

MonStruct

Hugo Filipe Rodrigues Cura

MonStruct

Sistema de monitorização de estruturas civis

Setembro de 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

MonStruct

Sistema de monitorização de estruturas civis

Hugo Filipe Rodrigues Cura

Presidente: Prof. Dr. Rui Pedro Duarte Cortesão

Orientador: Prof. Dr. Lino José Forte Marques

Vogal: Prof. Dr. Jorge Nuno de Almeida e Sousa Almada Lobo

Coimbra, 2013

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Lino José Forte Marques, meu orientador, por toda a disponibilidade demonstrada ao longo da elaboração desta dissertação, cujo incentivo e transmissão de conhecimentos foram essenciais para a sua evolução e conclusão.

À minha família, em particular aos meus pais, Joaquim e Lucinda, às minhas irmãs, Dina e Marisa, e à minha avó pelo amor, apoio, incentivo e dedicação transmitidos não só na fase de realização do presente trabalho como ao longo de toda a minha vida.

À Inês por todo o apoio, força e dedicação e ainda pelas leituras cuidadas a esta dissertação.

Aos meus amigos, em particular àqueles que fizeram parte do meu percurso académico.

Resumo

A presente dissertação assenta na concepção e desenvolvimento de um sistema de monitorização de baixo custo para estruturas civis, de utilização e configuração amigáveis, com vista à possibilidade de comercialização. As placas de desenvolvimento de baixo custo estão já massificadas e podem ser utilizadas para agregar e adquirir dados de um conjunto de transdutores apropriados com vista à monitorização de uma estrutura civil.

A necessidade de elevar os níveis de segurança, a sustentabilidade e a eficiência na inspeção e manutenção de estruturas civis incentiva a criação de sistemas alternativos, mas com tantas ou mais capacidades que sistemas industriais, a um custo reduzido.

O sistema trabalhado, composto por microcontroladores Atmel instalados em placas de desenvolvimento Arduino, está apto a comunicar num barramento RS-485 cujos dados sensoriais recolhidos serão não só guardados localmente como também serão enviados para uma plataforma de supervisionamento via GSM. O tratamento final dos dados é feito no servidor que está acessível *online*, a partir de qualquer local com acesso à Internet.

A aplicação de qualquer tipo de algoritmo ou padrão estatístico, com base nos dados recolhidos, pode ser feita a partir da base de dados criada no servidor.

Palavras-chave: monitorização, estruturas civis, microcontroladores, Arduino, sensores, RS-485

Abstract

This dissertation consists on the design and development of a low-cost civil structure monitoring system, with user-friendly configuration and looking for trading possibility. The low-cost development boards are already massified and can be used to acquire data from a set of transducers suitable for the civil structure monitoring.

The need to increase security levels, sustainability and efficiency in the inspection and maintenance of civil structures encourages the creation of alternative systems, but with as many or more capabilities that industrial systems have, at a reduced price.

The developed system, made up from Atmel microcontrollers installed into Arduino development boards, is able to communicate over RS-485 bus whose collected sensorial data will be stored not only locally but also sent via GSM to a supervisory platform. The final data treatment is done on the server which is available online, from any location with Internet access.

The application of any type of algorithm statistical pattern, based on collected data, can be made from the database created on the server.

Keywords: monitoring, civil structures, microcontrollers, Arduino, sensors, RS-485

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Lista de siglas e acrónimos.....	xi
Lista de figuras.....	xii
1. Introdução	1
1.1. Motivação e enquadramento.....	2
1.2. Objectivos	4
1.3. Contribuições	4
2. Monitorização de estruturas.....	5
2.1. Estado da arte.....	5
2.1.1. Sistemas de monitorização: revisão da literatura	6
2.1.2. Axiomas fundamentais da Monitorização da Integridade Estrutural.....	8
2.2. Metodologias	9
2.2.1. Processo de instalação e operação.....	11
2.2.2. Transdutores	13
2.3. Comunicação	18
2.3.1. Topologia	19
2.3.2. Norma RS-485.....	20
2.3.3. Transmissão de dados assente na linha de alimentação DC	21
2.3.4. Mecanismo de fiabilidade e detecção de erros	25
2.4. GSM/GPRS	26
2.5. Ethernet	27
3. Elementos do sistema	28
3.1. Microcontroladores e expansões	28
3.2. <i>Datalogger</i>	32
3.3. Transceptor	33
3.4. <i>MonStruct Shield</i> – Placa de expansão de comunicação	34
3.5. Sensores.....	35

3.6.	<i>MonStruct supervisor</i> – Servidor SCADA	36
4.	Implementação do sistema.....	38
4.1.	Arquitectura	38
4.2.	<i>Software</i>	39
4.2.1.	Biblioteca de comunicação	39
4.2.2.	<i>Gateway</i>	40
4.2.3.	<i>Datalogger</i>	42
4.2.4.	Nó sensorial	43
4.3.	Características e funcionalidades.....	44
4.4.	Configuração.....	45
4.5.	Plataformas de supervisionamento	48
4.6.	Custo de um sistema completo.....	49
4.7.	Montagem experimental.....	51
5.	Teste, validação e avaliação.....	53
6.	Conclusões	56
6.1.	Trabalhos futuros.....	57
	Referências	58
A.	Anexos	61
A.1.	Características sistema analógico e digital (Šimunic et al. 1997)	61
A.2.	Transceptor RS-485	61
A.3.	Leitura do deslocamento do LVDT	63

Lista de siglas e acrónimos

ADC	Analog-to-Digital Converter
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
bps	bits per second
DGPS	Differential Global Positioning System
DIP	Dual In-line Package
DTE	Data Terminal Equipment
EOT	End of Transmission
ETX	End of Text
GND	Ground
GSM	Global System for Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
HTTP	HyperText Transfer Protocol
ICSC	Inter-Chip Serial Communication
IDE	Integrated Development Environment
IP	Internet Protocol
IVA	Imposto sobre o Valor Acrescentado
kHz	quilo-hertz
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MIE	Monitorização da Integridade Estrutural
NTC	Negative Temperature Coefficient
PLC	Programmable Logic Controller
RS	Recommended Standard
RTD	Resistance Temperature Detectors
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMS	Short Message Service
SOH	Start of Header
SQL	Structured Query Language
STX	Start of Text
UART	Universal Asynchronoud Receiver/Transceiver
UPDT	User Program Development Tool
URL	Uniform Resource Locator

Lista de figuras

Figura 1 – Queda da ponte em Entre-os-Rios (Google Imagens).....	2
Figura 2 – Custo de implementação de sistemas de monitorização em pontes	3
Figura 3 – Analogia sensorial entre um sistema natural e um sistema inteligente.....	10
Figura 4 – Fluxograma do processo de instalação.	12
Figura 5 – Fluxograma do processo de operação.	13
Figura 6 – Princípio básico do padrão Moiré.	16
Figura 7 – Design conceptual do acelerómetro.....	16
Figura 8 – Filtros implementados na fibra óptica.	17
Figura 9 – Grandezas possíveis de recolher em sensores de fibra óptica de grelha Bragg.....	17
Figura 10 – Princípio de funcionamento de um sensor de deslocamento baseado em visão.	18
Figura 11 – Diferentes tipos de topologia da rede (Perrin 1999).	19
Figura 12 – Terminação paralela do barramento (TexasInstruments 2012).	21
Figura 13 – Esquemático do circuito de comunicação sobre a linha de alimentação DC.....	22
Figura 14 – Foto da montagem experimental para análise de resposta do circuito.	23
Figura 15 – Filtro passa-alto.	24
Figura 16 – Visualização no osciloscópio de sinais envolvidos na transmissão de dados.....	25
Figura 17 – Estrutura utilizada no pacote de rede.....	26
Figura 18 – Arquitectura comum.....	28
Figura 19 – Placas de desenvolvimento Arduino.....	29
Figura 20 – Shield GSM Arduino.	30
Figura 21 – Shield Ethernet Arduino.	31
Figura 22 – Shield LCD Keypad DFRobot.	32
Figura 23 – Placa Seeeduino Stalker.	33
Figura 24 – Transceptores RS-485 da Texas Instruments.	34
Figura 25 – Esquemático do MonStruct Shield.	34
Figura 26 – Aspecto da plataforma de supervisionamento MonStruct supervisor.	37
Figura 27 – Arquitectura do sistema desenvolvido.	38
Figura 28 – Fluxograma do funcionamento do gateway.....	41
Figura 29 – Fluxograma do funcionamento do datalogger.....	43
Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do nó sensorial.	44
Figura 31 – Sintaxe para configuração do sistema.	46
Figura 32 – Aspecto da plataforma de supervisionamento Xively.	48
Figura 33 – Exemplo de implementação estratégica numa ponte suspensa (Fonte: HyD).	49
Figura 34 – Montagem experimental.....	51
Figura 35 – Gateway utilizado na montagem experimental.	51
Figura 36 – Configuração da detecção de um evento.	54
Figura 37 – Alerta recebido no e-mail.....	54
Figura 38 – Detalhe dos eventos ocorridos na variável temperatura (N1S1).	55
Figura 39 – Pinout típico de um transceptor RS-485.	61

1. Introdução

A Monitorização da Integridade Estrutural (MIE) é o processo de implementação da identificação estratégica de danos numa estrutura de engenharia civil,¹ mecânica ou aeroespacial (Farrar & Worden 2007). É actualmente uma necessidade em obras de engenharia civil a partir de determinada envergadura, dependendo da sua finalidade. É principalmente nesta área que a engenharia electrotécnica “moderna” se coaduna com a engenharia civil, possibilitando a recolha de uma grande quantidade de parâmetros determinantes na análise de uma estrutura, seja ela uma ponte, um edifício ou um túnel.

Farrar (2006) definiu danos como sendo alterações introduzidas ao sistema e que afectam negativamente o seu estado, provocando alterações nos materiais e nas suas propriedades geométricas. Estes danos podem surgir abrupta ou progressivamente, onde, neste último caso, a deterioração e fadiga se acumulam com o passar do tempo, consequentes de uma manutenção deficiente. O desempenho da estrutura fica, assim, comprometido, no entanto não representa obrigatoriamente uma interrupção no seu funcionamento, apenas significa que o sistema não está a operar de forma óptima (Farrar & Todd 2006). À medida que os danos se intensificam, será atingido um ponto no qual a operação do sistema já não é aceitável para o utilizador, chamado de falha.

A MIE envolve, entre outros, a observação da estrutura ao longo do tempo, recolhendo periodicamente informação sensorial útil para que, após análise pontual e estatística, possa ser determinado o estado de conservação dessa estrutura. A observação pode também ser feita com vista à prevenção para que, a médio ou longo prazo, a estrutura sofra a devida manutenção e continue a desempenhar a sua função sem problemas e em condições de máxima segurança.

Considerando a hipótese de ocorrência de eventos pontuais e extremos, como ataques terroristas, situação de guerra ou actividade sísmica, é determinante uma taxa de amostragem rápida para que, em tempo real (ou quase), possa ser recolhido o máximo de informação para caracterizar o incidente e tomar as acções necessárias (Farrar & Worden 2007).

¹ Considera-se como estrutura, uma combinação de alicerces, pilares, vigas, lajes, etc.

A identificação e caracterização dos danos, onde relaciona diferentes áreas como MIE, monitorização da condição, avaliação não-destrutiva, controlo estatístico do processo e prognóstico dos danos, está fora do domínio da engenharia electrotécnica e não é abordado nesta dissertação.

1.1. Motivação e enquadramento

A detecção dos danos pretende-se conseguir o mais cedo possível para, dessa forma, evitar sobrecarga no orçamento da manutenção, eventuais catástrofes ou mesmo interrupção da operação.

A interrupção no funcionamento de uma estrutura, como uma ponte ou um túnel, consequente de uma monitorização deficiente ou inexistente, pode ter consequências graves quer a nível populacional quer no impacto económico na região afectada.

Devido a vários acidentes ocorridos há poucos anos, como a queda da ponte de Entre-os-Rios em Portugal, a 4 de Março de 2001, ou a queda ponte I-35W Mississippi River em Minneapolis, a 1 de Agosto de 2007, reforça-se a necessidade de uma constante avaliação do desempenho e segurança nas estruturas civis.

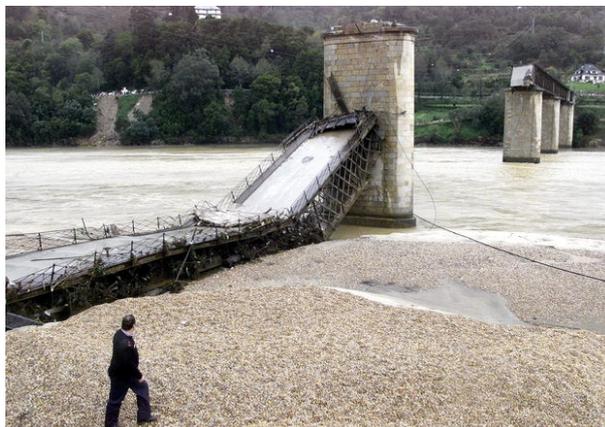


Figura 1 – Queda da ponte em Entre-os-Rios (Google Imagens).

A ponte Rion-Antirion Bridge, na Grécia, é um exemplo de sucesso na utilização de um sistema de monitorização, em estruturas de elevada complexidade, e em 2009 foi considerada como estando entre as estruturas mais inteligentes do mundo (Patel 2009). Com cerca de 300 sensores, já registou

duas vibrações anormais nos primeiros 5 anos de funcionamento, uma das quais, se não fosse tratada atempadamente, poderia ter causado danos graves nos tirantes.

Há ainda que ter em consideração a motivação económica pois os custos de implementação dos sistemas actuais podem ascender às centenas de milhar de dólares. Considerando um universo de 40 pontes, nas quais foi implementado um sistema de monitorização, a maioria delas teve custos até 50 mil dólares, no entanto um número considerável teve custos superiores a 100 mil dólares (Inaudi 2009).

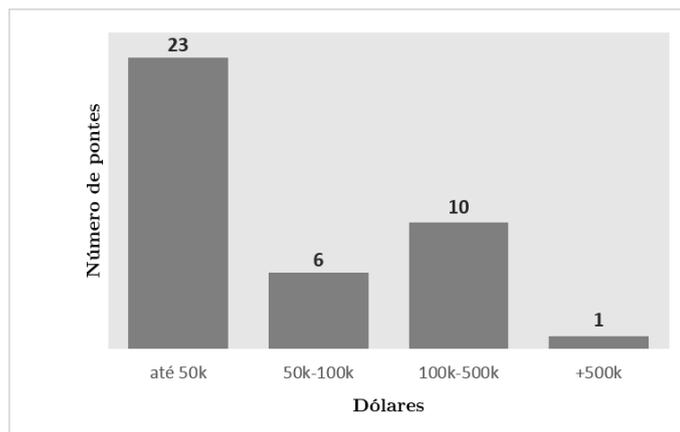


Figura 2 – Custo de implementação de sistemas de monitorização em pontes.

O custo aumenta proporcionalmente à complexidade da implementação e ao número de sensores instalados. Entre as pontes consideradas, 19 têm implementados pequenos projectos com 10 ou menos sensores, onde apenas 3 pontes têm mais de 100 sensores.

A tecnologia actualmente existente em microcontroladores de baixo custo é suficiente para construir um sistema apto a responder às necessidades existentes na monitorização de uma estrutura civil. Além disso, no decorrer de uma normal monitorização, é desejável que a intervenção humana seja nula, portanto, a poupança que este tipo de sistema permite, quer em recursos humanos quer no custo final do produto, é algo que se pretende e um desafio a desenvolver.

1.2. Objectivos

A segurança dos intervenientes nas estruturas, quer seja na fase de construção, quer seja na fase de utilização deve ser garantida, para que estes não corram perigo de vida. Para tal, devem criar-se sistemas que garantam a segurança e sustentabilidade das mesmas.

A criação de um espaço sensorial adequado e bem dimensionado permite que o próprio sistema de monitorização recolha informação determinante à inspecção. Com recurso a simulações computacionais e com base na informação recolhida, é ainda possível prever a necessidade de uma próxima intervenção de manutenção.

Os custos económicos, sejam eles de manutenção, reparação ou mesmo implementação, poderão ser minimizados e otimizados se as intervenções forem iniciadas na altura apropriada. A colaboração com as autoridades e equipas de socorro é também essencial para que, numa situação de catástrofe, possam ser tomadas decisões rápidas e correctas na sua intervenção (Ettouney & Alampalli 2011).

Para este projecto, foi definido como objectivo o desenvolvimento de um sistema, constituído por *hardware* e *software*, que permita implementar redes de monitorização de corrosão, fissuras, deslocamentos e outros, em estruturas de engenharia civil. O sistema deverá ser composto por nós sensoriais capazes de comunicar por RS-485 com um nó agregador local, que por sua vez comunicará por GSM com uma plataforma de supervisão remota.

1.3. Contribuições

Esta dissertação expande a vertente *low-cost* para o mercado industrial dos sistemas de monitorização de estruturas civis, podendo ser facilmente adaptado a qualquer tipo de estrutura.

Com o trabalho desenvolvido, um engenheiro civil ou técnico de manutenção conseguirá configurar todo o sistema, consoante as suas necessidades, sem que precise de conhecimentos avançados ou de formação específica na área, sendo apenas necessário seguir um pequeno guia de configuração.

2. Monitorização de estruturas

Desde há cerca de 15 anos que os sistemas de monitorização baseados em equipamentos digitais têm vindo a crescer, quer em número quer em inovação. A miniaturização, redução de custos e capacidade de processamento digital permitem que as estruturas sejam facilmente equipadas com este tipo de dispositivos.

2.1. Estado da arte

A maquinaria rotativa foi onde se sentiu, inicialmente, maior necessidade de adaptação dos conceitos de monitorização, mais concretamente a monitorização da condição (*condition monitoring*) (Bently & Hatch 2003). O processo de identificação era baseado em reconhecimento de padrões aplicados a parâmetros como o deslocamento, velocidade e aceleração, ocorridos tanto nas condições de operação normal como também durante o arranque e paragem.

Nos anos 70 e 80, as indústrias do petróleo, aeronáutica e automóvel foram as grandes responsáveis pelo desenvolvimento nesta área. Os investigadores de engenharia civil também começaram a estudar os danos consequentes das vibrações desde os anos 80, com particular incidência nas propriedades modais, formas de curvatura e índices de flexibilidade dinâmica. Todas estas necessidades exigiram o desenvolvimento de métodos para definir, de forma óptima, o número e a localização dos sensores, identificação das características de sensibilidade, capacidade de discriminação de alterações em todas as características observadas e desenvolvimento de métodos estatísticos capazes de avaliar o estado dependendo das condições (Khan et al. 2011).

Foi apenas a partir de meados dos anos 90 que a atenção se focou mais nas estruturas civis, enquanto as tecnologias de monitorização sensorial já estavam desenvolvidas e aplicadas na indústria aeroespacial, automóvel e na defesa militar. Cada vez mais surgia a necessidade de monitorizar as estruturas sujeitas a cargas diárias. Na década anterior a essa data, surgiram vários avanços experimentais no controlo e monitorização estruturais bem como a concepção de sistemas sensoriais capazes de caracterizar estragos consequentes de sismos (Kiremidjian et al. 1997).

Entre 1988 e 1990 surgiram algumas publicações com desenvolvimento teórico e testes laboratoriais dos quais resultaram o desenvolvimento de modelos conceptuais para localização de

sensores, transmissão do sinal e processamento centralizado da informação, apropriado para sistemas estruturais simples (Agabian & Masri 1988; Chang et al. 1990; Spyrakos et al. 1990).

Desde então, a evolução destes sistemas tem surgido nesses moldes de concepção. No que diz respeito aos transdutores, houve uma evolução considerável nos últimos 15 anos (Inaudi 1997), nomeadamente em sensores baseados em fibra óptica e em câmaras.

2.1.1. Sistemas de monitorização: revisão da literatura

Tal como já foi referido, os sistemas de monitorização têm vindo a ser abordados por vários autores ao longo dos últimos anos.

Em 1997, Kiremidjian et al. apresentaram uma *framework* completa para um sistema de monitorização de danos estruturais que incorporava unidades sensoriais, de microprocessamento, transmissão e aquisição de dados pelo método de diagnóstico.

Nesse mesmo ano, Šimunic et al. implementaram um sistema de monitorização digital em detrimento de um sistema analógico, existente na ponte Maslenica, na Croácia. Foram comparadas e discutidas as características de ambos os tipos. Neste caso, o sistema analógico baseou-se num sistema industrial constituído por PLCs, um computador, ADCs e barramento de comunicação. Foi ainda tido em conta um *design* modular para desenvolver novos componentes e instalar noutras estruturas. Deste ensaio foi possível eliminar as principais fraquezas existentes num sistema analógico e tornou-se possível a aplicação de tecnologias digitais modernas (ver Anexo na secção A.1.).

Klinghoffer et al. (2002) desenvolveram um projecto de estruturas inteligentes, com base num sistema integrado de monitorização, com o objectivo de reduzir custos de inspecção e manutenção e otimizar a circulação do tráfego. Foram tidas em conta a modularidade do sistema e a integração de modelos de deterioração avançados. O protótipo implementado foi testado com oito tipos de sensores, registo local de dados e um sistema de transferência de dados de longa distância (GSM). A plataforma de supervisão foi implementada em Java e toda a informação foi guardada numa base de dados SQL.

Inaudi et al. (2009) desenvolveram um sistema que pretendeu detectar e prever a corrosão em estruturas de betão armado. Tratou-se de um sistema com uma rede de sensores sem-fios constituído por vários sensores (eléctrodos e sensores de temperatura e humidade), *dataloggers* e um *gateway* que reunia toda a informação e a transmitia para uma base de dados central que incluía uma interface Web. O sistema foi desenvolvido com base num *design* modular com o objectivo de adaptação a estruturas de qualquer tamanho. Este sistema foi implementado com sucesso em dezenas de estruturas, em países como os EUA, Suíça e Itália. O seu desenvolvimento permitiu uma avaliação simples mas permanente, acerca do potencial de corrosão nas estruturas de betão armado.

Zhan-feng et al. (2006) implementaram uma nova técnica que consistia numa rede de sensores, na qual os sinais sensoriais eram convertidos em sinal digital e transmitidos com base no protocolo de rede TCP/IP. Para o desenvolvimento do projecto foram utilizados um ADC ADS8321 e um microprocessador Rabbit3000. A adopção deste tipo de processo resultou numa redução de custos do sistema, elevada fiabilidade e desempenho melhorado. Esta rede sensorial revelou ainda características como a boa aplicabilidade e flexibilidade do sistema, apontando para que fosse este o caminho a seguir nos sistemas de monitorização de integridade estrutural futuros.

A par com esse desenvolvimento, têm vindo a ser estudadas várias formas de tornar estes projectos mais económicos em termos monetários. A criação de linhas *low-cost* tem que ser explorada, para que a segurança e prevenção nas estruturas civis não seja descurada. Bergman et al. (2010) começaram a desenvolver projectos nesse sentido. Implementaram um protótipo de um sistema de sensores sem-fios, moderno e de baixo custo, que se caracteriza pela pequena dimensão física e pelos baixos recursos energéticos. Este tipo de sistema tende a apontar para um sistema com microprocessadores de baixa capacidade e alcance sem-fios (limitado). O sistema em causa baseou-se na plataforma Arduino e em módulos de redes sem-fios XBee, utilizando o TinyOS como sistema operativo. A comunicação física utilizada para a comunicação entre nós foi I²C. Embora tivesse ficado clara a necessidade de maior desenvolvimento do sistema, foram verificadas as capacidades de um sistema de baixo custo, modular e de *hardware* de código aberto, onde o conjunto Arduino+TinyOS se mostrou viável para trabalhos futuros.

Em Portugal, a Ponte da Arrábida sobre o rio Douro é um dos casos onde já foi implementado um sistema de monitorização. Neste caso em específico, destinou-se à avaliação da eficácia dos

trabalhos de reabilitação da ponte, iniciados em 1998. Este sistema permitiu observar determinados parâmetros relativos a deficiências estruturais (corrosão de armaduras e deterioração do betão) e à progressão dos mecanismos de deterioração, permitindo tomar uma decisão atempada quanto ao tipo de medidas a aplicar.

O sistema adoptado consistiu na utilização de placas de aquisição de dados e PCs para recolher dados de 16 conjuntos de sensores distribuídos por 8 secções em toda a estrutura. As informações recolhidas referem-se aos parâmetros que influenciam o processo de corrosão (resistividade, teor de humidade e temperatura), evolução da penetração, teor de cloretos e a profundidade de carbonatação. A adopção e implementação das medidas de prevenção em matéria de segurança, nas quais se insere este sistema, representaram cerca de 11% dos custos totais da obra (Frias et al. 2008).

2.1.2. Axiomas fundamentais da Monitorização da Integridade Estrutural

Embora não seja objectivo desta dissertação a caracterização dos danos numa estrutura, é conveniente ter noção dos princípios necessários à sua identificação. Geralmente, o processo de identificação dos danos implica estabelecer quatro pontos: (i) a sua existência, (ii) o local, (iii) o tipo e (iv) a intensidade.

No entanto, com base na literatura existente nos últimos 25 anos, este campo atingiu tal maturidade que emergiram vários princípios que definem e permitem identificar os danos com maior precisão. Importa referir que os autores não definem esta lista de axiomas como um conjunto completo e que estes axiomas, por si só, não permitem a identificação directa dos danos já que, ainda assim, é necessário utilizar algoritmos para chegar a uma decisão, a partir dos dados.

Os axiomas fundamentais da MIE apresentam-se abaixo listados.

- i. Todos os materiais têm falhas inerentes ou defeitos;
- ii. A avaliação dos danos requer uma comparação entre dois estados do sistema;
- iii. A identificação da existência e localização dos danos pode ser feita num modo de aprendizagem não supervisionada, mas a identificação do tipo de dano e a sua intensidade só podem ser efectuados, geralmente, num modo de aprendizagem supervisionada;

- iv. a) Os sensores não são capazes de medir danos. A informação extraída do sensor tem de ser processada e classificada estatisticamente, de forma a converter os dados do sensor em informação sobre os danos;
- b) Se não houver uma recolha de dados inteligente, quanto maior for a sensibilidade a um dano, mais sensível é a alteração das condições operacionais;
- v. A duração e a escala de tempo associados ao início e evolução dos danos ditam as propriedades e características necessárias no sistema sensorial a utilizar;
- vi. Num algoritmo, há um compromisso entre a sensibilidade ao dano e a sua capacidade de rejeitar ruído;
- vii. O tamanho do dano a ser detectado, conseqüente de alterações na dinâmica do sistema, é inversamente proporcional à gama de frequências de excitação.

Cada um destes axiomas está devidamente documentado e extensamente desenvolvido (Worden et al. 2007). Tendo estes axiomas em mente, fica mais claro o caminho a seguir na hipotética criação de um algoritmo de identificação de danos onde, mesmo que seja relativamente rudimentar, poderá ser mais que suficiente para identificar a maior parte dos danos possíveis numa estrutura civil.

2.2. Metodologias

Uma estrutura equipada com sensores, actuadores e sistemas de controlo centralizado pode chamar-se de *estrutura inteligente*. A expressão refere-se a sistemas estruturais inspirados em modelos naturais tais como o sistema nervoso humano. Os sistemas naturais apresentam características excepcionais que as estruturas inteligentes procuram imitar: precisão, eficácia, durabilidade, funcionalidade e adaptabilidade.

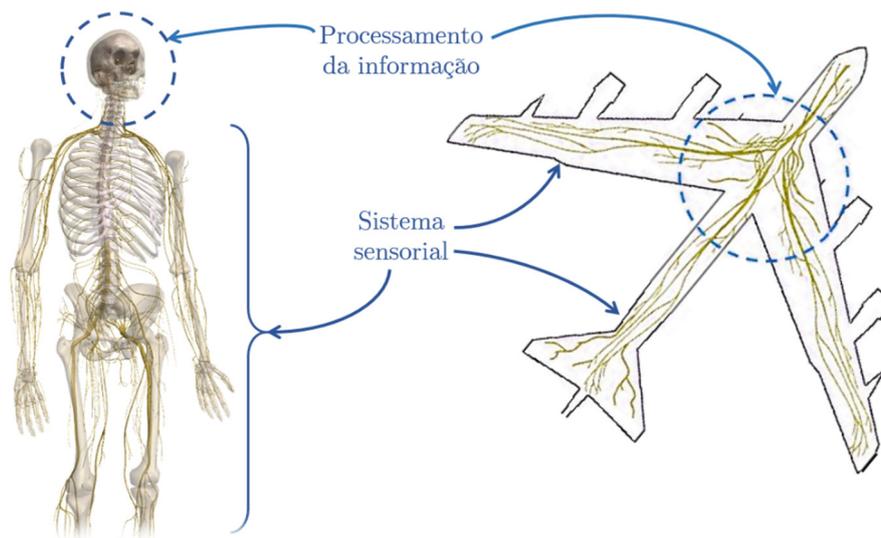


Figura 3 – Analogia sensorial entre um sistema natural e um sistema inteligente.

A utilização otimizada de uma determinada construção requer uma constante monitorização dos diferentes parâmetros que fazem parte da base ambiental do sistema. Se a importância da construção justificar a implementação do sistema de monitorização, há ainda que analisar a viabilidade dessa implementação. Para tal, a monitorização deve obedecer a vários requisitos (Phares et al. 2005):

- i. Custos reduzidos;
- ii. Facilidade de utilização;
- iii. Não colisão com a funcionalidade da estrutura;
- iv. Capacidade de detecção apropriada à necessidade;
- v. Fiabilidade e boa capacidade de resposta;
- vi. Elevada operacionalidade e estabilidade do sensor.

São várias as estratégias que permitem recolher dados das estruturas. Do ponto de vista da integridade da estrutura e dos dados que são úteis ao analista (humano ou virtual), a tecnologia actualmente disponível permite monitorizar os seguintes parâmetros:

- i. Temperatura;
- ii. Humidade;
- iii. Condições meteorológicas;
- iv. Deformações e tensões;

- v. Corrosão em armaduras;
- vi. Abertura de fendas;
- vii. Vibração.

É relativamente normal, mas não desejável, que estruturas já existentes sejam submetidas a cargas para as quais não foram dimensionadas. Os casos mais típicos referem-se a pontes rodoviárias, algumas delas centenárias, que são submetidas a uma carga (tráfego) impensável na época em que foram construídas. Estes são os casos onde é urgente equipar a estrutura com um sistema sensorial que permita avaliar, em tempo real, o desempenho da estrutura e assim evitar qualquer tipo de dano que possa contribuir para a sua ruína ou que possa ser um risco para a sociedade (Silva 2005).

2.2.1. Processo de instalação e operação

A partir do momento em que surge a decisão de monitorizar determinada estrutura, após a análise de diversos factores (normalmente inerentes à engenharia civil), podem ser averiguados os requisitos do sistema e dar início ao seu processo de instalação e operação.

A *Figura 4*, na página seguinte, apresenta o fluxograma com os passos básicos a seguir numa instalação. Não se espera que a primeira decisão do fluxograma É viável possa entrar em ciclo indeterminado, com reincidência na resposta Não. Trata-se apenas de um ajuste que deve ser feito entre o engenheiro civil e o técnico de montagem, de forma a otimizar todos os recursos.

Quanto à segunda decisão Servidor local?, é comum que os locais de monitorização sejam remotos e a ligação de dados mais comum seja GSM. Para o caso de ser pretendido apenas o registo local, o servidor pode ser ligado directamente ao *bus* RS485 (ver secção 2.3). Em casos pontuais, que pretendam apenas recolher dados da estrutura sem a possibilidade de acção imediata, o *datalogger* será suficiente. Isto é uma excepção ao fluxograma de instalação.

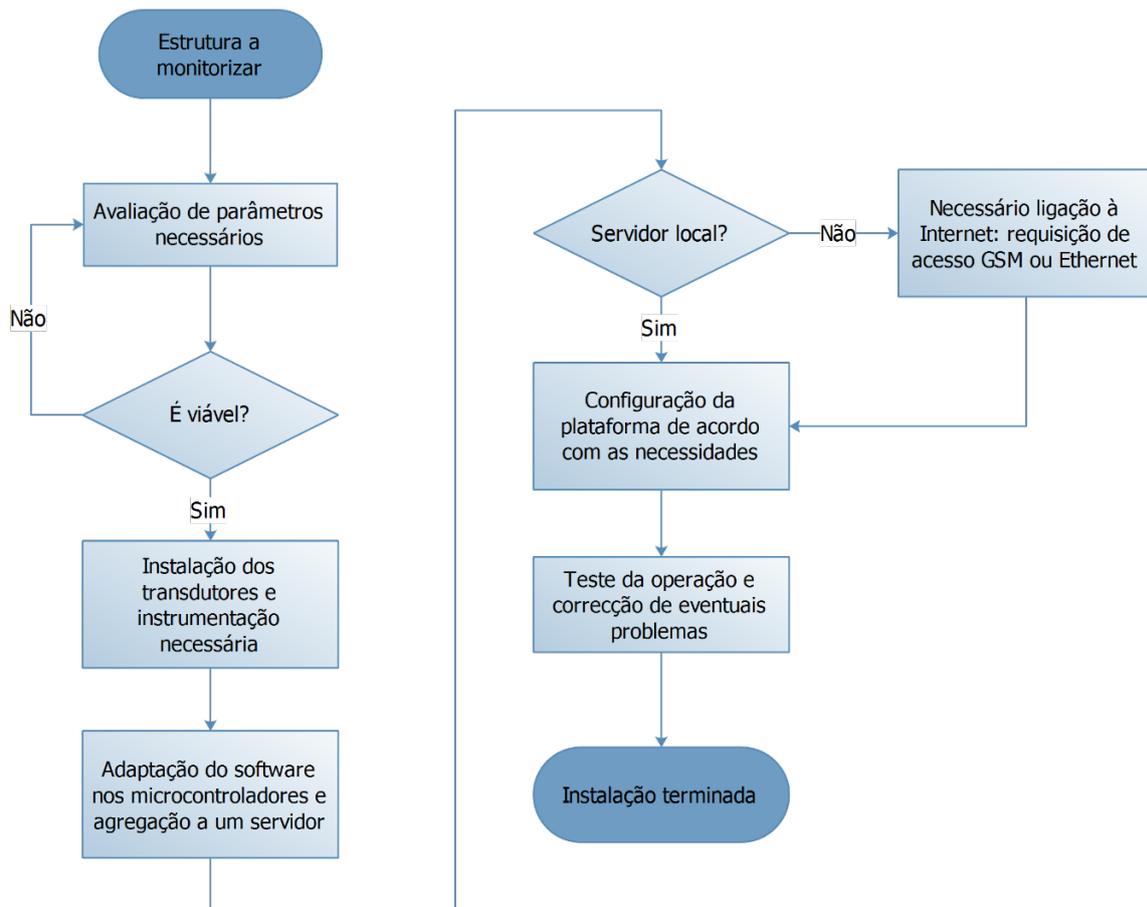


Figura 4 – Fluxograma do processo de instalação.

Assim que a instalação for concluída com sucesso, pode dar-se início à operação. O fluxograma que a representa pode ser visto na *Figura 5*, na página seguinte.

A aquisição de dados, dependendo do parâmetro, pode ser feita com diferente periodicidade e ter prioridades diferentes na identificação de valores a partir dessa aquisição. A gestão dessas prioridades (ou classificação de importância) é já tratada no processamento da informação.

Por exemplo, uma variação da 20°C na temperatura, durante um dia de Verão, é perfeitamente aceitável e pode ser responsável por alguma variação em valores de tensão ou deformação na estrutura. No entanto, uma alteração de 5 milímetros numa fenda pode ser extremamente preocupante e exigir intervenção imediata.

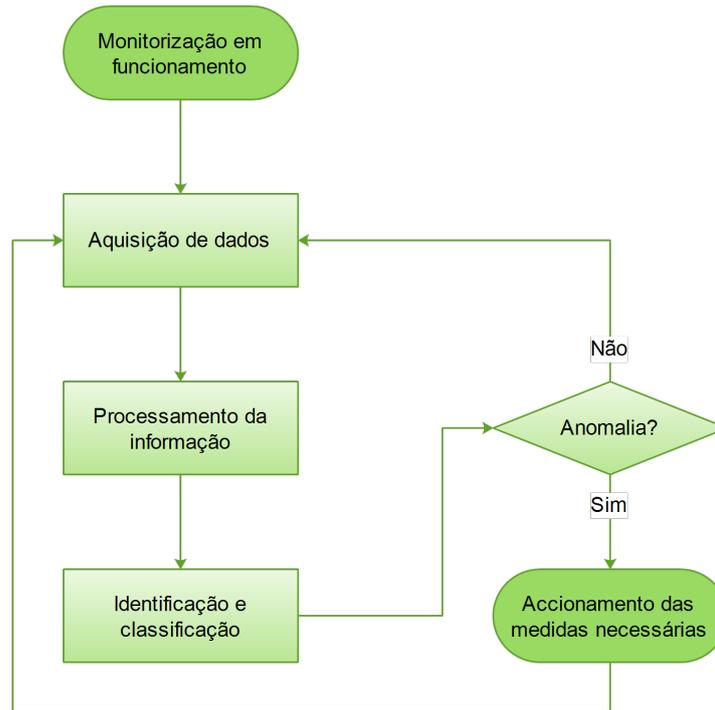


Figura 5 – Fluxograma do processo de operação.

2.2.2. Transdutores

Os sensores são constituídos por transdutores capazes de variar o seu valor de saída dependendo das condições de entrada a que é sensível.

Existe um conjunto de transdutores típicos, usados nas mais variadas áreas, sendo que os mais comuns em monitorização de estruturas encontram-se abaixo listados.

i. Temperatura

- **Termístor** – transdutor constituído por uma resistência cuja resistividade varia não-linearmente com a temperatura. Tipicamente os termístores têm elevada resistividade e elevado coeficiente de temperatura negativa (NTC), onde uma variação positiva da temperatura faz diminuir a resistência do termístor.
- **Termopar** – é um transdutor que consiste na junção de dois condutores metálicos de diferentes materiais. A alteração da temperatura gera uma diferença de

potencial na junção, directamente proporcional à temperatura: efeito *seebeck*. É normalmente utilizado para detectar grandes variações de temperatura, na ordem dos 0°C até 1600°C, apropriado para estruturas como fornos.

Este tipo de transdutor não é apropriado para pequenas variações de temperatura pois possui uma precisão baixa.

- **RTD** – transdutor que relaciona o valor do seu elemento resistivo com a temperatura. O elemento resistivo é feito a partir de materiais nobres que apresentam uma resistência única repetível, sendo o seu valor previsível em função da temperatura (p.e. cobre, platina e níquel).

ii. Deformações

- **Extensómetro (*strain gauge*)** – transdutor que altera a resistência eléctrica do seu corpo (em formato de grelha) em função da deformação do material no qual se encontra aplicado.
- **DGPS** – é um sistema de GPS diferencial com a precisão melhorada, capaz de ter uma precisão máxima de alguns centímetros (contra os cerca de 15 metros do sistema GPS vulgar). Este sistema é útil para medir, por exemplo, a deflexão em tabuleiros ou torres que os suportam, nas pontes.

iii. Corrosão de armaduras

- **Eléctrodos** – a resistividade eléctrica do betão relaciona-se directamente com o seu nível de deterioração (a resistência é inversamente proporcional à probabilidade de corrosão). A utilização de eléctrodos no interior do betão e a aplicação de uma corrente eléctrica permitem obter a diferença de potencial entre os eléctrodos e obter assim a resistência. Geralmente, este tipo de eléctrodos pode ser feito de materiais como óxido de manganês, prata ou cloreto de prata, chumbo e grafite.

iv. Fissuração no betão

- **LVDT** – um transformador diferencial variável linear é um tipo de transformador eléctrico utilizado para medir deslocamentos lineares, com grande precisão. Além da sua possível aplicação em fissuração do betão, pode também ser utilizado para medir deslocamento entre tabuleiros.
- **Fissurómetro (*crack meter*)** – é um transdutor de deslocamento, geralmente com uma extensão máxima inferior ao LVDT, apropriado para medir a evolução de fissuras no betão. A sua sensibilidade típica ronda os 0.01 milímetros.

v. Vibração

- **Acelerómetro** – mede a aceleração inerente à sua deslocação, normalmente nos eixos X, Y e Z. A partir desses valores é possível obter informação relativa à vibração.

vi. Condições meteorológicas

- **Estação** – uma estação meteorológica inclui geralmente quatro tipos de sensor: temperatura, humidade (higrómetro), vento (anemómetro) e pressão (barómetro). Embora se tratem de transdutores simples, a relação destes parâmetros com a deformação, fissuração, corrosão ou vibração pode ser extremamente relevante. É relativamente simples implementar uma estação meteorológica agrupando os transdutores necessários.

Paralelamente a estes transdutores, existem outros tecnologicamente mais avançados e que conseguem ir um pouco mais além dos transdutores típicos. Os transdutores listados de seguida têm uma aplicação mais específica que os transdutores típicos e podem ser o único recurso em determinada situação.

i. **Acelerómetro de fibra óptica baseado no padrão *Moiré***

A fibra óptica está a ser bastante importante na concepção de novos sensores. O padrão *Moiré* pode ser utilizado em fibra óptica na construção de um acelerómetro.

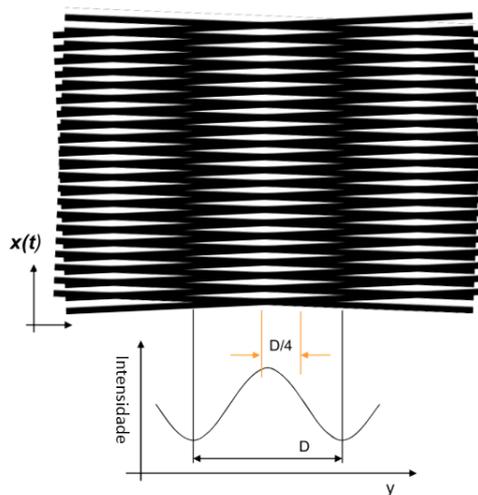


Figura 6 – Princípio básico do padrão Moiré.

O princípio de funcionamento consiste na fixação de uma das grelhas à estrutura, mantendo a outra móvel. O feixe luminoso, que circula na fibra óptica, terá de passar através da grelha e a sua atenuação é analisada. O resultado dessa atenuação ao longo do tempo permite obter o deslocamento, e conseqüentemente a aceleração.

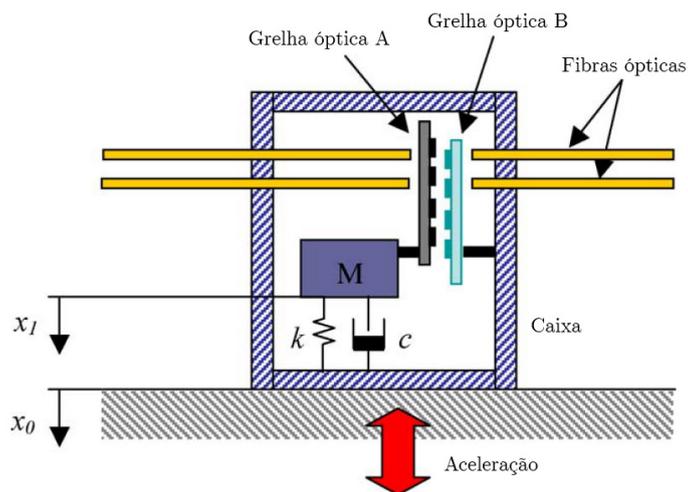


Figura 7 – *Design* conceptual do acelerómetro

ii. **Sensor de fibra óptica de grelha Bragg**

O feixe luminoso passa por uma série de filtros ópticos, colocados no interior da fibra óptica, que reflectem ou deixam passar determinado comprimento de onda dependendo da temperatura, vibração ou tensão mecânica a que forem submetidos.

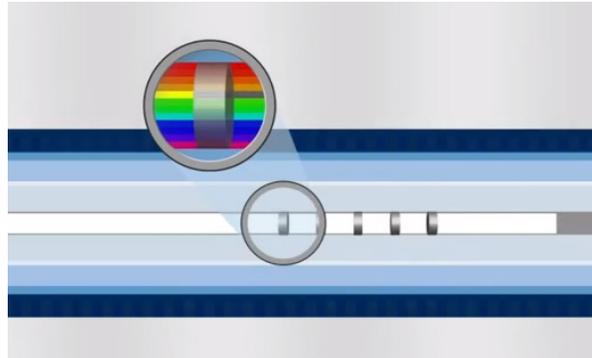


Figura 8 – Filtros implementados na fibra óptica.

Essas variações podem ser traduzidas em diversas grandezas como a pressão, temperatura, aceleração, tensão mecânica e deslocamento. Esta técnica permite ainda obter diversa informação com a utilização de apenas uma fibra óptica, utilizando multiplexação.

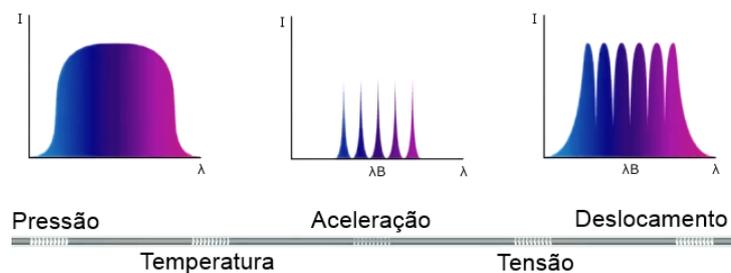


Figura 9 – Grandezas possíveis de recolher em sensores de fibra óptica de grelha Bragg.

Esta tecnologia tem várias vantagens como a multiplexação, transmissão de longa distância, imunidade a fontes de interferência electromagnética, integridade do sinal e dimensão reduzida.

iii. **Sensor de deslocamento remoto baseado em visão**

É instalada uma câmara num ponto fixo, não ligado à estrutura. Na estrutura, no ponto onde se pretende monitorizar, é colocado um alvo para ser, posteriormente, reconhecido no processamento de imagem.

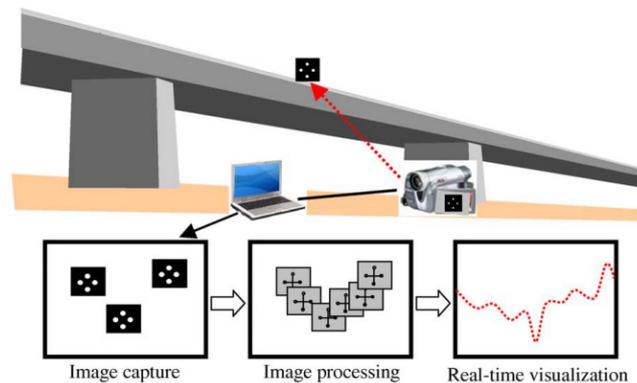


Figura 10 – Princípio de funcionamento de um sensor de deslocamento baseado em visão.

Após a devida calibração, a precisão que é possível obter neste processo depende da resolução da câmara, da sua objectiva e da distância à estrutura. Como exemplo, uma câmara com uma objectiva telescópica colocada a 20 metros do alvo, cuja captura seja uma imagem com 480 píxeis verticais, consegue uma precisão aproximada de 0.0625 mm/píxel, com um erro mecânico de 0.06 mm (Lee et al. 2007).

Nenhuma destas técnicas foi testada neste projecto, mas a sua breve referência poderá ser útil para compreender alguns conceitos e conhecer os actuais avanços em transdutores.

2.3. Comunicação

A norma RS-485, para estabelecer comunicação entre nós, prevê a utilização de um barramento diferencial bifilar.

A comunicação é concretizada pela interface série (ou UART) dos microcontroladores e recorre a um mecanismo de comunicação robusto, baseado em pacotes de rede.

2.3.1. Topologia

A topologia da rede poderá ser um problema se o comprimento do barramento for considerável e se for pretendida uma velocidade de comunicação rápida. Dado isso, devem ser tomadas algumas precauções devido a problemas que podem surgir com reflexões. Dependendo da estrutura, podem ser necessários vários tipos de topologia, no entanto uma escolha mais arrojada, diferente do recomendável, deve ser analisada pormenorizadamente.

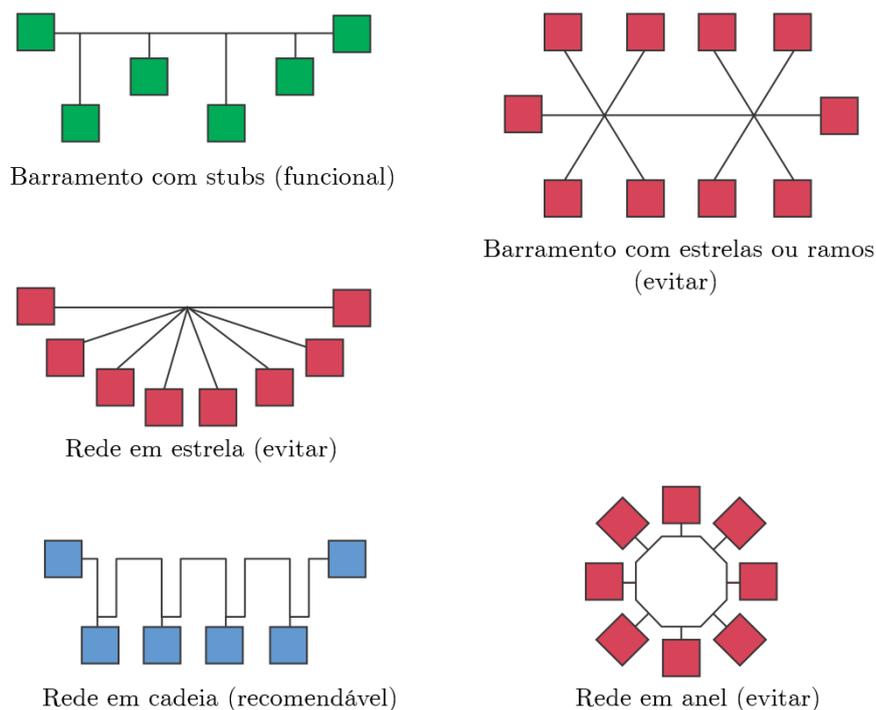


Figura 11 – Diferentes tipos de topologia da rede (Perrin 1999).

Para uma boa estabilidade na rede, é determinante que o tamanho do *stub*² seja tão pequeno quanto possível e de dimensões iguais em todo o barramento. A melhor forma para assegurar uma rede RS-485 robusta e fiável, é construí-la de acordo com a topologia de rede em cadeia (Perrin 1999).

² *Stub* é o tamanho do troço da linha de transmissão que vai desde o transceptor até ao barramento principal.

2.3.2. Norma RS-485

A norma RS-485 é a norma de comunicação mais versátil, entre as que conseguem ligar equipamento terminal de dados (DTE) directamente sem a necessidade de *modems*.

É utilizada numa grande variedade de aplicações e é caracterizada pelo seguinte conjunto de funcionalidades:

- i. Tensão de entrada entre -7V a +12V;
- ii. Capacidade máxima de, pelo menos, 32 nós em simultâneo³;
- iii. Capacidade de comunicação em longas distâncias (até 1200m);
- iv. Taxas de comunicação rápidas (até 50Mbit/s, comum 5Mbit/s).

Os dois condutores do barramento, identificados como A e B, funcionam como tensões diferenciais. Num caso comum e considerando o condutor A em relação ao condutor B, são de -1.5V a -6V para o valor binário 1 e de +1.5V a +6V para o valor binário 0.

A taxa de transmissão de dados varia inversamente ao comprimento do barramento. Por exemplo, a taxa máxima de transmissão começa a ser deteriorada a partir de 3 metros, enquanto que com o comprimento máximo (1200 metros) conseguem ser atingidos apenas cerca de 100 kbit/s.

Note-se ainda que é recomendável uma impedância resistiva (tipicamente 120Ω) nos extremos do barramento, representada por R_T na *Figura 12* na página seguinte.

³ Se os transceptores forem de alta impedância, poderão suportar até 256 nós no mesmo barramento.

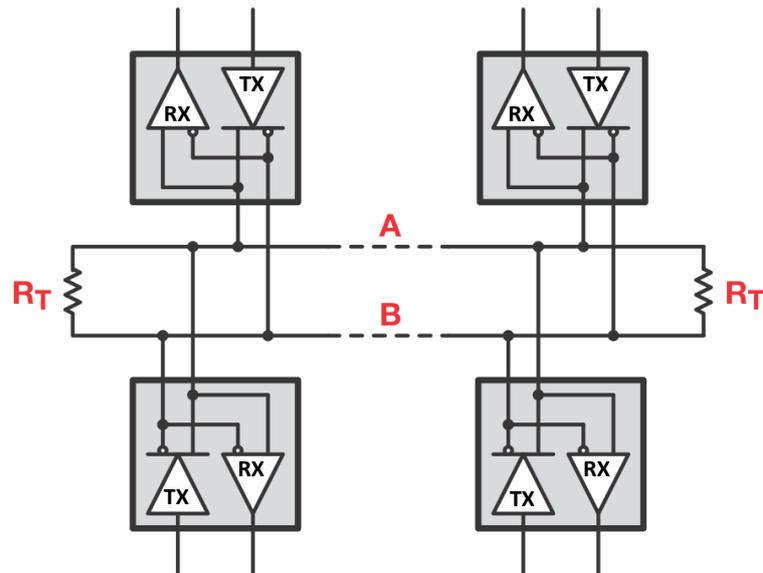


Figura 12 – Terminação paralela do barramento (TexasInstruments 2012).

Embora a comunicação seja diferencial, é necessário que todos os transceptores tenham o mesmo potencial como referência, o que requer a inclusão de um terceiro condutor no barramento para servir de massa entre todos os nós.

2.3.3. Transmissão de dados assente na linha de alimentação DC

A necessidade de alimentação dos nós pode ser um problema na instalação do sistema de manutenção. Se for efectuado da forma comum, isso exige um condutor adicional, ficando assim com 4 condutores: comunicação A, comunicação B, terminal comum (massa) e o terminal positivo.

No entanto, com recurso a alguma electrónica é possível reduzir esses 4 condutores para 2 condutores, o que, dependendo do comprimento necessário, pode ser vantajoso no orçamento da cablagem.

Trata-se de utilizar uma linha de alimentação DC, vulgarmente de +24V, na qual assenta a comunicação dos transceptores. O circuito implementado está representado no esquemático da *Figura 13*, na página seguinte.

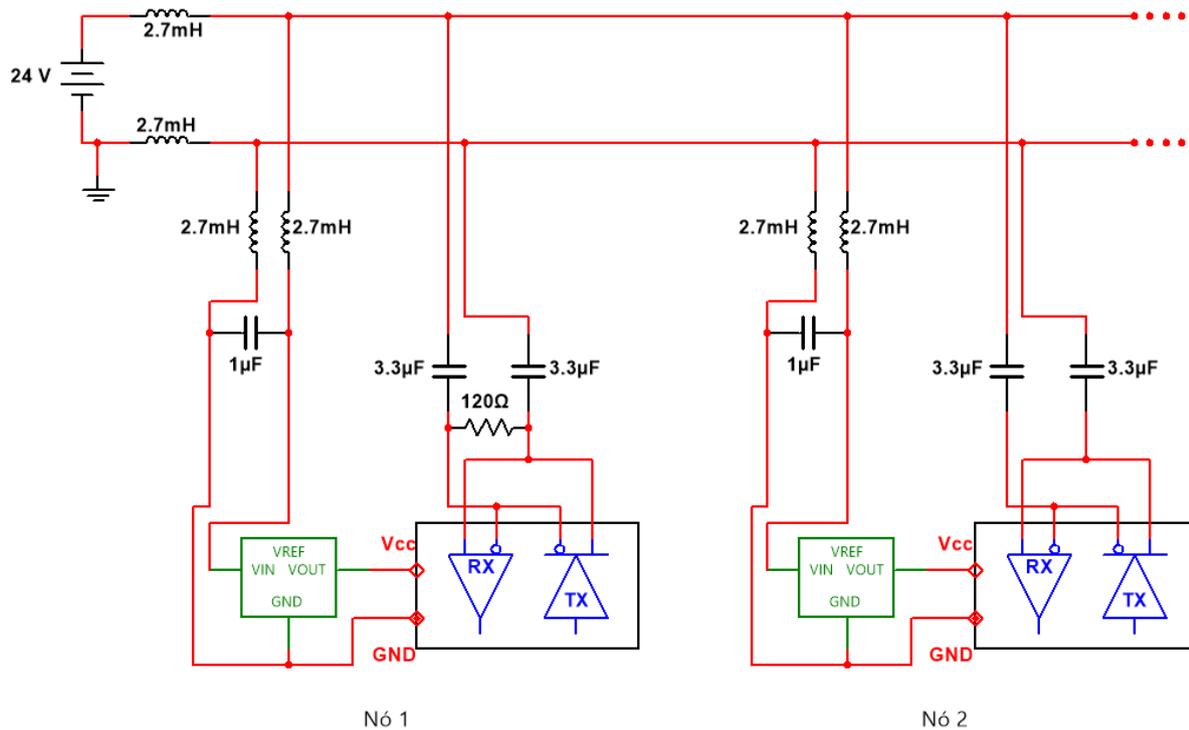


Figura 13 – Esquemático do circuito de comunicação sobre a linha de alimentação DC.

O circuito foi montado numa *breadboard* e foi utilizado um cabo de 13 metros com um par de condutores, blindado e de impedância característica de 120Ω . As resistências de fim de linha, junto a ambos os transceptores (extremos da linha), têm o valor da impedância característica. Note-se que apenas os nós nas extremidades do barramento têm a resistência de fim de linha. Os restantes, que funcionam como *stubs*, não têm qualquer resistência entre ambos os condutores.

O regulador de tensão serve para alimentar os nós (microcontrolador e sensores).

O circuito foi testado e dimensionado experimentalmente de modo a garantir o correcto funcionamento na gama de interesse (aproximadamente entre 5kHz e 50kHz).

Funcionamento do filtro

Devido à comunicação entre os transceptores ser diferencial e binária, a atenuação consequente do filtro utilizado não se reflecte na comunicação como será expectável do ponto de vista analógico. Em concreto, devido à sensibilidade dos transceptores, estes estabelecem comunicação em toda a

gama de frequências, no entanto o sinal é devidamente tratado de acordo com o que se pretende (separar a tensão DC do sinal). Ainda assim é útil fazer uma breve análise de resposta em frequência do circuito pois é necessário garantir que a frequência de corte do filtro passa-alto se encontra abaixo da frequência mínima que se pode considerar para a comunicação.

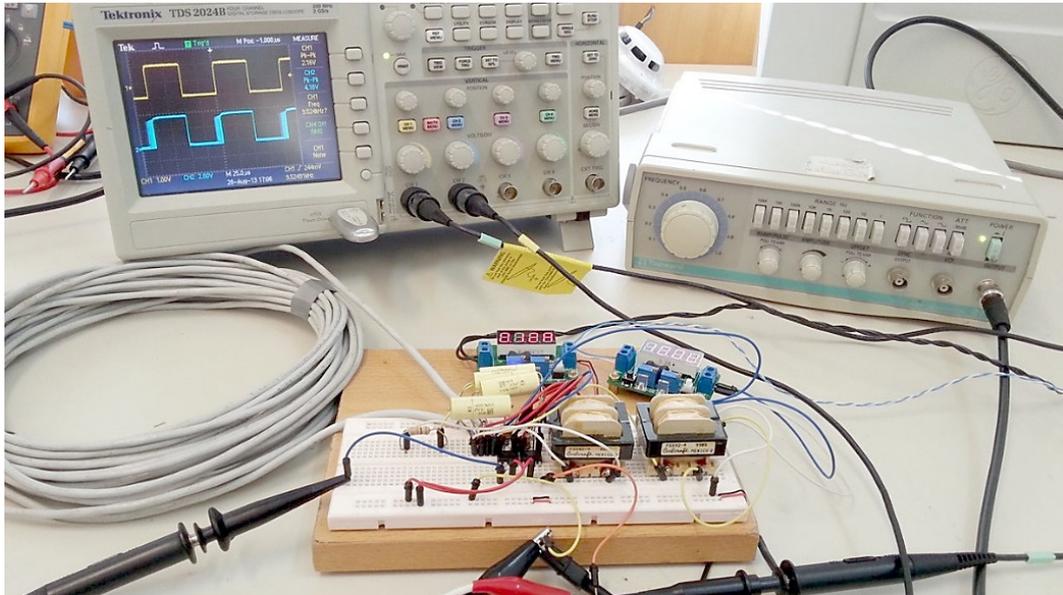


Figura 14 – Foto da montagem experimental para análise de resposta do circuito.

As bobinas utilizadas foram escolhidas tendo em conta a disponibilidade de material para desenvolver o projecto, no entanto um valor de indutância superior beneficiaria os resultados da interferência causada à tensão DC. Essas bobinas actuam como um filtro passa-baixo: isolam o sinal desencadeado pelas fontes de sinal (transceptores) e impedem-no de chegar à linha de alimentação DC, ou seja, deixam passar apenas a tensão DC (e baixas frequências).

Já os condensadores, inibem a passagem do sinal DC, pois actuam como um circuito aberto, e permitem que o sinal, a partir de determinada frequência, passe sem problemas. O sinal é acoplado capacitivamente na linha de alimentação DC. Mais especificamente, trata-se de um filtro passa-alto, representado na *Figura 15* na página seguinte.

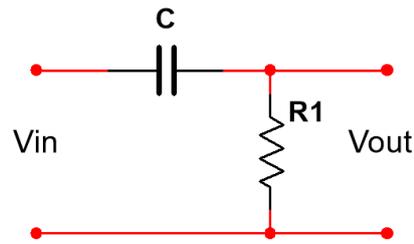


Figura 15 – Filtro passa-alto.

A sua frequência de corte é dada por

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Como existem dois condensadores no fim de linha considerado, a capacidade equivalente é

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{3.3 \times 10^{-6}} + \frac{1}{3.3 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow C_{eq} = 1.65 \times 10^{-6} \text{ [F]}$$

Considerando os valores utilizados experimentalmente, obtém-se

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 120 \times 1.65 \times 10^{-6}} = 803.8 \text{ Hz,}$$

o que se enquadra na gama de interesse. Ainda assim, seria benéfico aumentar o valor da capacidade dos condensadores utilizados de modo a baixar a frequência de corte.

Experimentalmente, utilizando o esquemático da *Figura 13*, foi possível detectar inversão no sinal de saída para uma frequência de entrada inferior a 2 kHz. A partir de 3 kHz, a comunicação foi sempre bem-sucedida, começando apenas a apresentar problemas acima de 500 kHz, relacionados com a capacidade de resposta dos transceptores.

A *Figura 16*, na página seguinte, compila os resultados da análise em quatro frequências diferentes. O canal 1 é o sinal do gerador, ligado ao pino DI do transceptor 1, e o canal 2 é o sinal recebido no outro transceptor, no pino RO⁴. O canal 3 e canal 4 estão ligados aos terminais A e B, respectivamente, do transceptor que recebe (após passar toda a linha de transmissão) e estão apresentados no “canal” MATH cujo resultado é a subtração do canal 3 ao canal 4, portanto, é o sinal visto do lado do transceptor.

⁴ Ver Anexo na secção A.2.

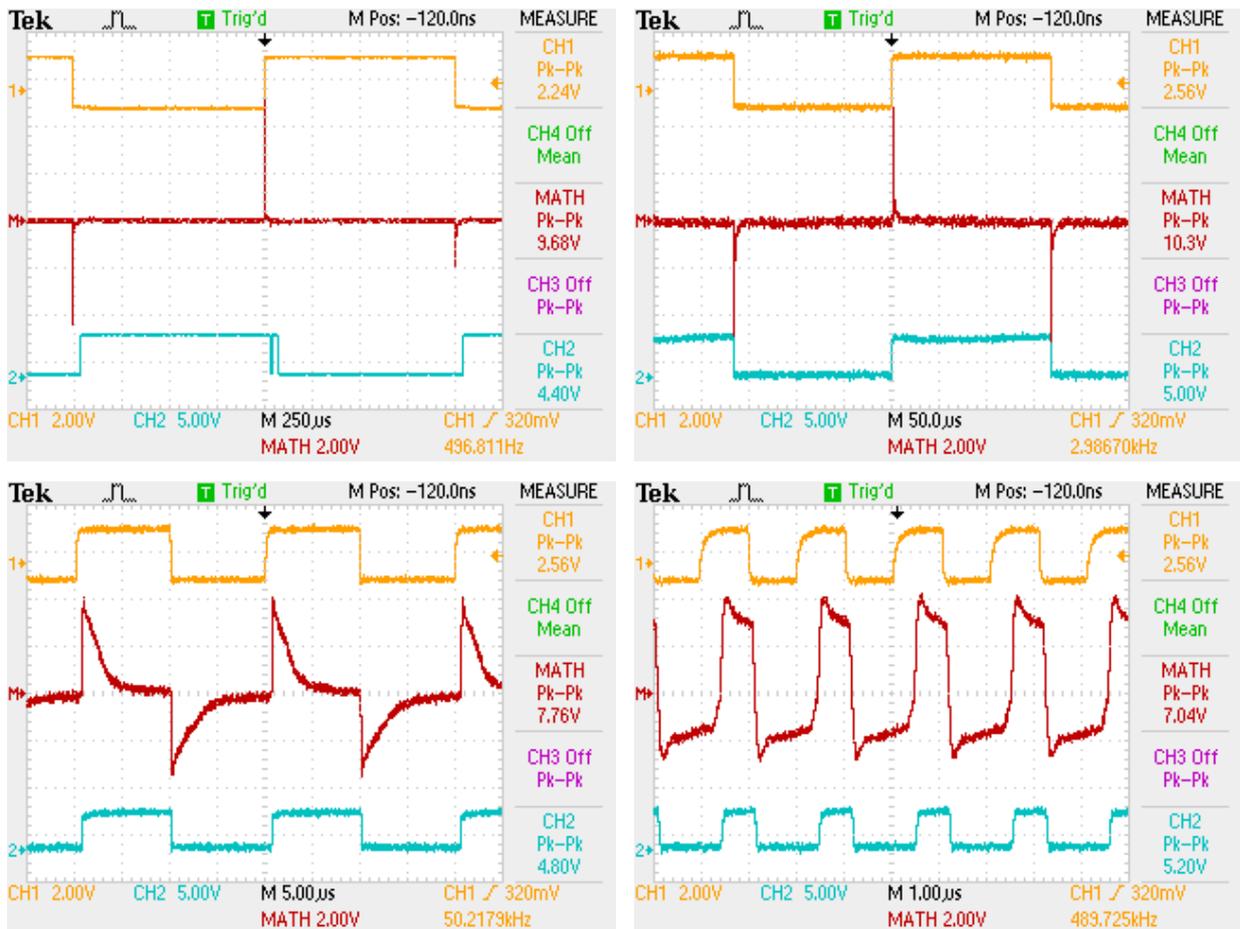


Figura 16 – Visualização no osciloscópio de sinais envolvidos na transmissão de dados.

2.3.4. Mecanismo de fiabilidade e detecção de erros

O mecanismo de comunicação que se revelou mais adequado para o propósito deste projecto é baseado em pacotes de rede. Dadas as circunstâncias da linha, uma simples transmissão sequencial de *bits* (*bit stream*) não satisfaz as exigências do que se pretende. Para esta situação, será bastante mais apropriado um método de comutação de pacotes, pois inclui várias características úteis (Leon-Garcia & Widjaja 2004).

Está disponível *online* (Majenko 2013) uma biblioteca que suporta e permite exactamente o tipo de comunicação pretendida. Chama-se *Arduino Inter-Chip Serial Communication* e, embora esteja em versão *beta*, está bastante robusta e capaz de desempenhar a tarefa na perfeição.

O pacote de rede criado com esta biblioteca contém um cabeçalho (informação acerca do pacote), um segmento de texto com dados arbitrários e uma secção de *checksum* para assegurar que o

pacote recebido é válido e que não contém erros. Todas as entradas são *bytes* e não existe confirmação da entrega do pacote (vulgarmente conhecido como *acknowledgement*).

A estrutura do pacote está representada na *Figura 17*.

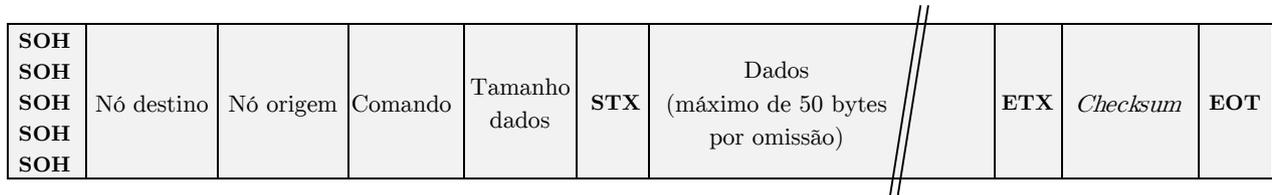


Figura 17 – Estrutura utilizada no pacote de rede.

As abreviaturas SOH (*Start of Header*), STX (*Start of Text*), ETX (*End of Text*) e EOT (*End of Transmission*) estão definidas na tabela ASCII e destinam-se a definir a estrutura do pacote de rede. Correspondem aos valores decimais 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Esta biblioteca permite definir até 254 nós e cada um deles pode enviar comandos ou mensagens para qualquer outro nó. Existe a possibilidade de registar (ou anular o registo, no decorrer do programa) de comandos que fazem um *callback* da função pretendida, passando todos os argumentos e executando a função pretendida. É ainda possível enviar um *broadcast* (envio de uma mensagem para todos os nós).

Embora os transceptores possam suportar uma taxa de transmissão elevada, não é recomendável (nem necessário) uma taxa superior a 9600 bps, de modo a prevenir a possibilidade de ocorrência de erros na comunicação. Quanto menor for a velocidade, maior é a margem para que um problema na ligação possa surtir efeitos nos dados transmitidos.

2.4. GSM/GPRS

O principal método utilizado para fazer chegar os dados desde o local da estrutura até à plataforma de monitorização é GSM. Esta tecnologia celular digital, actualmente vulgar, cobre mais de 90% de toda a população mundial e permite três tipos de comunicação móvel: chamadas de voz, mensagens de texto e serviço de dados.

O serviço de dados utilizado é GPRS, assenta sobre o GSM e consiste na comutação de pacotes. A rede criada é baseada em IP ligada a uma rede GSM e a outras redes de comutação de pacotes através de diversos interfaces e *gateways*.

2.5. Ethernet

Dependendo da disponibilidade das infra-estruturas circundantes à estrutura a monitorizar, a existência de uma ligação *ethernet* é vantajosa e preferencial em relação à GSM, já que é mais rápida, fiável, barata e menos susceptível a erros.

A ligação de dados *ethernet* é ainda a mais utilizada em ligações de rede local. Esta foi introduzida comercialmente em 1980 e em 1985 foi definida como a norma IEEE 802.3. Os sistemas que comunicam sob *ethernet* dividem uma corrente de dados em trechos mais pequenos, chamados quadros. Cada quadro contém informação dos endereços origem e destino, dados e um mecanismo de verificação de erros para, no caso de ser detectado, os dados serem retransmitidos.

3. Elementos do sistema

O *design* conceptual comum consiste em sensores com diversas capacidades e *hardware* para a aquisição de dados, comunicação e processamento, de forma a avaliar a integridade da estrutura.

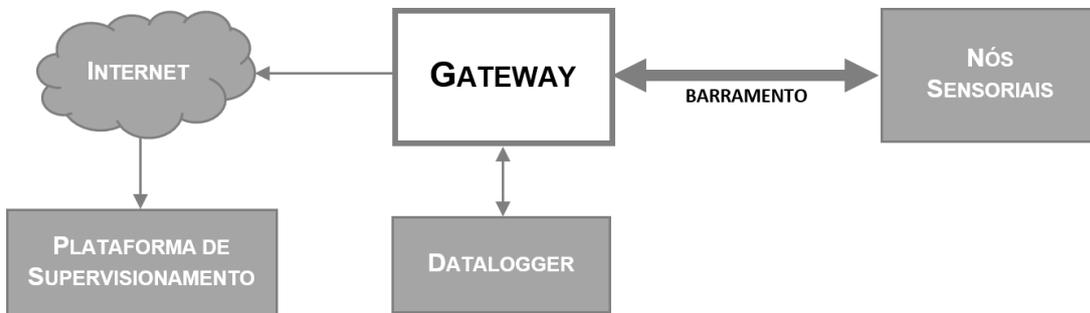


Figura 18 – Arquitectura comum.

Uma estrutura que necessite de monitorização, normalmente atinge determinadas dimensões que exigem um barramento⁵ para comunicação. Dado esse facto, torna-se necessária a existência de nós sensoriais que recebam pedidos do *gateway* (nó principal). Por sua vez, o *gateway* envia a informação recolhida para o *datalogger* (o seu principal propósito é criação de *backup*) e para uma plataforma de supervisão.

Para implementar todo o sistema foi efectuada uma análise de mercado com o objectivo de encontrar o equipamento que melhor satisfaz as necessidades. Assim, todo o equipamento foi escolhido tendo em vista as características, funcionalidade, consumo energético e o preço.

3.1. Microcontroladores e expansões

A Arduino é uma plataforma de código aberto para conceber protótipos de electrónica, abrangendo *hardware* e *software*. A programação é geralmente feita no IDE do Arduino, numa linguagem semelhante a C++.

Os microcontroladores utilizados são produzidos pela Atmel, de arquitectura AVR (Atmel n.d.), e equipam as placas de desenvolvimento utilizadas. Existem vários modelos que variam com base na versão do microcontrolador que possuem, com diferenças essencialmente na nível da memória

⁵ *Bus*, em língua inglesa.

disponível e no número de entradas e saídas. No entanto as três placas de desenvolvimento mais populares são Arduino Micro, Arduino Uno e Arduino Mega.

Tabela 1 – Comparação entre diferentes modelos de placas Arduino.

Placa Arduino	Micro	Uno	Mega
Microcontrolador	ATmega32u4	ATmega328p	ATmega2560
Tensão de operação	5 V		
Tensão de entrada	7-12 V		
Entradas/saídas digitais	20	14	54
Canais PWM	7	6	15
Entradas analógicas	12	6	16
Corrente DC portas digitais	40 mA		
Memória Flash	32 kB		256 kB
Memória SRAM	2.5 kB	2 kB	8 kB
Memória EEPROM	1 kB		4 kB
Velocidade de relógio	16 MHz		
Preço médio (s/ IVA)	18€	19€	39€

A placa Arduino Mini, de dimensões reduzidas, é suficiente e ideal para equipar os nós sensoriais na estrutura a monitorizar. Já para o *gateway*, dada a necessidade adicional de recursos, a placa Arduino Mega é determinante para controlar todo o processo.

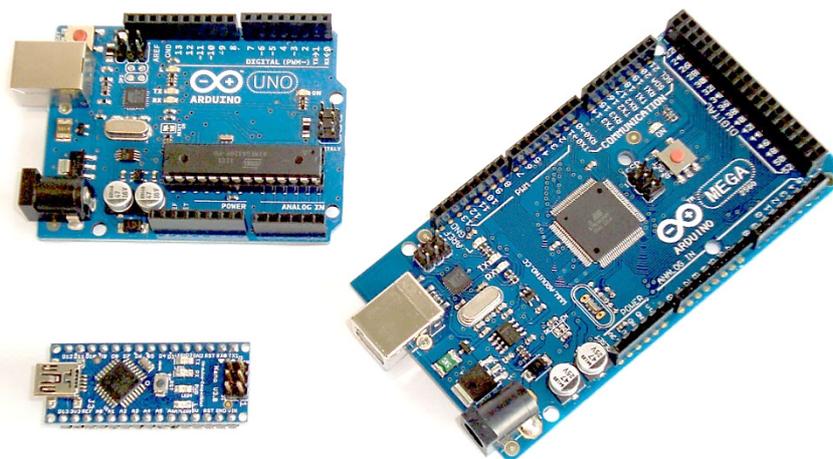


Figura 19 – Placas de desenvolvimento Arduino.

Estas placas permitem a adição de outras placas de expansão, chamadas de *shields*, que adicionam outras capacidades (GSM, Ethernet, Wi-Fi, GPS, LCD, etc). Em concreto, são utilizados três placas de expansão neste projecto, unicamente no *gateway*: GSM, *ethernet* e LCD.

Como produto final, não é comum utilizar estas placas de desenvolvimento em sistemas embebidos, no entanto é possível fazê-lo pois podem ser acondicionadas facilmente em invólucros preparados para tal.

Dado que todos os conteúdos são de código aberto, incluindo o *hardware*, existe produção de placas de desenvolvimento Arduino no mercado chinês de qualidade equiparada à original (fabricado em Itália), com valores entre os 5€ e 15€ (IVA incluído).

Placa de expansão GSM

A placa de expansão GSM serve para tratar toda a comunicação sem-fios entre o *gateway* e o servidor da plataforma de supervisionamento. Esta placa de expansão, recentemente colocada no mercado, foi desenvolvida pela Arduino em parceria com a Telefónica I+D, e disponibiliza uma biblioteca bastante robusta para interacção com esta placa. É de notar que nenhuma das outras placas GSM disponíveis no mercado, para utilização com a plataforma Arduino, tem tanta fiabilidade.



Figura 20 – *Shield* GSM Arduino.

O *modem* M10 da Quectel, que equipa esta placa, é *quad-band* e suporta frequências GSM 800MHz, GSM 900MHz, DCS 1800MHz e PCS 1900MHz. Suporta os protocolos TCP/UDP e HTTP sobre a ligação GPRS, cuja velocidade máxima possível é 85.6 kbps. É actuado com comandos AT e

utiliza apenas três portas digitais do Arduino: porta 10 para RX, porta 3 para TX e porta 7 para fazer *reset* ao *modem* (Arduino n.d.). A comunicação série utilizada é feita por *software*, devido ao Arduino Uno (e similares) terem apenas uma interface série por *hardware* e essa ser utilizada para outras necessidades (incluindo o *upload* do programa).

O seu preço é cerca de 70€ (+IVA).

Placa de expansão *ethernet*⁶

A placa de expansão *ethernet* baseia-se no *chip* WizNet W5100, suporta até 4 ligações *socket* em simultâneo, tem um *buffer* interno de 16 kB, suporta ligações 10/100 Mbit (norma IEEE 802.3) e liga-se à rede através de um cabo *ethernet* RJ-45.

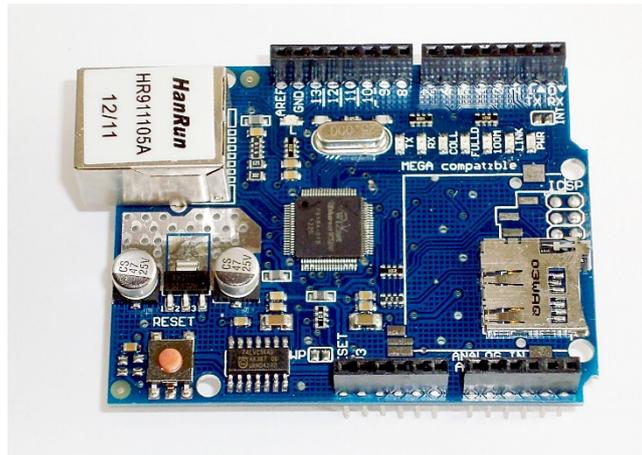


Figura 21 – *Shield* Ethernet Arduino.

Dispõe ainda de um suporte para cartões de memória *microSD*. A interface de comunicação com a placa Arduino é a SPI, quer para a funcionalidade *ethernet* quer para o cartão *microSD*, e apenas podem funcionar alternadamente.

O seu preço é cerca de 30€ (+IVA).

⁶ Esta placa tem a mesma função da placa GSM e servirá em detrimento da mesma (ver secção 2.5).

Placa de expansão LCD

O LCD não desempenha uma função determinante no sistema, contudo pode ser extremamente útil em situações de teste e *debug*. A placa de expansão utilizada chama-se LCD Keypad Shield e é distribuída pela DFRobot.



Figura 22 – Shield LCD Keypad DFRobot.

O ecrã LCD é composto por 2 linhas por 16 colunas e dispõe de um conjunto de botões de controlo, útil para o caso de utilização de um menu de opções⁷. Requer sete portas digitais e uma analógica (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e A0), o que implica alguma manipulação física dos pinos devido à colisão de portas com a placa de expansão GSM.

O seu preço é cerca de 9€ (+IVA).

3.2. Datalogger

O *datalogger* é um dispositivo com particularidades específicas, direccionado ao registo de dados com informação temporal. Trata-se da placa de desenvolvimento Seeeduino Stalker, equipada com um microcontrolador Atmel ATmega328p, *slot* para cartão de memória *microSD*, relógio de tempo real (DS3231SN), circuito de energia para bateria e painel solar (controlado pelo *chip* CN3063), com a possibilidade de acomodar um módulo ZigBee.

⁷ Menu não desenvolvido neste projecto.

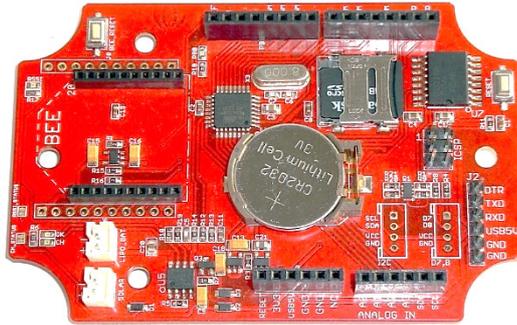


Figura 23 – Placa Seeduo Stalker.

O objectivo principal na utilização desta placa é a garantia da existência de uma cópia de segurança de toda a informação recolhida, no caso de haver algum problema no envio da informação para a plataforma de supervisão. Serve também para configurar todo o sistema, recorrendo apenas à edição de um ficheiro existente no cartão *microSD*.

Para garantir a monitorização de informação sensorial pontual, em situações de quebra de energia, esta placa dispõe da ajuda de uma bateria e de um painel solar. Por outro lado, se não houver essa necessidade (ou se estiverem outros recursos energéticos ao dispor) e se a placa de expansão *ethernet* estiver disponível no *gateway*, então esta placa *datalogger* é dispensável, pois o cartão de memória *microSD* pode ser lá colocado, ficando apenas a restar um módulo para o relógio de tempo real.

O preço do Kit, que inclui a placa de desenvolvimento, bateria, painel solar, programador, pilha CR2032, cartão *microSD* de 2GB, cabo USB e caixa hermética, é cerca de 37€ (+IVA).

3.3. Transceptor

O transceptor⁸ é um dispositivo, normalmente em formato de circuito integrado, que combina a emissão e recepção de dados. Existem vários fabricantes de transceptores RS-485, como é o caso da Texas Instruments, Maxim Integrated, Linear Technology, Analog Devices, Intersil, entre outros.

⁸ *Transceiver*, em língua inglesa.

A placa *MonStruct Shield* foi desenvolvida com o objectivo não só da comunicação e integração do respectivo transceptor mas também de outros pormenores necessários ao funcionamento do sistema de monitorização.

Esta placa de expansão está preparada para operar com a comunicação separada da alimentação (utilização das ligações A, B, GND e 5V) ou sobre uma linha de alimentação DC (utilização das ligações PA e PB), tal como foi abordado na secção 2.3.3. Todos os componentes necessários à filtragem do sinal estão incluídos nesta placa. A selecção de uma destas duas formas de operar é feita com a alteração de dois *jumpers* localizados na placa: U2 e U3.

O pino digital que é necessário para activar a comunicação no transceptor poderá estar ligado ao pino 2 ou ao pino 12 do Arduino, mediante a selecção do *jumper* U1. Esse *jumper* pode ainda ser retirado e pode ser utilizada uma ligação, com auxílio de um fio, a outro qualquer pino de maior conveniência.

Existe ainda um DIP *switch* de 5 *bits* que serve para identificar o respectivo nó, até um máximo de 32 nós. A inclusão deste componente é determinante pois é necessária uma correcta identificação dos nós para que a comunicação ocorra com sucesso.

3.5. Sensores

O sistema está apto a ler três tipos de sensores: analógicos, digitais e I²C. Parte dos sensores utilizados experimentalmente estavam disponíveis no laboratório e não são específicos para utilização em estruturas civis, no entanto são suficientes para testar a capacidade funcional do sistema.

Os sensores testados foram:

- i. **Sensirion SHT10** (Sensirion n.d.) – sensor de temperatura e humidade. Utiliza duas portas digitais e necessita da biblioteca para um funcionamento óptimo. É apropriado para utilização na estação meteorológica. O preço unitário é cerca de 16€ (+IVA);
- ii. **TPA81** (Devantech n.d.) – sensor de pilha termoelétrica de infravermelhos. Utiliza um microcontrolador Microchip 16F88, tem um *array* de detecção de 8x1 e um sensor de

temperatura ambiente. Utiliza a interface I²C nos endereços 0x01 (ambiente) e 0x68 (*array*) e não é apropriado para utilização numa estrutura civil;

- iii. **ST LIS3LV02DL** (STMicroelectronics n.d.) – acelerómetro. É um acelerómetro linear de 3 eixos, utiliza a interface I²C e pode ser utilizado numa estrutura. O preço unitário é cerca de 10€ (+IVA);
- iv. **LVDT Solartron AC25** – transformador diferencial variável linear. Este é um LVDT perfeitamente adequado para utilização numa estrutura civil para aquisição de valores de deslocamentos. Recorre à placa de condicionamento de sinal CN0301 da Analog Devices (Devices n.d.) e é utilizado um ADC para adquirir o seu valor de saída. O preço do LVDT é cerca de 120€ e o respectivo circuito de condicionamento 30€ (+IVA).

Em anexo (secção A.3.) está descrito todo o processo de configuração e aquisição de dados com o sistema descrito.

Poderiam ter sido utilizados outros sensores mas o propósito de teste e validação não o exigiu.

3.6. *MonStruct supervisor* – Servidor SCADA

O servidor consiste num computador ligado à rede com acesso a partir do exterior, que se encontra no laboratório e tem instalada uma adaptação da plataforma ScadaBR⁹, de código aberto.

O *MonStruct supervisor* funciona num servidor Apache Tomcat cujos dados podem ser armazenados numa base de dados Apache Derby ou MySQL. Existem várias formas de submissão de dados na plataforma, no entanto a mais prática e leve em recursos é através da utilização do método HTTP GET. Para o fazer, basta que o *gateway* aceda ao URL do servidor (através de ligação à Internet via GSM ou *ethernet*) com argumentos específicos. O tamanho máximo do URL são 2048 caracteres, mais que suficiente para o que se pretende.

O sistema pode ser configurado com diferentes permissões de acesso, programar eventos (diferentes estados periódicos), desencadear alarmes, alertar via *e-mail*, entre outros.

⁹ <http://www.scadabr.com.br/>

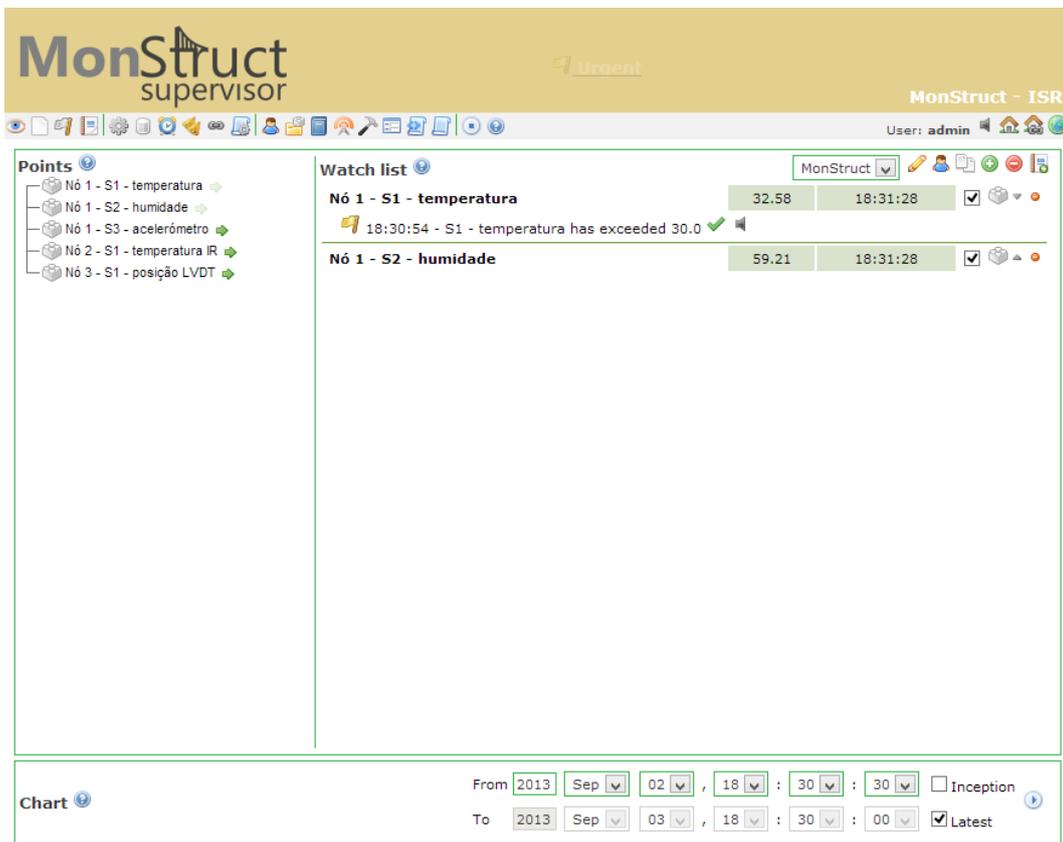


Figura 26 – Aspecto da plataforma de supervisionamento *MonStruct supervisor*.

4. Implementação do sistema

Este sistema foi projectado tendo em conta a necessidade de uma grande flexibilidade, pretendendo-se a capacidade de adaptação a qualquer tipo de configuração e estrutura. Também se pretende que não sejam necessários grandes conhecimentos técnicos para a configuração de todo o sistema, bastando para isso seguir um guia.

4.1. Arquitectura

O sistema foi concebido para instalar de acordo com a arquitectura representada na *Figura 27* e é composto por três tipos de microcontroladores Atmel, abaixo descritos.

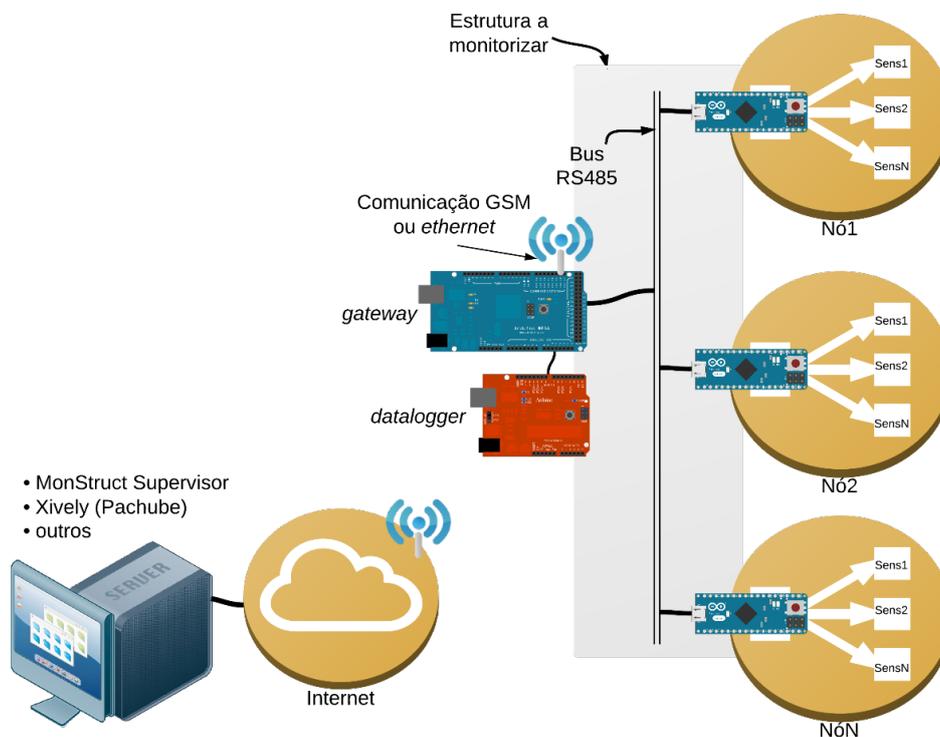


Figura 27 – Arquitectura do sistema desenvolvido.

Microcontroladores Atmel:

- i. **Arduino Mega** – *gateway* para controlar todo o processo;
- ii. **Arduino Pro Mini Seeeduino Stalker** – *datalogger* para registar toda a informação;
- iii. **Arduino Mini** – nó sensorial.

O barramento RS-485 é a via de comunicação entre todos os nós, possível com recurso aos transceptores.

A plataforma de supervisionamento pode ser baseada num servidor SCADA ou noutra plataforma devidamente configurada, como a plataforma Xively, ThingSpeak ou semelhante, discutido na secção 4.5.

4.2. Software

O *software* MonStruct consiste e três programas distintos: *gateway* (nó principal), *datalogger* e nós sensoriais.

Para cada um dos três programas houve a necessidade de criação de várias bibliotecas e respectivas classes, de forma a executar as principais tarefas com maior facilidade, dado o nível de complexidade atingido por cada um dos programas, maior organização do programa, encapsulamento e a possibilidade de modularidade.

4.2.1. Biblioteca de comunicação

A biblioteca escolhida para tratar toda a comunicação entre os microcontroladores, via UART, foi a *Arduino Inter-Chip Serial Communication* (ICSC), de código aberto e disponível *online* (Majenko 2013). Esta biblioteca tem características úteis ao propósito pretendido e é de utilização relativamente simples e completa.

Destacam-se as principais funções:

- i. **Inicialização** – função `begin(stationId, baudRate, &SerialPort, DEPin)`. Na inicialização é identificado o número correspondente ao nó, a taxa de transmissão e o número da porta série por *hardware* pretendida. Opcionalmente, é possível definir o pino digital para controlar o transceptor RS-485.

Exemplo: `ICSC.begin(3, 9600, &Serial1, 4);`

- ii. **Registar um comando** – função `registerCommand(commandID, commandCallback)`.

O registo de um comando permite desencadear o *callback* à função definida. Ao enviar uma

mensagem, pode ser incluído o comando para facilitar a acção a efectuar.

Exemplo: `ICSC.registerCommand('F', &func);`

```
void func(unsigned char source, char command, unsigned char length, char
*data){}
```

- iii. **Enviar uma mensagem** – função `send(destination, commandID, length, data)`.

Basta definir o nó destino, o comando a executar e os dados a enviar, se necessário. Para enviar um *broadcast* basta enviar para o destino '0' ou utilizar a função `broadcast(command, length, data)`.

Exemplo: `send(6, 'T', 5, (char *)&myData);`

- iv. **Recepção de mensagens** – função `process()`. Esta função deve ser chamada pelo menos em cada *loop* do programa, ou sempre que possa existir uma mensagem para receber.

Exemplo: `ICSC.process();`

4.2.2. Gateway

Como já referido, a função do *gateway* é o controlo de todo o processo, fazer pedidos aos nós sensoriais, recolha dos dados e o seu registo quer no *datalogger* quer na plataforma de supervisão. Embora as placas de expansão GSM e *ethernet* estejam referidas como alternativas, uma à outra, podem ser utilizadas e configuradas em simultâneo, para que uma actue no caso de a outra falhar. Neste caso a interface *ethernet* é a preferencial.

Para o programa do *gateway* foram criadas quatro bibliotecas: *gsmcom*, *ethercom*, *lcdkeypad* e *rs485com*, cada uma com uma classe. Os nomes são sugestivos e não deixam dúvida quanto à sua utilidade. Para a comunicação com o *datalogger*, foi criado um outro objecto para comunicação, da biblioteca ICSC. Embora o *datalogger* esteja ligado directamente ao *gateway*, via porta série, é mais fiável utilizar os recursos daquela biblioteca para gerir toda a comunicação e desencadear os pedidos.

O programa principal cria o objecto para cada classe, inicializa todas as interfaces necessárias (comunicação RS-485, GSM/*ethernet* e LCD) e pede a configuração ao *datalogger*. Assim que a configuração é bem-sucedida, o funcionamento do programa passa para o modo de aquisição de dados, cujos pedidos aos nós são efectuados com a periodicidade definida na configuração, recorrendo à biblioteca *TimedAction* (Brevig 2009).

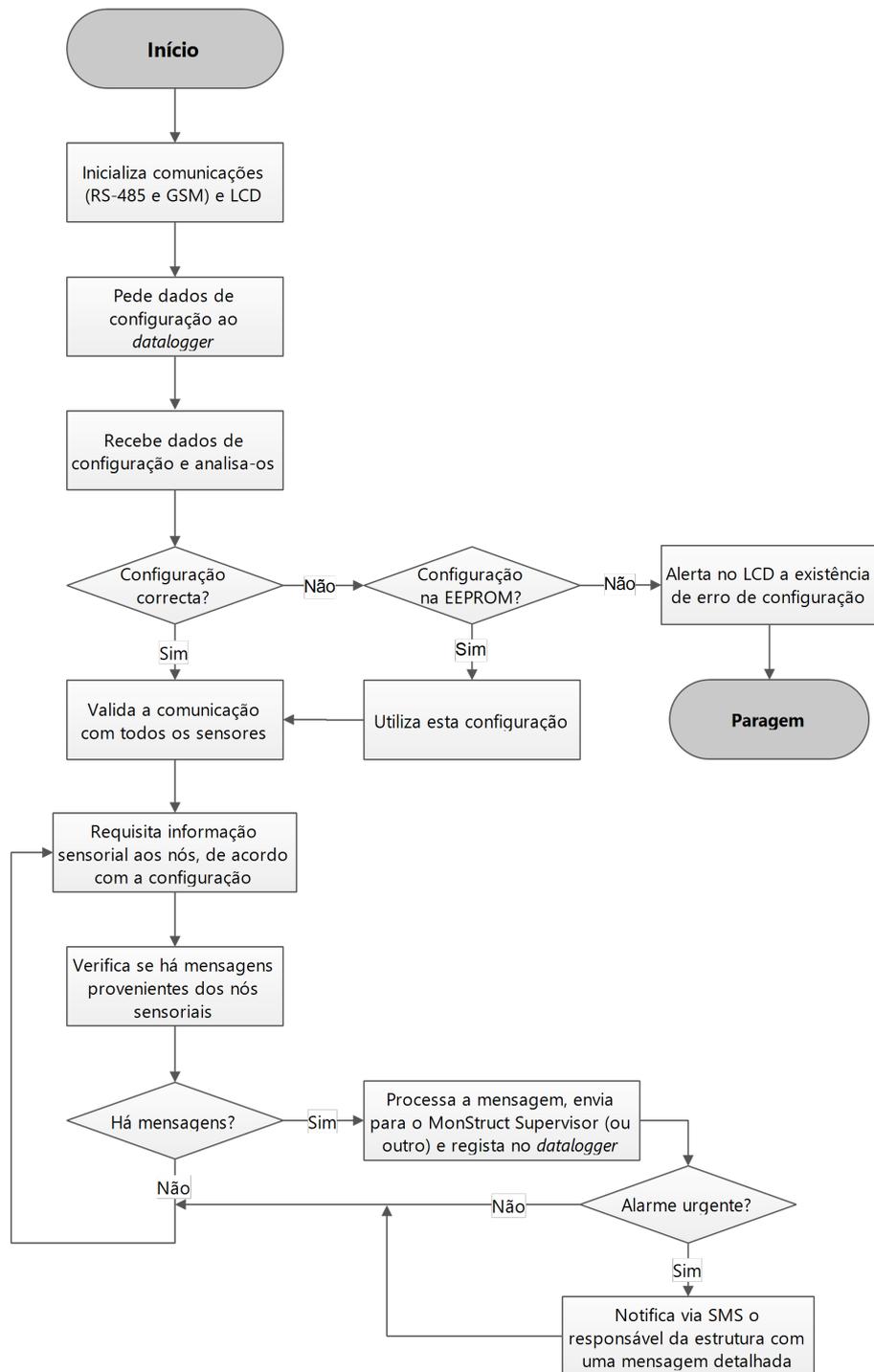


Figura 28 – Fluxograma do funcionamento do *gateway*.

Para os pedidos de leituras sensoriais aos nós, o *gateway* apenas utiliza a configuração que recebeu e faz um pedido específico a determinado nó, sem ser necessária qualquer configuração do nó. O funcionamento do *gateway* está representado no fluxograma da *Figura 28*.

O *gateway* tem ainda um mecanismo de *watchdog* implementado num *bootloader* modificado. Esse mecanismo permite que, no caso de o microcontrolador deixar de responder por qualquer motivo,

durante um tempo definido, é feito um “*auto-reset*” à placa permitindo que o programa seja reiniciado.

4.2.3. *Datalogger*

O *datalogger* inclui o cartão *microSD* que é o suporte para a configuração de todo o sistema a partir do ficheiro `nodes.cfg`¹⁰. Para o programa do *gateway* foram criadas três bibliotecas: *logger*, *rs485com* e *rtc*, cada uma com uma classe. A biblioteca *logger* gere toda a interacção com o cartão *microSD*.

O registo de toda a informação sensorial recolhida é efectuado pelo *datalogger*, para o cartão *microSD* e sempre que o *gateway* lhe dá ordem para tal. Este registo é encarado apenas como uma cópia de segurança de toda a informação sensorial recolhida e eventual registo de informação *debug*, no sentido de colmatar eventuais falhas de comunicação para a plataforma de supervisionamento. O relógio de tempo real integrado é determinante para que cada evento tenha sempre a hora associada. É possível perceber o funcionamento do *datalogger* através da representação na *Figura 29*, na página seguinte.

¹⁰ O método de configuração encontra-se descrito na secção 4.4.

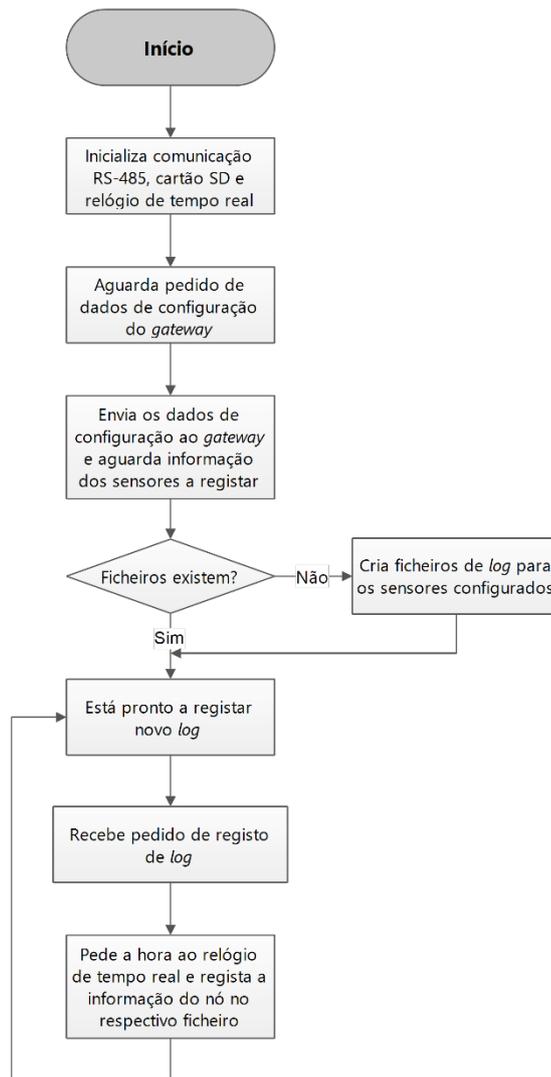


Figura 29 – Fluxograma do funcionamento do *datalogger*.

4.2.4. Nó sensorial

O nó sensorial é o responsável pela aquisição de dados de todos os sensores a ele ligados. Está apto a funcionar com sensores analógicos (via ADC), sensores digitais, I²C e outros que, mesmo utilizando uma destas 3 interfaces base, necessitem de algum tratamento adicional e consequente criação específica de tipo.

Para o programa do nó foram criadas três bibliotecas: *NodeSelector*, *rs485com* e *sensors*, cada uma também com uma classe. A biblioteca *NodeSelector* faz a leitura do DIP *switch*, para já de 5 *bits*, que define o endereço do nó no barramento RS-485.

A biblioteca *sensors* é composta por várias funções, que interagem directamente com os sensores e são chamadas a partir da biblioteca *rs485com*, mediante a ordem que é recebida do *gateway*.

O funcionamento do nó está representado no fluxograma da *Figura 30*.

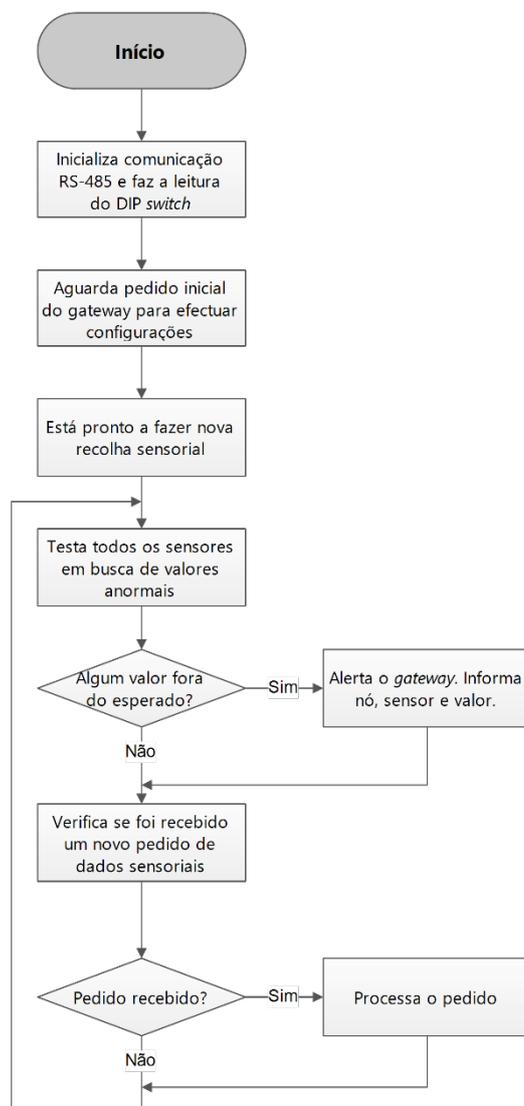


Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do nó sensorial.

4.3. Características e funcionalidades

Este sistema foi concebido tendo em vista tanto os requisitos mínimos (secção 2.2) como algo que o coloque num patamar mais interessante. Supondo a hipótese de produto comercial, os três elementos principais (*gateway*, *datalogger* e nó sensorial) estão prontos a operar sem a necessidade de serem reprogramados. O *software* foi implementado para que seja apenas necessária uma simples e correcta configuração, ficando dessa forma tudo a funcionar devidamente.

Há a questão da restrição ao suporte de sensores específicos, onde o pedido de aquisição de dados teria que ser implementado pontualmente, ou alternativamente fazer a pré-implementação de um leque bastante mais alargado de sensores, algo que seria possível num estado mais maduro do *software*.

Em resumo, as funcionalidades são:

- Configuração *user-friendly* a partir de um ficheiro;
- Fácil identificação dos nós com recurso a um DIP *switch*;
- Elevada adaptabilidade do nó sensorial aos possíveis sensores;
- Registo local de informação relacionada com o estado do sistema;
- Registo local de toda a informação sensorial recolhida;
- Integração de um LCD, actuado por um interruptor, para visualizar informação diversa no local a monitorizar (*gateway*);
- Capacidade de comunicar para a Internet, via *ethernet* ou GSM;
- Opção de registo remoto de dados para mais que uma plataforma de supervisão;
- Desencadeamento automático de alarmes, via Internet e SMS, no caso de se verificar determinada situação;
- Possibilidade de servir de actuador.

4.4. Configuração

Para configurar o sistema é necessário aceder ao cartão *microSD*, presente no *datalogger*, e editar o ficheiro `nodes.cfg` com a sintaxe apropriada. Esse ficheiro é enviado para o *gateway* assim que este o solicita.

Pretende-se que a sintaxe seja o mais simples possível, pois a simplicidade de configuração do sistema é um dos objectivos. A sintaxe implementada está representada na *Figura 31* na página seguinte.

Repete [número total sensores nó] vezes

N[número nó],[número total sensores nó],[tipo sensor],[info sensor],[amostragem]

...

UPDT,[intervalo actualização]

SMS,[número telemóvel]

ADDR,[endereço servidor]

@

Figura 31 – Sintaxe para configuração do sistema.

Cada linha iniciada pela letra N refere-se à configuração de um nó, identificado pelo valor inteiro *número nó*. Os valores admitidos pelos campos *tipo sensor* e *info sensor* estão descritos na *Tabela 2*, com a amostragem dada em ocorrências por hora.

O parâmetro UPDT refere-se ao intervalo de actualização (em segundos) dos valores de todos os sensores configurados, no sentido de encontrar um possível problema que desencadeie um alarme; o parâmetro SMS configura o número de telemóvel do responsável pela monitorização, no sentido de o informar de excepções ou alarmes (desde que esteja a ser utilizada a placa de expansão GSM); o parâmetro ADDR configura o endereço do servidor SCADA. Os parâmetros SMS e ADDR não são de configuração obrigatória e podem ser omitidos. O carácter '@' serve para identificar o final de transmissão da configuração do *datalogger* para o *gateway*.

Tabela 2 – Identificação dos diferentes tipos de sensor.

Descrição sensor	Tipo sensor	Info sensor
Analógico	A	pin
Digital	D	pin
I ² C genérico	I	address, reg
SHT1x	S	pin1, pin2, sens
TPA81	T	type
LVDT (AD7992)	L	channel

Para os sensores analógicos e digitais, o parâmetro *info sensor* refere-se ao pino de ligação e, para sensores I²C, esse parâmetro refere-se ao endereço e registo. Para os restantes, esse parâmetro refere-se a:

- SHT1x – *pin1* corresponde ao *dataPin* do sensor, *pin2* ao *clockPin* e *sens* ao sensor que se pretende ler (1 para temperatura e 2 para humidade);
- TPA81 – *type* corresponde ao tipo de sensor que se pretende, valor 1 para o *array* de temperaturas do sensor infravermelhos e valor 2 para o sensor de temperatura ambiente;
- LVDT AD7992 – *channel* corresponde ao canal do ADC AD7992 presente na placa CN0301, valor 1 para canal 1 e valor 2 para canal 2.

Supondo a necessidade de utilização de um sensor específico, seria necessária a implementação do respectivo código na biblioteca `sensors`.

Exemplo de configuração

Considera-se a necessidade de configuração de um pequeno conjunto de nós e respectivos sensores. Existem 3 nós equipados com os seguintes sensores e respectivas amostragens:

1. Sensor analógico nos pinos 3 e 4, ambos com amostragem a cada 30 segundos; sensor SHT10 nos pinos 10 e 11, para temperatura e humidade, com amostragem a cada 10 minutos;
2. Sensor LVDT AD7992 no canal 1 com amostragem a cada 5 minutos; sensor SHT10 nos pinos 10 e 11, só para temperatura, com amostragem a cada 20 minutos;
3. Sensor digital no pino 6 com amostragem a cada minuto; sensor I2C no endereço 0x54 e registo 0b100 com amostragem a cada hora;

Pretende-se configurar o intervalo de actualização local para 10 segundos, número de telefone 912345678 e endereço do servidor SCADA para <http://193.136.230.42:8080/ScadaBR/>.

A configuração a fazer é a seguinte:

```
N1,4,A,3,120,A,4,120,S,10,11,1,6,S,10,11,2,6
N2,2,L,1,12,S,10,11,1,3
N3,2,D,6,60,I,84,4,1
UPDT,10
SMS,912345678
ADDR,http://193.136.230.42:8080/ScadaBR/
@
```

A identificação dos sensores na plataforma de supervisionamento é feita de acordo com o nó em que se encontra e com a ordem em que foi configurado. Por exemplo, o sensor I²C no nó 3 será automaticamente identificado no *gateway* como N3S2, cuja variável terá de ser criada manualmente no *MonStruct supervisor*. Já para a plataforma Xively, referida na secção seguinte, os canais são criados automaticamente assim que é feito o PUT para o respectivo *feed*.

4.5. Plataformas de supervisionamento

A par com a plataforma SCADA utilizada, poderão ser utilizadas outras plataformas de supervisionamento. Existem várias de acesso gratuito e a tendência actual está a virar-se para a implementação dessas plataformas na *cloud*. Exemplos disso são as plataformas Sen.se, ThingSpeak ou Xively.

O sistema implementado está apto a trabalhar tanto com a plataforma *MonStruct supervisor* como com a plataforma Xively.

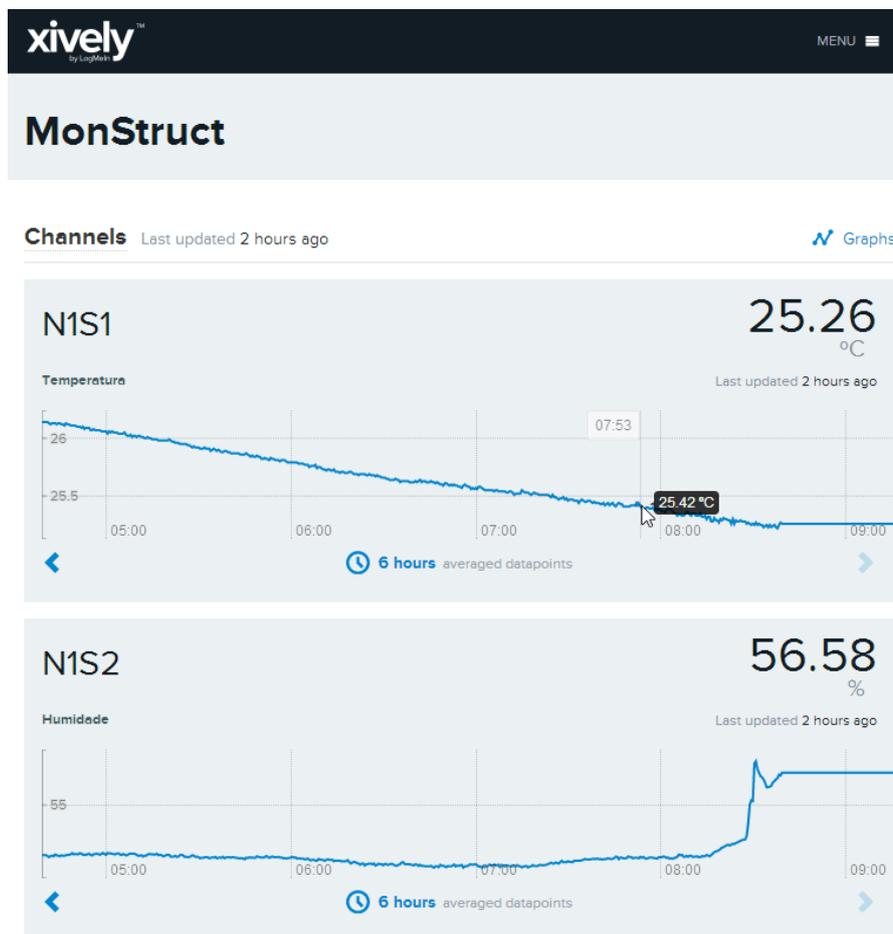


Figura 32 – Aspecto da plataforma de supervisionamento Xively.

Esta plataforma, suportada pela empresa LogMeIn, saiu recentemente da versão *beta* e está a crescer consideravelmente. Qualquer uma das outras plataformas referidas, e não só, poderá também ser integrada facilmente neste projecto, desde que tenha disponível uma API.

4.6. Custo de um sistema completo

O preço final de um sistema completo é, provavelmente, o que mais tem condicionado a adopção deste tipo de sistemas nas estruturas actuais. Apesar de não haver um valor concreto relativamente ao preço dos sistemas de monitorização disponibilizados por diversas empresas¹¹, constata-se facilmente que os valores em causa são bastante díspares, comparando com a solução de baixo custo apresentada.

O preço da cablagem e dos sensores representa a “maior fatia” num sistema deste tipo, no entanto o mercado é competitivo e o custo pode ser controlado se forem tomadas boas decisões, quer na projecção do sistema quer nos produtos e fornecedores escolhidos.

Uma estrutura com uma dimensão elevada, como uma ponte suspensa, pode necessitar de várias dezenas de sensores. Na *Figura 33* pode ser visto um exemplo de implementação na ponte Tsing Ma Bridge, em Hong Kong.

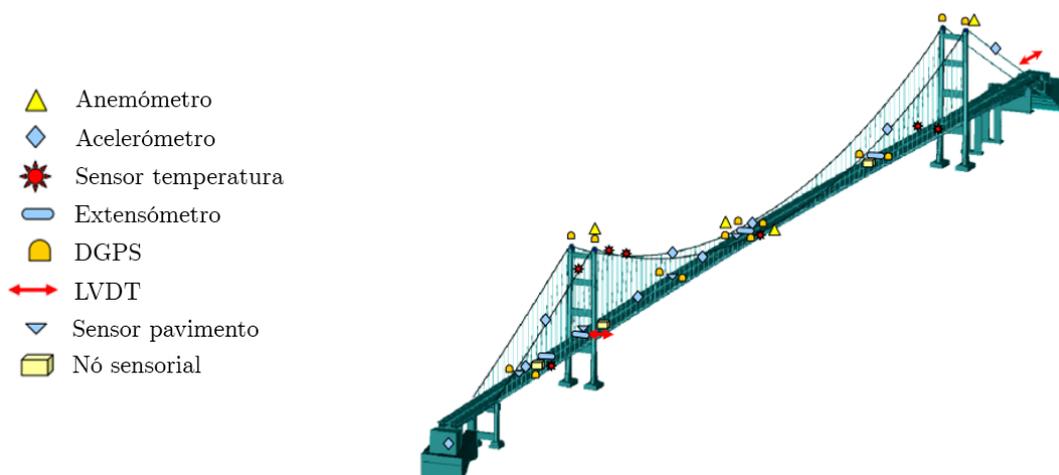


Figura 33 – Exemplo de implementação estratégica numa ponte suspensa (Fonte: HyD).

¹¹ Proddia, Oz Diagnóstico, Rohrback Cosasco Systems, Slope Indicator, Smart Fibres, entre outras.

Com base em algumas implementações já em funcionamento, colocou-se a hipótese das seguintes necessidades a implementar numa ponte em viga simples, com 100 metros de extensão. O orçamento para o material é apresentado na *Tabela 3*.

Tabela 3 – Material necessário a uma implementação.

<i>Tipo</i>	<i>Função</i>	<i>Marca/modelo</i>	<i>Quant.</i>	<i>Preço unit.</i>	<i>Preço total</i>
<i>Sensores</i>	Deslocamento - LVDT	Vishay	2	120.00 €	240.00 €
	Circuito acondicionamento LVDT	Analog Devices / AD698APZ	2	30.00 €	60.00 €
	Extensómetro	Omega / SGT-7/350-LD11	5	11.00 €	55.00 €
	Vibração - acelerómetro	STMicroelectronics / LIS3LV02DL	3	7.50 €	22.50 €
	Eléctrodo de corrosão no betão armado	Cescor / Ti MMO Electrode	4	16.00 €	64.00 €
	Temperatura no betão ou asfalto	Scale-Tron / TempTron	2	40.00 €	80.00 €
	Estação meteorológica (temp., hum., vento)	SHT10 + WindSensor + caixa	1	32.00 €	32.00 €
<i>Microcontroladores e relacionados</i>	Microcontrolador para o <i>gateway</i>	Arduino Mega	1	39.00 €	39.00 €
	Placa de expansão GSM	Arduino GSM Shield	1	70.00 €	70.00 €
	Placa de expansão LCD	LCD Keypad	1	9.00 €	9.00 €
	Microcontrolador para nó	Arduino Micro	8	18.00 €	144.00 €
	DIP <i>switch</i>	OEM	8	0.40 €	3.20 €
	<i>Datalogger</i>	Seeeduino Stalker	1	37.00 €	37.00 €
<i>Bus</i>	Transceptor RS-485	SN75176BP	8	0.62 €	4.96 €
	Cabo blindado para BUS RS-485	Benden 8132 2 pair	100	1.82 €	182.00 €
TOTAL (s/ IVA)					1 042.66 €

Da tabela pode observar-se a grande diferença de preços entre os tipos de material. Para sensores são necessários 553.50€, para o barramento 186.96€ e para os microcontroladores 302.20€. Se os microcontroladores (Arduino Mega e Micro) fossem adquiridos no mercado chinês, então seria possível poupar cerca de 138€, ficando a fatia dos microcontroladores a custar 164.20€ (todos os valores sem IVA incluído).

Há ainda que ter em conta que não é conhecido o nível de desgaste ou tempo de vida da maioria do material escolhido nem são consideradas eventuais normas a serem cumpridas.

Por vários motivos, ficaram também por contabilizar algumas quantias como cablagem diversa, sistema de alimentação, caixas para os microcontroladores e alguns sensores, placas de circuito impresso, acessórios variados, mão-de-obra de instalação e custos de manutenção.

4.7. Montagem experimental

A montagem experimental foi contruída sobre uma plataforma em madeira, de dimensões 50x40 cm, onde foram colocados todos os componentes necessários aos testes. O sistema foi testado com um *gateway*, um *datalogger*, três nós sensoriais com os respectivos sensores e diverso equipamento auxiliar. Na *Figura 34* é apresentada a montagem onde inclui alguma numeração para permitir uma melhor identificação dos componentes.

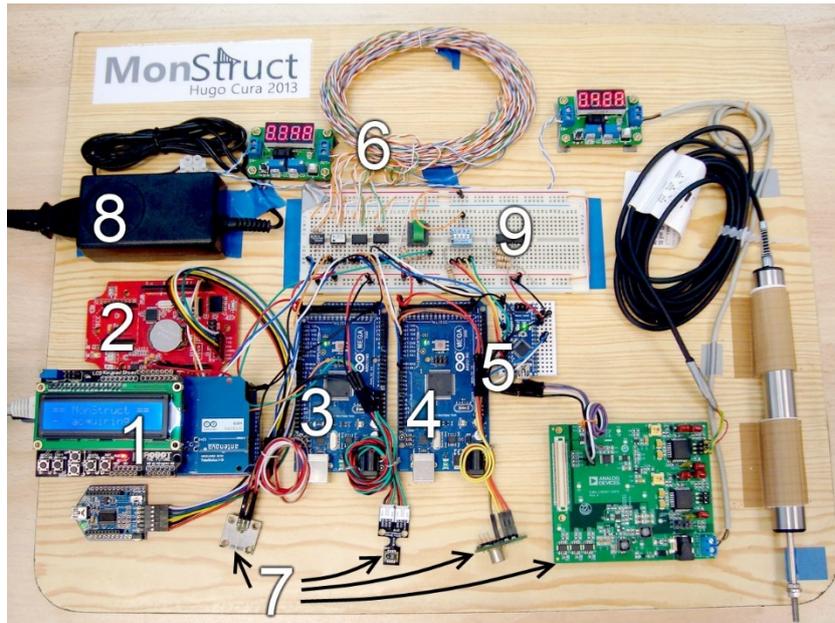


Figura 34 – Montagem experimental.

O *gateway* (1) é composto por uma placa Arduino Mega com três placas de expansão: GSM, Ethernet e LCD.



Figura 35 – Gateway utilizado na montagem experimental.

Os restantes microcontroladores são o *datalogger* (2), o nó 1 (3), nó 2 (4) e nó 3 (5). Os nós 1 e 2 têm uma placa Arduino Mega¹² e o nó 3 tem uma Arduino Nano. O barramento (6) liga cada nó com uma distância de 4 metros, num total de 12 metros de distância. A *breadboard* (9) inclui os 4 transceptores necessários, um interruptor que activa o modo *debug* no ecrã do *gateway* e um DIP *switch* que está a identificar o nó 3 no barramento. Os sensores (7) utilizados são, da esquerda para a direita, um acelerómetro, sensor de temperatura e humidade, sensor de temperatura infravermelhos e placa de condicionamento de sinal com o LVDT ligado.

O sistema é alimentado por uma fonte de alimentação (8) DC de 9 V, com corrente máxima de 1.5 A. Está a alimentar dois reguladores DC-DC, um deles a alimentar todo o sistema (5 V, corrente máxima ~ 500 mA) e o outro a alimentar a placa de condicionamento de sinal e o LVDT (6V, corrente máxima 460 mA).

¹² A escolha das placas deveu-se unicamente à disponibilidade de material para a execução do trabalho. A placa mais apropriada para os nós 1 e 2 seria uma Arduino Nano, tal como o nó 3.

5. Teste, validação e avaliação

O teste do projecto consistiu na colocação da montagem experimental em funcionamento contínuo, durante alguns dias. Foram utilizados os sensores referidos na secção 4.7 e, dada a impossibilidade de teste numa estrutura real, houve a actuação manual de alguns sensores.

O teste de funcionamento inicial consistiu em configurar correctamente todo o sistema. É determinante que os sensores sejam bem definidos na configuração para cada nó, pois é possível que sejam adquiridos dados mesmo que o sensor não esteja verdadeiramente ligado às portas definidas (caso das portas analógicas ou digitais).

No caso, a configuração utilizada no ficheiro `nodes.cfg` foi:

```
N1,3,S,8,9,1,240,S,8,9,2,240,I,29,215,720
```

```
N2,1,T,2,120
```

```
N3,1,L,1,60
```

```
UPDT,10
```

```
ADDR,monstruct.no-ip.org
```

```
@
```

O sistema iniciou, foi configurado com sucesso e começou a adquirir dados. Foram configuradas as plataformas de supervisão *MonStruct supervisor* e Xively.

No *MonStruct supervisor* foi definida a detecção de alguns eventos que desencadeiam alarmes (*Figura 36*). Um deles foi o aumento da temperatura do N1S1 (sensor 1 no nó 1) acima de 30°C. A detecção de um evento pode desencadear um *email*¹³ (opção escolhida), *Set point*, processo ou *script*. Há também a possibilidade de combinar a ocorrência (ou não) de diversas detecções para tomar depois determinada acção.

¹³ Pode ser enviado para uma *mailing list*, grupo de utilizadores ou para um único endereço.

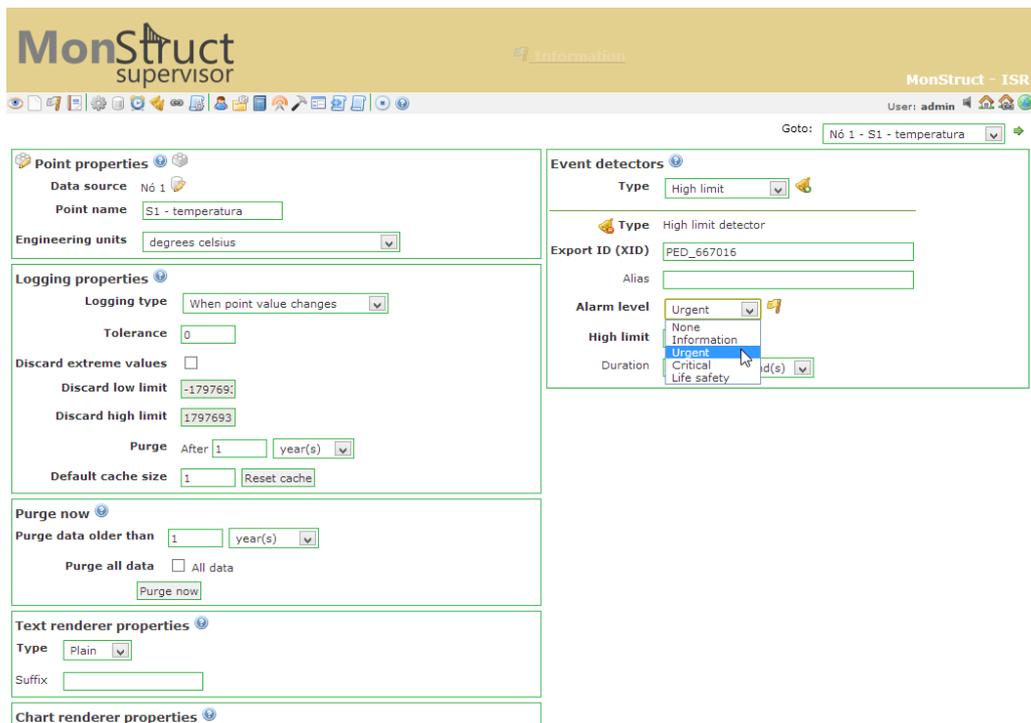


Figura 36 – Configuração da detecção de um evento.

De seguida foram efectuadas algumas perturbações ao sistema. Começou-se por desligar um sensor I²C que incorreu num valor fora do esperado e originou o envio dessa informação ao *gateway*. Essa informação surge apenas no LCD do *gateway*, no modo *debug*, embora possa ser ajustada para desencadear outro tipo de alertas, eventualmente também para a plataforma de supervisionamento numa variável específica.

O teste seguinte pretendeu desencadear o evento previamente configurado no *MonStruct supervisor*. O sensor foi levado a chegar a valores acima de 30°C e foi imediatamente recebido um *e-mail* no endereço configurado, que se apresenta na *Figura 37*.



Figura 37 – Alerta recebido no *e-mail*.

Todos os eventos ocorridos em determinada variável de dados ficam lá registados e podem ser visualizados com o máximo detalhe, como demonstra a *Figura 38*.

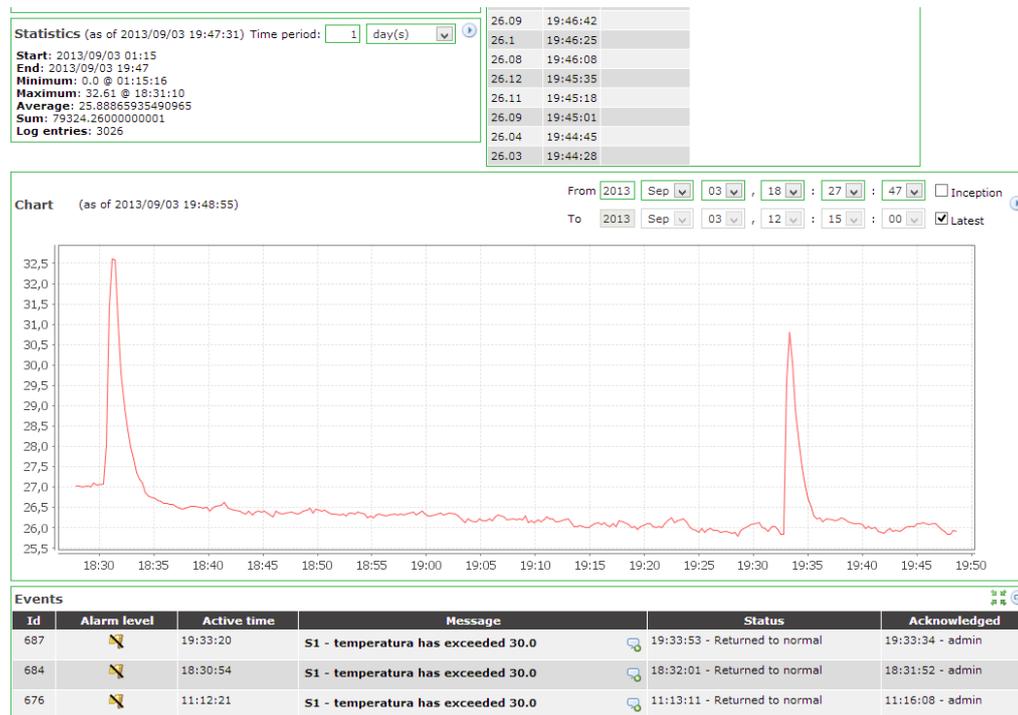


Figura 38 – Detalhe dos eventos ocorridos na variável temperatura (N1S1).

Para finalizar, a comunicação foi testada sobre uma linha de alimentação DC, utilizando o circuito implementado na secção 2.3.3, e a transferência de dados ocorreu sem qualquer problema, estando os nós a serem alimentados pela mesma linha.

Todos os testes efectuados foram bem-sucedidos, onde o sistema demonstrou ter capacidade de responder às interferências externas causadas.

Seria útil ainda a execução de outro tipo de testes, como a adição de vários nós sensoriais com o sistema em funcionamento, a utilização de um número de nós próximo da capacidade máxima dos transceptores utilizados (32 nós) ou ainda a troca de muita informação num curto espaço de tempo na tentativa de causar colisões e “entupir” o barramento.

6. Conclusões

Após toda a execução experimental é possível concluir que a tecnologia de baixo custo, utilizada de acordo com a arquitectura apresentada, é capaz de constituir um sistema fiável para monitorização de estruturas civis. Até então, a implementação deste tipo de sistemas tem sido bastante condicionada devido ao elevado preço, sendo apenas aplicado em estruturas de grande envergadura, no entanto a vertente *low-cost* tem capacidade para se expandir no mercado da monitorização de estruturas, independentemente da sua envergadura.

Foi demonstrado que o sistema implementado é robusto, considerando a actual fase de desenvolvimento do *software*, apresentando já alguma imunidade a diversas perturbações. A facilidade de utilização foi um aspecto relevante na evolução funcional do projecto, nomeadamente na sua configuração e na interacção com as plataformas de supervisão suportadas.

A comunicação com fios segundo a norma RS-485 revelou-se uma óptima opção, quer pela modularidade quer pela capacidade de expansão de nós no barramento. A comunicação GSM, suportada por um dispositivo de *hardware* recente, foi determinante para garantir a não dependência do sistema a uma ligação física à Internet.

Perante os factos descritos, foram cumpridos todos os objectivos propostos para este projecto. No entanto, dado o contexto em que se inseriu, ficaram por explorar alguns aspectos interessantes, nomeadamente o teste em ambiente real e o funcionamento com um elevado número de nós sensoriais. A colaboração directa com um engenheiro civil poderia ter permitido a aplicação de conhecimento mais específico nessa área, com o intuito de caracterizar uma estrutura apenas com base na informação sensorial recolhida.

Com o desenvolvimento deste trabalho tive a oportunidade de desenvolver e aplicar muitos dos conceitos aprendidos em todo o percurso académico. Pude ainda adquirir novas noções através de toda a literatura que me orientou na evolução deste projecto.

6.1. Trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido, sugerem-se alguns pontos que o tornariam num sistema mais completo, refinado e robusto, nomeadamente a nível do *software* MonStruct:

- i. Criação de *software* computacional para aplicação de algoritmos ou outro processamento, recorrendo directamente à base de dados criada (exportado do MonStruct supervisor, Xively ou outro);
- ii. Possibilidade de configurar o sistema e consultar informação diversa, em género de Menu, a partir de um *keypad* + LCD existente no ponto de controlo remoto;
- iii. Capacidade de configuração remota, onde seria possível alterar todos os parâmetros que são definidos no ficheiro `nodes.cfg`;
- iv. Integrar nativamente ZigBee;
- v. Cifrar a informação dos pacotes de rede trocada no barramento de forma a não correr o risco de ser interceptada ou de ser substituído um nó de forma mal-intencionada;
- vi. Compatibilizar os nós com outros protocolos de comunicação (CAN, Modbus, etc);
- vii. Implementar um sistema de sincronização temporal entre nós.

Referências

- Agbabian, M.S. & Masri, S.F., 1988. Proceedings of the International Workshop on Nondestructive Evaluation for Performance of Civil Structures.
- Arduino, Arduino GSM Shield. Available at: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoGSMShield> [Accessed August 22, 2013].
- Atmel, AVR 8-bit and 32-bit Microcontroller. Available at: <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx> [Accessed August 23, 2013].
- Bently, D.E. & Hatch, C.T., 2003. Fundamentals of rotating machinery diagnostics.
- Bergmann, N.W. et al., 2010. Low Cost Prototyping System for Sensor Networks. , pp.19–24.
- Brevig, A., 2009. TimedAction Library for Arduino. Available at: <http://playground.arduino.cc/Code/TimedAction> [Accessed August 22, 2013].
- Chang, G.C., Parrish, J.H. & Soeur, C., 1990. The First Flush of Runoff and Its Effects On Control Structure Design (1990).pdf.
- Devantech, TPA81 Infra Red Thermal Sensor. Available at: <https://solarbotics.com/product/40370/> [Accessed August 22, 2013].
- Devices, A., 2008. ADM485 - EIA RS-485 Transceiver.
- Devices, A., CN0301: Universal LVDT Signal Conditioning Circuit. Available at: <http://www.analog.com/en/circuits-from-the-lab/cn0301/vc.html> [Accessed August 22, 2013].
- Ettouney, M.M. & Alampalli, S., 2011. Infrastructure Health in Civil Engineering. , pp.12–17.
- Farrar, C.R. & Todd, M.D., 2006. Introduction to Structural Health Monitoring and Feature Extraction.
- Farrar, C.R. & Worden, K., 2007. An introduction to structural health monitoring. , pp.2–5.
- Frias, F., Moura, R. & Appleton, J., 2008. Reparação da Ponte Da Arrábida sobre o Rio Douro - Porto.
- Inaudi, D., 1997. Fiber Optic Sensor Network for The Monitoring of Civil Engineering Structures.
- Inaudi, D., 2009. Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects.

- Inaudi, D. & Manetti, L., 2009. Reinforced Concrete Corrosion Wireless Monitoring System. , (July), pp.1–10.
- Instruments, T., 2003. SN75176BP Differential Bus Transceiver.
- Khan, U.U.Z. et al., 2011. Detailed Study Of Structural Health Monitoring. , pp.3–6.
- Kiremidjian, A.S. et al., 1997. Structural Damage Monitoring for Civil Structures. , pp.2–3.
- Klinghoffer, O., Goltermann, P. & Bassler, R., 2002. Smart Structures: Embeddable Sensors for Use in The Integrated Monitoring Systems of Concrete. , pp.14–17.
- Lee, J.J. et al., 2007. Development and application of a vision-based displacement measurement system for structural health monitoring of civil structures. , pp.5–7.
- Leon-Garcia, A. & Widjaja, I., 2004. *Communication Networks: Fundamental Concepts and KeyArchitectures* 2^a Edição., McGraw-Hill.
- Majenko, 2013. Arduino Inter-Chip Serial Communication. Available at: <http://sourceforge.net/projects/arduino-icsc/> [Accessed August 23, 2013].
- Patel, P., 2009. Despite stimulus money, most U.S. bridges might stay dumb. *IEEE Spectrum*, 46(4), pp.11–12.
- Perrin, B., 1999. The Art and Science of RS-485.
- Phares, B.M. et al., 2005. Wisconsin Highway Research Program Health Monitoring of Bridge Structures and Components Using Smart Volume 1. , 1(January), pp.12–16.
- Sensirion, SHT10 - Digital Humidity Sensor (RH&T). Available at: <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-sensor-sht10/> [Accessed August 22, 2013].
- Silva, B.J.M. da, 2005. *Estruturas Inteligentes Utilizando Betão E Polímero Reforçado Com Fibras De Carbono*. Universidade do Minho.
- Šimunic, Z., Gašparac, I. & Pavlovic, B., 1997. Implementation Of Digital Measurement System In Monitoring Of Structures.
- Spyrakos, C. et al., 1990. Evaluating Structural Deterioration Using Dynamic Response Characterization. , pp.137–142.
- STMicroelectronics, LIS3LV02DL Linear Accelerometer 3-Axis. Available at: http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC444/PF127514.
- TexasInstruments, 2012. RS-485 Reference Guide.
- Worden, K. et al., 2007. The fundamental axioms of structural health monitoring.

Zhan-feng, G. et al., 2006. Network Sensor and Its Application in Structure Health Monitoring System. *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC'06)*, 1, pp.68–71.

A. Anexos

A.1. Características sistema analógico vs. digital (Šimunic et al. 1997)

Características	Sistema analógico	Sistema digital
Número de canais	128	16, expansíveis a 512
Transferência de sinal	Analógico	Digital
Configuração do sistema transferência de sinal	Radial	Em série
Expansão	Difícil	Fácil
Sensibilidade a perturbações electromagnética	Significativa	Baixa
Sensibilidade às condições meteorológicas	Significativa	Baixa
Robustez	Sistema complexo e delicado	Produto industrial
Estrutura	Complexa (difícil interpretação de erro)	Simples
Instalação	Demorada, devido à complexidade das ligações e ao diâmetro da cablagem	Simples e rápida
Aplicabilidade	Em grandes estruturas	
Confiança	Reduzida, face aos distúrbios electromagnéticos	Significante, devido à transferência digital de sinal
Compatibilidade	O sistema analógico pode ser substituído por um sistema digital simples, todos os sensores e amplificadores permanecem no sistema	
Nível tecnológico	<i>Design</i> clássico	<i>Design</i> moderno
Perspectiva	Limitada à implementação inicial	Desenvolvimento de novos componentes e sistemas

A.2. Transceptor RS-485

Um transceptor compatível com a norma RS-485 tem tipicamente 8 pinos e não há variações na sua funcionalidade, mesmo considerando fabricantes diferentes.

O *pinout* apresenta-se na *Figura 39*.

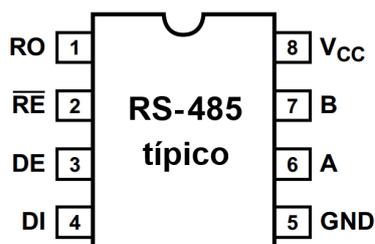


Figura 39 – *Pinout* típico de um transceptor RS-485.

A lógica de funcionamento é relativamente simples e perceptível após a análise das descrições na *Tabela 4*. Os dois condutores que fazem parte do barramento RS-485 são descritos por A e B.

Tabela 4 – Função dos pinos de um transceptor RS-485 genérico (Devices 2008).

Pino	Função	Descrição
1	RO	<i>Receiver Output</i> (liga ao RX do UART). Se A for superior a B em 200mV, RO tem nível lógico 1. Se A for menor que B em 200mV, RO tem nível lógico 0.
2	\overline{RE}	<i>Receiver Output Enable</i> . Um nível lógico 0 activa o RO; um nível lógico 1 coloca RO num estado de alta impedância.
3	DE	<i>Driver Output Enable</i> . Um nível lógico 1 activa as saídas diferenciais do <i>driver</i> , A e B; um nível lógico 0 coloca essas saídas num estado de alta impedância.
4	DI	<i>Driver Input</i> (liga ao TX do UART). Quando o <i>driver</i> está activo, o nível lógico 0 em DI força o A em 0 e B em 1, enquanto o nível lógico 1 em DI força A em 1 e B em 0.
5	GND	Ligação à massa, 0V.
6	A	Entrada receptora A não-inversora / Saída A do <i>driver</i> .
7	B	Entrada receptora B inversora / Saída B do <i>driver</i> .
8	V _{cc}	Alimentação, 5V ± 10%.

Tipicamente, estes *drivers* são projectados para funcionarem com uma corrente máxima de 60mA (potência de cerca de 0.3W). Possuem limitadores de corrente e desactivação automática térmica, que ocorre a aproximadamente 150°C. O receptor possui uma impedância de entrada mínima de 12kΩ, uma sensibilidade de entrada de ±200mV e um histerese de entrada de 50mV.

Os transceptores com capacidade para até 256 nós são actualmente bastante comuns, no entanto o transceptor utilizado, Texas Instruments SN75176BP (Instruments 2003), tem capacidade para apenas até 32 nós, suficiente para o propósito e perfeitamente adequado para estruturas que não exijam mais que 32 nós.

A.3. Leitura do deslocamento do LVDT

Para adquirir a posição do LVDT foi utilizada a placa de condicionamento de sinal CN0301 da Analog Devices. Essa placa inclui dois canais, cada um com o respectivo *chip* de condicionamento de sinal AD698.

A saída DC desse *chip* de condicionamento, com o LVDT utilizado, varia não linearmente entre -6V e +11V, lido com o multímetro em pontos de teste da referida placa. No entanto, esse valor é filtrado e limitado por um *amp-op* a uma saída entre 0V e +5V, valor esse que vai ser lido pelo ADC de 12 *bits* de interface I²C, AD7992. Essa restrição implica que o LVDT deixe de ter uma extensão de cerca de 7 centímetros e passe a estar limitado a cerca de 1 centímetro, no entanto os valores adquiridos nessa pequena extensão são extremamente fiáveis e de elevada exactidão.

A leitura desse ADC exige uma pré-configuração de alguns registos e foi necessária a implementação de um programa para recolher com sucesso a informação pretendida. Esse programa foi incluído na função *sensors* existente no *software* do nó sensorial, para assim estar apto a ler o LVDT recorrendo ao ADC AD7992.

O ADC está acessível no endereço 0x21. No *Configuration register* (endereço 0x02) é necessário apenas activar o canal no qual o LVDT está ligado (*bits* 00010000 para o canal 1). De seguida refine-se o *Cycle time register* (endereço 0x03) para $T_{convert} \times 32$ (*bits* 00000001). Basta depois adquirir os dados a partir do endereço 0x00.