que consomem energia, como amplificadores, filtros, conversores analógico-digitais, etc. A escolha dos componentes que irão compor o módulo de sensoriamento está condicionada ao tipo de grandeza a medir e à incerteza requerida pelo sistema de medição (KRISHNAMACHARI, 2005).

Existem algumas técnicas citadas em Alippi *et al.* (2009) para serem aplicadas nos casos em que a unidade de sensoriamento é grande consumidora de energia. Uma delas é o uso de taxas adaptativas com relação à energia disponível no sistema ou baseada em técnicas mais apuradas, como filtro de Kalman, que utiliza um modelo da grandeza de entrada para prever o próximo ponto de medição. Maiores informações podem ser achadas em Jain e Chang, 2004; Popa, Mysorewala e Lewis, 2006.

Outra técnica bem interessante é a do uso de múltiplos transdutores em um mesmo sensor inteligente, observando o mesmo mensurando, porém com diferentes exatidões de medição. Partindo do pressuposto de que o transdutor com menor exatidão de medição consome menos energia, este fica o tempo todo monitorando o mensurando; quando detecta um evento, ativa o transdutor com maior exatidão de medição, que faz a leitura do mensurando. Então, somente este dado coletado pelo transdutor mais exato é enviado para a estação-base.

A figura 5 traz um exemplo dessa técnica. Um transdutor é responsável apenas por detectar se houve vazamento. Caso tenha ocorrido, um segundo transdutor é acionado. Este, por sua vez, realiza uma análise do tipo de substância; se detectado que é inflamável, então o sensor inteligente transmite um sinal de alarme para a estação-base.

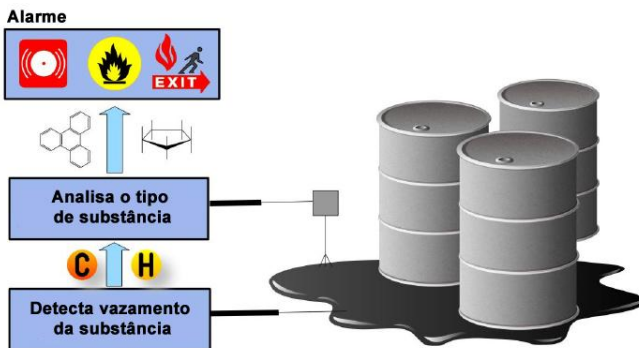


Figura 5: Monitoramento de líquidos inflamáveis

Fonte: Adaptado de Alippi *et al.* 2009.

Algumas precauções devem ser tomadas, com relação à utilização dessas soluções, para evitar o aumento da incerteza final de medição. No caso da técnica de taxa adaptativa baseada em filtro de Kalman, é preciso um bom modelo do sinal. Já com relação à técnica que utiliza múltiplos transdutores, tem-se que considerar o tempo de estabilização exigido pela unidade de sensoriamento após ser religada.

2.2.5 Fonte de energia

A fonte de energia é o módulo mais crítico em um sensor inteligente, pois é responsável por toda a alimentação do sistema. Existem, essencialmente, dois aspectos a serem considerados: o armazenamento/provisão da energia para o sistema e a captura de energia para o “nó sensor” de fontes externas.

O tempo de vida do sensor inteligente depende diretamente da fonte de energia. Se a energia acabar, todo o sistema para de funcionar. O armazenamento da energia em sensores inteligentes é usualmente feito em baterias baseadas em princípios eletroquímicos. As baterias são separadas em dois grupos: baterias primárias, quando não são recarregáveis, e as baterias secundárias, quando podem ser recarregadas (CALLAWAY JR, 2003; ROUNDY *et al.*, 2004; IEC, 2009). A tecnologia ligada a baterias teve um avanço considerável, embora não em ritmo tão intenso como a tecnologia dos processadores, memórias e transdutores. Nos últimos 20 anos, as baterias de tamanho AA tiveram sua capacidade aumentada de 0,4 A/h para mais de 2,5 A/h, além do tempo de recarga, que também foi diminuído (BULUSU e JHA, 2005; KARL e WILLIG, 2007).

Como um dos objetivos na área de sensores inteligentes é sua miniaturização, quando se enfoca a questão das baterias deve-se levar isso em conta. Assim, o enfoque da eficiência energética apresentada pelas baterias será pautado na questão do seu volume. As tabelas 2.2 e 2.3 fazem uma comparação desses valores em baterias primárias e secundárias mais usuais (ROUNDY *et al.*, 2004; KARL e WILLIG, 2007).

Tabela 2.2: Densidade energética de baterias primárias

Composto	Zinco-ar	Lítio	Alcalina
Energia (J/cm ³)	3780	2880	1200

Fonte: Roundy *et al.*, 2004; Karl e Willig, 2007.

Tabela 1.3: Densidade energética de baterias secundárias

Composto	Lítio	NiMHd	NiCd
Energia (J/cm ³)	1080	860	650

Fonte: Roundy *et al.*, 2004; Karl e Willig, 2007.

A seleção do tipo de baterias está sujeita aos parâmetros da aplicação, como o tempo de carga desejado, o volume e o peso admitidos; o tempo para recarga, etc. A bateria de lítio apresenta uma alta densidade energética, além de baixo efeito de memória, mas, por outro lado, exige um longo tempo de recarga. Já a bateria à base de zinco-ar oferece a melhor densidade energética dentre todas, porém apresenta uma vida útil muito curta (BULUSU e JHA, 2005; KARL e WILLIG, 2007; CALLAWAY JR, 2003). O tempo de vida das baterias depende de como sua energia é utilizada e de como é seu ciclo energético. O tempo de vida de baterias secundárias é severamente comprometido quando sobrecarregadas ou quando drenadas lentamente. Reguladores de tensão exigem muita corrente da bateria, o que, eventualmente, causa danos irreversíveis, como a queda de capacidade energética (POTTIE e KAISER, 2005; KARL e WILLIG, 2007).

A utilização de baterias primárias pode ser desastrosa em redes de sensores sem fio, com muitos pontos de medição, pois, em caso de necessidade de troca, os gastos podem ser exorbitantes. Então, é mais sensato o emprego de baterias secundárias, sendo, contudo, necessário um sistema de coleta de energia renovável para recarregá-las. Entre estes, o mais difundido é o de células fotovoltaicas, que coleta energia da luz ambiente, usualmente luz solar. A coleta de energia depende de o sensor inteligente estar ou não a céu aberto; depende do tipo de iluminação, da hora do dia e das condições climáticas. Todos estes fatores devem ser considerados na hora de especificar o sistema (KARL e WILLIG, 2007; CALLAWAY JR, 2003).

Outra forma de energia renovável é a pautada no princípio de conversão térmica, que aproveita um gradiente de temperatura para gerar

energia elétrica. Em teoria, mesmo um baixo gradiente de temperatura poderia produzir uma energia considerável; no entanto, na prática o desempenho obtido através dessa alternativa é muito baixo. Também se podem citar fontes de energia renováveis baseadas em vibrações, variações de pressão e vazão de fluidos, além de outras mais peculiares, como ruído acústico, reação nuclear e células de combustíveis (KARL e WILLIG, 2007). A tabela 2.4 mostra a capacidade energética de algumas dessas fontes alternativas (POTTIE e KAISER, 2005; RABAEY *et al.*, 2000).

Tabela 2.4: Densidade de potência para fontes alternativas de energia

Fonte de energia	Densidade de potência
Solar (ao ar livre)	15 mW/cm ² (sol direto)
	0,15 mW/cm ² (dia nublado)
Solar (interna)	0,006 mW/cm ² (2 m abaixo de lâmpada fluorescente)
	0,57 mW/cm ² (30 cm abaixo de lâmpada de 60 W)
Vibrações	0,01 - 0,1 mW/cm ³
Ruído acústico	3E-6 mW/cm ² (75 Db)
	9,6E-6 mW/cm ² (100 Db)
Reação nuclear	80 mW/cm ³
Conversão térmica	0,0018 mW (a cada 10 °C)

Fonte: Adaptado de Pottie e Kaiser, 2005.

Como abordado anteriormente, cada método de coleta tem características próprias, ficando a escolha do tipo de energia renovável a ser utilizada determinada na dependência das condições de operação dos sensores inteligentes e das especificações da aplicação. É sempre importante lembrar que um sistema superdimensionado aumenta desnecessariamente o custo de produção; assim, com a finalidade de diminuir gastos iniciais, é essencial trabalhar em paralelo com a idéia de economia de energia.

2.3 REQUISITOS PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

A concepção das redes de sensores sem fio são sistemas multi-sensores, constituídos de componentes minúsculos (imperceptíveis), cuja comunicação se baseie em tecnologia *wireless*. Assim, o estado de excelência das RSSFs tem com meta sensores inteligentes de tamanho microscópico/nanoscópico, com elevada autonomia energética, baixo custo de fabricação e alta robustez. Além disso, o sistema deve apresentar resultados de medição de alta exatidão, com resposta em tempo real (KANOUN e TRÄNKLER, 2004). A figura 6 resume os objetivos almejados pelo estado de excelência em RSSFs .

O surgimento e difusão das redes de sensores sem fio ocorreu principalmente devido ao desenvolvimento tecnológico e ao barateamento nas áreas de sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), microprocessadores e comunicação sem fio (ARAMPATZIS e LYGEROS, 2005; KRISHNAMACHARI, 2005; ZHAO e GUIBAS, 2004). As redes de sensores sem fio apresentam uma combinação de interesses técnicos não encontrados em nenhum outro tipo de rede *wireless* (CALLAWAY JR, 2003; WILLIG, 2006). Existe uma série de requisitos exigidos pela tecnologia; a seguir serão abordados os principais.



Figura 6: Estado de excelência para sensores inteligentes

Fonte: Adaptado de Kanoun e Tränkler, 2004.

2.3.1 Mobilidade

A mobilidade em redes de sensores sem fio é muito relativa, pois depende do tipo de aplicação. Devido às características-alvo dos sensores inteligentes, como miniaturização e autonomia energética, com certeza a mobilidade será muito explorada em futuras aplicações. Para que a mobilidade funcione de forma correta, porém, se faz preciso um sistema de geoposicionamento a fim de conhecer a localização exata de cada sensor inteligente.

Em teoria, este problema seria facilmente resolvido com a utilização de um GPS (Global Position System); entretanto, na prática, muitas vezes seu uso torna-se inviável devido ao custo e ao gasto energético com a implementação de um segundo sistema de comunicação (CALLAWAY JR, 2003).

2.3.2 Robustez da rede

Existem inúmeras topologias para redes, cada uma com suas vantagens e desvantagens, para aplicação nas redes de sensores sem fio. Serão apresentados aqui três tipos: rede em estrela, rede em malha e rede híbrida estrela-malha.

A topologia estrela é caracterizada quando a comunicação dos sensores inteligentes é feita diretamente com a estação-base. Os “nós sensores” somente recebem/enviam as informações da/para a estação-base; eles não podem se comunicar com “nós sensores” vizinhos. A figura 7 representa uma topologia em estrela. A vantagem desse tipo de configuração para redes de sensores inteligentes são a simplicidade e a facilidade de gerenciamento da energia dos “nós sensores”, além da baixa latência da comunicação dos “nós sensores” com a estação-base. A desvantagem consiste em que a estação-base precisa de um sinal de rádio que alcance todos os “nós sensores” e vice-versa, além da baixa robustez da rede com relação ao remanejamento da comunicação. Sem contar que esse tipo de topologia é pouco eficiente para monitorar amplas áreas com alta densidade de pontos de coleta de dados (KRISHNAMACHARI, 2005; WILSON, 2005).

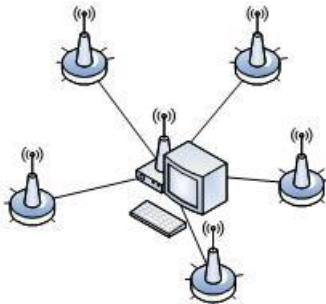


Figura 7: Topologia em estrela

Fonte: Adaptado de Krishnamachari, 2005.

A topologia em malha permite que qualquer “nó sensor” da rede transmita ou receba informações diretamente de outro nó vizinho, sem necessidade de passar pela estação-base (Figura 8). Este tipo de rede permite que um “nó sensor” se comunique com outro, mesmo que o sinal de rádio tenha alcance insuficiente entre os dois pontos, pois é possível usar um nó intermediário para repassar a mensagem ao nó destino. Esta topologia tem a vantagem de ser redundante. Se um “nó sensor” falhar no meio da comunicação, é possível redirecionar a mensagem por outro caminho. Outra vantagem é que o alcance da rede não se limita ao alcance do sinal de rádio dos nós; pode ser aumentado, adicionando-se pontos intermediários. As desvantagens são que o consumo de energia individual de cada nó sofre um acréscimo quando usado como ponte na comunicação. A latência do sistema tende a aumentar e é preciso um protocolo de comunicação mais robusto que o da topologia em estrela (WEBSTER, 1999; WILSON, 2005).

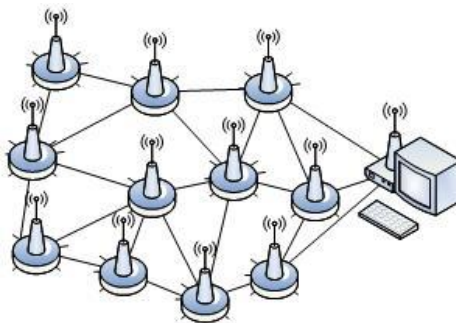


Figura 8: Topologia em malha

Fonte: Adaptado de Krishnamachari, 2005.

Existe a possibilidade de unir duas topologias, tendo como resultado uma topologia híbrida. Um tipo de topologia híbrida muito usado em redes de sensores sem fio é o da estrela-malha. A idéia dessa topologia é que os “nós sensores” com baixa energia não sejam dotados da capacidade de encaminhar mensagem; assim, apenas nós com mais capacidade energética têm a função de receber e retransmitir a informação. A figura 9, a seguir, representa o funcionamento dessa topologia. Em alguns casos, os nós que servem de ponte são alimentados por fontes externas. Esse tipo de topologia fornece uma comunicação robusta e versátil, mantendo o consumo de energia dos nós relativamente baixo. As desvantagens são a necessidade de um protocolo robusto, a exigência de que os “nós sensores” que servirão de retransmissores possuam maior capacidade energética e de processamento, além do aumento da latência da resposta (KRISHNAMACHARI, 2005; WILSON, 2005).

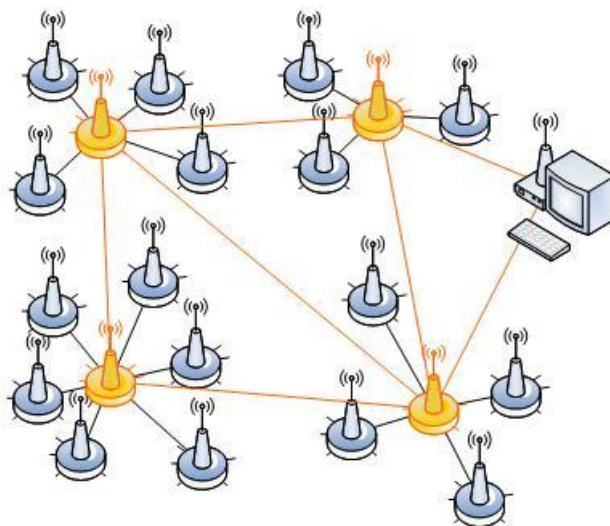


Figura 9: Topologia estrela-malha.

Fonte: Adaptado de Krishnamachari, 2005.

A escolha da topologia da rede depende muito dos requisitos da aplicação, como: tamanho da área de monitoramento, densidade de pontos de medição, capacidade computacional e energética dos “nós sensores”, tempo de latência exigido, etc. Após a escolha do tipo de topologia, é necessário um estudo detalhado de algoritmos de comunicação, quesito importante para otimizar o desempenho da rede.

2.3.3 Segurança

A criptografia das mensagens ajuda, em muitos casos, na segurança da informação; porém, este não é o único objetivo da segurança em redes de sensores sem fio. É importante ter-se certeza de que nenhuma informação recebida foi modificada em seu trajeto, pois podem ser geradas ações não desejadas, como, por exemplo, o acionamento do alarme de evacuação de uma indústria.

As redes de sensores sem fio são muito vulneráveis a ataques (YICK, MUKHERKEE e GHOSAL, 2008). Um dos problemas é a limitação computacional/energética dos sensores inteligentes, que não permitem a implementação de protocolos de comunicação robustos. Outro problema é que a informação trafega em um meio comum - o ar -, diferente de algumas redes baseadas em cabos e fios, em que o acesso desde o meio pode ser limitado (CALLAWAY JR, 2003).

2.3.4 Tempo de resposta

Tempo de resposta é o tempo que uma variação no mensurando demora para ser percebida após o momento em que ela realmente ocorreu (IEV, 2009). As redes de sensores sem fio, em comparação com outros tipos de redes, têm baixa exigência com relação à qualidade de serviço. Em geral, apresentam baixa taxa de transmissão, de poucos bits por hora. Assim, aceita-se que o tempo de resposta chegue à ordem de segundos ou até de minutos (CALLAWAY JR, 2003). Porém o tempo de resposta depende sempre da aplicação, existindo casos em que esse tempo precisa ser da ordem de microssegundos.

2.3.5 Taxa de transmissão

As redes de sensores sem fio têm uma taxa de transmissão limitada em comparação à de outras redes. É claro que isso é arbitrado pela aplicação; porém, normalmente fica em torno de 1 bit por segundo ou até menos (CALLAWAY JR, 2003). Para se manter essa taxa de transmissão tão baixa, fica praticamente inviável o uso de protocolos de

comunicação robustos como TCP/IP, uma vez que, devido ao tamanho do cabeçalho, a eficiência da rede pode cair significativamente.

Existem vários protocolos de comunicação sem fio, cada qual com sua peculiaridade. A figura 10 faz uma comparação entre alguns deles (ZHAO e GUIBAS, 2004; NATIONAL INSTRUMENTS, 2009). Como se pode ver, a escolha do protocolo de comunicação mais adequado depende de vários fatores, como distância entre pontos de medição, consumo energético, custo da comunicação, taxa de transmissão necessária, dentre outros.

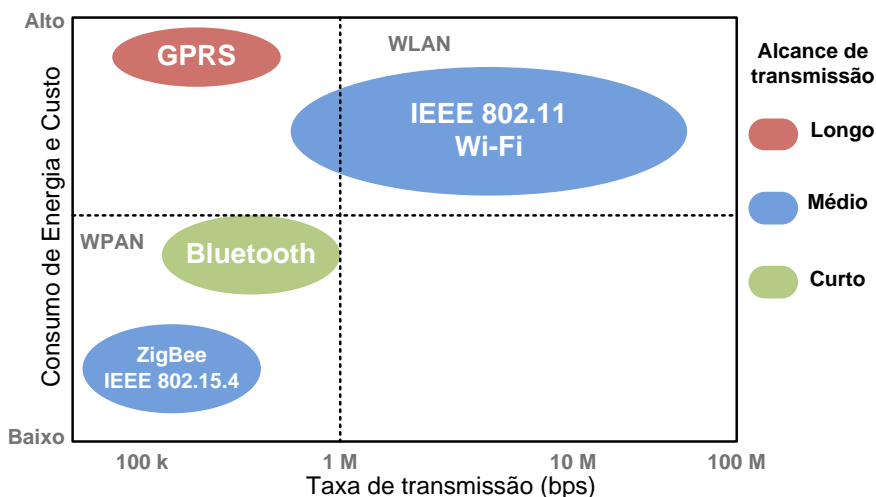


Figura 10: Comparação entre protocolos

Fonte: Adaptada de National Instruments, 2009.

2.3.6 Consumo de energia

O consumo exagerado de energia diminui o tempo de vida da rede. A definição do tempo de vida de uma rede de sensores depende da aplicação. Pode ser, por exemplo, o tempo em que o primeiro “nó sensor” parou de funcionar, ou o tempo em que a rede falhou em duas ou mais conexões (KARL e WILLIG, 2007). O tempo de vida da rede pode variar de dias até anos.

Aplicações de redes de sensores sem fio normalmente demandam componentes com baixo consumo de energia, pois, em muitos casos, a escolha por monitoramento sem fio é feita exatamente devido à dificuldade de acesso aos pontos de medição, ou à grande densidade de “nós sensores”, o que dificulta muito a recarga das baterias. Além do consumo dos componentes, também se deve observar o consumo exigido pelo protocolo de comunicação. Protocolos com o ZigBee (ALLIANCE, 2009) exigem baixo consumo energético; entretanto, apresentam limitações com relação ao alcance e à taxa de transmissão.

2.3.7 Custo

O baixo custo da produção de “nós sensores” é imprescindível, já que muitas das aplicações exigem uma grande quantidade de pontos de medição. Assim, é necessário buscar por componentes satisfatórios e com menores custos. Deve-se, outrossim, lembrar que o custo da rede não representa somente o custo inicial de fabricação e implementação; também devem ser considerados os gastos futuros com a manutenção. Despesas com a troca de baterias e com a comunicação devem ser computadas no custo total da rede (WILSON, 2005).

Algumas aplicações que necessitam de sistemas de comunicação especiais, seja utilizando satélites ou sistema telefônico, podem gerar custos elevados com o passar do tempo devido aos gastos com o serviço terceirizado de comunicação. Assim, a economia com relação à taxa de transmissão, além da questão do consumo de energia, é também financeiramente considerável.

2.3.8 Qualidade da informação

O principal objetivo das redes de sensores sem fio é medir; assim, de nada adianta um resultado de medição com uma incerteza maior de que a exigida pela aplicação. O balanço de incerteza desse tipo de sistema não é trivial, pois existe uma série de fatores que contribuem para a incerteza final. Deve-se, primeiramente, considerar as fontes de incertezas relacionadas à instrumentação tradicional, como, por

exemplo, a incerteza do transdutor e do circuito de condicionamento de sinal.

Além das fontes de incerteza provenientes de influências sobre o *hardware*, têm-se as incertezas derivadas dos algoritmos implementados sobre os valores no decorrer da cadeia de medição, seja uma simples média, ou algo mais complexo, como técnicas de fusão de dados. Há ainda as incertezas provenientes de parâmetros da rede, como, por exemplo, latência e perda de pacotes.

2.4 DESAFIO IMPOSTO PELAS REDES DE SENSORES SEM FIO

Levantados os requisitos exigidos pelas redes de sensores sem fio, é possível compreender a complexidade de se alcançar todos com uma única solução. A pirâmide, ilustrada na figura 11, representa por ordem de importância os requisitos que este trabalho tentará otimizar com o uso de algumas técnicas. A qualidade da informação e o consumo de energia são os dois mais importantes a serem considerados (POTTIE e KAISER, 2005); por este motivo, estão na base da pirâmide.

A incerteza almejada em um sistema de medição é sempre a menor possível, e em redes de sensores sem fio isso não é diferente. O desafio é como conseguir uma baixa incerteza de medição, ao mesmo tempo aumentando a eficiência energética da rede, diminuindo a taxa de transmissão, cortando custos e garantindo um baixo tempo de resposta. O capítulo seguinte tratará de técnicas que podem atender a estes requisitos, focando-se principalmente no custo, no consumo energético e na baixa incerteza.

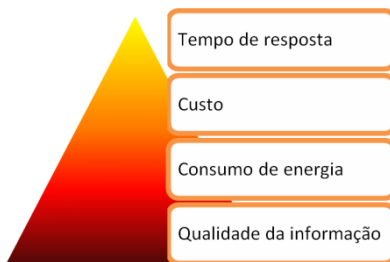


Figura 11: Pirâmide dos requisitos

Fonte: Autor

3 TÉCNICAS DE TRANSMISSÃO ADAPTATIVA

O baixo consumo energético é um dos principais desafios em redes de sensores sem fio (CALLAWAY JR, 2003; BULUSU e JHA, 2005). Existem vários estudos desenvolvidos nessa área que propõem diversas soluções para a conservação de energia da rede. A figura 12 mostra parte da taxonomia proposta por Anastasi (2008), com as possíveis opções encontradas para esse fim.

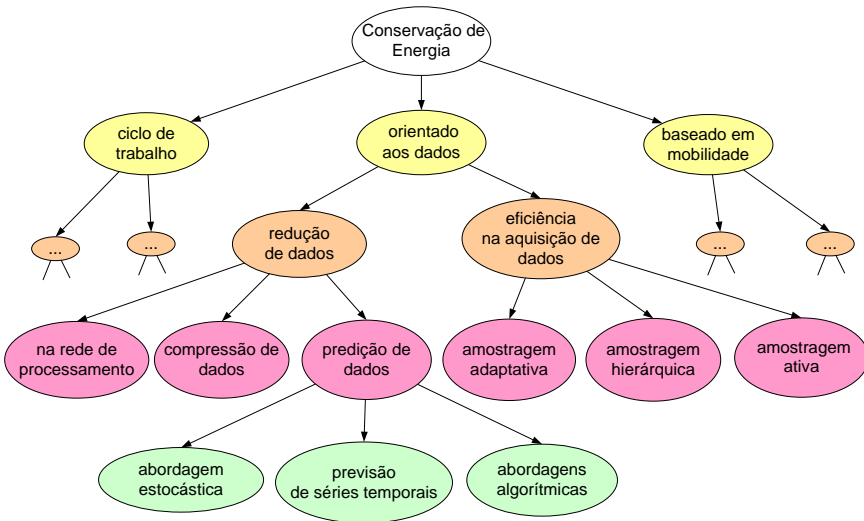


Figura 12: Taxonomia para conservação de energia em RSSFs

Fonte: Adaptado de Anastasi, 2008.

A proposta de estudo do presente trabalho combina técnicas de redução de dados com técnicas de eficiência na aquisição dos dados. No entanto, não se contemplou a questão da aquisição dos dados, mas a da transmissão dos dados. A idéia é buscar a redução do número de transmissões e do tamanho da mensagem transmitida, pois, na maioria das aplicações, são os pontos que mais exigem da fonte de energia. Além da economia energética, a redução do volume de dados transmitidos abate custos de operacionalidade da rede.

Utilizar uma taxa de transmissão igual à taxa de amostragem é a técnica mais comum, ou seja, toda vez que a unidade de sensoriamento

realiza uma medição, o valor é transmitido para a estação-base. A taxa de transmissão fixa é bastante confiável em termos metroológicos, pois todos os dados medidos são informados à estação-base e o próprio usuário pode decidir que tipo de filtragem ou interpolação aplicará sobre os valores. O problema desta técnica é o excesso de transmissão para alguns intervalos quando o mensurando se mantém quase constante. A figura 13 mostra esse tipo de comportamento: uma série transmissões que, se fossem mais espaçadas, não interfeririam na reconstrução do sinal.

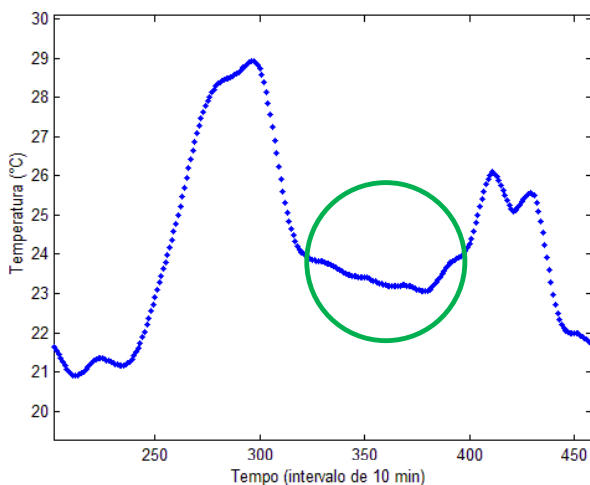


Figura 13: Concentração de pontos na taxa fixa de transmissão

Fonte: Autor.

Tendo em vista solucionar este problema, foi proposta a utilização de técnicas de taxa de transmissão adaptativas, conforme demonstrado na figura 14. Como se pode observar, a taxa de aquisição do sinal de medição (amostragem) é constante. Então, os dados medidos pelo sensor inteligente são aplicados ao algoritmo, que está sendo executado localmente, a fim de definir o momento em que a comunicação será estabelecida e também qual deve ser o conteúdo da mensagem transmitida. O objetivo é obter na estação-base a construção de um modelo de sinal que permita interpolar as medições não transmitidas, com um determinado grau de exatidão em relação aos valores reais do mensurando.

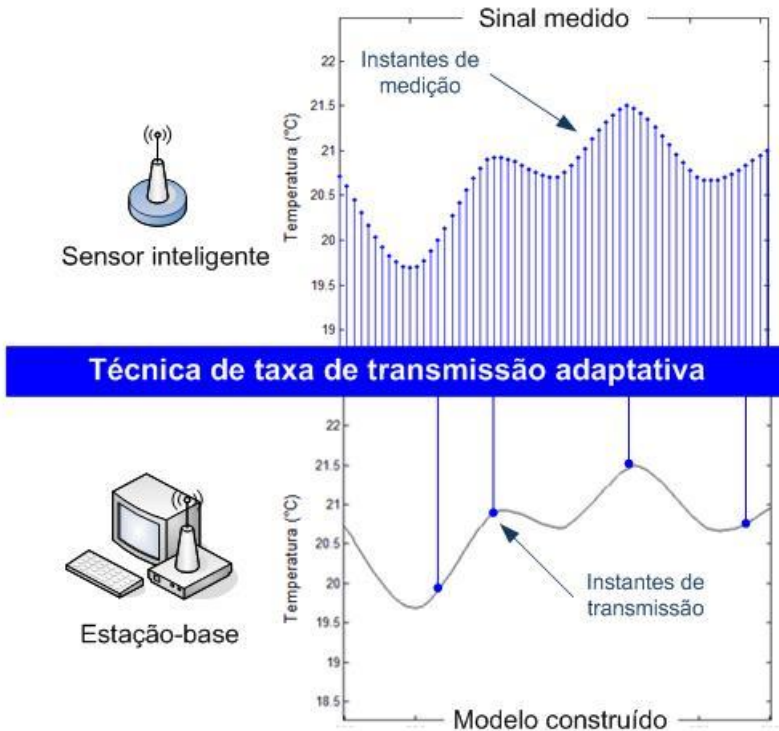


Figura 14: Técnica de taxa de transmissão adaptativa

Fonte: Autor.

Primeiramente, o tipo de técnica apresentada neste estudo tem por objetivo minimizar o consumo energético dos “nós sensores” e também reduzir gastos com relação ao serviço terceirizado de comunicação. Em segundo lugar, pretende garantir a qualidade da medição, o que significa que, mesmo com a redução do número de transmissões e do tamanho das mensagens, a incerteza final do resultado de medição deve ser pouco afetada. Em terceiro lugar, aspira a encurtar o tempo de resposta do sistema de medição.

3.1 TÉCNICAS EXISTENTES

Embora existam várias técnicas para taxas de transmissão adaptativas, poucas são as que se enquadram na proposta do trabalho, que é buscar técnicas que garantam quatros requisitos básicos:

- tenham como métrica de decisão o sinal de medição, mas que não necessitem da informação de “nós sensores” vizinhos;
- permitam controlar a incerteza sobre o valor apresentado pelo modelo na estação-base com relação ao valor medido pelo sensor inteligente;
- possam ser implementadas localmente no sensor inteligente, com baixa necessidade de processamento e de memória;
- limitem o volume de dados em cada instante de transmissão, sem necessidade de enviar todas as medições realizadas.

A seguir serão apresentadas as técnicas encontradas na literatura que suprem tais requisitos.

3.1.1 Send-On-Delta

A técnica Send-On-Delta (SOD) é muito utilizada em aplicações de redes de sensores sem fio para reduzir a taxa média de transmissões realizadas pelos “nós sensores” (MISKOWICZ, 2006; NGUYEN, 2007). Por esta técnica, a amostragem é realizada a intervalos constantes, mas o sensor inteligente decide realizar a transmissão à estação-base somente quando a diferença absoluta entre o último valor medido e o último valor transmitido for maior que um limiar predeterminado (Δy), como demonstrado na figura 15. O fluxograma da figura 16 explica a lógica do algoritmo implementado pela técnica.

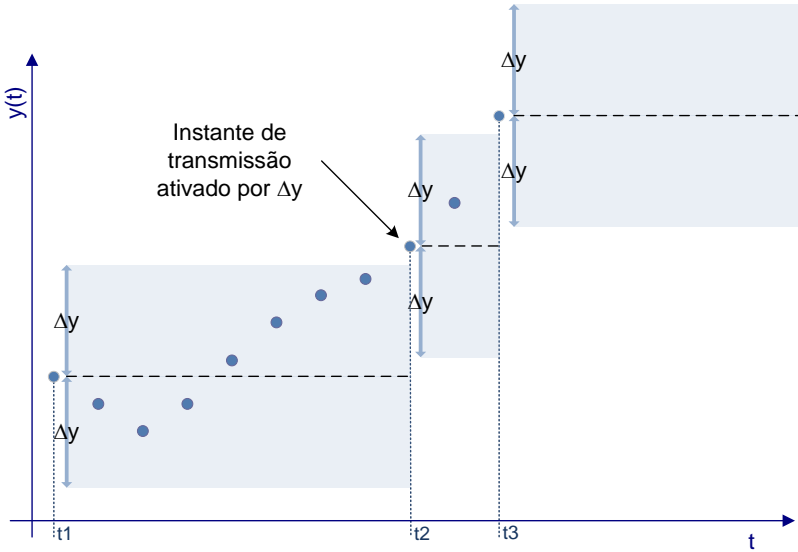


Figura 15: Funcionamento da técnica Send-On-Delta

Fonte: Adaptado de Nguyen e Suh, 2009.

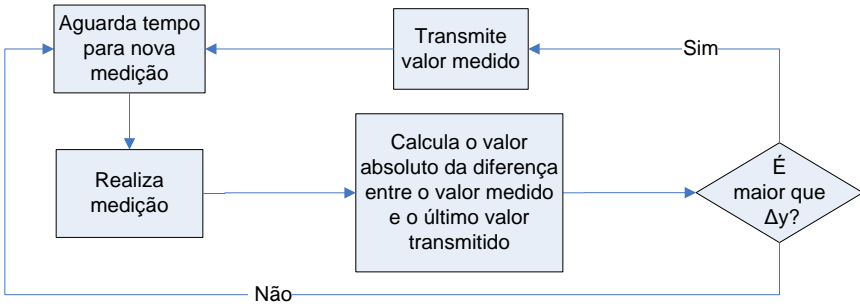


Figura 16: Fluxograma do algoritmo Send-On-Delta

Fonte: Autor.

3.1.2 Send-On-Delta com controle temporal

Um problema encontrado na técnica SOD é quando o mensurando oscila por um longo período de tempo entre os limites impostos por Δy (figura 17) e não ativa o envio de nenhuma mensagem à estação-base. Este intervalo em que a estação-base fica sem receber informação deixa o usuário em dúvida sobre a integridade do sistema, pois pode ser decorrente de alguma falha no sistema, retardando a tomada de ações corretivas.

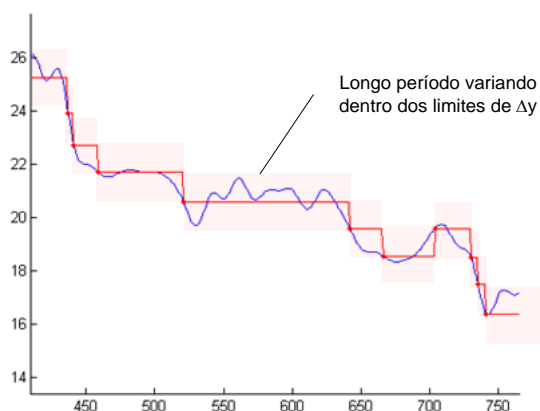


Figura 17: Oscilações no intervalo de Δy por longos períodos

Fonte: Autor.

Existem várias alternativas para a detecção de falhas em redes de sensores sem fio (CHEN, KHER e SOMANI, 2006; LEE e CHOI, 2008), mas uma solução simples para resolver o dilema imposto pela técnica SOD é a utilização da técnica proposta por Nguyen (2007), SOD com um controle temporal (SOD+t). Esta técnica usa a mesma lógica da SOD, porém com um adicional: determina um intervalo máximo em que o sistema pode ficar sem receber informação. Assim, se até este intervalo a estação-base não receber nenhuma transmissão do “nó sensor”, um alerta de falha é repassado para o usuário.

A técnica SOD+t funciona da seguinte forma: quando o sensor inteligente detecta que o valor do mensurando sofreu uma variação maior que o limiar Δy , o valor atual medido é enviado. Porém, se o

mensurando oscilar dentro dos limites impostos por Δy por um longo período, o sensor inteligente ativa o envio do dado com relação ao controle temporal determinado por Δt , conforme ilustrado na figura 18. O fluxograma da figura 19 explica a lógica do algoritmo implementada pela técnica.

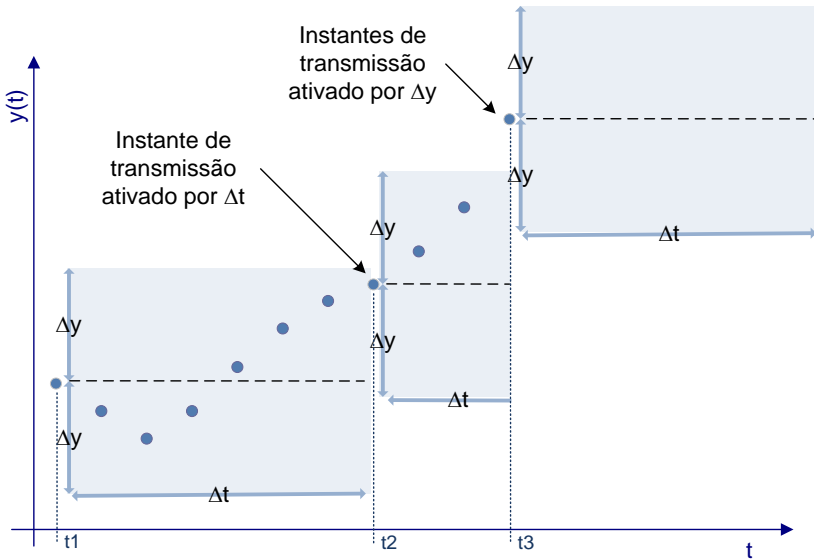


Figura 18: Funcionamento da técnica Send-On-Delta com controle temporal

Fonte: Autor.

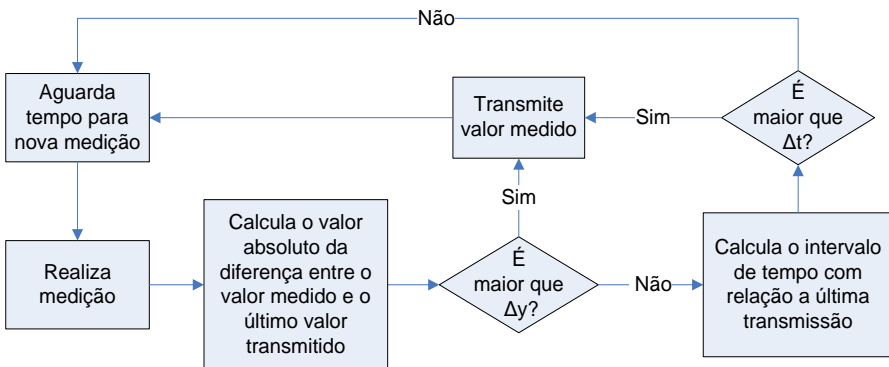


Figura 19: Fluxograma do algoritmo Send-On-Delta com controle temporal

Fonte: Autor.

Esta técnica aumenta um pouco a média do número de transmissões; entretanto, garante para o usuário o controle que os “nós sensores” continuam ativos. Tanto esta, quanto a Send-On-Delta convencional asseguram que o valor atual na estação-base está entre o limiar imposto por Δy com relação ao último valor medido pelo sensor inteligente.

3.1.3 Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anteriormente medido

Com a finalidade aperfeiçoar a técnica Send-On-Delta, diminuindo ainda mais o número de transmissões, Nguyen (2007) propôs uma técnica chamada de Send-On-Delta com predição linear (SOD+md). Ela utiliza uma extrapolação linear que tenta estimar qual será o próximo valor do mensurando; se a diferença absoluta entre o valor extrapolado e o valor medido pelo “nó sensor” for maior que o limiar Δy , o valor medido é transmitido.

A predição linear é construída sempre com base no valor que ficou fora dos limites de Δy e no valor anterior medido pelo sensor inteligente. Como a extrapolação também precisa ser realizada pela estação-base, é preciso enviar os dois valores. Assim, diferente das técnicas anteriormente explanadas, é preciso transmitir dois valores, o que aumenta o volume de dados na rede. A figura 20 representa o funcionamento da técnica e o fluxograma da figura 21 explica a lógica do algoritmo implementada.

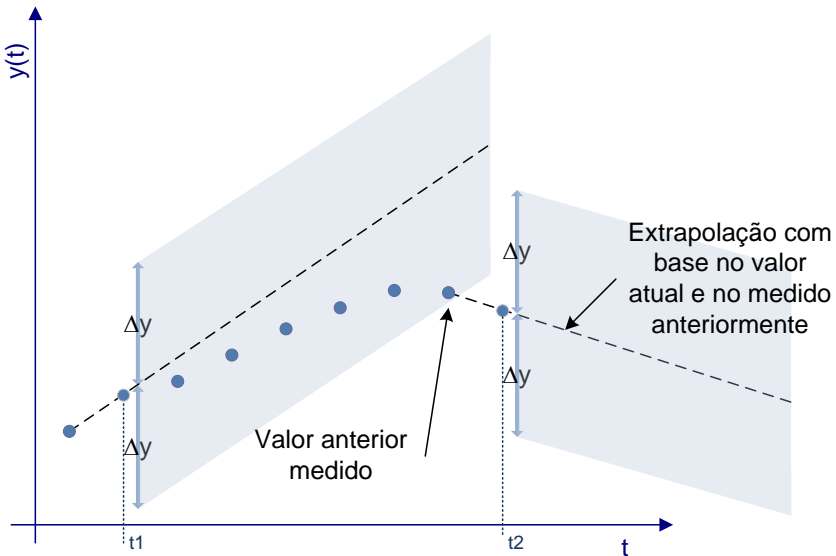


Figura 20: Funcionamento da técnica Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anterior medido

Fonte: Autor

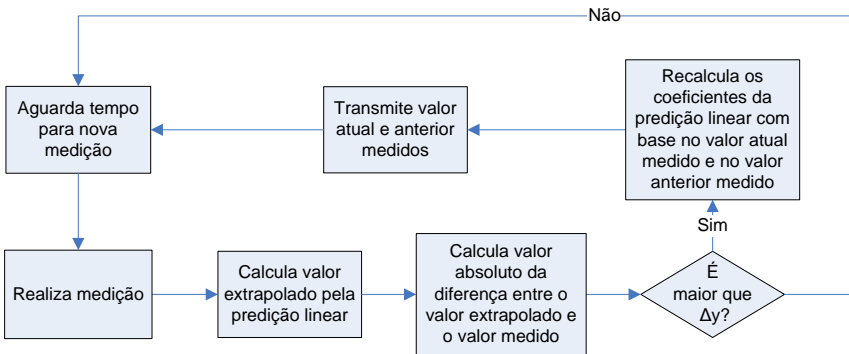


Figura 21: Fluxograma do algoritmo Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anterior medido

Fonte: Autor

3.2 AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS

As técnicas devem proporcionar a reconstrução de um modelo de sinal na estação-base que represente bem os dados medidos pelos sensores inteligentes, não precisando transmitir todos os valores medidos. Então, quando a estação-base recebe os valores selecionados pela técnica, é preciso aplicar algum tipo de interpolação sobre os pontos, a fim de se estimar os valores que não foram transmitidos. Para avaliar o desempenho de cada técnica, é necessário usar ferramentas estatísticas de ajuste de modelo, comparando os pontos interpolados na estação-base com todos os pontos medidos no sensor inteligente (WAELE e BROERSEN, 2000; ROLAIN, SCHOUKENS e VANDERSTEEN, 1998).

3.2.1 Suposições

A utilização de ferramentas estatísticas para avaliação de ajuste de modelo ao conjunto de dados medidos requer uma série de suposições. As suposições que devem ser consideradas são que os dados apresentam um erro aleatório, não correlacionado com o sinal, não correlacionado temporalmente, com média zero e variância constante por toda a extensão do sinal. Caso alguma dessas considerações não seja adequada, qualquer análise pode estar equivocada (NIST, 2009; MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

3.2.2 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação (R^2) é frequentemente utilizado para julgar a adequação de um modelo. É referido como a quantidade de variabilidade nos dados explicada ou considerada pelo modelo (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

O R^2 pode variar entre zero e um. Quanto mais próximo de um, representa que o modelo melhor se ajustou aos dados. Porém, R^2 é um indicativo fraco, não garantindo realmente que o modelo está bem

ajustado. Por essa razão, no presente estudo não se utilizará esse indicador para avaliar as técnicas (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Existem outras ferramentas numéricas para validação de modelos, mas somente são indicadas para casos raros, em que a análise gráfica é dificultada por algum motivo. Como os modelos expostos neste trabalho não se enquadram nesses casos, toda a análise da adequação do modelo será efetuada de forma gráfica (NIST, 2009).

3.2.3 Histograma do resíduo

Para o estudo de modelos construídos sobre amostras irregulares, a análise do ajuste da curva poderá ser realizada extraindo uma amostra regular do sinal medido (WAELE e BROERSEN, 2000). Quando se tem o sinal medido para todos os pontos interpolados pelo modelo, é possível calcular o resíduo do ajuste da curva. O resíduo (ϵ), para um modelo de interpolação, é a diferença entre cada valor medido e o valor correspondente previsto pelo modelo, como ilustrado na figura 22 (NIST, 2009; JOHNSON, 1994; CHAPRA e CANALE, 2006; MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

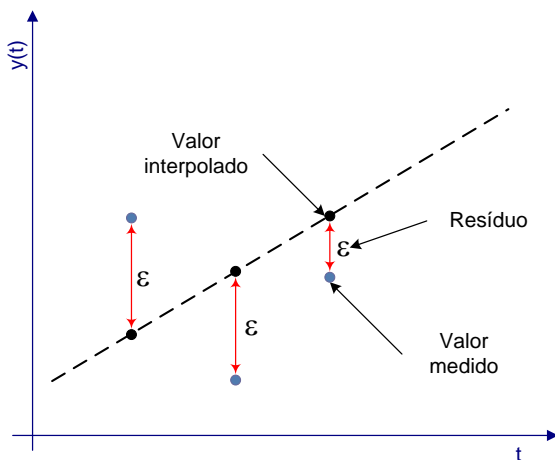


Figura 22: Resíduo da interpolação

Fonte: Adaptado de Johnson, 1994.

Como se parte da suposição de que o sinal medido é resultado do sinal verdadeiro do mensurando sobreposto a um ruído com distribuição normal, o resíduo também deve apresentar o mesmo tipo de distribuição, caso o modelo seja adequado para a série de dados. A forma mais fácil para analisar o tipo de distribuição do resíduo é através de um histograma (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978).

Quando a amostra é pequena, devem-se empregar outras ferramentas estatísticas para análise, pois o histograma não refletirá o comportamento verdadeiro do resíduo, conforme demonstrado na figura 23. Devido ao fato de o número de amostras neste estudo ser suficientemente elevado para o uso de histograma, será a única ferramenta utilizada para a análise do tipo de distribuição.

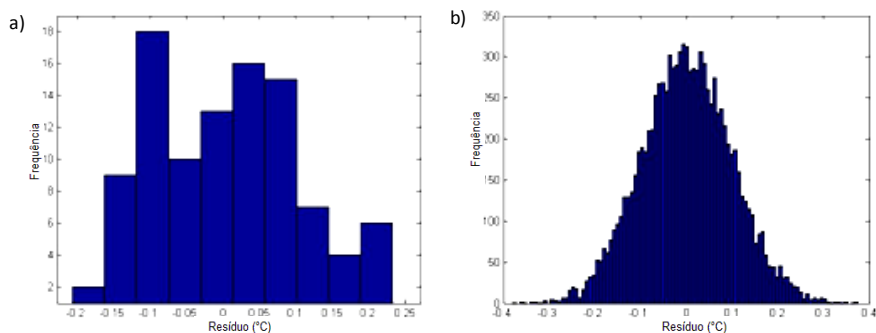


Figura 23: Histograma com amostras insuficientes (a) e suficientes (b)

Fonte: Adaptado de NIST, 2009.

3.2.4 Autocorrelação do resíduo

O histograma não garante, por si só, que o modelo se ajusta bem aos dados. É indicado o uso de gráficos para observar se o resíduo é autocorrelacionado, pois, se for, a estimativa do desvio padrão do erro será tendenciosa e possivelmente levará a conclusões erradas sobre o ajuste do modelo (NIST, 2009).

Uma forma de observar se o resíduo apresenta autocorrelação é montando um gráfico de dispersão do valor do resíduo atual pelo valor do resíduo subsequente. Caso o gráfico apresente uma estrutura que não tenha aparência aleatória, tem-se um indicativo de que o resíduo é

autocorrelacionado (NIST, 2009). A figura 24 mostra um gráfico fruto de resíduos autocorrelacionados e outro de resíduos não correlacionados.

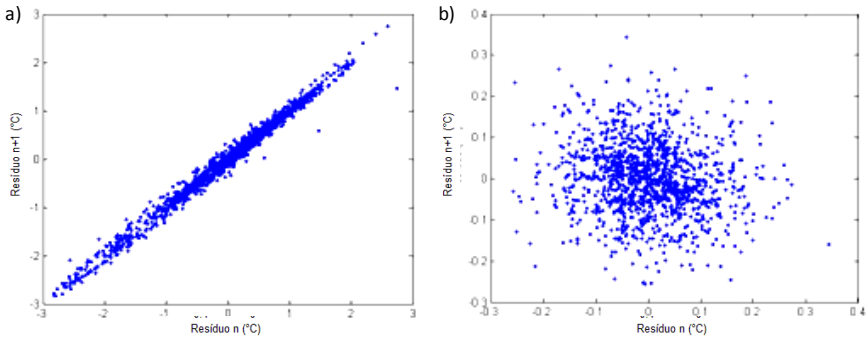


Figura 24: Gráfico com resíduos autocorrelacionados (a) e com resíduos não correlacionados (b)

Fonte: Adaptado de NIST, 2009.

3.2.5 Gráfico da dispersão do resíduo

O gráfico da dispersão do resíduo é a ferramenta mais forte para a análise do ajuste do modelo. Quando se fala em dispersão do ruído, não se está referindo somente ao gráfico do ruído pelo tempo, mas a toda e qualquer variável que de alguma forma possa ter relação com o resultado de medição.

É preciso uma análise visual minuciosa do gráfico da dispersão do resíduo para perceber falhas no método. Existe uma série de conclusões que podem ser tiradas com o uso e a interpretação correta dos gráficos gerados por esta ferramenta (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). A figura 25 (a) exemplifica um caso em que o modelo não se ajusta bem aos dados, no qual é possível notar uma correlação entre os valores. Já o gráfico da figura 25 (b) representa um modelo bem ajustado, pois o resíduo apresenta comportamento similar ao do ruído suposto.

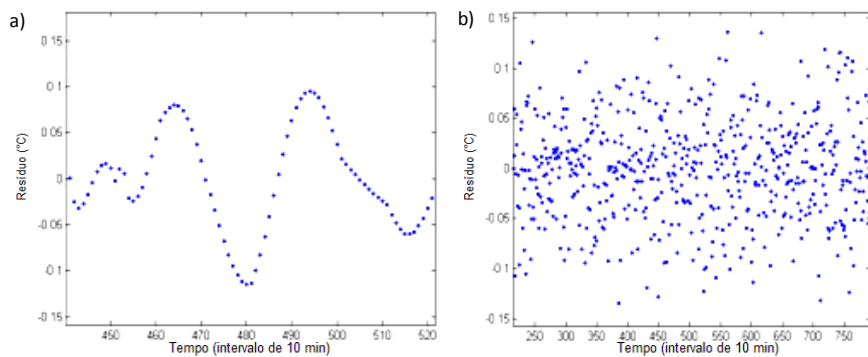


Figura 25: Gráfico da dispersão do resíduo com modelo não ajustado (a) e com modelo ajustado (b)

Fonte: Adaptado de NIST, 2009.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Não existe um modelo de reconstrução de sinal geral que englobe todas as aplicações. Assim, para se desenvolver um bom modelo, a primeira coisa que se deve ter é um conjunto de dados que reflita bem o comportamento do mensurando que se deseja investigar. O conjunto de dados que será utilizado para a continuação desta dissertação foi coletado da aplicação-chave do Projeto SensInt, monitoramento ambiental.

4.1 PROJETO SENSIINT

A Fundação CERTI, sob encomenda do Ministério de Ciência e Tecnologia, iniciou o Projeto SensInt. O objetivo central deste projeto de pesquisa e desenvolvimento em tecnologia de informação está na conceituação, modelagem e prototipagem de um “Sistema Modular de Sensores Inteligentes e Integráveis”, como elemento estratégico para a modernização de serviços, processos, sistemas e produtos tecnológicos (FUNDAÇÃO CERTI, 2007).

O Projeto SensInt não foi criado para suprir uma aplicação específica, mas, em sua primeira versão, visou abranger o monitorando ambiental de grandes áreas. Balizadas pela aplicação-chave, surgem as características necessárias à implementação do primeiro protótipo do projeto.

4.1.1 Monta-SMIR

Monta-SMIR é o nome de um sistema de instrumentação modular desenvolvido no Projeto SensInt que aplica o conceito de sensores inteligentes. Este sistema busca proporcionar benefícios como:

- maior facilidade no desenvolvimento de aplicações;

- sistemas mais fáceis de instalar e manter;
- rápida reposição de transdutores;
- modelos padronizados para dados e controle de transdutores;
- mobilidade e alta disponibilidade;
- recursos metrológicos avançados;
- processamento distribuído;
- auto-configuração e robustez;
- funções inovadoras a baixo custo.

O desenvolvimento do Monta-SMIR foi baseado na arquitetura apresentada nas normas da família IEEE 1451, a qual prevê a separação do projeto do transdutor, da especificação da rede de comunicação, dividindo o modelo tradicional de transdutor em duas partes principais (IEEE, 2003). A figura 26 representa os módulos em duas redes diferentes.

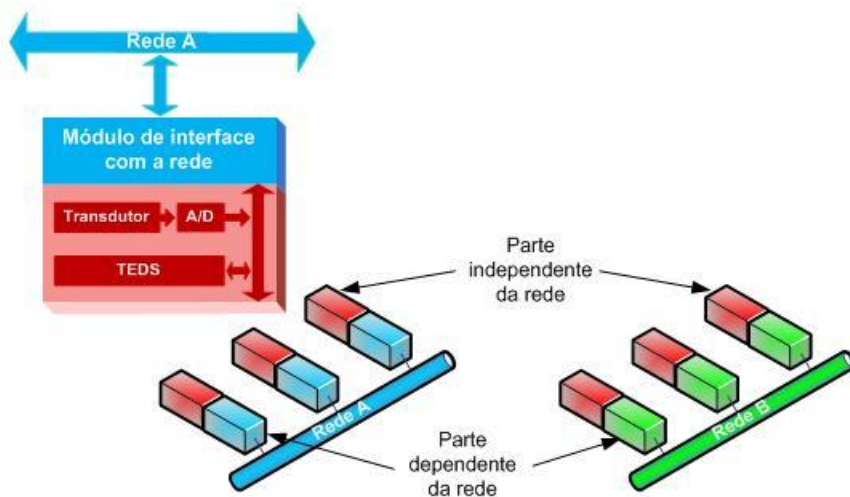


Figura 26: Módulos do sensor inteligente

Fonte: Adaptado de IEEE, 2003.

A primeira parte, que independe da rede, contém os transdutores, o circuito de condicionamento de sinais e a TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet*). As TEDSs são projetadas para conterem informações padronizadas que identifiquem e descrevam o transdutor, como, por exemplo, fabricante, número de série, modelo, faixa de

medição, curva de resposta, curva de calibração e muitas outras contempladas na norma. A segunda parte, dependente da rede, é responsável por realizar a interface entre a rede e a parte independente (IEEE, 2004; WYNN, 2004), como representado na figura 26.

O Monta-SMIR é constituído de um barramento principal, no qual são encaixados os módulos de condicionamento de sinal, o módulo de processamento/comunicação e o módulo de energia. A figura 27 demonstra os principais elementos que constituem o Monta-SMIR.

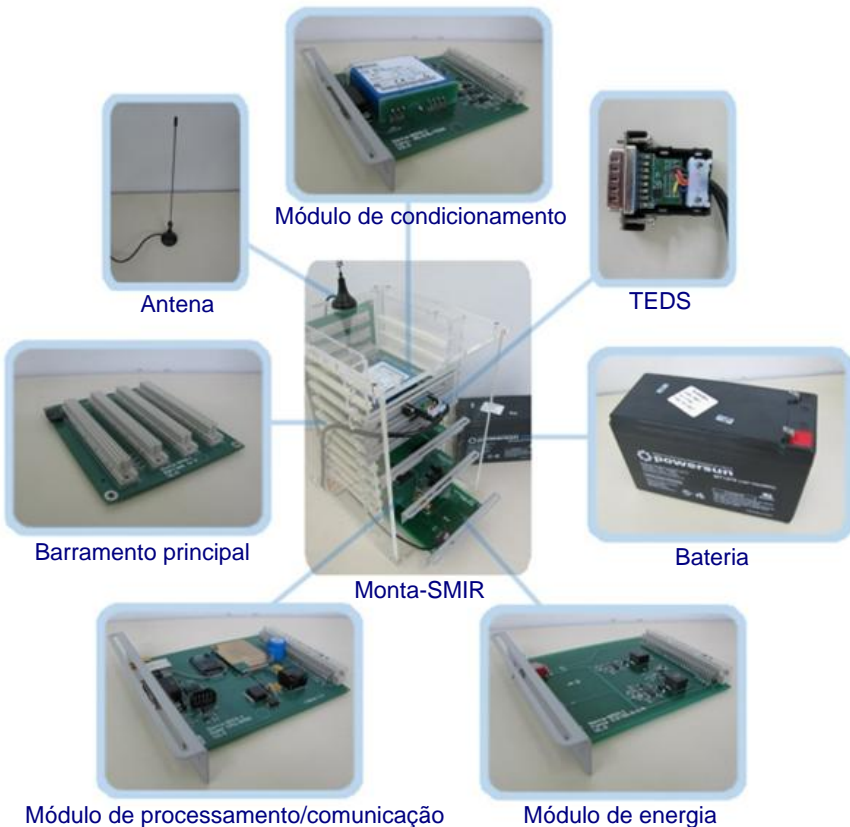


Figura 27: Monta-SMIR

Fonte: Autor.

Os módulos de condicionamento de sinal foram projetados para abranger a maior gama possível de transdutores comerciais. No caso dos transdutores utilizados no Projeto SensInt, nenhum veio com TEDS de fábrica; então, memórias físicas foram acopladas aos conectores de cada transdutor com as respectivas TEDSs, prática contemplada pela IEEE 1451.4. Assim, o valor da medição é mandado em paralelo com o sinal digital que contém as informações das TEDSs. Todos os transdutores foram calibrados e suas curvas de calibração, armazenadas em suas respectivas TEDSs.

O módulo de processamento/comunicação tem como elemento principal um microprocessador que possui memória interna e sistema de comunicação GPRS (General Packet Radio Service). Optou-se por esse protocolo devido à grande distância entre os pontos de monitoramento; apesar de esse tipo de comunicação estar entre os que mais consomem energia, possuir baixa taxa de transmissão e necessitar de uma rede terceirizada, foi a solução que melhor atendeu à demanda da aplicação.

Devido à baixa eficiência energética do módulo de comunicação, o módulo de energia foi projetado para suportar baterias secundárias, acopladas a painéis de energia solar para recarregar o sistema. Sendo assim, o módulo de energia supre bem as necessidades do sistema e o ponto mais crítico para o Projeto SensInt passa a ser o custo da comunicação via sistema celular .

4.1.2 Aplicação do Projeto SensInt

A aplicação-chave da primeira etapa do projeto foi o monitoramento ambiental, que teve como produto uma estação de monitoramento ambiental autônoma, instalada no Campus da UFSC. A estação, que tem forma de totem (figura 28), está equipada com transdutores de temperatura, umidade, precipitação pluvial e nível do lençol freático.



Figura 28: Totem instalado na UFSC

Fonte: Autor.

Além do totem, foram instalados linígrafos para medição de nível dos riachos nos arredores do Sapiens Parque, com o intuito de compreender fenômenos que ocorrem na bacia hidrológica local. Também foi instalada no Sapiens Parque uma estação de monitoramento ambiental em seu formato tradicional (BROCK e RICHARDSON, 2001), mais robusta e dotada de transdutores mais exatos. A localização geográfica de cada estação de medição está representada na figura 29.

Todas as estações transmitem via tecnologia celular GPRS os valores medidos para um servidor, que, então, disponibiliza as informações no portal do Projeto SensiInt na internet (www.sensiint.org.br). O usuário, ao acessar o portal, seleciona a estação conforme a localidade e depois o tipo de grandeza que deseja observar, podendo visualizar o valor estimado da grandeza para aquele momento, ou acessar o banco de dados para valores medidos. A figura 30 representa o funcionamento da rede SensiInt implementada.



Figura 29: Estações de medição

Fonte: Fundação CERTI.

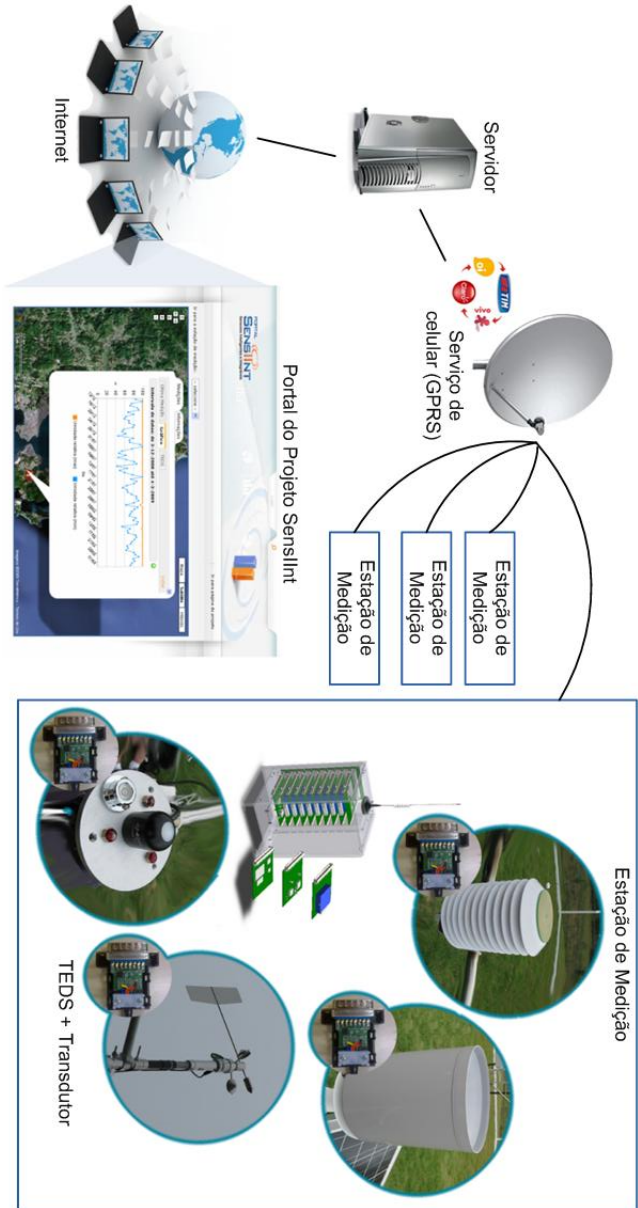


Figura 30: Rede do Projeto SensiInt
Fonte: Autor.

4.2 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Com a finalidade de diminuir o consumo energético e, principalmente, o gasto com comunicação dentro da aplicação do Projeto SensIIInt, buscaram-se técnicas de taxa de transmissão adaptativas, já apresentadas no capítulo 3. Para avaliar o comportamento das técnicas e a influência de cada uma sobre o resultado de medição, desenvolveu-se um simulador computacional. No ambiente de simulação, são aplicados valores sobre as técnicas como se fossem a leitura dos sensores inteligentes e conforme a decisão de cada técnica sobre quando e o que transmitir, o simulador reconstrói o sinal de medição da mesma forma que o servidor faria para disponibilizar ao usuário.

4.2.1 Dados utilizados

Para evitar a utilização de séries de tempo pouco representativas dos fenômenos reais, decidiu-se usar na simulação dados baseados em valores de temperatura ambiente, coletados a cada 10 minutos pelo totem que se encontra no campus da UFSC. Realizou-se uma análise espectral do sinal, a fim de averiguar sua largura de banda, efetuando-se, em seguida uma filtragem passa-baixas com o objetivo de reduzir o ruído de alta frequência. O propósito de usar este sinal é dar à análise certo grau de realismo e facilidade de interpretação, sem entrar no mérito da discussão da filtragem de quanto do sinal original foi eliminado.

O sinal resultante da filtragem foi considerado neste trabalho como o sinal verdadeiro, ou seja, um sinal de medição sem nenhum erro. A adequação do sinal a uma aplicação real foi realizada com a adição de um ruído com distribuição normal e desvio padrão de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este valor de desvio padrão é uma superestimativa do comportamento em campo do transdutor de temperatura da estação metrológica instalada no Sapiens Parque, no qual se pretende aplicar as técnicas aqui estudadas. Conforme o certificado de calibração (ANEXO A), este transdutor apresenta, após correção, uma incerteza expandida de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Apesar de se estar aplicando a correção no Projeto SensIIInt, neste valor de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ainda estão contidos erros sistemáticos não corrigidos. Os erros sistemáticos têm pouca influência sobre a decisão das técnicas; portanto, serão desconsiderados nesta simulação. Assim, o mais crítico são os

erros aleatórios que estão bem representados pelo ruído gerado pelo simulador, pois o desvio padrão do ruído de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ equivale a uma incerteza expandida de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o mesmo fator de abrangência utilizado no certificado, o que corresponde ao dobro da incerteza do certificado de calibração do transdutor de temperatura. Foi preciso recriar este sinal para garantir as suposições apresentadas em 3.2.1.

4.2.2 Reconstrução do modelo

As técnicas enviam valores discretos para o servidor; assim, algum tipo de curva precisa ser ajustado aos dados para estimar os pontos intermediários que não foram transmitidos (CHAPRA e CANALE, 2006). Existem diversas formas de interpolação entre pontos (RUGGIERO e LOPES, 1996; JOHNSON, 1994; CHAPRA e CANALE, 2006); porém, o simulador irá utilizar interpolação linear, por se tratar de uma técnica simples e robusta para amostras não-regulares (WAELE e BROERSEN, 2000; ROLAIN, SCHOUKENS e VANDERSTEEN, 1998).

Além da interpolação dos pontos que ficarão armazenados no banco de dados do servidor, o simulador também gera uma predição momentânea que corresponde à resposta que o usuário tem quando está acompanhando o valor estimado da grandeza para aquele momento. A figura 31 exemplifica os dois sinais para o caso da técnica SOD e SOD+md.

Para a reconstrução do modelo, as técnicas foram ajustadas de forma que:

- a predição momentânea, que é uma estimativa da grandeza para aquele momento, deve apresentar um erro máximo de $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ com relação ao último valor medido ($\Delta y = 1$). Este valor deve ser alto suficiente para que a variação do ruído não interfira constantemente na decisão da técnica e baixo o suficiente para que a reconstrução do modelo represente bem o mensurando;
- o intervalo máximo de tempo entre as amostras recebidas pelo servidor deve ser de 3 horas, a fim de possibilitar o controle sobre a integridade do sistema ($\Delta t = 18$). Este valor deve ser alto suficiente para manter uma boa eco-

nomia no número de transmissões e baixo o suficiente para minimizar o tempo de ações de reparo.

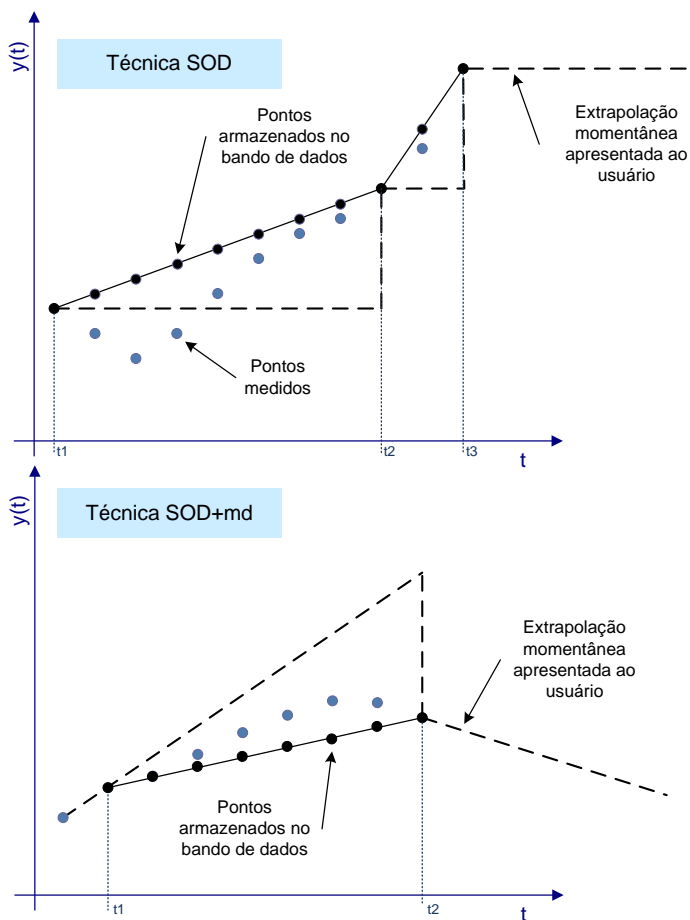


Figura 31: Modelos considerados

Fonte: Autor.

4.2.3 Geração de gráfico e calculo de valores

Tendo disponíveis os dados simulados correspondentes ao conjunto de valores verdadeiros do mensurando, o conjunto de valores medidos pelos “nós sensores” (valores simulados como verdadeiros, sobrepostos por ruídos simulados) e o conjunto de valores correspondentes aos modelos construídos no servidor, é possível avaliar muito bem o desempenho de cada técnica. O simulador executa esta avaliação em duas etapas. Na primeira etapa, na qual a saída são as ferramentas estatísticas apresentadas no capítulo 3, se analisa se as técnicas proporcionam um modelo que se ajusta à série de dados. Concluído que o modelo está bem ajustado ao conjunto de dados, passa-se para a segunda etapa, a avaliação de incerteza baseada no método de Monte Carlo (DONATELLI e KONRATH, 2004; MOSCATI, MEZZALIRE e SANTOS, 2004; ISO, 2004); assim, é possível estimar quanto cada técnica influi na incerteza final do resultado de medição. As avaliações das técnicas serão apresentadas no capítulo a seguir.

5 APRESENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS NOVAS TÉCNICAS

A utilização da técnica de transmissão adaptativa deve ser cuidadosamente avaliada. É preciso ter-se uma boa metodologia de validação para saber se ela é adequada à aplicação. Caso contrário, é possível que se estejam adicionando incertezas não conhecidas sobre o resultado final de medição. Além disso, uma boa metodologia ajuda a compreender quais são os problemas apresentados pelas técnicas, abrindo a possibilidade de aprimoramento.

A metodologia utilizada para avaliar se as técnicas de taxa de transmissão adaptativa proporcionam um bom ajuste aos valores coletados foi baseada em NIST, (2009), que apresenta três passos básicos para validação de um modelo:

- seleção do modelo;
- ajuste do modelo aos dados;
- análise do modelo.

O passo referente à análise do modelo é o mais importante, pois, caso indique uma não-adequação ao conjunto de dados medidos, será necessária a tomada de ações para seleção de um modelo mais apropriado. Neste capítulo estão contemplados os testes das técnicas apresentadas no capítulo 3 e conforme as limitações decorrentes dos modelos resultantes de cada técnica, novas técnicas serão propostas para efeito de um melhor ajuste aos dados.

5.1 APRESENTAÇÃO DAS NOVAS TÉCNICAS

Selecionadas as técnicas de taxa de transmissão adaptativa que se enquadram nos requisitos apresentados em 3.1, utilizou-se o simulador para avaliar o quanto o modelo resultante de cada uma é bom. Com base nos resultados apresentados a seguir, novas técnicas são propostas para tentar resolver as limitações das técnicas testadas.

5.1.1 Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anterior transmitido

A primeira técnica analisada foi a Send-On-Delta com predição linear, com base no ponto anterior medido (SOD+md). Esta apresentou problema em relação ao desempenho no número de transmissões, pois, quando o sinal de medição está contaminado pelo ruído, a predição se desvia rapidamente dos valores medidos. Para o mesmo intervalo de valores, a figura 32 (a) demonstra o comportamento da técnica sem adição de ruído; a figura 32 (b) com adição de ruído. Como pode se notar na figura 32 (b), as predições se distanciam mais rápido dos valores medidos, do que as predições da figura 32 (a); conseqüentemente, os instantes de transmissão no intervalo aumentam, no exemplo em questão de 5 para 12.

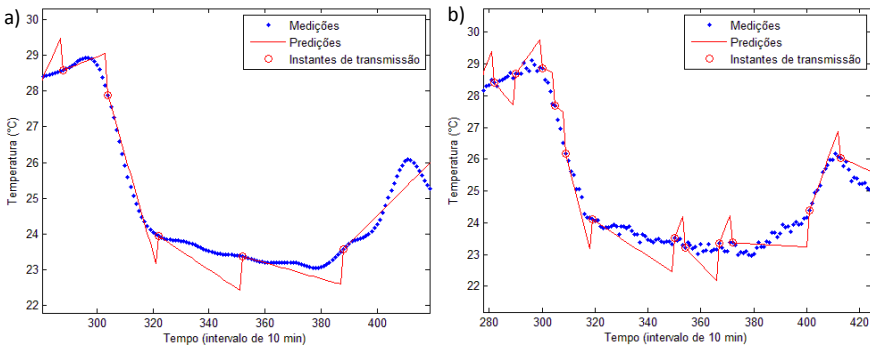


Figura 32: Comportamento da técnica SOD+md sem a presença de ruído (a) e com a presença de ruído (b)

Fonte: Autor.

Vista essa limitação da técnica em questão, propõe-se um aprimoramento trocando a base da predição linear do ponto anterior medido para o ponto anterior transmitido. A lógica da técnica continua a mesma: a predição linear tenta estimar o comportamento do mensurando e se a diferença absoluta entre o valor predito e o valor medido for maior que o limiar Δy , o dado é transmitido. A figura 33 representa o funcionamento da técnica e a figura 34 é o fluxograma do algoritmo.

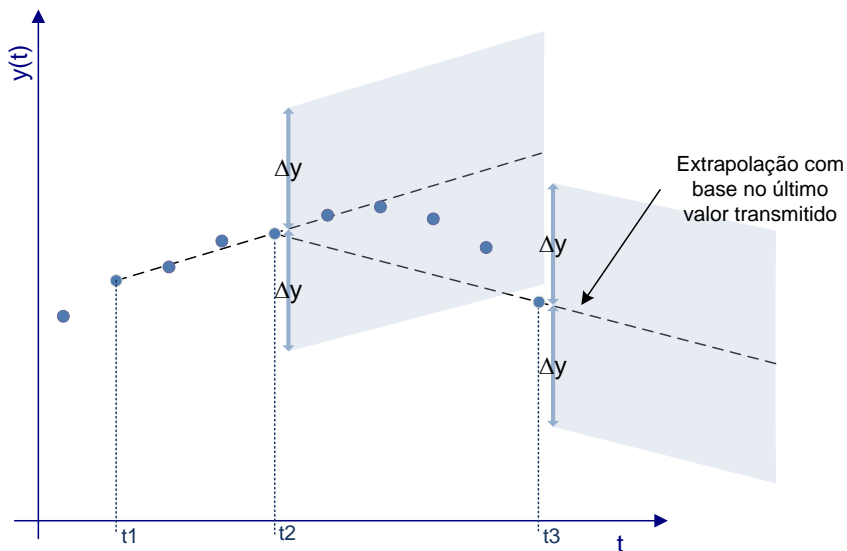


Figura 33: Funcionamento da técnica Send-On-Delta com previsão linear com base no valor anterior transmitido

Fonte: Autor.

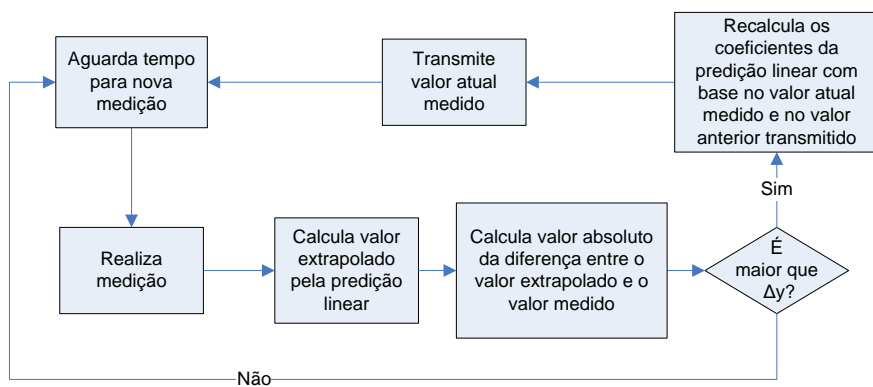


Figura 34: Fluxograma da técnica SOD+tx

Fonte: Autor.

A técnica Send-On-Delta com predição linear, com base no valor anterior transmitido (SOD+tx), em relação à técnica SOD+md, é mais robusta a ruídos, além de não exigir o envio de um valor adicional. A figura 35 demonstra o comportamento da técnica SOD+tx para a mesma série de valores da figura 32 (b), sendo possível notar que com o uso desta técnica as predições não se afastam tão abruptamente dos valores medidos, melhorando o desempenho em relação ao número de transmissões, reduzindo os instantes de transmissão no intervalo em questão de 12 para 8.

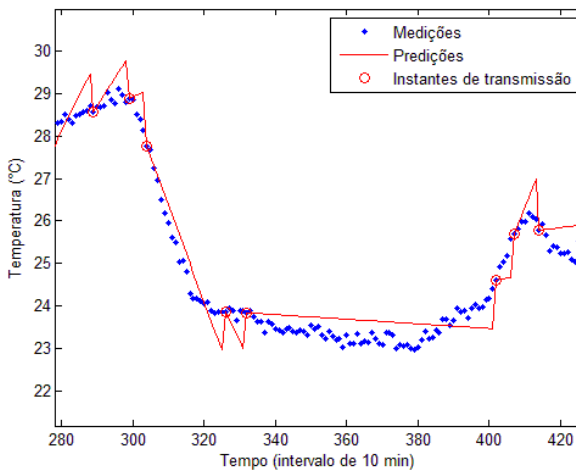


Figura 35 Comportamento da técnica SOD+tx com a presença de ruído

Fonte: Autor.

5.1.2 Send-On-Delta com ponto adicional

Um problema encontrado na técnica SOD é que o sinal apresenta uma variação muito próxima do limiar estabelecido pela aplicação, mas não chega a realizar a transmissão. Com base na idéia da técnica de SOD+md, que exige o envio de um valor adicional para que o servidor seja capaz de criar a predição linear, propõe-se uma nova técnica, a Send-On-Delta com ponto adicional (SOD+pp).

A técnica proposta sempre utiliza um ponto adicional intermediário, com o objetivo de evitar grandes desvios com relação aos dados medidos. Para definir o ponto adicional a ser enviado, utiliza-se como métrica o ponto que apresentar a menor soma quadrática do resíduo na interpolação final.

A técnica funciona basicamente em três etapas:

- definição do momento de transmissão - o momento de transmissão é definido pela mesma lógica da técnica SOD;
- interpolação dos pontos - no intervalo entre os momentos de transmissão são interpoladas retas entre o último ponto transmitido, cada ponto intermediário e o ponto atual a ser transmitido, como exemplificado na figura 36. O número de interpolações depende do número de pontos no intervalo. No intervalo do exemplo existem três pontos, então se faz preciso três interpolações;
- seleção do ponto adicional – com relação a cada interpolação advinda da etapa anterior, é calculada a soma quadrática do resíduo (ϵ) para todos os pontos do intervalo, como exemplificado na figura 36. O ponto que gerar a interpolação que apresenta a menor soma quadrática do resíduo é o ponto adicional selecionado. No caso do exemplo da figura 36 o segundo ponto foi o escolhido.

O fluxograma da figura 37 trás a lógica aplicada pelo algoritmo.

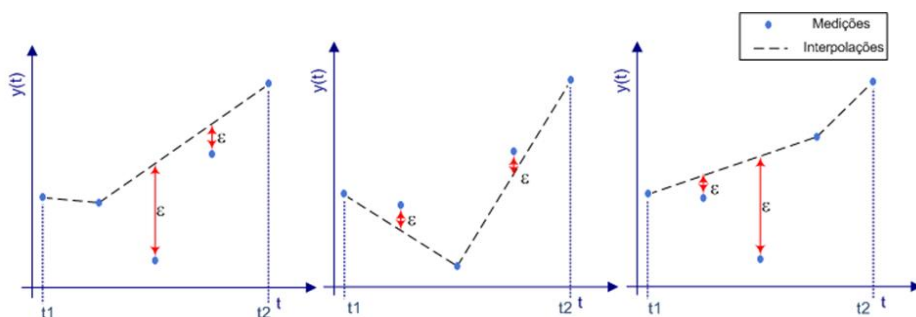


Figura 36: Funcionamento da técnica Send-On-Delta com ponto adicional

Fonte: Autor.

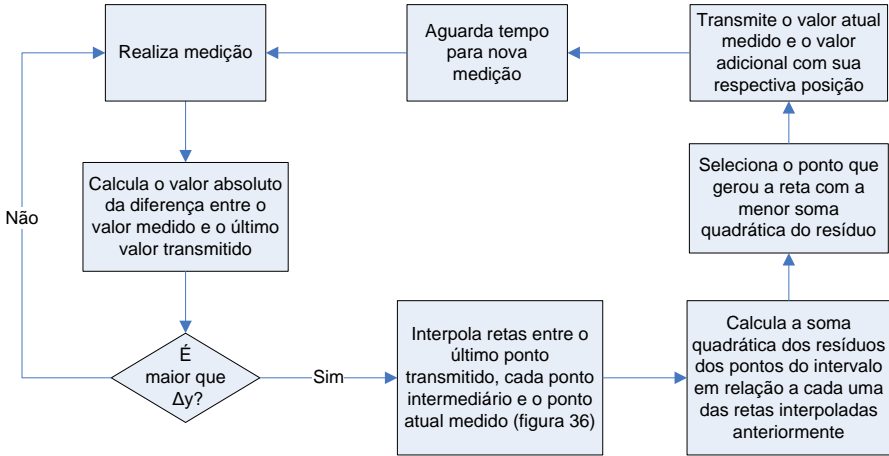


Figura 37: Fluxograma da técnica Send-On-Delta com ponto adicional

Fonte: Autor.

Analisando a figura 38, é possível notar que a técnica SOD+pp apresenta melhores resultados frente à técnica SOD. Na figura 38 (a), o modelo gerado pela técnica SOD está mais distante dos valores medidos, do que o modelo resultante da técnica SOD+pp, apresentados na figura 38 (b). No entanto, a técnica SOD+pp exige a transmissão de um ponto adicional e também transmissão da posição do ponto no intervalo.

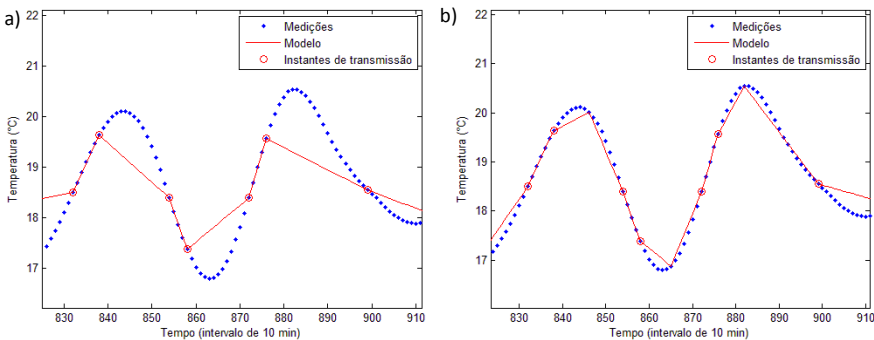


Figura 38: Comportamento da técnica SOD (a) e o comportamento da técnica SOD+pp (b)

Fonte: Autor.

5.1.3 Send-On-Delta com transmissão da função do modelo

Considerando que na técnica SOD+pp em cada instante de transmissão são enviados o valor do ponto do instante de transmissão, o valor do ponto adicional e o valor da posição do ponto adicional no intervalo, sugere-se uma nova técnica, a qual, ao invés de transmitir valores de pontos, transmite os coeficientes de uma linha que represente os pontos medidos no intervalo. Para definir essa linha, será utilizada uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados; assim, a técnica proposta tende a minimizar o resíduo. Apesar de existirem outros métodos de regressão mais modernos (NIST, 2009), o método dos mínimos quadrados é o que melhor se enquadra na aplicação em questão, principalmente devido ao fato de a série de dados ser curta.

A técnica proposta define o momento de transmissão com base na lógica SOD e, então, define pelo método dos mínimos quadrados a curva que melhor se ajusta aos dados contidos no intervalo. Desta maneira, não se enviam valores para o servidor, mas os coeficientes do polinômio resultantes da regressão. O servidor, ao receber esses coeficientes, interpola os valores intermediários correspondentes aos pontos que foram medidos, mas não transmitidos. A figura 39 representa o funcionamento da técnica e a figura 40, o fluxograma do algoritmo implementado.

Como pode se notar na figura 39, o algoritmo foi construído de forma a fazer coincidir o primeiro ponto da função atual com o último ponto da função anterior. Apesar de se estar limitando o ajuste do polinômio, esta condição evita uma descontinuidade do sinal. Desenvolveu-se também um algoritmo para manter a continuidade das derivadas; porém, os resultados não foram satisfatórios, aumentando substancialmente os erros. A função da curva que será criada não tem limitação com relação ao grau; no entanto, uma função com grau muito baixo pode não permitir um bom ajuste e uma função com grau elevado irá sobrecarregar o processamento, além de poder gerar comportamentos atípicos.

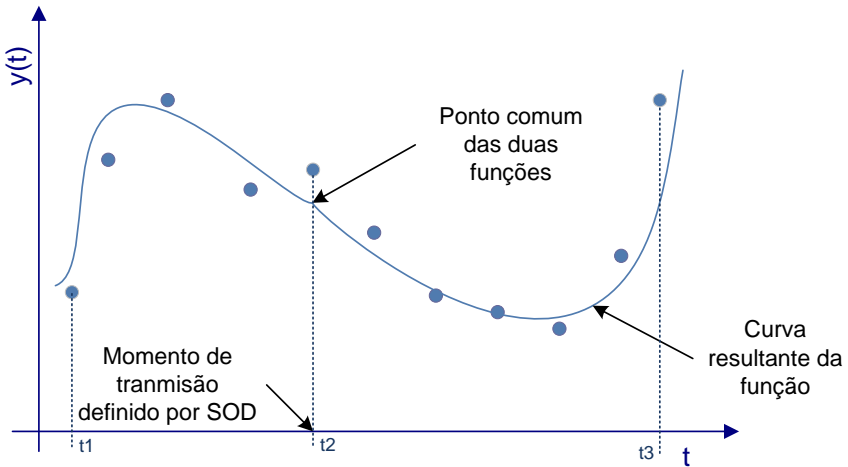


Figura 39: Funcionamento da técnica Send-On-Delta com transmissão da função do modelo

Fonte: Autor.

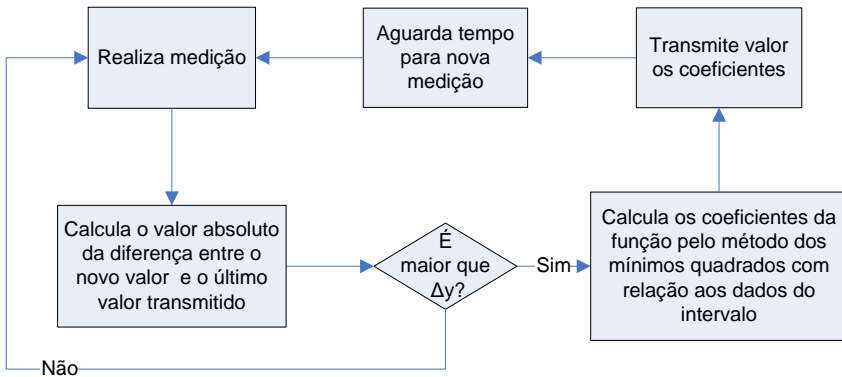


Figura 40: Fluxograma da técnica SOD+t+f

Fonte: Autor.

Com base na técnica Send-On-Delta com transmissão da função do modelo (SOD+f), propõem-se mais três técnicas que buscam diminuir ainda mais o número de transmissões, pois prevêm o comportamento do mensurando. A três se diferenciam entre si devido à forma como é realizada a extrapolação dos pontos.

A primeira técnica se baseia na lógica da técnica SOD+md; entretanto, ao invés de criar a predição linear com relação ao valor atual medido e ao anterior medido, a técnica calcula a predição com base no valor atual e anterior encontrados pela função, como demonstrado na figura 41. A segunda técnica se baseia na lógica da técnica SOD+tx, calculando a predição linear com base no valor atual da função e no último valor da função anterior, que é igual ao primeiro valor da função atual, como demonstrado na figura 42. A terceira técnica também se baseia numa predição, sendo esta a continuação da última função transmitida, conforme demonstrado na figura 43.

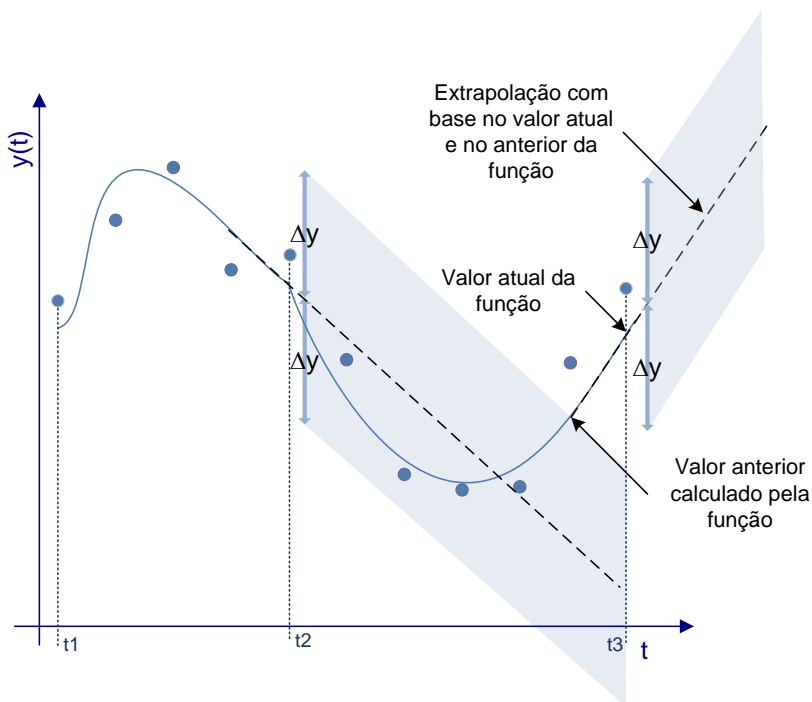


Figura 41: Funcionamento da técnica SOD+md

Fonte: Autor.

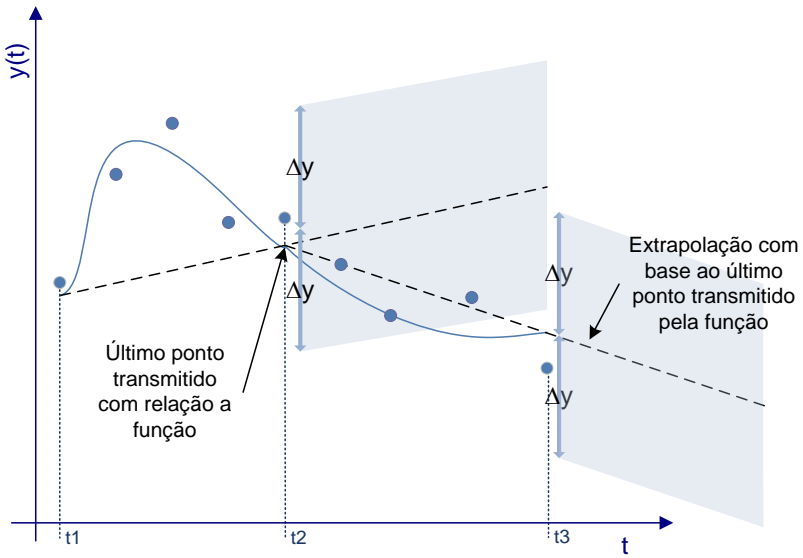


Figura 42: Funcionamento da técnica SOD+ftx

Fonte: Autor.

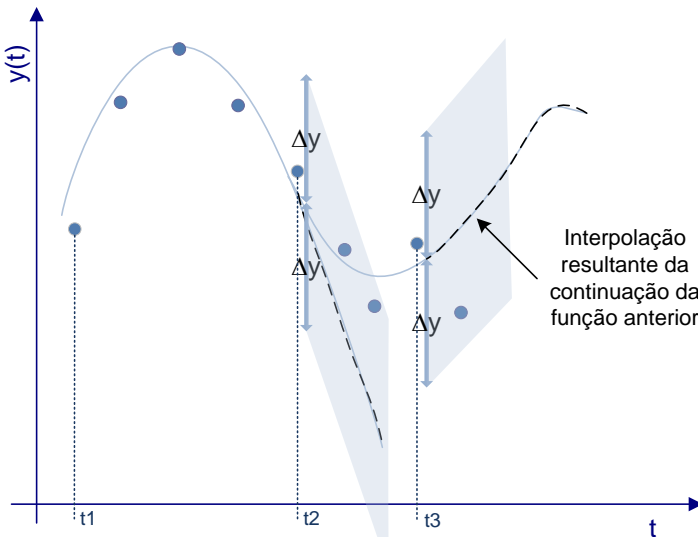


Figura 43 Funcionamento da técnica SOD+ff

Fonte: Autor.

5.2 AVALIAÇÃO DO AJUSTE DO MODELO AOS DADOS

Conforme especificado em 4.2.2, todas as técnicas foram reguladas para apresentar, em média, um erro de 1,0 °C entre o valor medido e a extrapolação momentânea apresentada ao usuário ($\Delta y=1$) e um intervalo máximo de 3 horas entre transmissões ($\Delta t=18$). Assim, todas as técnicas testadas foram implementadas com controle temporal. A princípio, por uma análise superficial do comportamento do sinal de temperatura simulado, adotou-se um polinômio de terceiro grau para as técnicas baseadas em funções. Adequados os parâmetros, o simulador gerou os gráficos para análise do ajuste do modelo de cada técnica, conforme apresentado a seguir.

5.2.1 Histogramas do resíduo

Como primeira análise do ajuste das técnicas serão observados os histogramas gerados pelo resíduo. Como o ruído adicionado ao sinal padrão tinha distribuição normal com desvio padrão de 0,1 °C, o resíduo de um modelo bem ajustado aos dados deveria ter as mesmas propriedades.

As técnicas SOD+t, SOD+t+md, SOD+t+tx e SOD+t+pp não apresentaram uma distribuição normal coerente a do ruído, como pode ser observado nas figuras 44. Além do mais, existe uma concentração grande de pontos para os quais o resíduo é zero, o que não indica que o modelo esteja bem ajustado aos dados, pois, na verdade esses pontos, em sua grande maioria, são resultantes dos valores transmitidos, que são iguais aos valores medidos e não decorrentes dos pontos interpolados pela técnica.

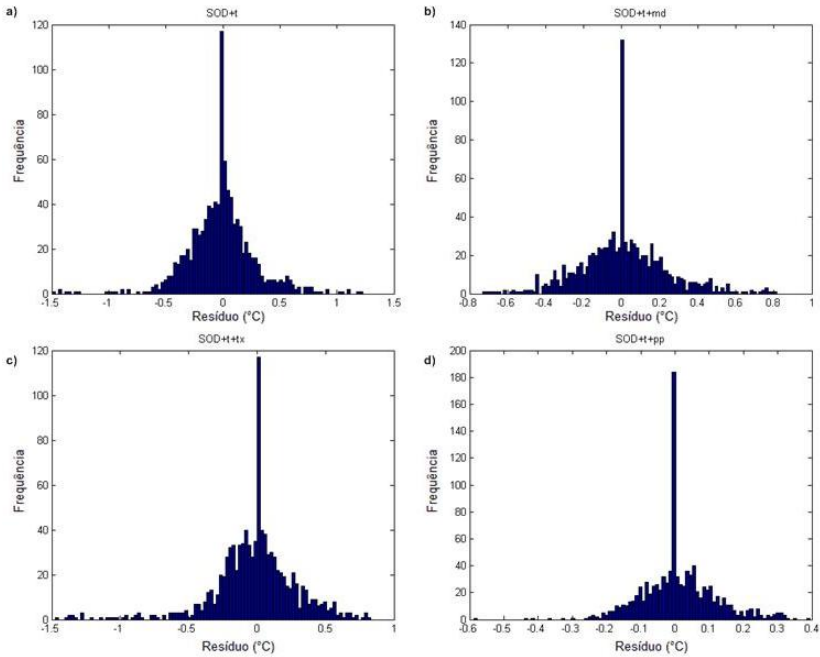


Figura 44: Histograma do resíduo. SOD+t (a), SOD+t+md (b), SOD+t+tx (c) e SOD+t+pp (d)

Fonte: Autor.

Já as técnicas que transmitem os coeficientes da função não sofrem essa anomalia, como pode ser observado na figura 45, pois não é necessariamente o valor medido que será transmitido, mas sim a curva que melhor se ajusta aos pontos a fim de se ter o menor erro quadrático.

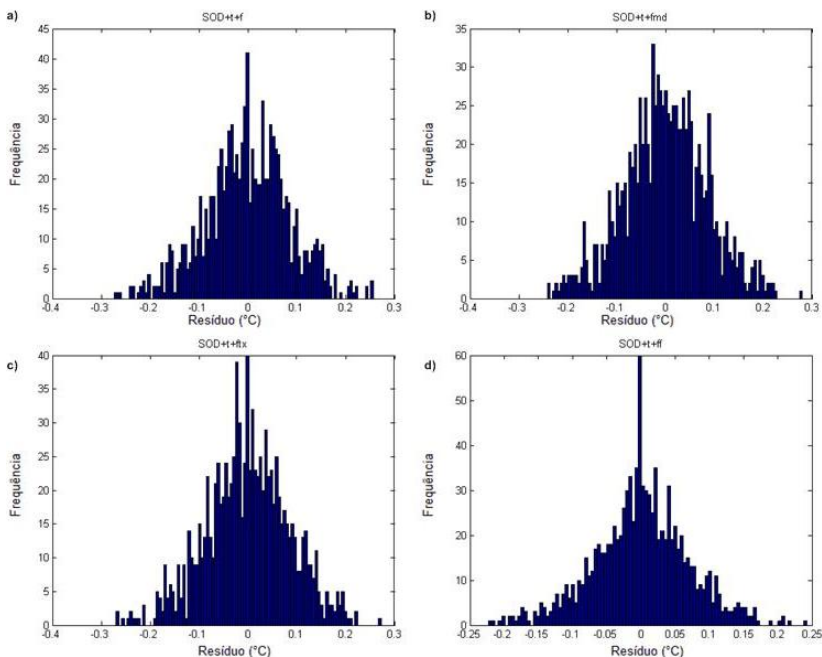


Figura 45: Histograma do resíduo. SOD+t+f (a), SOD+t+fmd (b), SOD+t+ftx (c) e SOD+t+ff (d)

Fonte: Autor.

5.2.2 Autocorrelação do resíduo

Com relação à autocorrelação do resíduo, as técnicas SOD+t, SOD+t+md e SOD+t+tx geram resíduos com uma forte autocorrelação, como pode se notar na figura 46 (a, b e c). A técnica SOD+t+pp, apesar de apresentar um desenho em cruz (Figura 46 d), não apresenta grande dependência do resíduo. Este comportamento de gerar uma cruz é devido ao fato de que os pontos transmitidos são iguais aos pontos medidos, gerando assim vários resíduos sobre os zeros do gráfico.

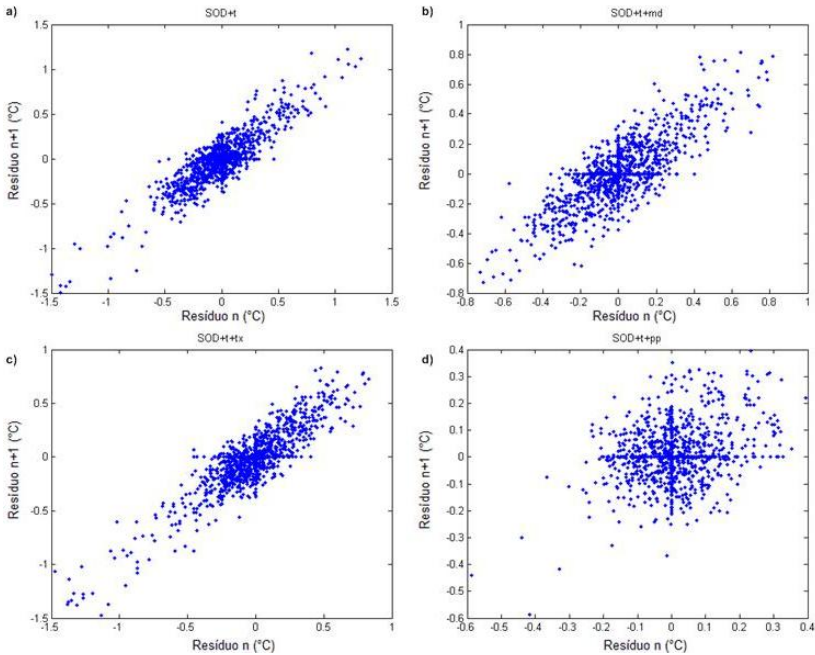


Figura 46: Independência do resíduo. SOD+t (a), SOD+t+md (b), SOD+t+tx (c) e SOD+t+pp (d)

Fonte: Autor.

Todas as outras técnicas que transmitem os coeficientes da função têm resíduo não correlacionado, como pode ser observado na figura 47. Apenas a técnica SOD+t+ff apresenta uma autocorrelação, porém, extremamente fraca a ponto de ser desconsiderada.

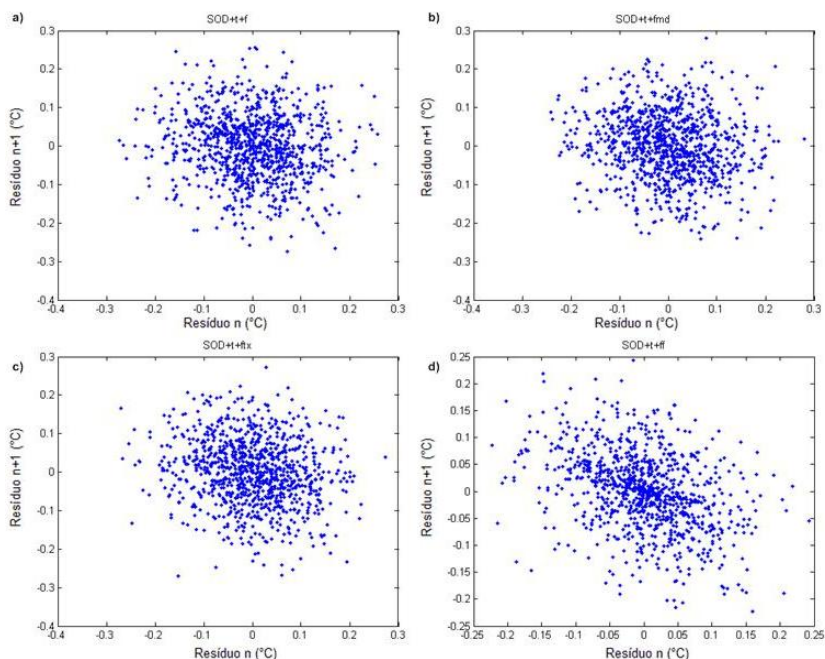


Figura 47: Independência do resíduo. SOD+t+f (a), SOD+t+fmd (b), SOD+t+ftx (c) e SOD+t+ff (d)

Fonte: Autor.

5.2.3 Gráfico da dispersão do resíduo

O gráfico da dispersão do resíduo foi de grande ajuda neste trabalho, pois sua análise possibilitou entender as limitações das técnicas existentes e, com isso, propor soluções. Um exemplo foi o estudo da dispersão da técnica SOD+t, que apresentou em alguns pontos resíduos com valores elevados, como demonstrado na figura 48 (a). Identificada a área que apresentou esse comportamento, é preciso analisar o sinal de medição e o modelo resultante da técnica para a mesma área, (Figura 48 b). Devido a este comportamento, propôs-se a técnica SOD+t+pp, que permitiu uma melhora do modelo, sem aumentar o número de transmissões (Figura 48 c).

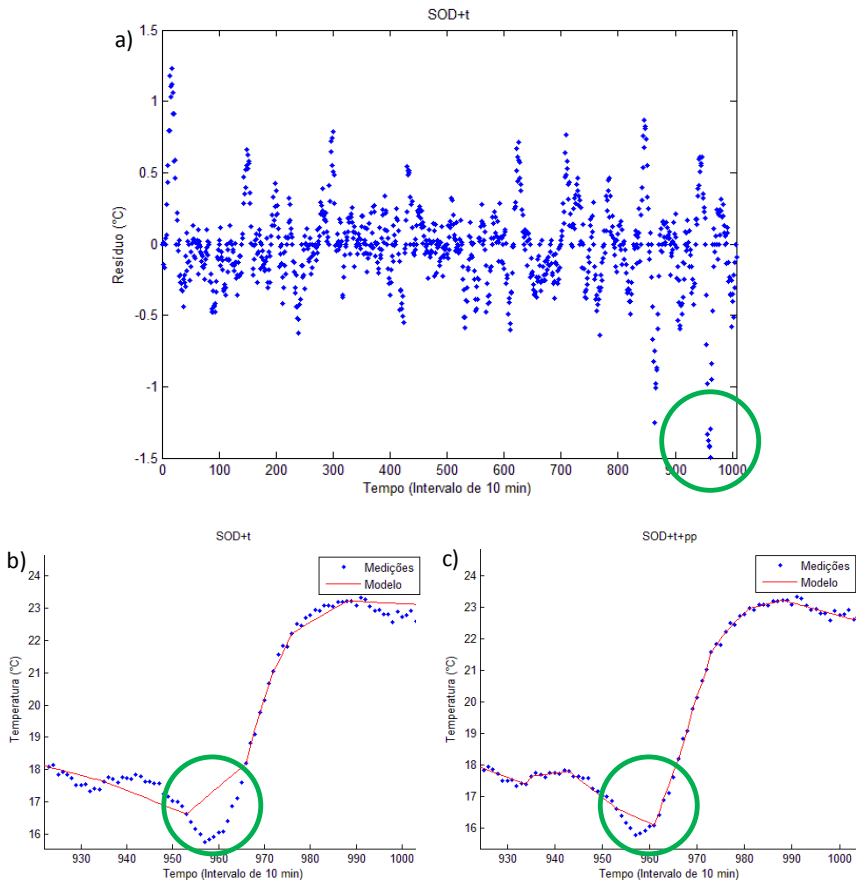


Figura 48: Análise do gráfico de dispersão do resíduo para SOD+t

Fonte: Autor.

Como pode se notar na figura 49 (a, b, c e d), o comportamento do resíduo das técnicas SOD+t, SOD+t+md, SOD+t+tx e SOD+t+pp não reflete o comportamento do ruído adicionado. De tal modo, chega-se à conclusão que estas técnicas não possibilitam um bom ajuste à série de dados. Já as técnicas que utilizam a regressão pelo método dos mínimos quadrados apresentam resultados satisfatórios, como pode se observar na figura 50 (a, b, c e d)

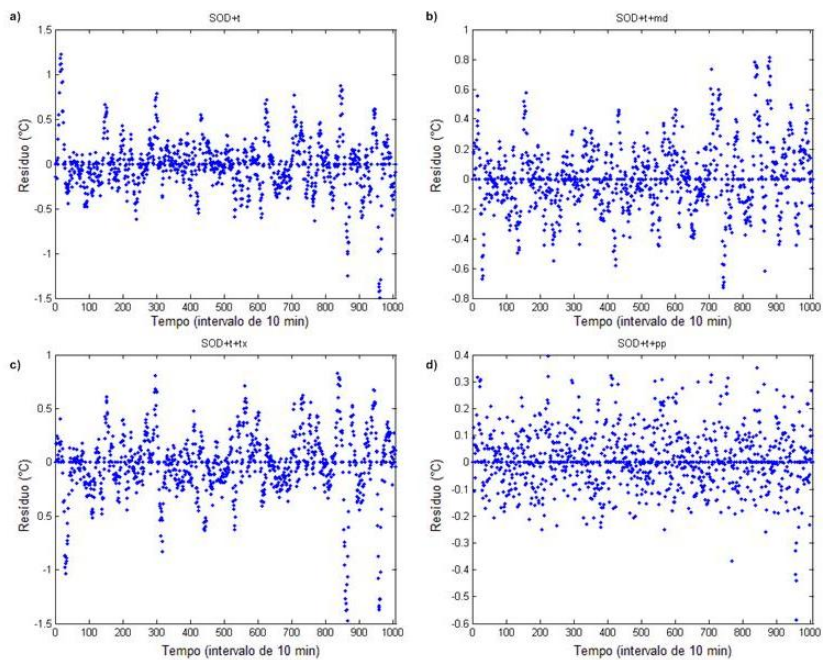


Figura 49: Dispersão do resíduo: SOD+t (a), SOD+t+md (b), SOD+t+tx (c) e SOD+t+pp (d)

Fonte: Autor.

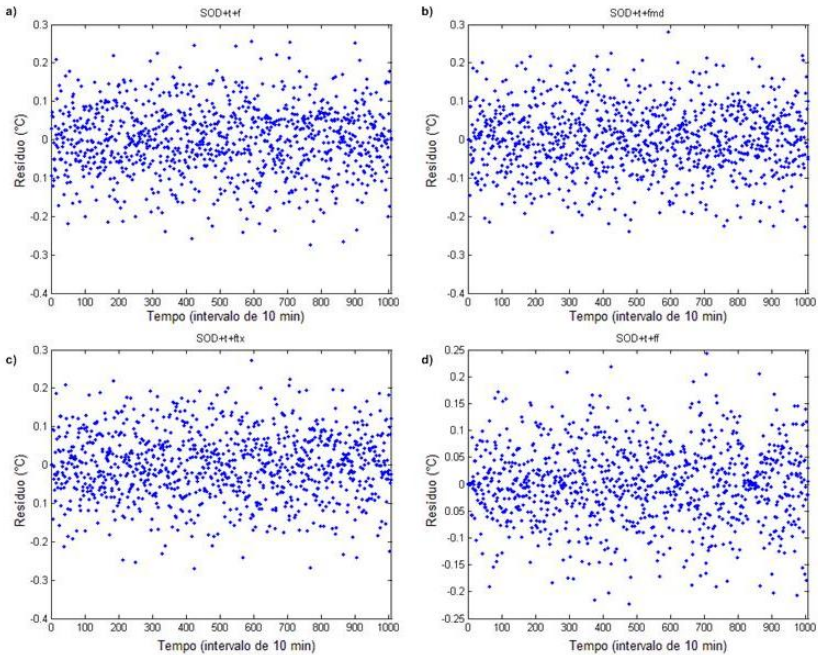


Figura 50: Dispersão do resíduo. SOD+t+f (a), SOD+t+fmd (b), SOD+t+tx (c) e SOD+t+ff (d)

Fonte: Autor.

5.2.4 Avaliação final do ajuste do modelo

Usadas as devidas ferramentas para análise do ajuste do modelo aos dados de temperatura simulados, é possível determinar quais são as técnicas que proporcionam um modelo coerente para a série de dados em questão. Um resumo da análise pode ser visto na tabela 5.1, na qual serão selecionadas somente as técnicas que demonstraram resultados satisfatórios em todos os campos. São elas: SOD+t+f, SOD+t+fmd, SOD+t+tx e SOD+t+ff.

Tabela 5.1 Resumo do ajuste dos modelos

Técnica	Histograma do resíduo	Autocorrelação do resíduo	Dispersão do resíduo
SOD+t	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta
SOD+t+md	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta
SOD+t+tx	Não ajusta	Não ajusta	Não ajusta
SOD+t+pp	Não ajusta	Ajusta	Não ajusta
SOD+t+f	Ajusta	Ajusta	Ajusta
SOD+t+fmd	Ajusta	Ajusta	Ajusta
SOD+t+ftx	Ajusta	Ajusta	Ajusta
SOD+t+ff	Ajusta	Ajusta	Ajusta

Fonte: Autor.

5.3 ESTUDO COMPARATIVO

Analisadas e escolhidas as técnicas que proporcionam modelos que se ajustam aos dados de medição, o próximo passo é verificar qual apresenta menor incerteza no resultado de medição final, qual proporciona menor incerteza quanto à extrapolação momentânea apresentada no servidor e qual apresenta melhor desempenho com relação à redução do número de envios. Para isso, utilizou-se um simulador baseado no princípio de Monte Carlo (DONATELLI e KONRATH, 2004; MOSCATI, MEZZALIRE e SANTOS, 2004; ISO, 2004).

Sobre o sinal padrão são aplicadas séries de amostras aleatórias; então, tais séries são submetidas às técnicas que proporcionam em suas saídas os modelos equivalentes para cada série na entrada. Com o conjunto de modelo resultante de cada entrada são calculados os desvios padrões e as médias para todos os pontos ao longo do sinal e esses valores servirão para levantar a incerteza final do resultado de medição. O simulador, além de gerar os modelos equivalentes ao resultado final

de medição, que ficará armazenado no banco de dados da estação-base, também simula os resultados da extrapolação momentânea apresentada ao usuário. Para cada série de dados é calculada a média de transmissões que servirá para avaliar o desempenho para cada técnica.

O simulador foi ajustado para gerar 10000 amostras aleatórias para cada ponto. O cálculo da incerteza final foi baseado no maior desvio padrão encontrado em toda a extensão do sinal, mais o maior erro sistemático da média com relação ao sinal verdadeiro. Utilizou-se um fator de abrangência para 95,45% de confiança para o cálculo final da incerteza de medição.

Os resultados encontrados na simulação estão expostos na tabela 5.2. Como se pode notar, a técnica SOD+t+fmd e a técnica SOD+t+ff foram as que apresentaram menor incerteza sobre o resultado final. No entanto, a técnica SOD+t+ff foi a que apresentou incerteza mais alta com relação à extrapolação momentânea e o pior desempenho econômico. Já a técnica SOD+t+fmd, além da menor incerteza final, também apresentou a menor incerteza com relação à extrapolação momentânea e um rendimento no número de transmissões equivalentes ao das demais técnicas, sendo assim a mais indicada para a série de dados em questão.

Tabela 5.2: Desempenho das técnicas selecionadas (3ª ordem)

Técnica	Incerteza final	Incerteza da predição	Economia de transmissões
SOD+t+f	0,3 °C	1,7 °C	92 %
SOD+t+fmd	0,2 °C	1,3 °C	92 %
SOD+t+ftx	0,3 °C	1,7 °C	92 %
SOD+t+ff	0,2 °C	2,2 °C	86 %

Fonte: Autor.

Também foram realizados experimentos para verificar se o grau do polinômio aplicado representa bem o comportamento da série de dados. Inicialmente, alterou-se a ordem do polinômio de terceira para segunda ordem. Com essa mudança, houve um acréscimo na incerteza final em todas as técnicas, conforme demonstrado na tabela 5.3. Estes resultados confirmam que o polinômio de segunda ordem é muito baixo para o experimento em questão.

Posteriormente foram testadas as técnicas com polinômio de quarta ordem, os resultados estão demonstrados na tabela 5.4. Devido ao aumento da ordem do polinômio a técnica SOD+t+ff apresentou grandes erros de predição, prejudicando muito a economia no número de transmissões. As técnicas SOD+t+f e SOD+t+ftx proporcionaram melhoras na incerteza final, sem alterações no desempenho econômico, porém a técnica SOD+t+f apresentou piores na incerteza de predição. Já a técnica SOD+t+ftx apresentou os melhores resultados dentre as demais, contudo são os mesmo obtidos com o uso do polinômio de terceira ordem, não justificando a mudança da ordem do polinômio, que além de exigir mais processamento, também aumenta o volume de dados transmitidos.

Tabela 5.3: Desempenho das técnicas selecionadas (2ª ordem)

Técnica	Incerteza final	Incerteza da predição	Economia de transmissões
SOD+t+f	0,6 °C	1,6 °C	92 %
SOD+t+fmd	0,4 °C	1,5 °C	92 %
SOD+t+ftx	0,6 °C	1,8 °C	92 %
SOD+t+ff	0,3 °C	2,3 °C	91 %

Fonte:Autor.

Tabela 5.4: Desempenho das técnicas selecionadas (4ª ordem)

Técnica	Incerteza final	Incerteza da predição	Economia de transmissões
SOD+t+f	0,2 °C	2,4 °C	92 %
SOD+t+fmd	0,2 °C	1,3 °C	92 %
SOD+t+ftx	0,2 °C	1,7 °C	92 %
SOD+t+ff	0,2 °C	13,2 °C	77 %

Fonte: Autor.

Essas técnicas são pouco robustas a *outliers* (observações que apresentam um grande afastamento das restantes); assim, é preciso alguma solução para eliminá-los. Existem muitos algoritmos de detecção de *outliers*, porém, uma alternativa simplista é calcular a média de várias medições realizadas em um intervalo curto o suficiente para que a variação real do mensurando seja desprezada. A eletrônica do Monta-SMIR permite esse tipo de prática. Testes foram realizados com a média de 30 medições. Percebeu-se que os valores de incertezas e o rendimento econômico são similares com os gerados sem o uso das médias, porém, a influência de *outliers* é amenizada.

Deve-se lembrar que esses resultados foram encontrados para os parâmetros especificados; se houver alguma mudança nos valores de Δy e Δt é preciso refazer toda a metodologia para saber se a técnica continua proporcionando um modelo que se ajusta à série de dados. Também é necessário refazer os cálculos de incerteza e de desempenho econômico com o objetivo de quantificar os impactos da mudança.

5.4 AVALIAÇÃO DENTRO DO PROJETO SENSIINT

Visto que o modelo gerado pela técnica SOD+t+fmd apresentou um bom ajuste em relação aos dados de temperatura simulados, decidiu-se testar a técnica sobre valores reais de medição de nível captados pelas estações linimétricas do Projeto SensIIInt. Esta avaliação é somente uma estimativa do comportamento da técnica SOD+t+fmd para o mensurando em questão, não sendo possível quantificar a incerteza e o desempenho da técnica, porque os dados coletados não seguem exatamente as suposições dadas no capítulo 3. Com a mudança do mensurando, é preciso reajustar o parâmetro Δy , que assumiu o valor arbitrário de 50 mm; já o valor de Δt continuou o mesmo, garantindo um intervalo máximo de 3 horas entre cada transmissão.

Como pode ser observado nas figuras 51 e 52, o modelo gerado pela técnica SOD+t+fmd, se ajusta muito bem à série de dados. A utilização da técnica proporciona, para esses casos, uma economia em torno de 90% no número de transmissões. Um estudo mais apurado precisaria ser feito para quantificar quanto isso reflete na economia energética do sistema, pois, apesar de a transmissão ser o maior

responsável pelo consumo energético, o emprego das técnicas propostas exige mais memória e processamento.

Além da economia energética, também se tem uma redução de custo relativo à manutenção da rede. Com a configuração de taxa de transmissão fixa com intervalo de 10 minutos, o gasto por estação de medição gira em torno de 50 reais/mês. Considerando que se tem uma economia de 90% sobre esse custo e são seis as estações de medição, no final de um ano se economizariam cerca de 3200 reais com a aplicação da técnica proposta.

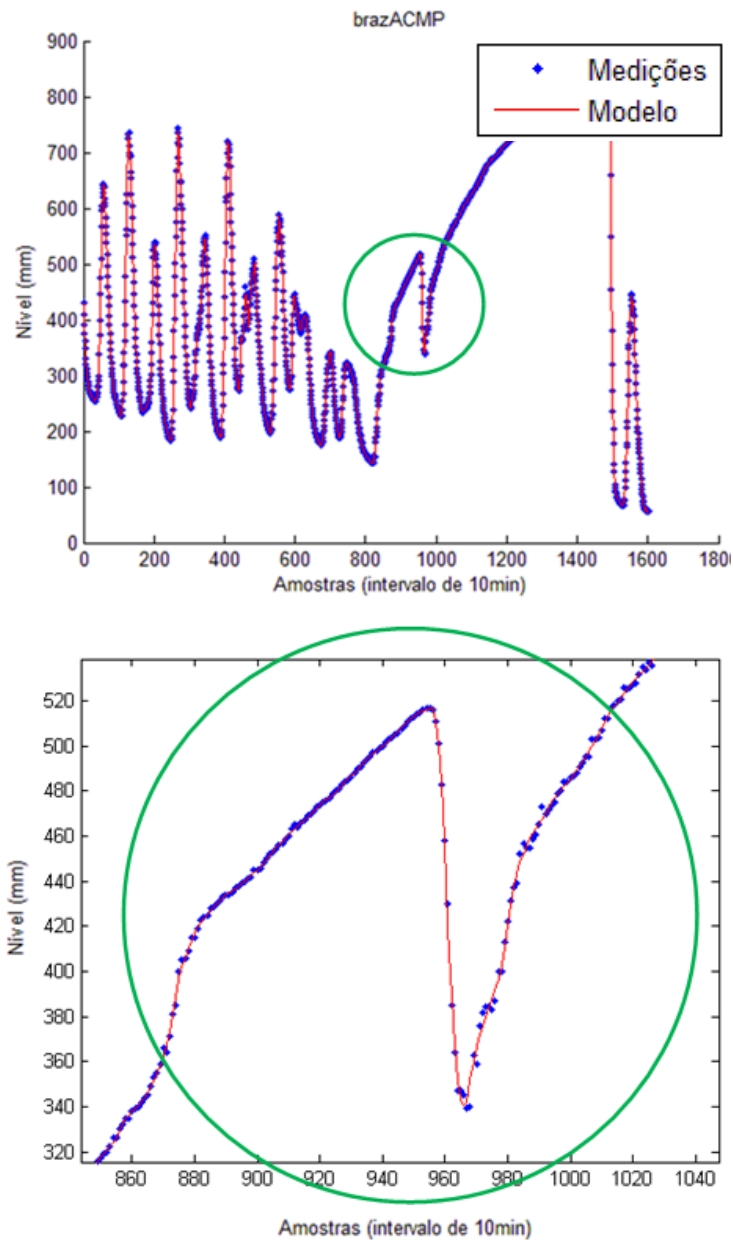


Figura 51: Interpolação sobre os dados do linígrafo do Rio do Braz/ACMP
Fonte: Autor.

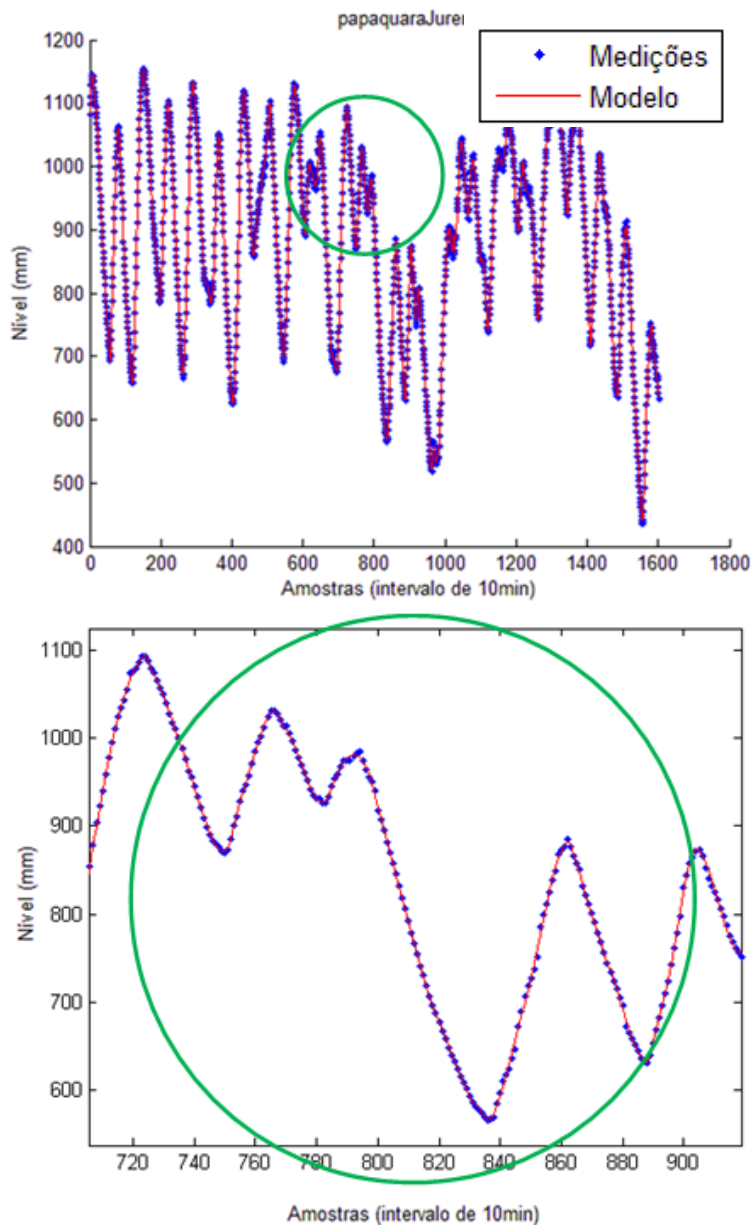


Figura 52: Interpolação sobre os dados do linígrafo do Rio Papaquara/Jurerê

Fonte: Autor.

Atualmente implementada nas estações de medição do Projeto SensInt, está rodando uma técnica nos moldes da utilizada pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), chamada neste trabalho de técnica EPAGRI. Esta técnica adota 60 minutos como intervalo fixo de transmissão, o que representa uma economia de 83,33% com relação ao intervalo anteriormente utilizado de 10 minutos. A taxa de amostragem dessa técnica preconiza a realização de medições a cada 15 segundos e em cada momento de transmissão são enviados os valores máximos e mínimos do intervalo e a média das medições.

Apesar de a técnica EPAGRI proporcionar uma economia razoável no número de transmissões, seus resultados são inferiores frente à técnica SOD+t+fmd para o conjunto de dados em questão, como demonstrado nos gráficos da figura 53. Os valores medidos pelo sensor inteligente estão representados por pontos azuis; a linha contínua verde é o sinal de resposta da técnica EPAGRI e a linha contínua vermelha, a resposta da técnica SOD+t+fmd. Os pontos verdes e vermelhos sobre as linhas contínuas representam o momento de transmissão de cada técnica.

A primeira restrição à técnica pode ser observada na figura 53 (b), na qual o modelo gerado pela técnica EPAGRI está atrasado com relação as medições. Este comportamento ocorre devido ao fato de o sinal de resposta ser resultante da média de valores de um intervalo muito longo (60 minutos). Assim, o atraso do sinal corresponde à metade do intervalo (30 minutos). Já o modelo da técnica SOD+t+fmd não apresenta atraso com relação aos pontos medidos.

A segunda restrição é com relação ao tempo de resposta. Utilizou-se, para comparar o tempo de resposta entre ambas as técnicas, um acontecimento atípico no nível do Rio do Braz: o momento em que uma barragem é rompida. O fenômeno está representado no gráfico da figura 53 (c), no qual é possível perceber a redução abrupta do nível devido ao rompimento da barragem. A partir do instante do rompimento, a técnica SOD+t+fmd demorou 20 minutos para informar o servidor sobre o evento, enquanto que a técnica EPAGRI demorou 60 minutos. Este atraso é significativo no caso de ser preciso tomar alguma decisão sobre o fenômeno, uma vez que a informação advinda da técnica EPAGRI somente chega ao servidor após o nível ter variado mais de 300 mm, contra apenas 50 mm da técnica SOD+t+fmd.

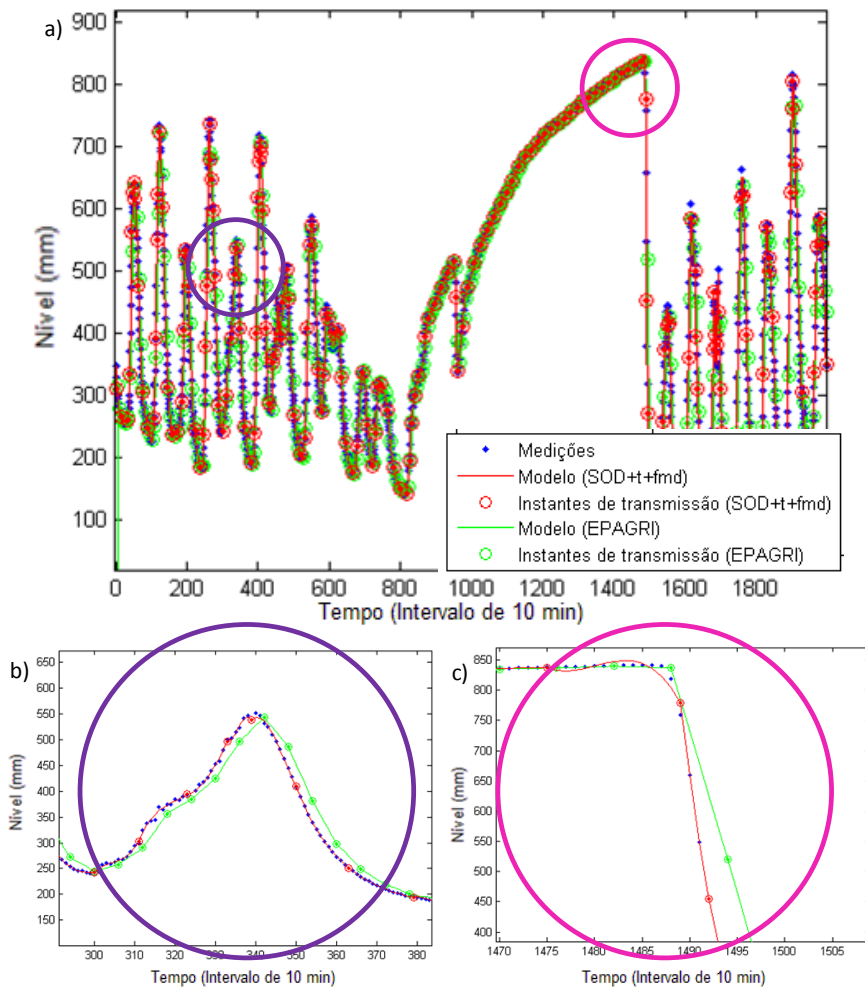


Figura 53: Resposta da técnica EPAGRI

Fonte: Autor.

Na técnica EPAGRI, a média e os valores máximos e mínimos do intervalo são enviados ao servidor, quantidade de bits não muito diferente da técnica SOD+t+fmd, que envia os coeficientes da função. Este quesito apresenta-se muito semelhante nas duas técnicas. Com relação à necessidade de processamento e memória exigidos por cada

técnica, é difícil estimar valores, porém, apesar de a técnica EPAGRI executar funções mais simples, como média e seleção de valores máximos e mínimos a quantidade de informação é demasiadamente elevada devido à taxa de amostragem, de tal modo que o processamento fica sobrecarregado e é necessário acrescentar memória para armazenar os dados. Diante das considerações anteriores, é possível aduzir que, no geral, a técnica SOD+t+fmnd apresenta vantagens frente à técnica EPAGRI para a aplicação em questão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho objetivou a busca de soluções para aumentar a eficiência energética e o corte de custos em redes de sensores sem fio. Um estudo apurado da literatura da área em questão possibilitou detectar serem estes uns dos principais desafios da tecnologia. Outra informação coletada junto à literatura é a de que o maior consumo energético ocorre no instante da transmissão. Além do mais, a transmissão também é responsável por gastos constantes durante a utilização do sistema. O desafio, porém, está em como diminuir o número de transmissões sem afetar a incerteza do resultado de medição.

Com objetivo de solucionar o desafio imposto, realizou-se um levantamento de técnicas de taxa de transmissão adaptativa existentes que suprissem as especificações impostas pela aplicação; examinou-se o comportamento das técnicas com o uso de simulação computacional e conforme suas limitações foram propostas novas técnicas. Em seguida, com base em análises gráficas, foram avaliados os modelos resultantes de tais técnicas, a fim decidir quais proporcionam um bom ajuste ao conjunto de dados. Seleccionadas aquelas que geraram modelos adequados a série de dados, então se passou para o próximo estágio: avaliação das técnicas com relação ao desempenho em termos de incerteza final e economia no número de transmissões. Para tal, utilizou-se um simulador computacional baseado em Monte Carlo, que avaliou a incerteza do resultado de medição final, a incerteza da predição e a economia no número de transmissões de cada técnica seleccionada.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

As técnicas propostas apresentaram desempenho superior ao das técnicas já existentes analisadas, garantindo os parâmetros impostos. A técnica SOD+t+fmd foi a que obteve melhores resultados para a aplicação testada. Possibilitou uma redução de mais de 90% no número de transmissões, sem afetar a incerteza final do resultado de medição.

Dentro do Projeto SensInt, a utilização de técnicas de taxa de transmissão adaptativas pode trazer muitos benefícios, desde o corte de gastos na fabricação do Monta-SMIR, reduzindo o tamanho da bateria e dos painéis solares, até a redução dos gastos mensais com o serviço de GPRS. Esta economia poderia ser destinada à compra de transdutores de medição com maior qualidade, aumentando, conseqüentemente, a exatidão de medição do sistema.

6.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

À vista do exposto, listam-se algumas sugestões para trabalhos a serem futuramente realizados:

- estudo aprimorado da real economia energética da rede, levando em conta o consumo exigido pelo módulo de comunicação, processamento/memória e sensoriamento;
- implementação da técnica em campo, dentro da aplicação do Projeto Sensint para validar os resultados obtidos;
- avaliação dos impactos sobre a incerteza do resultado referentes às limitações da rede, como falta de sincronismo do sistema, perda de pacotes, etc.;
- teste das técnicas com simulações baseada em Monte Carlo, considerando todas as fontes de incerteza, inclusive erros sistemáticos não corrigidos;
- busca por soluções mais refinadas para detecção de *outliers*, que permitam sua detecção e a transmissão de um alerta para a estação-base com o objetivo de criar um controle sobre o processo;
- estudo da melhora do sistema em função do remanejamento de recursos, devido à economia alcançada, tanto na manutenção da rede, quanto na construção do *hardware*;
- busca por técnicas de análise de falha em sistema, a fim de evitar a necessidade do controle temporal, reduzindo ainda mais o número de transmissões;
- levantamento do nível exato de processamento e memória exigido pela técnica.

7 REFERÊNCIAS

AKILIDIZ, I. F. E. A. A Survey on Sensor Networks. **IEEE Communications Magazine**. Georgia, ago. 2002. p. 102-114.

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Barueri: Manole, 2008.

ALIPPI, C. *et al.* Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-Hungry Sensors. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. abr. 2009. p. 16-23.

ALLIANCE. **ZigBee**. Disponível em: < www.zigbee.org >. Acesso em: 15 nov. 2009.

ANANDA, A.; CHAN, M. C.; OOI, W. T. **Mobile, Wireless and Sensor Networks: Technology, Applications, and Future Directions**. New Jersey: IEEE Press and Wiley-Interscience, 2006.

ANASTASI, G. E. A. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey. **ELSEVIER - Ad Hoc Networks**. Pisa, jul. 2008. p. 537-568.

ARAMPATZIS, T.; LYGEROS, J.; MANESIS, S. **A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks**. IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation. 27-29 jun. 2005. pp.719-724.

BETTS, B. Smart Sensors - New Standard Could Save Lives and Money. **IEEE Spectrum**. abr. 2006. p. 50-53.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Bulding**. New York: John Wiley & Sons, 1978.

BROCK, F. V.; RICHARDSON, S. J. **Meteorological Measurement Systems**. New York: Oxford University Press, 2001.

BULUSU, N.; JHA, S. (Eds.). **Wireless Sensor Networks**. London: Artech House, 2005.

CALLAWAY JR., E. H. **Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols**. Boca Raton: Auerbach Publications, 2003.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical Methods for Engineers**. 5. ed. New York: McGraw Hill, 2006.

CHEN, J., KHER, S.; SOMANI, A. **Distributed fault detection of wireless sensor networks**. 2006. In: Proceedings of the 2006 Workshop on Dependability Issues in Wireless Ad Hoc Networks and Sensor Networks. Los Angeles, CA, USA, 26 set. 2006.

DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C. **Considerações sobre a Aplicação da Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição**. Florianópolis: [s.n.], 2004.

ENZ, C. C. *et al.* WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution. **IEEE Computer**, v.37, n.8, ago. 2004. p. 62-70.

FLESCH, C. A. **Metrologia e eletrônica básica para experimentação: Eletrônica Básica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. p. 01-96.

FUNDAÇÃO CERTI. **Projeto SensIIInt: Sensores Inteligentes e Integráveis para Soluções e Produtos Brasileiros**. Florianópolis, 2007.

IEC. **IEV: International Electrotechnical Vocabulary**, 2009. Disponível em: < <http://www.electropedia.org/> >. Acesso em: 15 nov. 2009.

IEEE. **IEEE 1451.0 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators: common functions, communication protocols, and transducer electronic data sheet (teds) formats**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007 a.

IEEE. **IEEE 1451.1 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators: network capable application**

processor (ncap) information model. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999.

IEEE. **IEEE 1451.2 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators:** transducer to microprocessor communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997.

IEEE. **IEEE 1451.3 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators:** digital communication and transducer electronic data sheet (TEDS) formats for distributed multidrop systems. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

IEEE. **IEEE 1451.4 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators:** mixed-mode communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.

IEEE. **IEEE 1451.5 Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators:** wireless communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007 b.

ILYAS, M.; MAHGOUB, I. **Handbook of Sensor Networks:** compact wireless and wired sensing systems. Boca Raton: CRC Press, 2005.

INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição.** 3. ed. Rio de Janeiro: Inmetro, 2003.

ISO. Numerical Methods for the Propagation of Distributions. **GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.** v. 1, 2004.

JAIN, A. e CHANG, E. Y. **Adaptive sampling for sensor networks.** DMSN '04, vol. 72. ACM, New York, NY, 2004. p. 10-16.

JCGM. **VIM:** international vocabulary of metrology - basic and general concepts and associated terms. 3. ed. 2008.

JOHNSON, R. A. **Miller and Freund's Probability and Statistics for Engineers**. 5. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1994.

KANOUN, O.; TRÄNKLER, H.-R. Sensor Technology Advances and Future Trends. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 53, dez. 2004. p. 1.497-1.501.

KARL, H.; WILLIG, A. **Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks**. West Sussex: John Wiley & Son Ltd., 2007.

KLEIN, L. A. **Sensor and Data Fusion: a tool for information assessment and decision making**. Washington: SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007.

KRISHNAMACHARI, B. **Networking Wireless Sensors**. New York: Cambridge University Press, 2005.

LEE M. e CHOI Y. **Fault detection of wireless sensor networks**. *Computer Communications*, v. 31, issue 14, 5 set. 2008. p. 3.469-3.475.

MANWARING, A. E. A. **Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring**. *WSNA*, Georgia, set. 2002.

MISKOWICZ, M. Send-On-Delta Concept: An Event-Based Data Reporting Strategy. **Sensors**, v. 6, jan. 2006. p. 49-63.

MIT. 10 Emerging Technologies That Will Change the World. **Technology Review**, fev. 2003. p. 33-49.

MITCHELL, H. B. **Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction**. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Tradução de Verônica Calado. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2003.

MORRIS, A. S. **Measurement and Instrumentation Principles**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

MOSCATI, G.; MEZZALIRA, L. G.; SANTOS, F. D. D. **Incerteza de Medição pelo Método de Monte Carlo, no Contexto do "Suplemento 1" do GUM.** Esqualab 2004 - Encontro para a Qualidade de Laboratórios. São Paulo: [s.n.], 2004. p. 1-4.

NATIONAL INSTRUMENTS. **The Benefits of Wireless Technology.** Disponível em: <www.ni.com/wsn> Acesso em: 05 out. 2009.

NGUYEN, V. H.; SUH, Y. S. Networked Estimation for Event-Based Sampling Systems with Packet Dropouts. **Sensors**, v. 9, abr. 2009. p. 3.078-3.089.

NGUYEN, Y. S. Send-On-Delta Sensor Data Transmission With A Linear Predictor. **Sensors**, v. 7, abr. 2007. p. 537 – 547.

NIST. **SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods**, NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, Disponível em: <www.itl.nist.gov/div898/handbook>. Acesso em: 23 nov. 2009.

ON WORLD. **Wireless Sensor Networks: R&D Trends and Funding Opportunities**, 2009. Disponível em: <www.onworld.com/wsntrends>. Acesso em: 22 out. 2009.

POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. **Principles of Embedded Networked Systems Design.** Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

RABAEY, J.M. *et al.* PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking. **IEEE Computer Society**, Berkeley, jul. 2000. p. 42-48.

RAGHUNATHAN V., J. *et al.* Energy-Aware Wireless Microsensor Networks. **IEEE Signal Processing Magazine**, v.19, n. 2, mar. 2002. pp. 40-50.

RIVERA, J. *et al.* Improved Progressive Polynomial Algorithm for Self-Adjustment and Optimal Response in Inteligent Sensors. **Sensors**, v. 8, nov. 2008. p. 7.410-7.427.

ROLAIN, Y.; SCHOUKENS, J.; VANDERSTEEN, G. Signal Reconstruction for Non-Equidistant Finite Length Sample Sets: A "KIS"

Approach. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 47, out. 1998. p. 1.046-1.052.

RÖMER, K.; MATTERN, F. The Design Space of Wireless Sensor Networks. **IEEE Wireless Communications**, dez. 2004. p. 54-61.

ROUNDY, S. *et al.* Power Sources for Wireless Sensor Networks. **Proceedings of 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks**. Berlin, v. 2.920, jan. 2004. p. 1-17.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. D. R. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. 2ª. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1996.

SANTI, P. **Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks**. John Wiley & Sons, 2005.

SPENCER JR, B. F.; RUIZ-SANDOVAL, M. E.; KURATA, N. Smart Sensing Technology: Opportunities and Challenges. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 11, n. 4, 2004. p. 349-368.

STOJMENOVIC, I. **Handbook of Sensor Networks: Algorithms and Architectures**. Ottawa: John Wiley & Sons, 2005.

VERDONE, R. *et al.* **Wireless Sensor and Actuator Network: Technologies, Analysis and Design** [S.l.] - AP, 2007.

WAELE, S.; BROERSEN, P. M. T. Error Measures for Resampled Irregular Data. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 49, abr. 2000. p. 216-222.

WEBSTER, J. G. (Ed.). **The Measurement Instrumentation, and Sensors Handbook**. Boca Raton: CRC Press and IEEE Press, 1999.

WILLIG, A. Wireless sensor networks: concept, challenges and approaches. **IEEE Elektrotechnik & Informationstechnik**, Berlin, jun. 2006. p. 224-231.

WILSON, J. S. **Sensor Technology Handbook**. Burlington: Newnes Elsevier, 2005.

WYNN, R. The TEDS Smart Sensor Revolution - Bringing Plug-and-Play to Sensor Measurements. **IEEE Computing & Control Engineering**, ago./set. 2004. p. 25-27.

XIA, F.; ZHAO, W. Flexible Time-Triggered Sampling in Smart Sensor-Based Wireless Control Systems. **Sensors**, v. 7, 2007. p. 2.548-2.564.

YICK, J.; MUKHERKEE, B.; GHOSAL, D. Wireless Sensor network survey. **ELSEVIER - Computer Networks**, Davis, 14 abr. 2008.

ZHAO, F.; GUIBAS, L. J. **Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach**. San Francisco: Elsevier Inc., 2004.

ANEXO A



Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 03/11/09

Data da Emissão: 04/11/09

n. 4678/09

Página: 2 de 3

6. OBSERVAÇÕES:

6.1 A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e v_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

6.2 Condições ambientais durante a calibração: Temperatura Ambiente: [23 +/- 5] °C; Umidade Relativa do Ar: [60 +/- 20] %ur; Pressão Atmosférica: [1020 +/- 20] mbar.

6.3 Correção = $-\text{[Média das Indicações no SMC - Média das Indicações no SMP]}$.

6.4 Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 - ITS 90.

6.5 A calibração é válida somente para os pontos calibrados, sendo estes selecionados em comum acordo com o cliente.

6.6 Os resultados apresentados no item 7.2 deste certificado são válidos exclusivamente para a temperatura de referência informada.

7. RESULTADOS

7.1 Escala de Temperatura

TABELA DE RESULTADOS

Média das Indic. no SMP [°C]	Média das Indic. no SMC [°C]	Correção [°C]	Incerteza U [°C]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}	Meio Termostático
0,00	0,0	0,00	0,10	2,00	Infinito	Água
15,03	15,0	0,03	0,10	2,00	Infinito	Água
25,02	25,0	0,02	0,10	2,00	Infinito	Água
50,05	50,0	0,05	0,10	2,00	Infinito	Água

Observação: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação do SMC.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgnet/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgnet/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo de IAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados desta certificação referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não serve ao instrumento do controle metroológico instituído na regulamentação metroológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

RBC 01

Campus da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Sector C
CEP: 86040-970
Florianópolis - SC
Caixa Postal 5053

Tel.: +48 3239 2121
Fax: +48 3239 2119
metrologia@certi.org.br
www.certi.org.br

Fundação CERTI
CNPJ 78.626.363/0001-24
Insc. Est. 251.378.241
Insc. Mun. 50.111-5