

Rafael Frizzo Callegaro

**UMA ARQUITETURA PARA FUSÃO DE DADOS DE
SENSORES DE BAIXO CUSTO EM REDES DE SENSORES SEM
FIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas, Área de Concentração em *Controle, Automação e Sistemas*.

Orientador: Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr.

Coorientador: Carlos Barros Montez, Dr.

Florianópolis

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

CALLEGARO, RAFAEL

UMA ARQUITETURA PARA FUSÃO DE DADOS DE SENSO-
RES DE BAIXO CUSTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO /
RAFAEL CALLEGARO; orientador, Ricardo Alexandre Reinaldo de
Moraes; Coorientador, Carlos Barros Montez. –
Florianópolis, SC, 2014.

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Redes de sensores sem
fio, fusão da informação, sensores. I. Alexandre Reinaldo de Moraes,
Ricardo. II., Carlos Barros Montez. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e
Sistemas. IV. Título.

Rafael Frizzo Callegaro

**UMA ARQUITETURA PARA FUSÃO DE DADOS DE
SENSORES DE BAIXO CUSTO EM REDES DE SENSORES SEM
FIO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas, Área de Concentração em *Controle, Automação e Sistemas*”, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis (SC), 27 de Fevereiro de 2014.

Prof. Jomi Fred Hubner, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo Moraes, Dr.
Presidente/Orientador - UFSC

Prof. Iwens Gervasio Sene Júnior, Dr. - UFG

Prof. Gustavo Medeiros de Araújo, Dr. - UFSC

Prof. Ubirajara Franco Moreno, Dr. - UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita bondade.

Aos meus pais Davi Bedin Callegaro (in memoriam), e Inez Frizzo Callegaro pelo incentivo aos estudos.

A Minha esposa Vera Brotti Callegaro, pelo apoio incondicional, encorajamento, auxílio e paciência principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus filhos Clara Brotti Callegaro, Francisco Brotti Callegaro, Miguel Brotti Callegaro e Antônio Brotti Callegaro, que vieram todos de uma vez, bem no meio da dissertação criando um novo mundo e fazendo com que não pensássemos em mais nada. Infelizmente o Miguel e o Antônio foram mais cedo, mas a Clara e o Francisco estão aí para lembrar a importância do tempo.

Ao Orientador, Prof. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes, Dr. pela orientação dedicada, comprometida e competente.

Ao Coorientador Prof. Carlos Barros Montez, pela competência e disposição para ensinar e esclarecer, e principalmente com o envolvimento com o trabalho.

A Companhia Catarinense de Águas e Saneamento, pelo apoio recebido, tanto pelo empréstimo dos sensores Young, quanto pela liberação de horários para capacitação pessoal.

A Universidade Federal de Santa Catarina, sobretudo ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas pela oportunidade.

Ao Gerson Budke pela amizade e pela ajuda técnica altamente especializada, mas principalmente pela amizade.

Ao Marcelo Teixeira, pela ajuda sempre presente, e pela amizade sincera.

Aos muitos colegas de classe....

RESUMO

O sensoriamento de condições ambientais é frequentemente empregado nas áreas de Agricultura de Precisão e Engenharia Ambiental, como para o monitoramento climático, na detecção de pragas, na irrigação e análise do solo, nos mapas de produtividade e no monitoramento de áreas florestais e de rios urbanos. As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) vêm sendo propostas como infraestruturas para essas aplicações. As referidas redes produzem um grande volume de dados. Contudo, como são comumente compostas por sensores de baixo custo e com baixa confiabilidade, eventualmente dados anômalos (*outliers*) são gerados, afetando a qualidade final do monitoramento. Essas condições implicam na necessidade da utilização de métodos de fusão de informações que viabilizem o funcionamento da rede e aumentem a confiança nos dados monitorados. Tendo em vista tais características, o presente trabalho propõe uma arquitetura para a fusão de informação voltada a sensores de baixo custo. A arquitetura foi validada através de um estudo de caso envolvendo sensores de pressão atmosférica, compatíveis com a plataforma Arduino, cujos dados produzidos foram tratados por técnicas de fusão de informação. Na avaliação dos resultados obtidos, dois sensores de alto custo foram utilizados para fornecerem valores de referência. Os resultados obtidos mostram que alguns dos métodos de fusão de baixo nível e técnicas para a detecção de *outliers* estudados neste trabalho, quando combinados e organizados segundo a arquitetura proposta, conseguem substituir um único sensor centralizado e de alto custo, mantendo a confiabilidade obtida nos dados monitorados.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio, fusão da informação, sensores.

ABSTRACT

Detection of environmental conditions is frequently employed in the fields of precision agriculture and environmental engineering, being also used in irrigation and soil testing, productivity maps, and the monitoring of forest areas and urban rivers. Wireless Sensor Networks (WSN) have been proposed as an infrastructure for these applications. These networks produce a large volume of data. However, as they are often comprised of sensors of low cost and reliability, anomalous data (outliers) is occasionally produced, affecting the final quality of the monitoring. These conditions require using information fusion methods that make it possible for the network to function while increasing the reliability of monitored data. Considering these characteristics, this work proposes an architecture for information fusion aimed at low-cost sensors. The architecture was validated through a case study involving atmospheric pressure sensors compatible with the Arduino platform. The data they produced was processed with information fusion techniques. In the evaluation of the obtained results, two high-cost sensors were used to provide reference values. The obtained results show that, when combined and organized according to the proposed architecture, some of the low-level fusion methods and the outlier detection techniques studied in this work are able to replace a single centralized, high-cost sensor while maintaining reliability of the monitored data.

Keywords: Wireless sensor network, information fusion, sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relacionamento entre os termos de fusão.....	29
Figura 2 - Modelo Baseado nas Entradas e Saídas.....	33
Figura 3 – Fusão competitiva, complementar, cooperativa	35
Figura 4 – Modelo JDL.....	36
Figura 5 – Modelo DFD	38
Figura 6 – Fusão de dados multisensores.....	39
Figura 7 – Modelo em Cascata	40
Figura 8 – Modelo OODA	41
Figura 9 – Comparativo entre Precisão e Exatidão	51
Figura 10 – Critério de Chauvenet.....	52
Figura 11 – Algoritmo para o critério de Chauvenet	54
Figura 12 – Fluxograma método de Peirce	56
Figura 13 – Função de conversão para variância/confiança.....	58
Figura 14 – Fluxograma do CWA com MTF	60
Figura 15 – Arquitetura RSSF	66
Figura 16 – Arquitetura proposta	68
Figura 17 – Fusão entre <i>beacons</i>	70
Figura 18 – CWA com Alterações.....	74
Figura 19 – KITRFA1	79
Figura 20 – Topologia da RSSF.....	80
Figura 21 – Local do Experimento	81
Figura 22 – Interligação Young/Microcomputador	82
Figura 23 – Sensores de Referência.....	83
Figura 24 – Sensor de referência interno vs externo com correção	85
Figura 25 – Amostra 1	86
Figura 26 – Amostra 2	87
Figura 27 – Técnicas de fusão na amostra 1	88
Figura 28 – Técnicas de fusão na amostra 2	89
Figura 29 – CWA aplicado a amostra 2	91
Figura 30 – Métodos com melhor resultado na amostra 2	93
Figura B.1 – Topologias RSSF.....	111
Figura B.2 – Topologia em Árvore.....	113
Figura B.3 – Arquitetura dos dispositivos	114
Figura B.4 – Modos de operação IEEE 802.15.4.....	115
Figura B.5 – Estrutura do superquadro com GTS.....	115
Figura B.6 – Transferência de dados do dispositivo para o coordenador.....	119
Figura B.7 – Transferência de dados do coordenador para o dispositivo.....	120
Figura B.8 – Associação e desassociação.	121
Figura B.9 – Sensor/Atuador	125
Figura B.10 – Pressão Atmosférica	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da precisão e exatidão.....	50
Tabela 2 – Critério de Chauvenet	53
Tabela 3 – Tabela de Peirce.....	57
Tabela 4 – Comparativo entre os métodos de fusão	62
Tabela 5 – Comparativo dos dados técnicos dos sensores	77
Tabela 6 – Fator de correção para erros sistemáticos.....	78
Tabela 7 – Valores de Young e Vaisala – 24 horas em intervalos de 1 hora	84
Tabela 8 – Resultados dos métodos de fusão na amostra 1.....	88
Tabela 9 – Peirce aplicando na amostra 2.....	90
Tabela 10 – MTF aplicado a amostra 2.....	90
Tabela 11 – CWA aplicado na amostra 2	91
Tabela 12 – Sensores que participam da fusão utilizando CWA + MTF na amostra 2	92
Tabela A.1 – Amostra 1	105
Tabela A.2 – Amostra 2.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK – *Acknowledgement*
BO – *Beacon Order*
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CH – *Cluster Head*
CSMA/CA – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
DFD – *Data Feature Decision*
ED – *Energy Detection*
FFD – *full-funcion device*
GCC – *GNU Compiler Collection*
GTS – *guaranteed time slot*
GTS – Timeslots garantidos
HART – *Highway Addressable Remote Transducer*
HPA – hectopascal
IEC – *International Electrotechnical Commission*
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISA – *International Society of Automation*
JDL – *Joint Directors of Laboratories*
LQI – *Link quality indication*
LR-WPAN – *Low Rate Wireless Personal Area Networks*
MAC – *Media Access Control*
MEMS – *Microelectromechanical systems*
MTF – Média Tolerante a Falhas
OD – *Oxigênio Dissolvido*
OSI – *Open System Interconnection*
PA – Pressão Atmosférica
PAN – *Personal Area Network*
PHY – *Physical Layer*
RFD – *Reduced-function Device*
RSSF – Redes de Sensores Sem Fio
TCP/IP – *Transport Control Protocol / Internet Protocol*
TDMA – *Time Division Multiple Access*
VIM – vocabulário internacional de metrologia
WSN – *Wireless Sensor Network*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVO GERAL.....	25
1.2.1 Objetivos específicos.....	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	25
2. FUSÃO DA INFORMAÇÃO	27
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 FUSÃO DE INFORMAÇÕES EM RSSF.....	29
2.3 CLASSIFICAÇÕES DA FUSÃO DE INFORMAÇÕES.....	31
2.3.1 Baseada no nível de abstração dos dados.....	31
2.3.2 Baseada na entrada e saída.....	32
2.3.3 Baseada na configuração dos sensores.....	34
2.4 MODELOS DE FUSÃO.....	35
2.4.2 Modelo DFD.....	37
2.4.3 Fusão de dados multisensores.....	38
2.4.4 Modelo em cascata.....	39
2.4.5 Modelo OODA.....	41
2.4.7 Discussão sobre os modelos.....	42
2.5 FUSÃO DE INFORMAÇÕES E REDES DE SENSORES SEM FIO.....	42
2.6 FUSÃO DA INFORMAÇÃO E PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	43
2.9 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	43
3. MÉTODOS DE FUSÃO	45
3.1 INTRODUÇÃO.....	45
3.2 DADOS ATÍPICOS - <i>OUTLIERS</i>	46
3.2.1 Ataques Maliciosos.....	46
3.2.2 Eventos.....	47
3.2.3 Falhas.....	47
3.2.4 Erros.....	48
3.3 FUSÃO DE DADOS BRUTOS.....	51
3.3.1 Critério de Chauvenet.....	52
3.3.2 Método de Peirce.....	54
3.3.3 Média Tolerante a Falhas.....	57
3.3.4 <i>Confidence-weighted Averaging</i>	57
3.4 AGREGAÇÃO E COMPRESSÃO DE DADOS.....	61
3.5 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE FUSÃO.....	61
3.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO.....	62
4. ARQUITETURA PROPOSTA	65

4.1 INTRODUÇÃO	65
4.2 MODELO DE REDE	65
4.3 ARQUITETURA PROPOSTA	67
4.3 CAMADA DE FUSÃO LOCAL	69
4.4 CAMADA DE FUSÃO DE BAIXO NÍVEL	70
4.4.1 Calibração	70
4.4.2 Fusão on-line e off-line (com <i>timestamping</i>)	71
4.4.3 Detecção de erros grosseiros e sistemáticos	72
4.4.4 Métodos de Fusão	72
4.4.5 Realimentação	73
4.6 ALTERAÇÕES NO METODO CWA	73
5. AVALIAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA	75
5.1 TIPOS DE SENSORES USADOS NO EXPERIMENTO	75
5.1.1 Sensor de referência externo	76
5.1.2 Sensor de referência interno	76
5.1.3 Sensores de baixo custo	76
5.2 CORREÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E SISTEMÁTICOS	77
5.3 <i>HARDWARE</i> DE DESENVOLVIMENTO – KITRFA1	78
5.4 TOPOLOGIA DA IMPLANTAÇÃO DA REDE	79
5.5 LOCALIZAÇÃO E IMPLANTAÇÃO	80
5.6 OBTENÇÃO DOS DADOS	81
5.7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	83
5.7.1 Comparação entre os sensores de referência interno e externo	83
5.7.2 Amostra de dados utilizada para comparação das técnicas de fusão da informação	85
5.7.3 Fusão na amostra 1	87
5.7.4 Fusão na amostra de dados 2	88
6 CONCLUSÕES	95
6.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS	95
6.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO	96
6.3 CONTRIBUIÇÕES E ESCOPO DO TRABALHO	96
6.4 TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	99
APENDICE B - REDES DE SENSORES SEM FIO	107
B.1 INTRODUÇÃO	107

B.1.2 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)	107
B.1.3 A NORMA IEEE 802.15.4.....	108
B.1.3.1 Topologia de rede	110
B.1.3.2 Camadas PHY e MAC	113
B.1.3.3 Transferência de dados.....	118
B.1.3.4 Associação e desassociação de um nodo a PAN.....	120
B.1.4 ZIGBEE	122
B.1.5 WIRELESSHART	122
B.1.6 ISA 100.11A	123
B.1.7 SENSORIAMENTO E SENSORES.....	124
B.1.7.1 Classificação dos Sensores.....	125
B.1.7.2 Pressão Atmosférica.....	128
B.1.7.3 Barômetro	129

1. INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) consiste em uma rede composta por nodos de baixo custo, de pequenas dimensões e com alguma capacidade de processamento e transmissão. Desta forma, eles vão além da simples coleta de informação, pois têm funcionalidades que permitem analisar e fundir seus próprios dados ou dados de outros nodos sensores. Os nodos são equipados com algum tipo de sensor com capacidade de monitoramento de grandezas físicas. Ademais, normalmente eles não se comunicam somente entre si, mas também com uma estação base para que os dados possam ser divulgados, processados, analisados ou armazenados (POELLABAUER, 2010). A sua aplicação varia desde os ambientes industriais, detecção de fogo em florestas, detecção de enchentes, monitoramento de tubulações de gás, água e óleo até o telemonitoramento de pacientes e localização de médicos em hospitais (AKYILDIZ et al., 2002).

Por outro lado, as RSSF possuem necessidades diferenciadas em relação às redes de computadores tradicionais. Em geral, as RSSF devem possuir mecanismos para autogerenciamento, autoproteção, auto-manutenção e suportar topologias dinâmicas, além de possuírem sérias restrições relacionadas à energia e transmissão de dados (DAVID CULLER, 2004; RUIZ, 2003), o que impede a utilização de grande parte dos tradicionais protocolos desenvolvidos para o modelo TCP/IP.

A comunidade científica, ao identificar tais problemas, desenvolveu a norma IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011). As especificações desta norma definem as camadas de Enlace (MAC) e a Física (PHY), segundo o modelo OSI (*Open System Interconnection*), para redes sem fio de área privada e com baixa taxa de transmissão (LR-WPAN). O padrão não foi especificado notadamente para uso em RSSF, mas devido ao baixo consumo de energia e custo dos nodos, tem se mostrado adequado e vem sendo amplamente adotado.

As RSSF começam a ser bastante utilizadas nos processos de automatização de monitoramento de diversas grandezas físicas. Estas redes substituem as tradicionais aplicações de monitoramento que assumem a abordagem centralizada, onde há um sensor único monitorando cada grandeza observada. Tal sensor, por ser único, necessita ser de alta confiabilidade, robusto e, conseqüentemente, de alto custo. As obras de instalação para garantir a confiabilidade das medições também costumam ser dispendiosas. Essa abordagem centralizada também envolve uma complexa manutenção, pois, via de regra, o armazenamento dos dados é

feito em *dataloggers*, que são dispositivos dedicados para armazenar localmente os dados coletados pelos sensores. O requisito de implantação de sensores em locais inóspitos e de difícil acesso inviabiliza a substituição constante de suas baterias e dificulta o acesso aos *dataloggers*, aumentando o custo de manutenção (MONTEZ, 2014).

Outros problemas encontrados nas aplicações centralizadas são relacionados com a confiabilidade na medição e a baixa robustez. Basear a confiabilidade das medidas em apenas um sensor implica em baixa tolerância a faltas, seja ocasionada por faltas provenientes do equipamento sensor, seja por problemas na implantação (quedas de folhas de árvores, destruição dos nodos por animais) ou simplesmente pela natureza do sinal que está sendo monitorado (ex. a temperatura medida por um sensor exposto ao sol pode apresentar muita discrepância espaço-temporal com relação aos sensores que estão na sombra). Essa característica, associada à manutenção, eleva o custo, pois pode ser necessário o seu acompanhamento constante, com o deslocamento de seres humanos até o sensor para efetuar tarefas de coleta de dados, manutenção e calibração.

As RSSF utilizam múltiplos sensores que medem uma única ou múltiplas grandezas. Os sensores podem consistir-se de muitos tipos diferentes, capazes de monitorar uma ampla variedade de condições ambientais, como temperatura, luminosidade, vibração, umidade, movimento/aceleração, fluxo de água e chuva, dentre outros. Cada tipo de grandeza é medido por um instrumento diferente, a pressão atmosférica, por exemplo, é comumente medida por sensores barométricos. Esses sensores são de fácil obtenção e operação e a grandeza, de simples compreensão.

O principal desafio relacionado com o uso de múltiplos sensores está implicado com a análise dos dados sensoriais que são transmitidos. Neste processo de análise de dados, usualmente empregam-se técnicas de fusão de informações. A fusão de informações é o estudo de métodos eficientes para, automática ou semiautomaticamente, transformar informações de diferentes fontes e diferentes pontos no tempo em uma representação que fornece apoio efetivo para a tomada de decisão humana ou automatizada. Espera-se que, por meios de técnicas de fusão e RSSF, obtenha-se tolerância a falhas, maior cobertura espacial e temporal, além da melhoria da precisão. Dependendo da técnica de fusão utilizada, admite-se que seja realizada a autocalibração, ajustes automatizados na qualidade da fusão e economia de energia. No que se refere à energia, a fusão de dados em uma RSSF é de extremo interesse, pois a tarefa de comunicação sem fio é absolutamente dispendiosa e também é relativamente cara em comparação ao processamento (POTTIE; KAISER, 2000).

Vários modelos de fusão são propostos na literatura, os mais conhecidos são o modelo JDL (*Joint Directors of Laboratories*) (HALL; LLINAS, 1997), Fusão e integração de multissensores (LUO, R. C. C.-C., YIH; KUO-LAN, SU, 2002) e o DFD (*Data-Feature-Decision*) (DASARATHY, 1997). Esses modelos são genéricos e não consideram as várias características inerentes das RSSF, como a capacidade de processamento distribuído, tolerância a falhas, comunicação e questões relacionadas à energia. A capacidade de processamento pode fazer com que certas decisões como autocalibração, considerações relativas à qualidade do sensor, economia de energia e ajustes na qualidade dos dados sejam tomadas localmente.

Consequentemente, diversas aplicações que empregam uma infraestrutura de RSSF, como, por exemplo, as de monitoramento ambiental, vêm deixando de ocupar, exclusivamente, a atenção da academia e gradualmente estão sendo adotadas por empresas, substituindo as soluções tradicionais.

Há vários desafios científicos e tecnológicos envolvidos. De uma forma não extensiva, podem-se elencar os seguintes (MONTEZ, 2014):

1. Os nodos e dispositivos sensores estão sujeitos às falhas devido ao ambiente hostil em que estes geralmente são implantados e à qualidade dos sensores.
2. Cada aplicação-alvo e ambiente de implantação possui características específicas, que, para serem otimizadas, necessitam de uma customização na topologia de implantação. Não é possível adotar ou desenvolver uma topologia única para monitoramento e disseminação de dados que seja adequada para todas as situações.
3. O consumo energético e a necessidade de se manter a rede operacional o maior tempo possível sem intervenção humana implicará na adoção de ciclos de trabalho (*duty-cycles*) nas operações individuais dos nodos sensores ou em agrupamentos (*clusters*) destes.
4. Há a necessidade de se desenvolver um sistema robusto, o qual possa funcionar o maior tempo possível sem a necessidade de intervenção humana.
5. A quantidade de amostras de dados coletadas em cada nodo e, conseqüentemente, em cada agrupamento de sensores pode gerar uma quantidade de informação intratável.

Especificamente na presente dissertação, abordam-se, principalmente, os desafios enunciados nos itens 1, 4 e 5 e os principais requisitos das aplicações são:

- Detecção de dados anômalos e Tolerância a Falhas.
- Tratamento de um grande volume de dados.
- Autoajuste.

Em síntese, o principal problema abordado nesta pesquisa pode ser expresso através da seguinte questão: “Como realizar o monitoramento ambiental utilizando uma RSSF com múltiplos sensores de baixo custo, substituindo tradicionais sensores centralizados e de alto custo, mantendo, ou mesmo superando a confiabilidade obtida nos dados monitorados? ”.

Os requisitos são tratados sob o viés da fusão da informação. A fusão de informações é o estudo de métodos eficientes para, automática ou semiautomaticamente, transformar informações de diferentes fontes e diferentes pontos no tempo em uma representação que fornece apoio efetivo para a tomada de decisão humana ou automatizada (BOSTRÖM et al., 2013).

Os principais trabalhos correlatos a esta dissertação de mestrado foram publicados em SALUSTIANO (2006) e ELMENREICH (2002). SALUSTIANO (2006) desenvolveu uma aplicação para a fusão de dados de sensores utilizada no monitoramento de ambientes. Apesar de não ter proposto uma arquitetura, o referido trabalho tem grande relevância, exibindo vários aspectos técnicos que testam determinados algoritmos de fusão. No entanto, o autor utiliza comunicação com fios, portanto, desconsidera aspectos inerentes à RSSF (ex. capacidade de processamento dos nodos). Além disso, a qualidade dos sensores para a realização da fusão não é abordada.

ELMENREICH (2002) pesquisa a aplicação da fusão de sensores para sistemas de tempo real (*on-line*) e propõe uma arquitetura para tal. Além da arquitetura, esse trabalho propõe um algoritmo de fusão que considera a qualidade dos sensores no cálculo. Apesar de utilizar uma rede com fios, o autor assume que os nodos sensores têm algum poder de processamento. As demais características de uma RSSF não são consideradas.

Destaca-se, como limitações deste trabalho, o mesmo estar voltado para a coleta de dados em ambientes genéricos, não sendo abordados casos de detecção de eventos e ataques maliciosos. Ademais, a topologia de rede utilizada nos testes foi a estrela, porém, não haveria grandes dificuldades para implementar outras topologias de RSSF. Os métodos usados

são na maioria baseados em técnicas estatísticas. A validação da arquitetura é realizada monitorando apenas uma grandeza física, e a mesma não é comparada com outra arquitetura. Além disso, os métodos são basicamente de fusão de dados de sensores de baixo nível.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do presente trabalho é propor e avaliar uma arquitetura para o monitoramento ambiental utilizando uma RSSF com sensores de baixo custo.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Apresentar conceitos, modelos e técnicas de fusão de informações.
- c) Propor uma arquitetura para o monitoramento remoto de ambientes de forma automatizada.
- d) Avaliar a arquitetura proposta através de estudo de caso.
- e) Avaliar algoritmos de fusão de dados de baixo nível para a arquitetura proposta.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 trata da fusão de informações, modelos e arquiteturas. No Capítulo 3, são apresentados alguns conceitos sobre *outliers* e algoritmos de fusão, aplicados à fusão de baixo nível. No Capítulo 4, é proposta uma arquitetura para o monitoramento remoto de ambientes e no Capítulo 5, esta arquitetura é avaliada comparando alguns algoritmos para a fusão de informações de baixo nível, seguido de uma discussão dos resultados obtidos. No Capítulo 6, são exibidas as conclusões finais do trabalho, os desafios encontrados e as perspectivas futuras. E, por último, tem-se os apêndices. No apêndice A, estão as amostras selecionadas que são utilizadas na avaliação da arquitetura. No apêndice B, o estudo das RSSF usadas como infraestrutura pela arquitetura, e um esboço sobre pressão atmosférica, usada como estudo de caso na avaliação da arquitetura.

2. FUSÃO DA INFORMAÇÃO

Encontram-se na literatura diversas definições e conceitos relacionados com a *Fusão da Informação*. Neste capítulo apresentam-se as definições que melhor se adaptam ao âmbito deste trabalho. Também relacionam-se as vantagens e desvantagens de se utilizar a fusão em RSSF, além das classificações e arquiteturas comumente utilizadas. Por fim, são introduzidos conceitos de tolerância a falhas, erros e incertezas de medições.

2.1 INTRODUÇÃO

O termo fusão da informação é amplamente utilizado na literatura, para designar sistemas e aplicativos que usam dados provenientes de várias fontes de informação. Os sinônimos mais comuns são “fusão de dados multisensor” (HALL; LLINAS, 1997), “integração de múltiplos sensores” (LUO, R. C.; KAY, 1992), fusão de sensores (ELMENREICH, 2002) e fusão de dados (HALL; LLINAS, 1997). A utilização de um ou outro termo está intimamente ligada com a área de aplicação, a saber: estatística, robótica, controle, inteligência artificial, visão computacional, processamento de imagem/sinais digitais e outras.

Para a *International Society of Information Fusion* (ISIF), o termo fusão da informação é definido como “o estudo de métodos eficientes para automaticamente ou semiautomaticamente transformar informações de diferentes fontes e diferentes pontos no tempo em uma representação que fornece apoio efetivo para tomada de decisão humana ou automatizada” (BOSTRÖM et al., 2013). Nesta definição é importante notar que a fusão está preocupada com a transformação da informação. Este termo destina-se a cobrir todas as possíveis formas de combinar, agregar para inferir, bem como reduzir a informação.

Na área de RSSF, o termo agregação de dados é comumente utilizado como sinônimo de fusão da informação como em (INTANAGONWIWAT et al., 2002; KRISHNAMACHARI; ESTRIN; WICKER, 2002). No entanto, a agregação de dados é um caso específico de fusão de informações e trata basicamente de técnicas de transferência de dados (KULIK; HEINZELMAN; BALAKRISHNAN, 2002). A relação entre os termos agregação e fusão de informações pode ser visto na Figura 1.

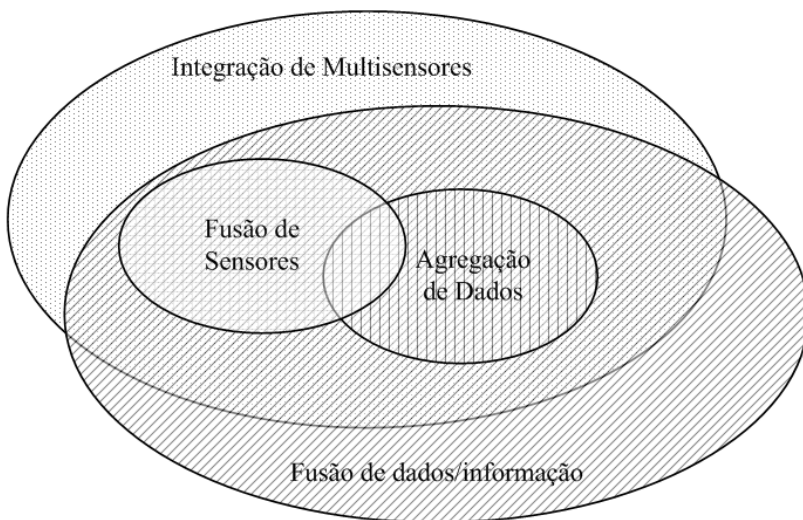
A fusão de dados é outro termo utilizado como sinônimo para fusão de informações. Apesar do termo ser de fácil entendimento, para ELMENREICH (2002) a fusão da informação tem maior abrangência e cobre todos os aspectos do campo de fusão (exceto fusão nuclear ou fusão

no mundo da música) enquanto o termo fusão de dados pode coincidir com a nomenclatura utilizada por outras áreas de pesquisa, além de ser utilizado para nomear a fusão de dados brutos (*data raw*).

Já o termo fusão de sensores, colocado como um subconjunto da fusão de informações é apresentado como “a combinação de dados sensoriais ou dados derivados dos dados sensoriais, tal que a informação resultante é em algum sentido melhor do que seria possível quando essas fontes fossem usadas individualmente” (HALL; LLINAS, 1997). Os dados utilizados podem ser, até mesmo, várias observações do mesmo sensor ao longo de um período de tempo. No entanto esta definição não cita a possibilidade da utilização das informações para a tomada de decisão (BOSTRÖM et al., 2013). Assim para que haja um bom entendimento, utilizaremos o termo fusão de dados de sensores, como um subconjunto da fusão da informação, preocupada com a fusão de dados brutos provenientes de diferentes sensores em um mesmo espaço de tempo.

Em resumo, NAKAMURA, E. F. (2007) comparou os termos sinônimos de fusão de informações. Na Figura 1, observamos a fusão da informação como termo que abrange termos comuns como fusão de informações e agregação de dados. A integração de Multisensores, não se encaixa totalmente na definição de fusão de informações, pois também define a como os sensores são interligados. Podemos observar ainda uma pequena intersecção entre fusão de sensores e agregação de dados.

Figura 1 – Relacionamento entre os termos de fusão



Fonte: (NAKAMURA, E. F., 2007)

2.2 FUSÃO DE INFORMAÇÕES EM RSSF

Uma maneira comumente utilizada para o monitoramento, é a medição utilizando um único sensor utilizando uma abordagem centralizada. Entre os desafios na utilização de um único sensor destacam-se (ELMENREICH, 2002):

- **Disponibilidade:** é a perda de percepção sobre o objeto monitorado. Pode ser ocasionado, por exemplo, pela avaria do sensor ou perda de comunicação.
- **Cobertura Espacial:** Limitação do sensor no sentido da área sensoriada. Como exemplo, em uma caldeira a temperatura pode variar de uma região para outra, não sendo possível determinar corretamente a temperatura média da água.
- **Cobertura Temporal:** cada sensor tem uma frequência de operação. Esta frequência pode ser insuficiente para observar um determinado evento.

- **Exatidão:** Medições de sensores individuais limitam-se a exatidão do elemento de detecção independente.
- **Incerteza:** Devido a sua visão limitada, um sensor é incapaz de reduzir a incerteza na sua percepção devido a ambiguidade ou observação limitada do objeto.
- **Calibração:** Tradicionalmente, a calibração é realizada durante o tempo de produção, e normalmente a maioria dos sensores sofre com problemas tais como o envelhecimento e desvio térmico. A utilização de múltiplos sensores permite a execução de calibração automática (TAKRURI; CHALLA; YUNIS, 2009).

Por outro lado, é crescente o uso de múltiplos sensores para o monitoramento de uma ou várias grandezas físicas. Esta abordagem é utilizada com o objetivo de buscar melhores resultados e pode fazer uso, de técnicas de fusão de informações incluindo aí as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF).

A fusão é amplamente utilizada nas RSSF, visto a configuração das redes com nodos em diferentes tipos de arranjos. Maiores informações sobre topologias de RSSF podem ser vistos no apêndice B. As falhas não são exceção nas RSSF. Estas redes, muitas vezes utilizadas em ambientes agressivos, como os industriais ou em campo aberto, sofrem a influência de variação brusca de temperatura, pressão, ruído eletromagnético, radiação, choques mecânicos; e mesmo em ambientes mais controlados podem ocorrer problemas decorrentes do processo de comunicação. Além disso, existem os erros e incertezas inerentes aos métodos de medição.

O enfoque padrão para compensar a privação de sensor é construir uma unidade tolerante a falhas. A utilização de múltiplos sensores permite fornecer informações mesmo em caso de falha parcial, abrangendo uma maior área de cobertura no espaço e tempo.

É importante ressaltar que esta abordagem também resulta em uma maior robustez contra erros nas medições, principalmente quando utilizado sensores de tecnologias diferentes, realizando-se várias medições independentes que são, posteriormente, fundidas. Ainda como outro aspecto positivo pode-se citar a sinergia, obtida através da observação de diferentes aspectos mensurados, gerando conclusões impossíveis de se obter com a utilização de um único sensor, e as facilidades proporcionadas pela RSSF. Relativo ao custo deve-se observar que a infraestrutura de suporte exigida é menor, pois, os sensores por serem múltiplos podem ser mais baratos, menos precisos e exatos (caso a aplicação permita menor precisão).

Outra vantagem de uso de múltiplos sensores é referente à redução da complexidade da aplicação. Ela não precisará lidar com números imprecisos, fluxos ambíguos e incompletos, além de ter entradas e saídas padronizadas, independentemente do tipo e tecnologia do sensor utilizado (ELMENREICH, 2002).

No entanto há de se observar algumas restrições no uso de fusão. A utilização de sensores de menor custo poderá acarretar em um desempenho insatisfatório no sentido de perda de precisão. Caso os dados de entrada sejam de má qualidade, de forma que a quantidade de dados incorretos superarem os corretos, o desempenho global do sistema poderá ser afetado (NAKAMURA, E. F., 2007). A distribuição de sensores, via de regra, acarreta em um maior esforço de comunicação. A execução da autocalibração pode ser complexa em ambientes sensíveis e difusos. Pode-se ressaltar a enorme vantagem da fusão e RSSF, desde que observadas as limitações impostas pela aplicação.

2.3 CLASSIFICAÇÕES DA FUSÃO DE INFORMAÇÕES

Nesta seção classificam-se os tipos de fusão segundo os níveis de abstração, entrada e saída e relação entre as fontes.

2.3.1 Baseada no nível de abstração dos dados

LUO, R. C. C.-C., YIH; KUO-LAN, SU (2002) divide a fusão de múltiplos sensores ou um simples sensor ao longo do tempo em quatro níveis de abstração: sinal, *pixel*, *característica* e *de símbolo*, como segue:

- **Sinal** (*signal-level*): Normalmente usado em sistemas de tempo real e trata basicamente de dados brutos (*raw data*), como por exemplo, pressão, altitude e luminosidade.
- **Pixel** (*pixel-level*): A fusão no nível de pixel pode ser utilizada para melhorar a informação associada a cada pixel de uma imagem, resultante da associação de múltiplas imagens. As imagens são obtidas normalmente através de sensores óticos, como infravermelho e câmeras de vídeo.
- **Característica** (*feature-level*): A fusão ao nível de característica pode ser entendida como a extração de atributos, tais como feições, traços, padrões ou aspectos em destaque a partir dos dados dos sensores.

- **Símbolo ou Decisão** (*symbol-level*): A fusão em nível de símbolo permite que as informações provenientes dos sensores, conhecimento *a priori* e informações dos demais níveis de fusão sejam utilizadas de forma conjunta para a tomada de decisão.

No entanto, é necessário salientar que muitos sensores podem fornecer informações para qualquer um dos níveis citados, além de possivelmente haver a interação entre os níveis e esta classificação pode não abranger todos os tipos de aplicações.

A classificação segundo Dasaraty (1997), quando feita pelo nível de abstração, deve ter três níveis, sendo eles: sinal, característica e decisão.

- **Fusão de baixo nível** ou de sinal: Os dados brutos são fornecidos como entradas, combinadas diretamente em novos dados que são melhores do que as entradas individuais. Utilizado quando os sensores observam o mesmo parâmetro físico com os dados derivados compatíveis. Se não for possível fundir em baixo nível, deverá ser utilizada a fusão de nível de características ou decisão.
- **Fusão de nível médio** ou de características: é a abstração de dados brutos, de forma que quando extraídos representem o objeto de forma precisa e concisa. Normalmente é a combinação de dados como forma, velocidade e posição, de maneira que os métodos clássicos de reconhecimento de padrões, como a inferência, possam ser aplicados. Normalmente as características extraídas são usadas em nível de decisão.
- **Fusão de alto nível** ou de decisão: é o nível de tomada de decisões, assumindo as representações simbólicas como entrada. É um lugar ideal para incorporar conhecimento *a priori* e informações específicas sobre a decisão a ser tomada.

Para DASARATHY (1997) é possível ainda que a fusão seja realizada levando em consideração mais de um nível de abstração, como por exemplo, a tomada de decisão baseada em dados brutos e características.

2.3.2 Baseada na entrada e saída.

DASARATHY (1997) ainda classificou os métodos de fusão em cinco categorias de acordo com as entradas e saídas.

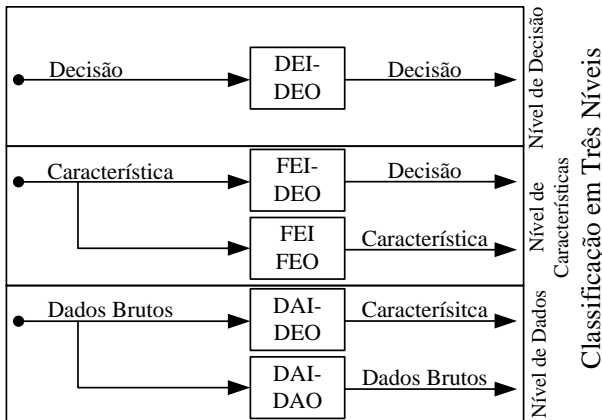
- **Dados entram – Dados Saem** (*Data In – Data Out*): nesta classe a fusão da informação é lida com dados brutos e o resultado é

ainda relacionado com dados brutos, porém, estes são possivelmente mais precisos ou confiáveis.

- **Dados entram – Características Saem (*Data In – Feature Out*):** usa dados brutos de fontes para extrair características ou atributos que descrevem uma entidade. Neste caso, o termo "entidade" significa qualquer objeto, situação ou abstração do mundo.
- **Características entram – Características Saem (*Feature In – Feature Out*):** é aplicado em um conjunto de recursos para melhorar/refinar uma característica ou extrair novas.
- **Características Entram – Decisões Saem (*Feature In – Decision Out*):** nesta classe a fusão de informação leva a um conjunto de características de uma entidade a gerar uma representação simbólica ou uma decisão.
- **Decisões entram – Decisões Saem (*Decision In - Decision Out*):** podem ser fundidas a fim de obter novas decisões ou dar ênfase as anteriores.

A Figura 2 mostra de forma comparativa os métodos baseados em entrada e saída, bem como o baseado nos três níveis de abstração.

Figura 2 - Modelo Baseado nas Entradas e Saídas



Fonte: (DASARATHY, 1997)

Pode-se verificar que não é possível utilizar um dado bruto para tomada de decisão. Para que seja possível tal configuração deve-se entrar

com dados e sair com características e em outra operação entrar com características e sair com decisões. Nesta classificação é possível visualizar de forma clara o fluxo de informações.

2.3.3 Baseada na configuração dos sensores

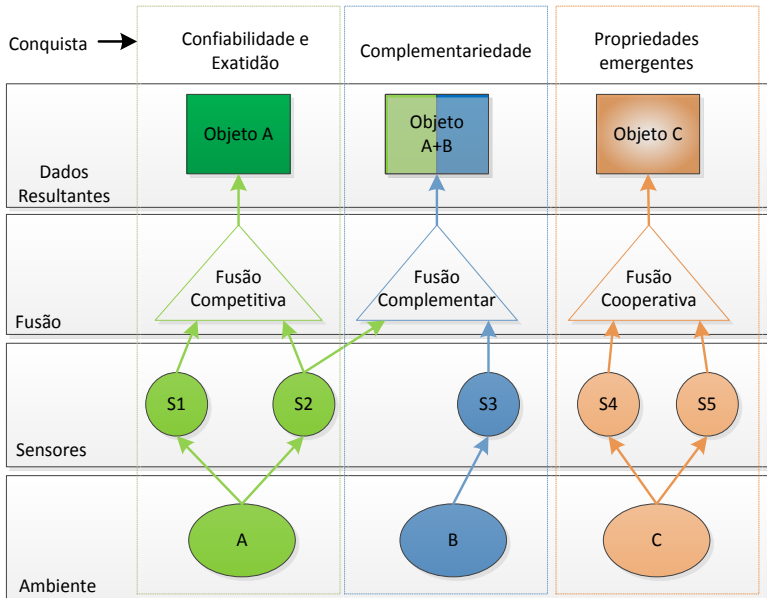
Redes de fusão de sensores também podem ser categorizadas de acordo com o tipo de configuração do sensor. DURRANT-WHYTE (1988) distingue três tipos de configuração do sensor:

Complementares: é a combinação de dados complementares. Neste caso, os sensores não dependem diretamente um do outro, mas se complementam para obter uma imagem mais completa do fenômeno observado. Na Figura 3, verifica-se que S2 e S3 fornecem informações de objetos A e B. O Resultado da fusão é a observação de $A + B$ de forma complementar.

Competitivo ou Redundante: Nesta configuração são fornecidas medições independentes da mesma propriedade em instantes diferentes ou por duas ou mais origens no mesmo instante. A Figura 3 mostra a observação de A por S1 e S2. O resultado pode ser uma melhor acurácia e/ou precisão, além de proporcionar tolerância a falhas e maior robustez, podendo se utilizar sensores competitivos ou heterogêneos para um melhor resultado. Em RSSF, a fusão dos dados pode fornecer informação de alta qualidade e prevenir que os sensores transmitam informações redundantes.

Cooperativa: Uma rede cooperativa de sensores usa as informações fornecidas por mais de um sensor para derivar informações que não estariam disponíveis se fosse utilizado apenas um. Normalmente, neste tipo de fusão, há perda de precisão e confiabilidade. Na Figura 3, S4 e S5 representam uma configuração cooperativa. Eles observam o mesmo objeto, mas as medições são utilizadas para formar uma observação sobre o objeto C que não poderia ter sido obtida a partir das medições individuais de S4 ou S5.

Figura 3 – Fusão competitiva, complementar, cooperativa



Fonte: (ELMENREICH, 2002)

O arranjo de uma fusão poderá incluir uma ou mais configurações, formando uma arquitetura híbrida. Por exemplo, podem-se utilizar uma RSSF e sensores de pressão atmosférica redundantes em uma mesma área geográfica delimitada por um microclima de interesse a fim de obter uma informação com maior exatidão. Utilizando a fusão complementar podem-se unir as informações geradas para obtenção de dados de uma unidade climática maior. Utilizando-se de fusão cooperativa é possível observar fenômenos adicionais como temperatura, velocidade do vento e umidade do ar, concretizando uma estação meteorológica que poderá gerar informações a fim de se obter a previsão meteorológica.

2.4 MODELOS DE FUSÃO

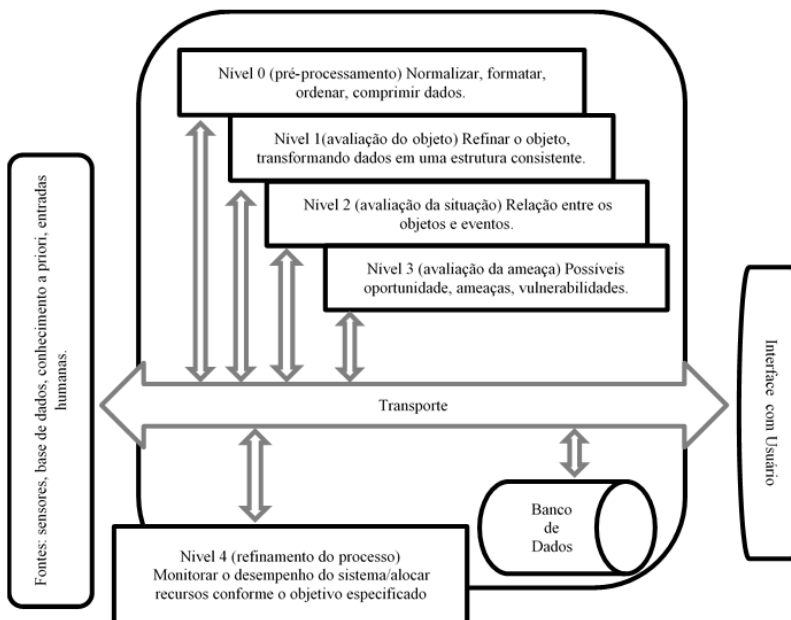
Os modelos de fusão de informações na maioria das vezes descrevem um conjunto de processos e como estes se relacionam, abstraindo-se de implementações ou instâncias específicas e são úteis para orientar a especificação, proposta e o uso da fusão de informações dentro RSSF.

Muitos modelos foram propostos para auxiliar no projeto de sistemas de fusão de informações. Alguns deles são o *JDL Process Model* (e

variações), *Dasarathy Model*, *Waterfall Model* e a Fusão de dados multi-sensores.

O modelo JDL (*Joint Directorate of Laboratories*) surgiu a partir da área militar, na década de 80. Apresentou um dos primeiros modelos realmente úteis de fusão além de uma terminologia padrão. Seu objetivo era melhorar a comunicação entre militares, reduzir a ambiguidade e distinguir as entidades individuais. Logo, ele se tornou comum em outras áreas que utilizam fusão de informações. É composto por 5 níveis de processamento, sistema de banco de dados e um barramento de informações conectando os componentes. Na Figura 4 podem-se verificar de forma didática os níveis de processamento de 0 a 3, o fluxo de dados e os componentes do modelo.

Figura 4 – Modelo JDL



Fonte: (HALL; LLINAS, 1997)

- **Fontes:** responsável por providenciar a entrada de dados, pode ser um banco de dados, sensores, conhecimento *a priori* ou entrada humana.

- **Sistema de Banco de Dados:** apoia a manutenção dos dados, utilizados ou fornecidos pelo sistema.
- **Interface com o usuário:** entrada e saída de dados como comandos, alarmes, displays, gráficos e sons.
- **Nível 0** – trata-se de observar o objeto e pré-processar os dados, ou seja, normalizar, formatar, ordenar, comprimir dados. Esta tarefa pode ser feita dinamicamente de acordo com as necessidades do sistema.
- **Nível 1** – Trata-se de fundir os atributos do objeto provenientes de múltiplas origens, com o objetivo de identificá-lo e localizá-lo em um mapa, por exemplo.
- **Nível 2** – Tenta contextualizar a relação entre o objeto e os eventos observados, como por exemplo, observar os sinais acústicos de pássaros e baseado em um conjunto de sons, inferir a classe pássaro.
- **Nível 3** – Avalia a situação atual e projeta um futuro para identificar possíveis ameaças, vulnerabilidades e oportunidades para as operações. Por exemplo, identificando um alvo e prevendo sua futura localização, podendo identificar ou não se representa uma ameaça.
- **Nível 4** – É um meta-processo responsável por monitorar o desempenho do sistema e alocar as fontes de acordo com os objetivos especificados, e não por via de regra um processo de fusão.

A terminologia utilizada no modelo JDL provém da área militar e sua aplicação original é para defesa. Uma revisão do modelo foi realizada por LLINAS et al. (2004), removendo nível 4 e acrescentando abordagens de comunicação entre níveis, antes inexistentes.

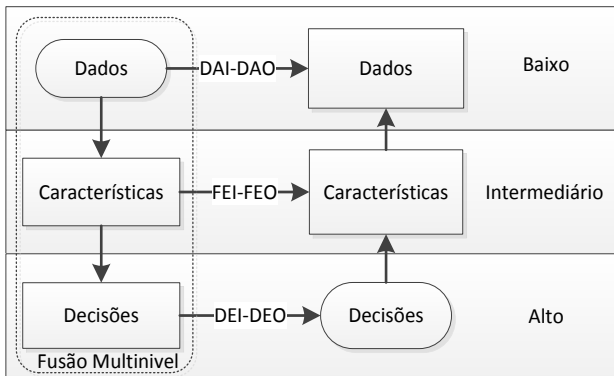
2.4.2 Modelo DFD

O *Data-Feature-Decision* (DFD) proposto por DASARATHY (1997) é um modelo baseado em como as informações entram e saem em uma tarefa de fusão, independente do domínio da aplicação Figura 5. Ele explicita o nível de abstração das informações, além da entrada e de saída de cada tarefa de fusão.

Neste modelo na entrada principal fornecem-se dados brutos (*raw data*) e a saída principal é a decisão. Tem boa especificação de como os dados se relacionam. Embora não fique claro como a arquitetura lida com a melhoria da qualidade, o modelo fornece uma maneira requintada de

especificar as tarefas de fusão mediante o que se espera na entrada e saída. O desempenho do sistema é reforçado por blocos de decisão que usam retroalimentação do sistema para ajustar sua capacidade de decisão. A Figura 5 mostra que os dados, recursos e decisões podem ser fundidos em qualquer nível, assim como a entrada e saída. Desta forma, por exemplo, podem entrar decisões e saírem dados ou entrarem dados e saírem decisões.

Figura 5 – Modelo DFD



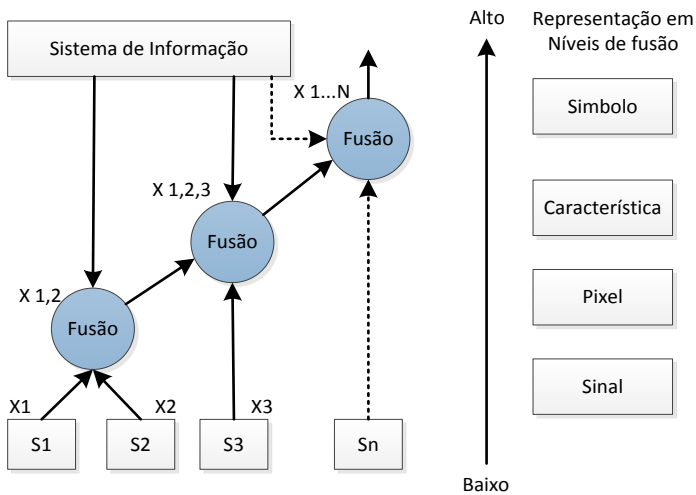
Fonte: (DASARATHY, 1997)

2.4.3 Fusão de dados multisensores

LUO, R. C. C.-C., YIH; KUO-LAN, SU (2002) introduziram uma estrutura genérica de fusão de dados baseada na integração de multisensores. Nesta estrutura, os centros de fusão são distribuídos de forma hierárquica e alimentados por sensores e os níveis de fusão inferiores. O modelo é claramente dividido em duas partes. Uma refere-se à forma com que os sensores são integrados e a outra como os dados são fundidos. A integração refere-se ao uso de múltiplos sensores para auxiliar em uma tarefa específica, enquanto a fusão refere-se a qualquer fase do processo de integração onde há uma combinação real dos dados.

A Figura 6 mostra o diagrama com a fusão e a integração dos múltiplos sensores simultaneamente. Neste diagrama, os dados coletados no nível do sensor são transferidos para os centros de fusão, onde o processo de fusão ocorre de forma sequencial e hierárquica.

Figura 6 – Fusão de dados multisensores



Fonte: (LUO, R. C. C.-C., YIH; KUO-LAN, SU, 2002)

2.4.4 Modelo em cascata

HARRIS CJ (1998) descreveu outro modelo básico, comumente usado para fusão de informações, chamado modelo em cascata (*Waterfall Model*). Uma representação deste modelo é mostrada na Figura 7, onde observa-se o fluxo de dados fluindo do nível de dados para o nível de tomada de decisão. O sistema é retroalimentado com informações provenientes do módulo de tomada de decisão com destino ao nível de sinal. Esta retroalimentação ajuda o sistema na reorganização e autocalibração.

Figura 7 – Modelo em Cascata



Fonte: (HARRIS CJ, 1998)

Neste modelo existem três níveis de representação dos dados:

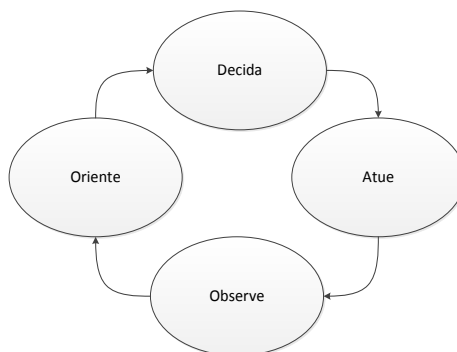
- **Nível 1:** Os dados brutos são devidamente transformados para fornecer as informações necessárias sobre o ambiente. Para realizar esta tarefa são necessários sensores com capacidade para observar o objeto de interesse.
- **Nível 2:** é composto na extração de características e na sua fusão. Estes processos são feitos para obter um nível simbólico de inferência sobre os dados. Seu objetivo é minimizar a quantidade de dados enquanto maximizam as informações entregues. A saída deste nível é uma lista de estimativas com probabilidades (e crenças) que lhes estão associados.
- **Nível 3:** refere-se a objetos de eventos. Rotas possíveis de ação são montadas de acordo com a informação que foi recolhida, as bibliotecas e bases de dados disponíveis e a interação humana.

2.4.5 Modelo OODA

Alguns modelos são especificados com base nas atividades que devem ser executadas por um sistema de fusão de informação. Nesses modelos há interesse na sequência em que a fusão será executada. O principal modelo nesta categoria é o OODA (Observe, Oriente, Decida, Atue), que é um modelo cíclico composto de quatro estágios, como pode ser visto na Figura 8. As principais fases do processo de fusão (BOYD, 1987):

- **Observe:** recolha as informações das fontes disponíveis.
- **Oriente:** As informações coletadas são fundidas para obter uma interpretação da situação atual.
- **Decida:** Especificar um plano de ação em resposta à compreensão da situação.
- **Atue:** O plano é executado.

Figura 8 – Modelo OODA



Fonte: (BOYD, 1987)

De acordo com BEDWORTH; O'BRIEN (2000) observar corresponde ao processamento de sinal e sensoriamento. Como resultado temos a fusão de sensores. Já orientar corresponde a extração de características e o reconhecimento de padrões e como resultado teríamos a fusão de características. Decidir corresponde a tomada de decisão e processamento de contexto, que em seguida alimenta a ação, que nada mais é do que o controle. Como podemos verificar, praticamente todos os processos são comuns a outros modelos, com exceção ao JDL, que não prevê a atuação.

2.4.7 Discussão sobre os modelos

Um dos primeiros modelos apresentados o JDL, tem origem militar. Ele nos proporciona uma visão sistêmica e introduz um dicionário de termos de fusão e a divisão em níveis. No entanto, os termos utilizados muitas vezes são de difícil entendimento e aplicação. Os modelos seguintes como o DFD utilizam abordagem e termos mais genéricos, facilitando a aplicação. O modelo DFD, fornece um léxico mais adequado, deixando de lado a aplicação militar e partindo para uma abordagem genérica também na modelagem. A fusão de multisensores é o que mais se aproxima de uma aplicação real, pendendo a ser uma arquitetura.

De forma geral, os modelos podem ser usados para facilitar a compreensão dos requisitos e limitações introduzidas por técnicas de fusão. Embora não considerem a natureza distribuída das RSSF, eles funcionam como um guia para especificar quais métodos podem ser usados e como eles podem ser integrados.

Outros modelos para fusão são os baseados em papéis como os propostos por KOKAR; BEDWORTH; FRANKEL (2000) e FRANKEL; BEDWORTH (2000). Eles abordam a fusão de forma diferenciada dos demais métodos baseados em tarefas, especificando os atores e seus papéis nas funções de fusão como por exemplo centro de fusão, roteador e sensores.

2.5 FUSÃO DE INFORMAÇÕES E REDES DE SENSORES SEM FIO

Comumente as RSSF utilizam algum tipo de fusão, porém neste caso, a comunicação é levada em consideração quando os dados são fundidos. Devido à capacidade de processamento de um nodo de RSSF, existe a possibilidade da fusão ser efetuada nos próprios dispositivos ou utilizar a capacidade de processamento para melhorar o transporte e fazer a fusão posteriormente. A fusão de dados em uma RSSF é extremamente interessante, pois a tarefa de comunicação sem fio é absolutamente dispendiosa em termos de consumo de energia e também é relativamente cara em comparação ao processamento (POTTIE; KAISER, 2000). Esta é a principal razão para que os nodos de RSSF possuam capacidade de processamento, caso contrário o nodo poderia apenas transmitir os dados, que depois seriam processados por um computador e/ou nodo raiz.

2.6 FUSÃO DA INFORMAÇÃO E PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Há uma relação entre a fusão de informações e os protocolos de comunicação. Nela a fusão pode exercer papel de apoio ou liderança. No papel de apoio, a fusão é tida como uma ferramenta para auxiliar o estabelecimento do protocolo de comunicação. Já no papel de liderança, o aplicativo utiliza os protocolos de comunicação como meio para realizar a fusão (NAKAMURA, E. F., 2007).

No primeiro caso, a fusão de informação atua como uma ferramenta para auxiliar os protocolos de comunicação. Por exemplo, pode-se utilizar um método de fusão para estimar a frequência com que os nodos transmitem os dados para o centro de fusão (BUDKE, 2012).

Em outros casos a fusão faz o papel principal, utilizando da infraestrutura para poder atingir os objetivos. Quando a fusão faz o papel principal na RSSF, a comunicação é estabelecida de maneira que pode afetar os resultados em termos de consumo de energia e qualidade dos dados. Para fornecimento dos dados são utilizadas técnicas como as de agregação de dados. Comumente a arquitetura é montada utilizando nodos cabeças de cluster, nodos roteadores e nodos fontes.

2.9 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram revisados os termos relacionados à fusão de informação, muitas vezes referenciado como fusão de sensores de dados e agregação de dados. Estes termos no entanto podem ser classificados como subconjuntos da fusão de informações, e tendem a estudarem uma área específica de fusão.

As vantagens de se realizar o sensoriamento utilizando a fusão de informações de vários sensores está no aumento da disponibilidade, cobertura espacial, cobertura temporal e exatidão, podendo ainda diminuir a ambiguidade nas observações e possibilitar autoajustes. No entanto, caso a quantidade de sensores incorretos superem os corretos, o resultado global é afetado.

Intimamente relacionada a fusão de informações, está a identificação e a eliminação de observações que diferem significativamente do perfil normal. Assim foram definidos os conceitos de falhas e erros, foco da formação de dados atípicos.

A utilização de RSSF facilita a automatização da coleta de dados, a utilização de um grupo de sensores de baixo custo deve ser avaliada, quanto à precisão requerida.

As principais classificações de fusão como a de quatro níveis, entrada e saída e baseada na configuração dos sensores foram descritas neste capítulo. Foram apresentados alguns modelos clássicos de fusão de informações. Um dos primeiros é o JDL, que tem origem militar. Ele nos proporciona uma visão sistêmica e introduz um dicionário de termos de fusão e a divisão em níveis. No entanto, os termos utilizados muitas vezes são de difícil entendimento e aplicação. Os modelos seguintes utilizam abordagem e termos mais genéricos semelhantes ao JDL mas que facilitam a aplicação em outras áreas.

Por último referencia-se os modelos baseados em papéis que deixa de lado a especificação de tarefas e atividades e passam a especificarem um conjunto de funções e especificam as relações entre eles.

3. MÉTODOS DE FUSÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Conforme visto no capítulo anterior, há diversas taxonomias para os métodos de fusão da informação. Uma classificação possível, e apresentada na Seção 3.3.1, leva em consideração os níveis em que a fusão ocorre, assumindo a existência de três níveis de abstração: de baixo, médio e alto nível (DASARATHY, 1997).

Os métodos de baixo nível – como Chauvenet, Peirce, Média Tolerante a Falhas e *Confidence-weighted Averaging* – são aqueles voltados para aplicações que interagem junto aos sensores e ao ambiente monitorado, sendo adequados para serem empregados no monitoramento com RSSF. Os dois principais objetivos desses métodos são:

- (i) Redução na quantidade dos dados transmitidos;
- (ii) Detecção de dados atípicos (*outliers*)¹ nas medidas efetuadas pelos sensores.

Existe uma vasta literatura na área de RSSF sobre métodos de fusão de dados. Devido à necessidade de redução no consumo energético, aliada à baixa largura de banda existente nessas redes, grande parte dos trabalhos existentes é focada no objetivo (i).

Contudo, é importante ressaltar que as RSSFs também têm como características: a redundância em sensores que medem uma mesma grandeza e uma baixa confiabilidade nos sensores. Nesse sentido, abordagens de fusão competitiva (ELMENREICH, 2002), representadas na Figura 3, são de grande importância para aumentar a confiabilidade e exatidão dos valores lidos pelos sensores. Ademais, por outro lado, dados atípicos em uma RSSF podem indicar simplesmente a presença de um evento relevante e que precisa ser tratado. Dessa forma, o objetivo (ii) nos métodos de fusão da informação assumem também grande importância nas aplicações de monitoramento em RSSF.

Esta dissertação apresenta uma arquitetura de fusão da informação para aplicações de monitoramento utilizando RSSF como meio e foca nas

¹ Também chamado por alguns autores de “*dirty data*” ((ZHOU et al., 2011)

técnicas de fusão *stateless* de baixo nível. A correta aplicação dos métodos de fusão de baixo nível é uma etapa fundamental para qualquer aplicação de análise de dados nas camadas superiores de fusão. Outras técnicas, como a agregação e compressão de dados, comumente utilizadas em RSSF, atem-se somente na redução dos dados trafegados. As principais técnicas neste sentido são os algoritmos de detecção de falha (YANG; MERATNIA; HAVINGA, 2010), que também podem ser conhecidos como algoritmos de sensores em consenso (SALUSTIANO, 2006).

Não é de interesse da pesquisa, as técnicas aplicadas a níveis superiores da fusão ou que dependam do histórico de observações, como por exemplo, filtro de Kalman, Média Móvel, Inferência Bayesiana, Logica Fuzzy e Redes Neurais.

3.2 DADOS ATÍPICOS - *OUTLIERS*

Em RSSF, a baixa confiabilidade dos sensores e o ambiente inóspito em que estes executam dão origem a valores atípicos ou *outliers* que precisam ser identificados. Muitas vezes, problemas de comunicação ocasionam erros no envio de dados, com omissão, duplicação ou envio de dados inconsistentes. Outra origem de *outliers* ocorre quando nodos funcionam em situações limites, com temperatura e umidade em valores extremos e em situações de bateria com carga baixa.

De uma forma geral, as aplicações e abordagens usadas para lidar com *outliers* em RSSF dependem fortemente da fonte que os origina. Segundo YANG et al. (2010), em uma aplicação de monitoramento os *outliers* podem ter origem em três fontes a saber: ataques maliciosos, Eventos, Falhas e Erros.

3.2.1 Ataques Maliciosos

Os ataques maliciosos podem ocorrer, por exemplo, quando a RSSF é utilizada em aplicações militares e de segurança. Desta forma, os sensores são expostos à manipulação por adversários (FAWZY; MOKHTAR; HEGAZY, 2013). Estes *outliers* costumam ser tratados em trabalhos de tolerância a falhas bizantinas por técnicas de detecção de intrusão em RSSF (YANG et al., 2010).

3.2.2 Eventos

Os eventos também dão origem a dados atípicos e, de acordo com a necessidade da aplicação, precisam ser tratados adequadamente. Muitas das aplicações de RSSF funcionam com objetivo de fazer alguma detecção *on-line* de eventos. Exemplos desse tipo de aplicação de monitoramento são a detecção de incêndio em florestas, vibrações anormais em estruturas, mau funcionamento em equipamentos fabris etc (DA PENHA JR; NAKAMURA, 2010). A detecção de eventos envolve necessariamente um conhecimento *a priori* do evento de interesse (FAWZY et al., 2013). Nessas aplicações, os valores dos sensores são comparados com valores limites, classificados e tratados como eventos que indicam mudança de estado no fenômeno de interesse (YANG et al., 2010). Em aplicações que armazenam a massa de dados monitorada para um posterior tratamento *off-line*, esse tipo de *outlier* assume grande importância. Técnicas para redução da quantidade de dados transmitidos e armazenados, geralmente baseadas em médias e técnicas de agregação para compressão de dados, tendem, infelizmente, a remover ou mascarar os dados atípicos, os quais poderiam indicar eventos importantes a serem analisados no ambiente monitorado.

3.2.3 Falhas

Uma das características das RSSF é a similaridade com os sistemas distribuídos no que tange as falhas. Diz-se que um sistema apresenta defeito quando o resultado diverge do que é considerado um comportamento correto (COULOURIS; J. KINDBERG, 2007). O erro é uma parte do estado de um sistema que pode levar a uma falha. As falhas causadas por erros podem ocorrer, por exemplo, devido às condições atmosféricas inadequadas para o funcionamento de uma RSSF, que causará problemas na comunicação.

Modelos de falhas

Para HADZILACOS; TOUEG (1993), as falhas podem ser classificadas em três tipos: omissão, arbitrária ou bizantina e de sincronização.

Um sistema falha por omissão quando deixa de executar as ações que deveria, ou simplesmente para de responder seja por falha no processo ou de comunicação.

Já as falhas de sincronização dizem respeito a sistemas onde limites de tempo são estabelecidos e estes limites não são cumpridos por seus componentes.

As Falhas arbitrárias ou bizantinas são o pior tipo. Um processo comete uma falha arbitrária se a sequência de passos que ele executa desvia arbitrariamente da sequência esperada. Assim, pode apresentar qualquer comportamento.

Mascaramento de Falhas

A fim de tornar um sistema tolerante a falhas podem ser utilizadas técnicas como as de redundância para mascarar as falhas (COULOURIS; J. KINDBERG, 2007). Alguns tipos de redundância são:

- **De informação:** bits extras são adicionados para permitir recuperação de bits trocados.
- **Temporal:** uma ação é realizada e, caso necessário, repetida.
- **Física:** componentes são adicionados para permitir que o sistema como um todo supere a perda ou mau funcionamento de alguns componentes.

A redundância de informação é utilizada para recuperação de bits deteriorados. A temporal pode ser utilizada em casos de falhas intermitentes, desde que em tempo hábil, pois se ocorrer o erro a requisição será realizada novamente. A redundância física é realizada adicionando componentes extras para a observação de um objeto, possibilitando que o sistema tolere a perda ou o mau funcionamento de alguns membros. A maioria dos sistemas que toleram falhas bizantinas deve ter mais de dois terços de componentes corretos (LAMPART; SHOSTAK; PEASE, 1982) e/ou satisfazer $N \geq 2f+1$, onde “N” é o número de componentes, e “f” o número de componentes falhos, formando pelo menos um grupo. Este grupo pode ser organizado hierarquicamente ou plano. Do ponto de vista de uma RSSF, a topologia estrela – na qual o nodo central pode realizar o papel de coordenador na tomada de decisão –, caracteriza o funcionamento de um grupo hierárquico. Já uma RSSF ponto-a-ponto caracteriza uma rede organizada de forma plana, na qual todos os nodos são iguais e as decisões são tomadas coletivamente.

3.2.4 Erros

A análise de erros é um estudo de incertezas em medições. A medição tem o mensurando como objeto e tem a finalidade de determinar uma estimativa do valor do mensurando e/ou observar algumas das suas

propriedades. De uma forma geral a medição tem imperfeições que dão origem ao erro e incertezas no resultado da medição e são formados por componentes aleatórios e sistemáticos, além da incerteza da medição. De acordo com o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) há os seguintes tipos de erros (INMETRO, 2012):

- **Erros Aleatórios:** O erro aleatório presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis de grandezas de influência.
- **Erros Sistemáticos:** originam-se de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição e está relacionada com a proximidade do valor verdadeiro.
- **Erros Grosseiros:** em operações manuais, deve-se à falta de atenção, pouco treino ou falta de perícia do operador. Em redes RSSF, o erro grosseiro pode ser ocasionado por falta de comunicação, inversão de bits, instrumentação incorreta no domínio de valor ou tempo.

De acordo com o (INMETRO, 2012) os conceitos de Precisão e Exatidão podem ser definidos como segue:

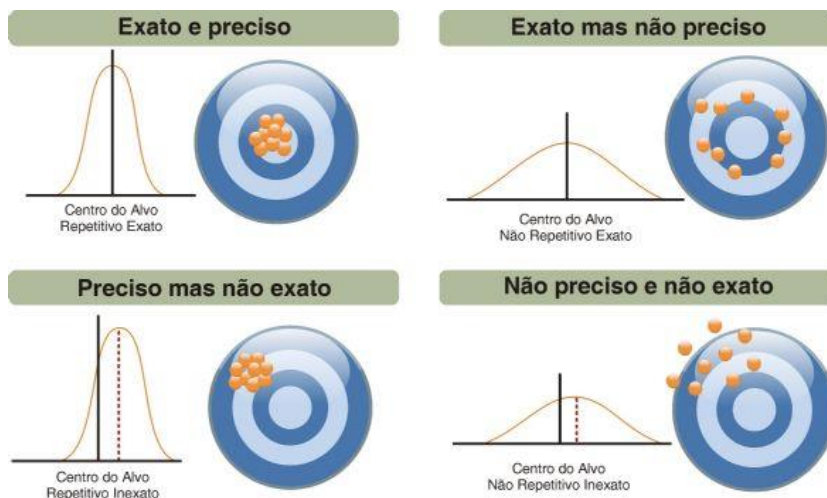
- **Precisão (*Precision*):** é o grau de variação de resultados de uma medição, é afetada pelos erros aleatórios e é uma característica do instrumento. Um sensor preciso produz indicações muito próximas quando se mede o mesmo mensurando sob as mesmas condições. Um sensor impreciso gera leituras aleatórias.
- **Exatidão (*Accuracy*):** de uma medida é a conformidade entre ela e o valor real, tomado como aceito ou referência. É afetada pelos erros sistemáticos e só pode-se saber a exatidão de um sensor, caso também se saiba o verdadeiro valor da variável medida. Pode-se realizar a comparação das propriedades da exatidão e precisão pela Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades da precisão e exatidão

	Exatidão (<i>Accuracy</i>)	Precisão (<i>Precision</i>)
Definição	É a conformidade entre a medida e o valor real	É o grau de variação de resultados de uma medição
Medidas	Única medição	Múltiplas medições
Erros	Sistemáticos	Aleatórios
Alterações	Pode ser alterada	Não pode ser alterada
Palavras Chave	Valor Real, Valor verdadeiro	Dispersão, Repetitividade.
Medida	± 0.2 hPa	0.01 hPa – \pm Algarismos significativos
Tratamento	Calibração, múltiplos sensores.	Estatístico – Média e desvio padrão.

Na Figura 9 compara-se exatidão e precisão, utilizando alvos e a curva da distribuição normal. No primeiro caso, as medidas são exatas e precisas, a curva é íngreme e o centro da distribuição está próxima do valor real. As medidas exatas, mas não precisas, tem valores dispersos, com uma curva normal mais achatada, porém os valores ficam em torno do valor real. Já nas medidas precisas mas não exatas, tem-se a curva normal íngreme, no entanto, nota-se que o pico da distribuição está em desacordo com o real valor da medida. No último caso pode-se verificar os valores longe do centro e dispersos, sendo este o pior caso.

Figura 9 – Comparativo entre Precisão e Exatidão



Fonte: (NOVUS, 2013)

No entanto, mesmo com as correções dos erros aleatórios e sistemáticos, melhorando respectivamente a precisão e a exatidão, ocorre a incerteza da medição, que reflete a falta de conhecimento exato do valor mensurado (INMETRO, 2012). Esta incerteza traz a dúvida sobre a validade do resultado de uma medição (TAYLOR, 2012). O objetivo é que a incerteza seja a menor possível, tendendo a zero. Para reduzir o valor da incerteza é necessário que sejam verificadas algumas fontes possíveis como, por exemplo, a definição insuficiente pela exatidão requerida, amostragem não representativa, resolução finita do instrumento e desconsideração das condições ambientais. Os componentes de incerteza resultantes podem ser quantificados por meio de variâncias ou desvios-padrão (INMETRO, 2012).

3.3 FUSÃO DE DADOS BRUTOS

Os melhores resultados de fusão de sensores poderiam ser obtidos, caso fosse possível modelar matematicamente a variável observada (ELMENREICH, 2002). No entanto, a modelagem matemática nem sempre é possível. Nestes casos muitas vezes são utilizadas abordagens estatísticas (YANG et al., 2010). Na sequência, quatro métodos estatísticos de interesse direto deste trabalho são descritos.

3.3.1 Critério de Chauvenet

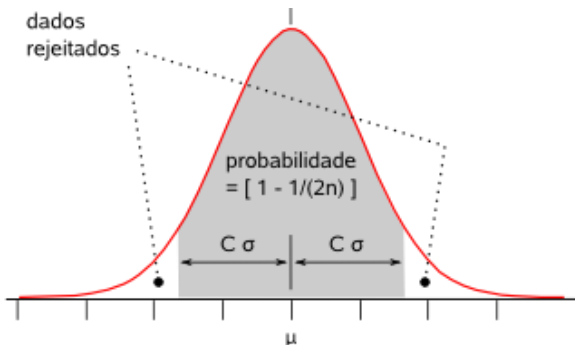
O critério de Chauvenet é um método estatístico que foi desenvolvido para a detecção de *outliers*. Ele baseia-se na hipótese de que uma medição arbitrária pode ser rejeitada se a probabilidade de obter o desvio da média para este valor é menor do que o inverso do dobro do número de medições (TAYLOR, 2012).

Segundo o critério, uma leitura pode ser rejeitada, se a probabilidade de se obter um desvio particular da média estimada for menor que $1/2n$, sendo n o número de leituras realizadas, quando $n \geq 3$. Isso significa que resultados considerados “bons” estão dentro de uma faixa cuja probabilidade é $1 - 1/(2n)$, como pode ser visto na Figura 10 (SOARES, 2013).

O tamanho da amostra é muito importante na utilização do método, pois com uma amostra grande, há poucas chances de que um dos valores afetem a média de forma significativa. Um valor divergente em uma amostra grande deve estar muito longe da média para “mover” a distribuição. Isso faz com que a utilização de poucos dados tenha exigências mais rígidas.

Considerando uma distribuição normal de média μ e desvio padrão σ , pode-se concluir que os resultados bons ocupam a faixa central escura, como se pode observar na Figura 10. Os dados a serem rejeitados ocupam as áreas extremas.

Figura 10 – Critério de Chauvenet



Fonte: (SOARES, 2013)

As faixas de probabilidades são dadas em termos de desvio-padrão, conforme a Figura 10. Para cada valor de n , pode ser calculada a probabilidade; e por integração matemática da função de densidade de

probabilidade da distribuição normal, determina-se o coeficiente C de Chauvenet, correspondente ao número de desvios-padrão para a faixa de valores considerados aceitáveis.

A Figura 11 delinea o algoritmo do critério de Chauvenet para detecção de *outliers*. Devido à carga computacional quando se faz operações integrais e exponenciais em sistemas embarcados, pode ser utilizada uma simples tabela de *look-up* (Tabela 2) contendo o valor já calculado do número máximo de desvios em relação ao tamanho da amostra. (linha 9).

Tabela 2 – Critério de Chauvenet

Tamanho da amostra N	Máximo "C" (em desvios)	Tamanho da amostra N	Máximo "C" (em desvios)
3	1,38	15	2,13
4	1,54	20	2,24
5	1,65	25	2,33
6	1,73	50	2,57
7	1,80	100	2,81
8	1,87	300	3,14
9	1,91	500	3,29
10	1,96	1000	3,48

Fonte: (SOARES, 2013)

Para verificar quanto um valor suspeito se desvia da média em termos de desvio padrão (*z-score*) utiliza-se a equação 1:

$$Z[I] = \frac{|S[I] - \mu|}{\sigma} \quad (1)$$

Onde $S[I]$ é o valor suspeito, μ é a média da amostra, σ o desvio padrão da amostra. Se o valor de Z for maior que Máximo "C" para n amostras, o valor está fora da faixa de valores esperado (linha 14 da Figura 21). Deve-se calcular novamente a média e o desvio padrão, com os valores que ficaram dentro da faixa esperada, obtendo assim o resultado final.

Figura 11 – Algoritmo para o critério de Chauvenet

```

1  INICIO
2  enquanto verdade faça
3  Envie uma mensagem solicitando os dados dos nodos sensores:
4  Inserir no vetor "S" os valores de ponto flutuante dos "N" nodos sensores que transmitiram
5  REQUER: N>=3;
6  TAMANHO_S = tamanho (S);
7   $\mu$  = MEDIA.ARITMETICA (S);
8   $\sigma$  = DESVIO.PADRAO (S);
9  C = chauvenet[LINHA(TAMANHO_S)];
10 Criar o vetor "S1";
11 para (I=1;I<=tamanho(S);I++) faça
12     Z = (| (S[I]-MEDIA.ARITMETICA)|)/DESVIOP;
13     se (Z <= CC)
14         LINHA_LIVRE = busca_linha_livre(S1);
15         S1[LINHA_LIVRE]=S[I]
16     fim se
17 fim para
18  $\mu$  = MEDIA.ARITMETICA (S1);
19  $\sigma$  = DESVIO.PADRAO (S1);
20 retorna ( $\mu$ ,  $\sigma$ )
21 pausa(30 segundo);
22 fim enquanto;
23 FIM

```

Alguns autores levantam questões quanto ao uso do critério de Chauvenet. Segundo (TAYLOR, 2012), o uso do critério deve ser evitado quando n for pequeno; além disso, este trabalho questiona o limite adotado de $1/2n$, pois este é considerado um valor escolhido de forma arbitrária. Além disso, a técnica foi desenvolvida para remover um único valor duvidoso da amostra, e não é recomendada a utilização de mais de uma passagem, no mesmo conjunto de dados. Assim, quando houver várias incógnitas e várias observações duvidosas, o critério de Chauvenet não deve ser usado (CHAUVENET, 1863). Neste caso, o mais adequado é a utilização do método de Peirce, descrito a seguir.

3.3.2 Método de Peirce

O método de Pierce é uma técnica estatística para detecção de *ouliers*, em uma amostra com comportamento normal. O artigo original data de 1852, contudo é amplamente utilizado nos dias atuais. (ROSS, 2003) descreve o método de detecção de dados suspeitos proposto por Peirce como segue:

“as observações devem ser rejeitadas quando os desvios reais da média obtidos por mantê-los, é menor do que os desvios obtidos por sua rejeição, multiplicada pela probabilidade de fazer tantos e não mais, observações anormais” (ROSS, 2003) .

Explicando de outra forma, o objetivo de sua técnica era gerar probabilidades de erro que ocorrem no sistema onde todas as n observações

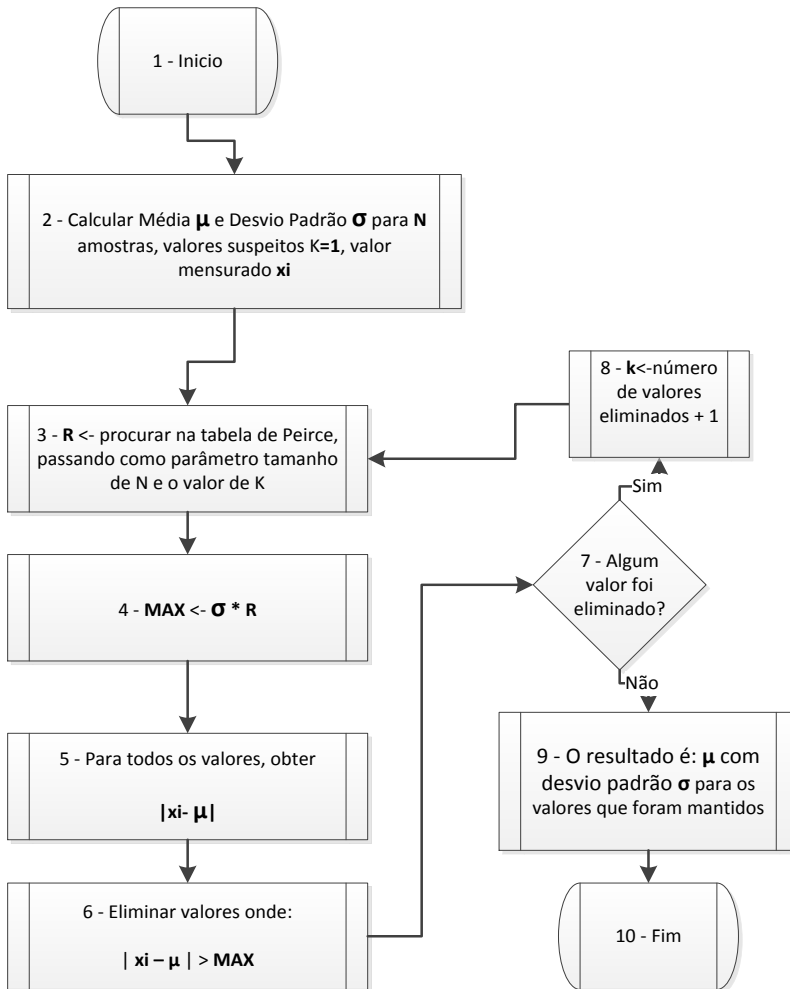
são mantidas *versus* as k amostras rejeitadas. Ele então rejeita k observações e verifica se a amostra é mais próxima da normal que a anterior. O Critério de Peirce, prevê a detecção de mais de um dado discordante na amostra.

O método de cálculo utilizado por Peirce é matematicamente complexo de usar. Desta forma Gould levou o método a ser apresentado em um formato mais facilmente empregável com tabelas derivadas do trabalho de Peirce (GOULD, 1855). A Tabela 3 contém os resultados obtidos pela função de Peirce para 10 amostras, sendo que delas no máximo 5 são duvidosas.

A Figura 12, mostra o fluxo para a aplicação do método de Peirce. O algoritmo inicia obtendo o tamanho da amostra “N” a média μ e desvio padrão σ , para o conjunto de dados, fase 2 do fluxograma. É necessário observar que $K=1$ no primeiro passo, ou seja, na primeira interação o número de dados duvidosos no conjunto corresponde a 1. Com o valor de N e K se pode obter o valor R, etapa 3 do fluxograma. O valor de máximo aceitável MAX, é obtido pela multiplicação do desvio padrão σ pelo valor R obtido da tabela. Tomando o valor sendo testado como x_i , $|x_i - \mu|$ deve ser inferior a MAX (etapa 6 do fluxograma), para permanecer na amostra.

Se nenhum dado for eliminado da amostra, então o algoritmo chega ao fim resultando a média e o desvio padrão, calculados sobre todos os elementos. Caso algum valor tenha sido eliminado, o valor de K é incrementado conforme o número de elementos que foram excluídos. Uma nova rodada do algoritmo acontece, partindo do passo 3 do fluxograma, agora com um novo valor para K . O algoritmo termina quando nenhum elemento mais é eliminado da amostra. Com os valores restantes, são calculados as novas médias e desvios padrão.

Figura 12 – Fluxograma método de Peirce



Fonte: (ROSS, 2003)

O critério de Pierce é rigoroso quanto à detecção de dados duvidosos. Ele não assume um valor arbitrário para a rejeição de *outliers*.

Tabela 3 – Tabela de Peirce

	Observações duvidosas				
N	1	2	3	4	5
3	1.196				
4	1.383	1.078			
5	1.509	1.200			
6	1.610	1.299	1.099		
7	1.693	1.382	1.187	1.022	
8	1.763	1.453	1.261	1.109	
9	1.824	1.515	1.324	1.178	1.045
10	1.878	1.570	1.380	1.237	1.114

Fonte:(ROSS, 2003)

Algumas limitações do método de Peirce usando a tabela estão relacionadas com o tamanho do conjunto de dados, bem como o número observações duvidosas. Isso pode ser um problema, quando utilizadas grandes amostras.

3.3.3 Média Tolerante a Falhas

Um dos métodos de fusão de sensores com simples aplicação, e bons resultados é a Média Tolerante a Falhas – (MTF) (MARZULLO, 1990). Basicamente o método divide um conjunto ordenado de dados em três partes, eliminando as extremidades.

O primeiro passo desta técnica é ordenar o conjunto de dados enviados pelos nodos sensores. Tomando $t=N/3$, onde N é o tamanho do conjunto, se descartam os extremos da amostra ordenada, ou seja, as t maiores e as t menores medidas. O valor final é o cálculo da média e desvio padrão dos valores restantes.

3.3.4 Confidence-weighted Averaging

Elmenreich (2002) propôs um método de fusão relacionando a confiança nos sensores pelo inverso da respectiva variância denominado *Confidence-weighted Averaging* - CWA. A variância é uma quantidade

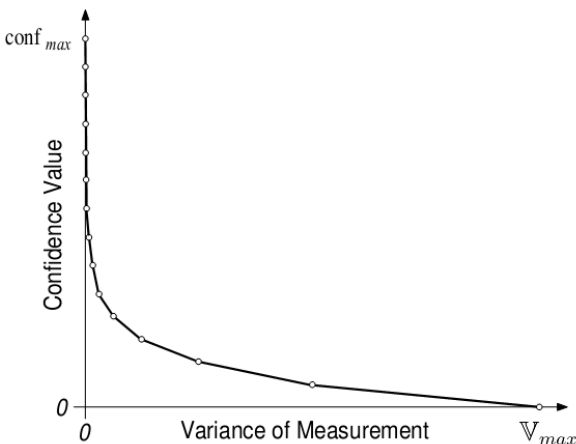
útil em muitos casos pois possibilita comparar diferentes grupos de dados. O desvio-padrão, por sua vez, tem a vantagem de ser expresso na mesma unidade que a variável medida, tornando mais fácil de comparar resultados. No CWA, o melhor caso a variância é próxima de zero, tendo assim a máxima confiança e no pior caso o sensor gera valores aleatórios dentro da sua faixa de operação. A aplicação direta do CWA em RSSF deve observar uma característica indesejada decorrente da baixa carga da bateria, que ocasiona o travamento do sensor fazendo com que a variância fique muito próxima de zero (YANG et al., 2010).

A variância de pior caso pode ser calculada como a variação de uma função aleatória uniformemente distribuída entre os limites a e b , onde a e b são os valores mínimos e máximos de uma função aleatória, uniformemente distribuída.

$$V[S] = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (2)$$

Esta função gera o gráfico representado na Figura 13, onde se observa a relação entre a variância e a confiança proposta por Elmenreich.

Figura 13 – Função de conversão para variância/confiança



Fonte: (ELMENREICH, 2002)

Segundo o autor, é possível encontrar uma distribuição de probabilidade que produza desvios ainda maiores, mas entende-se que valores

muito altos de variância são quase inúteis e, portanto, tem confiança mínima.

Para o cálculo da média ponderada, assume-se que as observações são recebidas da mesma entidade, e o domínio de valor é contínuo. As observações devem ser feitas aproximadamente no mesmo instante. As funções de erro são consideradas independentes, os valores de medição são fundidos usando-se uma média ponderada conforme a equação 3:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n S[i] \cdot \frac{1}{V[i]}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{V[i]}} \quad (3)$$

Onde n é o número de observações de entrada, S_i representa os valores da medição e V_i é a variância estimada. Deve-se observar que o valor da variância deve ser diferente de zero. A variância do conjunto de medidas é obtida pela equação 4:

$$V = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{V[i]}} \quad (4)$$

Normalmente o melhor desempenho da fusão é alcançado, quando são usados sensores heterogêneos com funções de erro independentes.

CWA com tolerância a falhas

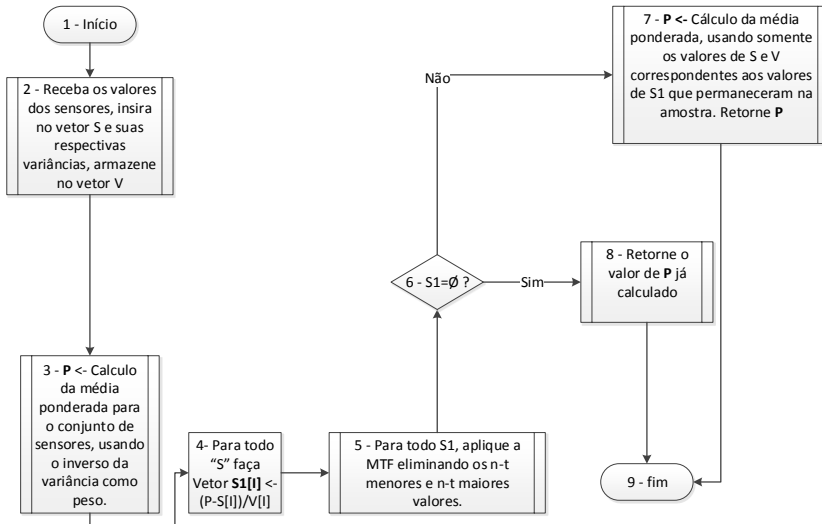
Outros métodos de fusão como a média tolerante a falhas (MTF) podem ser utilizados juntamente com o modelo de confiança proposto, com objetivo de se obter tolerância a falhas. O autor propõe a extensão, integrando a MTF da seguinte forma: Calcula-se a média ponderada P , incluindo todos os sensores de acordo com a equação (3). Para cada sensor, fazer:

$$S1[i] = \frac{P - S[i]}{V[i]} \quad (5)$$

Onde V_i é a variância do sensor S_i e aplicar a MTF. Os valores restantes formam o conjunto de sensores e suas variâncias, da qual deverá ser novamente calculada a média ponderada. Desta forma, serão excluídos sempre 2/3 dos sensores, conforme especificado no algoritmo da MTF. Pode-se observar na Figura 14 o fluxograma do CWA com MTF. Ele inicia recebendo dos sensores tanto os dados de algumas medidas, quanto a variância existente nestes dados, na etapa 2. Na etapa 3, para

cada interação, ou seja, para cada sensor é aplicada a equação 3. O resultado desta equação, para cada sensor, vai para a MTF, etapa 5. Desta forma a MTF faz a filtragem, considerando a variância, sendo que quando utilizada isoladamente, a fusão é realizada somente com os dados. Com os dados restantes depois da MTF, finalmente é realizada a média ponderada, com a obtenção do valor fundido, e da respectiva variância.

Figura 14 – Fluxograma do CWA com MTF



O CWA é interessante por considerar dois aspectos no processo, o da qualidade dos sensores e concordância das leituras entre sensores diferentes. No primeiro caso, o método observa a variância em um conjunto de dados obtidos pelo sensor e através desses dados, consegue determinar a confiança no sensor. Esta forma pode ser mais adequada do que utilizar os dados informados pelo fabricante como a precisão, devido à incerteza sobre a qualidade do sensor de baixo custo, além de que esses dados podem variar com o tempo (*drift*). Os demais métodos estudados neste capítulo, não consideram a qualidade do sensor, quando se realiza a fusão dos dados de múltiplos sensores.

3.4 AGREGAÇÃO E COMPRESSÃO DE DADOS

A agregação é uma técnica de fusão centrada em dados que é muito utilizada em RSSF. Assim como os demais métodos de fusão citados, a agregação tem o objetivo de diminuir a quantidade de dados transmitidos durante o sensoriamento. Para isso geralmente envolve a junção de dados de vários sensores em nodos intermediários, eliminando eventuais dados duplicados gerados por *broadcasts*, estratégias de roteamento, além de dados duplicados de sensores diferentes (KULIK et al., 2002).

Já as técnicas de compressão não são consideradas métodos de fusão de informações, pois somente utilizam codificações para representar dados a fim de que tenham um menor tamanho antes de serem transmitidos. O destinatário dos dados, ciente da codificação utilizada, descompacta-os, tendo novamente as informações originais (KIMURA; LATIFI, 2005; MARCELLONI; VECCHIO, 2008).

Em ambos os casos, os métodos não aproveitam a sinergia gerada pela utilização de múltiplos sensores e estão fora do escopo deste trabalho.

3.5 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE FUSÃO

Os métodos descritos são comuns na literatura para o tratamento de *outliers* e são comparados na Tabela 4. Basicamente são baseados em estatísticas e probabilidades, principalmente devido ao fato de não ter-se a função matemática que descreve a grandeza a ser observada.

A respeito do número de sensores discordantes, o método de Chauvenet é ineficaz quando, em um conjunto de sensores tem-se mais de um discordante, independentemente do tamanho da amostra. Isso também pode limitar a sua aplicação. Nos demais métodos, o número de sensores discordantes pode ser maior que um.

Outro aspecto importante é a possibilidade de se verificar exatamente quais/qual sensor está fornecendo dados atípicos. Neste quesito o método MTF, deixa a desejar pois elimina sempre 2/3 dos sensores, independentemente dos dados gerados pelos mesmos estarem corretos ou não. Os demais métodos se mostraram adequados neste quesito.

Tabela 4 – Comparativo entre os métodos de fusão

	Chauvenet	Peirce	MTF	CWA	CWA +MTF
Nº Máximo de Sensores Discordantes	1	>1	>1	>1	>1
Aponta discordante?	Sim	Sim	Não	Não	Não
Considera qualidade do sensor	Não	Não	Não	Sim	Sim
Conjunto Pequeno?	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Conjunto Grande?	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Rejeição Arbitrária?	Não	Não	Sim	Não	Sim

No tratante a qualidade dos sensores o único método testado, que avalia este quesito é o CWA. Os demais apenas realizam comparativos entre os dados, mas não consideram parâmetros de qualidade.

Quanto ao tamanho da amostra, para um conjunto grande de valores, com mais de 30 amostras seguramente poderá ser usada a média aritmética. No entanto, quanto menor o conjunto de sensores até o limite de $n \geq 3$, onde n é o número de sensores, mais refinado deve ser o método aplicado. A maioria dos métodos testados suportam amostras pequenas, com restrição apenas ao método de Chauvenet. Já para amostras grandes, o método Peirce é inadequado, devido basicamente ao uso de vetor bidimensional. Os demais métodos MTF e CWA trabalham tanto com poucos quanto com muitos sensores.

A rejeição arbitrária por sua vez é outro quesito importante a ser verificado em um método. Eliminar dados de sensores sem um motivo explícito podem trazer problemas para a aplicação nos níveis superiores da fusão. Desta forma, métodos que eliminam apenas os dados discordantes, tendem a ter uma maior aplicabilidade dos que métodos como a MTF que que elimina sempre 2/3 dos sensores. A MTF é o único método testado que realiza esta operação, levando esta característica ao CWA quando ambos estão integrados.

Concluindo, o CWA traz uma característica importante que é a possibilidade de trabalho em conjunto com outros métodos. Isso pode ser importante em casos onde deseja-se levar em consideração por exemplo a qualidade do sensor, tendo ao mesmo tempo tolerância a falhas.

3.6 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu os motivos que levam a se realizar a fusão de baixo nível em RSSF. Uma adequada manipulação dos dados brutos é imprescindível para o correto funcionamento das camadas superiores da

fusão. Dentre os objetivos dos métodos estão, principalmente, a detecção de falhas e de erros, além da redução nos dados trafegados na rede, obtendo, dessa forma, o prolongamento do tempo de vida da mesma.

Por isso, foram estudados alguns métodos comumente presentes na literatura destacando-se os métodos de Pierce e CWA. O primeiro por ser rigoroso quanto à detecção de dados duvidosos, não assumindo um valor arbitrário para a rejeição dos dados e podendo detectar vários *outliers* em uma amostra. O segundo por permitir a utilização em conjunto com outros métodos, incluindo a MTF. Além disso, o CWA permite que se leve em consideração, no cálculo da fusão, a qualidade dos dados obtidos pelo sensor.

4. ARQUITETURA PROPOSTA

4.1 INTRODUÇÃO

Os modelos apresentados para a fusão de informações apresentadas no Capítulo 2 – como a JDL, Fusão de Multisensores e Fusão em Cascata – são importantes por padronizar os conceitos e os fluxos dos processos necessários para a fusão de informações. Esses modelos são genéricos, não sendo voltadas para um domínio de aplicação específico.

Nesta dissertação é apresentada uma proposta de arquitetura de fusão de informações que utiliza alguns dos conceitos fornecidos pelos modelos tradicionais, contudo apresentando uma abordagem específica para o monitoramento remoto de ambientes com RSSF. Nesse sentido, os processos propostos pela arquitetura são voltados para a diminuição do volume de dados e a detecção de *outliers*, conforme os métodos discutidos no Capítulo 3.

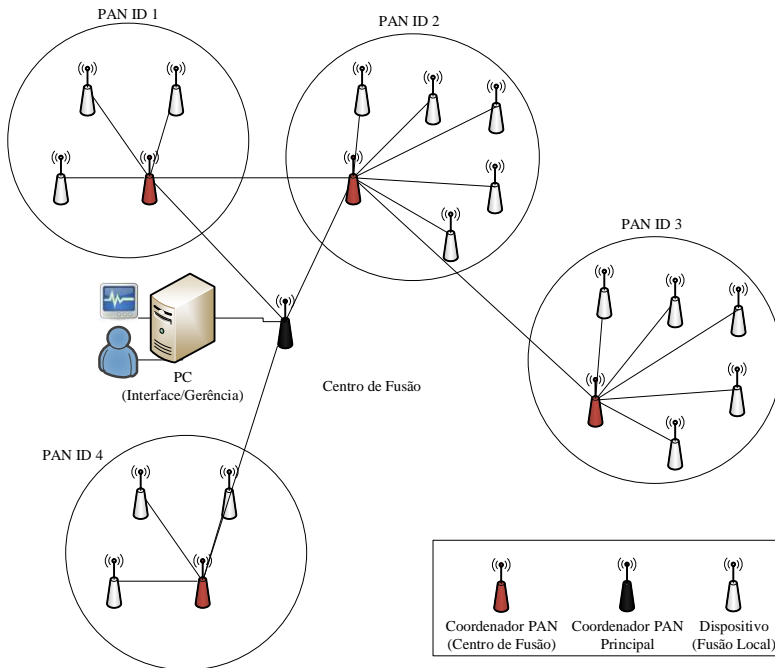
Neste capítulo, inicialmente é descrito o modelo de redes subjacente, composto por uma RSSF configurada com uma topologia hierárquica, organizada na forma de clusters de sensores. Na sequência, é descrita a arquitetura para fusão de dados proposta, composta por duas camadas de fusão e uma camada de gerenciamento e interface com usuário.

4.2 MODELO DE REDE

Na arquitetura proposta neste trabalho, assume-se que exista subjacente uma RSSF configurada como uma árvore de *clusters* (Figura 15). Esse tipo de topologia hierárquica é adequado para aplicações de monitoramento de ambientes com RSSF, pois pode modelar desde a cobertura espacial de uma área pequena (com a configuração da rede com um único *cluster* em topologia estrela), até o monitoramento de uma vasta área, com a formação de diversos *clusters*, cada qual responsável por uma sub-região espacial. Neste trabalho utiliza-se nodos que implementam o padrão IEEE 802.15.4, o qual define diversas topologias de configuração. Para maiores informações são apresentadas no apêndice B.

Cada região monitorada por um *cluster* forma uma PAN, gerenciada por um nodo *Coordenador PAN*, o qual, na arquitetura proposta, pode cumprir o papel de um *Centro de Fusão*.

Figura 15 – Arquitetura RSSF



Quando estiver executando o papel de *Coordenador PAN*, o nodo deverá ter a responsabilidade de gerir a PAN, sincronizando a rede através de envios de *beacons* e cumprindo tarefas especificadas no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011). Maiores detalhes sobre a norma podem ser vistos no Apêndice B.

Este mesmo nodo, ao cumprir o papel de *Centro de Fusão*, tem a responsabilidade de receber dados brutos coletados pelos nodos sensores, detectar e eliminar erros grosseiros, além de aplicar algoritmos de fusão, capazes de detectar sensores discordantes.

Os *dispositivos* (nodos sensores) podem executar uma fusão local antes de enviar seus dados para o seu respectivo *Coordenador PAN*.

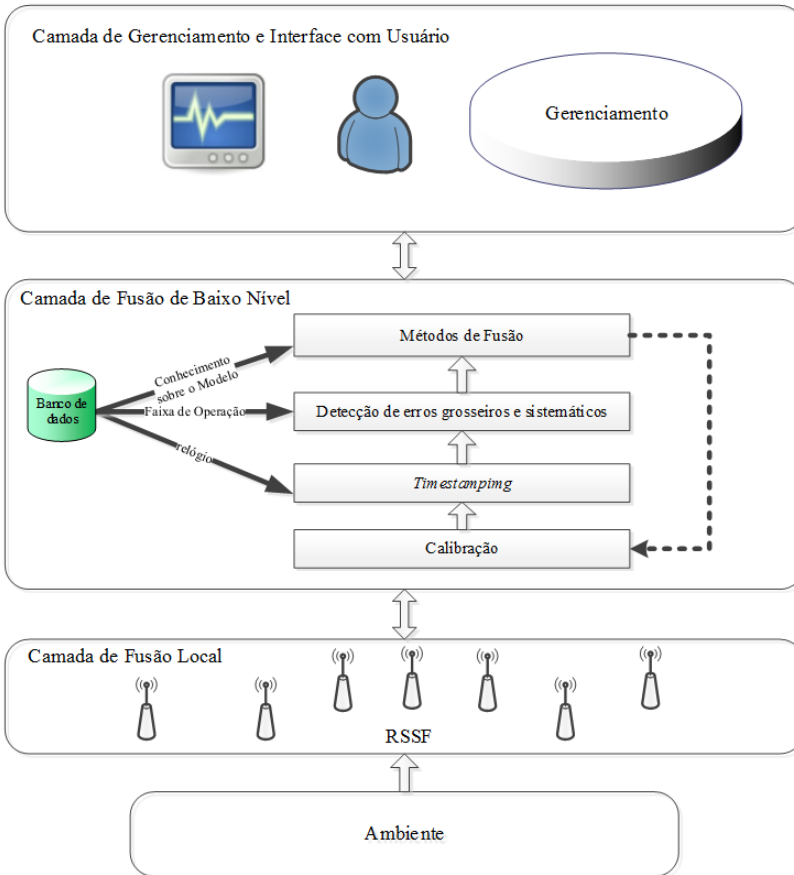
Os dados coletados e tratados pelos *Centros de Fusão* são disseminados na rede até alcançarem a raiz da rede, que é um nodo especial que cumpre o papel de *Coordenador PAN Principal*. Este nodo pode ter maior capacidade de processamento, estar ligado a um computador, fazer acessos a bancos de dados, oferecer interfaces com usuários e até mesmo possuir conexão com a Internet. Os dados coletados por este nodo são

tratados por processos de fusão de dados de médio e alto nível e são utilizados, via de regra, para tomadas de decisão de usuários humanos.

4.3 ARQUITETURA PROPOSTA

A arquitetura voltada para aplicações de monitoramento com RSSF divide as atividades executadas na rede em três camadas: *Camada de Fusão Local*, *Camada de Fusão de Baixo Nível* e *Camada de Gerenciamento e Interface com Usuário* (Figura 16).

Figura 16 – Arquitetura proposta



A *Camada de Gerenciamento e Interface com usuário* é responsável por executar tarefas correspondentes à fusão de médio e de alto nível (conforme classificação de (DASARATHY, 1997) vista na Seção 3.3.1). Essas tarefas – que costumam envolver interações com usuários e acessos a bases de dados – são usualmente empregadas nas tomadas de decisão, são dependentes de cada aplicação, e estão fora do escopo deste trabalho. Por conseguinte, para explicar o funcionamento da arquitetura, serão detalhadas apenas a *Camada de Fusão Local* e a *Camada de Fusão de Baixo Nível*.

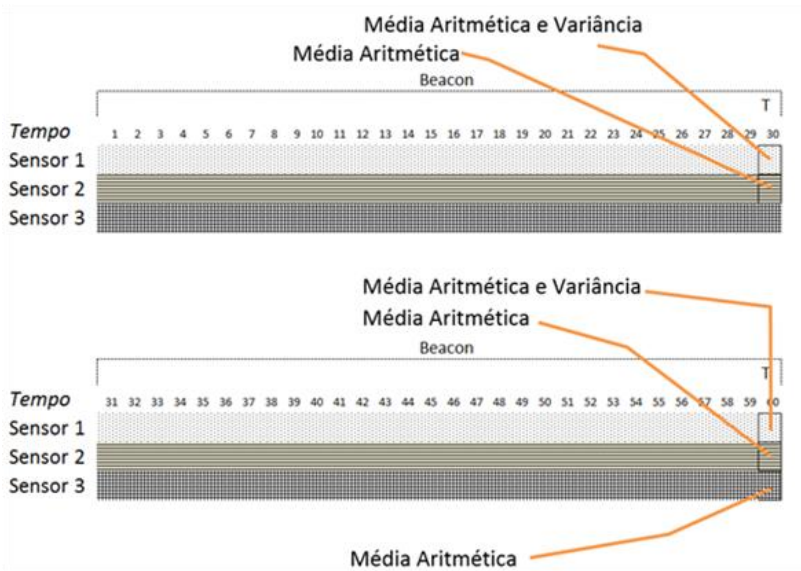
4.3 CAMADA DE FUSÃO LOCAL

O objetivo deste nível de processamento é configurar os sensores a fim de coletar dados sobre o ambiente onde o mesmo está inserido, realizar algum tipo de fusão local simples, e encaminhar os dados para transmissão.

Para implementar esse tipo de fusão local um dos primeiros passos é verificar junto ao fabricante do sensor quais são as taxas de amostragens recomendadas. Dependendo do intervalo de tempo entre as leituras possíveis em um sensor é comum obter-se uma grande quantidade de dados, ou seja, acima de 30 amostras. Nestes casos, como vimos no capítulo 3, não se obtém muitos benefícios na aplicação de métodos complexos de fusão, podendo-se aplicar uma simples média aritmética, para a redução no volume de dados e absorção de dados atípicos. No mais, neste nível não é possível correlacionar os dados do sensor com outros, impossibilitando a detecção de falhas bizantinas por exemplo.

Alguns algoritmos de fusão como o CWA por exemplo, podem utilizar diferentes informações no seu processamento, tais como a variância ou desvio padrão, gerados pela fusão local. Para o cálculo desses valores assim como a fusão no sensor, uma boa opção é realizar o cálculo no intervalo entre *beacons*, como exemplificado na Figura 17.

Também é necessário conferir se existe algum tipo de ajuste ou calibração a ser realizado no sensor, segundo recomendações do fabricante.

Figura 17 – Fusão entre *beacons*

A Figura 17 apresenta como exemplo três sensores. O primeiro faz o cálculo da média aritmética e variância de 30 leituras; uma a cada segundo. O sensor 2 realiza o cálculo da média com 30 amostras coletadas a cada 1 segundo, e o sensor 3 a cada 60 segundos. As transmissões (T) são realizadas a cada *beacon* nos sensores 1 e 2, e a cada 2 *beacons* no sensor 3. Após a fusão local, cada nodo transmite seus dados individualmente para o nodo coordenador PAN (*Centro de Fusão*).

4.4 CAMADA DE FUSÃO DE BAIXO NÍVEL

A *Camada de Fusão de Baixo Nível* pode ser discutida a partir de seus componentes (Figura 16): calibração; *timestamping*; detecção de erros grosseiros e sistemáticos; fusão da informação e realimentação.

4.4.1 Calibração

A calibração de sensores é um problema fundamental em RSSF (CAMPOS; AVILEZ, 2012; TAN et al., 2013). A calibração é o conjunto de operações que estabelece e corrige a diferença existente entre uma observação e o verdadeiro valor da variável medida. Em alguns casos, pode consistir de uma correção aditiva ou multiplicativa da indicação com uma

incerteza de medição associada (INMETRO, 2012). Como ignora-se o verdadeiro valor, a calibração tende a minimizar o erro sistemático a um ponto tal que este seja desprezível para a aplicação em questão.

A calibração de cada dispositivo, individualmente, conhecida como *micro-calibração*, pode ser de pouco valor com o passar do tempo devido a condições ambientais e envelhecimento de *hardware*. Além disso, pode ser intratável quando a rede possuir um grande número de sensores (TAN et al., 2013).

Segundo CAMPOS; AVILEZ (2012), a *autocalibração* ou *calibração autoidadada* compreende a conclusão de um processo de coleta, análise e decisão sobre a calibração, com base nos dados oriundos do próprio sistema de fusão. (TAN et al., 2013) tratam a autocalibração como uma calibração no nível de sistema, de forma que os parâmetros de todos os sensores da rede são ajustados automaticamente. A Calibração no nível de sistema muitas vezes aproveita o conhecimento prévio sobre o local monitorado e sobre o próprio sensor. O grande desafio de calibração de redes baseadas em fusão é entender e explorar a complexa correlação entre desempenho do sistema e as características dos sensores individuais.

Um método convencional de auto calibração é a correção de leituras de cada sensor para um referencial comum baseado em um sensor de referência de alta precisão, ou baseado na referência de um grupo de sensores (BYCHKOVSKIY et al., 2003; RAMANATHAN et al., 2006).

4.4.2 Fusão on-line e off-line (com *timestamping*)

Na arquitetura proposta, a fusão de baixo nível pode ocorrer de forma *on-line* ou *off-line*. No caso da fusão *off-line*, os *Coordenadores PAN* não cumprem o papel de *Centros de Fusão*: apenas encaminham os dados recebidos na direção do *Coordenador PAN Principal* (Figura 15), onde a fusão será executada.

A fusão *off-line* pode ser utilizada para um estudo posterior aprofundado do ambiente observado. Neste caso, é necessário associar estampilhas de tempo (*timestamping*) referentes ao momento da observação em cada dado armazenado. A fusão de baixo nível *off-line* pode ser associada a processos de fusão de médio ou alto nível, cujo escopo está fora desta dissertação.

Os *Centros de Fusão* desempenham importante papel na *Camada de Fusão de Baixo Nível* quando ocorre a fusão *on-line*. A fusão *on-line* é primordial em redes de sensores que também possuam atuadores, para que seus resultados sejam utilizados imediatamente.

4.4.3 Detecção de erros grosseiros e sistemáticos

A detecção e eliminação de erros grosseiros é uma tarefa simples de ser feita e é necessária na arquitetura proposta, principalmente por esta admitir o uso de sensores de baixa qualidade. A detecção pode ser baseada, por exemplo, na inspeção da faixa de operação dos sensores, ou seja, os dados obtidos pelo sensor e que se encontram fora da faixa operacional possível para o modelo, ou variável observada. Por exemplo, se um sensor tem em suas características técnicas a capacidade para observar a pressão atmosférica entre 700 e 1100 hPa (maiores informações sobre as medidas de pressão atmosférica e sensores podem ser vistos no apêndice B), valores fora deste intervalo podem ser descartados. Assim como valores impossíveis de serem obtidos na observação da variável, mesmo que o sensor tenha capacidade de medição.

Erros sistemáticos são mais difíceis de serem detectados. Correções básicas podem ser efetuadas já na implantação (*deployment*) do sensor, quando estas influenciam no valor final. As demais correções podem ser feitas baseando-se, por exemplo, em um sensor de referência, no qual já se tenha confiança; ou baseando-se em um grupo de sensores, nos quais, coletivamente, acredita-se que seus valores médios sejam confiáveis.

4.4.4 Métodos de Fusão

Neste nível os dados dos sensores são fundidos, a fim de diminuir o volume e detectar possíveis dados atípicos. Neste nível sem aplicam os citados no Capítulo 3.

Para esta arquitetura, considera-se um algoritmo apropriado aquele com a capacidade de comparar os dados obtidos pelos sensores envolvidos na fusão e seguindo um critério realizar ou não a supressão dos seus dados. A eliminação das observações de sensores, mesmo quando estes realizam leituras corretas, tende a descartar observações desnecessariamente o que não é desejável. Ainda, é conveniente que quando uma observação for descartada, de alguma forma o algoritmo tenha capacidade de marcar ou mostrar de forma clara qual sensor e qual o motivo que levou o dado a ser rejeitado. Igualmente, devido a dúvida sobre a qualidade dos sensores de baixo custo, é desejável que o algoritmo tenha mecanismos capazes de computar a qualidade do sensor durante o processo de fusão.

4.4.5 Realimentação

As realimentações são informações obtidas de banco de dados, do usuário e outras fontes, que podem até mesmo ter sido geradas pelo próprio sistema, semelhante ao que ocorre no modelo JDL (HALL; LLINAS, 1997). Na arquitetura, elas são utilizadas para informar ao nodo a nível de fusão local, que os seus dados desviam sistematicamente do grupo, ou de um sensor de referência. Informações prévias sobre as características do sensor podem ser incluídas no centro de fusão, para que a mesma realize uma fusão de melhor qualidade.

4.6 ALTERAÇÕES NO METODO CWA

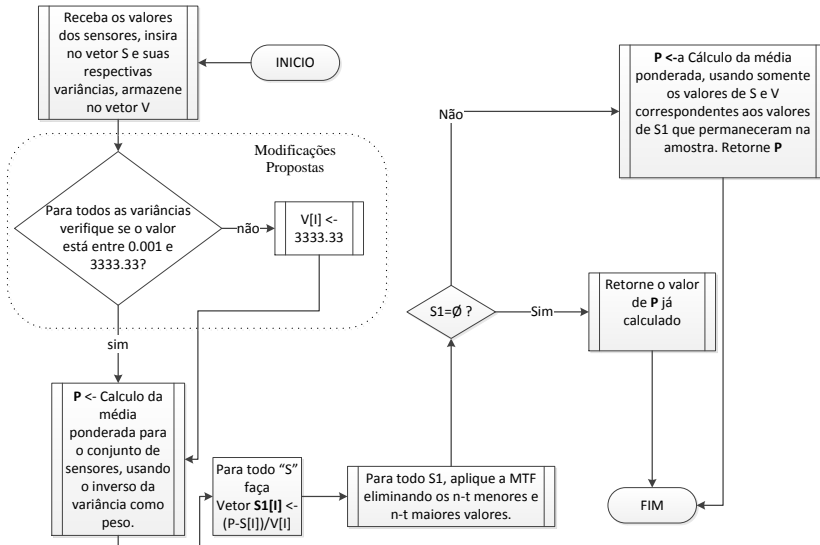
O método CWA utilizado para fundir informações de sensores diferentes, prioriza os sensores com menor variância. Uma exceção apontada pelo próprio autor do algoritmo é que, caso a variância seja zero, passa a ser necessário algum tratamento especial para evitar a divisão por zero.

Contudo, em experimentos preliminares efetuados no desenvolvimento desta dissertação observou-se um outro problema relacionado ao primeiro. A arquitetura proposta neste trabalho é voltada para RSSFs que utilizam sensores de baixo custo, com a contrapartida de serem de baixa confiabilidade. Foi observado, em alguns cenários de execução, que leituras de dados coletados por um único sensor podiam apresentar valores iguais, praticamente sem variação, ou com variação bem menor do que os outros sensores para a variável observada, por um longo período de tempo, caracterizando um sensor defeituoso e “travado”. Esse travamento do sensor poderia ser definitivo ou temporário, por um curto ou longo tempo.

Esse sensor “travado”, pela sua anormal e extremamente baixa variância, fazia com que seus dados incorretos contribuíssem com um maior peso no cálculo da média ponderada do que os sensores corretos. Assim foi necessária uma alteração simples do algoritmo original na implementação realizada nesta dissertação. Basicamente, quando um sensor apresentar variações entre leituras abaixo de um valor estipulado (e dependente do tipo e da especificação do sensor), sua variância calculada será artificialmente aumentada para o máximo valor possível no CWA, contribuindo assim minimamente para o cálculo da média ponderada.

Na Figura 18 é apresentado o algoritmo CWA já com a modificação proposta. Neste caso específico, utilizou-se variações menores que 0.001 para o teste da variância mínima, e 3333.33 para o valor da variância máxima usada na média ponderada.

Figura 18 – CWA com Alterações



5.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi proposta uma arquitetura para o monitoramento remoto de ambientes com RSSF, com base nos modelos de fusão existentes. A arquitetura foi proposta em níveis considerando como infraestrutura de comunicação em processamento uma RSSF. Para cada nível, tarefas intermediárias finalizando nos métodos de fusão *stateless* que fazem a fusão de dados de múltiplos sensores, com objetivo de prestar serviços as camadas superiores como de nível intermediário e alto.

Dentre os métodos possíveis a serem utilizados com a arquitetura, foi proposta uma modificação no CWA, quando na presença de nodos travados.

Importante ressaltar que, apesar de não ter como objetivo a detecção de eventos ou ataques maliciosos durante a fusão, a arquitetura proposta pode até mesmo ser utilizada com esses fins, desde que se utilize outros algoritmos de baixo nível disponíveis na literatura.

5. AVALIAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA

Neste capítulo avalia-se a arquitetura proposta através de um estudo de caso. Uma aplicação de monitoramento ambiental, que usa a Pressão Atmosférica (PA) como grandeza principal a ser monitorada, é utilizada para ilustrar o uso da arquitetura.

A PA é uma grandeza relevante para diversas áreas de aplicação, como a meteorologia, altimetria, engenharia sanitária e ambiental. Maiores informações sobre a pressão atmosférica e os sensores (barômetros) podem ser vistos no Apêndice B. Comumente para o sensoriamento da PA no monitoramento ambiental, emprega-se um único sensor barométrico de alta qualidade, confiável, com especificações rígidas no que tange à instalação e operação e, conseqüentemente, de alto custo. Muitas vezes, dados são armazenados localmente em *data loggers* ou transmitidos por redes cabeadas, o que prejudica a flexibilidade na implantação dessas redes e a recuperação *on-line* dos dados gerados.

Por outro lado, com o desenvolvimento das redes sem fio e, em especial, com o desenvolvimento das RSSFs, existe a possibilidade de se medir a PA utilizando uma RSSF de baixo custo, beneficiando-se da flexibilidade e de um maior grau de cobertura que esta pode propiciar. Contudo, neste contexto, técnicas de fusão de dados são necessárias para diminuir o volume de dados e aumentar a confiabilidade nas observações.

Neste capítulo, a arquitetura proposta é avaliada através de uma aplicação de monitoramento de PA, juntamente com os métodos de fusão de dados de sensores baseadas no Critério de CHAUVENET (1863), Método de Peirce (GOULD, 1855), MTF (MARZULLO, 1990) e CWA (ELMENREICH, 2002). Estas técnicas são aplicadas nos dados obtidos dos sensores e o resultado, comparado com dados obtidos de sensores de referência (com confiabilidade avaliada de forma *off-line*).

Para facilitar a apresentação dos resultados nos gráficos e tabelas, o *Confidence-Weighted Averaging* – CWA, com as alterações propostas no Capítulo 4 será referenciado como CWA com modificações. Da mesma forma, o método (ou critério) de Chauvenet será nomeado como Chauvenet.

5.1 TIPOS DE SENSORES USADOS NO EXPERIMENTO

Nos experimentos, além dos sensores de baixo custo dos nodos sensores da RSSF, também são usados sensores de referência. Foram empregados dois sensores de referência: um externo localizado no Aeroporto Hercílio Luz (Aeroporto de Florianópolis) e outro interno instalado junto ao local do experimento, próximo aos sensores da RSSF. Ambos sensores

de referência possuem um alto custo de aquisição e grande utilização pela indústria.

5.1.1 Sensor de referência externo

O sensor de referência externo é da marca Vaisala modelo PMT16A, utiliza tecnologia de silicone capacitivo². Sua função é informar os dados da pressão atmosférica do local às aeronaves que pretendem decolar ou pousar no Aeroporto Hercílio Luz, além de fornecer dados para o monitoramento ambiental da região.

A comunicação entre o sensor de referência externo e o microcomputador onde os dados são armazenados é realizada através de rede cabeada, a cada minuto. A pressão atmosférica é armazenada juntamente com a informação do instante de tempo em que foi coletado (*timestamp*) em um arquivo de formato de texto.

O microcomputador fica localizado na torre de controle do aeroporto e tem seu relógio sincronizado pelo protocolo *network time protocol* (NTP), considerado suficientemente preciso e exato para o experimento.

5.1.2 Sensor de referência interno

O sensor barométrico de referência interno, instalado no local do experimento é o R. M. Young modelo 61302V, o qual será referenciado neste trabalho como Young. A fabricante do sensor não divulga a tecnologia ou mecanismo utilizado pelo sensor para a obtenção da pressão atmosférica do ambiente. Na configuração padrão de fábrica³, o sensor observa o ambiente a cada segundo e calcula uma média local a cada 30 amostras. Desta forma, obtém-se a pressão atmosférica com intervalos em torno de 30 segundos.

5.1.3 Sensores de baixo custo

Os sensores de pressão atmosférica de baixo custo são quatro, modelo BMP085 da fabricante Bosch⁴, de tecnologia piezo-resistivo, que

² <http://www.vaisala.com>

³ <http://www.youngusa.com>

⁴ www.bosch-sensortec.com

doravante serão denominados simplesmente de Bosch. Estes sensores são utilizados comumente em projetos envolvendo a plataforma de desenvolvimento *open source Arduino*⁵. A comunicação com o sensor é realizada através de uma interface I²C⁶.

Nos sensores de baixo custo, o consumo de energia foi mantido conforme o padrão de fábrica. Dessa forma, a obtenção da pressão atmosférica tem uma latência de 7.5 ms, sendo possível 128 amostragens por segundo. O coeficiente de calibração foi ajustado seguindo as recomendações do fabricante para este modelo de sensor.

Os dados de pressão atmosférica ambiental foram coletados pelos sensores Bosch a cada 1 segundo, e uma fusão local que calcula a média aritmética a cada 30 amostras foi realizada. Esta quantidade de amostras foi escolhida por ser a mesma usada pelo sensor de referência Young, facilitando a comparação do desempenho entre os sensores. Além da média, também foram realizados cálculos das variâncias, as quais são usadas pelo método CWA.

As características técnicas dos três tipos de sensores podem ser observadas na Tabela 5. As tecnologias envolvidas no processo de observação, como capacitivo e piezoelétrico podem ser melhor estudadas no Apêndice B.

Tabela 5 – Comparativo dos dados técnicos dos sensores

Sensor	Exatidão hPa	Faixa de operação hPa	Resolução hPa	Preço R\$	Comunicação	Tecnologia
Vaisala	± 0.3	600 a 1100	0.1	4.300,00	Não informada	Capacitivo
Young	± 0.3	500 a 1100	0.1	3.852,00	Rs 232	Não informado
Bosch	± 0.2	700 a 1100	0.01	65,00	I ² c	Piezoelétrico
Todos assumem um erro sistemático de ± 1 hPa e 65° no período de 12 meses						

5.2 CORREÇÃO DE ERROS GROSSEIROS E SISTEMÁTICOS

No centro de fusão, com os dados obtidos dos sensores de baixo custo, é necessário verificar a existência de erros grosseiros e sistemáticos. Observando a faixa de operação dos sensores Bosch, que varia entre 700 e 1100 hPa, optou-se por considerar valores fora desta faixa como sendo erros grosseiros. Mensagens de comunicação que não chegassem

⁵ www.arduino.cc

⁶ www.nxp.com

ao centro de fusão eram detectadas e seus valores assumidos como zero, para serem posteriormente classificados como erros grosseiros.

Mesmo utilizando as configurações nos sensores de acordo com o recomendado pelo fabricante Bosch, observou-se um desvio permanente dos valores de pressão atmosférica obtidos individualmente em comparação com o sensor de referência interno. Para a correção deste desvio, foram utilizados dados de pressão contidos em intervalos de uma hora, de onde se extraíram médias para cada um dos sensores, incluindo o sensor de referência interno.

A diferença entre o sensor de referência interno e cada sensor do experimento foi adicionada ao valor obtido pelo sensor. Essa adição foi efetivada no centro de fusão. No entanto, essa foi uma escolha de projeto pois esta calibração poderia ser realizada pelo próprio sensor, desde que o centro de fusão informasse ao sensor o seu desvio em relação ao valor de referência.

Os valores constantes individuais que foram obtidos no cenário utilizado por este trabalho podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fator de correção para erros sistemáticos

Young (referência)	Bosch1	Bosch2	Bosch3	Bosch4
0,00	0,15	0,30	0,08	0,37

5.3 HARDWARE DE DESENVOLVIMENTO – KITRFA1

O *hardware* utilizado para os nodos da RSSF foi desenvolvido por BUDKE (2012). Os *kits* de RSSF ATxMEGA_{v2} (Figura 19) são dotados do transceptor AT86RF212, utilizando a pilha de protocolo 2.7.1 da ATMEL. O mesmo segue o padrão IEEE 802.15.4 e opera na faixa de 900MHZ (adequado para comunicação externa de longo alcance, *outdoor*). O *hardware* possui um relógio de tempo real que atende a norma IEEE 802.15.4, e porta de comunicação serial USB-CDC. Suporta comunicação I2C, serial RS232, RS485, além do uso de cartões SD. Pode ser alimentado por fonte AC/DC de 12V, via USB de 5V ou por duas baterias de 1.5V, totalizando 3V. No entanto só é possível um tipo de alimentação por vez.

Figura 19 – KITRFA1



Fonte: (BUDKE, 2012)

A escolha pelos *kits* da Atmel foi devido a diversas vantagens, tais como a disponibilidade imediata, contato direto com o desenvolvedor, compatibilidade com uma grande gama de sensores, documentação detalhada, transceptor compatível com IEEE 802.15.4-2006, além de ferramenta de alto nível para o desenvolvimento e compilação Atmel Studio 6. O Atmel Studio pode ser utilizado para edição de códigos em C/C++ e o compilador é baseado em GNU *Compiler Collection* (GCC).

5.4 TOPOLOGIA DA IMPLANTAÇÃO DA REDE

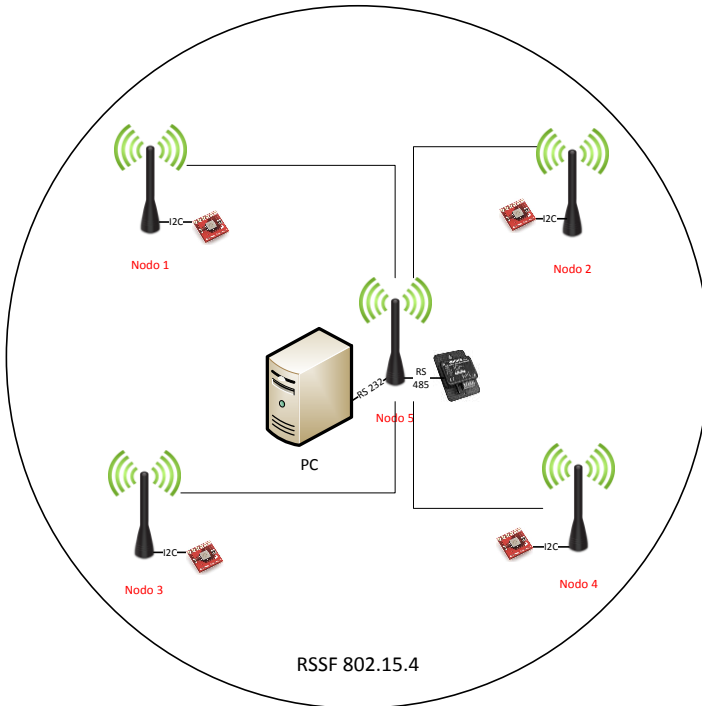
A comunicação entre os sensores do experimento foi realizada utilizando-se uma RSSF IEEE 802.15.4 com topologia em estrela (Figura 20). A quantidade de sensores de baixo custo que foi usada no experimento (quatro) satisfaz o critério mínimo de sensores exigido pelas técnicas de fusão apresentadas no Capítulo 3.

O nodo 5 foi acoplado a um microcomputador e configurado para atuar como nodo Coordenador PAN/Centro de Fusão. A rede foi configurada para ser utilizada em modo com *beacon* ativado, e este nodo, cumprindo seu papel de Coordenador PAN, é responsável por sincronizar a rede através de envio de *beacons*. Os 4 nodos foram ajustados para transmitir dados a cada *beacon* para o nodo coordenador.

Para configurar a periodicidade da aplicação foi utilizado o valor do *Beacon Order* (BO) = 11, o que define um *Beacon Interval* (BI) de

aproximadamente 30 segundos. Maiores informações sobre o funcionamento de RSSF com *beacon* pode ser vista no apêndice B.

Figura 20 – Topologia da RSSF



Na Figura 20, pode-se ver o esquema de interligação dos sensores Bosch aos 4 nodos utilizando a comunicação I²C. Já o sensor Young foi ligado ao KIT (nodo 5) através do padrão de comunicação RS 485, e este por sua vez ligado ao PC através da porta serial (USB) utilizando RS 232.

5.5 LOCALIZAÇÃO E IMPLANTAÇÃO

O local escolhido para a realização das medições foi nas proximidades do Aeroporto Hercílio Luz na cidade de Florianópolis, Santa Catarina, no período entre 15 e 18 de junho de 2013. Na Figura 21 pode-se observar a localização do sensor de referência externa operado pela aeronáutica nas proximidades da cabeceira da Pista 14, a 5 metros de altitude com referência o nível do mar. A distância medida entre o sensor de referência externo e o experimento foi de 1300 metros.

Figura 21 – Local do Experimento

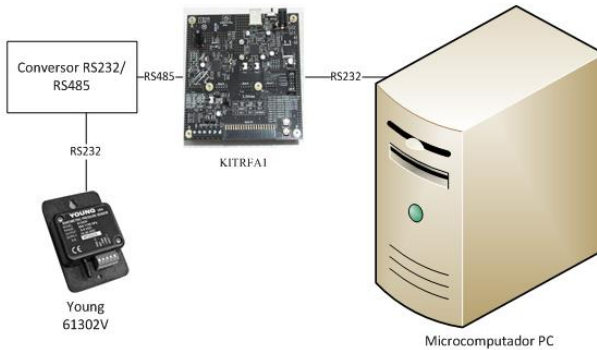


O local do experimento foi escolhido pela proximidade ao sensor externo, sem contudo interferir no controle e tráfego aéreo. No local do experimento, o sensor de referência interno e os sensores de baixo custo foram acomodados em uma área não maior do que 1 metro quadrado, protegidos de intempéries.

5.6 OBTENÇÃO DOS DADOS

A coleta dos dados gerados pelo sensor de referência interno Young foi realizada através da interface serial RS232 do sensor. Esta interface foi acoplada a um conversor RS232/RS485, e o conversor conectado ao KITRFA1 do nodo 5, mostrado na Figura 22. Já o KITRFA1 foi conectado ao microcomputador do experimento pela interface USB, utilizando comunicação serial RS232, com velocidade de 115 Kbps. Conforme anteriormente explicitado na Figura 30, o nodo 5 atua como Coordenador PAN e Centro de Fusão, sendo o responsável por receber os dados dos demais nodos do experimento.

Figura 22 – Interligação Young/Microcomputador



Cada sensor de baixo custo Bosch foi acoplado a um *kit* de RSSF – KTRFA1 através da interface I²C. O *software* de rede utilizado nos nodos para coleta de dados dos sensores de baixo custo foi implementado diretamente sobre a camada MAC. Assim não foram utilizados sistemas operacionais específicos para RSSF, tais como o *TinyOS* ou *freeRTOS*.

Com exceção do *software* de rede, os demais componentes de *hardware* e *software* do KTRFA1 foram mantidos na sua configuração original. A alimentação dos nodos de 1 a 4 foi realizada por 2 baterias do tipo AA, sendo que os nodos também alimentavam os sensores Bosch. O nodo 5 utilizou fonte de alimentação AC/DC, a mesma utilizada para alimentar o sensor Young.

O nodo 5 foi interligado ao microcomputador utilizando comunicação serial com cabo USB. A velocidade e comunicação foi estabelecida a 115 Kbps, e os dados coletados pelos nodos foram armazenados em arquivo texto. Para esta tarefa se utilizou o *software* RealTerm⁷, que coletava os dados, adicionava os *timestamps*, em seguida os armazenava em um arquivo texto com a seguinte estrutura:

```
<timestamp, nodo [1 - 10], variância [1 - 10]>
```

Conforme já explicitado, o microcomputador do experimento assim como o computador do aeroporto tiveram seu horário sincronizado

⁷ realterm.sourceforge.net

através do protocolo NTP. O NTP tem exatidão na ordem de alguns segundos, sendo que o comparativo entre sensores de referência interno e externo foi realizada na casa de algumas horas. Desta forma o NTP mostrou-se adequado para o experimento.

Sobre a fusão, optou-se por realizar a fusão a *posteriori*, pela existência de limitações de permanência no local do experimento e na obtenção dos dados *on-line* do sensor de referência externo.

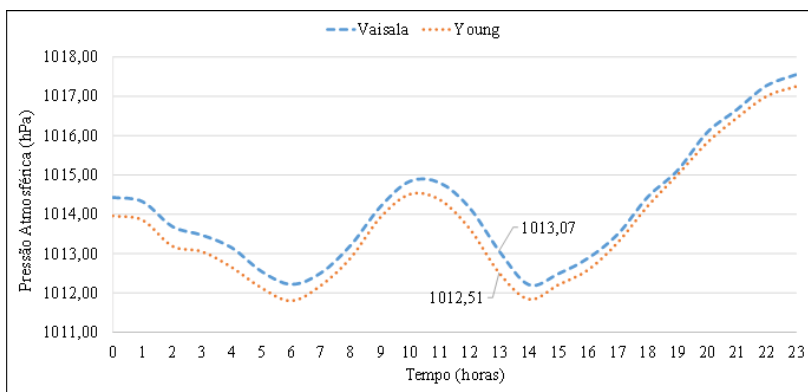
5.7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.7.1 Comparação entre os sensores de referência interno e externo

A primeira análise de dados realizada foi sobre os dados obtidos pelos sensores de referência interno (Young) e externo (Vaisala). O objetivo foi verificar se as leituras feitas pelo sensor de referência interno são coerentes com as do sensor de referência externo.

Foram selecionados dados referentes a 24h de leituras e realizada uma média horária da pressão atmosférica. Para realizar o comparativo foi necessário corrigir os efeitos causados pela diferença de altitude em torno de 1,5 metros, que equivale a 0.18 hPa, subtraídos dos valores obtidos pelo sensor de referência externo. Além da altitude foi necessário considerar a exatidão dos sensores. Segundo os fabricantes, as leituras podem variar ± 0.3 hPa e, dessa forma, a discrepância entre os dois sensores não deve ultrapassar ± 0.6 hPa.

Figura 23 – Sensores de Referência



A Figura 23 apresenta o gráfico comparativo entre os sensores Young e Vaisala, sob mesma altitude. Pode-se observar que ambos os

sensores têm leituras que mostram variações correspondentes ao longo do tempo: a diferença média entre os sensores foi de 0.35 hPa, abaixo do limite de ± 0.6 hPa.

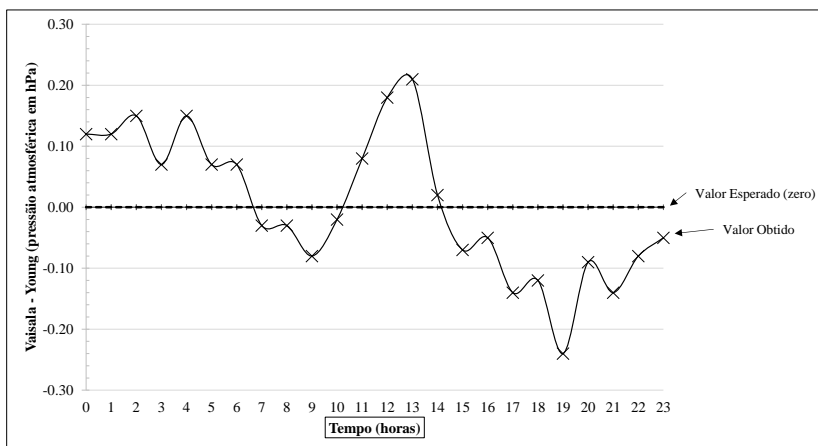
No período de 24 horas em que foram feitas as medições, a diferença máxima instantânea obtida entre os sensores foi de 0.56 hPa, próximo do limite máximo estipulado. Essas variações temporárias que ocorrem ao longo do tempo geralmente estão relacionadas às diferenças nas temperaturas dos diferentes locais de observação e velocidade dos ventos. Mas a diferença média de 0.35 hPa obtida caracteriza um erro sistemático. Este valor foi adicionado as leituras do sensor Young. Os valores obtidos após as correções podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de Young e Vaisala – 24 horas em intervalos de 1 hora

Tempo	Vaisala	Young	Diferença Vaisala – Young
0 h	1014.43	1014.31	0.12
1 h	1014.32	1014.20	0.12
2 h	1013.69	1013.54	0.15
3 h	1013.47	1013.40	0.07
4 h	1013.15	1013.00	0.15
5 h	1012.55	1012.48	0.07
6 h	1012.22	1012.15	0.07
7 h	1012.51	1012.54	-0.03
8 h	1013.21	1013.24	-0.03
9 h	1014.19	1014.27	-0.08
10 h	1014.84	1014.86	-0.02
11 h	1014.80	1014.72	0.08
12 h	1014.17	1013.99	0.18
13 h	1013.07	1012.86	0.21
14 h	1012.21	1012.19	0.02
15 h	1012.49	1012.56	-0.07
16 h	1012.89	1012.94	-0.05
17 h	1013.50	1013.64	-0.14
18 h	1014.44	1014.56	-0.12
19 h	1015.11	1015.35	-0.24
20 h	1016.08	1016.17	-0.09
21 h	1016.66	1016.80	-0.14
22 h	1017.27	1017.35	-0.08
23 h	1017.55	1017.60	-0.05

Uma maneira de avaliar a consistência dos resultados é fazer a subtração dos valores obtidos pelos diferentes sensores. O valor esperado para este cálculo é 0 ± 0.6 hPa. O gráfico da Figura 24 mostra o resultado desse cálculo, sendo que a diferença máxima ficou em torno de ± 0.25 hPa.

Figura 24 – Sensor de referência interno vs externo com correção



Com esses resultados, pode-se considerar que o sensor de referência interno está validado com relação ao sensor de referência externo, o qual é periodicamente calibrado pois seus valores são utilizados para operação diária no aeroporto. Por conveniência, na continuidade deste trabalho, os dados referentes aos sensores de baixo custo (Bosch) e os resultados obtidos pela fusão de seus valores serão comparados somente com os de referência interna (Young), doravante chamado apenas de sensor de referência.

5.6.2 Amostra de dados utilizada para comparação das técnicas de fusão da informação

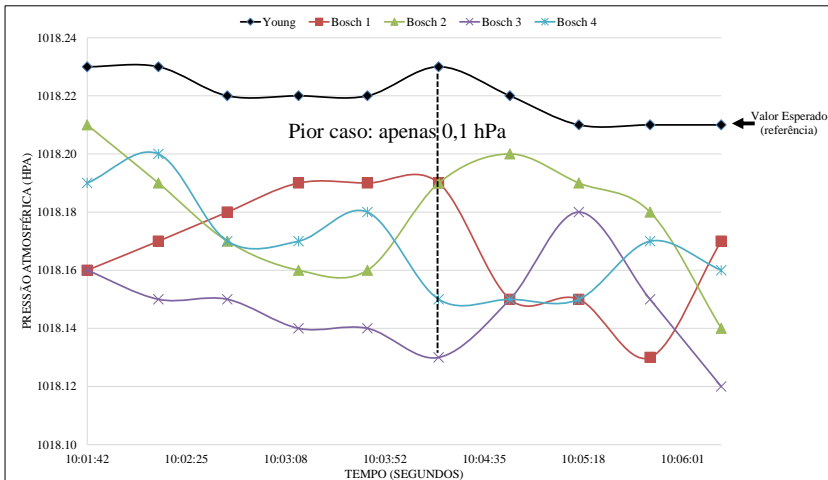
Para fins de avaliação dos métodos de fusão, a figura de mérito usada foi a diferença obtida pelo resultado da fusão de sensores de baixo custo com o valor do sensor de referência. Ou seja, a melhor técnica é aquela em que a diferença entre os valores obtidos pela fusão de sensores de baixo custo e o sensor de referência seja zero. Nas técnicas de fusão, a escolha do conjunto de sensores que farão parte da fusão e quais serão considerados *outliers* e, conseqüentemente, excluídos do cálculo fica a cargo dos algoritmos utilizados. Assume-se que os erros grosseiros e sistemáticos já foram corrigidos nos sensores antes da aplicação das técnicas de fusão.

Na avaliação das técnicas de fusão foram selecionados do volume de dados coletados, dois conjuntos de dados obtidos em dias diferentes. Ambas as amostras de dados se referem a um intervalo de medição de 5

minutos. A primeira amostra (Tabela A.1) foi escolhida porque os sensores Bosch apresentam dados concordantes, próximos entre si. Já a segunda foi escolhida exatamente por ter um sensor de baixo custo com valor discordante dos outros.

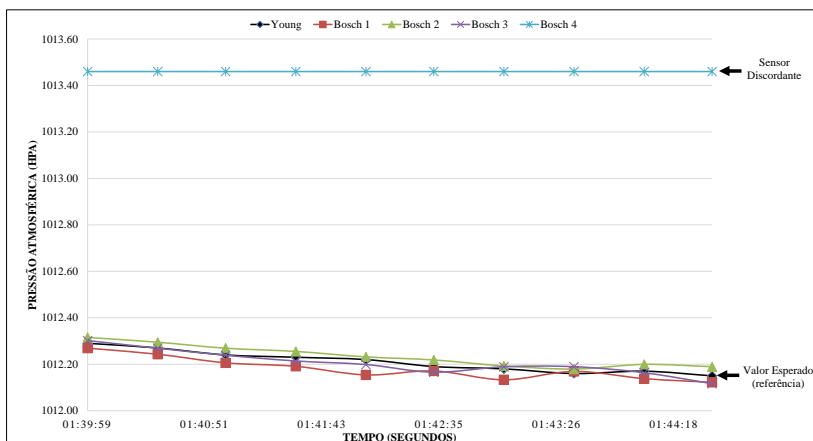
As leituras obtidas na amostra 1 – dados concordantes – são apresentadas na Figura 25. Assumindo as informações técnicas de exatidão fornecidas pelos fabricantes tem-se que os valores não devem ultrapassar ± 0.5 hPa. Em grande parte do tempo os sensores de baixo custo concordam entre si nos valores de pressão atmosférica, estando muito próximo do valor de referência. O pior caso acontece às 10:04:15, onde o sensor Bosch3 apresenta uma diferença 0.1 hPa da referência.

Figura 25 – Amostra 1



A segunda amostra (Figura 26) apresenta uma discordância dos dados obtidos em um dos sensores de baixo custo (Tabela A.2). Esta diferença aconteceu provavelmente pelo travamento de um dos sensores ocasionado pelo baixo nível de bateria no nodo em que o ele estava acoplado. No gráfico, observa-se que os valores do sensor Bosch4 permanecem distante dos demais, chegando a diferir 1.31 hPa (contra apenas 0,01 do gráfico da Figura 25, obtido da amostra 1) da referência, enquanto os demais sensores diferem apenas 0.07 hPa.

Figura 26 – Amostra 2

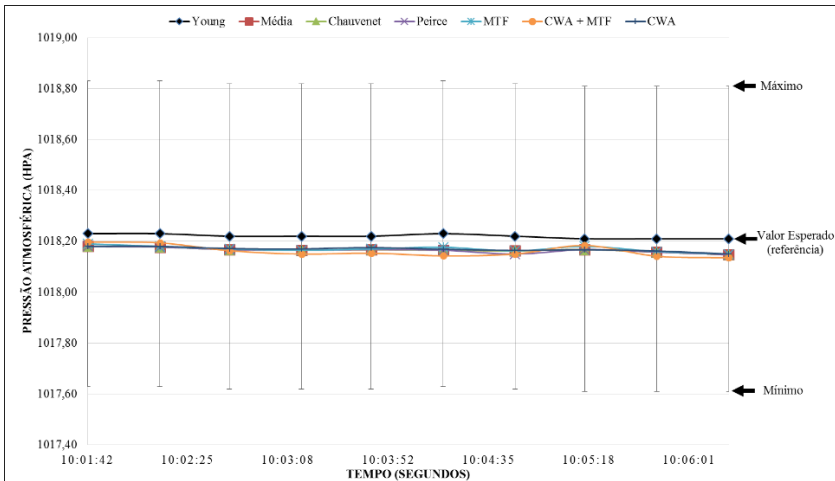


5.6.3 Fusão na amostra 1.

Foram testados e comparados os seguintes métodos: média aritmética, Chauvenet, Peirce MTF, CWA e CWA+MTF. A Figura 27 e a Tabela 9 apresentam os resultados desses métodos aplicados na amostra 1.

O método da média aritmética obteve uma diferença máxima de 0.06 hPa, muito próximo do valor de referência. O Critério de Chauvenet utilizou os dados de todos os sensores, obtendo os mesmos valores da média aritmética. O Método de Peirce, conseguiu valores muito semelhantes ao da média aritmética, com exceção dos dados aferidos às 10:04:46, onde três sensores tiveram as leituras iguais, e um sensor divergiu. Neste caso, o método desconsiderou a leitura desse sensor divergente. Isso ocorreu pelo fato do desvio padrão ter sido extremamente baixo pela proximidade entre as leituras, fazendo com que qualquer dado diferente fosse descartado. Os números fundidos com o método de Peirce ficaram muito próximos da média e conseqüentemente da referência. Também a média tolerante a falhas teve valores próximos da referência. O método CWA com alterações, distanciou-se da referência entre 0.04 e 0.06 hPa. A maior variação aconteceu com CWA + MTF, diferindo 0.09 hPa da referência. Devido à baixa variância das leituras individuais dos sensores, todos obtiveram alta confiança no método.

Figura 27 – Técnicas de fusão na amostra 1



Podemos observar na Figura 27, que os métodos até mesmo se confundem nas linhas do gráfico, devido ao resultado muito próximo obtido pelos métodos de fusão na amostra 1. O Valor de referência se distancia, quando comparados aos valores obtidos pelos métodos, mas muito distante dos valores máximos e mínimos estipulados e exibidos através das barras de erro verticais.

Tabela 8 – Resultados dos métodos de fusão na amostra 1

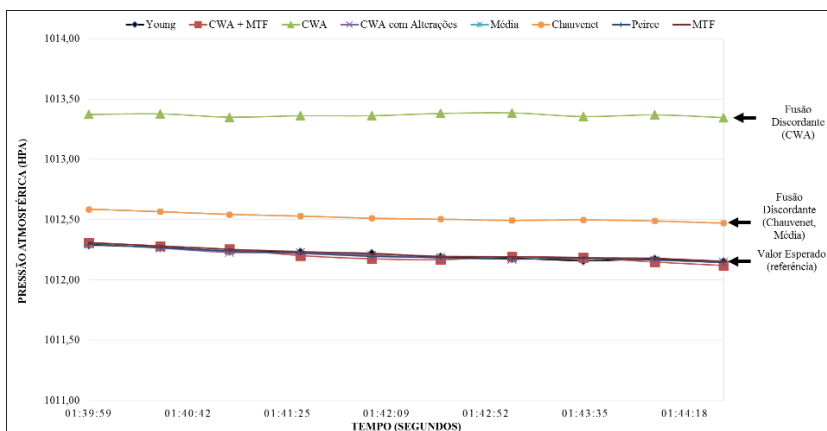
Tempo	Young	Média	Chauvenet	Peirce	MTF	CWA + MTF	CWA
10:01:42	1018.23	1018.18	1018.18	1018.18	1018.19	1018.20	1018.18
10:02:13	1018.23	1018.18	1018.18	1018.18	1018.18	1018.19	1018.18
10:02:43	1018.22	1018.17	1018.17	1018.17	1018.17	1018.16	1018.17
10:03:14	1018.22	1018.17	1018.17	1018.17	1018.17	1018.15	1018.17
10:03:44	1018.22	1018.17	1018.17	1018.17	1018.17	1018.15	1018.18
10:04:15	1018.23	1018.17	1018.17	1018.17	1018.18	1018.14	1018.17
10:04:46	1018.22	1018.16	1018.16	1018.15	1018.16	1018.15	1018.16
10:05:16	1018.21	1018.17	1018.17	1018.17	1018.18	1018.18	1018.17
10:05:47	1018.21	1018.16	1018.16	1018.16	1018.16	1018.14	1018.16
10:06:18	1018.21	1018.15	1018.15	1018.15	1018.15	1018.14	1018.15

5.6.4 Fusão na amostra de dados 2.

A Figura 29 apresenta os resultados dos métodos utilizando a amostra de dados 2, a qual possui um sensor com valores discordantes. A

média aritmética não obteve bom desempenho, divergindo do sensor de referência. Este problema deve-se ao fato da média não fazer distinção entre sensores, considerando sempre todos os sensores. Ademais essa técnica não permite dizer qual sensor apresenta valores discordantes.

Figura 28 – Técnicas de fusão na amostra 2



Ao aplicar o método de Chauvenet sobre a amostra 2, verifica-se que o mesmo não detecta o sensor 4 como discordante, obtendo os mesmos valores que a média aritmética. Interessante notar que se o sensor de referência fizesse parte do conjunto de sensores usados para o cálculo da fusão, o método de Chauvenet conseguiria um melhor desempenho, eliminando o sensor discordante e realizando a média aritmética com os sensores restantes.

O método de Peirce conseguiu detectar corretamente o sensor 4 como discordante dos demais (Tabela 9). O máximo desvio entre o sensor de referência e o valor obtido na fusão foi de 0.03 hPa.

Tabela 9 – Peirce aplicando na amostra 2

- Tempo	Desvio Padrão.	R	Max	Bosch 1	Bosch 2	Bosch 3	Bosch 4
01:39:59	0,58	1,383	0,81	0,32	0,27	0,28	0,87
01:40:30	0,60	1,383	0,82	0,32	0,27	0,30	0,89
01:41:00	0,61	1,383	0,85	0,34	0,27	0,30	0,92
01:41:31	0,62	1,383	0,86	0,34	0,28	0,32	0,93
01:42:02	0,63	1,383	0,88	0,36	0,28	0,31	0,95
01:42:32	0,64	1,383	0,88	0,33	0,29	0,34	0,96
01:43:03	0,64	1,383	0,89	0,36	0,30	0,30	0,97
01:43:34	0,64	1,383	0,89	0,33	0,32	0,31	0,96
01:44:05	0,65	1,383	0,89	0,35	0,29	0,33	0,97
01:44:35	0,66	1,383	0,91	0,35	0,28	0,36	0,99

Diferente dos métodos de Chauvenet e Peirce, a Média Tolerante a Falhas (MTF) sempre descarta os valores de dois terços dos sensores.

Na Tabela 10 apresenta-se o resultado da execução da MTF na amostra 2. Pode-se verificar que o sensor Bosch 2 participou de todas as médias, enquanto o sensor Bosch 4 foi corretamente desconsiderado. Já Bosch 1, apesar de ter leituras próximas das corretas foi desconsiderado em 80% dos casos, presentes nesta amostra. Comparando os resultados obtidos pela MTF com o sensor de referência, encontra-se o valor máximo de 0.02 hPa.

Tabela 10 – MTF aplicado a amostra 2

	Bosch 1	Bosch 2	Bosch 3	Bosch 4
01:39:59	○	●	●	○
01:40:30	○	●	●	○
01:41:00	○	●	●	○
01:41:31	○	●	●	○
01:42:02	○	●	●	○
01:42:32	●	●	○	○
01:43:03	○	●	●	○
01:43:34	○	●	●	○
01:44:05	○	●	●	○
01:44:35	●	●	○	○

Legenda: (○) Não Participa (●) Participa

O CWA é o mais completo, no sentido em que leva em consideração a qualidade do sensor. No entanto os dados de variância devem estar disponíveis. Há três formas de executar o método: na primeira considera-se apenas a variância informada pelos sensores; na segunda são incluídas

as modificações propostas no capítulo 4 e, por fim, utilizando o algoritmo modificado em conjunto com a média tolerante a falhas.

Figura 29 – CWA aplicado a amostra 2

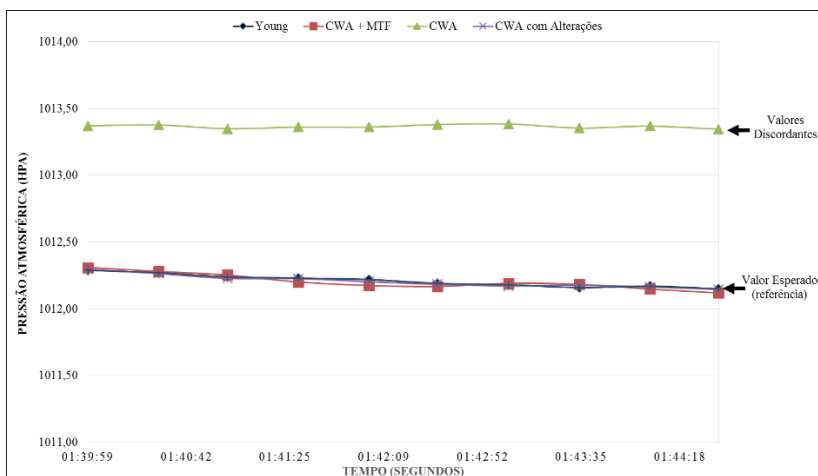


Tabela 11 – CWA aplicado na amostra 2

Tempo	Referência	CWA + MTF	CWA	CWA com alterações
01:39:59	1012,29	1012,31	1013,37	1012,30
01:40:30	1012,27	1012,28	1013,38	1012,26
01:41:00	1012,24	1012,25	1013,35	1012,23
01:41:31	1012,23	1012,20	1013,36	1012,23
01:42:02	1012,22	1012,18	1013,36	1012,20
01:42:32	1012,19	1012,17	1013,38	1012,18
01:43:03	1012,18	1012,19	1013,39	1012,17
01:43:34	1012,16	1012,18	1013,36	1012,18
01:44:05	1012,17	1012,15	1013,37	1012,16
01:44:35	1012,15	1012,12	1013,35	1012,15

Pode-se observar na Figura 38 e Tabela 11 que o CWA, sem alterações e sem a utilização da MTF, tem um desempenho ruim, obtendo a diferença máxima de 1,21 hPa do sensor de referência. Este resultado evidencia que, caso um sensor tenha leituras sequenciais iguais, a variância obtida é zero e o sistema terá sua maior confiança no sensor discordante.

Utilizando o CWA com alterações (proposto no Capítulo 4), assume-se que um sensor com variância constante próxima de zero é

defeituoso, fazendo com que sua variância seja elevada artificialmente a um valor máximo. Assim, apesar do sensor defeituoso participar da média ponderada, obtém-se um resultado mais aproximado do sensor de referência.

A terceira forma aplicada é o CWA com alterações, incluindo a MTF. A inclusão da MTF traz dados próximos da referência.

Tabela 12 – Sensores que participam da fusão utilizando CWA + MTF na amostra 2

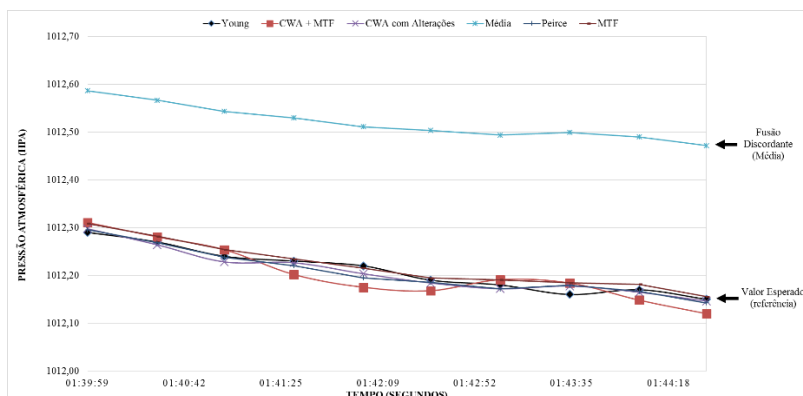
Tempo	Bosch 1	Bosch 2	Bosch 3	Bosch 4
01:39:59	○	●	●	○
01:40:30	○	●	●	○
01:41:00	○	●	●	○
01:41:31	●	○	●	○
01:42:02	●	○	●	○
01:42:32	●	○	●	○
01:43:03	○	●	●	○
01:43:34	○	●	●	○
01:44:05	●	○	●	○
01:44:35	●	○	●	○

Legenda: (○) Não Participa (●) Participa

Na Tabela 12 foram marcadas as participações dos sensores na média final. Apesar de utilizar a MTF, ao contrário do que aconteceu quando esta técnica foi usada sozinha, o sensor Bosch 3 participou 100% das vezes, e os sensores Bosch 1 e 2 se alternaram igualmente na participação. O sensor divergente foi excluído corretamente. O método obteve valores muito próximos do valor de referência, como pode ser observado na Figura 30.

Em resumo, a média aritmética e Chauvenet obtiveram os mesmos resultados e consideraram os valores do sensor discordante; o método Elmenreich sem modificações teve o pior resultado, pois avaliou como mais confiável o sensor de pior desempenho. As fusões com valores próximos da referência são expostas no gráfico da Figura 30.

Figura 30 – Métodos com melhor resultado na amostra 2



6.8 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi possível aplicar e avaliar a arquitetura, com enfoque principal nos métodos de fusão de dados de sensores. A avaliação foi realizada utilizando um estudo de caso de medição da pressão atmosférica. Os valores obtidos pela fusão utilizando a arquitetura e com diferentes métodos de fusão foram comparados a valores obtidos por sensores de referência.

A arquitetura orientou sobre o modelo de RSSF a ser adotado, também definiu etapas a serem seguidas antes de se realizar a fusão utilizando os métodos na camada de fusão de baixo nível. Como, por exemplo, pode-se citar a calibração efetuada, as definições do momento em que ocorre a fusão, se on-line ou off-line, e como proceder. Outro processo importante foi a detecção de erros sistemáticos e grosseiros. Muitos dos dados observados tinham valor fora da faixa de operação, como, por exemplo, valores variando em torno de zero ou um. Tais valores poderiam inviabilizar a aplicação dos métodos de fusão, fazendo com que sensores discordantes ainda continuassem no sistema, por não terem uma discrepância tão grande. Informações vindas do pré-conhecimento dos sensores foram incluídas, como a faixa de operação dos sensores, e o conhecimento sobre a dinâmica da variável observada.

Na camada de fusão de baixo nível, dentre os métodos testados, mostraram-se inadequados a média aritmética, Chauvenet e CWA sem modificações. A média se mostrou inadequada, pois incluiu o sensor discordante, fazendo com que o valor fundido se afaste do valor obtido pelo

sensor de referência. O CWA elevou a confiança de um sensor travado, fazendo com que ele contribuísse com maior peso, levando o resultado da fusão a se afastar demasiadamente do valor obtido pelo sensor de referência. Já o método de Chauvenet não conseguiu eliminar o sensor defeituoso, tendo obtido o mesmo resultado da média aritmética.

Os demais métodos se mostraram adequados. A MTF obteve valores muito próximos do sensor de referência. No entanto, a MTF sempre elimina os valores de pelo menos 2/3 dos sensores, mesmo estando corretos, e não considera a qualidade dos sensores. O método de Peirce também teve bom resultado, e possibilita, de certa forma, classificar sensores discordantes e estes dados podem ser analisados a fim de se verificar possíveis erros solucionáveis nos sensores, como, por exemplo, calibração. Além disso, o método de Peirce pode detectar vários sensores discordantes de uma só vez, o que não acontece com Chauvenet, por exemplo. Todavia, assim como os demais métodos, Peirce não considera a qualidade dos sensores para a realização da fusão.

O método com melhor desempenho, ou seja, com valores obtidos próximos dos sensores de referência e que leva em consideração a qualidade dos mesmos, é o CWA. Foi possível contribuir com uma pequena alteração no método, a fim de que sensores com variância muito próxima de zero fossem considerados discordantes. Porém, por utilizar a MTF, não é possível dizer com certeza se um sensor tem algum tipo de problema, a fim de solucioná-lo.

Em resumo, pôde-se concluir que a arquitetura utilizando RSSF e sensores de baixo custo obtiveram resultados condizentes aos obtidos pelos sensores de referência. Ainda que o volume de dados tenha sido reduzido devido à fusão e os *outliers* ocorridos durante o experimento absorvidos pela arquitetura, de forma que o desempenho geral não ficou comprometido.

6 CONCLUSÕES

6.1 REVISÃO DAS MOTIVAÇÕES E OBJETIVOS

As aplicações de monitoramento de ambientes que empregam a infraestrutura de RSSFs vêm recebendo grande atenção, deixando de ocupar exclusivamente o espaço acadêmico. Tais aplicações estão sendo adotadas por empresas e gradualmente substituindo as tradicionais soluções existentes, que são centralizadas e baseadas em sensores confiáveis e de alto custo. Esta mudança de paradigma, nos últimos anos, tem sido acelerada pelas vantagens inerentes das RSSF, no que diz respeito à flexibilidade na implantação da rede, melhor cobertura espacial, custo dos sensores etc. Contudo, nas referidas aplicações existem ainda diversos desafios que precisam ser superados, e que não deveriam ser tratados informalmente, mas sim de maneira sistemática e baseada em estudos científicos. Por exemplo, as RSSFs geram grande quantidade de dados e existem os problemas do consumo energético dos nodos, da escolha do tipo e da qualidade do sensor, da quantidade de sensores a serem usados na rede, dentre outros. O presente trabalho foca nesses problemas, tratando-os sob o viés dos métodos da fusão da informação, ou seja, técnicas que lidam com grande quantidade de dados e que podem reduzir o consumo energético, além de, e principalmente, serem capazes de aumentar a confiabilidade nos dados monitorados pela rede, a partir de manipulação matemática no conjunto de dados monitorados.

Uma pergunta básica que se buscou responder neste trabalho é se uma RSSF formada por alguns sensores de baixo custo poderia substituir um único sensor centralizado e alto custo, mantendo, ou mesmo superando, a confiabilidade nos resultados nos dados monitorados. A utilização dos dados obtidos dos sensores de baixo custo, na sua forma bruta, não se mostrou adequada, devendo-se utilizar um método de fusão. Dentre os métodos testados, Peirce e CWA + MTF foram os mais adequados para a fusão de sensores. Já a média aritmética, Chauvenet e CWA sem modificações, somente tiveram bom desempenho sem a presença de nodos falhos.

Um desafio prático referente a um problema existente na Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Esta companhia estava interessada em adquirir sensores barométricos para monitorar parâmetros de qualidade de água bruta. Dentre as alternativas existentes, havia sensores “convencionais” de “alto custo” do fabricante Young, modelo 61302V. A CASAN já havia adquirido recentemente algumas unidades de tais sensores. Contudo, o surgimento de sensores usados por

kits de baixo custo (ex. Arduino) com preços equivalentes a 1/50 do preço original dos sensores de “alto custo” ajudou a definir a aplicação- alvo para o estudo de caso deste trabalho de pesquisa.

Apesar do estudo de caso ter sido desenvolvido sobre uma única grandeza física, a arquitetura de fusão proposta por este trabalho é genérica o suficiente para ser utilizada em outras aplicações de monitoramento ambiental, a saber: monitoramento de intensidade de chuvas, monitoramento de luminosidade em pastagens, dentre outras.

6.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho teve início com um estudo extensivo das técnicas propostas para a fusão de dados em sensores. Entretanto, devido à grande intersecção com outras áreas de investigação – como, por exemplo, técnicas de agregação de dados em RSSF, modelos estatísticos para a detecção de eventos em data mining etc -, o presente trabalho se concentrou em técnicas de fusão para a detecção de anomalias (*outliers*). Tal escolha teve por base o fato de se assumir sensores de baixa confiabilidade na RSSF subjacente, o que enfatiza a necessidade de se detectar sensores faltosos e evitar que seus dados afetem a confiabilidade da aplicação como um todo.

Assim sendo, foram realizadas medições utilizando RSSF com sensores barométricos. A princípio, o objetivo inicial era estudar técnicas para a fusão de dados. No entanto, a dificuldade em organizar a forma com que os dados seriam coletados, transmitidos e tratados, levantou a necessidade de se estudar e propor uma arquitetura específica para a fusão da informação em aplicações de monitoramento em RSSF. Foram estudadas algumas arquiteturas tradicionais propostas na literatura, como a JDL, mas estas eram genéricas demais, o que nos levou a propor uma arquitetura específica para a nossa aplicação com RSSF.

6.3 CONTRIBUIÇÕES E ESCOPO DO TRABALHO

Esta dissertação fez um estudo bibliográfico sobre redes de sensores sem fio, especificamente a norma IEEE 802.15.4. Também foi realizado um estudo de arquiteturas e métodos de fusão que possam ser aplicados a uma RSSF. Como não foi encontrada uma arquitetura disponível que pudesse facilmente ser aplicada ao monitoramento de ambientes, foi proposta pelo presente trabalho uma arquitetura que possibilita a organização do sistema de monitoramento, levando em

consideração a fusão de informações e a arquitetura de rede. Além da arquitetura, foram avaliados alguns métodos de fusão de dados aplicáveis juntamente com a arquitetura proposta.

Acredita-se que futuros sistemas de monitoramento de ambientes utilizando RSSF possam dispor deste trabalho como ferramenta, tanto no que se refere ao levantamento bibliográfico, no desempenho dos métodos testados, quanto utilizar ou basear sua aplicação na arquitetura proposta.

Possivelmente, trabalhos da academia, como este, podem ajudar nas escolhas das empresas, para que elas considerem a aquisição de sensores de baixo custo, conseguindo resultados tão confiáveis como os obtidos com os sensores de alto custo, beneficiando-se das características das RSSF, como a maior cobertura espacial e flexibilidade na implantação.

6.4 TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros, poder-se-ia fazer experimentos em uma RSSF com um grande número de sensores agrupados em clusters, possibilitando uma cobertura geográfica maior. Além disso, com um maior número de nodos, se é possível monitorar ambientes utilizando fusão descentralizada.

Outra possibilidade é a utilização de algoritmos de fusão associada com técnicas de escalonamento de sono (*sleepscheduling*) para aumentar ou reduzir o número de nodos ativos, colocando alguns nodos para hibernar, baseados na qualidade dos dados que estão sendo obtidos no momento. Desta forma, acredita-se na possibilidade de grande economia de energia, sem afetar a qualidade final dos dados obtidos.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F. et al. A survey on sensor networks. *Communications Magazine*, IEEE, v. 40, n. 8, p. 102-114, 2002.
- BEDWORTH, M.; O'BRIEN, J. The Omnibus model: a new model of data fusion? *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 15, n. 4, p. 30-36, 2000.
- BOSTRÖM, H. et al. On the Definition of Information Fusion as a Field of Research. v. 1, n. 1, p. 8, 16/10/2013 2013.
- BOYD, J. R. A discourse on winning and losing: Unpublished set of briefing slides available at Air University Library. Alabama, USA: Maxwell AFB 1987.
- BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B. E. *Química, A Ciência Central*. Pearson Prentice Hall, 2005. 992 ISBN 9788587918420.
- BUDKE, G. F. *Abordagens de Comunicação para Fusão Paralela de Dados em Redes de Sensores sem Fio IEEE 802.15.4 em Topologia Estrela*. Florianópolis - SC: UFSC. Mestre: 105 p. 2012.
- BYCHKOVSKIY, V. et al. A collaborative approach to in-place sensor calibration. *Information Processing in Sensor Networks*, 2003. Springer. p.301-316.
- CAMPOS, M. F.; AVILEZ, O. Modelagem: Uma abordagem teórica para a calibração autoidadada de sensores em rede sensores. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 12, n. 1, 2012.
- CHAUVENET, W. *A Manual of Spherical and Practical Astronomy*. 1. Pennsylvania: J. B. LIPPINCOTT & CO, 1863.
- CHEN, M. et al. Directional geographical routing for real-time video communications in wireless sensor networks. *Computer Communications*, v. 30, n. 17, p. 3368-3383, 2007.
- COULOURIS, G. D.; J. KINDBERG, T. *Sistemas Distribuídos - 4ed: Conceitos e Projeto*. Bookman, 2007. ISBN 9788560031498.
- CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M. Guest editors' introduction: overview of sensor networks. *Computer*, v. 37, n. 8, p. 41-49, 2004.

CUOMO, F. et al. Topology Formation in IEEE 802.15.4: Cluster-Tree Characterization. Pervasive Computing and Communications, 2008. PerCom 2008. Sixth Annual IEEE International Conference on, 2008. 17-21 March 2008. p.276-281.

DA PENHA JR, O. S.; NAKAMURA, E. F. Fusão de dados de temperatura e luminosidade para detecção de queimadas em florestas. SBCUP – II Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva. Sessão Técnica 1: Redes de Sensores: 241-250 p. 2010.

DASARATHY, B. V. Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications. Proceedings of the IEEE, v. 85, n. 1, p. 24-38, 1997.

CULLER, D.; ESTRIN, D.; SRIVASTAVA, M. Guest editors' introduction: overview of sensor networks. Computer, v. 37, n. 8, p. 41-49, 2004.

DURRANT-WHYTE, H. F. Sensor models and multisensor integration. Int. J. Rob. Res., v. 7, n. 6, p. 97-113, 1988.

ELMENREICH, W. Sensor Fusion In Time Triggered Systems. 2002. 157 (Ph.D. thesis). Institut für Technische Informatik, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.

FAWZY, A.; MOKHTAR, H. M. O.; HEGAZY, O. Outliers detection and classification in wireless sensor networks. Egyptian Informatics Journal, v. 14, n. 2, p. 157-164, 2013.

FIORUCCI, A. R.; BENEDETTI FILHO, E. A Importância do Oxigênio Dissolvido em Ecossistemas Aquáticos. Revista Química Nova na Escola, v. 22, p. 7, 2005.

FRANKEL, C. B.; BEDWORTH, M. D. Control, estimation and abstraction in fusion architectures: lessons from human information processing. Information Fusion, 2000. FUSION 2000. Proceedings of the Third International Conference on, 2000. 10-13 July 2000. p.MOC5/3-MOC510 vol.1.

GOULD, B. A. On Peirce's criterion for the rejection of doubtful observations, with tables for facilitating its application. Astronomical Journal, v. 4, p. 81-87, 1855.

HADZILACOS, V.; TOUEG, S. Fault-tolerant broadcasts and related problems. In: (Ed.). Distributed systems (2nd Ed.): ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1993. p.97-145. ISBN 0-201-62427-3.

HALL, D. L.; LLINAS, J. An introduction to multisensor data fusion. Proceedings of the IEEE, v. 85, n. 1, p. 6-23, 1997.

HARRIS CJ, B. A., DODD TJ. Multi-sensor data fusion in defence and aerospace. *Aeronautic Journal*, v. 102, n. 1015, 1998, p. 229-244,.

IEEE. Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area network (LR-WPAN). 802.15.4. Part 15.4, 2011.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012) v. 1, n. 1ª ed. luso-brasileira, p. 81, 2012 2012.

INTANAGONWIWAT, C. et al. Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks. *Distributed Computing Systems, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on*, 2002. 2002. p.457-458.

KIMURA, N.; LATIFI, S. A survey on data compression in wireless sensor networks. *Information Technology: Coding and Computing, 2005. ITCC 2005. International Conference on*, 2005. 4-6 April 2005. p.8-13 Vol. 2.

KOKAR, M. M.; BEDWORTH, M. D.; FRANKEL, C. B. Reference Model for data fusion Systems. *PROC SPIE INT SOC OPT ENG*, 2000. p.191-202.

KRISHNAMACHARI, B.; ESTRIN, D.; WICKER, S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks. *Distributed Computing Systems Workshops, 2002. Proceedings. 22nd International Conference on*, 2002. 2002. p.575-578.

KULIK, J.; HEINZELMAN, W.; BALAKRISHNAN, H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wirel. Netw.*, v. 8, n. 2/3, p. 169-185, 2002.

LAMPORT, L.; SHOSTAK, R.; PEASE, M. The Byzantine Generals Problem. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, v. 4, n. 3, p. 382-401, 1982.

LLINAS, J. et al. Revisiting the JDL data fusion model II. DTIC Document. 2004

LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, 2003. p.179-226.

LUO, R. C.; KAY, M. G. *Data fusion and sensor integration: State-of-the-art 1990s*. Academic Press Boston, MA, v. 1, n. 1, p. 7-135, 1992.

LUO, R. C. C.-C., YIH; KUO-LAN, SU. Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. *Sensors Journal*, IEEE, v. 2, n. 2, p. 107-119, 2002.

MARCELLONI, F.; VECCHIO, M. A Simple Algorithm for Data Compression in Wireless Sensor Networks. *Communications Letters*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 411-413, 2008.

MARTINS, M. et al. Comportamento da pressão atmosférica e do vento máximo no episódio Catarina: Resultados Preliminares. *Congressos Brasileiros de Meteorologia*, 2004 2004.

MARZULLO, K. Tolerating failures of continuous-valued sensors. *ACM Trans. Comput. Syst.*, v. 8, n. 4, p. 284-304, 1990.

MONTEIRO, M. A. Dinâmica atmosférica e a caracterização dos tipos de tempo na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá. 2007. 223 Tese de Doutorado (Doutorado). Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia., UFSC, Florianópolis - SC.

MONTEZ, C. RSSF em monitoramento de desastres ambientais (Notas Técnicas): UFSC 2014.

NAKAMURA, E. F. Fusão de dados em redes de sensores sem fio. 2007. 174 (Tese de Doutorado). Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

NAKAMURA, E. F.; LOUREIRO, A. A. F.; FRERY, A. C. Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications. *ACM Comput. Surv.*, v. 39, n. 3, p. 9, 2007.

NOVUS. Notas Técnicas: Conceitos básicos de metrologia - Parte 1. 19/03/2013 2013. Disponível em: <
<http://www.novus.com.br/Imagens/Precisao%20x%20Exatidao.jpg> >.

POELLABAUER, W. D. C. Fundamentals of wireless sensor networks : theory and practice. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010. ISBN 978-0-470-99765-9.

POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless Integrated Network Sensors. *Communications of the ACM*, v. 43, n. 5, 05/2000 2000.

RAMANATHAN, N. et al. Rapid deployment with confidence: Calibration and fault detection in environmental sensor networks. 2006.

RAOL, J. R. Multi-sensor data fusion with MATLAB. New York, NY: CRC Press, 2009. 523 ISBN 1439800057.

ROMER, K.; MATTERN, F. The design space of wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, v. 11, n. 6, p. 54-61, 2004.

ROSS, Stephen M. Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data. *Journal of Engineering Technology*, v. 20, n. 2, p. 38-41, 2003.

RUIZ, Linnyer Beatrys. Maná: uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais.

SALUSTIANO, R. E. Aplicação de Técnicas de Fusão de Sensores no Monitoramento de Ambientes. 2006. 162 (Mestrado). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas

SANTOS, S. T. D. Redes de Sensores sem Fio em Monitoramento e Controle. 2007. COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.

SEMPREBOM, Tiago et al. Distributed DBP: A (m, k)-firm based distributed approach for QoS provision in IEEE 802.15. 4 networks. In: *Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on. IEEE, 2009.* p. 1-8.

SILVA, I. et al. Tecnologias emergentes para redes industriais sem fio: WirelessHART vs ISA100.11a. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP, 2011.

SOARES, M. Informações Técnicas: Critério de Chauvenet 02 de dezembro 2013 2013. Disponível em: < <http://www.mspc.eng.br/tecdiv/med200.shtml> >.

TAKRURI, Maen; CHALLA, Subhash; YUNIS, Ramah. Data fusion techniques for auto calibration in wireless sensor networks. In: *Information Fusion, 2009. FUSION'09. 12th International Conference on. IEEE, 2009.* p. 132-139.

TAN, R. et al. System-level calibration for data fusion in wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, v. 9, n. 3, p. 28, 2013.

TAYLOR, J. R. Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições Físicas. University of Colorado: Bookman, 2012. 329 ISBN 8540701367.

TIAN, H. et al. SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks. *Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on, 2003.* 19-22 May 2003. p.46-55.

WILLIG, A. Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: A Selection. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 2, p. 102-124, 2008.

YANG, Z.; MERATNIA, N.; HAVINGA, P. Outlier Detection Techniques for Wireless Sensor Networks: A Survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, v. 12, n. 2, p. 159-170, 2010.

ZHOU, C.-H. et al. A Technique of Filtering Dirty Data Based on Temporal-Spatial Correlation in Wireless Sensor Network. *Procedia Environmental Sciences*, v. 10, Part A, n. 0, p. 511-516, 2011.

APENDICE A - AMOSTRAS

Tabela A.1 – Amostra 1

TEMPO	MÉDIA 30 AMOSTRAS					VARIÂNCIA				Média
	Young	Bosch 1	Bosch 2	Bosch 3	Bosch 4	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	
10:01:42	1018.23	1018.16	1018.21	1018.16	1018.19	0.0030	0.0047	0.0068	0.0027	1018.18
10:02:13	1018.23	1018.17	1018.19	1018.15	1018.20	0.0044	0.0026	0.0045	0.0040	1018.18
10:02:43	1018.22	1018.18	1018.17	1018.15	1018.17	0.0016	0.0034	0.0055	0.0028	1018.17
10:03:14	1018.22	1018.19	1018.16	1018.14	1018.17	0.0018	0.0039	0.0038	0.0051	1018.17
10:03:44	1018.22	1018.19	1018.16	1018.14	1018.18	0.0023	0.0040	0.0083	0.0025	1018.17
10:04:15	1018.23	1018.19	1018.19	1018.13	1018.15	0.0024	0.0036	0.0051	0.0028	1018.17
10:04:46	1018.22	1018.15	1018.20	1018.15	1018.15	0.0044	0.0039	0.0053	0.0046	1018.16
10:05:16	1018.21	1018.15	1018.19	1018.18	1018.15	0.0035	0.0052	0.0029	0.0041	1018.17
10:05:47	1018.21	1018.13	1018.18	1018.15	1018.17	0.0046	0.0021	0.0034	0.0044	1018.16
10:06:18	1018.21	1018.17	1018.14	1018.12	1018.16	0.0039	0.0025	0.0084	0.0040	1018.15

Tabela A.2 – Amostra 2

TEMPO	DADOS - MÉDIA 30 AMOSTRAS					VARIÂNCIA EM 30 AMOSTRAS					Média
	Young	Bosch 1	Bosch 2	Bosch 3	Bosch 4	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4		
01:39:59	1012.29	1012.27	1012.32	1012.30	1013.46	0.0039	0.0027	0.0053	0.0000	1012.59	
01:40:30	1012.27	1012.24	1012.29	1012.27	1013.46	0.0031	0.0052	0.0045	0.0000	1012.57	
01:41:00	1012.24	1012.21	1012.27	1012.24	1013.46	0.0019	0.0044	0.0044	0.0000	1012.54	
01:41:31	1012.23	1012.19	1012.26	1012.21	1013.46	0.0041	0.0025	0.0046	0.0000	1012.53	
01:42:02	1012.22	1012.15	1012.23	1012.20	1013.46	0.0045	0.0024	0.0050	0.0000	1012.51	
01:42:32	1012.19	1012.17	1012.22	1012.17	1013.46	0.0052	0.0047	0.0039	0.0000	1012.50	
01:43:03	1012.18	1012.13	1012.19	1012.19	1013.46	0.0049	0.0042	0.0057	0.0000	1012.49	
01:43:34	1012.16	1012.17	1012.18	1012.19	1013.46	0.0026	0.0038	0.0041	0.0000	1012.50	
01:44:05	1012.17	1012.14	1012.20	1012.16	1013.46	0.0033	0.0041	0.0048	0.0000	1012.49	
01:44:35	1012.15	1012.12	1012.19	1012.12	1013.46	0.0027	0.0028	0.0046	0.0000	1012.47	

APENDICE B - REDES DE SENSORES SEM FIO

B.1 INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), em inglês *Wireless Sensor Network* (WSN), consiste em uma rede composta por nodos com capacidade de processamento, transmissão e equipados com algum tipo de sensor com capacidade de monitoramento de grandezas físicas como, por exemplo, a luminosidade, a temperatura, a pressão atmosférica etc. Estas redes, muitas vezes, operam em ambientes hostis, possuindo como principais requisitos a escalabilidade, o baixo custo e a fácil operacionalização.

Neste apêndice apresenta-se os principais conceitos relacionados a RSSF, destacando-se a descrição do padrão IEEE 802.15.4. Em seguida, descrevem-se as características gerais de sensores utilizados por estas redes e, por fim, apresentam-se os principais conceitos relacionados com a medição da pressão atmosférica, grandeza esta que será utilizada como estudo de caso.

B.1.2 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

As RSSF são largamente empregadas nas áreas militar, ambiental, médica/biológica e de automação (residencial, comercial e industrial). A forma mais comum de uso das RSSF é nas atividades de monitoramento, onde se determina o valor de algum parâmetro num dado local, normalmente com o objetivo de detectar a ocorrência de eventos de interesse e estimar valores de parâmetros em função do evento detectado. Pode-se ainda classificar um objeto detectado e utilizar estas redes para o rastreamento de objetos, entre outras aplicações (LOUREIRO et al., 2003).

A crescente utilização das RSSF deve-se aos recentes avanços em sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), nas tecnologias de comunicação sem fio e dos sistemas eletrônicos digitais, os quais permitiram o desenvolvimento de nodos sensores multifuncionais de baixo custo, baixo consumo de energia, pequenos e, principalmente, com a capacidade de comunicação sem restrições em curtas distâncias. Esses nodos sensores alavancam a ideia de RSSF baseadas na colaboração de um grande número de nodos (AKYILDIZ et al., 2002). Outro aspecto importante, relacionado à miniaturização dos dispositivos, baixo custo e consumo energético, é a instalação destes dispositivos ao longo de um espaço físico de grande proporção, o que resulta numa maior cobertura e proximidade do fenômeno físico observado (CULLER; ESTRIN; SRIVASTAVA, 2004).

Os nodos utilizados nas RSSF atuais têm capacidades que vão além da simples coleta de informação, estes têm funcionalidades que permitem analisar e fundir seus próprios dados ou dados de outros nodos sensores. Normalmente os nodos não se comunicam somente entre si, mas também com uma estação base, a fim de que os dados possam ser divulgados, processados, analisados ou armazenados (POELLABAUER, 2010).

Por outro lado, as RSSF possuem necessidades diferenciadas com relação às redes de computadores tradicionais. Em geral, as RSSF devem possuir mecanismos para autogerenciamento, autoproteção, automanutenção, suportar topologias dinâmicas, além de possuírem sérias restrições relacionadas à energia e transmissão de dado (CULLER et al., 2004; RUIZ, 2003), o que impede de utilizar as técnicas tradicionais.

O protocolo IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) é um protocolo adequado para redes LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Networks*) e está amplamente associado com as tecnologias ZigBee⁸ e o recém especificado Wireless Hart⁹. Ambas as tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de especificar protocolos para redes em ambientes com restrições temporais e restrições de recursos computacionais. Apesar de não ter sido desenvolvido especificamente para redes de sensores sem fios, o protocolo IEEE 802.15.4 se apresenta como a principal solução para essas redes.

B.1.3 A NORMA IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011) padroniza as camadas Física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) em nodos de redes de baixa largura de banda, com baixo consumo energético em uma LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*). Os principais objetivos de uma LR-WPAN são a facilidade de instalação, transferência confiável de dados, custo extremamente baixo e vida razoável da bateria, mantendo um protocolo simples e flexível.

Alguns recursos fornecidos pela norma são os seguintes:

- Operação em topologia estrela ou peer-to-peer.
- *Timeslots* garantidos (GTS).
- Controle de acesso ao meio *Carrier sense multiple access with collision avoidance* – CSMA-CA ou ALOHA.

⁸www.zigbee.org

⁹www.hartcomm.org

- Confiabilidade na transferência de dados.
- Baixo consumo de energia.
- *Energy detection* (ED)
- *Link quality indication* (LQI)

Os possíveis papéis desempenhados pelos dispositivos (nodos) IEEE 802.15.4 são:

- **Coordenador PAN:** é o controlador principal da *Personal Area Network* (PAN). Ele tem capacidade para identificar a rede e permite a associação de dispositivos.
- **Coordenador:** O coordenador não cria sua própria rede, desta forma deve estar associado a um coordenador PAN. Ele oferece serviços de sincronização através da transmissão de *beacons*.
- **Dispositivos simples:** não é nem coordenador PAN, nem coordenador.

Dois tipos de dispositivos podem participar de uma rede IEEE 802.15.4: os de função completa e os de função reduzida:

- **Dispositivo de função completa:** *full-function device* (FFD) é um dispositivo que é capaz de servir como um coordenador de uma *Personal Área Network* (PAN) ou cliente. Em uma WPAN é necessário pelo menos um dispositivo FFD.
- **Dispositivo de Função Reduzida (RFD):** (*reduced-function device* RFD). Um RFD se destina a aplicações que são extremamente simples, pois é implementado usando o mínimo de recursos e capacidade de memória. Opera com implementação mínima do protocolo IEEE 802.15.4 e não é capaz de servir como coordenador PAN.

B.1.3.1 Topologia de rede

A norma IEEE 802.15.4 especifica que as topologias estrela e ponto-a-ponto devem ser utilizadas de acordo com os requisitos das aplicações (Figura B.1). A topologia com agrupamento em árvore (*cluster tree*) é uma outra possibilidade (Figura B.2).

Topologia em Estrela

Na topologia em estrela, a comunicação é estabelecida entre dispositivos e um único controlador central, chamado de coordenador PAN. O coordenador PAN é o controlador principal de uma PAN e na maioria dos casos é alimentado pela rede elétrica, enquanto os demais dispositivos são alimentados por bateria. Ele pode ser escolhido, por exemplo, em virtude de ser o primeiro dispositivo a comunicar no canal.

A formação de uma rede estrela acontece depois que um FFD é ativado, ele pode estabelecer sua própria rede e se tornar o coordenador PAN. As redes em estrela operam independentes umas das outras. Cada uma tem um identificador único que permite a comunicação entre os dispositivos da rede. Portanto, para o estabelecimento de uma rede em estrela é necessário a escolha de um identificador PAN, que não deve estar sendo utilizado por qualquer outra rede dentro da área de cobertura destes nodos. Uma vez que o identificador PAN é escolhido, este permite que outros dispositivos se associem a rede. Devido à simplicidade, a topologia estrela vem sendo proposta em diversas aplicações, principalmente no monitoramento industrial (WILLIG, 2008). Além da simplicidade, justifica-se a topologia estrela pelo fato dos atuais *transceivers* de rádio frequência poderem facilmente alcançar mais de 200m em condições de visada, o que permite a cobertura de grandes áreas (BUDKE, 2012).

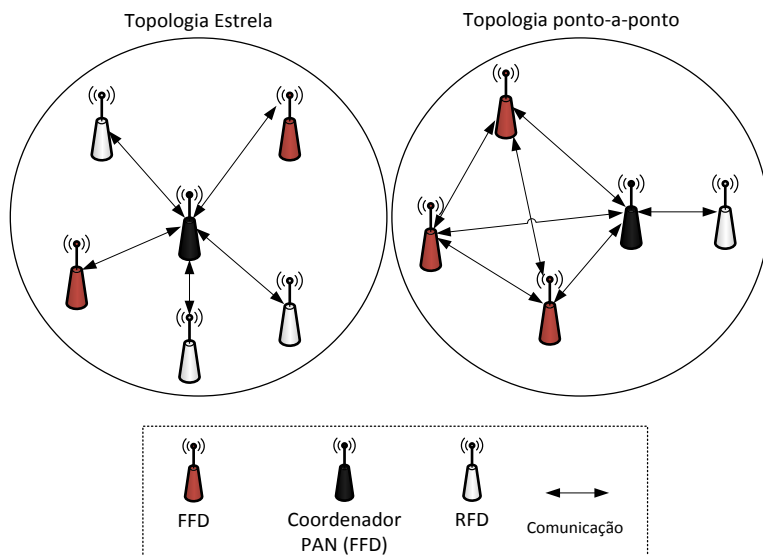
Topologia ponto-a-ponto (*peer-to-peer*)

A topologia *peer-to-peer* também tem um coordenador PAN, no entanto, difere da topologia em estrela no sentido em que qualquer dispositivo é capaz de se comunicar com outro ao seu alcance. Esta topologia permite formações de rede mais complexas, como a topologia de rede *mesh*. Em redes *peer-to-peer* é comum utilizar múltiplos saltos (*multi-hop*) para encaminhar as mensagens, a partir de qualquer dispositivo da rede. A função de roteamento não é normalizada pelo padrão IEEE 802.15.4. No entanto, considerando que existe um elevado número de nodos numa rede de grande escala, é normal que nodos vizinhos estejam

próximos uns dos outros. Desta forma, este princípio de roteamento *multi-hop* é adequado para permitir a reutilização do canal de comunicação em diferentes regiões da RSSF e para superar alguns dos problemas relacionados com a propagação do sinal em comunicações de longa distância (AKYILDIZ et al., 2002; CHEN et al., 2007; ROMER; MATTERN, 2004).

Os principais desafios de pesquisa em roteamento *multi-hop* em RSSFs são essencialmente devidos ao grande número de restrições que devem ser simultaneamente satisfeitas. Uma das restrições mais importantes é a exigência de um reduzido consumo de energia dos nodos sensores devido à dificuldade (ou impossibilidade) de substituição das fontes de alimentação. É normal ter aplicações de RSSFs que devem operar durante meses ou anos, sem que haja substituição (ou recarregamento) das fontes de alimentação. Portanto, o consumo de energia deve ser considerado como um parâmetro primordial no projeto de algoritmos de roteamento *multi-hop*, a fim de prolongar a vida útil da RSSF (TIAN et al., 2003).

Figura B.1 – Topologias RSSF



Fonte: (IEEE, 2011)

Na Figura B.1, podemos ter os exemplos de duas topologias. Em estrela e ponto a ponto.

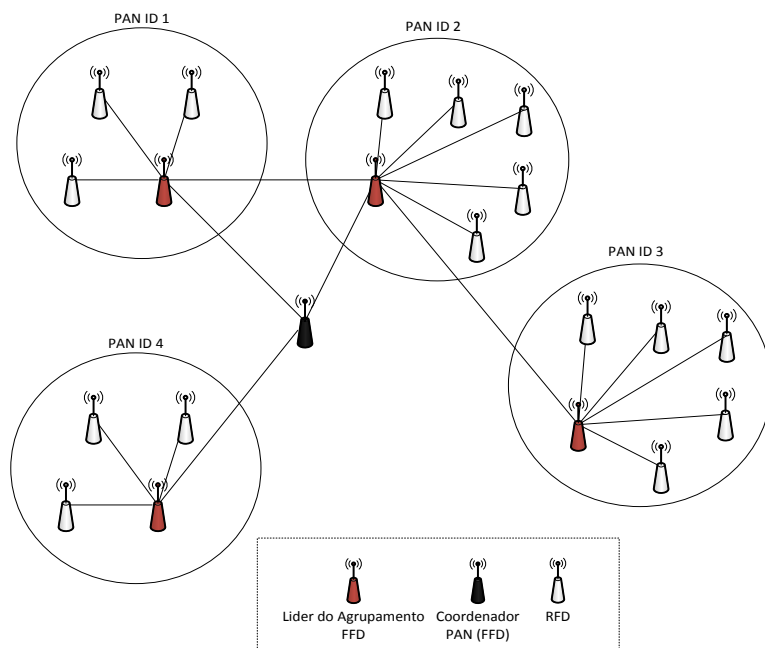
Agrupamento em Árvore

Um exemplo da utilização da topologia *peer-to-peer* é na construção de uma topologia em árvore (*cluster tree*). Elas se assemelham a um conjunto de diversas redes em topologias em estrela, unidos pelos seus respectivos coordenadores, onde estes se tornam líderes de agrupamento (Figura B.2), também conhecidos como cabeças de cluster (*Cluster Heads* – CHs). O padrão 802.15.4 não define especificamente como construir um agrupamento em árvore. Ele apenas indica que é possível de ser realizado. Existem diversas propostas na literatura com o objetivo de fornecer algoritmos para formação de agrupamentos. Genericamente alguns passos para a formação de uma árvore são descritos em (CUOMO et al., 2008).

O início da rede ocorre analogamente à topologia estrela, e o coordenador PAN é responsável por enviar *beacons* periódicos. Qualquer nodo no alcance de rádio pode requisitar a sua entrada na rede. Caso seja um dispositivo FFD, o coordenador PAN pode permitir a associação deste dispositivo para atuar como folha ou coordenador líder de agrupamento, constituindo seu próprio cluster. Já os nodos RFD não podem se tornar coordenadores, somente folhas. Um nodo folha poderá se conectar ao coordenador principal se estiver ao seu alcance de rádio e se o líder de agrupamento permitir.

Desta forma, mesmo que o nodo central não esteja ao alcance do nodo folha, a rede estará formada. Um nodo líder de agrupamento poderá se comunicar com seus filhos (folhas) e com seu predecessor na rede, normalmente outro coordenador de agrupamento ou coordenador PAN. O fluxo de dados ocorre no sentido das folhas para o coordenador PAN, ou seja, de baixo para cima da árvore.

Figura B.2 – Topologia em Árvore



Fonte: (IEEE, 2011)

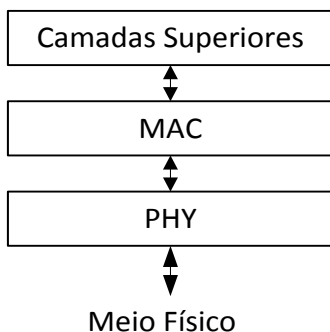
B.1.3.2 Camadas PHY e MAC

A norma IEEE 802.15.4 define somente as camadas física (PHY) e de controle de acesso (MAC) integrantes do padrão, mostrada em forma de blocos na Figura B.3.

A camada PHY (*Physical Layer*) fornece o serviço de transmissão de dados e o serviço de gestão da camada física. O serviço de dados permite a transmissão e recepção de unidades de dados de protocolo PHY (PPDUs) através do canal de rádio físico. A PHY manipula a camada física do rádio realizando a seleção de canais, ativação e desativação do rádio e a verificação de energia e sinal. As principais faixas de frequência de operação de rádio são as seguintes:

- 868–868.6 MHz (1 canal)
- 902–928 MHz (10 canais)
- 2400–2483.5 MHz (16 Canais)

Figura B.3 – Arquitetura dos dispositivos



Fonte: (IEEE, 2011)

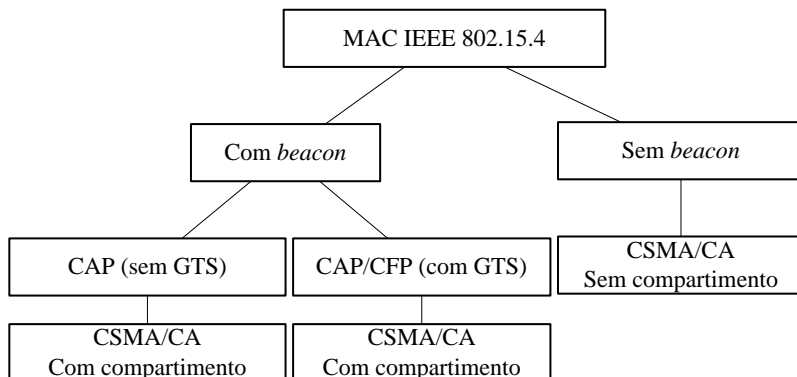
As taxas de dados alcançadas vão desde 20 Kbps em 868 MHz a 250 Kbps operando em 2.4 GHz. As baixas frequências são adequadas para transmissões de longa distância.

A subcamada MAC fornece os serviços de dados e gerenciamento. É da subcamada MAC a responsabilidade pelo gerenciamento e sincronização de *beacons*, controle de acesso ao canal de comunicação, manutenção dos tempos reservados (*slots GTS*), validação e reconhecimento de mensagem, associação e desassociação de dispositivos e também fornece opção para a implementação de mecanismos de segurança. Os *beacons* são sinalizadores, que também podem ser definidos como pacotes de controle, gerados periodicamente pelo coordenador para sincronizar a rede além de delimitar e descrever a estrutura do superquadro (*superframe*).

A operação de uma LR-WPAN pode ser realizada com ou sem *beacon*, e no caso de operação com *beacon*, pode ter ou não slots de tempo garantido GTS, como pode ser visualizado na Figura B.4.

- **Com *beacon*:** o coordenador gera *beacons* periódicos e identifica a rede. Os demais dispositivos sincronizam-se com o *beacon* e são utilizados superquadros.
- **Sem *beacon*:** os nodos podem simplesmente enviar seus dados após uma fase de associação, utilizando o CSMA/CA sem compartimentos.

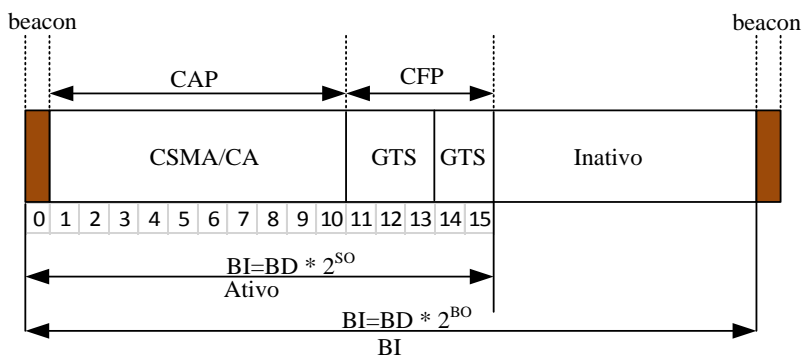
Figura B.4 – Modos de operação IEEE 802.15.4



Fonte: (IEEE, 2011)

O superquadro inicia com a transmissão do *beacon* e é delimitado por dois *beacons*, que determina o valor do intervalo de *beacon* (*BI*). O formato do superquadro é definido pelo coordenador. Basicamente, ele é dividido em 16 compartimentos (*slots*) de mesmo tamanho, conforme pode ser observado na Figura B.4. Opcionalmente o superquadro pode ter uma porção ativa e uma porção inativa. Durante a parte inativa, o coordenador é capaz de entrar em um modo de economia de energia. ADF

Figura B.5 – Estrutura do superquadro com GTS



A Figura B.5 mostra que imediatamente após o *beacon*, inicia-se o período de contenção (CAP). Durante este período, qualquer dispositivo que pretenda se comunicar deve utilizar os mecanismos de acesso ao meio definidos no CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision*

Avoidance). O CAP deve conter pelo menos oito períodos ativos, mas pode chegar até 16. Aplicações que requerem baixa latência, ou largura de banda específica podem utilizar as porções de tempo garantido (GTS). Os GTS formam o período sem contenção (CFP), posicionadas sempre no final da parte ativa do superquadro e depois do CAP. O coordenador pode alocar até sete slots GTS, permitindo-se ao dispositivo a alocação de mais de um desses slots. No entanto, pelo menos uma porção do superquadro deve ser formada pelo CAP, para permitir que novos dispositivos se unam a rede. Todas as operações contidas no CAP devem acabar antes do CFP. O dispositivo que utilize um slot GTS deve acabar a sua comunicação antes do fim do próximo GTS/CFP. Durante o CFP não é utilizado o CSMA/CA.

Em uma rede de 2.4 GHZ, a duração de um BI é igual a 15.36×2^{BO} , onde $0 \leq BO \leq 14$. A porção ativa do superquadro é denominada *Supeframe Duration* (SD), e sua duração é definida pelo parâmetro SO, onde SD é igual a 15.36×2^{SO} , com $0 \leq SO \leq BO \leq 14$. Caso $SO = BO$ então $SD = BI$, e o superquadro estará sempre ativo. Se $SO = 15$, o superquadro não terá período ativo após o *beacon*. Uma rede operará sem *beacon* se $BO=15$, pois o superquadro não existirá. O valor mínimo do superquadro é dado por $SO=0$. A periodicidade pode variar entre 15.36 ms até 4.2 minutos, com tempo de compartimento de 960 μ s a 15.7 segundos e o número máximo de bytes que podem ser transmitidos nestes compartimentos de tempo varia de 30 bytes a 491 kbytes. A Tabela B.1 – Períodos do Superquadro, elaborada por SEMPREBOM et al. (2009), relaciona os valores de períodos possíveis juntamente com os comprimentos dos compartimentos de tempo e os tamanhos dos compartimentos durante o período ativo.

Tabela B.1 – Períodos do Superquadro

SO=BO	PERÍODO (MS)	COMPARTIMENTO (MS)	TAMANHO (BYTES)
0	15.36	0.96	30
1	30.72	1.92	60
2	61.44	3.84	120
3	122.88	7.68	240
4	245.76	15.36	480
5	491.52	30.72	960
6	983.04	61.44	1920
7	1966.08	122.88	3840
8	3932.16	245.76	7680
9	7864.32	491.52	15360
10	15728.64	983.04	30720
11	31457.28	1966.08	61440
12	62914.56	3932.16	122880
13	125829.12	7864.32	245760
14	251658.24	15728.64	491520

Fonte: (SEMPREBOM et al., 2009)

Por exemplo, em uma rede configurada com SO=1 e BO=2, tem um BI=61.44 ms, formado por períodos ativos e inativos iguais com 30.72 ms. O período ativo é dividido em 16 compartimentos. Cada compartimento tem duração de 1.92 ms, ou seja, capaz de enviar 60 bytes.

O BI pode conter o período de acesso com contenção (CAP) e o período de acesso sem contenção (CFP). Utilizando exclusivamente o CAP, um dispositivo deve competir com outros usando CSMA/CA com compartimentos e todas as transmissões devem ser finalizadas antes do fim do CAP ou antes do início do período inativo.

No modo com *beacons*, o nodo tem duas opções para realizar o envio de dados. No primeiro modo o *tracking beacon*, o nodo sempre sincroniza como *beacon* e envia os dados. No segundo modo sem *tracking beacon*, o nodo pode “dormir” por longos períodos de tempo, mas deve sincronizar com um *beacon* transmitido pelo coordenador, assim que de-seja transmitir dados.

Caso um coordenador opte por não usar uma estrutura de superquadro, ele vai desligar as transmissões de *beacon*. Assim, não existe a estrutura do superquadro e o acesso ao meio é realizado utilizando o

CSMA/CA sem compartimentos. Todas as mensagens a serem transmitidas, com exceção das mensagens de reconhecimento (ACK) e quadros que seguem imediatamente um ACK devem ser transmitidos segundo este mecanismo. Este tipo de configuração não pode ser utilizado em redes com restrições temporais.

A norma trata a economia de energia através do parâmetro *Battery Life Extension* – BLE. Quando um nodo ativa o modo BLE, são feitas alterações nos algoritmos CSMA/CA. No entanto, ao habilitar este parâmetro também podem ocorrer colisões, quando existirem muitos nodos na rede.

B.1.3.3 Transferência de dados

A transferência de dados pode ser realizada de três maneiras, a saber:

- Dispositivo para o coordenador.
- Coordenador para o dispositivo
- Dispositivo para dispositivo

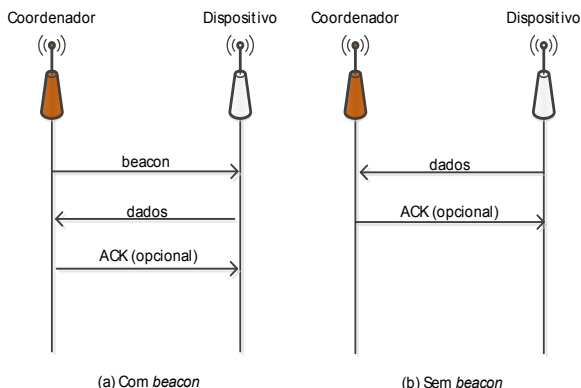
Basicamente em uma rede ponto-a-ponto, a comunicação ocorre entre os dispositivos. No entanto, o *beacon* ainda é utilizado para controlar as associações na rede.

Dispositivo para o coordenador

Em uma rede com *beacon* habilitado, o dispositivo aguarda o *beacon*, e uma vez detectado, o nodo se sincroniza com a estrutura do superquadro (Figura B.6a). Uma vez sincronizado, ele transmite seu quadro de dados para o coordenador usando CSMA-CA. Já o coordenador pode ou não enviar um quadro de reconhecimento (*acknowledgment* – ACK).

Sem *beacon* ativado (Figura B.6b), o dispositivo simplesmente transmite para o coordenador a qualquer tempo utilizando CSMA-CA. Também neste caso existe a possibilidade do coordenador enviar um ACK para o dispositivo.

Figura B.6 – Transferência de dados do dispositivo para o coordenador

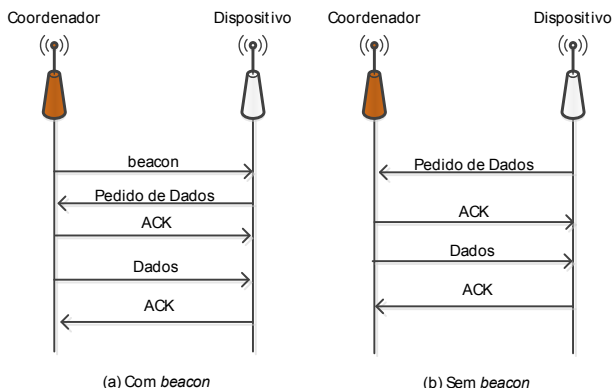


Fonte: (SANTOS, 2007)

Coordenador para o dispositivo

Em uma rede com *beacon* habilitado (Figura B.7a), quando o coordenador quer transmitir um quadro para o dispositivo ele indica no *beacon* que existe mensagem de dados pendentes para o dispositivo. Então, o dispositivo devidamente sincronizado com o *beacon* requisita os dados. O coordenador envia um pacote de reconhecimento ACK da requisição, e em seguida envia o quadro de dados usando CSMA-CA e, finalmente, retira a mensagem da lista de mensagens pendentes no *beacon*.

Figura B.7 – Transferência de dados do coordenador para o dispositivo



Fonte: (SANTOS, 2007)

Em uma rede sem *beacon* ativado, para transmitir os dados entre coordenador e dispositivo (Figura B.7b) o primeiro registra os dados do dispositivo e aguarda um contato de requisição de dados, que deve ser realizado pelo dispositivo com comando apropriado em nível de camada MAC. O coordenador reconhece o pedido de dados transmitindo um ACK para o dispositivo. O coordenador sempre envia um quadro de dados para o dispositivo, com a diferença de que se haviam dados pendentes eles é que são enviados, caso contrário é enviado um quadro com tamanho zero.

Dispositivo para dispositivo

Se a rede for ponto-a-ponto, os dispositivos podem se comunicar entre si, desde que estejam no seu alcance de rádio.

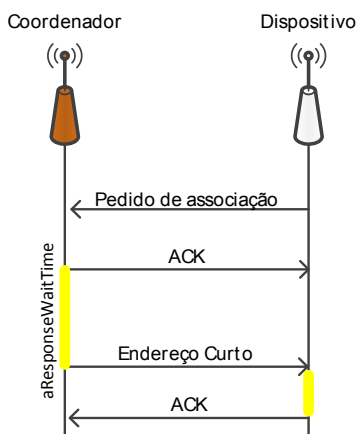
B.1.3.4 Associação e desassociação de um nodo a PAN

A associação de um dispositivo a uma rede 802.15.4 inicia-se com a exploração do canal a procura de *beacon*, esta pode ser passiva ou ativa. No modo passivo, o dispositivo aguarda a transmissão de *beacons* dentro do seu alcance de rádio, enquanto na forma ativa, ele solicita o *beacon*. O resultado da exploração é utilizado para escolher uma PAN adequada, considerando o canal físico, o seu identificador PAN, o seu endereço curto ou longo.

Na Figura B.8 demonstra-se uma associação corretamente estabelecida. Um dispositivo não associado envia seu pedido de associação ao

coordenador. Se o comando de associação é recebido corretamente pelo coordenador, ele envia um ACK. Isso não quer dizer que o dispositivo já está associado, apenas que o comando foi recebido corretamente. O coordenador analisa durante o tempo *aResponseWaitTime* se existem recursos disponíveis para a associação do dispositivo. Se a resposta for positiva o coordenador enviará um comando de resposta indicando sucesso na associação. Caso contrário, a resposta será de falha, incluindo o motivo. Na resposta positiva, está incluso um endereço curto, que será usado para a comunicação com o dispositivo.

Figura B.8 – Associação e desassociação.



Após aguardar pelo tempo de *aResponseWaitTime*, o dispositivo recebe o resultado de sua solicitação. Caso for positiva, ele armazena o endereço do coordenador e envia um quadro de reconhecimento.

A desassociação parte do coordenador ou do dispositivo. Quando do coordenador, este envia uma notificação de desassociação para o dispositivo. A desassociação ocorre mesmo se o dispositivo não responder a solicitação. Se a desassociação partir do dispositivo, este envia um comando de notificação de desassociação ao coordenador. O coordenador envia um quadro de reconhecimento. Mesmo se o quadro de reconhecimento não for recebido, o dispositivo se considera desassociado.

Ao desassociar-se um dispositivo remove todas as referências daquela rede PAN e o coordenador remove as referências do dispositivo associado.

B.1.4 ZIGBEE

O Zigbee é um padrão de rede sem fio, que complementa o padrão IEEE 802.15.4. Conta com mais de 150 membros e trabalha em conjunto com a IEEE. No entanto, enquanto este especifica somente as camadas PHY e MAC, o Zigbee implementa também as de Rede e de Aplicação, além de objetos de dispositivo Zigbee (ZDOs). Os ZDOs são responsáveis por uma série de tarefas, que incluem manutenção de papéis de dispositivos, gestão de pedidos para se juntar a uma rede, a descoberta de dispositivos e segurança. As redes Zigbee são autoorganizáveis, auto-gereciáveis, e permitem o estabelecimento de redes *mesh*, onde os nodos se comportam como roteadores, permitindo a transmissão de mensagens de um nodo para outro utilizando vários caminhos.

B.1.5 WIRELESSHART

O protocolo HART¹⁰ (*Highway Addressable Remote Transducer*) é um padrão global para envio e recebimento de informações digitais através de cabos analógicos entre dispositivos inteligentes e de controle ou sistema de monitoramento. WirelessHART é um protocolo de comunicações de rede sem fio tipo *mesh*, voltado para aplicações industriais de monitoramento e controle. Um dispositivo WirelessHART implementa a mesma estrutura de comandos usadas por um dispositivo clássico HART RS484. Em setembro de 2010 a versão final do padrão foi publicada pela Comissão Eletrotécnica Internacional como IEC 62591/2010.

A camada física da especificação é baseada no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011), compartilhando desta forma as mesmas taxas de transmissão, modulação e alcance de rádio, além da coexistência com outros padrões como IEEE 802.11, Bluetooth e Zigbee. No entanto, utiliza apenas 15 canais em 2.4 GHZ e tem alterações no mecanismo de avaliação de presença da portadora.

A camada de enlace define o controle de acesso ao meio e o escalonamento dos pacotes a serem enviados. No WirelessHART este procedimento é realizado através de acesso múltiplo por divisão de tempo

¹⁰ <http://www.hartcomm.org>

(TDMA) e saltos de frequência. Para os dispositivos que desejam transmitir, são reservados slots de tempo com duração de 10ms, e a transmissão deve ocorrer em um dos 15 canais disponíveis. O padrão também permite a criação de superquadro. Esta estrutura é formada por um período contínuo de *timeslots*, e a quantidade de slots indica a periodicidade do superquadro.

A camada de Rede e Transporte é o ponto de convergência com a especificação HART e tem funções relacionadas ao roteamento, endereçamento e segurança fim-a-fim. A camada de Transporte foi definida de uma maneira mais simples que a camada de rede onde o objetivo principal é a transmissão dos dados com confiabilidade fim-a-fim (SILVA et al., 2011).

O padrão WirelessHART é utilizado por fabricantes como Emerson, Siemens, ABB, Endress+Hauser dentre outros.

B.1.6 ISA 100.11A

A Sociedade Internacional de Automação (ISA) aprovou em 2013, a versão final da norma IEC 62734, que trata do novo padrão de comunicação voltado para aplicações industriais de monitoramento e controle denominado ISA 100.11a. O objetivo do padrão é fornecer comunicação sem fio confiável e segura com baixa latência. Devido a camada física ser baseada na norma 802.15.4 é facilitada a coexistência com outros padrões de rede industrial sem fio. Permite a utilização de 16 canais e suporta diversas técnicas de detecção de portadora, permitindo inclusive desabilitá-la.

Na camada de enlace, além das funções básicas definidas pelo modelo OSI, a ISA 100.11a provê uma extensão que permite a utilização de CSMA/CA, TDMA e saltos de frequência. Além disso, a camada MAC tem capacidades de roteamento, porém limitada a sub-redes. Caso a comunicação encontre um *backbone*, daí em diante o roteamento é realizado pela camada de Rede e Transporte.

A camada de Rede e Transporte provê o roteamento no nível de *backbone* e utiliza endereçamento de 128 bits como no protocolo IP versão 6 – (IPv6), além de possuir capacidades de fragmentação de pacotes. Já a camada de transporte tem funcionalidades semelhantes a comunicação UDP, proporcionando comunicação fim-a-fim sem conexão.

A camada de Aplicação é baseada na orientação a objetos, de forma que a comunicação é realizada objeto-a-objeto (SILVA et al., 2011) e permite o tunelamento de outros protocolos como HART, WirelessHART, Profibus, FieldBus, Modbus, além de integração com a Internet.

Alguns fabricantes que utilizam o padrão ISA 100.11a são a Honeywell e Yokogawa.

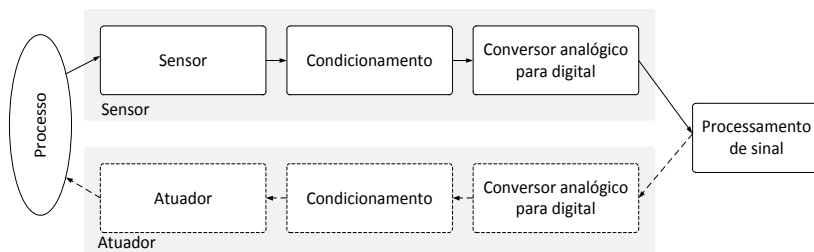
B.1.7 SENSORIAMENTO E SENSORES

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), através do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (INMETRO, 2012) denomina sensor o elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida. O transdutor é um dispositivo que converte um sinal de uma forma física para um sinal correspondente de outra forma física. A grandeza de saída tem correlação específica com a grandeza de entrada. Neste trabalho utilizar-se-á o termo sensor com o mesmo significado de transdutor sensor.

Sensores têm a capacidade de capturar fenômenos reais convertendo-os em dados que possam ser processados (POELLABAUER, 2010). No monitoramento de ambientes eles são necessários, pois realizam a detecção primária, e afetam significativamente o desempenho da fusão de informações, em qualquer uma das suas etapas (RAOL, 2009).

Os fenômenos reais que são observados e convertidos para sinais elétricos não estão prontos para processamento imediato, pois passam por uma fase de avaliação e condicionamento. Por exemplo, os sinais de frequência requerem amplificação (ou atenuação) para alterar a amplitude do sinal para coincidir melhor com a conversão analógico/digital. Após o condicionamento, o sinal analógico é transformado num sinal digital através de um conversor *analog-to-digital* (ADC). Depois destas operações o sinal está disponível para processamento visualização e armazenamento. A sequência de operações pode ser visualizada na Figura B.9.

Figura B.9 – Sensor/Atuador



Fonte: (POELLABAUER, 2010)

Em muitos casos de RSSF, é possível que sejam acoplados atuadores. Atuadores são elementos que podem atuar no mundo físico, como por exemplo, uma válvula de controle de fluxo de água. Em um processo inverso, os sinais elétricos vindos de um controlador são transformados de sinais elétricos em ações no processo físico, formando um circuito fechado (Figura B.9).

B.1.7.1 Classificação dos Sensores

O monitoramento de uma grandeza depende da propriedade física a ser observada (temperatura, pressão, luz e umidade etc). Na Tabela B.2 estão incluídas algumas propriedades físicas comuns, incluindo exemplos de tecnologias de sensores usados para a observação. Existem vários outros métodos para classificar sensores, por exemplo, quanto à necessidade de alimentação suplementar, onde se os sensores precisam de energia externa, eles são referidos como ativos. Isto é, eles devem emitir algum tipo de energia (por exemplo, micro-ondas, luz, som) para desencadear uma resposta, ou detectar uma variação na energia do sinal transmitido. Por outro lado, os sensores passivos detectam a energia do meio ambiente e utilizam esta energia.

Tabela B.2 – Classificação e exemplos de sensores

Tipo	Exemplo
Temperatura	Termístores, termopares
Pressão	Manômetros, barômetros, medidores de ionização
Ótico	Fotodiodos, foto transístores, sensores de infravermelho, sensores CCD
Acústico	Ressonadores piezoelétricos, microfones.
Mecânico	Medidores de tensão, sensores táteis capacitivos, diafragmas, células piezoresistivos
Movimento/Vibração	Acelerômetros, giroscópios, sensores fotográficos
Fluxo	Anemômetro, fluxo de ar
Posição	GPS, sensores baseados em ultra-som, sensores infravermelhos, inclinômetros
Eletromagnetismo	Sensores de efeito Hall, magnetômetros
Químico	sensores de pH, sensores eletroquímicos, sensores de gás.
Umidade	Capacitivos e resistivos sensores, hygrometers, sensores de umidade baseados em MEMS
Radiação	Detectores de ionização, Geiger – contadores Mueller

Fonte: (POELLABAUER, 2010)

Outra classificação possível para os sensores é baseada nos métodos aplicados e os fenômenos elétricos utilizados para converter propriedades físicas em sinais elétricos.

- **Resistivo:** depende de alterações na resistividade elétrica de um condutor com base em uma propriedade física tais como a temperatura (POELLABAUER, 2010).
- **Capacitivo:** Ao serem colocadas duas placas condutoras, uma próxima da outra tendo sobre elas um material isolante (dielétrico), por exemplo, o vidro ou plástico, o conjunto se comporta como um capacitor. A capacitância apresentada por esse conjunto depende do dielétrico e do tamanho e separação das placas condutoras. Ao se tocar com o dedo na placa isolante, este passa a apresentar uma capacitância adicional ao sistema. A variação pode ser detectada e utilizada em medições.
- **Indutivo:** são dispositivos eletrônicos capazes de medir a proximidade de objetos metálicos que entram em seu

campo magnético. Esses dispositivos exploram o princípio da impedância de uma bobina de indução, que ao conduzir uma corrente alternada tem esta alterada quando um objeto metálico é posicionado dentro do campo magnético. Isso ocorre porque o objeto absorve parte do campo magnético e essa variação é detectada pelo circuito do sensor que produz um sinal de saída. Os sensores indutivos são muitas vezes utilizados para medir a proximidade, posição, força, pressão, temperatura e aceleração.

- **Piezoelétrico:** Elementos piezoelétricos como cristais e cerâmica são utilizados para a construção de transdutores para um vasto número de aplicações diferentes. Eles geram uma carga elétrica proporcional a pressão mecânica ou um deslocamento de cargas exercida sobre o material.

Comercialmente, vários sensores de baixo custo estão disponíveis para utilização juntamente com nodos de RSSF. Pode-se citar como exemplo:

- **Fotocélula:** Este sensor muda a resistência, dependendo da quantidade da luz a que está exposto. É utilizado para medir a luminosidade de ambientes.
- **Fluxo de água:** Este sensor é constituído por um corpo de válvula de plástico, um rotor de água e um sensor de efeito Hall. Quando a água flui através do rotor, a sua velocidade muda com diferentes taxas de fluxo e o sensor de efeito Hall emite o sinal de pulso correspondente.
- **Chuva:** A medição pode ser realizada pela alteração da corrente elétrica entre filamentos condutores causados pelo contato com a água. Um dos usos comuns do sensor de chuva é em automóveis. O sistema funciona com a utilização do fenômeno físico da refração total. É fixado um sensor de chuva que emite uma luz infravermelha em um ângulo de 45 graus em relação ao vidro do automóvel, ocasionando a refração total, em que é medida a quantidade de luz recebida pelo sensor de chuva. Quando existem gotas no vidro, essa refração é prejudicada, desviando o raio de luz para outras direções, diminuindo a incidência sobre o sensor de chuva.

Outro sensor de baixo custo é o de pressão atmosférica ou sensor barométrico, que servirá como estudo de caso desta dissertação. Desta forma, a seguir são explanados conceitos sobre pressão atmosférica e o funcionamento de alguns tipos de sensores barométricos.

B.1.7.2 Pressão Atmosférica

A pressão atmosférica (PA) é a pressão exercida pelo ar sobre uma unidade de área de uma superfície terrestre ou de outro planeta, conforme a Figura B.10. Desta forma, se a força exercida pelo ar em um determinado ponto da superfície aumenta, a PA também aumentará. Em uma dada posição é usualmente definida como o peso por unidade de área da coluna de ar acima desta posição. Uma atmosfera (atm) equivale a pressão que uma coluna de ar com base de 1 m^2 exerce sobre a superfície (BROWN; LEMAY; BURSTEN, 2005).

Figura B.10 – Pressão Atmosférica



Fonte: (BROWN et al., 2005)

O peso do AR foi medido pela primeira vez por Evangelista Torricelli em 1643. Os fatores que influenciam a PA são a latitude, altitude, temperatura, marés barométricas, umidade e densidade do ar (MONTEIRO, 2012). Em um dado plano, áreas de baixa pressão têm menos massa atmosférica acima de sua localização, enquanto que as áreas de alta pressão têm mais massa atmosférica acima de sua localização. As altas pressões resultam da descida do ar frio. Quando o ar quente se eleva cria, por baixo dele, uma zona de baixa pressão. Baixas pressões, normalmente, significam mau tempo. Quanto mais baixa a altitude, maior a pressão. As baixas pressões são causadas pela elevação do ar quente. À medida que o ar, ao subir, arrefece e o seu vapor de água transforma-se

em nuvens, que podem produzir chuva, neve ou tempestade. Simultaneamente, ao nível do solo, há ar que se desloca para substituir o ar quente em elevação, o que dá origem a ventos (MONTEIRO, 2007). Existe ainda uma oscilação natural da PA causada pela ação gravitacional da lua, conhecida como marés barométricas. Estas oscilações ocorrem em períodos de 6 horas, com máximas às 10 e 22 horas, e mínimas às 4 e 16 horas (MONTEIRO, 2012).

Para fins de medição, ao nível do mar, uma atmosfera equivale 760 torr (Torriceli) ou 1013,25 hPa (hectopascal), a 15 graus célsius. O equipamento utilizado para medir a PA é o barômetro e a unidade de medida, mais comumente utilizada, é a hectopascal.

Os valores medidos da PA podem ser úteis em diversas áreas como:

- **Meteorologia:** Previsão do tempo, relacionado às altas e baixas pressões além da previsão de catástrofes. A passagem de furacões associam-se sempre com uma queda violenta na pressão atmosférica num curto período de tempo, podendo chegar a 75 hPa em casos extremos, como o acontecido em Florianópolis de 26 a 28 de março de 2004 (MARTINS et al., 2004).
- **Altimetria:** como a PA diminui com a altitude em aproximadamente 1 hPa para cada 8.43 metros que se sobe, pode-se determinar a altitude de uma aeronave, por exemplo, utilizando um barômetro instalado em solo e outro na aeronave, sendo assim possível determinar a altitude em que a mesma se encontra (MONTEIRO, 2012).
- **Engenharia Sanitária e Ambiental:** Oxigênio Dissolvido na Água (OD) é o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição por lançamentos orgânicos. Além da PA, outros fatores que influenciam no OD são a temperatura e concentração de cloretos (FIORUCCI; BENEDETTI FILHO, 2005).

B.1.7.3 Barômetro

A pressão é uma grandeza analógica, existindo uma infinidade de tipos de sensores que podem convertê-la no movimento de uma agulha numa escala, tensão elétrica, corrente elétrica ou outra grandeza que possa ser observada.

Os três principais tipos de sensores barométricos são:

- **Membrana:** o tipo mais comum de sensor barométrico é o de membrana. Ele é composto essencialmente por uma câmara hermeticamente fechada, eletrodos e diafragma. Quando uma pressão é aplicada ao

diafragma ele se deforma com uma conseqüente alteração de sua resistência elétrica. Essa resistência pode então ser medida por um circuito externo.

- **Capacitivo:** é o sensor de pressão que se baseia na alteração da capacitância entre um diafragma que se deforma, e uma placa fixa no seu interior. São compostos por uma câmara hermética, semi-condutor, uma armadura fixa e uma móvel e um diafragma. Com o aumento da pressão aplicada ao diafragma a armadura móvel que ele representa se aproxima da armadura fixa e com isso a capacitância do sensor aumenta.
- **Piezoelétrico:** sensores barométricos piezoelétricos são compostos por um diafragma, cerâmica piezoelétrica e armadura para fixação. Uma membrana faz contato através de uma agulha com um cristal piezoelétrico. Quando muda a pressão da agulha sobre o cristal ele se deforma, gerando uma tensão elétrica que se manifesta na sua saída.