

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Desenvolvimento de Rede Sem Fios
de Instrumentação para Infra-Estruturas
de Engenharia Civil**

Luis Filipe Ferreira da Silva Peneda

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Doutor Adriano da Silva Carvalho

Julho de 2008

© Luis Filipe Ferreira da Silva Peneda, 2008

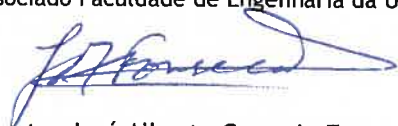
A Dissertação intitulada

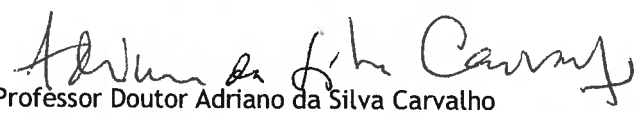
“Desenvolvimento de rede de instrumentação sem fios”

foi aprovada em provas realizadas em 15/Julho/2008

o júri


Presidente Professor Doutor Américo Lopes de Azevedo
Professor Associado Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca
Professor Associado da Universidade de Aveiro


Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor - Luis Filipe Ferreira Silva Peneda



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A idade avançada e os danos em infra-estruturas requerem sistemas de monitorização, em que seja possível com estes avaliar o estado de uma estrutura, tendo em vista a preservação desta, actuando sobre a estrutura com reparações e/ou em métodos preventivos. O problema surge quando o custo dos sistemas de monitorização é muito elevado.

A monitorização contínua permite um maior conhecimento das mudanças do comportamento da estrutura ao longo do tempo o que se traduz numa melhor estimativa do estado da estrutura civil. Com a informação detalhada do comportamento da estrutura obtida através do sistema de monitorização os custos de manutenção também podem ser reduzidos, desde que os métodos da inspecção sejam aplicados eficientemente.

Com novas tecnologias emergentes, exige-se que os sistemas de monitorização sejam mais versáteis, menos complexos, modulares e com processos de instalação mais rápidos. Desta forma é possível o surgimento destes sistemas para monitorizar todos os tipos de estruturas, prevenindo-se acidentes, poupando-se vidas, custos e evitando-se gastos em construções de novas estruturas.

Neste trabalho pretende-se construir um protótipo de um sistema de monitorização sem fios com o objectivo de se eliminarem ao máximo as comunicações por cabos, substituindo-as por comunicações sem fios. Desta forma pretende-se construir um sistema de monitorização mais versátil, com instalação simples e rápida, utilizando a mais recente tecnologia de sensores e de comunicações sem fios.

A solução para um sistema de monitorização aqui apresentado contempla uma arquitectura de rede sem fios, a constituição dos dispositivos dessa mesma rede, o uso de sensores *Microelectromechanical Systems* integrados com sensores convencionais e a construção de uma interface que comunique com todo o sistema.

Abstract

The ageing and damages in infrastructures require monitoring systems, where it is possible to evaluate the health of an infrastructure, the preservation of the structure through maintenance and preventive methods. A problem arises when the cost of the monitoring systems is very high. The continuous monitoring allows a larger knowledge on the behaviour of the infrastructures along time, and a better estimate of the health of the civil structure.

The maintenance costs can be reduced by using detailed information on the behaviour of the structure through the monitoring system, since the evaluation methods are applied more efficiently.

With new technologies, it is possible to conceive monitoring systems more flexible, less complex, modular and easier to be installed. With these systems it is possible to prevent accidents and prevent high costs in constructions of new structures.

In this work it is intended to build a wireless monitoring system, avoiding wired communications. The system should be simple and quick to be installed using the most recent technology of sensors and wireless communications.

The proposed solution is a monitoring system based on architecture of wireless network, the choice of the devices of the network, the use of Microelectromechanical Systems integrated with conventional sensors and the development of an interface that can control all system.

Agradecimentos

A todas as pessoas que tornaram a realização deste projecto possível, em especial ao Filipe Cavadas aluno do programa doutoral de Engenharia Civil. Ao Professor Doutor Joaquim Figueiras por todo o apoio prestado.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho, pelo convite para a realização deste trabalho, e por todo o apoio prestado ao longo do seu desenvolvimento.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Contextualização	1
1.2 - Objectivos.....	2
1.3 - Estrutura	2
Capítulo 2	3
Estado da Arte.....	3
2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Contexto.....	3
2.3 - Sistema	5
2.4 - Protocolos de Comunicações.....	7
2.5 - Serviços	11
2.6 - Aplicação de <i>Software</i>	15
2.7 - Nós de sensores	16
2.8 - Sensores	17
2.9 - Conclusões	19
Capítulo 3	21
Projecto do Sistema	21
3.1 - Introdução.....	21
3.2 - Arquitectura do Sistema	21
3.3 - Nível de Sensores	26
3.4 - Nível Nós de Sensores	28
3.5 - Unidade Central.....	36

3.6 - Aplicação de <i>Software</i>	40
3.7 - Conclusões	43
Capítulo 4	45
Implementação.....	45
4.1 - Introdução	45
4.2 - Configuração do protótipo	45
4.3 - Testes e Análise dos Resultados.....	55
4.4 - Conclusões	61
Capítulo 5	63
Conclusão e Futuros Desenvolvimentos.....	63
5.1 - Principais Conclusões	63
5.2 - Futuros Desenvolvimentos	63
Anexos	65
A. Arquitectura do Protótipo.....	67
B. Esquema da Base de Dados	68
C. Esquema da Página <i>Web</i>	69
D. Esquema Eléctrico do Circuito de Aquisição	70
Referências	71

Lista de figuras

Figura 2.1- Tarefas de uma WSN do ponto de vista da gestão.	4
Figura 2.2- Organização de uma WSN sugerida por [4].....	5
Figura 2.3 - Modelos de redes.	7
Figura 2.4 - Arquitectura de nós de sensores sugerido em [9].....	17
Figura 3.1 - Estrutura da rede.	23
Figura 3.2 - Arquitectura do protótipo.....	24
Figura 3.3 - Modelos de comunicações.....	32
Figura 3.4 - Arquitectura de um nó de sensores.	35
Figura 3.5 - Esquema da Base de Dados.	38
Figura 3.6 - Esquema da página <i>Web</i>	41
Figura 4.1 - Esquema eléctrico do circuito de aquisição.	47
Figura 4.2 - Formato típico do protocolo de comunicações.....	48
Figura 4.3 - Trama tipo 0.	48
Figura 4.4 - Trama tipo 1.....	48
Figura 4.5 - Trama tipo 2.....	48
Figura 4.6 - Trama tipo 3.....	48
Figura 4.7 - Trama tipo 5.....	49
Figura 4.8 - Programa do microcontrolador.....	49
Figura 4.9 - Ciclo de Aquisição de dados do ADS1256.	51
Figura 4.10 - Ligação com a BD da Aplicação de Registo de Dados.	52
Figura 4.11 - Ligação com a <i>intranet</i> da Aplicação de Registo de Dados.	52
Figura 4.12 - Gráfico de valores medidos.	54

Figura 4.13 - Ensaio de comunicação através de Betão Armado.	57
Figura 4.14 - Teste de comunicação no interior do laboratório H102.	58
Figura 4.15 - Ensaio de alcance de comunicações.	58
Figura 4.16 - Ensaio realizado com hardware que suporta <i>ZigBee</i>	59
Figura 4.17 - Estrutura 1 do ensaio geral.	60
Figura 4.18 - Estrutura 2 do ensaio geral.	60
Figura 6.1 - Arquitectura do protótipo projectado.	67
Figura 6.2 - Esquema da Base de Dados.	68
Figura 6.3 - Esquema da página <i>Web</i>	69
Figura 6.4 - Esquema eléctrico do circuito de aquisição.	70

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Relação energia/distância de comunicações sem fios, publicado em [9].	14
Tabela 3.1 - Lista de sensores escolhidos.	26
Tabela 3.2 - Lista de MEMS escolhidos.	27
Tabela 3.3 - Lista de conversores AD analisados.	29
Tabela 3.4 - Resolução de cada sensor.	30
Tabela 3.5 - Levantamento das necessidades energéticas.	34
Tabela 4.1 - Protocolo de Comunicações.	47
Tabela 4.2 - Tabela com configuração do ensaio geral.	60

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

ARP	<i>Address Resolution Protocol</i>
BD	Base de Dados
DEC	Departamento de Engenharia Civil da FEUP
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores da FEUP
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GUI	<i>Graphic User Interface</i>
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABEST	Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
PCB	<i>Print Circuit Board</i>
RS232	<i>Recommended Standard 232</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>

Lista de símbolos

\$ Dólar dos Estados Unidos da América

Capítulo 1

Introdução

A monitorização realizada pelos equipamentos de Engenharia Civil envolve, na sua implementação, muitos meios materiais e recursos humanos que se pretendem reduzir, porque estes implicam custos elevados. Para a monitorização realizada em pequenos períodos de tempo, é importante que a instalação do sistema de monitorização não seja complexa nem confusa.

Assim pretende-se implementar uma solução que tem como objectivo minimizar a cablagem e que simplifique as ligações, de modo a que seja mais cómodo e mais simples a monitorização em estruturas.

1.1 - Contextualização

A monitorização de estruturas está a ter cada vez maior importância nomeadamente na Europa central devido à reconstrução maciça de infra-estruturas após a Segunda Guerra Mundial. O tempo útil de vida para o qual essas estruturas foram construídas foi de 50 a 100 anos. Ou seja, algumas estruturas estão em risco de colapso e caso não sejam tomadas medidas, podem acontecer acidentes graves onde vidas humanas se podem perder. Inclusive, recentes estragos levaram à instalação de sistemas de monitorização para analisar o comportamento da estrutura e os passos da sua deterioração.

O maior problema neste momento dos sistemas de monitorização existentes actualmente prende-se com o facto de serem pouco versáteis e muito dispendiosos. Existem situações em que o custo do sistema de monitorização é mais elevado que o custo de uma nova estrutura. Assim torna-se necessária uma redução de custos, e para tal a utilização de novas tecnologias torna-se fundamental. O uso de novos sensores mais pequenos, mais inteligentes e mais baratos, associado ao desenvolvimento de redes sem fios pode baixar os preços dos sistemas de monitorização.

Contudo não se deve focar a monitorização só com o objectivo de monitorização de estruturas em risco, mas também se deve pensar na monitorização de estruturas novas.

A análise realizada com os dados adquiridos da monitorização e o conhecimento das sucessivas alterações do comportamento da estrutura, permite um prognóstico de tempo de vida da estrutura e das suas componentes mais seguro, criando condições para um baixo custo de manutenção e o desencadear de acções correctivas que prolongam o tempo de vida da estrutura.

1.2 - Objectivos

Pretende-se com este trabalho criar uma rede de instrumentação sem fios para infra-estruturas. A solução terá como objectivo principal substituir por antenas, o elevado número de cabos que estes testes exigem actualmente.

Terá de ser analisado o tipo de utilização, para que as condições de emissão e transmissão permitam um bom funcionamento da rede.

Este trabalho tem o propósito de, uma vez implementado, adquirir e armazenar os dados de cada um da mais diversa gama de sensores utilizados pela Engenharia Civil.

Cada nó terá também de ser capaz de ser o mais modular possível, isto é, deverá ser possível introduzir novo equipamento sem que seja necessário uma reconfiguração total da rede.

O desenvolvimento da dissertação implementará uma solução protótipo com todas as funcionalidades descritas acima.

1.3 - Estrutura

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. Para além da presente introdução ao tema, no segundo capítulo tem-se uma visão sobre o estado da arte onde é feito uma análise sobre os mais recentes estudos nesta área.

De seguida no terceiro capítulo são apresentadas as opções tomadas em cada camada do sistema. Estas estão organizadas por sub-capítulos sucessivos, a saber: os sensores; os nós de sensores, o registo e organização de dados e a aplicação que faz interface com utilizador.

Os testes e resultados da implementação de todo o sistema são apresentados no capítulo 4 e finalmente no capítulo 5 apresentam-se as conclusões e possíveis futuros desenvolvimentos do sistema.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentadas as diferentes áreas de estudo que foram envolvidas na concepção desta dissertação. Este estudo baseou-se na análise dos mais recentes documentos publicados sobre as áreas envolvidas. Entre os documentos pesquisados estão comunicações, artigos em revistas, consulta de alguns livros e a consulta de normas. A presença na conferência CCC2008 organizada pela Faculdade de Engenharia também visou uma melhor percepção do Estado da arte.

É apresentada uma referência ao contexto da dissertação, são apresentados os últimos avanços da tecnologia nesta área e também são discutidas com pormenor todas as questões envolvidas na constituição de um sistema de uma rede sem fios para sensores.

2.2 - Contexto

Desde o aparecimento das redes sem fios que muitas oportunidades surgiram em múltiplos domínios da engenharia. Em [1] são referidas aplicações de redes sem fios com grande potencial de desenvolvimento, como sensorização militar, segurança física, controle de tráfego aéreo, vigilância de tráfego, vigilância por vídeo, automação industrial, sistemas de robótica distribuída, controlo de ambientes naturais e na construção e monitorização de estruturas.

As redes sem fios utilizadas para monitorização são uma das diversas aplicações que estas redes têm. As redes de monitorização remotas permitem, que de uma forma cómoda seja possível detectar através de sensores um acontecimento físico discreto ou contínuo e actuar de acordo com o fenómeno. Com a utilização de redes sem fios a quantidade de cabos utilizados nas redes de instrumentação diminui exponencialmente sem por isso reduzir o seu desempenho.

O trabalho inicial deste projecto incidiu numa pesquisa sobre as recentes aplicações de Redes Sem Fios de Sensores (WSN) em trabalhos recentemente publicados. A primeira grande

lição que se retira está relacionada com a estrutura da rede, que vai depender fortemente da aplicação, tendo em conta diversos factores como o ambiente, o custo, o objectivo da aplicação, o hardware e as limitações do sistema [2].

De acordo com [2] existem vários tipos de redes de sensores sem fios, as WSN terrestres, as WSN subterrâneas, as WSN subaquáticas, as WSN multimédia e as WSN móveis.

As redes terrestres permitem comunicações fiáveis em ambientes muito densos. Nestas redes é muito importante que os nós de sensores possam transmitir os dados eficientemente com uma unidade que faz o controlo da rede. As WSN subterrâneas consistem em ter distribuído nós de sensores para monitorizar em condições do subsolo, como por exemplo numa cave, numa mina ou enterrados. As WSN subaquáticas permitem fazer medições debaixo de água, através de vários nós de sensores distribuídos e veículos desenvolvidos para o meio aquático. As WSN multimédia são redes cujo objectivo é monitorizar e registar eventos como vídeo, áudio e imagens. As WSN móveis consistem em diversos nós de sensores que possam, mover-se sozinhos e interagir com o mundo físico.

O tipo de redes desenvolvido neste projecto foram as WSN terrestres e por essa razão o estudo do estado da arte foca-se essencialmente no estudo de monitorização de redes de sensores sem fios.

Do ponto de vista da gestão de uma WSN e dos seus requisitos funcionais a variedade de tarefas que a WSN executa devem ser classificada em cinco grupos: o Sistema; o Protocolo de Comunicações; os Serviços; a Aplicação; e os Sensores, a tecnologia a eles associada, tal como é possível visualizar na figura 2.1.

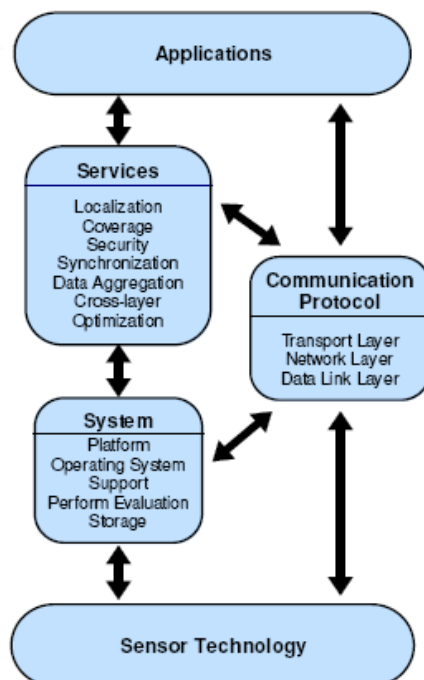


Figura 2.1- Tarefas de uma WSN do ponto de vista da gestão.

As tarefas consideradas como fazendo parte do Sistema são as seguintes: gerir os vários sensores de acordo com a respectiva finalidade, suportar os nós que podem ou não funcionar de forma autónoma, organizar a operação e os esquemas de armazenamento de dados distribuídos ou não.

Os Protocolos de Comunicação devem seguir uma norma standard capaz de realizar a comunicação entre a aplicação e os sensores e a comunicação entre nós de sensores.

As tarefas genericamente designadas por Serviços têm como objectivo otimizar a performance do sistema e a eficiência da rede, através das tarefas descritas na figura 2.1.

A Aplicação é a parte de interface do utilizador com todo sistema. Este grupo de tarefas engloba o conjunto de funcionalidades que o sistema permite ao utilizador, tais como gestão da informação gerada, gestão de todos os constituintes da rede, configurações ou reconfigurações da mesma.

O grupo de tarefas Tecnologia de Sensores engloba todos os sensores utilizados, o tipo de sensores e a tecnologia distinta a estes associados.

2.3 - Sistema

A arquitectura do sistema é essencial para que a rede funcione correctamente e consiga uma boa optimização na utilização de todos os recursos [3]. A rede tem de ser organizada em nós, para que cada um destes possa ter a si ligado um ou mais sensores de um ou mais tipos. Também deverá conter uma unidade de processamento que seja capaz de gerir o estado do sistema. Por último, a rede também tem de conter uma interface com o utilizador.

Em [4] é apresentada uma possível organização de uma rede de sensores sem fios. A organização apresentada na figura 2.2 é o tipo de organização que garante mais versatilidade e modularidade ao sistema.

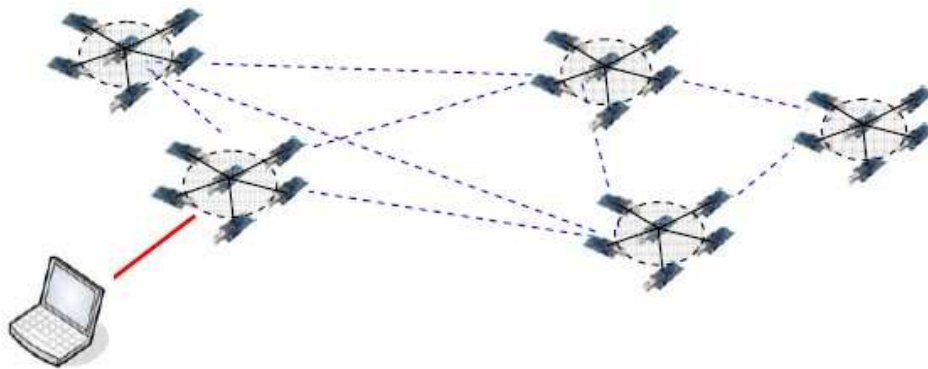


Figura 2.2- Organização de uma WSN sugerida por [4].

A figura 2.2 apresenta uma arquitectura típica de um sistema com elevado número de sensores.

Esta arquitectura de rede apresenta-se disposta por nós que tem a si ligados vários sensores, uma unidade central e uma aplicação que faz a interface do utilizador com a rede. A unidade central é responsável pela organização de histórico de dados, por processar todas as ordens da aplicação e todos os eventos da rede. Os nós comunicam via sem fios com os restantes nós e com a estação central. Relativamente aos sensores estes tanto podem estar ligados por fios com os nós, para uma maior facilidade de integração com a maioria dos sensores existentes para Engenharia Civil, ou então, estão ligados aos respectivos nós via sem fios, como em [4] é apresentado.

Cada nó precisa de saber a sua identidade e localização dos seus vizinhos para existir uma colaboração ao nível do processamento e armazenamento de dados, tendo em vista uma optimização energética.

Como está descrito em [1] a rede deve lidar com os recursos que se alteram dinamicamente, a energia, a largura de banda e a capacidade de processamento, para que autonomamente consiga otimizar estes recursos. Na arquitectura da rede também há que ter em conta factores como o tamanho da rede, a latência, a fiabilidade, a robustez e a densidade de nós.

Deve-se recordar que todos os elementos que constituem o sistema de monitorização devem ter a robustez suficiente para resistir as condições adversas do meio ambiente onde estão inseridos [4].

2.3.1 - Arquitectura

De acordo com [1][2] actualmente existem duas topologias de rede, a topologia rede planeada e a topologia rede *ad hoc*.

Na topologia rede planeada a distribuição, de todos ou parte, dos nós de sensores da rede é estática. Assim, á custa de uma menor flexibilidade torna-se menos dispendiosa a manutenção e o controlo de toda a rede.

A topologia rede *ad hoc* prevê que a distribuição de cada nó não seja fixa. Para redes *ad hoc* a topologia tem de ser construída em tempo real, ou seja, tem de ter capacidade de se actualizar periodicamente para que novos sensores sejam integrados ou a rede prescindir de sensores em mau funcionamento [5]. Desta forma os nós estão em permanente reconfiguração e necessitam de saber qual o encaminhamento a dar aos dados que cada um produz, para evitar risco de encravamento.

A topologia de rede *ad hoc* é mais indicado para ambiente de difíceis acesso e a redes com elevado número de nós (da ordem das dezenas ou centenas) e permite que a distribuição dos nós seja feita de forma aleatória.

A topologia de rede pré determinada é mais aconselhável para uma rede pequena pois é mais fácil implementar para poucos nós e o controlo do *jitter*, da latência e da detecção de falhas é mais eficaz.

Cada nó da rede não precisa de ter um conhecimento geral sobre a rede, apenas tem de se garantir que cada um interaccione apenas com os vizinhos. A juntar ao conhecimento da topologia, cada sensor precisa de saber a sua própria localização global ou relativa na rede. Para uma arquitectura de pequena dimensão os nós podem saber a sua posição e a de todos os nós da rede, mas o mais usual para redes de grande dimensão, é estes saberem a sua posição relativa. O facto de o nó saber a sua posição relativa, significa que este sabe a sua posição em relação aos nós mais próximos, denominados de nós vizinhos. Para garantir a existência de redundância na rede um nó terá de ter pelo menos 2 vizinhos, assim garante-se pelo menos uma alternativa no encaminhamento de dados caso um dos nós vizinhos falhe.

Os nós de sensores devem ter uma boa performance no processamento de sinal, na computação e na auto-configuração da rede para que se consiga ser escalável, ter robustez e ter longevidade na rede, como é referido em [6].

Contudo a aplicação que se pretende para o sistema e o ambiente que o envolve vão determinar o tamanho da rede, a arquitectura e a topologia da rede. Estes factores vão influenciar a energia consumida, a taxa de transmissão, a largura de banda, o processamento e o armazenamento de dados.

2.4 - Protocolos de Comunicações

Os protocolos de comunicações tem como função assegurar que as mensagens recebidas são correctamente interpretadas, para isso estas também necessitam de ser enviadas segundo a mesma sintaxe. Todos os protocolos devem ter um design internacionalizado e não necessitar da intervenção do utilizador [1].

Segundo o [2], para WSN o protocolo de comunicações consiste em cinco camadas de protocolos standard de transferência de pacotes: a camada aplicação, a camada transporte, a camada de rede, a camada de ligação de dados e a camada física. Neste sub-capítulo dá-se ênfase à camada de transporte, à camada de ligação de dados, à camada transporte e à camada física, sendo que a camada de aplicação será abordada no sub-capítulo Aplicação.

Na figura 2.3 apresenta-se uma comparação do modelo para WSN sugerido em [2], com o modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) norma publicada pelo ISO (*International Organization for Standardization*).

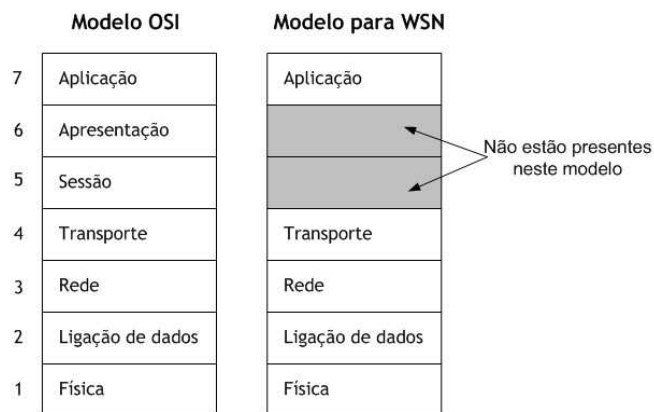


Figura 2.3 - Modelos de redes.

Pode-se verificar que a camada sessão e a camada apresentação não são incluídas nas redes WSN. Estas duas camadas são de pouca utilidade para a maioria das aplicações, e nas normas mais utilizadas para a estruturação de WSN são mesmo omitidas [7]. No modelo OSI a camada apresentação tem como função estruturar os dados das camadas inferiores, de forma que estes possam ser interpretados por dispositivos distintos. A camada Sessão permite que dois utilizadores em diferentes dispositivos estabeleçam uma sessão de comunicação entre si, esta camada também permite definir quem recebe e quem envia, sincronizar os dispositivos e gerir o tamanho dos pacotes. Como nas WSN se pretende simplificar as comunicações para minimizar a energia dispendida nas comunicações, estas duas camadas não fazem parte do modelo para as WSN.

2.4.1 - Camada Transporte

A camada transporte garante a fiabilidade e a qualidade dos dados de e para a camada superior. Nesta camada é realizada a fragmentação dos dados a enviar, construção dos dados recebidos, contém o mecanismo de controlo de tráfego na rede e um mecanismo de recuperação de pacotes. Durante a transferência de dados entre dois dispositivos, a camada transporte está também, incumbida de garantir a fiabilidade dos dados e a transparência dos mesmos, para a camada superior (a camada aplicação).

A transparência na transferência de dados é importante para garantir que qualquer dispositivo consiga interpretar a informação correctamente.

A recuperação de pacotes é um ponto crítico para WSN e pode originar o congestionamento ou a colisão de pacotes, e a memória dos nós pode mesmo chegar ao limite. Do ponto de vista energético a perda de pacotes também é crítica, pois quantos mais pacotes forem reenviados mais energia se despende.

Em [2] são sugeridos vários protocolos existentes para WSN que realizam as funções da camada de transporte. Estes diferenciam-se essencialmente conforme a arquitectura da rede.

Apesar de existirem protocolos da camada de transporte em [2] são descritos algumas questões que podem ser melhoradas, como o controlo de congestionamento na rede, a interacção entre camadas e equidade entre nós.

A camada transporte pode melhorar o seu funcionamento com as interacções entre camadas, nomeadamente na recepção de relatórios de erros da camada de rede e na escolha de melhores caminhos para retransmissões [2].

2.4.2 - Camada Rede

Esta camada lida com o encaminhamento dos dados através da rede e fornece às camadas superiores uma total independência dos sistemas de conexão, da transmissão e comutação de dados. Esta camada é também responsável pelo estabelecimento, manutenção e por terminar uma conexão

Conforme é descrito em [2] os protocolos de encaminhamento de pacotes para WSN diferem dos tradicionais protocolos de encaminhamento como por exemplo o IP (*Internet Protocol*) e o ARP (*Address Resolution Protocol*). Para redes WSN a camada de rede deve facilmente controlar a comunicação ao longo dos nós e a propagação de dados até a estação central. Para tal estes protocolos necessitam de ter uma estrutura por camadas para garantir as necessidades das WSN

É também importante que este protocolo leve em conta as restrições em termos de consumo de energia, largura de banda das comunicações, a memória e a capacidade de processamento. Contudo o protocolo desta camada deverá também abordar as questões de eficiência, tolerância de falhas, igualdade e segurança na rede.

Tal como nas outras camadas em [2] são descritos resumidamente alguns protocolos adaptados a WSN.

2.4.3 - Camada Ligação de Dados

A principal tarefa da camada ligação de dados é garantir a transmissão de informação entre dois nós, através da camada física. Uma vez que, para redes sem fios, o meio de transmissão é o mesmo para todos os nós, é necessário garantir que um e só um dispositivo comunica de cada vez. Assim existe a necessidade de haver um controlo do acesso ao meio e de uma gestão dos dados. O controlo de acesso ao meio é feito pelo protocolo MAC (*Medium Access Control*). Este protocolo deve garantir a transmissão sem erros, uma estrutura na sincronização, uma utilização da largura de banda, um controlo de fluxo, ser escalável e ter eficiência energética na transmissão de dados.

Em [1] e em [2] são brevemente apresentados alguns protocolos para a camada de ligação de dados de uma WSN. Estes diferentes protocolos têm a sua razão de ser, de acordo com os diferentes objectivos para os quais foram concebidos. Assim, existem protocolos orientados

para a poupança de energia, o controlo de erros, a sincronização temporal, o acesso ao canal, e ainda outras características específicas. Conforme a aplicação que se pretende para o sistema, a escolha do protocolo MAC tem de ser a que assegure a melhor performance do sistema.

2.4.4 - Camada Física

A camada física é a que se encarrega de transmitir os bits pelo canal de comunicação. Esta camada é responsável pela interacção com a camada MAC e pela definição de parâmetros como o tipo de modulação, a largura de banda e a arquitectura do transmissor rádio. Para cada uma destas características são sugeridos algumas soluções em [2] que tem como objectivo minimizar o consumo de energia. A importância da arquitectura do transmissor é muito importante pois pode condicionar bastante a performance das outras camadas.

O rádio é uma das partes de hardware que mais gasta energia e é fundamental otimizar o seu funcionamento. É sugerido em [2] que quanto mais curto for o acordar e mais suave for o arranque do rádio, menor é a quantidade de energia consumida. Em [6] são sugeridas duas técnicas que tentam otimizar o tempo de operação do rádio e a energia dispendida por este hardware.

Uma questão ainda relativa à camada física para WSN é sobre a utilização das antenas. Este assunto é discutido mais à frente no sub-capítulo Serviços, na secção Cobertura.

2.4.5 - Normas de Protocolos Sem Fios

Como as redes sem fios estão com forte desenvolvimento em várias áreas distintas foram criadas normas de protocolos de comunicações, com o objectivo normalizar as comunicações de redes sem fios. É importante referir que as normas aqui abordadas referem-se à camada de ligação de dados e à camada física, do modelo apresentado na figura 2.3. Cada norma apresentada define as funções e o conjunto de protocolos, da camada de ligação de dados e da camada física, necessárias para que os nós de sensores comuniquem com uma variedade de redes.

Para redes sem fios de sensores foram desenvolvidos normas standard, para aplicações mais genéricas, e protocolos proprietários que tem como objectivo satisfazer aplicações mais específicas. Os protocolos de WSN existentes têm como principal objectivo reduzir o consumo de energia gasto para transmitir dados.

Bluetooth

O standard *Bluetooth*, ou IEEE 802.15.1, opera na faixa centrada nos 2,45GHz. A última versão normalizada permite transferências até 3Mbps e está equipada com vários mecanismos de poupança de energia. O *Bluetooth* trabalha com *frequency hopping* para eliminar interferências na transferência de dados e para tal utiliza uma pilha protocolar complexa que necessita de 200Kbytes de memória [8]. Uma desvantagem do *Bluetooth* é que este tem um curto alcance, cerca de 10m.

ZigBee

ZigBee é um protocolo baseado na norma IEEE 802.15.4. Esta norma é uma solução que foi desenvolvida para redes sem fios de baixo custo, que tem como objectivos ter uma baixa taxa de transmissão de dados, uma bateria com longo tempo de vida e redes seguras. Uma rede *ZigBee* pode formar redes de malha conectando centenas de milhares de dispositivos juntos [2]. É uma boa solução para aplicações de monitorização de longa duração, pois segundo [2], com a mesma bateria pode funcionar por muitos anos.

Segundo [9], o *Zigbee* tem a vantagem de a pilha do protocolo ser de 4Kbytes ao contrário do *Bluetooth* que tem 32Kbytes. Este standard está optimizado para transferências de dados intermitentes, assim a energia total consumida é baixa se houver poucos dados a serem transmitidos para um longo período de tempo.

IEEE 802.11

É uma norma desenvolvida pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) que define as comunicações entre computadores para WLAN (*Wireless Local Area Network*). Esta família de 802.11 permite transferências de dados até cerca de 100m e é uma norma que gasta pouca energia por cada bit transferido, consultar tabela 3.1. Os standards desta norma operam centrados nas frequências 2,4GHz e 5GHz, mas os standards mais usados, IEEE802.11b e IEEE802.11g, operam na frequência 2,4GHz. Actualmente esta norma permite uma taxa máxima de transferência de dados até 54Mbit/s, contudo está previsto em 2009 o lançamento da IEEE802.11n que permitirá uma transferência máxima de 300Mbit/s.

A grande vantagem desta norma está no mecanismo de controlo de acesso ao meio (MAC). Este mecanismo consegue controlar o fluxo da rede, conter um bom método de detecção de erros e recuperação de dados.

Para WSN as vantagens apresentadas podem tornar-se num inconveniente pois para uma rede com uma baixa taxa de transferência de dados, onde estes mecanismos praticamente não são utilizados, e por isso gastam energia desnecessariamente.

Esta norma também é vulgarmente conhecida como *Wi-Fi*, no entanto um dispositivo só *Wi-Fi* é uma certificação da *Alliance* que garante que todos os dispositivos que sejam certificados como *Wi-Fi* trabalhem entre si correctamente, mesmo sendo de diferentes fabricantes. Em diante sempre que possível será usado o termo *Wi-Fi* em substituição, de IEEE802.11.

Wibree

O *Wibree* é uma tecnologia de comunicação sem fios concebida com objectivo de consumir pouca energia, ter um curto alcance e os dispositivos terem um baixo preço de custo. Permite uma taxa de transferência de dados até um 1 Mbit/s, tem um alcance máximo de 5 a 10 metros e opera na frequência 2,4GHz.

A tecnologia *Wibree* permite a comunicação entre pequenos dispositivos alimentados por bateria e dispositivos *Bluetooth*.

WirelessHART

Este standard foi concebido pela *HART Communication Foundation*, para processos de medida e para aplicações de controlo em sistemas de automação. Opera na frequência 2,4GHz e para ter baixo consumo energético este standard baseia-se na norma IEEE 802.15.4. Segundo [2] é um protocolo fiável, seguro, energeticamente eficiente e compatível com todas as ferramentas, dispositivos e sistemas da norma IEEE 802.15.4.

nanoNET

O protocolo *nanoNET* é um protocolo proprietário de comunicações rádio frequência que utiliza dispositivos com *transceivers* rádio de baixo consumo. Segundo [9], a tecnologia *nanoNET* é uma solução que trabalha centrado nos 2,4GHz, utiliza a técnica CSS (*Chirp Spread Spectrum*) utiliza uma pequena pilha protocolar, comparando com o protocolo *Zigbee*, este oferece uma maior taxa de transferência, uma maior fiabilidade e menor consumo de energia.

2.5 - Serviços

Tal como esta descrito na figura 3.1, funções como localização, a cobertura, o armazenamento de dados, a sincronização, a segurança e a agregação e compressão de dados são explorados como serviços das redes de sensores [2].

2.5.1 - Localização

A localização para WSN é importante pois facilmente se identifica a área danificada detectada pelos sensores do sistema.

Para uma rede com arquitectura pré estruturada, facilmente os nós sabem a sua posição, porque a posição de cada nó no sistema foi definida quando a rede foi projectada. Para redes *ad hoc* a localização de um nó na rede é mais complexo pois os restantes nós podem estar em constante mudança ou reconfiguração.

A juntar ao conhecimento da topologia, cada sensor precisa de saber a sua própria localização relativa na rede, para que as mensagens sejam encaminhadas para os seus nós vizinhos (em *unicast* e/ou *multicast*) em vez de serem difundidas na rede (*broadcast*). Ao saber a localização dos vizinhos pode-se adaptar a potência de transmissão, para o nível mais baixo que garanta a transmissão de dados. Estas duas configurações demonstram a importância, a nível energético, do conhecimento da posição de cada nó.

Em [2][6] são sugeridas alguns métodos de localização. O documento [6] apresenta um *case study*, de um sistema implementado com um encaminhamento de dados geográfico com o protocolo GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*).

2.5.2 - Abrangência

A cobertura da rede é um factor importante em termos de eficiência para WSN [2]. Tal como é descrito em [1] “*Also, for networks on the ground, RF transmission degrades with distance much faster than in free space, which means that communication distance and energy must be well managed.*” Isto é, a quando se dá o envio de dados num nó este deve avaliar a relação distância/energia para se optar pela solução óptima, que garanta a comunicação.

Numa rede não é necessário assegurar que todos os nós tenham comunicação assegurada com todos os outros nós. A utilização de técnicas *multi-hop* pode trazer vantagens a nível das comunicações para redes de grande dimensão.

O sistema *multi hop* é um mecanismo que permite que a rede esteja dividida por Pontos de Acesso (*Acess Point*). Cada Ponto de Acesso define uma área onde se tem vários nós ligados. Assim, se um nó de uma área pretender comunicar com o nó de outra área, essa comuni-

cação passa obrigatoriamente pelos Pontos de Acesso de cada uma das áreas. O ponto de acesso tem de ter uma arquitectura diferente dos restantes nós, pois tem de ter uma capacidade de controlo de tráfego que os nós não precisam de ter.

Para se poder retirar benefícios das técnicas *multi-hop* é necessário um mecanismo de localização eficiente e protocolos que incluam auto configuração e calibração dos nós (protocolos usados para redes com arquitecturas *ad hoc* [10]).

Com técnicas *multi-hop* melhora-se a eficiência na transmissão de sinal pois apenas é necessária energia para transmissão de sinal para o Ponto de Acesso e não para a unidade central [10].

A transmissão de dados também pode ser distribuída. Isto é com uma configuração correcta da camada de rede e da camada transporte o reenvio de dados pode ser feita por todos os nós. O mecanismo de encaminhamento de dados tem de ser eficiente para poder transmitir dados na rede, com o mínimo de energia dispendida.

Uma transmissão de dados em *muti-hop* ou distribuída, faz com que o sistema gaste energia. Mas para uma WSN a cobertura não é igual para todos os nós de sensores, isto é, depende da aplicação do sistema. O alcance de cada nó vai depender das condições físicas do ambiente de onde estiver instalado, do limite de potência admitido, da frequência usada para comunicar, arquitectura da antena e a redundância das comunicações.

Em Portugal existe imposição legislativa [11], para potência de transmissão para sistemas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), como é o caso. Assim existindo um limite legal para a potência de transmissão, é importante uma boa escolha na arquitectura das antenas. Em redes sem fio usualmente o tipo de arquitectura de antena é omnidireccional, embora para algumas situações as antenas direccionais também possam ser interessantes. Para as antenas omnidireccional a transmissão é difundida em todas as direcções, enquanto que para as antenas direccionais a transmissão é focalizada num pequeno feixe orientado.

Existindo limite legal para a potência de transmissão tem de se ter em conta que para a mesma potência de transmissão as antenas omnidireccionais tem menor alcance do que as antenas direccionais. Outra questão importante é que quanto maior for a potência utilizada para transmitir maior será a energia dispendida pelo sistema.

A redundância nas comunicações, também é um factor importante, pois com antenas omnidireccionais facilmente se alcança mais do que um nó, enquanto que nas antenas direccionais só se se tiver mais do que um nó no mesmo feixe se consegue redundância. Assim a melhor solução para a redundância são as antenas omnidireccionais.

O documento [11] também impõe restrições na gama de frequência a usar para este tipo de sistemas, sendo que para este tipo de sistemas normalmente é usado 2,4GHz.

É importante referir que a legislação das Telecomunicações diferem de país para país, portanto também é necessário validar a aplicabilidade da solução legalmente.

2.5.3 - Segurança

As redes devem ser protegidas contra intrusos para evitar que processos paralelos sejam processados na rede e prejudiquem o funcionamento normal do sistema. Estes intrusos podem provocar uma baixa latência que pode por em risco a sobrevivência da rede.

Em [1] refere que “Se o sensor for colocado em ambiente hostil as questões de segurança devem ser introduzidas no projecto e não devem ser deixadas para segundo plano.”. Mais uma vez dependendo da aplicação, tem de se assegurar o bom funcionamento do sistema.

No documento [6] são apresentados alguns protocolos de segurança para WSN. Estes protocolos tem de monitorizar, detectar e responder a ataques sem prejudicar o serviço normal da rede, para se ter uma WSN segura.

2.5.4 - Sincronização

Para redes de sensores sem fios a sincronização temporal é importante para o encaminhamento de pacotes e para precaver desperdício de energia com colisões e retransmissões [2].

A sincronização temporal global permite de uma forma programada, que os nós cooperem e troquem dados. Assim fica mais facilitada a programação dos períodos de tempo, em que parte do hardware é desligada para de poupança de energia.

A sincronização temporal pode-se tornar bastante complexa, dependendo da precisão que se pretenda na aplicação. Para algumas técnicas de medições é necessário uma sincronização temporal entre os nós de 1 μ s. Em [10][12] por exemplo são referidas necessidades da sincronização temporal entre todos nós para técnicas de medição acústica.

2.5.5 - Compressão e Agregação de Dados

A compressão e agregação de dados podem fazer aumentar a fiabilidade na transferência de dados reduzindo os seus custos [2]. Estas técnicas são mais indicadas para WSN onde a quantidade de dados a circular na rede é elevada.

A compressão de dados consiste numa redução dos dados a transmitir na rede, reduzindo o volume de dados também de reduz a energia gasta com a transmissão destes. A compressão é realizada antes do envio, a descompressão é realizada após a recepção. Quando se opta por um protocolo de compressão de dados é necessário ter em conta a importância dos dados, o volume de dados a circular na rede.

A agregação de dados consiste no agrupar de dados de vários dispositivos, durante uma transferência de dados, quando os dados passam por mais algum dispositivos além do emissor e receptor. A agregação de dados também deve ser feita por um nó de sensores, quando este junta a informação dos vários sensores que tem a jusante antes de transmitir dados.

Para WSN onde o envio de dados é feito para os nós vizinhos, os dados são reencaminhados sucessivamente até ao receptor, cada dispositivo que reencaminha os dados deve juntar os seus dados caso essa informação tenha como destino o mesmo receptor.

Para transmissão de dados *multi-hop* esta agregação de dados pode ser feita pelos Pontos de Acesso ou pelos nós como para o caso anterior.

É necessário garantir que esta agregação de dados é realizada apenas para mensagens onde seja útil o destinatário receber os dados adicionados a mensagem inicial, caso contrario é dispendida energia desnecessariamente.

Com estas duas técnicas pretende-se diminuir o tráfego da rede optimizando o tamanho dos pacotes transmitidos. Cada uma destas técnicas aborda a questão da energia, robustez, precisão, eficiência e a possibilidade de ser escalável [2].

Em [2] são apresentados protocolos para cada uma destas técnicas. Em [9] é apresentado um caso específico de aplicação da técnica de agregação de dados.

2.5.6 - Interacções entre Camadas

Para garantir que o bom funcionamento de cada camada seja o bom funcionamento do conjunto das camadas existe o protocolo de interacções entre camadas.

A interacções entre camadas aplicada em WSN é mais eficaz e eficiente energeticamente do que na aplicação tradicional constituída por camadas independentes. Com este mecanismo as interacções entre camadas tratam a pilha de protocolos como um sistema e não como camadas individuais. Assim, as camadas partilham as informações de controlo de cada uma, optimizando e melhorando o funcionamento do sistema como um todo, evitando redundâncias de actividades de controlo.

Um exemplo da vantagem das interacções entre camadas ocorre numa transferência de dados. O uso das interacções entre camadas permite que os dados adicionais de controlo sejam partilhados entre todas as camadas e faz com que estes dados de controlo a transferir seja minimizado em relação a abordagem tradicional por camadas com funcionamento independente. Reduzindo o número e o tamanho dos dados a transferir, implicitamente reduz-se o consumo de energia.

As interacções entre camadas fazem com que sejam partilhadas informações entre camadas. No documento [2] são propostas alguns protocolos que estabelecem troca de informações entre a camada ligação de dados, a camada física, a camada de rede e a camada de transporte.

2.5.7 - Optimização

Actualmente para minimização de energia há a possibilidade de por software desligar parte do hardware por intervalos de tempo e assim poupar energia, que após longos períodos de funcionamento se torna considerável. Existem vários métodos sugeridos em [6] que garantem o funcionamento da rede e dos nós mesmo com estes períodos de *stand-by*. Ao reduzir o tempo de funcionamento do hardware responsável pelas comunicações reduz-se o consume energético mas a latência da rede inevitavelmente aumenta.

A redução de tráfego de dados também traz benefícios em termos energéticos à rede, como está descrito em [13], o custo de processamento comparado a uma comunicação entre plataformas revela que 3000 instruções podem ser executadas para o mesmo custo, em termos de energia, que a transmissão de um bit a 100 m. É sugerido em [1][6] que os nós de sensores façam processamento de sinal localmente de modo a reduzir o tráfego das comunicações. Em [9] é realizada uma comparação do custo energético do envio de um bit face a 12m e 30m para vários protocolos de redes sem fios standard.

Tabela 2.1 - Relação energia/distância de comunicações sem fios, publicado em [9].

Communication standard	12 m distance	30 m distance	Max. Transfer rate
IEEE 802.11b (WLAN)	200 nJ/bit	300 nJ/bit	11 Mbps
BluetoothTM	2,5 μ J/bit	-	0,8 Mbps
Zigbee TM	7 μ J/bit	7 μ J/bit	20 to 250 kbps
Home-RF (example)	1 μ J/bit	2 μ J/bit	0.8 to 2 Mbps
nanoNET (CSS)	60 nJ/bit	80 nJ/bit	2 Mbps

Como é referido na Agregação de dados sugere-se que quando um nó recebe informação faça uma combinação e fusão com os seus dados e envie a informação. Desta forma aumenta-se o processamento mas consegue-se diminuir a energia gasta porque se enviam menos bits.

Em [9], é referido que para a maioria das aplicações de monitorização as comunicações com alcance de 10m a 30m são suficientes. Assim tal como é sugerido anteriormente não é necessário transmitir a distâncias superiores à distância do vizinho. Com isto reduz-se a potência de transmissão de dados. Para longos períodos de funcionamento esta redução permite uma grande poupança de energia.

2.6 - Aplicação de *Software*

A camada aplicação faz parte da aplicação de Software onde devem estar presentes a variedade de protocolos que são utilizados pelo utilizador. Aqui, através de um programa dedicado, é construída uma aplicação que realiza o interface do sistema com o utilizador. Contudo é necessário ter em conta que as funções de armazenamento e de recolha dos dados e as funções de apresentação de dados para o utilizador, devem estar totalmente separadas a nível de software, isto porque, sugere-se que o armazenamento e recolha de dados deve ser realizado por um e só um dispositivo, permitindo que possam existir múltiplos acessos aos mesmos dados em paralelo. Assim recomenda-se que a aplicação de software esteja separada em duas aplicações, a aplicação do utilizador e a aplicação de registo de dados.

A partir da aplicação do utilizador, o utilizador deve ser capaz de observar e perceber o comportamento do sistema, através de algum tratamento de dados realizado pela aplicação. Também deve ser possível configurar novos ensaios a realizar pelo sistema.

O estabelecimento da correlação entre os dados e a performance da estrutura deve ser baseada na perícia da interpretação dos dados por um especialista, [4]. Assim como o utilizador será um especialista na área, com a sua ajuda na concepção da aplicação de Software, é possível construir uma aplicação do utilizador mais intuitiva e capaz de realizar o tipo de análise pretendida. Também é importante referir que aplicação de Software deve ser o mais modular possível para casos onde o sistema não tenha uma só aplicação, pois a análise pode variar conforme a monitorização pretendida.

O registo dos dados tem como objectivos criar um histórico de todos os dados lidos pelos sensores, permitir ao utilizador saber a configuração da monitorização, a localização de cada dispositivo, e permitir o utilizador saber informações específicas sobre cada dispositivo. Existem vários SGBD (Sistemas de Gestão de Base De Dados) que permitem realizar este armazenamento de dados entre os quais o *PostgreSQL*, o *Microsoft Access* e o *MySQL*. Na escolha do SGBD a usar é necessário ter em conta parâmetros como a compatibilidade da BD (Base de Dados) com a aplicação de software, o volume de dados, o custo da licença de utilização da BD, entre outras.

As aplicações de *Software* podem ser construídas com vários programas que permitem ter um tipo de aplicação GUI (*Graphic User Interface*). O tipo de aplicação GUI é um tipo de interface que permite ao utilizador interagir com dispositivos electrónicos, através de um registo de dados elaborar gráficos, relatórios, análises *online* do estado do sistema e restantes funcionalidades pretendidas pelo utilizador.

Para a construção da aplicação de registo de dados existem diversas opções como: o *Lazarus*, o *Kylix*, o *Delphi*, o *Microsoft Visual Studio*, entre outros deste mesmo género, que per-

tencem ao género de programas IDE (*Integrated Development Environment*) que permitem gerar ficheiros executáveis; o *LabVIEW* que é um programa mais específico para área de instrumentação e automação; o *MATLAB* que permite um elevado poder de cálculo; entre outros.

Na escolha do programa para realizar a aplicação do utilizador é necessário ter em conta varias considerações, o tipo de cliente (*Thin Client* ou *Fat Client*), o custo da licença de utilização do software, a plataforma onde este irá correr, a linguagem de programação, o tipo de dados que se pretende avaliar, quais os programas com que irá interagir e o tipo de funcionalidades de interacção com a rede que se pretende. Para a elaboração desta interface tem-se a possibilidade da construção de um sítio na *Web* utilizando um browser como interface, bem como se pode optar pelo mesmo tipo de programas sugeridos para a aplicação de registo de dados. Apesar ser possível a aplicação de registo e a aplicação do utilizador ser construída com o mesmo tipo de programas estas devem ser separadas e funcionar independentemente uma da outra, pois as suas funcionalidades são bem distintas.

O tipo de cliente, *Thin Client* e *Fat Client*, são os dois tipos de cliente do modelo de software cliente-servidor. O modelo cliente-servidor descreve a relação entre dois *hosts*, o cliente e o servidor. A definição do tipo de cliente é importante pois aqui é definido onde a maior parte do processamento é realizado, e consequentemente toda a estrutura da aplicação. Se se pretende que a maioria do processamento seja realizada no servidor e o cliente tenha pouco ou nenhum software dedicado instalado tem-se um tipo de cliente *Thin Client*. No tipo de cliente *Fat Client*, tem-se que o processamento é maioritariamente processado no cliente e a comunicação com o servidor transfere dados de comunicação e dados para armazenamento.

Como exemplo de aplicações de software é apresentado em [14] uma aplicação desenvolvida para um browser da *Web*, em [12] uma aplicação de software realizada em *MATLAB*, e em [10] é exemplificada uma aplicação de software realizada em *LabVIEW*. As aplicações de software [10][12] são para WSN onde são utilizadas técnicas de emissão acústica, tal como é referido anteriormente, estas técnicas necessitam de uma capacidade de cálculo elevada.

2.7 - Nós de sensores

Para a construção de um nó de sensores é necessário ter em conta as diversas funcionalidades que este parâmetro tem de cumprir para assegurar o bom funcionamento da rede.

Um nó de sensores independentemente da arquitectura de rede, segundo [9], tem de ser capaz de adquirir todos os dados dos diferentes sensores, ter capacidade de armazenamento de informação, capacidade de análise de dados, trabalhar sincronizado com a rede, capacidade de receber e enviar informações de e para outros nós.

A interface entre o equipamento de aquisição e a unidade central tem de seguir um protocolo de comunicações normalizado e um modelo de cooperação que optimizem o funcionamento de toda a rede.

A comunicação entre um nó de sensores e os sensores não tem de ser necessariamente física, ou seja, um nó de sensores pode ter comunicação com os sensores segundo um protocolo de comunicações sem fios. Caso se opte por esta configuração é necessário ter em conta que este protocolo tem características diferentes por causa das diferentes necessidades em relação ao protocolo de comunicações com o dispositivo central da rede. Esta configuração

implica que a unidade sensor não seja apenas e só o sensor mas tenha pelo menos mais o dispositivo de comunicação.

Para a uma configuração dos sensores ligados com cabos aos nós de sensores em [9] é sugerida uma arquitectura para um nó de sensores, como esta presente na figura 2.4. Neste arquitectura tem-se uma unidade de rádio para transferir dados do nó para o dispositivo central. O CPU é responsável por processar os dados adquiridos pelo conversor AD e realizar a gestão do envio dos dados pelo rádio de modo a poupar o máximo de energia possível. Em [9] é descrito que para aquisição dos sinais de saída dos sensores um conversor AD é suficiente, pois estes estão optimizados para trabalhar com valores de baixa potência. Para estes dispositivos a frequência de aquisição e a amplitude da resolução (bits) têm mais influência na potência consumida no sistema do que o tipo de sensores propriamente dito.

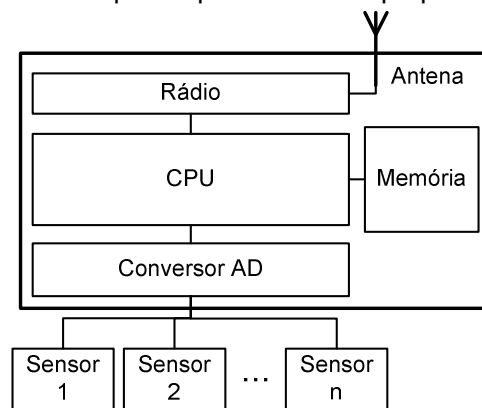


Figura 2.4 - Arquitectura de nós de sensores sugerido em [9].

É importante também referir que a frequência de aquisição e a frequência de leitura não tem de ser necessariamente a mesma. Isto é a frequência de aquisição é a frequência que o nó de sensores adquire os sinais oriundos dos sensores. A frequência de leitura é a frequência que o nó de sensores envia para a unidade central os dados de uma ou mais leituras. Assim deseja-se que o nó de sensores seja capaz de trabalhar com diferentes frequências de aquisição, programadas pelo utilizador ou pelo sistema, enquanto a frequência de leitura será definida pelo protocolo de rede.

2.8 - Sensores

Os avanços recentes nas técnicas de medição e a tecnologia de novos sensores tornaram-se num grande impulsionador para o desenvolvimento de redes sem fios de sensores.

As técnicas de medição acústica estão a ter cada vez mais relevância para análise do comportamento e o estado de uma estrutura. Esta técnica de medição é não evasiva, mas ao contrário de outros sensores necessita de uma boa capacidade de processamento.

Os novos sensores têm uma especial importância em aplicações de engenharia civil pois reduz fortemente o custo do sistema de monitorização. Os MEMS (*Microelectromechanical Systems*) são pequenos dispositivos integrados que combinam componentes eléctricos e mecânicos.

No que diz respeito a escolha de sensores tem de ter em conta as características da aplicação para se optar pela melhor escolha, tendo em conta que não se deve basear uma análise do estado duma estrutura numa unidade física ou num só sensor. Para estudar a saúde de uma estrutura é importante medir rotações, acelerações, deslocamentos, extensões e a tem-

peratura, também é importante a temperatura e humidade do ambiente onde a estrutura se encontra. A confiança de um sistema de monitorização é razoavelmente melhor quando há uma combinação da informação obtida em nós diferentes, como é referido em [4].

Para monitorizações prolongadas deve-se optar por sensores passivos como os sensores piezoelétricos [9]. Para monitorizações de curtos períodos de tempo tem-se uma maior liberdade de escolha, podendo-se optar por sensores activos, mas mesmo assim deve-se ter em conta que o sistema de monitorização é fortemente dependente da energia consumida.

Para WSN consegue-se integrar praticamente todo o tipo de sensores, apenas os sensores com frequência de amostragem superior a 100 mil amostras por segundo não são recomendados por razões energéticas, conforme o documento [9]. Assim, para aquisições com técnicas de emissões acústicas tem de ser tomada uma escolha de compromisso, por causa da limitação da frequência de amostragem para WSN.

2.8.1 - MEMS (*Microelectromechanical Systems*)

Os MEMS são sensores activos com baixo consumo de energia, e na sua maioria já têm integrado o circuito de condicionamento de sinal. Estes sensores podem sentir, medir e adquirir informação do ambiente e realizar algum processamento. Actualmente os MEMS não substituem todo o tipo de sensores. Os MEMS existentes são acelerómetros, inclinómetros e giroscópios. Dependendo das suas características estes sensores podem ser produzidos a custos desde 3,5\$ a 12\$, valores muito inferior ao custo dos sensores actuais. Esta diferença de preço torna o sistema de monitorização mais competitivo e viável para aplicação num grande número de estruturas.

Os sistemas de monitorização com MEMS têm diversas vantagens relativamente a sistemas com sensores convencionais. Em [10] são apresentadas algumas desvantagens dos sistemas convencionais como o excesso de tempo de instalação face ao período de medida, a cablagem necessária para ligar todos os sensores, a sua pouca versatilidade, porque apenas podem ser instalados em algumas estruturas e o custo muito elevado da monitorização. Em algumas situações o custo de instalação de um sistema de monitorização convencional numa infraestrutura pré existente, pode ser da escala do custo da construção de uma nova infraestrutura que substitua a que se pretende avaliar.

Ao ser introduzido um protocolo de comunicação sem fios entre nós da rede e/ou entre sensores e nós elimina-se a cablagem necessária para comunicações. Assim aumenta-se a versatilidade do sistema e a capacidade de adaptação ao mais variado tipo de aplicações.

Um inconveniente continua a ser a alimentação dos sensores e dos nós de sensores, pois esta também é realizada por cabos. Dependendo da aplicação pode-se optar por uma fonte de alimentação baseada em energias renováveis para sistemas com longos períodos de monitorização ou optar por baterias para sistemas com curtos períodos de monitorização. Também deve ser alvo de estudo a relação distribuição/fonte de energia, isto é, deve ser estudado, para o caso de aplicação específica, se vale a pena ter uma fonte de alimentação para cada um dos componentes do sistema ou se mais vale distribuir a energia entre os vários componentes.

Apesar de num futuro próximo os MEMS irem substituir os sensores actuais, estes ainda não satisfazem todas as necessidades, pelo que desta forma o sistema tem de integrar também os actuais sensores. Espera-se que num futuro próximo os MEMS contenham internamente modos de dormida ou de baixo funcionamento com rápidas transições de estado, [9].

2.9 - Conclusões

Neste capítulo são apresentadas, baseadas em estudos recentes, as diversas áreas que envolvem a constituição de um sistema de uma rede de instrumentação sem fios.

Sobre a arquitectura do sistema terá de ser tomada uma das opções apresentadas, arquitectura pré estruturada ou *ad hoc*. Esta escolha irá condicionar todas as opções tomadas em diante.

O modelo em camadas para WSN apresentado será usado no capítulo seguinte e algumas considerações relativas a cada camada são importantes. Contudo optou-se, para a utilização de uma das normas *standard* discutidas apresentadas para a camada física e para a camada de ligação de dados. Apesar da escolha da norma *standard* tem de se assegurar os serviços que garantam a operacionalidade da rede.

A arquitectura dos nós de sensores, seguida terá como base a arquitectura sugerida em [9][18] pois a função dos nós de sensores para o sistema que irá ser desenvolvido é semelhante a apresentada nestes artigos.

A apresentação dos dados da monitorização realizada por este sistema será suportada pela aplicação do utilizador a ser desenvolvida, esta aplicação terá de permitir um acesso remoto ao dispositivo que gere a interface com a rede.

O dispositivo que gere os nós de sensores é também responsável por garantir o normal funcionamento da rede e é o dispositivo por onde tem de passar a comunicação da rede WSN com um acesso remoto.

A Base de Dados do sistema de monitorização independentemente do SGBD tem de garantir a integridade dos dados, suportando todas as funções que o sistema implementa.

No sistema apresentado no capítulo seguinte foi discutida a utilização da mais recente tecnologia de sensores, os MEMS, juntamente com a tecnologia de sensores convencionais utilizados em sistemas de monitorização de estruturas. Desta forma garante-se a integração de novos sensores com os sensores já existentes.

Capítulo 3

Projecto do Sistema

3.1 - Introdução

Neste capítulo é feita uma breve apresentação do projecto do sistema construído. Nos sub-capítulos seguintes, é feita com maior pormenor, à discussão acerca das escolhas realizadas para este sistema. As escolhas são apresentadas por níveis, onde cada nível é constituído por um ou mais dispositivos responsáveis por um conjunto de funções. Em primeiro lugar é apresentada a arquitectura do sistema onde é definido o objectivo da rede e todas as funcionalidades que se pretende que possua. De seguida são apresentados os sensores escolhidos para o sistema. No sub-capítulo seguinte é apresentada a constituição dos nós de sensores e todas as funções pelas quais estes são responsáveis. De seguida será descrita as funcionalidades da unidade central. Por fim será apresentada a aplicação de software responsável pela interface com o utilizador.

3.2 - Arquitectura do Sistema

Neste subcapítulo inicialmente é realizada uma análise de requisitos para o protótipo a construir, antes de se avançar com as características do sistema projectado.

3.2.1 - Requisitos

Com o sistema a implementar neste trabalho pretende-se construir uma rede sem fios de instrumentação que seja capaz de monitorizar uma infra-estrutura de engenharia civil. O sistema deve estar preparado para ser instalado de forma rápida, ser modular para se adequar a diferentes infra-estruturas.

O sistema a conceber tem de ser capaz de realizar a monitorização em curtos períodos de tempo, isto é, monitorizar ensaios realizados em estruturas com duração de 2 ou 3 dias.

A rede de comunicações sem fios deve permitir que ao serem inseridos nós de sensores na rede, esta se ajuste automaticamente e que o funcionamento da rede se mantenha, não permitindo quebras de funcionamento da rede de comunicações.

As funções da camada física, da camada ligação de dados, da camada de rede e da camada transporte tem de ser asseguradas por todos os elementos que constituem a rede de comunicações.

Deve ser possível remotamente aceder ao sistema de monitorização e proceder a alterações de configuração sem ser necessário intervenção humana no local da monitorização.

Os nós de sensores devem permitir que se possa adquirir dados de sensores que actualmente são utilizados nos sistemas de monitorização actuais e sensores de tecnologia recente como os MEMS.

Os sinais de saída dos sensores são DC, assim o equipamento de aquisição mais adequado será um conversor analógico digital. Este tem de ser capaz de medir todos os sensores a si ligados com a frequência que se pretender e com a resolução suficiente para medir cada sensor.

Os nós de sensores devem ser capazes de ter algum processamento de dados, isto é, tem de ser capazes de processar os dados adquiridos oriundos dos sensores, processar o protocolo de comunicações da rede sem fios de modo a realizarem as funcionalidades que se pretende localmente.

Nos nós de sensores deve ser possível ajustar a frequência de leitura aos sensores a si ligados e a frequência que o utilizador pretender para o ensaio efectuado.

No protótipo deve constar uma Base de Dados onde todos os valores adquiridos pelos sensores são inseridos.

Deve ser possível visualizar os valores adquiridos pelos sensores *online*, isto é, à medida que os dados são adquiridos pelos nós de sensores estes devem ser introduzidos na Base de Dados no mais curto espaço de tempo. De referir que não existe um requisito temporal neste período de tempo, é necessário garantir que os dados desde o momento que são adquiridos até ao momento que são inseridos na Base de Dados não ultrapassem os 60 segundos.

A representação gráfica e através de tabelas também é um requisito pois facilita a leitura dos mesmos.

3.2.2 - Arquitectura

A arquitectura de rede implementada está dividida por níveis tal como está presente na figura 3.1. Cada nível tem um conjunto de dispositivos responsável por realizar um conjunto de funções explicadas com maior pormenor em detalhe nos sub-capítulos seguintes.

Pretende-se com este sistema ter uma solução modular, isto é, que consiga monitorizar qualquer estrutura de forma prática e sem processos demorados de instalação. Assim, independentemente da aplicação, os diversos dispositivos apresentados na figura 3.1, estão distribuídos pela estrutura conforme o tipo de monitorização pretendido, sem ser necessária uma mudança na arquitectura da rede.

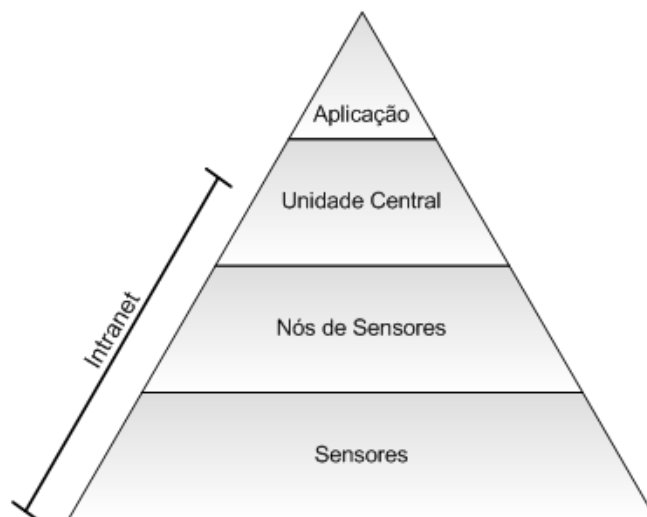


Figura 3.1 - Estrutura da rede.

Para este sistema tem-se uma arquitectura de rede *ad hoc* que permite ter uma maior facilidade na integração de novos nós ou em reconfigurações de toda a rede. A quantidade de nós de sensores não deve ser relevante, na medida em que como se tem uma rede *ad hoc* o sistema consegue-se adaptar facilmente a novas configurações.

O modelo de comunicações é o modelo TCP/IP. Este é constituído por cinco camadas, que tal como o modelo para WSN, sugerido na figura 2.3, são: a camada aplicação, a camada transporte, a camada de rede, a camada de ligação de dados e a camada física.

O sistema é constituído por quatro níveis responsáveis por distintas funções. Cada um dos níveis intermédios é responsável pela ligação dos níveis superiores e inferiores. Desta forma tem-se um sistema com controlo distribuído.

A *intranet* presente na figura 3.1 é uma rede de instrumentação, onde através da instrumentação realizada com os sensores é possível monitorizar as infra-estruturas que se pretende. Na *intranet* é que se encontra toda a actividade relacionada com a aquisição dos dados oriundos dos sensores. O acesso à *intranet* é realizada através da aplicação de interface com o utilizador que tem acesso via *internet* com a unidade central. Na *intranet* todo o sistema opera sem ser necessária intervenção humana depois de instalação realizada.

A unidade central juntamente com os nós de sensores é responsável pelo controlo de toda a *intranet*. No capítulo 2 do estado da arte é sugerido que o protocolo da camada transporte deve ser gerido pela unidade central, isto porque a unidade central, vai conter uma elevada capacidade de processamento, armazenamento e energia suficiente para comunicar com todos os nós da rede. Contudo, esta solução é mais dispendiosa em termos energéticos, em comparação com de modo que a gestão da camada transporte é partilhada pela unidade central e pelos nós de sensores.

A aplicação do utilizador para esta aplicação deve ser do tipo *Fat Client* pois consulta a BD presente no servidor e processa-os no computador do cliente. Desta forma garante-se que não são realizadas operações sobre a BD que violem a integridade dos dados. A BD deve ser instalada num servidor, remoto ou local, e tem como objectivo criar um histórico de leituras.

A sugestão do capítulo 2 foi seguida, e assim no sistema tem-se que a frequência de aquisição é diferente da frequência de leitura. No entanto, importa referir que mesmo com a diferença de frequências a rede tem que permitir que os dados sejam guardados na BD passado pouco tempo.

Como os ambientes de obra de estrutura são hostis à electrónica, deve-se proteger todos os dispositivos com uma protecção bem afixada e que não sobressalte no campo de vista a presença do equipamento para que não haja extravio do mesmo.

Para um maior pormenor e para a solução protótipo que se pretende implementar foi realizado o diagrama presente na figura 3.2. Aqui é possível visualizar de uma forma clara a solução protótipo que foi implementada para cumprir os objectivos inicialmente pretendidos.

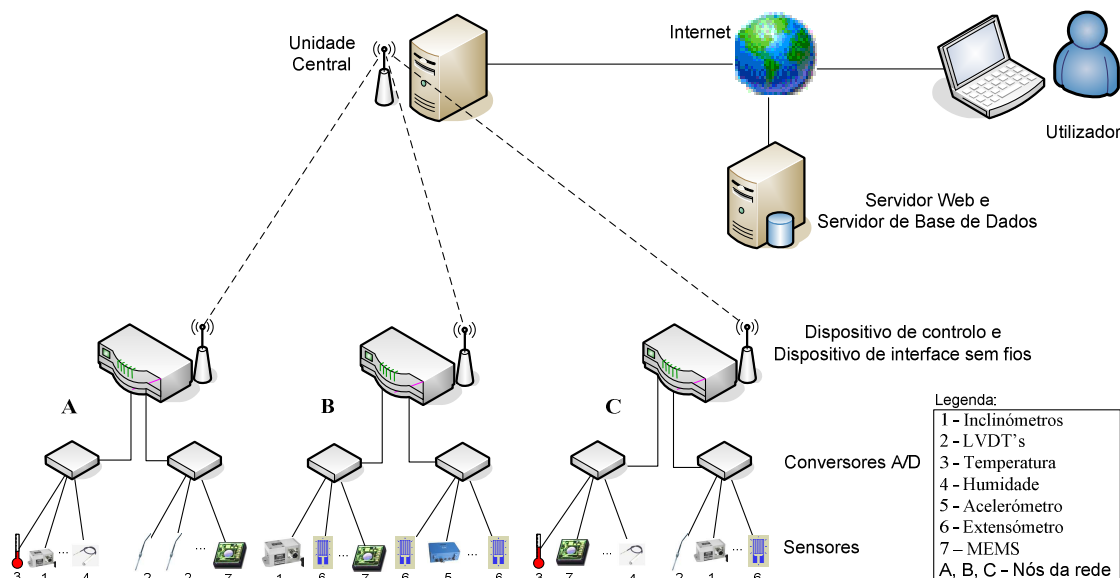


Figura 3.2 - Arquitectura do protótipo.¹

A solução protótipo apresenta uma unidade central, três nós de sensores e um variado número de sensores de vários tipos.

A aplicação referida na figura 3.1 é a aplicação do utilizador que permite ao utilizador visualizar e analisar os dados, em *online*, que estão a ser adquiridos pelo sistema. Esta realiza uma comunicação com a unidade central.

O sistema contém um dispositivo central onde é possível administrar por acesso remoto a intranet, através de uma aplicação de registo de dados. A unidade central é constituída por um computador que não exige elevados requisitos a nível de hardware. A única particularidade está no facto de necessitar de dois hardwares de rede, um para comunicar com a *intranet*, outro para estabelecer a comunicação à *internet*. O sistema operativo é o *Windows XP* pois os programas de desenvolvimento de *software* apenas eram suportados por este sistema operativo. Contudo a unidade central não necessita de ter o sistema operativo *Windows XP*, pois tal como é referido mais a frente todas as soluções a nível de aplicação de *software* são suportadas por mais que um sistema operativo. A unidade central tem uma ligação à *internet* e um acesso à *intranet*, e estas ligações são distintas. Aplicação de registo de dados presente na unidade central tem de ser capaz de registar na BD as medições realizadas pelos sensores e permitir reconfigurações da rede.

A BD contém o registo das leituras efectuadas por cada sensor, e dados relativos à constituição da rede. A ligação remota à rede, através da aplicação do utilizador, permite uma monitorização com a representação dos dados de cada sensor e também permite uma confi-

¹ É possível visualizar o esquema com maiores dimensões no anexo A.

guração e/ou reconfiguração do sistema. Entende-se por configuração do sistema a definição do tipo de sensores da rede, quais os sensores que estão ligados a que nós, quais os nós presentes na rede, qual é a configuração de cada nó, a possibilidade de definição da localização de todos os nós e sensores, a frequência de leitura e a frequência de aquisição de cada sensor.

A gama de sensores neste sistema foi definida juntamente com DEC (Departamento de Engenharia Civil). Dentro dos sensores utilizados tem-se MEMS e sensores convencionais usualmente utilizados pelo DEC para monitorização em estruturas.

As grandezas que se pretende medir com os MEMS são acelerações, rotações e temperatura, isto porque actualmente ainda não existem no mercado com o mesmo nível de desenvolvimento, MEMS capazes de medir outras grandezas físicas. Os sensores convencionais servirão para medir grandezas como a humidade relativa, as extensões, os deslocamentos e ainda as rotações, as acelerações e a temperatura. Numa fase inicial tem-se MEMS e sensores convencionais a medir a mesma grandeza para validar os valores medidos pelos MEMS.

Os nós de sensores tem uma arquitectura modular, que permite ser alterada conforme a configuração que se pretende. A arquitectura típica dos nós de sensores contempla um conversor AD, um dispositivo de controlo que realiza a interface dos conversores AD com o dispositivo de a rede sem fios cumprindo o protocolo de comunicações TCP/IP. O dispositivo que realiza a interface é responsável pela a gestão da informação do nó de sensores.

Com a escolha do componente que será responsável pela transmissão de dados de cada nó via sem fios, terá de ser realizada uma análise sobre o equipamento, onde terá de se perceber qual a capacidade de transmissão deste, e se necessário proceder a alterações. Estas alterações podem passar pela substituição das antenas omnidireccionais por antenas direccionais ou a colocação de um amplificador de ganho, sem que o limite permitido por lei seja ultrapassado.

Neste sistema tem-se a possibilidade de escolher o volume de dados a adquirir por todo o sistema de monitorização. A versatilidade da rede possibilita a monitorização de qualquer parte da estrutura conforme se pretenda, isto é, consegue-se monitorizar a estrutura em qualquer ponto com os sensores necessários. Interessa referir que a importância que a variedade de sensores que se pode utilizar tem. É possível e interessa ter a maior variedade possível de grandezas físicas adquiridas para uma avaliação correcta do estado da estrutura.

Os nós de sensores para este sistema têm dois tipos de ligações distintos. Os sensores têm ligação física ao nó de sensores por cabo, onde é transmitido o sinal adquirido pelo sensor. A comunicação entre os nós de sensores e a unidade central é realizada via sem fios, onde os dados são enviados segundo o protocolo de comunicações escolhido, o TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*).

O equipamento de aquisição escolhido foi um conversor AD com capacidade de processamento associada, a qual permite fazer um processamento local dos dados tal como é sugerido nos *papers* referidos no capítulo do estado da arte.

Relativamente a alimentação de todos os componentes pode tornar-se vantajoso integrar alguns elementos dos nós, por exemplo utilizar a mesma alimentação para o nó e para os sensores a si ligados. Caso não seja possível integrar estas alimentações sugere-se que os sensores que estejam próximos partilhem uma alimentação local ou tenham mesmo uma alimentação própria.

3.3 - Nível de Sensores

Os sensores e os MEMS seleccionados em conjunto com o DEC, visam obter a informação habitual para a monitorização de estruturas de grande dimensão e visam medir parâmetros de temperatura, humidade, extensões, rotações, acelerações e deslocamentos. Os sensores convencionais seleccionados fazem parte do laboratório do DEC, ou seja, são parte dos sensores que são utilizados em Engenharia Civil em todo o tipo de testes. A tabela 3.1 apresenta os sensores convencionais seleccionados e as suas características mais importantes.

Tabela 3.1 - Lista de sensores escolhidos.

	LVDT		Inclinómetro	Temperatura	Extensómetro	Humidade
Referência	MONITRAN	RDP - DCTH	LSOC 1L	NTC	Vishay 250UW	HIH-4000-00
Sinal de saída	<i>Single Ended</i>	Diferencial	<i>Single Ended</i>	Diferencial	Diferencial	<i>Single Ended</i>
Alimentação	[10 , 30] V	[6 , 18] V	24 Vdc	5 Vdc	5 Vdc	[4,0 , 5,8] V
Gama de medida	[0 , 5] cm	[0 , 10] cm	$\pm 1^\circ$	[0 , 55] °C	$R^{(2)} \pm 3,0\%$	[0 , 100] %
Sensibilidade	0,32mA/mm	50mV/mm	8 mA/°	- ⁽³⁾	0,012R ⁽²⁾ Ω/V	33 mV/%
Circuito de Condicionamento	Conversor Corrente - Tensão	Circuito somador	Conversor Corrente - Tensão	Ponte de Wheatstone	Ponte de Wheatstone	Buffer
Testes iniciais	Laboratório	Laboratório	Laboratório	Forno DEC	Laboratório	Forno DEC

Os sinais de saída de cada um destes instrumentos de medida é muito díspar pelo que foi necessário homogeneizar os respectivos sinais através de circuitos de condicionamento de sinal de forma que os sinais estejam dentro da gama de entrada admissível pelo conversor AD.

Como o sistema contempla sensores convencionais e MEMS, também foi necessário definir quais os MEMS existentes no mercado que satisfizessem os requisitos pretendidos pelo DEC para medir grandezas como a rotações, acelerações. Na tabela 3.2 são apresentadas as características mais importantes dos MEMS seleccionados.

Os dados obtidos com os MEMS seleccionados tem como termo de comparação os sensores convencionais que meçam a mesma grandeza para que se consiga validar os valores medidos pelos MEMS.

² R é a resistência do extensómetro, que pode ter valor diferente para a mesma referência.

³ Informação fornecida pelo DEC inconclusiva.

Tabela 3.2 - Lista de MEMS escolhidos.

	Acelerómetro / Inclinómetro	Acelerómetro	Acelerómetro
Referência	ADIS16201	ADXL330	ADXL203
Sinal de saída	via SPI	3 <i>Single Ended</i>	2 <i>Single Ended</i>
Alimentação	[3,0 , 3,6] V	[1,8 , 3,6] V	[3,0 , 6,0] V
Gama de medida	$\pm 1,7g$	$\pm 3g$	$\pm 1,7g$
Sensibilidade	0.10 ° /LSB	300 mV/g	1000 mV/g
Número de Eixos	2	3	2
Testes iniciais	Laboratório	Laboratório	Laboratório

3.3.1 - Circuitos de Condicionamento

Como é possível verificar na tabela anterior, as grandezas e os valores assumidos pelos diferentes sensores exige a criação de circuitos auxiliares que permitam a aquisição normalizada de dados pelo conversor AD.

Para a gama de sensores seleccionada tem-se 4 circuitos diferentes, circuito somador, circuito Ponte de *Wheatstone*, Conversor Corrente-Tensão e um circuito Buffer.

O circuito somador a ser aplicado a saída do LVDT RDP-DCTH serve para somar um sinal DC de 2,5V para que a saída do LVDT passe de [-2,5 , 2,5]V para [0,0 , 5,0]V.

O circuito da ponte de *Wheatstone* é um circuito típico para medir variações de resistência. Neste sistema este circuito é aplicado para os sensores resistivos como os extensómetros e sensor de temperatura, é importante referir que as resistências constantes da ponte variam com a resistência do sensor.

O conversor corrente-tensão é um circuito simples de electrónica, uma resistência e um amplificador operacional, que serve para converter a saída dos sensores de corrente para a gama de tensão de entrada do conversor. Assim, com uma resistência de 220 Ω , as variações de corrente de [4 , 20]mA são convertidas em [0,88 , 4,4]V de forma a ser possível medir as variações do sensor pelo conversor AD.

O circuito do *buffer* apenas serve para isolar o sensor do circuito de aquisição, de modo a que caso haja algum problema com o sensor, como por exemplo uma sobre tensão ou uma sobre intensidade, este não se propague e danifique o resto do circuito. Em circuitos em que esse isolamento não seja garantido, foi incluído um *buffer* antes de se ligar ao conversor AD.

3.3.2 - Teste de Calibração

Para cada tipo de sensor foi necessário realizar um teste de calibração intermédio para garantir que os valores emitidos por cada sensor fossem os pretendidos. Os testes, realizados com os sensores que tem a sua saída que não esteja de acordo com a entrada dos conversores AD, foram realizados já com o circuito de condicionamento de sinal ligado à saída dos sensores.

Assim para os sensores de temperatura e para os sensores de humidade foi utilizada uma câmara existente no laboratório Norte do DEC, que permite regular a temperatura e a humidade no seu interior.

Para os extensómetros seleccionados foi desenhada uma pequena experiência com uma barra de aço em que à medida que se controlava a deformação desta, avaliava-se a deformação no extensómetro pelo seu sinal de saída.

Os LVDT's com o respectivo circuito de condicionamento foram sujeitos a deslocamentos e verificada a sua consistência com os sinais de saída do circuito.

Para os inclinómetros foi realizada um teste com ajuda de uma barra com inclinação regulável. Neste teste à medida em que se regulava a inclinação, era feita a validação dos valores comparativamente com os valores de inclinação real.

Com os MEMS também se realizaram pequenas experiências em laboratório, que consistiam em colocar os MEMS acelerómetros fixos a uma superfície e conforme os impactos verificar o seu sinal de saída.

Contudo convém referir que apesar dos testes realizados servirem para compreender o funcionamento dos sensores os resultados dos mesmos testes não foram validados, pois estes sensores estão em boas condições.

3.4 - Nível Nós de Sensores

Neste sub-capítulo é apresentada a constituição dos nós de sensores e as razões que levaram a ser tomadas as decisões relativas a arquitectura do nó de sensores, tendo como objectivo aplicação do sistema.

Com a variedade de sensores admitidos é fundamental escolher um conversor AD que seja capaz de adquirir adequadamente os sinais à saída de cada sensor.

Neste sub-capítulo também é feita uma apresentação do dispositivo de interface do nó com a rede sem fios, a *WiPort*. O equipamento *WiPort*, juntamente com a unidade central, é responsável pelo controlo do tráfego da rede, isto é, suporta todas as funções da camada transporte.

Por existir uma incompatibilidade de protocolos entre o conversor AD e o dispositivo de interface sem fios, foi necessário introduzir o equipamento que permitisse uma conversão do protocolo *RS-232C* em *SPI* e vice-versa.

3.4.1 - Escolha do Conversor AD

A escolha do conversor A/D para adquirir adequadamente os sinais emitidos pelos sensores, foi baseada na avaliação das características mais importantes para esta aplicação. Assim foram tidas em conta características como a frequência de aquisição, o número de bits de conversão, o número de entradas, a capacidade de processamento, a relação sinal/ruído, potência consumida e o custo do integrado.

O conversor A/D escolhido tem de ser capaz de converter sinais diferenciais ou *single-ended*, oriundos dos sensores ou dos circuitos de condicionamento destes. Também foi colocado um requisito pelo DEC na frequência de aquisição, em que o sistema tinha de conseguir adquirir sinais de cada sensor com pelo menos a frequência de 100Hz. Isto é, o conversor tem de conseguir satisfazer a equação:

$$n_{\text{entradas}} \times 100\text{Hz} \geq f_{\text{amostragem}}, \quad (3.1)$$

onde, n_{entradas} é o número de entradas e $f_{\text{amostragem}}$ é a frequência que o conversor gera um resultado.

Após uma análise de soluções disponíveis no mercado fez-se uma selecção de dispositivos, presente na tabela 3.3, que podem cumprir as funções que o conversor AD tem de cumprir. É importante referir que a lista de conversores AD realizada, contempla conversores com capacidade de processamento associada e com interface standard, pois este tipo de equipamento aumenta as potencialidades da conversão e do tratamento de dados sem por isso aumentar o custo do equipamento.

Tabela 3.3 - Lista de conversores AD analisados.

Referência	Resolução [bits]	Taxa de amostragem	Entradas do conversor A/D	Potência Consumida [mW]	SNR [dB]	Preço
CS5524	24	606 Sps	4	9	- ⁽⁴⁾	\$9,21
CS5528	24	606 Sps	8	9	- ⁽⁴⁾	\$11,37
AD7718	24	1,365 kSps	10	8,75	126	\$6.78
AD7739	24	15,1 kSps	8	100	- ⁽⁴⁾	\$8.42
MAX11040	24	64 kSps	4	132	- ⁽⁴⁾	- ⁽⁵⁾
ADS1217	24	780 Sps	8	0,8	- ⁽⁴⁾	\$ 6,25
ADS1218	24	780 Sps	8	0,8	- ⁽⁴⁾	\$ 7,40
ADS1216	24	780 Sps	8	0,6	- ⁽⁴⁾	\$ 6,25
ADS1256	24	30 kSps	8	36	- ⁽⁴⁾	\$ 9,30
ADS1258	24	125 kSps	16	42	- ⁽⁴⁾	\$ 10,65
ADS1278	24	126 kSps	8	530	111	\$ 29,95

A frequência de aquisição pretendida pelo DEC faz com alguns destes dispositivos não possam ser seleccionados, porque não cumpre a equação (3.1). Tem-se o caso dos dispositivos ADS1216, ADS1217, ADS1218 e CS5528, que despendem muito pouca energia e poderiam ser uma boa solução mas não cumprem o requisito imposto pela equação (3.1). Caso se optasse por esta solução, no futuro não haveria espaço para medições com frequência mais elevada, como por exemplo, a aquisição de sinal de sensores de emissão acústica.

Outra característica importante na escolha de um conversor é o número de bits de conversão. Para a escolha do número de bits é necessário calcular para cada sensor o número de medidas que se pretende.

Segundo [20], o cálculo do número de bits necessários para os sinais de entrada é baseado nas seguintes equações.

$$Dynamic\ Range(DR) = \frac{Measurement\ range}{Resolution} \quad (3.2)$$

$$V_{ir} = (2^n - 1)q \cong 2^n q \text{ (V)} , \quad (3.3)$$

onde V_{ir} é a gama de entrada em tensão, q a quantificação e n o número de bits.

⁴ - Não existem dados sobre a relação SNR deste componente.

⁵ - Não está disponível o preço deste componente.

$$DR = \frac{V_{ir}}{q} \Leftrightarrow q = \frac{V_{ir}}{DR} (V / dB) \quad (3.4)$$

Equação (3.2) fica:

$$DR = 20 \log \left(\frac{V_{IR}}{q} \right) = 20 \log(2^n) \cong 6n \text{ (dB)} \quad (3.5)$$

Tabela 3.4 - Resolução de cada sensor.

Sensor	Gama de Medida	Resolução mínima	Sensibilidade	Vir	DR [dB]	q [V/dB]	Número de Medidas	Número de bits mínimo
RDP - DCTH	[0 , 10] cm	0,1mm	50 mV/mm	5 V	60,00	0,083	1000	10
MONITRAN	[0 , 5] cm	0,1mm	70,4 mV/mm	3,52 V	53,98	0,065	500	9
LSOC 1L	$\pm 1^\circ$	0,0001rad	1,76 V/°	3,52 V	56,89	0,062	700	10
NTC	[0 , 55] °C	0,1°C	-(6)	-	-	-	-	-
Vishay 250UW	$R^{(7)} \pm 3,0\%$	0,001%	0,012R ⁽⁷⁾ Ω/V	36,94mV	46,65	0,792	215	8
HIH-4000-001	[0 , 100] %	0,1%	33 mV/%	3,5 V	60,00	0,055	1000	10
ADXL330	$\pm 3g$	0,001g	300 mV/g	2,06 V	86,28	0,024	20600	15
ADXL203	$\pm 1,7g$	0,001g	1000 mV/g	3,4 V	90,63	0,038	34000	16

Por causa da falta de informação presente foi questionado ao DEC como é realizada a conversão dos referidos sensores e foi transmitido que os equipamentos de aquisição usuais, DT-500 e DT-800, tem 15bits e 16bits de resolução respectivamente, ou seja, para manter o funcionamento habitual seria necessário ter pelo menos 16bits (65536 medidas).

O número de bits de conversão necessários depende do sensor que precisar de mais bits para uma conversão correcta. Se se assegurar a conversão deste, assegura-se que leituras dos restantes sensores são bem efectuadas pois estes necessitariam de menos bits para conversão. Assim tem-se que o número de bits mínimo necessário é de 16bits.

Apesar de apenas serem necessários 16 bits pode-se observar que todos os conversores seleccionados da tabela 3.3 têm 24bits (16777216 medidas) de resolução e fazem a conversão analógica-digital com a tecnologia *sigma-delta*. Esta opção deve-se ao facto de com 24bits ser possível medir qualquer um dos sensores escolhidos com resolução suficiente e também se deve ao facto de no mercado existir uma vasta gama de soluções de conversores AD com 24bits utilizando a tecnologia *sigma-delta*. A tecnologia *sigma-delta* para conversão analógica-digital tem uma boa relação sinal ruído e consegue ter velocidades elevadas de conversão mesmo num conversor com um número elevado de bits.

Como o número de sensores não é fixo entre nós, porque varia com a aplicação do sistema, não é possível estimar uma solução óptima para o número de entradas do conversor a escolher. Mas como existem sensores que ocupam mais do que uma entrada do conversor AD

⁶ Informação fornecida pelo DEC inconclusiva.

⁷ R é a resistência do extensómetro, que pode ter valor diferente para a mesma referência.

facilmente se percebe que este tem de ter varias entradas e que quantas mais entradas tiverem menos conversores serão necessários. Como apenas existe um dispositivo com 16 entradas, o ADS1258, estar-se-ia a reduzir a 1 a possibilidade de escolha sem avaliar as restantes características. Assim os conversores com 8 e 10 entradas também serão uma boa opção pois apesar de terem menos entradas garantem maior agilidade aos nós de sensores. Desta forma eliminam-se os integrados CS5524 e MAX11040.

Com o tipo de aplicação que se pretende, isto é, curtos períodos de tempo e ter dispositivos com mobilidade, a potência consumida por cada um dos equipamentos, na ordem das dezenas de *miliWatt*, é aceitável. Os conversores que consomem maior potencia são os que tem frequências de aquisição mais elevadas, pelo como já foi referido não é necessário uma frequência acima da frequência dada pela equação (3.1). Assim o equipamento AD7739 e o ADS1278 ficam fora das opções.

O custo dos integrados avaliados aumenta a medida que se tem maior frequência de aquisição. Contudo não foi adquirido apenas o integrado, optou-se por adquirir o *Evaluation Kit* do integrado escolhido pois para uma solução protótipo importa em primeiro lugar é validar a solução.

Após serem considerados e ponderadas todas as características acima referidas, as hipóteses possíveis são o AD7718, ADS1256 e o ADS1258. Todos estes dispositivos tem sensivelmente o mesmo preço, mas o preço da *Evaluation Board* já difere bastante, sendo 150\$, 49\$ e 49\$ respectivamente. Apesar de o AD7718 apresentar menos consumo energético e uma relação entradas/frequência de aquisição mais perto da gama pretendida, a escolha do conversor recaiu sobre o ADS1258, sendo que o principal factor para a sua escolha, foi as 16 entradas disponíveis.

Contudo, após encomenda e troca de informações com o fabricante, a *Texas Instruments*, verificou-se que o equipamento ADS1258 apesar de já estar disponível para venda ainda se encontrava em desenvolvimento e só estaria disponível em finais de Junho. Assim avançou-se para aquisição de *Evaluations Boards* do ADS1256 cujo funcionamento é muito idêntico ao ADS1258.

A família ADS1255/56/58 segundo o fabricante é recomendada para aplicações industriais com alta performance na conversão analógica-digital, com sendo o melhor na classe na relação sinal/ruído, contendo uma alta resolução e uma alta transferência de dados.

É também referido pelo fabricante que este conversor AD é programável, contudo este apenas suporta um número restrito de comandos enviados por SPI, a que corresponde as funções que este suporta

3.4.2 - Dispositivo de Interface Sem Fios

A escolha do dispositivo de interface sem fios está relacionada directamente com a norma do protocolo de comunicações que foi seguida. No capítulo 2, Estado da Arte, são apresentadas várias normas de comunicações sem fios, o *Bluetooth*, o *ZigBee*, *Wi-Fi*, *Wibree*, *nanoNET*, *WirelessHART*. Com o uso de uma destas normas assegura-se para além de um funcionamento normalizado e fiável que a integração futura, ao nível da camada física e a camada de ligação de dados, com outros sistemas que seguem a mesma norma seja transparente.

As normas *Bluetooth* e *Wibree* apesar de implicarem conter um *hardware* com baixo consumo de energia e uma alta taxa de transferência de dados, tem a desvantagem de ter um alcance curto, o que as retira do leque de opções. O protocolo *nanoNET* é um protocolo pro-

prietário e com uma reduzida gama de dispositivos disponíveis, que tornaria este sistema dependente do seu proprietário e das suas soluções, para além de que aumentaria o custo do sistema. O protocolo *WirelessHART* foi concebido para processos de controlo de sistemas de automação e contem características em termos de consumo energético e de controlo do trafico de rede adequadas a aplicação deste sistema, porem este protocolo é recente (finais de 2007) e ainda não existe no mercado muitos dispositivos que trabalhem segundo esta norma.

As opções reduzem-se assim a utilização do *ZigBee* ou do *Wi-Fi*. O *ZigBee* é um protocolo que implica baixos consumos de energia, tem uma abrangência elevada e foi concebido para uma transferência de dados reduzida. A família IEEE 802.11 permite ter um alcance elevado, contempla uma elevada transferência de dados no *standard* IEEE 802.11g, mas o hardware que esta trabalha segundo esta norma consome mais energia do que o hardware em que trabalha segundo *ZigBee*. Esta razão juntamente com o desaconselho, no Estado da Arte, do uso do TCP, que é o protocolo de camada transporte que habitualmente a família 802.11 implementa, levaria a opção pelo *ZigBee*. Contudo foi realizada uma pesquisa de mercado considerando estas duas hipóteses.

Esta pesquisa revelou que os dispositivos que implementam que realizam comunicações sem fios segundo o protocolo *ZigBee* não contemplam funções das camadas de rede ou de transporte que facilitaria a comunicação entre os diversos dispositivos. Como também o objectivo principal do trabalho não é apresentar funções de gestão de uma rede de comunicações com protocolo *ZigBee* optou-se pela alternativa. Os dispositivos que realizam comunicações segundo a norma IEEE 802.11b e/ou IEEE 802.11g, *standards* mais comuns da norma IEEE 802.11, para alem das funções da camada de ligação de dados e da camada física contemplam as funções da camada rede e da camada transporte, que facilitam as comunicações, nomeadamente nas recuperações de erros, no controlo do acesso ao meio, na transmissão de pacotes e no controlo de fluxo e tráfego da rede.

O dispositivo escolhido foi a *WiPort* do fabricante *Lantronix*. Este dispositivo permite a interface de uma comunicação segundo os protocolos RS-232C, RS-485 e RS-422 com a comunicação sem fios segundo o modelo de comunicações TCP/IP.

Apesar aparente mudança de modelo de comunicações pode-se verificar que o modelo TCP/IP é muito semelhante ao modelo de comunicações sugerido no Estado da Arte para WSN.

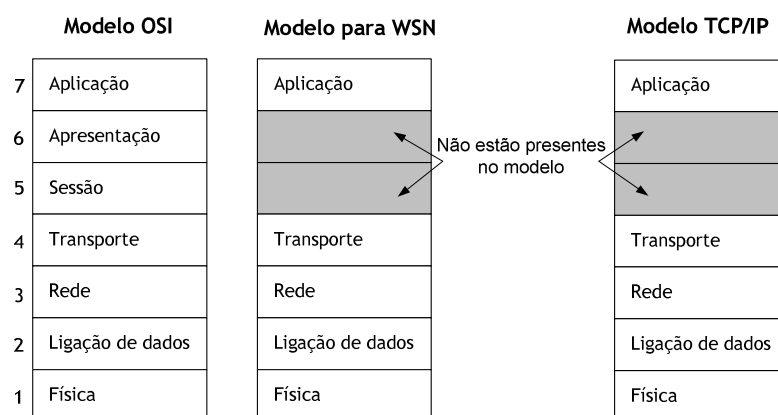


Figura 3.3 - Modelos de comunicações.

Com a opção pelo modelo de comunicações TCP/IP algumas das sugestões ao nível de cada camada do modelo de comunicações para WSN, que foram discutidas no capítulo 2, não podem ser implementadas, mas podem ser levadas em conta na implementação como a agregação, a compressão de dados, a inclusão de modos de poupança de energia, entre outros.

O maior inconveniente deste dispositivo para o sistema que se pretende é o consumo de energia. A *WiPort* caso esteja no seu funcionamento nominal e com taxas elevadas de transferência de dados consome 950mW, que é um valor bastante elevado mesmo para este sistema que não terá longos períodos de funcionamento. O consumo de energia pode ser minimizado introduzindo modos de poupança de energia que o hardware já contempla. Também é necessário ter em conta que partir da aplicação que se pretende deste sistema pode-se verificar que o consumo de energia, assegurados por baterias nos sistemas de monitorização actuais, de alguns dias é suficiente para garantir a utilização de dispositivos que suportam o TCP/IP.

Na aquisição da *WiPort* também foi ponderada a possibilidade de compra da *Evaluation Board da WiPort*. Avançou-se então para a compra deste equipamento pela razão que para uma solução protótipo importa em primeiro lugar é validar a solução, tal como foi referido para os conversores AD.

3.4.3 - Controlo de Informação

Num nó de sensores é aconselhado nos vários *papers* referidos no estado da arte, que seja realizado o controlo dos dados fornecidos pelos sensores. Com um dispositivo que tenha capacidade de processar, avaliar os dados localmente e enviar os dados com a frequência desejada, obtêm-se uma melhor performance no sistema.

Uma vez que também existe uma incompatibilidade de interface entre a *WiPort*, *RS-232C*, e o conversor A/D, *SPI*, torna-se necessário converter os sinais para que estes dois dispositivos possam comunicar entre si e se possível em *full-duplex*. O modelo da *WiPort* existente até ao momento, apenas permite comunicações segundo protocolo RS232. Por seu lado toda a gama de conversores avaliada apenas permite comunicações segundo protocolo *SPI*.

Também foi considerada a hipótese de não existir controlo no nó de sensores, isto porque o protótipo tendo pequenas dimensões, simplificaria o *hardware* utilizado e todas as comunicações seriam geridas pelo nó central. Esta configuração permitiria a comunicação em *full-duplex*, mas foi preterida em relação à hipótese do microcontrolador, porque surgiram duas contrariedades. A primeira delas é que o dispositivo apenas suportava a comunicação de quatro canais de comunicação (*SCLK*, *DIN*, *DOUT*, *CS*) do *SPI* e o conversor AD tem necessidade de para além dos 4 canais de comunicação, dispor de mais um canal (o sinal *DRDY*) que indica se que uma conversão foi concluída. O segundo problema é a inexistência de um sinal de relógio (*SCLK*) uma vez que nem o conversor AD nem o MAX3111E geram sinal de relógio. Assim seria necessário incluir um dispositivo para gerar o sinal de relógio externo para permitir comunicação sob o protocolo *SPI*.

Com a utilização do microcontrolador consegue-se ter no mesmo dispositivo a comunicação com dois protocolos em *full-duplex*, permite resolver estas duas contrariedades e permite ter um processamento dados local que potencializa o funcionamento dos nós de sensores.

Contudo com a utilização do micro controlador torna-se necessário realizar um circuito de hardware para montagem do micro processador e de todo o hardware que este necessita para o seu funcionamento correcto. Também como existe uma incompatibilidade de alimentações e dos níveis de sinal digital entre o microcontrolador (0V corresponde ao nível lógico 0 e 5,0V corresponde ao nível lógico 1) e o conversor AD (0V corresponde ao nível lógico 0 e 3,3 V corresponde ao nível lógico 1) foi necessário adicionar dois Buffers de conversão de sinal de 3,3V para 5,0V, e de 5,0V para 3,3V, conforme o sentido do canal de comunicação.

Com a inclusão de um microcontrolador a controlar a comunicação SPI tem-se a possibilidade de aumentar o número de dispositivos num nó. Isto é, como o SPI inclui uma linha de comando que permite seleccionar o dispositivo com que está a comunicar, tem-se a possibilidade de utilizar a canal de comunicação como linha de endereçamento para múltiplos dispositivos, o que aumenta a capacidade aquisição de um nó.

3.4.4 - Alimentação do Nó de Sensores

As componentes deste sistema têm requisitos de alimentação muito variados, pois é necessário suportar alimentação dos diversos dispositivos que integram o nó de sensores, os circuitos de condicionamento e os sensores. Com o objectivo de se centralizar a alimentação dos nós e dos sensores num só ponto, fez-se um estudo energético que permite ter à disposição, em cada nó, as mais variadas alimentações. Na tabela 3.5 apresenta-se um levantamento das necessidades energéticas do sistema.

Com a alimentação localizada em cada nó é possível que o cabo de alimentação e o cabo de transmissão de sinal tenham um conector único. Assim simplifica-se o problema da multiplicidade e da complexidade das ligações que é exigida até ao momento. Caso não seja possível integrar estas alimentações sugere-se que os sensores que estejam próximos partilhem uma alimentação local ou tenham mesmo uma alimentação própria.

Tabela 3.5 - Levantamento das necessidades energéticas.

Dispositivo	Alimentação	
	Corrente	Tensão
RDP - DCTH	- ⁽⁸⁾	[6 , 18] V
MONITRAN	- ⁽⁸⁾	[10 , 30] V
LSOC 1L	- ⁽⁸⁾	24 V
NTC	- ⁽⁸⁾	5 V
Vishay 250UW	7,2 mA	5 V
HIH-4000-001	500µA	[4.0 , 5.8] V
ADIS16201	11 mA	[3,0 , 3,6] V
ADXL330	180 mA	[1,8 , 3,6] V
ADXL203	0,7 mA	[3 , 6] V
ATMEGA8	3.6 mA	5 V
ADS1256	- ⁽⁸⁾	3,3V ; 5,0V
TL084	2,5 mA	±15 V
SN74LVC245AN	500 µA	3,3 V
SN74HCT541N	1mA	5 V
MAX232	80 µA	5 V
WiPort	650 mA	3,3 V

É importante referir que os valores de corrente são valores máximos de corrente para estados de funcionamento que consomem mais energia que estados de funcionamento habituais.

⁸ - Não existem dados do fabricante.

A alimentação dos nós de sensores é feita por duas baterias de 12Volts colocadas em paralelo. Para assegurar a variada gama de tensões tem de se introduzir reguladores de tensão para os níveis 3,3V, 5V, 15V, e -15V.

É necessário ter em atenção os requisitos de corrente do circuito. Estes requisitos variam com os sensores que estiverem ligados ao nó de sensores. Então é necessário fazer um ligeiro sobre dimensionamento que consiga prever e assegurar que em situações onde se tenha o máximo de consumo de corrente o sistema consiga funcionar convenientemente.

Os reguladores de tensão para as tensões de -15V, 15V e 5V suportam até 500mA, o regulador para 3,3V suporta até 800mA. Assim para precaver futuros problemas é necessário introduzir pelo menos dois reguladores em paralelo de modo a fornecer mais corrente ao circuito.

3.4.5 - Funcionalidades

O nó de sensores tem de garantir um conjunto de funcionalidades para o qual foi concebido. Para responder ao conjunto de funcionalidades arquitectura do nó de sensores é a que está presente na figura 3.4. Esta arquitectura não segue a arquitectura sugerida no capítulo 2 devido à diferença de requisitos funcionais e dos dispositivos escolhidos.

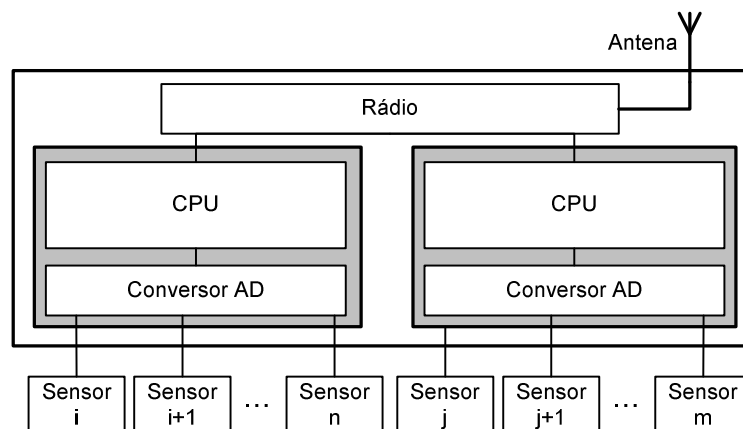


Figura 3.4 - Arquitectura de um nó de sensores.

A *Wiport* contém duas entradas RS-232C que permite ter a si ligados dois circuitos em paralelo. Assim pode-se ter no máximo dois microcontroladores ligados com funcionamento em *full-duplex* a trabalhar em paralelo. Na figura 3.4 é apresentado o microcontrolador e apenas um conversor AD, pois esta será a configuração típica do nó de sensores. Contudo a configuração pode ser alterada e tal como foi referido anteriormente ter um ou mais dispositivos a comunicar via SPI como por exemplo um ADIS16201 ou outros conversores AD a funcionar em simultâneo.

Com esta configuração tem-se uma flexibilidade em termos de hardware que permite uma melhor adaptação do sistema à monitorização que se pretende.

Esta arquitectura, comparada com a arquitectura sugerida do capítulo 2 não contém um bloco externo de memória, mas nem por isso o bloco memória foi eliminado. O micro controlador tem 8Kbytes para o software que se pretenda implementar e para armazenamento de dados. A *Wiport* também contém 2Mbytes de memória que podem ser utilizados como *Buffer* para dados que não tenham sido transferidos por algum motivo.

A frequência de transmissão e a frequência de aquisição são controladas pelo dispositivo CPU conforme as frequências que se pretenda operar. Poderia no entanto surgir problemas com as comunicações e com a gestão na transmissão de dados mas o dispositivo de interface sem fios juntamente com a Unidade central consegue controlar estes mesmos problemas.

O modelo de cooperação nas comunicações sem fios é do tipo *Peer-to-Peer*. Para este sistema protótipo, todos os nós comunicam apenas com a unidade central e sempre que o pretendem fazer estabelecem uma conexão própria. Caso estejam a decorrer transferências de dados em paralelo não irá haver interferência pois a unidade central consegue gerir estas mesmas transferências.

3.5 - Unidade Central

A unidade central é o ponto de ligação da *intranet* com aplicação para o utilizador. É a unidade da rede responsável pela gestão e pelo controlo dos nós de sensores. Nesta unidade tem-se uma aplicação de registo de dados que é responsável pela comunicação com os nós de sensores da *intranet* e pelo registo de dados numa BD.

Este dispositivo é responsável pela configuração ou reconfiguração de todos os nós de sensores presentes na *intranet*. Esta configuração é realizada através de consultas à BD.

É um computador que não necessita de ter uma grande capacidade de processamento pois terá poucos processos a correr. Tal como foi referido na secção 3.2, a unidade central necessita de conter duas interfaces de rede com protocolo TCP/IP, uma para as comunicações da *intranet*, outra para o acesso remoto através da *internet*. O sistema operativo escolhido é o Windows XP mas poderia ser outro pois como é referido mais a frente, neste subcapítulo, todas as soluções a nível de aplicação de software são suportadas por mais que um sistema operativo. Não existe necessidade de instalar *software* pois a aplicação de registo de dados é um ficheiro executável e não necessita do *software* que a desenvolveu.

3.5.1 - Aplicação de Registo de Dados

No capítulo 2 são sugeridos vários programas onde é possível realizar a aplicação de registo de dados. Da vasta gama sugerida no capítulo 2 apenas é avaliada as características do tipo de programas IDE pois as funcionalidades desta aplicação requerem bom funcionamento das comunicações com os dispositivos electrónicos e não requerem uma elevada capacidade de processamento nem uma análise da qualidade dos dados recolhidos.

A aplicação de registo dos dados é um tipo de aplicação GUI (*Graphic User Interface*) que é um tipo de interface que permite ao utilizador interagir com dispositivos electrónicos. Contudo não se pretende que o utilizador utilize este dispositivo para interagir com o sistema mas, caso surja algum problema o utilizador necessita de ter um meio em que possa avaliar o estado da rede. O utilizador, ao conseguir avaliar o estado da rede, consegue perceber onde se localiza o problema, e desta forma torna-se mais eficaz a intervenção caso seja necessária.

Para a construção da aplicação de registo de dados têm-se varias opções como programa *Lazarus*, *Delphi*, *Kylix* e o *Microsoft Visual Studio*. No entanto existem outros programas que podem surgir como alternativa e que poderão realizar o mesmo conjunto de funcionalidades pretendidas para esta aplicação mas não foram considerados por não haver um conhecimento

tão aprofundado. Os programas que estão em questão são programas que suportam um tipo de linguagem de programação orientada a objectos.

É necessário ter vários factores em consideração na escolha do software a utilizar para elaboração da aplicação de registo de dados como, o sistema operativo do sistema onde vai correr aplicação, a licença de utilização do software, as funcionalidades que se pretendem, quais os programas com que irá interagir.

Os programas Delphi e Kylix foram criados pela mesma empresa, sendo que são orientados para sistemas operativos diferentes, Windows e Linux respectivamente. Para poder usufruir destes é necessário pagar uma licença de utilização, no entanto o Kylix tem uma versão *open edition* que não suporta tantas funcionalidades. O *Microsoft Visual Studio* é um software que necessita de licença de utilização e apenas corre em Windows. Por fim, o *Lazarus* é um programa *freeware* e *cross platform*, isto é, é um software para desenvolvimento deste tipo de aplicações livre e que com o mesmo código consegue gerar um executável em qualquer plataforma como Linux, Windows ou Macintosh.

Sendo os programas praticamente equivalentes para o tipo de funções que se pretende, optou-se pela solução mais barata em que não é necessário pagar licença de utilização. Desta forma as alternativas reduzem-se ao *Lazarus* e à versão do *Kylix open edition*. O facto do *Lazarus* ter a vantagem de ser *cross platform*, levou a optar por este software.

3.5.2 - Base de Dados

A arquitectura da BD para o sistema de monitorização é peça fundamental para uma análise ao ensaio realizado. Pode ser realizada uma análise *online*⁹ ou uma análise posterior. Em qualquer uma destas análises é importante que as operações sobre a BD sejam rápidas e que possam ocorrer paralelamente desde que seja garantida a integridade da mesma.

Os vários Sistemas de Gestão de BD sugeridos no capítulo 2, *PostgreSQL*, o *Microsoft Access* e o *MySQL*, garantem a integridade. No entanto tem de se optar pela escolha por um destes sistemas. A utilização do *Microsoft Access* de como SGBD foi excluída pois é necessário pagar licença de utilização e em alternativa existe *software* livre como os SGBD *MySQL* e *PostgreSQL*.

Os SGBD *MySQL* e *PostgreSQL* são dois SGBD amplamente utilizados para o mais variado tipo de aplicações. Apesar de ser possível utilizar qualquer um destes SGBD de modo livre tem-se que o *MySQL* é um SGBD proprietário da empresa *MySQL AB* enquanto que o *PostgreSQL* é desenvolvido por uma comunidade mundial programadores. O *PostgreSQL* nos últimos anos tem ganho sucessivos prémios credenciados como melhor SGBD. Por seu lado o *MySQL* é utilizado por muitas empresas multinacionais em variadas aplicações.

Ambos os SGBD utilizam o *SQL (Structured Query Language)* como linguagem de interface que permite que o acesso à BD, através de *queries SQL*, realizado para *MySQL* e para *PostgreSQL* possa ser o mesmo desde que a estrutura da BD seja a mesma. O *MySQL* é mais rápido, mais estável e mais indicado para operar em *Windows*. Contudo estas desvantagens para o tipo de aplicação não são muito relevantes, pois com *PostgreSQL* consegue-se inserir dados com instruções executadas na ordem dos milissegundos, a o esquema de BD não tem grandes dimensões portanto em princípio não haverá problemas com estabilidade.

⁹ Análise *online* permite uma consulta dos dados na ordem dos segundos.

Também interessa questionar onde ficará situada a BD, se num servidor, se localmente na unidade central ou num esquema misto, onde a BD está no servidor e na unidade central. Com opção de alojar a BD de dados localmente na unidade central, a ligação á *internet* seria apenas para acesso do utilizador aos dados via remota, e com um servidor de BD local garantia-se a não dependência de um servidor externo. No entanto, existem algumas contrariedades, caso ocorra um dano físico na unidade central, aspecto a ter em conta devido as adversidades que este tipo sistemas de monitorização enfrentam ou caso esta seja extraviada, além do prejuízo material, os dados da monitorização perdem-se. A hipótese de esquema misto, teria por base ter duas BD idênticas, uma num servidor, outra na unidade central, em que periodicamente é realizado uma transferência dos dados da BD da unidade central para a BD do servidor. Contudo esta solução não garante a visualização dos dados *online*.

O programa para realizar a aplicação de registo de dados, o *Lazarus* é compatível com qualquer um destes SGBD independentemente da sua localização. Como não existe nenhuma desvantagem nos dois SGBD avaliados para o tipo de aplicação que se pretende, optou-se pelo SGBD *PostgreSQL* mas com o *MySQL* a solução seria igualmente válida.

A opção seguida para alojar a BD foi a opção do servidor remoto que contempla um SGBD *PostgreSQL*. Desta forma garante-se o armazenamento dos dados em situações de infortúnio bem como se garante que na aplicação é possível visualizar os dados *online*.

Na figura 3.5 é apresentado um diagrama para o esquema da BD para o sistema. Tal como foi sugerido no capítulo do Estado da Arte o esquema de BD após ser criado, foi verificado junto de um especialista em monitorização de estruturas de Engenharia Civil, que indicou algumas correcções entretanto efectuadas e validadas.

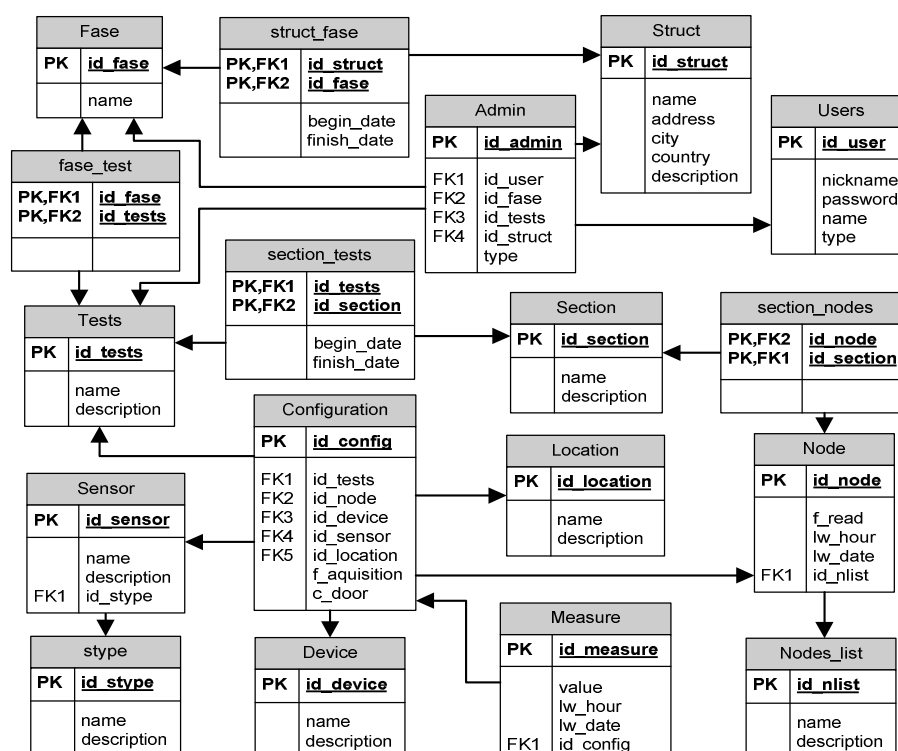


Figura 3.5 - Esquema da Base de Dados.¹⁰

¹⁰ É possível visualizar o esquema com disposição mais alargada no anexo B.

As tabelas *Struct*, *Fase*, *Tests*, *Section*, *Location*, *Sensor*, *stype*, *Device* e *Node_list* são tabelas descritivas importantes para a análise dos resultados da monitorização realizada. As tabelas *struct_fase*, *fase_test*, *section_nodes*, *section_tests* são tabelas que garantem as relações de integridade das tabelas com que estabelecem ligação.

A tabela *Struct* é onde estão os dados relativos à estrutura monitorizada, e apresenta uma descrição e a morada da mesma. A tabela *Fase* contém as diferentes fases em que está a estrutura, como por exemplo construção ou reabilitação. A tabela *Tests* apresenta uma listagem dos ensaios que podem ocorrer nas variadas monitorizações das estruturas. Na tabela *Section* tem-se uma listagem de secções analisadas, como por exemplo primeiro pilar a Norte. A tabela *Sensor* contém a lista de todos os sensores utilizados em todas as monitorizações realizadas. A tabela *stype* é a tabela que indica de que tipo é o sensor, como por exemplo MEMS, acelerómetro, inclinómetro, etc. A tabela *Location* contém a descrição das diferentes localizações onde os sensores com determinada configuração se encontram. A tabela *Device* contém uma listagem de todos os dispositivos ligados, por SPI, ao microcontrolador do nó de sensores, como por exemplo ADS1256 ou ADIS16201. Na tabela *Node* tem-se configurações de nós com registo da última vez que foi recebida uma comunicação do nó e com a frequência de leitura que este nó estava a operar. A tabela *Node_list* contém a listagem de todos os dispositivos de interface sem fios que é possível utilizar numa configuração de um nó. A tabela *Configuration* é a tabela que contém todas as configurações dos sensores da rede, onde se tem as entradas onde estes são ligados e a frequência de aquisição a que o conversor AD tem de as adquirir. A tabela *Measure* é a tabela onde são inseridos todos os valores lidos para cada configuração.

A aplicação de registo de dados apenas edita as tabelas *Measure* e *Node*, sendo as tabelas *Configuration*, *Node*, *Device*, *Measure*, *Sensor* de consulta de modo a garantir integridade dos dados e a configurar correctamente os nós de sensores. A aplicação do utilizador, apresentada no subcapítulo seguinte, permite mediante algumas condições, o acesso a todas as tabelas onde é permitido consultar, inserir, editar e apagar desde que seja garantida a integridade dos dados.

3.5.3 - Funcionalidades

Para este sistema específico pretende-se que uma aplicação de registo de dados execute as funcionalidades já descritas, como o registo na BD de todas as medidas efectuadas pelos sensores, a configuração de todos os dispositivos de rede, um pequeno interface de comunicações que ajude à detecção de erros caso alguma situação anormal aconteça.

Ambos os SGBD permitem a utilização do SQL como linguagem de interface que permite que facilmente se possa alterar o SGBD mantendo a estrutura da BD.

Todas as configurações e/ou listagem de dados contêm os dados de ensaios a decorrer como também contêm o registo de ensaios anteriores de forma a ter-se um registo histórico de todos os ensaios de monitorização realizados.

3.6 - Aplicação de *Software*

Esta aplicação tem como principal fim visualizar os dados recolhidos através da monitorização realizada. A visualização deve permitir ao utilizador visualizar dados de variadas formas, gráficos, tabelas, entre outros, para que a análise dos dados seja mais intuitiva.

Tal como é sugerido no capítulo 2, antes de se discutir o programa a utilizar para realizar a construção da interface do utilizador importa primeiro discutir o tipo de cliente. Este parâmetro é bastante importante pois condiciona os restantes parâmetros a avaliar, tais como: o custo da licença de utilização do software; o sistema operativo onde está a aplicação; a linguagem de programação; o tipo de dados a avaliar; os programas com que interage; e o tipo de funcionalidades de interacção com a rede que se pretende.

O tipo de cliente, *Thin Client* e *Fat Client*, é uma característica do modelo de comunicações cliente-sevidor. Este modelo de comunicações é utilizado no acesso aos dados por parte da aplicação quando a BD está alojada num servidor. Ao definir-se o tipo de cliente define-se onde a maior parte do processamento de dados é realizado, se no cliente ou no servidor, *Fat Client* e *Thin Client* respectivamente. Como o servidor apenas tem como função armazenar a BD e não é realizado nenhum tipo de processamento, o tipo de cliente escolhido para este sistema foi *Fat Client*. O acesso ao servidor apenas é feita para operações sobre a BD, significa que o restante processamento é suportado pela aplicação do utilizador.

No Estado da Arte as soluções sugeridas para construção da aplicação do utilizador são as mesmas dos programas para construção da aplicação de registo dos dados, mas aqui pode-se adicionar à gama de soluções o interface *Web*, realizado através de um *browser*.

Com a discussão realizada no subcapítulo anterior, Unidade Central, pode-se retirar que as soluções de programas *IDE* que melhor se adequam a este protótipo se reduzem ao *Lazarus* e ao *Kylix* por serem soluções com licença de utilização livre e que garantem as funcionalidades pretendidas. Assim tem-se um leque de opções com os programas *Lazarus*, *Kylix*, *Matlab*, *LabView* e interface *Web*.

O *Matlab* tem uma elevada capacidade de processamento de cálculo matemático mas essa capacidade de cálculo não é totalmente aproveitada com o tratamento de dados pretendidos, além do que é um software pago. O *LabView* é um programa com forte aplicação em instrumentação e com vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. Para este sistema pretende-se apenas manipular os dados, pois a aquisição é realizada por outra parte do sistema, a manipulação para este protótipo não exige a necessidade de se ter um software pago para o fazer. O software *Kylix* tem a desvantagem, em relação ao *Lazarus*, de ser um programa apenas para aplicações no sistema operativo Linux, assim para este sistema como não está definida a utilização do sistema operativo para aplicação do utilizador opta-se pelo *Lazarus* em detrimento do *Kylix*. O *Lazarus* e a interface *Web* têm a vantagem de em diversos sistemas operativos ser possível com o mesmo código realizar o mesmo conjunto de tarefas, sendo que o *Lazarus* requer a instalação de software, enquanto a interface *Web* não requer a instalação de qualquer programa de software, pois praticamente todos os computador com acesso a *internet* já contemplam um *browser* capaz de interpretar o código gerado. Assim optou-se pela construção da aplicação do utilizador com interface *Web*.

A aplicação do utilizador pode estar alojada num servidor ou num terminal específico para o sistema. Para ambas as soluções tem de existir um acesso ao servidor da BD. Caso a aplicação do utilizador esteja num servidor, permite que o acesso à aplicação do utilizador possa ser realizado em paralelo por diversos utilizadores. Caso esteja num terminal apenas

um utilizador pode ter acesso a aplicação. Para este sistema interessa ter uma aplicação onde múltiplos utilizadores possam ter acesso através de um computador pessoal com acesso a *internet*. Assim de forma cómoda e através de qualquer ponto com acesso à *internet* é possível aceder ao mais variado tipo de informação que a aplicação contém.

A interface *Web* pode ser construída com varias linguagens de programação. As linguagens de programação a utilizar dependem das funcionalidades pretendidas na página *Web*. Para esta aplicação apenas utilizou-se *HTML*(*HyperText Markup Language*) para estruturar e construir a página e *PHP*(*Hypertext Preprocessor*) para aceder à BD e construir algumas das funcionalidades para disposição dos dados tais como tabelas e gráficos.

3.6.1 - Níveis de Acesso

Depois de estar definido o tipo de aplicação e antes de se começar a construção da aplicação do utilizador fez-se um levantamento, junto de um especialista, das necessidades e das funcionalidades que esta aplicação tem de suportar. Após ser realizado este levantamento foi elaborada a estrutura da página *Web*, presente na figura 3.6.

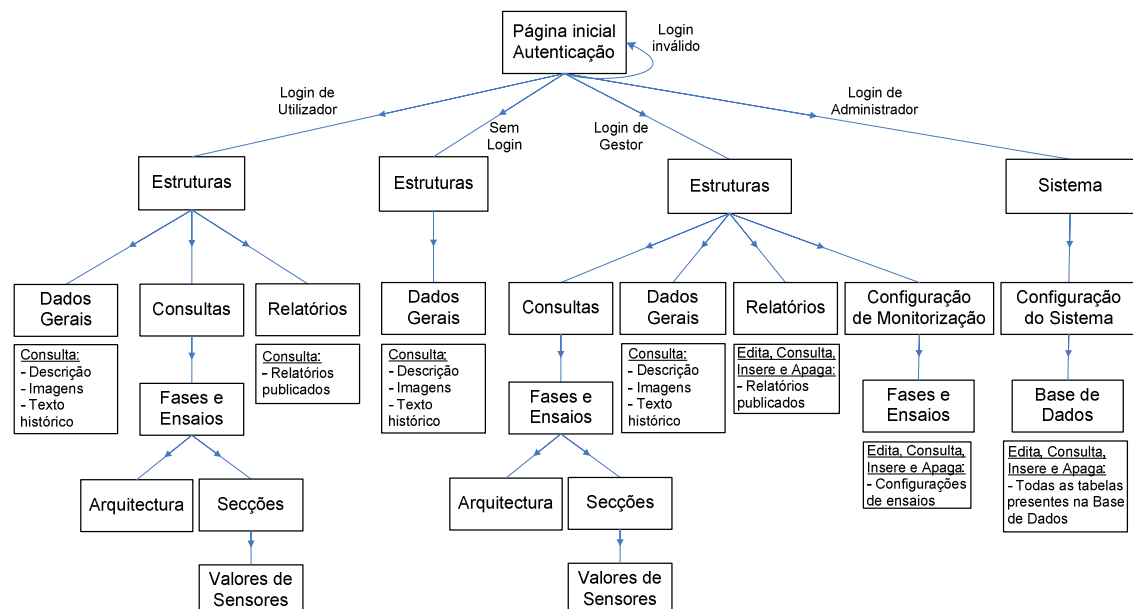


Figura 3.6 - Esquema da página Web.¹¹

Para aceder aos diferentes conteúdos da página foram realizados quatro níveis de acesso à página. Tem-se os níveis de acesso com autenticação, administrador, gestor e utilizador, e um nível mais restrito onde não é necessário autenticação na página.

Os níveis de acesso foram separados porque não se pretende que todos os utilizadores tivessem acesso à configuração de todos ensaios de monitorização, nem a possibilidade de configurar a BD.

Seguida da página inicial tem-se uma página onde é possível escolher a estrutura monitorizada. Dependendo do nível de acesso, é possível fazer consultas sobre os resultados das monitorizações feitas na estrutura seleccionada, é possível consultar dados gerais da estrutura, é possível consultar relatórios realizados pelos especialistas envolvidos na monitorização,

¹¹ É possível visualizar o esquema com maiores dimensões no anexo C.

é possível inserir e editar todas as tabelas da BD, e é também possível configurar ou reconfigurar os ensaios do sistema introduzindo novos dados na Base de Dados

3.6.2 - Organização e Representação dos Dados

A partir da aplicação de Software o utilizador deve ser capaz de observar e perceber o comportamento do sistema, através de algum tratamento de dados realizado pela aplicação.

O tratamento de dados não é igual para todos os sensores, isto porque se tem sensores que medem grandezas diferentes, e sensores com diferentes características para a mesma grandeza.

Para ser possível o utilizador visualizar os dados da forma sugerida, o mais usual em sistemas de monitorização é a forma gráfica, onde através de gráficos se possa apresentar e confrontar valores medidos por vários sensores para o mesmo ensaio ao longo do tempo. Também é possível apresentar os mesmos dados mas em tabelas onde podem ser apresentados os diversos valores adquiridos.

3.6.3 - Funcionalidades

A aplicação do utilizador construída permite através de *browser* com acesso à *internet* realizar uma análise dos dados adquiridos com o sistema de monitorização. Esta análise é realizada através da disponibilização de gráficos, e tabelas com os valores medidos.

Esta aplicação tem de ser capaz de processar todos os valores dos sensores e gerar uma apresentação que seja familiar ao utilizador, isto é, deve apresentar os dados de acordo com a grandeza medida. A aplicação do utilizador deve permitir que a análise dos dados possa ser realizada com os intervalos de tempo que sejam mais convenientes para o utilizador.

A aplicação do utilizador contém diversos níveis de acesso para que o acesso à informação seja restrito a um pequeno grupo de utilizadores.

Como esta aplicação está num servidor é possível ter-se vários utilizadores a usufruírem da mesma em paralelo realizando diferentes operações. No entanto, todas as operações realizadas na aplicação do utilizador têm de garantir a integridade de todo o sistema. Para tal foram previstos pequenos mecanismos para controlo de dados na aplicação que garantem essa mesma integridade.

A esta aplicação foi adicionada a hipótese de configuração e reconfiguração de um sistema de monitorização. Aqui é possível configurar o ensaio pretendido através da inserção dos dados na BD. Quando o sistema for activado a aplicação de registo de dados vai à BD e extrai a informação introduzida pelo o utilizador.

Para além das funcionalidades também foi adicionada uma secção da página *Web* onde são apresentadas informações sobre as diversas estruturas monitorizadas.

3.7 - Conclusões

Neste capítulo é apresentada a arquitectura do sistema e os dispositivos que constam dessa mesma arquitectura. São justificadas as escolhas de cada um dos módulos presentes nessa mesma arquitectura.

Este sistema de monitorização é constituído por uma rede *intranet* e por uma aplicação de software do utilizador, ligada remotamente através da *internet*, capaz de gerir a *intranet*. A arquitectura de rede *intranet* definida para este sistema é *ad hoc*. Esta rede é constituída por uma unidade central, por nós de sensores e diversos sensores.

A comunicação entre os nós de sensores e a unidade central é realizada sem fios e o protocolo seguido é o TCP/IP. A comunicação entre os nós de sensores e os sensores é feita por fios.

A gama de sensores utilizada neste sistema contém MEMS e sensores usualmente utilizados pelo DEC para monitorização. Desta forma é garantida a integração de sensores de tecnologia mais recente com sensores cujo seu funcionamento está validado pelo DEC.

Os nós de sensores são constituídos por três dispositivos, o dispositivo rádio, um microcontrolador e um conversor AD. Estes dispositivos têm funções distintas. O dispositivo rádio seleccionado é a *Wiport* e é responsável pela comunicação do nó de sensores sem fios com a unidade central. O conversor AD é responsável por adquirir os sinais dos sensores com frequência pretendida, e após pesquisa de mercado foi seleccionado o dispositivo ADS1256. O microcontrolador é o dispositivo que realiza controlo no nó de sensores. Este dispositivo coordena o funcionamento do conversor AD e interpreta os dados oriundos da unidade central.

A unidade central da *intranet* é responsável pela gestão dos nós de sensores, de introduzir na BD os valores adquiridos pelos sensores e de configurar os nós de sensores de forma automática, baseando-se na informação presente na BD.

Toda esta informação gerada nos diversos ensaios é enviada para uma BD alojada remotamente num servidor com SGBD *PostgreSQL*.

Na aplicação com acesso remoto é possível visualizar e analisar dados lidos pelos sensores de forma gráfica, é possível configurar toda a *intranet* para os diferentes ensaios, é possível consultar relatórios realizados por especialistas, como também é possível aceder a informação genérica sobre as estruturas monitorizadas.

A comunicação entre o nó de sensores com os sensores que este tem de adquirir, é realizada por cabos e caso a gama de saída dos sensores não seja a mesma da gama de medida do conversor AD são utilizados circuitos de condicionamento de sinal. A alimentação dos nós de sensores e dos sensores é suportada pelo nó de sensores, que garante todos os níveis de tensão e de corrente necessários.

Na *intranet* é possível acrescentar e retirar de funcionamento nós durante os ensaios.

Este sistema de monitorização é capaz de se adaptar a diferentes estruturas sem necessitar de alterações de *hardware* nos nós de sensores. No entanto caso se pretenda é possível modificar o *hardware* de um nó de sensores, de forma prática, adicionando conversores ou outros dispositivos.

Todas as aplicações desenvolvidas são *cross platform* e caso se pretenda pode ser mudado o sistema operativo sem alteração de código. O SGBD também pode ser modificado sem ser

necessárias profundas alterações das comunicações com a BD, pois o código das aplicações é realizado em *SQL*.

Capítulo 4

Implementação

4.1 - Introdução

Neste capítulo é apresentada a implementação do sistema de monitorização. Esta configuração do protótipo do sistema teve como suporte a discussão e as opções tomadas no capítulo anterior. Aqui é apresentada a forma de como as funcionalidades descritas no capítulo anterior são implementadas.

Após configuração do protótipo foram realizados alguns testes e discutidos os seus resultados. Também neste capítulo foi realizada a preparação de um ensaio com todo o sistema a funcionar em pleno para uma situação próxima da situação real, onde este sistema terá de funcionar.

4.2 - Configuração do protótipo

Neste subcapítulo são apresentados os algoritmos seguidos pelos diferentes dispositivos e aplicações que fazem parte do sistema. Esta configuração suporta a funções enunciadas no capítulo anterior.

4.2.1 - Nó de Sensores

A constituição típica de cada nó de sensores é a presente na figura 3.4 do capítulo anterior. Assim em cada nó tem-se tipicamente uma *Wipor*, com dois circuitos de aquisição. Cada circuito de aquisição é composto por um microcontrolador e por um conversor ADS1256.

Para melhor compreender o funcionamento do nó de sensores é necessário tecer algumas considerações iniciais.

O nó de sensores apesar de ser possível e de ter sido sugerido nos capítulos anteriores não armazena dados para enviar mais tarde. Este envia os dados para a unidade central quando o conversor acaba de fazer uma conversão. Esta opção tomada pode no entanto ser revista em desenvolvimentos deste sistema.

O tipo de comunicação do nó de sensores com a unidade central é *Peer-to-Peer*, que significa que sempre que se estabelece uma comunicação entre a unidade central e o nó de sensores os dois dispositivos já sabem a identificação do dispositivo, não necessitando por isso mecanismo de identificação da mensagem.

Cada nó de sensores do protótipo apenas comunica com a unidade central. Esta opção foi tomada pela razão de a rede conter apenas três nós de sensores e uma unidade central.

A unidade central é única pois todo o funcionamento da rede foi previsto para tal. Caso se pretende incluir outro dispositivo idêntico é necessário reformular parte da arquitectura do sistema. No entanto desde que as conexões de cada unidade sejam bem definidas o protocolo de comunicações, a Base de Dados, a aplicação de registo de dados e a aplicação de utilizador não necessitam de sofrer alterações significativas.

Os dispositivos Wiport como contem duas entradas *RS-232C* onde serão ligados dois circuitos de aquisição tem a capacidade de estabelecer duas conexões com a unidade central a funcionar em paralelo. Sendo o IP da Wiport o mesmo as conexões são distinguidas pela PORT com que a wiport está configurada para cada entrada *RS-232C*.

A unidade central tem a capacidade de estabelecer diversas conexões com os nós de sensores a funcionar em paralelo.

O conversor AD apesar de ser referido pelo fabricante, que é possível programa-lo, este apenas responde a um número restrito de comandos enviados por SPI. Estes comandos tem requisitos muito específicos em termos temporais, o que torna complexo o funcionamento com este dispositivo. Assim foi necessário realizar um algoritmo capaz de colocar o ADS1256 a trabalhar conforme o pretendido.

O funcionamento do conversor AD é cíclico, isto é o ADS1256 lê uma entrada, duas no caso de ligação diferencial, de cada vez. O que indica que a de cada vez que se pretenda ler os valores lidos pelo conversor apenas se obtêm os resultados de um sensor.

A frequência de aquisição do ADS1256 é a mesma para todos os sensores e é igual a frequência do sensor com configuração de frequência mais elevada. Isto implica que para sensores configurados com frequência mais baixa sejam feitas medições desnecessárias. Contudo, as frequências de aquisição tem valores muito próximos, a excepção é feita para sensores de humidade e de temperatura.

O esquema eléctrico do circuito de aquisição está presente na figura 4.1. Como os níveis de tensão das comunicações dos dispositivos não é igual, foi necessários incluir os dispositivos SN74HCT541N, SN74LVC245AN e MAX3212, responsáveis por adaptar esses mesmos níveis de tensão.

Com cada circuito de aquisição é possível ter-se ligado um máximo de 8 sensores *single-ended* e um mínimo de 4 sensores diferenciais. No capítulo anterior foi sugerida a inclusão de mais dispositivos ligados ao mesmo microcontrolador, mas tal não foi seguido neste capítulo pela razão de que os nós de sensores ficariam sistemas mais complexos e com pouca mobilidade.

De referir que com o uso dos ADS1258 o número de sensores possíveis ligar a um circuito de aquisição aumenta para o dobro, pois este tem o dobro das entradas disponíveis para realizar a conversão analógico-digital.

FEUP Wi Sensor

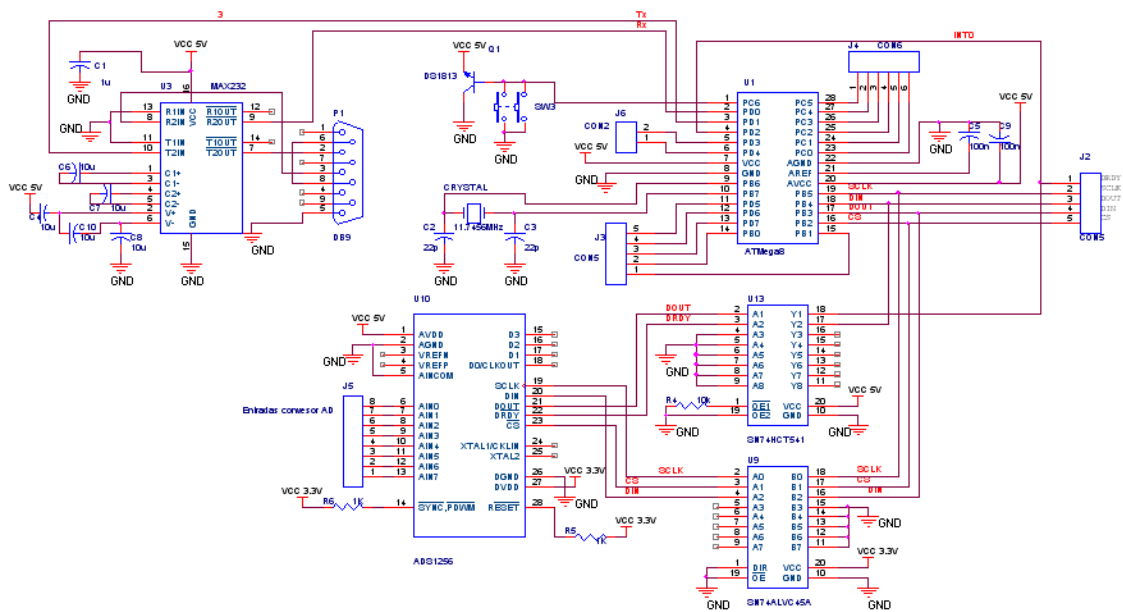


Figura 4.1 - Esquema eléctrico do circuito de aquisição.¹²

Protocolo de comunicações

É importante referir que o protocolo de comunicações aqui apresentado não serve para validar as comunicações entre dois dispositivos, mas serve para que um dispositivo consiga perceber o significado dos valores que recebe. Este protocolo é um conjunto de regras que permitem um funcionamento normalizado de todo o sistema.

Na tabela 4.1 está descrito cada um do tipo de mensagens deste protocolo de comunicações.

Tabela 4.1 - Protocolo de Comunicações.

Tipo	Descrição
0	Trama de confirmação enviada pelo nó central a indicar que recebeu os dados correctos. Esta mensagem é enviada por um nó quando este é ligado. O nó de sensores envia para a unidade central informação que identifica o dispositivo de controlo.
1	A estação central após receber trama 1, envia trama do tipo 2 com todas as configurações presentes na tabela <i>Configuration</i> para o qual o nó foi configurado para o referido ensaio.
2	A estação central envia este tipo de trama com o conteúdo dos dados específicos de cada configuração, como a frequência de aquisição e a porta do conversor AD onde o sensor está ligado.
3	Trama que o nó de sensores envia com o valor lido pelo conversor. Para distinguir qual sensor corresponde à medida é também enviado o código da configuração correspondente.
5	

¹² É possível visualizar o anexo D o esquema eléctrico em maiores dimensões.

Implementação

Uma trama do protocolo de comunicações tem o formato típico da figura 4.2. O carácter @ é o byte que indica o início de uma trama. De seguida é enviado um byte com o tipo de mensagem que é enviada. Os bytes seguintes são os bytes de dados que variam com o tipo de mensagem. No final é enviada o carácter #13 que indica o final de uma mensagem. Após este carácter é enviada um byte BCC (*Byte Carriage Control*), este byte é byte de controlo que contém o resultado da operação lógica XOR de todos os bytes da mensagem.



Figura 4.2 - Formato típico do protocolo de comunicações.

O tipo de mensagem 0 é uma trama de confirmação de que o nó de sensores recebeu os dados correctamente. É uma trama com o formato da figura 4.3.



Figura 4.3 - Trama tipo 0.

O tipo de mensagem 1 presente na figura 4.4 é a mensagem que um nó de sensores envia quando é activo, esta mensagem é enviada para a unidade central e contém o código que identifica o nó que está ligado.



Figura 4.4 - Trama tipo 1.

A unidade central envia o tipo de trama 2 para o nó de sensores saber quantas configurações este tem e quais os códigos de configuração que este tem.

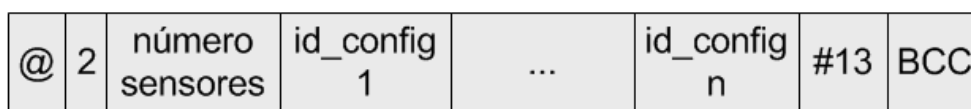


Figura 4.5 - Trama tipo 2.

O tipo de mensagem 3, presente na figura 4.6, é enviado pela unidade de sensores após ser enviada a recebida a mensagem de confirmação, tipo 0, do nó de sensores. Esta mensagem contém os dados referidos a um sensor. É enviado *id_config* que identifica a configuração, a frequência de aquisição do sensor e a que entrada ou entradas do conversor este está ligado. Como o tamanho da mensagem é variável também é enviado o tamanho desta.

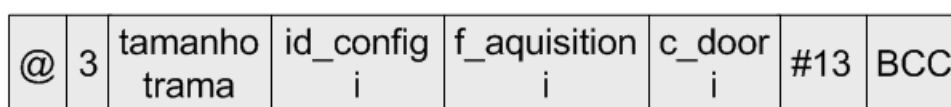


Figura 4.6 - Trama tipo 3.

O tipo de mensagem 5 é enviado pelo nó de sensores para a estação central com o valor da aquisição feita pelo conversor AD ao sensor que corresponde o *id_config* que também é enviado.

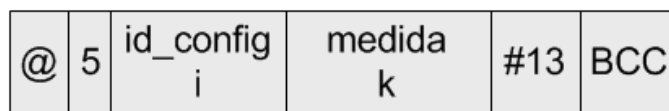


Figura 4.7 - Trama tipo 5.

O tipo de tramas 3 é enviado sequencialmente, em que cada trama corresponde a uma configuração para cada sensor.

Microcontrolador

O microcontrolador escolhido, ATmega8, foi programado com código que cumpre o algoritmo presente na figura 4.8. Este algoritmo começa por referir a inicialização de variáveis. Para este microcontrolador foi necessário configurar os registos que possibilitam a comunicação SPI, RS-232C, uma rotina de interrupções e um *timer*.

Após ser activado o ATmega8 envia para a unidade central um código único que o identifica. Aplicação de registo de dados consulta a BD e envia para o nó de sensores, ao qual pertence o circuito de aquisição, todos os códigos de configurações que este dispositivo tem. Entretanto é inicializado um *timer*, que caso ultrapasse os 30 segundos gera um *time out* e volta a enviar a trama do tipo 1 à unidade central.

Quando o *Atmega8* recebe a trama 2 com as suas configurações. Enquanto aguarda as configurações específicas de cada sensor é reiniciado o *timer*. Caso o tempo seja excedido o *Atmega* volta ao estado inicial e envia a sua trama com o seu código.

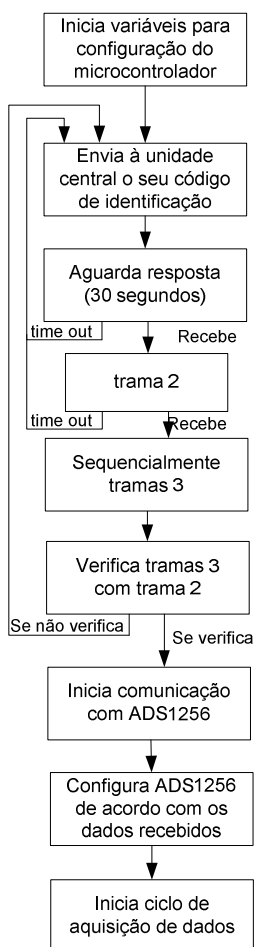


Figura 4.8 - Programa do microcontrolador.

Se o microcontrolador começar a receber sequencialmente as mensagens do tipo 3, este vai registrando na estrutura de dados que foi criada, no Atmega8 para guardar as configurações de todos os sensores que este circuito tem de medir. Esta estrutura será usada nos estados seguintes para a comunicação com o ADS1256, para que este receba os comandos corretos.

Após receber a quantidade de tramas tipo 3 que corresponde ao número de configurações enviadas pela trama 2 o microcontrolador vai verificar se estas correspondem as configurações da trama 2. Caso não correspondam o microcontrolador volta ao estado inicial e envia a trama do tipo 1.

Se as tramas foram bem recebidas é inicializada a comunicação com o conversor AD. Para ser iniciada a comunicação é necessário configurar registos e enviar um determinado número de comandos. Os comandos enviados configuram o modo de funcionamento deste e a sincronizam o ATmega8 com o ADS1256.

De seguida é iniciado o ciclo de aquisição de dados do conversor AD descrito na figura 4.9.

ADS1256

Apesar da aquisição de dados ser realizada pelo conversor AD, este ciclo de aquisição é gerido pelo microcontrolador.

Após configuração do conversor AD é iniciado o ciclo de aquisição da figura 4.9. Antes do início deste ciclo o ATmega8 enviou a frequência de aquisição a que este tem de operar. Tal como é referido em no início deste subcapítulo esta frequência é a mesma para todos os sensores que implica que sejam feitas medições desnecessárias para sensores configurados com frequências de aquisições mais baixas.

Este ciclo de aquisição é iniciado quando o sinal DRDY do conversor AD é activo. Este comando significa que o conversor finalizou um ciclo de conversão dos dados e está pronto a iniciar novo ciclo de conversão.

Após DRDY ser activado, é enviado o comando WREG que escreve qual a porta do conversor AD a ser lida neste ciclo. Para o microcontrolador saber qual a porta a ser lida consulta a estrutura de dados com todas as configurações dos sensores, acima referida.

De seguida são enviados os comandos SYNC, WAKEUP, RDATA, em que o SYNC serve para sincronização, WAKEUP serve para começar a conversão AD, e o RDATA é o comando para leitura dos dados da conversão. Entretanto o sinal DRDY é colocado a 1.

Desde o envio do comando RDATA até o conversor AD começar a enviar dados da medida é necessário espera o tempo t_6 imposto pelo *hardware* ADS1256. Este tempo é calculado através da frequência de aquisição do conversor e da frequência do relógio que este utiliza.

Depois de ter esperado o tempo t_6 é necessário enviar sinal de relógio via SPI para ser possível receber os dados adquiridos pelo conversor AD.

No final do envio dos dados é necessário esperar t_{11} , tempo imposto por *hardware*, que tem de existir de intervalo entre dois ciclos de leitura.

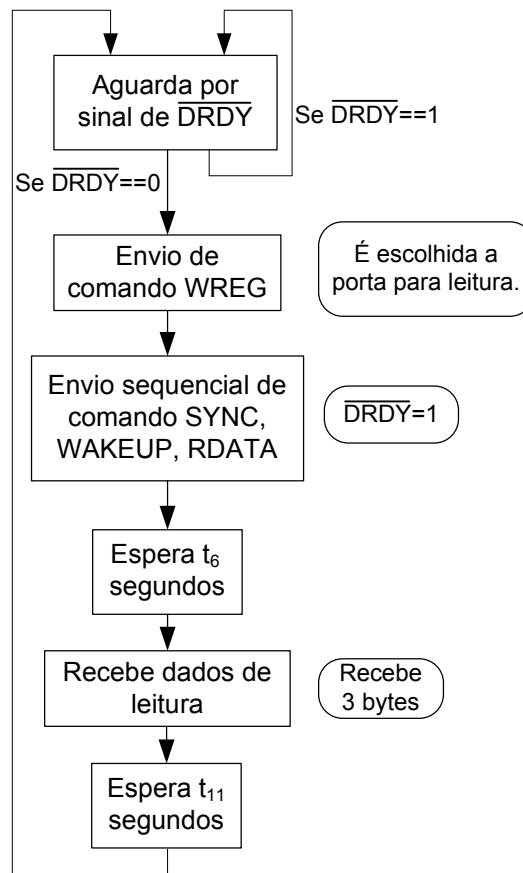


Figura 4.9 - Ciclo de Aquisição de dados do ADS1256.

Alimentação

O nó de sensores suporta todas as alimentações de todos os sensores a ele ligados e dos dispositivos que dele fazem parte, entenda-se Wiprot, Atmega8, ADS1256 e electrónica necessária para o funcionamento correcto destes dispositivos.

As componentes deste sistema têm requisitos de alimentação muito variados, pois é necessário suportar alimentação dos sensores e de toda a electrónica do nó de sensores e dos circuitos de condicionamento dos sensores que vão desde a necessidade da existência de tensões de -15V, +15V para os circuitos auxiliares de condicionamento, até 24V para alimentar os sensores passando por 3,3V e 5V para os restantes circuitos electrónicos.

Para facilitar a operação do sistema optou-se por criar fontes de alimentação internas para todas estas necessidades sendo a alimentação exterior única a 24V.

Isto permite que o cabo de alimentação e os cabos de transmissão de sinal tenham um conector único. Com isto simplifica-se o problema da multiplicidade e da complexidade das ligações que é exigida até ao momento.

4.2.2 - Aplicação de Registo de Dados

A aplicação de registo de dados é responsável por interagir com os nós de sensores conforme o protocolo de comunicações explicado na subsecção 4.2.1. Nesta aplicação realizadas algumas operações sobre a BD. São inseridos os dados das medições feitas pela *intranet*. É consultada uma informação necessária para configuração dos nós de sensores.

Implementação

Como é referido no capítulo anterior para uma facilidade de interacção com a *intranet* foi construídos pequenos módulos que permitem compreender se o funcionamento da referida aplicação é o correcto. A aplicação prevê três módulos, a comunicação TCP/IP, a comunicação com Base de Dados e ainda uma comunicação via porta serie.

A comunicação via porta serie não será aqui aprofundada porque não faz parte do funcionamento normal do sistema. Esta opção foi introduzida para facilitar a configuração dos microcontrolador e das WiPort's.

Com o módulo SQL, presente na figura 4.10, é possível realizar a *query* sobre a BD que se pretende. O resultado desta *query* é apresentado na mesma janela. Para as situações onde não é gerado nenhum resultado da operação sobre a BD o utilizador consegue perceber se a *query* foi bem sucedida através de um *Label* que aparece junto do botão *Execute*.

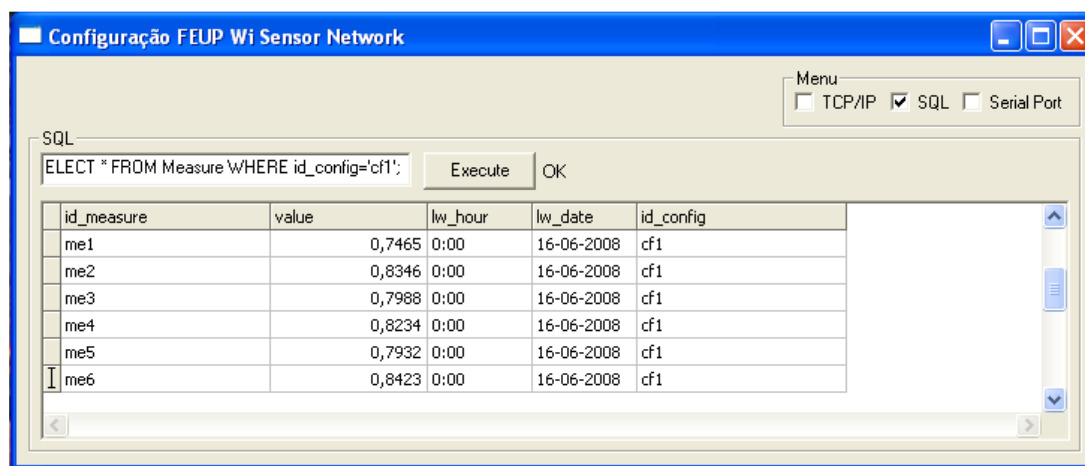


Figura 4.10 - Ligação com a BD da Aplicação de Registo de Dados.

Através do módulo TCP/IP, presente na figura 4.11 é possível visualizar para os três nós de sensores o estado das comunicações. A figura

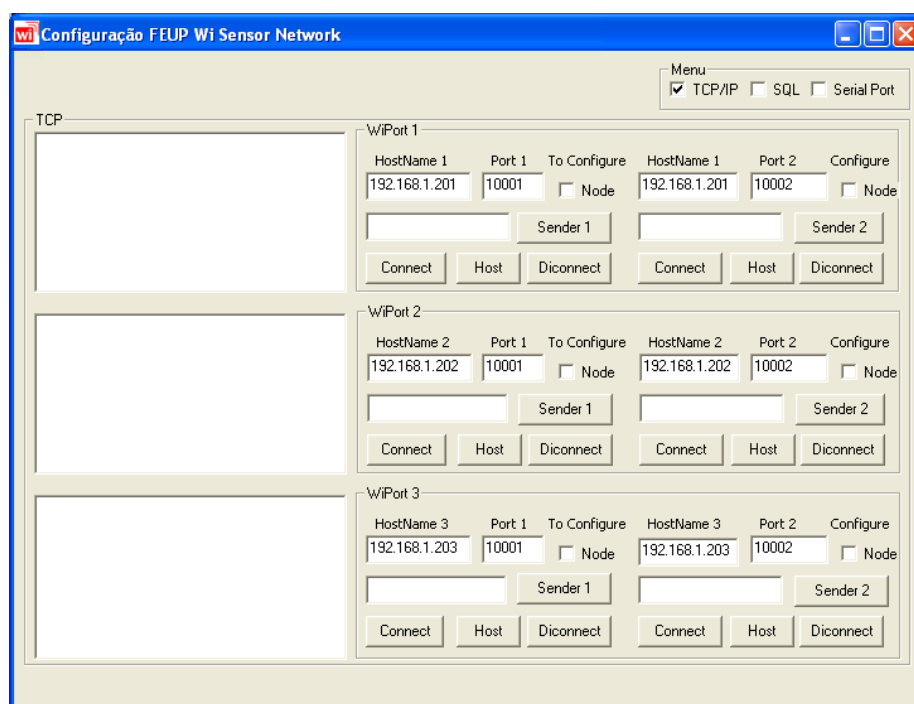


Figura 4.11 - Ligação com a *intranet* da Aplicação de Registo de Dados.

Neste modulo é possível verificar o estado as comunicações com cada nó de sensores, é possível configurar e/ou configurar os nós de sensores, é possível estabelecer e desactivar conexões, é possível enviar uma *string* de dados para o microcontrolador presente no nó de sensores.

4.2.3 - Aplicação do Utilizador

Os diferentes níveis de acesso têm permissões diferentes que restringem o acesso a alguns tipos de dados.

Para o nível sem autenticação é possível consultar dados gerais sobre as estruturas monitorizadas presentes na BD, como imagens, a história e a descrição da estrutura. Também é possível aceder aos conteúdos informativos do LABEST.

Para o nível de acesso utilizador, para além de ser possível consultar os dados gerais da estrutura, é possível consultar os ensaios de monitorização por ensaio e por fase. Após a escolha da fase e do ensaio é possível consultar a arquitectura e as secções. A arquitectura é a arquitectura do sistema de monitorização, que mostra a forma como foi realizada a distribuição dos sensores por toda a estrutura. A página das secções permite consultar e confrontar os dados recolhidos pelos vários sensores apresentados em gráficos ou em tabelas. Para este nível de acesso também é possível consultar, por fase, relatórios realizados pelos especialistas envolvidos na monitorização em questão.

Para um utilizador que tenha o nível de acesso gestor, é possível realizar todas as tarefas dos níveis referidos anteriormente. Com este nível de acesso é também possível gerir os ensaios, tendo a possibilidade de inserir novo ensaio, e configurar a disposição de todos os dispositivos da rede por secção. Para além da possibilidade de inserir ensaios também é possível apagar e editar configurações de ensaios. Assim é possível configurar e/ou reconfigurar o sistema de monitorização desde que este ainda se encontre activo.

Para o nível de acesso administrador tem-se a possibilidade de inserir, editar, apagar e consultar todos os dados de todas as tabelas. Este nível de acesso tem de ser restrito pois uma desorganização da BD pode originar um bloqueio de todo o sistema.

Os níveis acesso gestor e utilizador são variáveis conforme o ensaio. Esta flexibilidade permite que uma pessoa possa configurar apenas um ensaio pelo qual é responsável e não configurar os outros ensaios que não sejam da sua responsabilidade. Estes níveis são gerados automaticamente ao ser inserido um novo ensaio na aplicação de utilizador, sendo que o nível de gestor é automaticamente associado ao utilizador que insere novo ensaio.

Apresentação Gráfica

Os valores adquiridos pelos sensores que são inseridos na tabela *Measure* da BD. Nesta tabela tem-se as medições de todos os sensores em todos os ensaios realizados, a forma de como estes valores são distinguidos por ensaio, por nó, por dispositivo, por sensor é feita na tabela *Configuration*. Esta tabela contém a configuração da *intranet* para todos os ensaios realizados e através desta tabela que é realizada a configuração dos nós.

Assim escolhendo a estrutura, a fase, o ensaio, o nó e o sensor é possível visualizar os valores adquiridos pelos sensores como o exemplo da figura 4.3



Figura 4.12 - Gráfico de valores medidos.

Os valores a partir do qual foi criado este gráfico foram dados de experiências de leituras do AD1256 para sensores diferentes, por isso os seus valores dispostos não traduzem nenhum significado físico.

Configuração e reconfiguração do sistema

Para que seja mais fácil ao utilizador configurar todo o sistema de monitorização além de ser possível visualizar os dados e outras informações acerca da estrutura foi adicionada a possibilidade de configurar o sistema a partir desta aplicação. Ou seja, após ser projectado o sistema de monitorização pretendido é possível inserir via aplicação do utilizador as configurações dos nós de sensores, dos sensores a ele ligados, da sua localização e da secção onde estes se encontram.

Essas configurações podem ser inseridas através de um formulário que é gerado pela aplicação do utilizador com todos os dados que são importantes de forma a tornar mais intuitiva e mais prática a configuração e a reconfiguração do sistema.

Assim os utilizadores com nível de acesso gestor, podem configurar toda a monitorização via aplicação *Web*. Após este planeamento estar na BD e todo o sistema estiver montado ao ligar todos os dispositivos o sistema configura todos os nós de sensores conforme os dados para este ensaio foram inserido na BD.

Como a aplicação *Web* está num servidor é possível ter paralelamente diversos utilizadores a realizar diferentes tipos de tarefas. Contudo é importante garantir que a configuração e reconfiguração do sistema seja restrita e que poucos utilizadores tenham permissão para o fazer.

Funcionalidades

Nesta aplicação é possível consultar diversas informações, editar, inserir, e eliminar dados sobre ensaios realizados na intranet. As operações não estão acessíveis a todos os tipos de utilizador da aplicação, existindo portanto níveis de acesso para ser realizada essas restrições.

As consultas que podem ser feitas são dos mais variados tipos, desde consulta de todo o material existente até consulta de sistemas de monitorização a decorrer e de sistema de

monitorização que já não se encontram activos. Os sistemas de monitorização que podem ser consultados contêm o plano de monitorização bem como quais os dispositivos que foram utilizados e onde esses mesmos dispositivos se encontravam.

Na aplicação *Web* é possível visualizar os valores de cada sensor por estrutura, por fase, por ensaio, por nó e por dispositivo. Esta visualização também pode ser ajustada ao intervalo de tempo que o utilizador pretender. Também é possível confrontar valores de vários sensores no mesmo gráfico, estando esses valores assinalados a cores distintas.

Nesta aplicação também é possível consultar os dados em formato de tabela, para situações que interessem ao utilizador saber os valores medidos no intervalo de tempo que este pretender.

4.3 - Testes e Análise dos Resultados

Neste subcapítulo são apresentados testes de comunicações entre dois dispositivos da intranet com o objectivo de verificar o alcance das comunicações e testes com o objectivo de verificar o nível de permeabilidade das comunicações através das barreiras existentes em infra-estruturas.

Aqui não são apresentados os testes de todas as aplicações de *software*, a aplicação de registo de dados e a aplicação do utilizador. Os testes destas aplicações foram realizados durante a construção das mesmas e validados de acordo com o funcionamento pretendido para as mesmas. Os sensores considerados, como já foi referido anteriormente foram testados em laboratório juntamente com os respectivos circuitos de condicionamento.

O funcionamento do protocolo de comunicações da aplicação de registo de dados com os nós de sensores foi testado em laboratório, e foi validado o seu correcto funcionamento de acordo com as funções descritas na subsecção 4.2.2.

Foram realizados vários testes com os sensores, nós de sensores e com a aplicação de registo de dados que permitiram verificar que desde a aquisição do valor do sensor até a inserção dessa mesma medida na BD era realizada correctamente. Aqui também foi possível verificar que a aplicação de registo de dados também configura correctamente todos nós de sensores, baseando-se nas configurações presente na BD.

Assim com todo o sistema a funcionar correctamente foi planeado um ensaio juntamente com o DEC para testar o sistema em ambiente real, contudo este teste não foi possível porque não houve disponibilidade de todo o material a tempo de realizar o ensaio antes da apresentação da tese. No entanto o planeamento está descrito neste subcapítulo pois é em tudo idêntico ao planeamento a realizar para futuras monitorizações em infra-estruturas.

Parte dos testes foram realizados no LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural), pois neste laboratório é possível simular o ambiente onde se pretende que o sistema seja implementado. O LABEST é um dos laboratórios do DEC da FEUP.

Os testes que serviram para comprovar o funcionamento dos dispositivos electrónicos foram realizados em laboratório de electrónica.

4.3.1 - Teste de Alcance de Comunicação

O teste de alcance de comunicação tem uma grande importância para este sistema. Pois para aplicar o sistema em infra-estruturas é necessário compreender se o material que as constitui afecta as comunicações do sistema. Estas infra-estruturas podem ser constituídas por diferentes materiais, mas apenas alguns constituem uma barreira às comunicações sem fios como por exemplo o aço e as ligas metálicas.

As pontes e viadutos, em virtude da sua extensão, são o caso mais típico de aplicação deste sistema. No caso das pontes em caixão¹³, grande parte do sistema de monitorização é instalado no seu interior. Este caixão, tal como os pilares e tabuleiro das pontes são construídos em betão armado, com malhas de aço onde o tipo de malha varia com os esforços a que os elementos estão sujeitos. Assim, com este ensaio pretende-se verificar se as comunicações do sistema sem fios construído atravessam as paredes que constituem o caixão.

Como também se pretende que o sistema consiga comunicar para diferentes tipos de infra-estruturas é importante avaliar questões como o alcance dessa mesma comunicação e se a direcionalidade das antenas é proveitosa para esta aplicação.

Foram realizados testes no laboratório H102 do edifício H da FEUP. Neste laboratório está instalado o LABEST e onde são realizados outros testes com sistemas de monitorização de infra-estruturas. Assim neste laboratório é possível ter uma ideia próxima do real, do ambiente onde se pretende que o sistema funcione.

Foram realizados diferentes tipos de teste. No teste inicial tentou-se perceber qual o alcance das comunicações e quais as barreiras que as afectaram. No segundo teste tentou-se fazer atravessar uma comunicação através de um piso de betão armado. No terceiro e último teste foi utilizado um *hardware* diferente que suporta *ZigBee*. Neste ultimo teste também se pretendia medir o alcance das comunicações.

Nestes ensaios apenas foram consideradas as medições que foram bem recebidas, isto é, caso tenha ocorrido comunicação mas esta não tenha sido bem interpretada esta não foi considerada para os ensaios aqui realizados.

Teste de Comunicação através de Betão Armado

Com este ensaio pretende-se simular a comunicação de dentro para fora do caixão, isto é, se a comunicação sem fios atravessa uma parede de betão armado.

Para ser possível uma onda electromagnética atravessar uma superfície metálica é necessário que a abertura dessa superfície metálica seja superior ao comprimento de onda da onda electromagnética. Caso esta condição não se verifique a onda é reflectida pela superfície metálica.

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.1)$$

onde λ é o comprimento de onda, c a velocidade da luz e f a frequência.

Sabendo que a frequência a que opera a *Wiport* é de 2,4GHz, frequência esta definida pela norma IEEE802.11b/g, e que a velocidade da luz é de 3×10^8 m/s, tem-se:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{2,4 \times 10^9} = 12,5 \text{cm} \quad (4.2)$$

¹³ Uma viga em caixão é uma viga com secção transversal com contorno fechado, usualmente com dimensões visitáveis.

Assim tem-se que a comunicação do sistema só atravessa superfícies metálicas com abertura superior a 12,5cm. Caso contrario as comunicações são reflectidas.

Para verificar se esta Lei se aplica neste tipo de ambientes, foi planeada uma simulação do ambiente do caixão onde se tentou comunicar através de uma superfície constituída por betão armado.

Este ensaio foi então realizado no laboratório H102 onde se tenta com dois nós comunicar através de uma laje constituída por betão armado. Tem-se um nó no ponto 2 outro nó no ponto 3 e como é possível perceber através da figura 4.16 os nós estão alinhados segundo o eixo vertical.

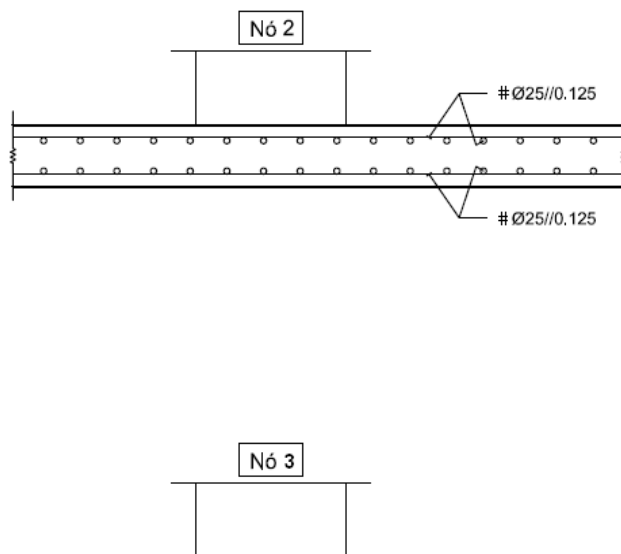


Figura 4.13 - Ensaio de comunicação através de Betão Armado.

Tal como é possível ver na figura, a laje contém uma armadura construída por malhas de 12,5x12,5cm de cabo de aço com 25mm de diâmetro, que implica que esta armadura contenha uma janela de 10x10cm de abertura.

Este ensaio foi realizado numa zona do laboratório distante, cerca de 25m, da zona de abertura que dá que dá acesso ao piso superior. O objectivo desta distância era tentar garantir que a comunicação dos nós não pudesse ser através de outro caminho a não ser tentar atravessar o piso.

Após várias tentativas, não foi possível obter nenhum tipo de comunicação entre os dois nós. Assim a Lei da Física acima enunciadas aplica-se inteiramente, pois como tem-se uma janela de 10cm, esta não é superior ao valor de λ na equação 4.2 e esta é a razão pela qual não se consegue estabelecer qualquer tipo de comunicação entre nós de sensores colocados em lados opostos da laje.

Assim pode-se constatar que o betão armado não permite, comportando-se como uma superfície reflectora, a passagem de comunicações deste sistema sempre que se tiver com janelas de abertura igual ou inferior a 12,5cm.

Teste de Alcance entre dois nós da rede

A figura 4.14 apresenta a planta do laboratório H102, que tem uma área próxima de 800m². Nesta figura pode-se visualizar dois pisos deste laboratório, piso 1 e piso 0. A passagem de um piso para o outro pode ser feita pelo interior do laboratório. Esta passagem fica situada na zona do quadrado da figura e tem uma abertura de cerca de 25 m².

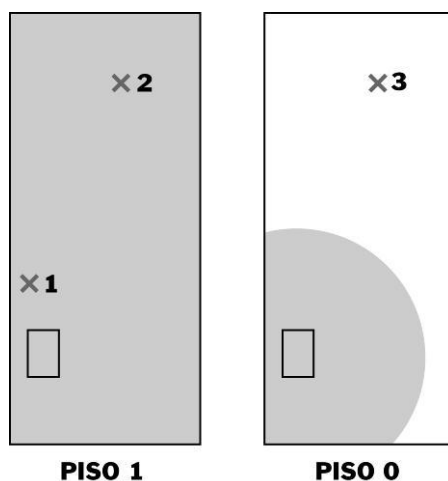


Figura 4.14 - Teste de comunicação no interior do laboratório H102.

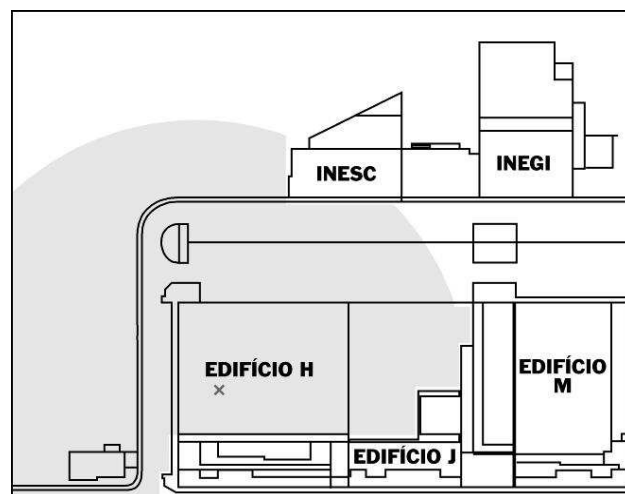


Figura 4.15 - Ensaio de alcance de comunicações.

Os pontos 1, 2, 3 da figura 4.14 são os locais onde estiveram presentes os nós. Para este ensaio foram utilizados o nó 1 e um nó móvel não representado que testou o alcance das comunicações da rede nas comunicações entre nós.

Na figura 4.15 tem-se o resultado do teste de alcance de comunicações, onde o ponto representado no edifício H corresponde ao ponto 1 da figura 4.14. O alcance a que foi detectado comunicação esta a cinzento no mapa apresentado na figura 4.15. A zona a cinzento tem uma distancia máxima do ponto de cerca de 100m.

Neste ensaio pode-se verificar que as comunicações atravessaram as paredes dos laboratórios do edifício H sem problemas. Como as paredes internas do edifício H são feitas de alvenaria e as paredes exteriores são feitas em placas de betão pode-se constatar que as paredes constituídas por estes materiais não provocam uma degradação de sinal assinalável e permitem comunicação para o tipo de sinal utilizado neste sistema.

Contudo, as paredes da frente do edifício H onde estão presentes diversos gabinetes não foi possível estabelecer comunicação. Para este caso não é possível estabelecer realização com nenhum tipo de material pois não se sabe a constituição dessas paredes. No entanto, a densidade de paredes e objectos metálicos presente nesta zona do edificio H é bastante superior à encontrada no laboratório H102. Esta razão pode justificar o enfraquecimento do sinal e por essa razão a não existência de comunicação.

Relativamente à figura 4.14 pode-se verificar não houve problemas nas comunicações no piso 1. Ao contrário das comunicações do piso 1, as comunicações demonstraram não ter um grande alcance no piso 0 com o nó situado na posição 1. Como é possível ver na figura 4.14 a comunicação no piso 0 só se dá perto da abertura existente do piso 1 para o piso 0. Significa portanto que mais uma vez se pode verificar que a comunicação tem dificuldades em atravessar o piso.

Testes de Alcance com Zig-Bee

Como havia disponibilidade da utilização de outro *hardware*, o CC2431, que suporta o protocolo ZigBee para a camada de ligação de dados, também foram realizados testes de comunicações com para ser possível comparar resultados.

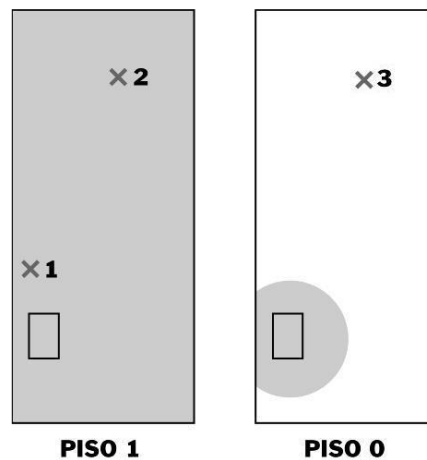


Figura 4.16 - Ensaio realizado com hardware que suporta ZigBee.

O teste realizado com este equipamento permitiu constatar os mesmos resultados a nível de comunicação através da laje de betão armado. Isto é, não se consegue transmitir sinal do piso 0 para o piso 1 com dois dispositivos localizados nos pontos 2 e 3. Este resultado seria de esperar pois este equipamento também trabalha na frequência de 2,4 GHz.

Outro resultado importante deste ensaio está no facto de que a abrangência de sinal no piso 0 é menor que a abrangência do sistema implementado. Sabendo que ambas as antenas são omnidireccionais, a justificação para este resultado encontra-se no facto da potência de transmissão não ser igual para os dois *hardware's*. Após consulta das datasheet's dos dois componentes verificou-se que a Wiprot emite sinal com 14dBm, enquanto o dispositivo CC2431 no máximo emite a 10dBm, que é o valor permitido pela lei portuguesa, para estes sistemas tipo de aplicações.

4.3.2 - Preparação do Sistema para o Ensaio Geral

O ensaio geral conforme foi dito em cima, já está planeado, sendo que falta ligar todo o material e retirar os resultados desse mesmo ensaio. Este ensaio irá ser realizado no laboratório H102. Irão ser monitorizadas duas estruturas em ao mesmo tempo, uma estará a ser monitorizada por dois nós e outra por apenas um nó.

Cada nó de sensores é constituído por um circuito de aquisição e por uma Wiprot. Assim tem-se em cada nó que apenas é permitida a utilização de oito entradas para os diversos sensores.

Implementação

Para ser possível confrontar resultados está previsto ser montado um Datalogger junto de uma das estruturas a monitorizar. Todos os sensores referidos na secção sensores serão aqui utilizados. A distribuição dos sensores está presente na figura 4.18 para a estrutura 1, enquanto que para a figura 4.19 apresenta a distribuição de sensores para a estrutura 2.

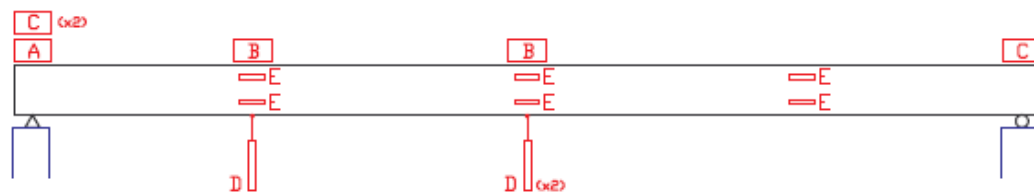


Figura 4.17 - Estrutura 1 do ensaio geral.

Legenda:

- A MEMS ADIS16201
- B MEMS
- C Inclinómetro
- D LVDT corrente
- E Extensómetro



Figura 4.18 - Estrutura 2 do ensaio geral.

Legenda:

- C Inclinómetro
- D LVDT corrente
- F LVDT tensão
- G Temperatura
- H Humidade

Toda a informação relativa a este ensaio está presente na tabela 4.2 da BD, onde é possível gerar os dados da forma mais comum ao utilizador.

Tabela 4.2 - Tabela com configuração do ensaio geral.

Configuracao	Seccao	Testes	No	Dispositivos	Sensores	Frequencia de aquisicao	Entradas	Localizacao
cf11	seccao_1 extensao	No 1		ADS1256 A	Vishay 250UW	100	01	a meio da viga pre-esforçada
cf12	seccao_1 extensao	No 1		ADS1256 A	Vishay 250UW	100	23	a meio da viga pre-esforçada
cf13	seccao_1 extensao	No 1		ADS1256 A	Vishay 250UW	100	45	viga pre-esforçada junto do pilar poente
cf14	seccao_1 rotacao	No 1		ADS1256 A	LSOC 1L	100	6	viga pre-esforçada junto do pilar nascente
cf15	seccao_1 rotacao	No 1		ADS1256 A	LSOC 1L	100	7	viga pre-esforçada junto do pilar poente
cf21	seccao_1 deformacao	No 2		ADS1256 B	LVDT_RDP	100	0	a meio da viga pre-esforçada
cf22	seccao_1 deformacao	No 2		ADS1256 B	LVDT_RDP	100	2	a meio da viga pre-esforçada
cf23	seccao_1 aceleracao	No 2		ADS1256 B	ADXL203	100	13	a meio da viga pre-esforçada
cf24	seccao_1 aceleracao	No 2		ADS1256 B	ADXL330	100	456	a meio da viga pre-esforçada
cf25	seccao_1 aceleracao	No 2		MEMS ADIS16201	ADIS16201	100		viga pre-esforçada junto do pilar poente
cf31	seccao_2 rotacao	No 3		ADS1256 C	LSOC 1L	100	0	viga do lado norte
cf32	seccao_2 rotacao	No 3		ADS1256 C	LSOC 1L	100	1	viga do lado norte
cf33	seccao_2 deformacao	No 3		ADS1256 C	LVDT_MONITRAN	100	23	viga do lado norte
cf34	seccao_2 Temperatura	No 3		ADS1256 C	NTC	100	45	viga do lado norte
cf35	seccao_2 humidade	No 3		ADS1256 C	HIH	100	6	viga do lado norte
cf36	seccao_2 deformacao	No 3		ADS1256 C	LVDT_RDP	100	7	viga do lado norte
cf41	seccao_1 extensao	sem referencia	DataTaker DT-500	Vishay 250UW	100			viga pre-esforçada junto do pilar nascente
cf42	seccao_1 extensao	sem referencia	DataTaker DT-500	Vishay 250UW	100			viga pre-esforçada junto do pilar nascente
cf43	seccao_1 rotacao	sem referencia	DataTaker DT-500	LVDT_MONITRAN	100			a meio da viga pre-esforçada
cf44	seccao_1 deformacao	sem referencia	DataTaker DT-500	LSOC 1L	100			viga pre-esforçada junto do pilar poente

De referir que na coluna nó nas linha onde aparece “sem referência” deve-se ao facto de destes sensores estarem ligados a um *DataTaker* e não a um conversor AD.

A alimentação de todos os sensores é feita através dos circuitos de condicionamento. Estes circuitos são alimentados pelo circuito de aquisição dos nós de sensores ao qual vão ser ligados para a adquirir os sinais medidos.

4.4 - Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a forma de como as funcionalidades do sistema foram implementadas. Aqui são apresentados os algoritmos implementados para cada um dos dispositivos.

Também foi apresentado o protocolo de comunicações que rege a comunicação do nó de sensores com a unidade central.

Foram realizados testes a todos os dispositivos, a todas as aplicações deste sistema e as relações entre estes.

Os testes foram realizados em ambiente próprios que tentam simular o funcionamento do dispositivo num ambiente próximo do ambiente para o qual foi desenvolvido.

A análise aos testes de abrangência revela que caso a infra-estruturas contenha uma armadura com uma janela igual ou inferior a 12,5cm as comunicações deste sistemas não conseguirão atravessar essa armadura, sendo reflectidas.

Também foi possível constatar que as comunicações têm um alcance elevado, cerca de 100m, contudo as comunicações não foram testadas em infra-estruturas reais pelo que o alcance nas mesmas poderá ser diferente. Caso seja mais reduzido pode-se contornar a questão colocando antenas direccionais, mas para esta solução é necessário ter um cuidado especial com a direcionalidade das antenas, pois estas podem implicar um mau funcionamento do sistema caso não estejam bem alinhadas.

Capítulo 5

Conclusão e Futuros Desenvolvimentos

5.1 - Principais Conclusões

Para Como principal conclusão deste trabalho está demonstrada a possibilidade de criar uma rede de instrumentação sem fios para estruturas a custos reduzidos e com elevada performance.

Recorde-se que a versatilidade da rede é uma das características mais relevantes a observar dada a necessidade de cada sistema de monitorização se adequar à estrutura a monitorizar.

A capacidade que a rede tem para incorporar toda a gama de sensores usados em Engenharia Civil, adaptando respectivos sinais de saída, e garantindo as frequências de leitura mais adequadas para cada um foi um dos requisitos essencial que também foi cumprido.

Este protótipo também permite a sua rápida montagem evitando longos processos de montagem fios de comunicação entre as diversas partes do sistema de monitorização

A aquisição de dados neste sistema permite visualizar os dados de cada sensor *online*, o que é especialmente valorizado pelos especialistas de monitorização de estruturas.

Só foi possível conceber um sistema com características tão interessantes com o permanente envolvimento de seus utilizadores finais, que foram inexcedíveis no empenho e atenção ao bom funcionamento do sistema.

5.2 - Futuros Desenvolvimentos

Para o futuro desenvolvimento deste sistema lançam-se de seguida algumas possibilidades de melhorias que em muito poderão torna-lo mais flexível e robusto.

É necessário desenvolver um sistema de redundância para a energia da unidade central, pois caso a alimentação desta falhe, todo o sistema fica inoperável.

Uma outra linha de trabalho passa pela melhoria da ligação sensor conversor AD. O objectivo é criar um elemento *standard* que permite a ligação qualquer que seja o sensor ao conversor AD.

Uma outra linha de evolução passa por ser possível programar a amostragem de medidas de vários sensores. Para ensaios de longa duração, segundo o estado da Arte existe vantagem em agregar um conjunto de dados e periodicamente envia-los para a unidade central.

Não foram previstas situações de alarme na aplicação. Em futuros desenvolvimentos poderá ser interessante prever-se a introdução de alarmística para situações de comportamento anormal da estrutura.

O mesmo pode ser dito do sistema de monitorização onde poderão ser introduzidos alarmes para o comportamento anormal de aquisição de dados.

A solução adoptada para este protótipo foi a de colocar a BD num servidor *PostgreSQL*, mas a solução para a BD para um sistema mais avançado deverá ser encarada a possibilidade de desenvolver um esquema misto onde periodicamente serão guardados os dados adquiridos num servidor.

Como é evidente o presente trabalho baseia-se no desenvolvimento de um protótipo. Todas as tarefas de optimização da passagem de um protótipo para um sistema pré industrial envolvem trabalhos trabalho de melhoria de selecção de componentes mais adequadas, processos de construtivos optimizados e uma bateria de testes em ambientes reais que validem a solução.

Anexos

A. Arquitectura do Protótipo

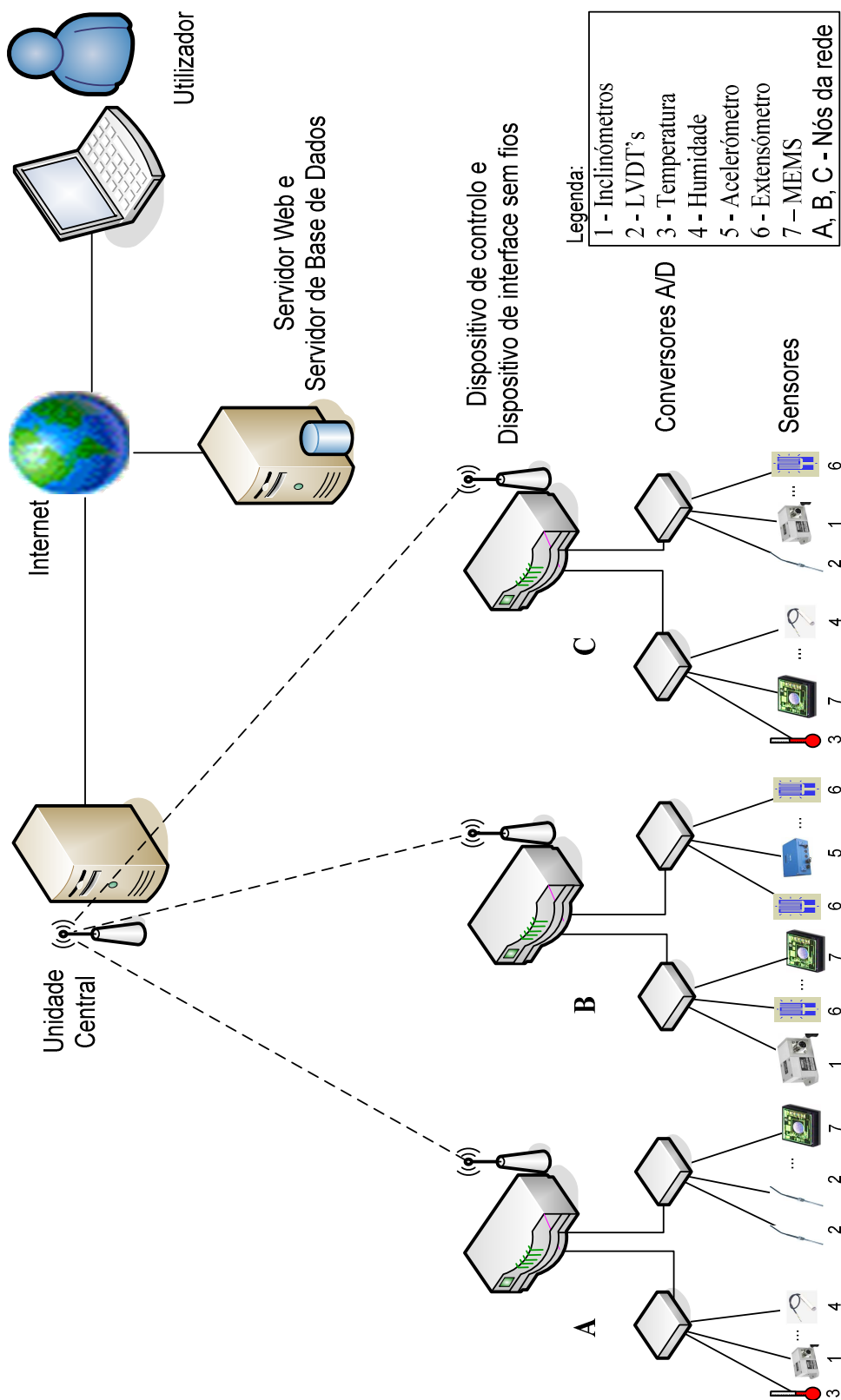


Figura 6.1 - Arquitectura do protótipo projectado.

B. Esquema da Base de Dados

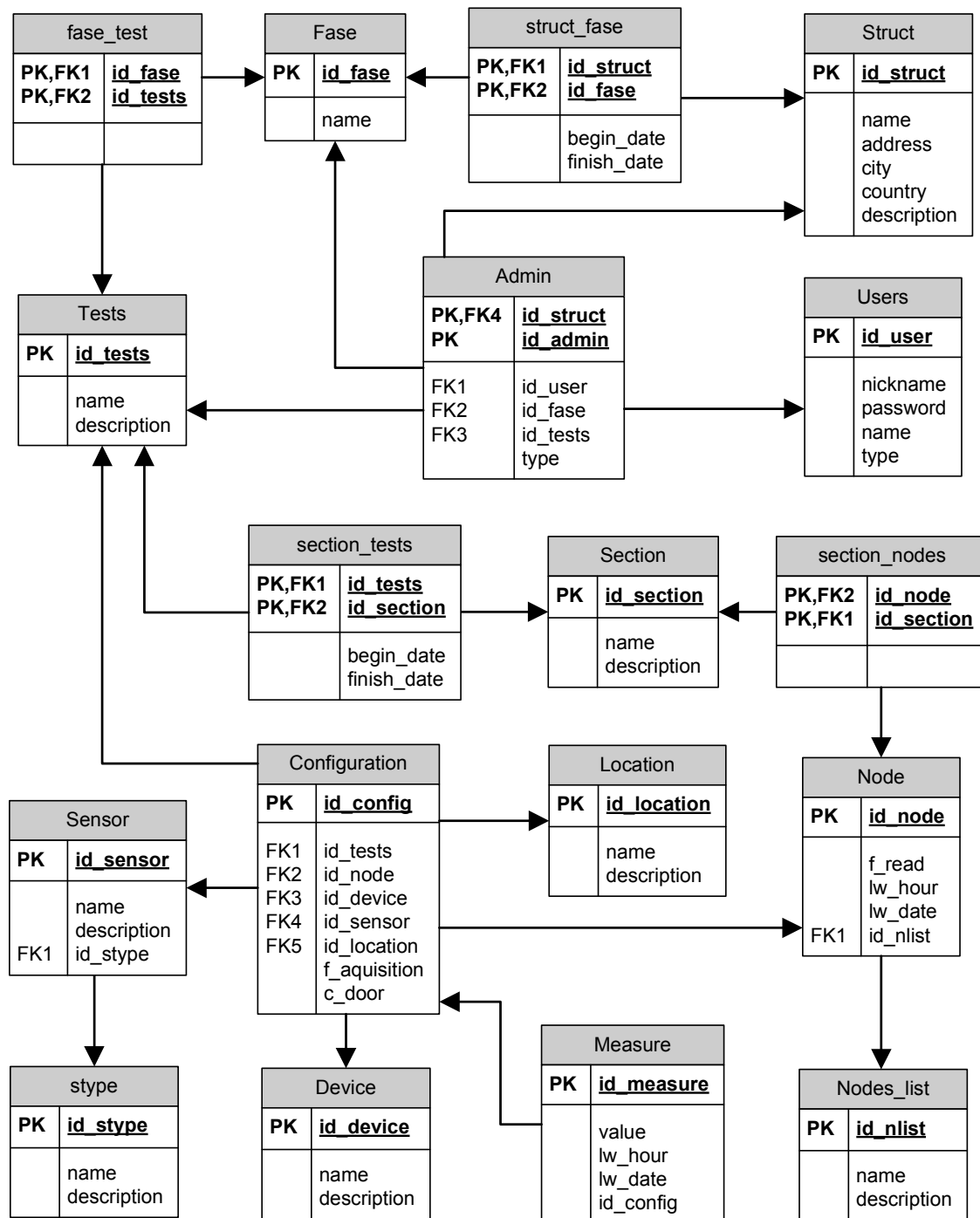


Figura 6.2 - Esquema da Base de Dados.

C. Esquema da Página Web

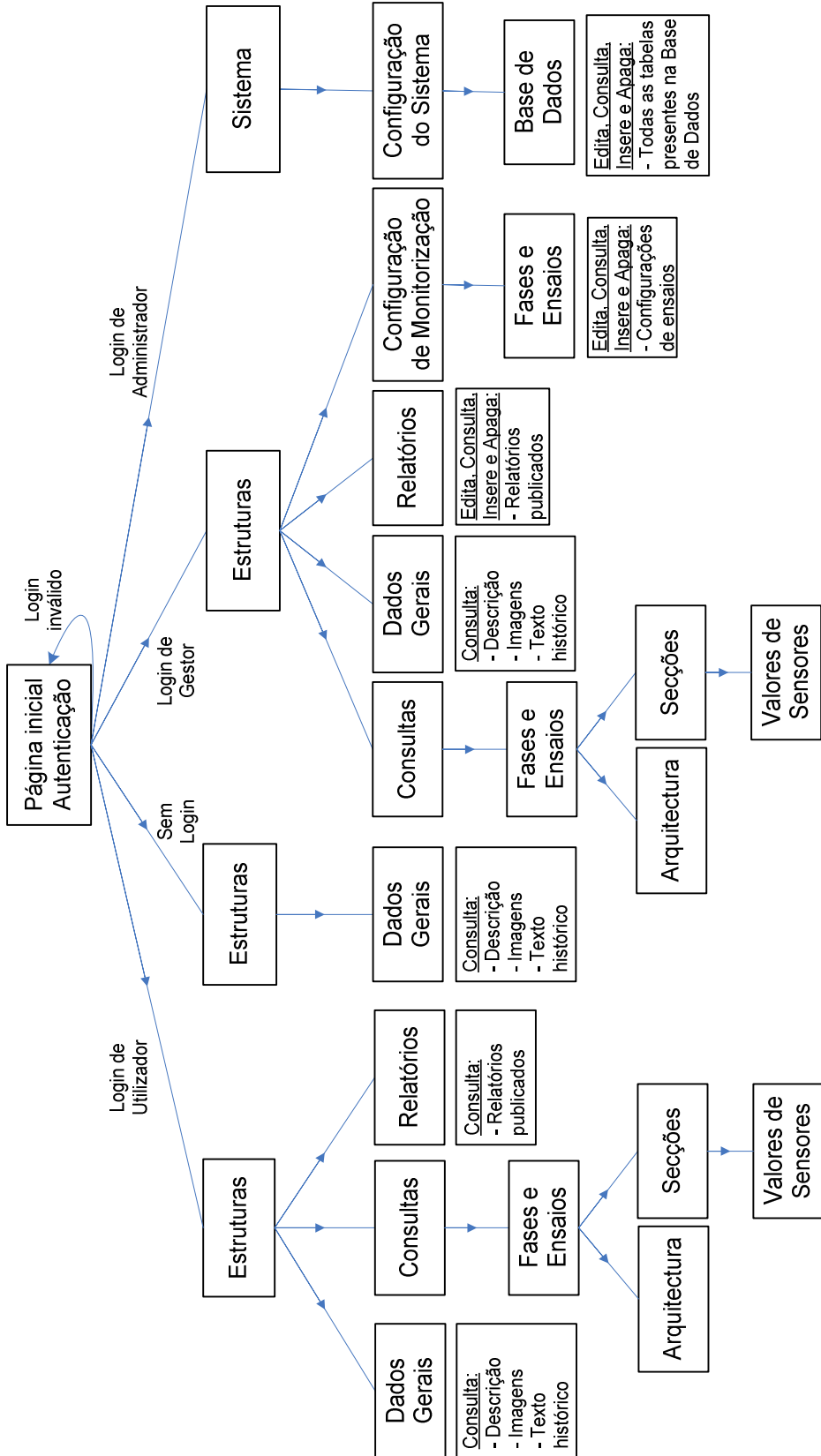


Figura 6.3 - Esquema da página Web.

Referências

- [1] C.-Y. Choung, S.P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges", Proceedings of IEEE (2003)
- [2] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless Sensor Network Survey, Computer Networks" (2008), doi: 10.1016/j.comnet.2008.04.002
- [3] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing", IEEE Computer, vol. 34, pp. 57-66, Aug. 2001.
- [4] C. Grosse, "Monitoring of structures using wireless sensors and acoustic emission techniques." In "Challenges for Civil Construction" (A. Marques Torres et al., Eds.), Proc. of the int. conf. CCC2008, ISBN: 978-972-752-100-5, pp 28-38
- [5] B. Deb, S. Bhatnagar, and B. Nath, "A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management", Dept. Comput. Sci. , Rutgers Univ., Tech. Rep. DCS-TR-441, 2001
- [6] D. Ganesan, A. Cerpa, W. Ye, Y. Yu, J. Zhao, D. Estrin, "Networking issues in wireless sensor networks.", J.Parallel Distrib. Comput. 64 (2004) 799-814
- [7] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice Hall, New Jersey, 2003
- [8] E. Mackensen, W. Kuntz, "Intelligente, autarke Mikrosysteme für drahtlose Sensor-Aktor-Netzwerke VDI/VDE-Gesellschaft (Hrsg.): Sensoren und Messsysteme" 2004, VDI-Berichte 1829, Düsseldorf, 2004.
- [9] M. Krüger, C. Grosse, "Structural Health Monitoring with Wireless Sensor networks." Otto-Graf-Journal 14 (2004), pp 77-90
- [10] C. Grosse, S.D. Glaser, M. Krüger, "Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS", Proc. SPIE Vol. 6174, Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems (Eds. Masayoshi Tomizuka, Chung-Bang Yun, Victor Giurgiutiu), pp. 407-418.
- [11] ANACON, "Quadro Nacional de Atribuição de Frequências". Disponível em www.anacom.pt. Acesso em 1/Maio/2008.
- [12] F. Finck, J. Kurz, C. Grosse, H.-W. Reinhardt "Improvement of AE technique using wavelet algorithms, coherence functions and automatic data analysis" Construction and Building Materials 18 (2004) 203-213
- [13] G.J. Pottie, W.J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors", Common. ACM 43 (5) (May 2000) 51-58
- [14] W.-S. Jang, M.J. Skibniewski, et al., "Wireless sensor networks as part of a web-based building environmental monitoring system", Automation in Construction (2008)

- [15]William Stallings, “Data and Computer Communications”, Prentice Hall, New Jersey, 2007
- [16]C. Grosse, F. Finck, J. Kurz, H.-W. Reinhardt, “Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering.” Proc. 26th European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE), DGZfP: Berlin, BB90 (2004), pp 843-856.
- [17]C. Grosse, S.D. Glaser, M. Krüger: “Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS”. Proc. SPIE Vol. 6174, Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems (Eds. Masayoshi Tomizuka, Chung-Bang Yun, Victor Giurgiutiu), pp. 407-418
- [18]S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves , S. Glaser, M. Turon, “Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the 6th IPSN 2007, pp. 254-263.
- [19]Nanotron Technologies GmbH: nanoNET Chirp-based wireless network. nanoNET White Paper, Version 1.0.
- [20]Pallás-Areny, Ramón; ”Analog signal processing”, Wiley-Interscience, New York, 1999
- [21]Postgresql. Disponível em <http://www.postgresql.org>. Acesso em 17/Abril/2008.
- [22]MySQL. Disponível em <http://www.mysql.com>. Acesso em 17/ Abril /2008.