



Joana Rita da Cruz Faria

Monitorização e Diagnóstico Automático de Purgadores em Linhas de Vapor Industriais através de Sensores Inteligentes Sem Fios.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Física, na área de especialização em Instrumentação, orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso, apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências de Tecnologias da Universidade de Coimbra

2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Monitorização e Diagnóstico Automático de Purgadores em Linhas de Vapor Industriais através de Sensores Inteligentes Sem Fios.

Joana Rita da Cruz Faria
Mestrado Integrado em Engenharia Física
Departamento de Física
Faculdade de Ciências e Tecnologias
Universidade de Coimbra

Orientador: Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso
Categoria: Professor Auxiliar
Departamento de Física

Júri:

Presidente: Professor Doutor José Paulo Pires Domingues
Categoria: Professor Auxiliar
Departamento: Departamento de Física

Nome: Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso
Categoria: Professor Auxiliar
Departamento: Departamento de Física

Nome: Professor Doutor Carlos Manuel Bolota Alexandre Correia
Categoria: Professor Catedrático
Departamento: Departamento de Física

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Professor Francisco Cardoso e à Engenheira Sónia Semedo que me apoiaram e guiaram ao longo do desenvolvimento deste projeto, o meu mais sincero agradecimento. Aos Engenheiros da Eneida® Marcos Cordeiro, Luís Oliveira, Sérgio Faria e Nuno Santos por estarem sempre disponíveis para prestar esclarecimentos. Aos meus pais e aos meus irmãos que sempre estiveram a meu lado com uma palavra amiga, obrigada pela paciência e carinho. Aos meus amigos, particularmente à Mariana Ramos e ao Pedro Silva que sempre se disponibilizaram para tudo.

Resumo

Um sensor inteligente sem fios e auto-alimentado é apresentado como solução de monitorização e diagnóstico de purgadores de vapor em indústrias de processo, visando evitar a degradação de eficiência energética das mesmas. Os critérios de diagnóstico dos dois tipos de falha possíveis num purgador de vapor são apresentados, bem como a estrutura e as tecnologias escolhidas para os dispositivos de sensorização, comunicação e alimentação em potência. Para além da tecnologia de sensorização e dos critérios de diagnóstico com base na informação assim obtida, especial relevo é também dado à tecnologia de captura de energia termoelétrica, tirando partido dos diferenciais térmicos inerentes à instalação industrial.

Abstract

An autonomous, wireless and self-powered smart sensor is described, addressing the condition monitoring and diagnosis of steam traps, whose performance degradation impairs energy efficiency in most of the process industries. The diagnostic criteria in the two possible failure modes of steam traps are presented, as well as the structure and technologies of the embedded devices for sensing, communication, and power supply, special attention being paid to the capability to run the system on the thermoelectric energy gathered from local pipes. Also, several test results regarding the behavior of the sensing module are presented.

Palavras-chave

Sensor inteligente; rede sem fios; energia termoelétrica; purgadores de vapor;

Keywords

Smart sensor; wireless network; energy harvesting; steam trap condition.

Conteúdo

Agradecimentos	0
Resumo.....	1
Abstract	1
Palavras-chave/ Keywords	2
Conteúdo.....	3
Índice de figuras	4
Índice de tabelas	6
Acrónimos	6
1. Introdução	7
1.1 Motivação e Objetivos	7
1.2 Estrutura da dissertação	8
2. Purgadores de vapor: caracterização e diagnóstico	10
2.1 Princípios de funcionamento	10
2.2 Tipos de falhas.....	14
2.3 Importância da monitorização de purgadores.....	16
2.4 Métodos de diagnóstico.....	18
2.4.1 Monitorização manual vs. Rede de sensores inteligentes.....	18
2.4.2 Técnica de diagnóstico	19
2.5 Conclusão – Especificação do projeto.....	22
3. Arquitetura do sistema	23
4. Sensor Inteligente	26
4.1 Comunicação.....	26
4.1.1 Módulo de comunicação.....	27
4.2 Sensorização.....	29
4.2.1 Código do microprocessador hospedeiro	33
(i) Código comum	34
(ii) Código de diagnóstico	35
4.2.2 Testes e resultados.....	37
4.3 Alimentação	42
4.3.1 Testes e resultados.....	47
5. Conclusão	55
6. Bibliografia	56

Índice de figuras

Figura 1 - Transferências energéticas entre o vapor de água em circulação e os produtos que envolvem as condutas resultando em condensado.....	10
Figura 2 - Representação esquemática do funcionamento de um purgador (FLOWSERVE Gestra, 2006)	11
Figura 3 - Representação esquemática de um bloqueio num purgador (adaptado de (FLOWSERVE Gestra, 2006)).....	15
Figura 4 - Representação esquemática de uma fuga num purgador (Adaptado de (FLOWSERVE Gestra, 2006)).....	16
Figura 5 - Representação esquemática da solução proposta, composta por duas unidades.....	23
Figura 6 - Arquitetura do sistema de comunicações.....	25
Figura 7 - ilustração de um agregado de purgadores	26
Figura 8 - Adaptação da arquitetura de comunicações do sistema.....	27
Figura 9 - Aplicação típica do LTP 5900 (Linear Technology Corporation, 2014).....	28
Figura 10 - modelo TRF7970A da Texas Instruments.....	29
Figura 11 - Representação esquemática da implementação dos módulos de sensorização (idênticos) num purgador.....	30
Figura 12 - Precisão do sensor de temperatura (ADT7301 @ 3.3 V) (Analog devices, 2011)	31
Figura 13 - Diagrama de blocos funcional do sensor ADT7301 (Analog devices, 2011)	31
Figura 14 - Arquitetura da comunicação SPI com os sensores de temperatura	32
Figura 15 - Esquemático do módulo de sensorização.....	33
Figura 16 - Fotografia do módulo de sensorização, na figura referenciado como (1).....	33
Figura 17 - Diagrama de blocos do software implementado.....	36
Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema de testes.....	37
Figura 19 - Fotografia do primeiro sistema de testes do módulo de sensorização	38
Figura 20 - Gráfico da temperatura (Teste 1).....	39
Figura 21 - Fotografia do novo sistema de testes	40
Figura 22 - Gráfico do processo de arrefecimento	40
Figura 23 - Gráfico do processo de aquecimento	41
Figura 24 - Aplicação típica do circuito integrado LTC3109 (Linear Technology Corporation, 2014)	43
Figura 25 - Imagem de transformadores coilcraft	44
Figura 26 - Imagem de termopilha da laird technologies	44
Figura 27 - Diagrama esquemático das ligações do microprocessador MSP430F2418.....	44
Figura 28 – Diagrama esquemático do módulo de alimentação	45
Figura 29 - Fotografia do módulo de alimentação.....	45
Figura 30 – Diagrama de blocos do sistema de testes.....	46
Figura 31 - Fotografia do sistema de testes inicial.....	47
Figura 32 - Fotografia do novo sistema de dissipação	48
Figura 33 - Curva de carga do supercondensador para diferentes diferenciais térmicos	48
Figura 34 – Nova montagem da fonte de calor.....	49

Figura 35 - Curva de carga do condensador para diferentes temperaturas da fonte de calor...	50
Figura 36 – Fotografia do sistema de testes completo	51
Figura 37 - Curva de descarga do supercondensador para diferentes frequências de comunicação	52
Figura 38 - Descarga do supercondensador na presença e na ausência de uma fonte de calor	52
Figura 39 - Tensão no supercondensador a comunicar a cada minuto	53
Figura 40 - Resumo dos componentes da solução dividida em duas partes	54

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores típicos da temperatura das tubagens recolhidos numa medição de campo...12

Acrónimos

USD - Dólar dos Estados Unidos da América

ATEX – Atmosfera Explosivas

SPI – *Serial Pheripheral Interface*

HART - *Highway Addressable Remote Transducer*

wirelessHART - *Wireless Highway Addressable Remote Transducer*

NFC – *Near Field Communication*

SCKL – Serial Clock Line

MISO – Master In, Slave Out

MOSI – Master Out, Slave In

CS – Channel Select

1. Introdução

1.1 Motivação e Objetivos

O vapor de água é utilizado na indústria de processos e uma das suas aplicações é o aquecimento dos produtos que envolvem as tubagens onde circula. Consequentemente, devido a esta transferência de energia, ocorre condensação de vapor nas imediações das paredes das condutas. Deste modo, a área de superfície de contacto entre o vapor e a conduta fica reduzida, prejudicando o processo de transferência de energia pretendido. Assim sendo, torna-se fundamental a existência de dispositivos para remoção desta fase líquida em sistemas de circulação de vapor, os purgadores.

Os purgadores são dispositivos de natureza puramente mecânica, ou seja, não possuem qualquer tipo de eletrónica ou alimentação externa e são passíveis da ocorrência de falha. A ocorrência de falhas num purgador pode significar uma fuga de vapor de água ou um bloqueio na drenagem do condensado que influencia a temperatura do vapor, originando mais condensado. A ocorrência de falha gera uma redução da eficiência energética do purgador e, analogamente, perdas energéticas. Portanto torna-se essencial diagnosticá-los porque quanto mais tempo não for detetada maiores serão as perdas energéticas associadas. Além disso como os purgadores podem atingir os milhares de unidades em fábricas de grandes dimensões, é essencial a deteção e registo da ocorrência de falha para que rapidamente se consiga identificar o purgador em falência de modo a acionar as medidas adequadas à sua reparação. Portanto, a monitorização dos purgadores é de elevada importância de modo a reduzir os custos de exploração (operação e manutenção) de uma fábrica, resultando em aumento de eficiência de energética.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento de monitorização em tempo real que seja inteligente, fácil de instalar, sem manutenção e apto a atmosferas potencialmente explosivas. Entende-se por sensor inteligente um sensor

com capacidade de tomar decisões de forma autónoma, por outras palavras, que integre uma unidade de processamento. A facilidade e portanto o baixo custo de instalação torna-se especialmente relevante em casos de implementação maciça de dispositivos, como é vocação do caso vertente. Portanto, é fundamental que seja uma solução sem fios. Por outro lado, é importante que o equipamento não requeira manutenção frequente de modo a minimizar os custos de operação, particularmente os associados à substituição periódica de baterias. Por conseguinte, opta-se por um módulo de alimentação baseado em tecnologia *energy-harvesting*, isto é, em que a energia é capturada do meio envolvente. Por fim, pretende-se que este sistema seja certificado como intrinsecamente seguro, segundo as diretivas ATEX, de modo a estar qualificado para aplicações na indústria de processo da química pesada e petroquímica, zonas consideradas como potencialmente explosivas.

A abordagem adotada consiste num sensor sem fios que irá diagnosticar o funcionamento do purgador através da monitorização das temperaturas em tubuladuras adjacentes. A alimentação do sensor é baseada na conversão de energia térmica, proporcional ao diferencial térmico entre tubagens e o ambiente envolvente. Os equipamentos são integrados numa rede de sensores sem fios (*RSSF*), comunicando por radiofrequência.

1.2 Estrutura da dissertação

Para além deste capítulo introdutório, a dissertação está organizada em quatro capítulos. O capítulo II consiste numa descrição detalhada do funcionamento dos purgadores e de exemplos de falha típicos. São também apresentados e discutidos vários tipos de monitorização conhecidos, concluindo-se sobre o princípio de funcionamento.

No capítulo III é discutida a estrutura do dispositivo de monitorização e diagnóstico de purgadores e de um sistema que, integrando um conjunto numeroso destes dispositivos, permita comunicar prontamente a informação relevante.

No capítulo IV o sensor inteligente é descrito em pormenor, sendo discutidas as tecnologias envolvidas neste projeto para suportar as funções de: (i) aquisição e tratamento local de informação, (ii) comunicação sem fios, e (iii) alimentação em potência. Assim, este capítulo subdivide-se em três secções, sendo descritas de forma detalhada as tecnologias de sensorização, alimentação da solução.

Por fim, no capítulo conclusivo é realizada uma apreciação dos resultados obtidos e propostas de desenvolvimentos futuros.

2. Purgadores de vapor: caracterização e diagnóstico

O funcionamento dos sistemas de vapor baseia-se em transferências energéticas entre o vapor em circulação e os produtos, tipicamente fluidos inflamáveis, que envolvem as condutas de distribuição (Figura 1), tendo como objetivo fundamental manter estes produtos a uma determinada temperatura. Devido à transferência de energia do vapor de água para os produtos gera-se uma mudança de fase no fluido, dando origem a depósitos de água nas paredes das condutas. A presença desta fase líquida nas tubagens reduz a área da superfície de contacto, criando uma diminuição da temperatura do fluido e do caudal de vapor transferido. Logo, de modo a que se mantenha o correto funcionamento do sistema é essencial que se remova esta fase líquida e esta é a função dos purgadores de vapor.

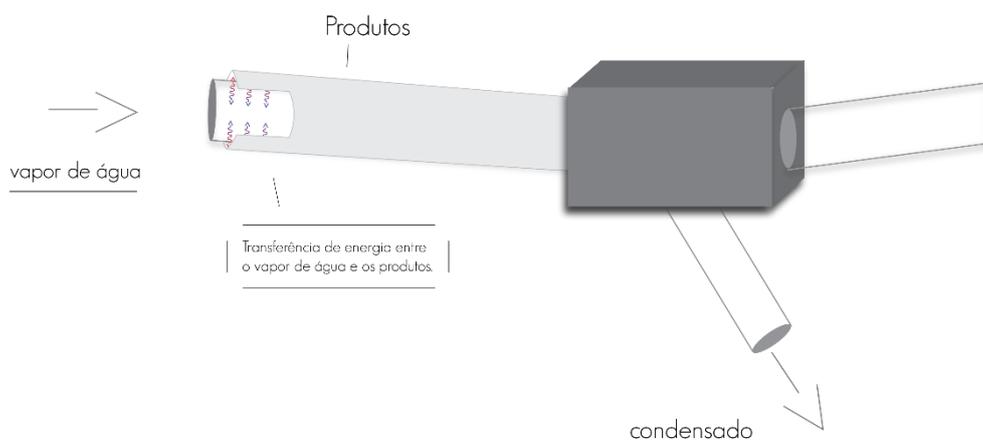


FIGURA 1 - TRANSFERÊNCIAS ENERGÉTICAS ENTRE O VAPOR DE ÁGUA EM CIRCULAÇÃO E OS PRODUTOS QUE ENVOLVEM AS CONDUTAS RESULTANDO EM CONDENSADO

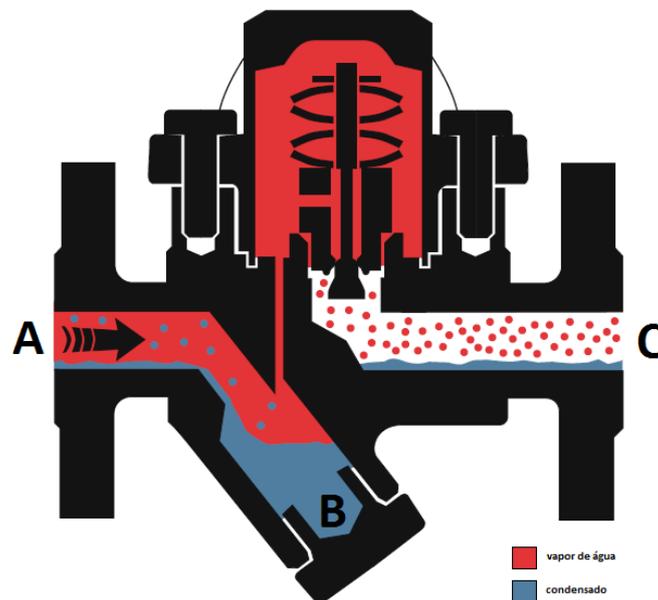
2.1 Princípios de funcionamento

Os purgadores de vapor são válvulas automáticas que alternam entre dois estados, aberto e fechado: abrem na presença de condensado e fecham na presença de vapor de água. Estes dispositivos são implementados em sistemas de vapor para drenarem a fase

líquida presente nas tubagens mantendo em circulação o vapor de água. Idealmente devem ainda conseguir remover gases não-condensáveis sem influenciar a transmissão do vapor, uma vez que estes gases (tipicamente oxigénio e dióxido de carbono) estimulam o desgaste das peças do sistema.

Complementando a oferta tradicional de dispositivos puramente mecânicos existem no mercado alguns purgadores eletrónicos, de utilização minoritária, de que exemplos podem ser encontrados em (Emerson) (Spirax Sarco).

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DE UM PURGADOR (FLOWSERVE GESTRA, 2006)



Na Figura 2 podemos visualizar uma representação esquemática da operação correta de um purgador, sendo o vapor de água representado a vermelho e a fase líquida a azul.

A tubagem (A) é a entrada do purgador, a (C) a saída para o sistema e a (B) é a tubagem por onde é escoado o condensado. Em (A) ocorre a entrada de vapor de água e algum depósito de condensado para o interior do purgador; este último vai-se depositando na zona inferior do purgador para que quando alcançar um determinado nível de líquido seja drenado através da tubagem (B). O purgador mantém-se em modo fechado até que se atinga um nível de líquido definido, momento em que ocorre a transição para o estado aberto. Deste modo, apenas o condensado é removido do purgador, mantendo-

se o vapor de água no seu interior. Analogamente, quando o nível de condensado se torna mínimo dá-se a transição de estado para o modo fechado de modo a evitar as fugas de vapor de água para a tubagem (B). O vapor de água, que se manteve no interior do purgador, é reintroduzido em circulação através da tubagem (C). Todavia, na tubagem (C) ainda se encontram pequenos vestígios de fase líquida que surgem da inevitável condensação do vapor.

A temperatura das tubagens, em correta operação, é tipicamente de 110°C a 120°C para as tubagens (A) e (C) e sensivelmente de 70°C a 80°C para a tubagem (B). O condensado drenado possui uma temperatura quase idêntica à da tubagem (B), tendo ainda uma fração de energia do vapor de água original. Assim sendo, por forma a poupar energia e água, este condensado drenado é reintroduzido na caldeira do sistema para ser aquecido e reconvertido em vapor. Os valores na

Tabela 1 foram registados numa medição de campo.

SITUAÇÃO	T _A (°C)	T _B (°C)
OPERAÇÃO REGULAR	110 - 120	70 - 80
FUGA	100 - 110	90 - 100
BLOQUEIO	90 - 100	60 - 70

TABELA 1 - VALORES TÍPICOS DA TEMPERATURA DAS TUBAGENS RECOLHIDOS NUMA MEDIÇÃO DE CAMPO

Os purgadores são aplicados em várias áreas industriais que utilizam sistemas de vapor, tais como a indústria de processos, têxtil, alimentar, entre outras. Como seria expectável, esta vasta gama de aplicações traduz-se numa variedade de purgadores de vapor. Os purgadores podem ser subdivididos em função do princípio de funcionamento em que se baseia a alteração de estado da válvula, resultando em três categorias: (i) termostáticos, (ii) mecânicos e (iii) termodinâmicos. (Risko, 2011). Infelizmente, nenhuma destas soluções é perfeita, associando-se uma determinada categoria a um leque de aplicações. Com o intuito de aperfeiçoar o desempenho global surgiram alguns purgadores que combinam vários princípios de funcionamento no mesmo dispositivo.

(i) Termoestático

Os purgadores termostáticos, ou purgadores de temperatura, respondem a alterações de temperatura nas imediações da válvula. Neste tipo de purgador a válvula automática é (constituída tipicamente por um material bimetálico), sensível à temperatura do fluido em contacto, possibilitando a permuta entre dois estados, aberto e fechado, em função da expansão ou contração da válvula. No caso de a temperatura das imediações ser reduzida pode-se considerar que a válvula está imersa em condensado e proceder à alteração de estado para aberto, permitindo o escoamento do condensado. Analogamente, numa situação em que a temperatura seja próxima à do vapor deve ocorrer a transição de estado para fechado, por forma a preservar o vapor em circulação.

Uma das vantagens deste método é a capacidade de diferenciação entre vapor de água e gases não condensáveis mais frios, possibilitando facilmente a sua purga. Este fator é pertinente dado que este tipo de gases, tipicamente ar (oxigénio e dióxido de carbono), causam desgaste nas peças do sistema. Além disso, o seu modo de falha preferencial é no estado aberto (Pentair, 2013), logo possibilita que o sistema se mantenha em funcionamento, ainda que de forma ineficiente. Uma desvantagem é o elevado tempo de resposta: este fator está diretamente relacionado com o período de tempo em que é dissipada a energia do condensado. Uma vez que o purgador só transita para o estado aberto quando se alcança uma temperatura baixa na zona da válvula, existe um determinado intervalo de tempo até que se obtenha essa diminuição de temperatura.

(ii) Mecânico

Os purgadores mecânicos respondem diretamente a alterações no nível de condensado, independentemente da pressão e temperatura do sistema. Este tipo de purgador possui um objeto flutuador acoplado a um sistema mecânico que, consoante o nível de condensado, abre e fecha a válvula. No caso de elevado nível de condensado abre a válvula para drenar o líquido, analogamente no caso de nível reduzido de condensado fecha a válvula. Certas implementações deste método, como as *Closed Float Mechanical*

Traps, não permitem a distinção entre gases não-condensáveis e vapor de água, tornando-se necessário adicionar um módulo termostático para este fim. Este módulo adicional também é suscetível de falha quer em modo aberto, causando perdas de vapor, quer em modo fechado, impossibilitando a descarga de condensado e gases. Portanto, este tipo de purgadores tem sensivelmente a mesma probabilidade de falhar no estado aberto ou fechado (Pentair, 2013), tornando-se imperativo um equipamento que permita identificar os dois tipos de falhas.

(iii) Termodinâmico

Estes purgadores são essencialmente detetores de fase, uma vez que conseguem distinguir entre a fase líquida e gasosa do fluido. Contudo, não conseguem distinguir o vapor de água de outros gases não-condensáveis que possam estar eventualmente presentes, logo a sua capacidade de os remover do sistema é reduzida. O seu funcionamento é simples, possuindo apenas uma parte móvel. Porém, com base neste princípio existem três configurações fundamentais que se diferenciam pelo formato da válvula. Este tipo de purgadores também apresenta a vantagem de falhar tipicamente em modo de fuga, i.e., em estado aberto (Pentair, 2013).

2.2 Tipos de falhas

Em sistemas de vapor a energia é perdida por várias formas, como condução, convecção e radiação. Perdas adicionais podem ocorrer devido a fugas nas junções dos vários tubos que constituem a complexa rede e a dispositivos da linha danificados ou em incorreto funcionamento. Algumas falhas são de fácil deteção como fugas nos tubos ou nas junções, outras apenas são identificadas por fiscalização e portanto podem operar durante algum tempo de forma inapropriada antes de identificadas. Os purgadores são um exemplo de dispositivos passíveis de falhas e a sua presença é típica em redes de vapor.

Num purgador ocorrem essencialmente dois tipos de falhas: bloqueio ou fuga, e estas devem-se à permanência do purgador num determinado estado, respetivamente

fechado ou aberto. A origem destas falhas deve-se geralmente ao desgaste da peça móvel, a válvula.

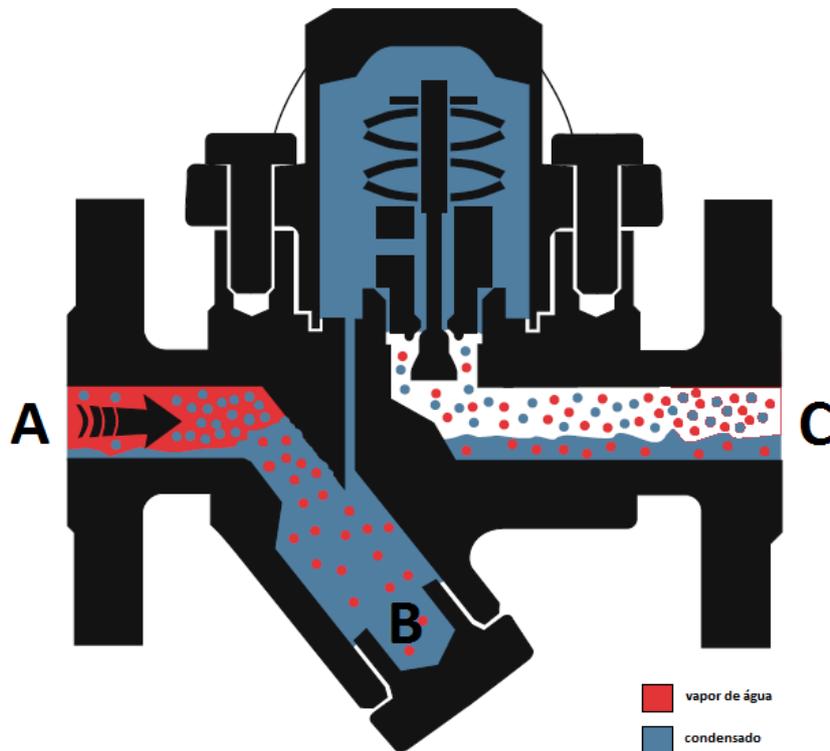


FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM BLOQUEIO NUM PURGADOR (ADAPTADO DE (FLOWSERVE GESTRA, 2006))

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática onde se podem observar as consequências provocadas pela permanência de um purgador no modo fechado (tipo de falha doravante referido apenas por bloqueio). Na ocorrência de um bloqueio, o condensado deixa de ser drenado e começa a acumular-se na tubagem B. Quando este agregado ultrapassa um determinado nível, alcança a tubagem A. Nesta fase interfere com a temperatura das três tubagens presentes (A, B e C) causando uma diminuição de temperatura geral. Este tipo de fuga pode até causar interrupção do fornecimento de vapor de água ao sistema.

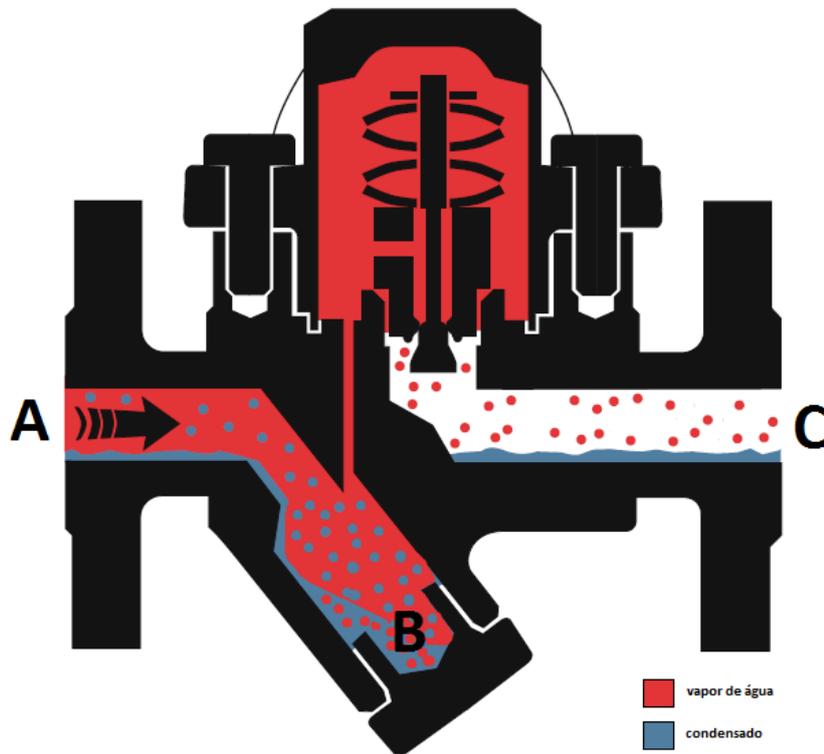


FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA FUGA NUM PURGADOR (ADAPTADO DE (FLOWSERVE GESTRA, 2006))

A Figura 4 representa um esquema das alterações causadas pela permanência de um purgador em modo aberto (tipo de falha doravante referido apenas por fuga). Em fuga dá-se a passagem de algum vapor de água para a tubagem B, a de escoamento do condensado. Este tipo de falha gera um aumento da temperatura na tubagem B, tendendo para a temperatura da tubagem A. Regista-se ainda um aumento anormal de perdas energéticas, podendo até originar uma redução de pressão que influencia a restante rede.

2.3 Importância da monitorização de purgadores

Um dos elementos fundamentais da criação de custos é a energia necessária para manter a operação fabril, sendo particularmente relevante na indústria de processos por, frequentemente, poder exceder os custos de matérias-primas. Logo, a atenção à eficiência energética é essencial neste tipo de indústria. As consequências das perdas

energéticas, além das quantias desperdiçadas empregues na sua formação, incluem também a retribuição de taxas, porque apesar dos produtos libertados para o meio ambiente não serem tóxicos existem implicações ambientais a considerar devido ao facto de esta energia ser gerada através da utilização de combustíveis fósseis que estão associadas ao pagamento de contribuições. Em resumo, é pertinente implementar soluções de supervisão industriais, motivando uma valorização económica e tecnológica dos recursos.

Em sistemas de vapor, um dos elementos que condiciona fortemente a economia de produção são os purgadores. De modo a conseguir compreender a real importância da monitorização destes dispositivos é importante conhecer as perdas associadas ao seu funcionamento incorreto, a sua taxa de falhas média e ainda os encargos monetários daí resultantes.

Uma vez que os purgadores têm um preço relativamente baixo, em caso de deteção de problemas são substituídos. No entanto, entre a ocorrência de falha e a deteção da mesma, o sistema está continuamente a desperdiçar energia e, portanto, a aumentar de forma significativa e desnecessária os custos de operação do mesmo. Analogamente, sem a implementação de um sistema de monitorização, estes podem ficar durante grandes períodos de tempo em operação deficiente sem serem diagnosticados. De acordo com Risko, J. (Risko, 2011) *“Average-quality traps may have just a 4-year life expectancy (which implies a 25% failure rate), while higher-quality steam traps may have an 8-yr life expectancy (12.5% average failure rate)”*. Se considerarmos uma fábrica com 4000 purgadores, espera-se que 1000 falhem dentro de um ano. Além da taxa de falhas média é importante saber as perdas médias associadas a falhas. É possível fazer estimativas mais exatas sabendo as características concretas do sistema, tais como a pressão a que se encontra o vapor de água nas condutas, tipo de purgador e diâmetro da fuga. Bahadori, Alizera (Bahadori, 2012) apresenta um exemplo e estima as perdas para um purgador numa linha de vapor, assumindo de forma conservadora um custo de 3 USD por tonelada de vapor. Neste exemplo estima que um só purgador em falha desperdice sensivelmente 96 USD por semana. De modo a compreender os custos associados a falhas em purgadores numa fábrica vamos extrapolar este cálculo para um

conjunto de 4000 purgadores de qualidade média, logo com 25% de probabilidade de falha. Assim, podemos assumir que sensivelmente 1000 purgadores não estarão a operar corretamente. Efetuando estes cálculos para um período de um ano, aproximadamente 50 semanas, obtém-se o total de 4,8 M USD desperdiçados anualmente numa fábrica. Por outras palavras, um purgador desperdiça em média 1 200 USD anualmente, desvalorizando os custos de hipotéticas rotinas de manutenção em operação.

2.4 Métodos de diagnóstico

O método de diagnóstico a selecionar deve permitir a deteção dos dois tipos de falhas explicitados anteriormente de forma inequívoca. Por outras palavras, o método deve identificar fugas e bloqueios sem nunca acionar falsos alarmes.

2.4.1 Monitorização manual vs. Rede de sensores inteligentes

Seguidamente são apresentadas e discutidas duas formas de implementar sistemas de monitorização: (i) manual e (ii) através de uma rede de sensores inteligentes.

- (i) Primeiramente pode optar-se por uma solução de tipo manual, isto é, equipamentos portáteis operados por um colaborador. Desta maneira, existem várias equipas de manutenção que testam periodicamente a totalidade dos purgadores existentes. A vantagem da implementação de um sistema de monitorização manual reside no reduzido investimento inicial necessário, uma vez que um só equipamento de monitorização permite testar vários purgadores. Contudo, este sistema requer um maior número de operários em constante laboração e não assegura a deteção de falha em tempo real. Na verdade, uma falha pode ficar sem ser detetada tanto tempo quanto o tempo médio da verificação completa do sistema.
- (ii) A segunda trata-se da implementação de uma rede de sensores inteligentes que monitorizem em tempo real e de forma completamente autónoma os purgadores. Deste modo, não é necessária qualquer intervenção humana ao

nível das unidades de diagnóstico e, em caso de falha, os próprios sensores reportam o evento para uma unidade central, de modo a que se possam acionar as medidas necessárias. A monitorização em tempo real permite detetar e corrigir a falha de forma rápida, logo possibilita uma diminuição das perdas associadas a falhas assim como um menor desgaste dos purgadores, aumentando o seu tempo de vida útil. A desvantagem deste segundo método é o investimento inicial. Por forma a ter viabilidade e interesse económico este investimento deve ser recuperável num período de um ano, idealmente. Assim sendo, pela estimativa apresentada na secção anterior a solução de monitorização não deve ter um custo superior a 1 200 USD. Contudo, esta estimativa não considerou custos relacionados com as rotinas de inspeção e reparação em hipotético funcionamento que amplificariam o valor estimado.

2.4.2 Técnica de diagnóstico

Seguidamente são apresentados e discutidos vários métodos de diagnóstico: (i) acústico, (ii) térmico intrusivo e (iii) térmico extrusivo.

- (i) Em geral, o método de diagnóstico mais utilizado industrialmente é o acústico; esta tem sido a abordagem seguida por grandes empresas como Schneider (Schneider Electric, 2011), Emerson (Emerson, 2012), Armstrong (Armstrong), entre outras. Contudo esta metodologia foi imediatamente desconsiderada por não identificar os dois tipos de falhas possíveis. Este método consiste na utilização de sensores acústicos para registo dos ruídos de operação do purgador, os quais se encontram na banda do audível e ultrassons. De um modo geral, as fugas, vapor de água a elevada pressão a atravessar um pequeno orifício, geram um ruído distinto do de operação típica, possibilitando a deteção de ocorrência de falha. No entanto, no caso de se tratar de uma falha de tipo bloqueio não é possível distinguir qualquer ruído provocado por esta falha dos sons de operação típica. Esta é a principal razão da exclusão deste método, contudo existem ainda dois problemas

adicionais. O primeiro é a distinção entre sons em ambientes tipicamente ruidosos. O segundo deve-se à fraca capacidade de adaptação aos diferentes tipos de purgadores, que produzem diferentes ruídos de operação.

Relativamente a métodos de diagnóstico baseados em medições de temperatura das tubagens adjacentes do purgador erguem-se várias abordagens:

- (ii) Em primeiro lugar podia recorrer-se a um sensor de temperatura acoplado a um sensor de pressão inseridos de forma intrusiva no sistema que, usufruindo da variação da relação de pressão/temperatura para os diferentes estados físicos da água, poderiam aferir acerca das respetivas quantidades presentes no fluido. Esta abordagem já existe no mercado pela empresa Spirax Sarco (Spirax Sarco, 2006), contudo esta solução apresenta grandes desvantagens. Primeiro, para além de interferir com o normal funcionamento do sistema, exige que o sistema esteja desligado aquando da sua instalação, acarretando elevados custos. Segundo, possui baixa fiabilidade, uma vez que o vapor saturado e água à mesma pressão têm a mesma temperatura e, portanto, os sensores que pretendem determinar a quantidade de condensado possuem um elevado erro.
- (iii) Em segundo lugar podia optar-se por uma medição da temperatura das tubagens de forma extrusiva, que pode ser feita à distância ou por contacto com a superfície. O diagnóstico de um purgador pode ser efetuado de forma inequívoca através da medição, e posterior processamento, da temperatura das tubagens de entrada e de saída do condensado (ver secção princípios de funcionamento). Com este método consegue-se identificar os dois tipos de falha pretendidos. Consultando a secção de tipos de fugas verifica-se que as temperaturas de funcionamento correto são cerca de 115°C para tubagem de entrada e 70°C para a tubagem de escoamento. Em bloqueio a temperatura das duas tubagens diminui entre 10°C a 20°C dependendo da gravidade da falha. Em caso de fuga a temperatura da tubagem de saída de condensado aumenta entre 10°C a 20°C. Contudo, estes são valores típicos, que dependem fortemente das especificações do sistema, e por essa razão a

solução deverá ser capaz de guardar os dados relativos à evolução temporal das temperaturas medidas, de modo a analisar variações relativas de temperatura em vez de valores absolutos. Ou seja, em caso de fuga registar-se-ia um aumento de temperatura na saída inferior, tendendo para a temperatura à entrada do purgador; em caso de bloqueio verificar-se-ia uma diminuição em ambas as temperaturas medidas.

Este método de diagnóstico baseado na medição da temperatura das tubagens dos purgadores pode ser concretizado de duas formas diferentes recorrendo a sensores infravermelhos ou sensores de temperatura de contacto. A temperatura pode ser aferida à distância através de sensores infravermelhos, de tal forma que a janela de medição tivesse um determinado ângulo sólido que lhe permitisse visualizar apenas a área da tubagem a analisar. Para tal, os sensores teriam de ser colocados a distâncias muito próximas das tubagens e obter-se-ia uma arquitetura de sistema praticamente equivalente a uma de medição de contacto com a superfície. Além disso, os sensores de infravermelhos são mais difíceis de calibrar e mais dispendiosos que os sensores utilizados em medições de contacto. A única desvantagem que os sensores de contacto apresentam é o fato de requerem um bom acoplamento térmico às tubagens. Todavia, nas proximidades dos purgadores existe uma zona da tubagem que não está protegida com isoladores. Assim sendo, pode assegurar-se um bom acoplamento térmico desde que o material de encapsulamento seja um bom condutor elétrico. Atualmente já existem no mercado soluções que utilizam este método de diagnóstico (Cooper Atkins) (Cypress, 2008). Contudo esta solução é alimentada a baterias (duração expectável entre 2 a 5 anos) e utiliza cabos para interligar os dois módulos de medição de temperatura o que é extramente desaconselhável em ambientes perigosos e potencialmente explosivos, onde é típica a utilização de purgadores.

2.5 Conclusão – Especificação do projeto

Em suma, o método considerado como mais indicado para diagnosticar purgadores de forma inequívoca é aquele que permita a identificação dos dois tipos de falhas, isto é, o método de medição de temperatura na tubagem de entrada e na de purga, analisando-se cada purgador individualmente de forma extrusiva. Deste modo a nossa solução está dividida em duas unidades independentes, por forma a evitar cablagem, que comunicam entre si sem fios. Ambas as unidades incluem um sistema de alimentação independente de captura energética por diferencial térmico e um módulo de medição e processamento da temperatura. A distinção elementar entre as unidades é a capacidade de comunicação para o exterior, apenas presente na unidade principal.

De uma forma sintética, a solução consiste num dispositivo de medida das variações de temperatura de forma extrusiva em dois pontos distintos do purgador alimentado através da captura de energia térmica e em que toda a comunicação é efetuada sem fios.

3. Arquitetura do sistema

No capítulo anterior concluiu-se que o método de diagnóstico mais indicado baseia-se na variação térmica e nas diferenças de temperaturas entre as duas tubagens (A e B, tal como representado na Figura 2) do purgador. A parte central do purgador tem uma envergadura típica de 10 centímetros, logo a solução deverá ser composta por duas partes, como está ilustrado na Figura 5.

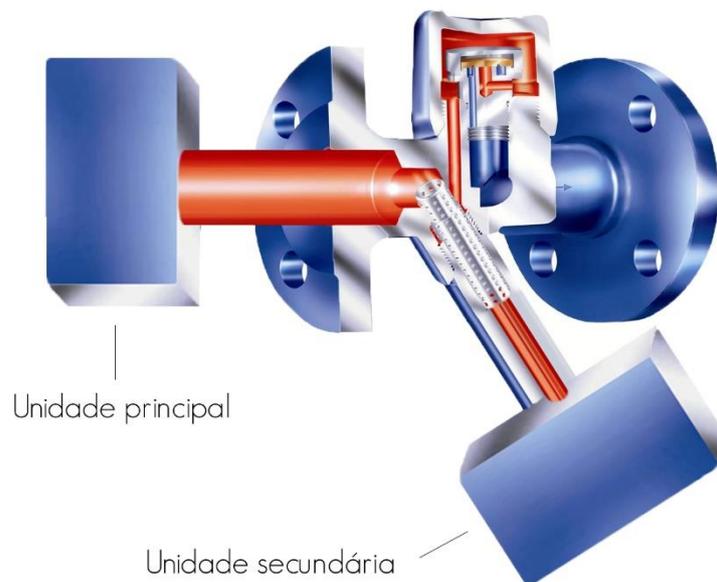


FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SOLUÇÃO PROPOSTA, COMPOSTA POR DUAS UNIDADES.

Estas duas unidades foram projetadas respeitando regulamentos estabelecidos para equipamentos em ambientes potencialmente explosivos ou substâncias perigosas. Os principais objetivos do cumprimento destas normas são a maximização da segurança da solução e a certificação ATEX. Esta certificação implica o cumprimento de um conjunto de normas estabelecidas para equipamentos destinados a **AT**mosferas **EX**plosivas (IEC, 2011). O cumprimento das normas resulta facilitado pela ausência total de cabos de interligação, para isso as unidades devem possuir alimentação independente e a comunicação deve ser feita sem fios. Portanto, cada uma das unidades vai operar de

forma autónoma apesar de fazer parte de um só sistema de monitorização associado a um único purgador.

A comunicação será efetuada por tecnologias de comunicação sem fios e em indústria de automação, processos e sistemas de controlo uma das mais empregadas é o protocolo *wirelessHART*. A seleção de um protocolo comum no domínio das indústrias de processo é vantajosa porque aumenta a probabilidade de existência de uma rede que possa integrar a solução ou no caso de ser indispensável a implementação da rede aumenta-se a probabilidade da utilização da mesma por soluções compatíveis que surjam posteriormente.

A tecnologia *wirelessHART* tem capacidade de se organizar e tratar automaticamente da sua estrutura de rede, é flexível, dimensionável (i.e., servir grandes e pequenas fábricas), fiável, segura e conciliável com tecnologia HART já existente. A rede *wirelessHART* é uma rede sem fios centralizada que apresenta a grande vantagem de suportar redes emalhadas. Numa rede emalhada todos os nós da rede possuem aptidão para transmitir mensagens enviadas por nós adjacentes, deixando de ser obrigatório que tenham ligação direta à unidade central. Assim, elimina-se a necessidade de repetidores e as transmissões conseguem evitar possíveis obstáculos graças à diversidade de trajetos possíveis para o envio de determinada mensagem. Com base na tecnologia IEEE 802.15.4, esta solução é de baixa potência e de baixo consumo energético, opera na banda de frequências mundialmente livre dos 2.4 GHz e tem um alcance na ordem da centena de metros, dependendo das condições do meio. Assim sendo, este alcance pode não ser suficiente para cobrir unidades fabris espraçadas em áreas consideráveis (> 1Ha). A resposta intuitiva poderia ser a utilização de outro protocolo que suportasse um maior alcance, porém este iria ser muito mais exigente do ponto de vista energético o que é preocupante numa solução que se pretende que seja autossuficiente energeticamente. Então, a proposta é a introdução de *gateways* que trabalhem com o protocolo *wirelessHART* para receção dos alarmes provenientes das unidades e que os transmitam por Wi-Fi, tecnologia com um alcance largamente superior. Estas *gateways*, por sua vez, podem ser alimentadas pela rede de distribuição elétrica de forma a evitar questões relacionadas com a sua sustentabilidade energética. Além disso, a tecnologia

Wi-Fi é largamente implementada em indústria quando a exigências de dimensão assim o exigem, portanto de forma análoga advém a vantagem que anteriormente foi evidenciada relativamente à compatibilidade com redes já existentes ou à facilidade da posterior integração de equipamentos. Na Figura 6 está representado esquematicamente de forma resumida a arquitetura de comunicações para um sistema completo referente a uma unidade fabril de grande extensão.

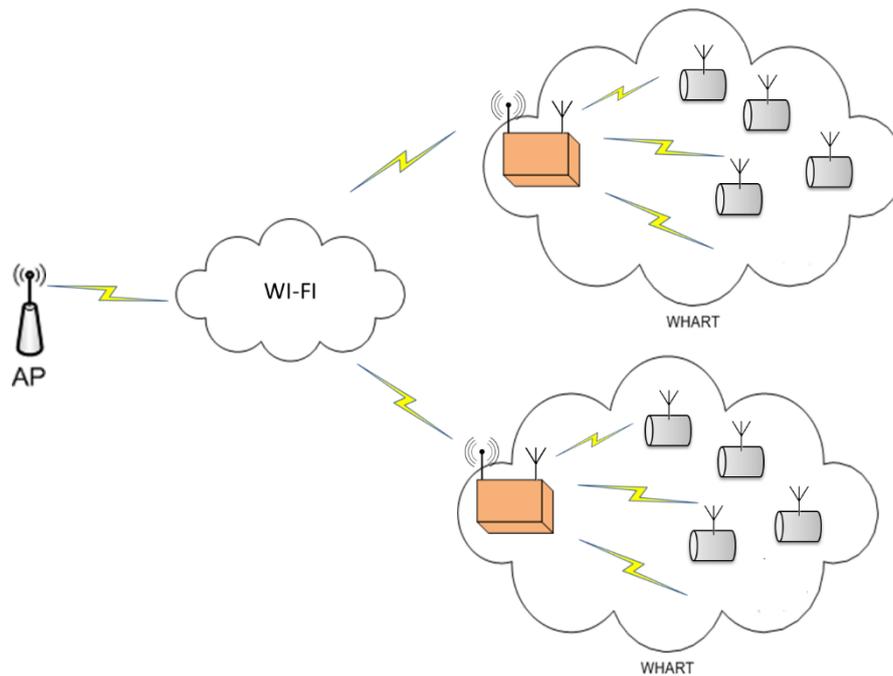


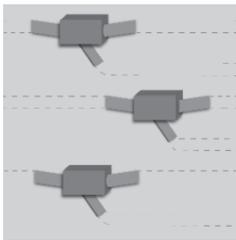
FIGURA 6 - ARQUITETURA DO SISTEMA DE COMUNICAÇÕES

4. Sensor Inteligente

Como referido no capítulo anterior a monitorização de um purgador de vapor é realizada por uma solução que, por sua vez, é composta por duas partes. Neste capítulo optamos por subdividir a solução em três segmentos, os quais vão integrar as duas partes da unidade, são eles: (i) Comunicação, (ii) Sensorização e (iii) Alimentação.

4.1 Comunicação

No capítulo anterior já foi abordada e discutida a comunicação externa do sensor, contudo falta ainda debater algumas considerações acerca da comunicação interna do equipamento, i.e., a comunicação entre as duas partes da mesma solução.



**FIGURA 7 -
ILUSTRAÇÃO DE UM
AGREGADO DE
PURGADORES**

Os purgadores estão dispostos em agregados e tendo em conta que é necessário uma solução de monitorização por purgador, é lógica a existência de agregados de sensores e de uma conseqüente elevada taxa de comunicações por unidade de área. Além disso, no caso de estarem presentes outros tipos de dispositivos que também usem a mesma gama de frequências este tráfego será ainda superior.

A questão que se ergue é se a largura de banda disponível pela tecnologia *wirelessHART* é suficiente para suportar todas estas comunicações, isto é, as comunicações frequentes entre as duas partes da solução e as de advertência de falha. Estima-se que na maioria dos casos seria suficiente, mas não é boa prática que a aplicabilidade da solução esteja dependente de fatores como: (i) o número de purgadores num agregado, (ii) a taxa de comunicações e (iii) a probabilidade de falha dos purgadores, entre outros. Adicionalmente, o facto de a implementação destes sensores ocupar grande parte da largura de banda disponível iria dificultar, ou impedir, a convivência com outros aparelhos de comunicação sem fios.

Assim sendo, para assegurar a integridade das comunicações e permitir a compatibilidade com outros equipamentos de comunicação sem fios, a solução deve

operar com dois tipos de comunicações sem fios diferentes: (i) *wirelessHART* para comunicações externas à solução e (ii) NFC (*Near Field Communication*) para comunicações frequentes entre as duas partes da mesma solução.

A tecnologia NFC (*Near Field Communication*), tal como o próprio nome indica, tem um curto alcance, da ordem das dezenas de centímetros, logo é apropriada para efetuar a comunicação frequente entre as duas partes da mesma solução, uma vez que, apesar de os purgadores estarem dispostos em agregados, a interferência entre as várias unidades será praticamente inexistente devido ao reduzido alcance das comunicações. Assim, a utilização da tecnologia NFC permite uma maior segurança nas comunicações e a poupança de energia comparativamente à tecnologia *wirelessHART*.

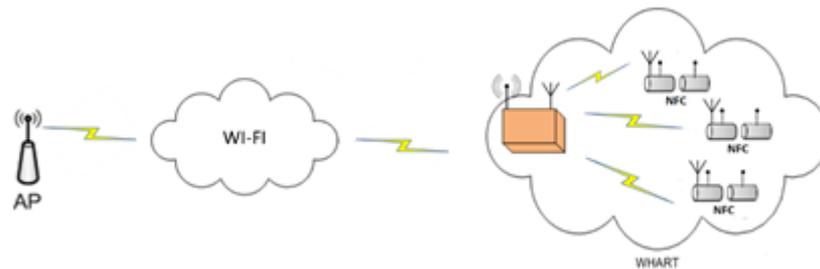


FIGURA 8 - ADAPTAÇÃO DA ARQUITETURA DE COMUNICAÇÕES DO SISTEMA

Através desta arquitetura de sistema garante-se um ambiente calmo do ponto de vista da radiofrequência, o que possibilita a partilha desta rede de comunicação com outros dispositivos e mantém-se a utilização da tecnologia *wirelessHART*, largamente implementada em aplicações industriais, assegurando a cobertura de grandes regiões fabris.

4.1.1 Módulo de comunicação

O módulo de comunicação difere entre as duas unidades da solução já que apenas a unidade principal consegue comunicar por tecnologia *wirelessHART*. Para este fim utiliza-se o LTP 5900 da *Linear Technology*. Este equipamento é um sistema completo de comunicação sem fios para redes em malha, incluindo um transmissor/recetor de radiofrequência, processador embebido e *software* de rede para arquitetar uma rede

automaticamente adaptável. Na Figura 9 está demonstrada a integração típica deste sistema numa rede de comunicação sem fios *wirelessHART*.

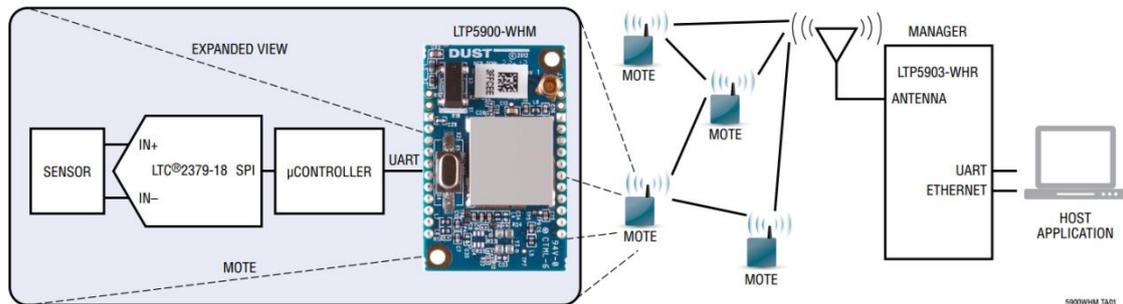


FIGURA 9 - APLICAÇÃO TÍPICA DO LTP 5900 (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, 2014)

De um modo geral, esta tecnologia respeita os elevados níveis de segurança e confiança requeridos pela indústria de automação, portanto do uso dos mecanismos de sincronização e agilidade de frequência que lhe são inerentes conseguem-se obter respostas satisfatórias em tempo real para grandes redes em malha. Neste caso em particular, graças à inteligência da solução, apenas vai transmitir alarmes ou mensagens de aviso, em vez de dados, portanto a comunicação *wirelessHART* será esporádica não sendo afetada pelo relativamente baixo débito de transmissões que a tecnologia IEE 802.15.4 consegue suportar. Todavia, à medida que a tecnologia *wirelessHART* se dissemina por meios industriais, particularmente para o controlo de equipamentos industriais, a integração de sensores pode ser vista como uma aplicação dependente da estrutura de rede onde deve existir especial atenção à importância das transmissões, dando-se prioridade às mensagens de controlo em detrimento das de monitorização.

A comunicação entre as duas partes da unidade é efetuada por tecnologia NFC (*Near Field Communication*) e é sustentada pelo modelo TRF7970 da *Texas Instruments*. (*Texas Instruments*, 2011) Este modelo deve ser acoplado a um microcontrolador hospedeiro por comunicação SPI no modo slave/master, respetivamente, para economizar energia.

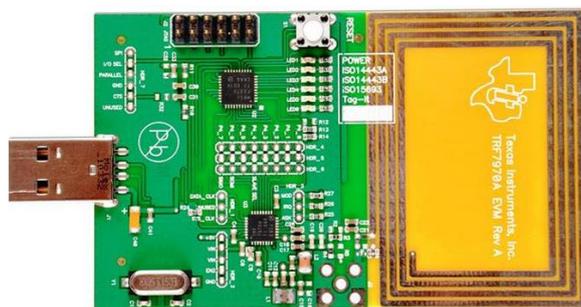


FIGURA 10 - MODELO TRF7970A DA TEXAS INSTRUMENTS

4.2 Sensorização

O módulo de sensorização tem como tarefa a recolha e processamento dos valores de temperatura. Neste módulo poderia optar-se por utilizar apenas um sensor de temperatura que estaria sujeito ao critério de verosimilhança, isto é, averiguar a concordância entre resultados de medidas consecutivas. Por outras palavras, o sensor de temperatura não poderia registar variações bruscas de temperatura devido à inércia térmica existente, considerando-se como inadmissível que por minuto as medições se alterassem mais do que 5°C. Contudo, este critério não possibilita que a solução tenha capacidade de se auto-diagnosticar, tornando-se mais vulnerável a possíveis falhas e até falsos alarmes. Portanto, no que respeita ao *hardware*, idêntico em ambas as partes da unidade, é composto por um microcontrolador hospedeiro e três sensores digitais de temperatura de baixo consumo de potência. Os três sensores de temperatura estão acoplados à superfície das condutas e dispostos segundo o método da redundância modular tripla, fornecendo a aptidão de autodiagnóstico à solução. Segundo este método, os três sensores estão a desempenhar a mesma tarefa e a unidade de processamento é responsável por analisar, através de um sistema de votação conforme a maioria, e devolver apenas um valor de temperatura.

Na Figura 11 está ilustrada a organização dos sensores de temperatura implementados nas tubagens de um purgador.

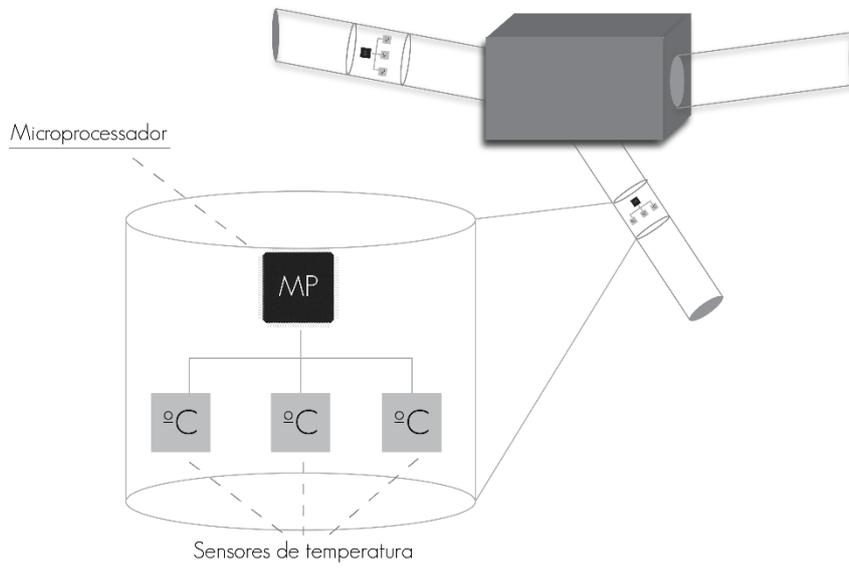


FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA IMPLEMENTAÇÃO DOS MÓDULOS DE SENSORIZAÇÃO (IDÊNTICOS) NUM PURGADOR

No caso de um sensor medir um valor de temperatura diferente dos restantes dois, por um fator previamente estipulado, esse valor deve ser ignorado. Caso esta discrepância se mantenha, deve-se registar o mal funcionamento do sensor. Deste modo, se um dos sensores estiver a operar incorretamente os dois restantes podem disfarçar esse erro e seguidamente enviar uma mensagem a reportar o sucedido. A solução é mais duradoura, mais fiável e necessita de menos manutenção. Contudo, este desacerto não deve ser ignorado e as devidas precauções devem ser tomadas, porque no caso de dois sensores de temperatura se danificarem em simultâneo podem originar falsos alarmes relativamente às falhas dos purgadores.

Os sensores seleccionados são ADT7301 da *Analog Devices* (Analog devices, 2011) porque possuem características adequadas de precisão e repetibilidade na gama de temperaturas a testar e são facilmente integráveis por comunicação SPI com o microcontrolador hospedeiro local – MSP430F2418 da *Texas Instruments* (Texas Instruments, 2012). Na Figura 12 estão apresentados os resultados de testes de precisão ao sensor de temperatura seleccionado e verifica-se que no pior caso o erro é de 2°C,

para a gama de temperaturas envolvidas. Não é significativo para esta aplicação dado que as variações de temperatura em caso de falha estima-se que sejam pelo menos cinco vezes superiores.

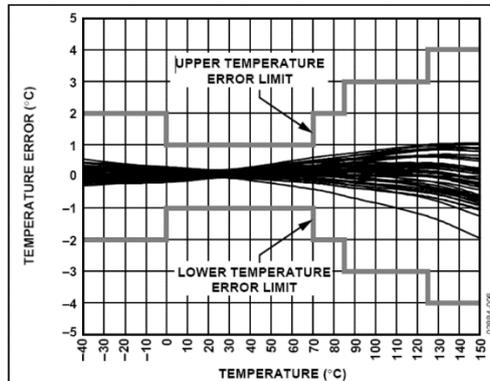


FIGURA 12 - PRECISÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA (ADT7301 @ 3.3 V) (ANALOG DEVICES, 2011)

Na Figura 13 está apresentado o diagrama de blocos funcional do sensor de temperatura selecionado. Este sensor possui um conversor analógico/digital interno de 13-bits economizando o tempo de processamento do microcontrolador hospedeiro.

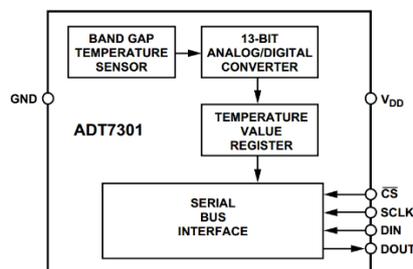


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO SENSOR ADT7301 (ANALOG DEVICES, 2011)

O microcontrolador comunica com os sensores por SPI (Serial Peripheral Interface) no modo *master, full-duplex*. Neste modo o microcontrolador (*master*) inicia a comunicação e consegue suportar vários sensores (*slaves*) utilizando um canal para selecionar o sensor a comunicar em cada instante, como está ilustrado na Figura 14.

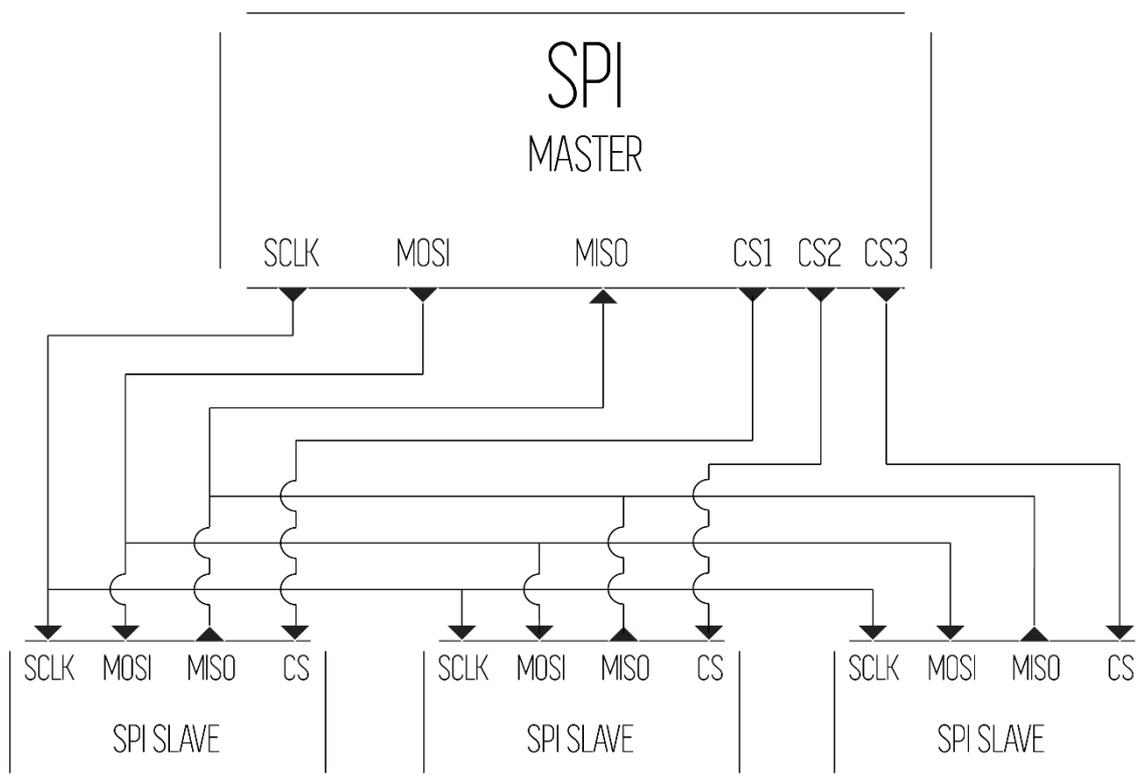


FIGURA 14 - ARQUITETURA DA COMUNICAÇÃO SPI COM OS SENSORES DE TEMPERATURA

Nesta arquitetura utilizam-se quatro canais de correspondência para efetuar uma comunicação eficiente. O canal SCLK (Serial Clock) sincroniza as transmissões entre o microcontrolador (master) e o sensor de temperatura (slave) sempre que necessário; o canal MOSI (Master Out, Slave In) realiza as comunicações do microcontrolador para o sensor de temperatura; o canal MISO (Master In, Slave Out) concretiza as transmissões do sensor para o microcontrolador e, por fim, o CS (Channel Select) permite selecionar qual o sensor que está a comunicar com o microcontrolador. Deste modo apenas é inicializada e programada apenas uma vez a comunicação SPI e os canais SCKL, MOSI e MISO são partilhados pelos três sensores, sendo ativados/desativados pelo canal de controlo CS. Na Figura 15 está apresentado o esquemático referente ao módulo de sensorização, porém nesta figura não se exhibe o microcontrolador hospedeiro porque este é partilhado com o módulo de alimentação, logo é apresentado na secção seguinte.

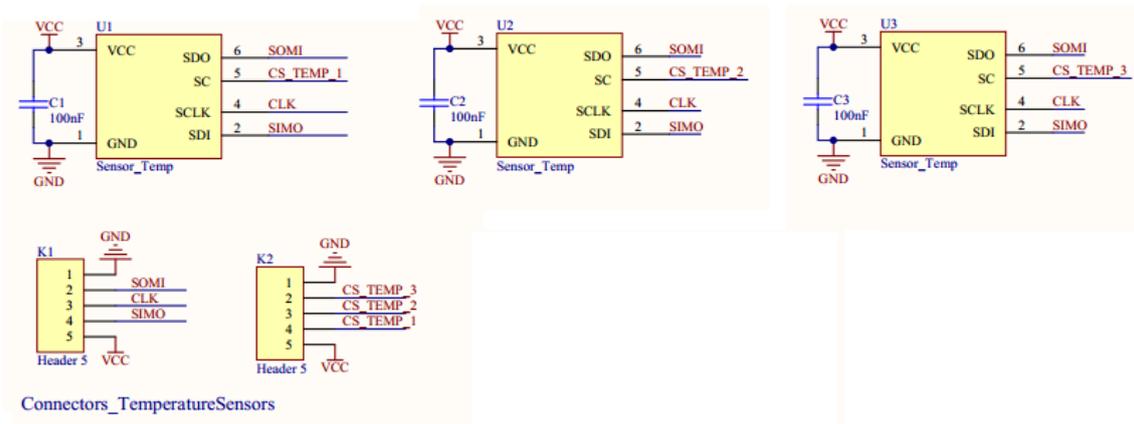


FIGURA 15 - ESQUEMÁTICO DO MÓDULO DE SENSORIZAÇÃO

Na Figura 16 está apresentada uma fotografia do módulo de sensorização onde se podem observar os três sensores de temperatura distintos bem como o microprocessador e módulo de alimentação.

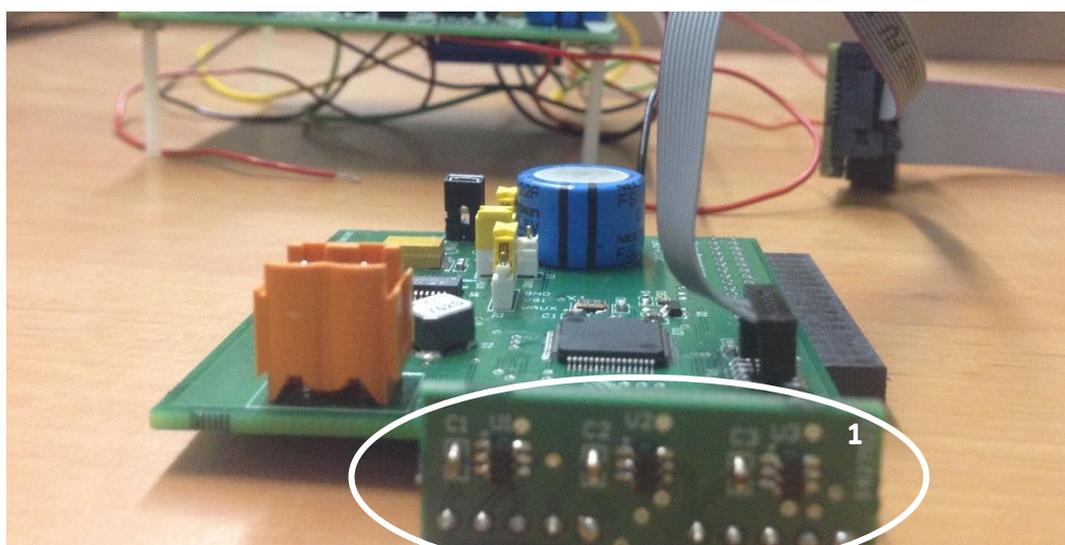


FIGURA 16 - FOTOGRAFIA DO MÓDULO DE SENSORIZAÇÃO, NA FIGURA REFERENCIADO COMO (1)

4.2.1 Código do microprocessador hospedeiro

O código do sistema de sensorização pode ser segmentado em duas partes: (i) código comum e (ii) código de diagnóstico. O código comum figura nas duas partes da unidade, onde é concretizada uma primeira análise das medições de temperatura para avaliar se devem ser ou não validadas como parâmetro de diagnóstico. Simultaneamente, é este

segmento do código que está encarregue do auto-diagnóstico da solução. O código de diagnóstico apenas surge na unidade principal e é responsável pela auto-calibração da solução e pelo diagnóstico de falhas no purgador.

(i) Código comum

Numa primeira análise consideremos a arquitetura básica do código comum a ambas as partes da unidade, que consiste na implementação do critério da redundância modular tripla. Este critério já foi previamente debatido na secção referente ao *hardware*, relativamente ao código este é aplicado às medições validadas dos três sensores de temperatura de determinada unidade. Neste código é implementado um sistema de votação em que se verificará a concordância entre os três valores recolhidos e no caso de um distar mais do que um valor especificado será desconsiderado para efeitos de diagnóstico. Por outras palavras, de forma análoga ao critério anterior, os sensores acoplados à mesma superfície devem medir sensivelmente o mesmo valor de temperatura ou serão desacreditados.

Nesta análise não vamos considerar os registos de temperatura como um determinado valor mas sim como sendo intervalos de temperatura, isto é, janelas em torno de um valor. Segundo a *datasheet* do sensor de temperatura, para a gama de temperaturas em utilização o sensor não deve apresentar um erro superior a 2°C, portanto é razoável considerar um abertura de +/- 2°C em torno do valor validado no critério anterior.

No caso de as três janelas se intersectarem faz-se uma média dos valores para se chegar ao valor final da temperatura da conduta, o qual é aprovado como sendo o valor médio para determinada conduta. De outra forma, desvaloriza-se o valor referente à janela não intersectada e consideram-se apenas os outros dois registos para identificar o valor médio da conduta. No caso extremo de não existir qualquer intersecção o erro será inscrito e realizam-se novas medições de temperatura. Nestas duas últimas situações, o erro deve ficar memorizado e no caso de ocorrência sucessiva deste problema deve considerar-se que o sensor ou sensores de temperatura estão deteriorados e ativar um alarme para que se possam acionar as medidas necessárias. Da implementação deste critério deve surgir um só valor de temperatura aprovado como sendo o valor médio de

determinada conduta. Os valores de temperatura validados após a implementação do critério ficam registados em memória de modo a garantir um historial mínimo de uma hora para o estudo da evolução da temperatura e facilitar o processo de diagnóstico de falha.

(ii) Código de diagnóstico

A unidade principal deve ainda incluir o código referente ao diagnóstico do purgador. Acedendo ao historial guardado pode verificar-se a diferença entre as temperaturas medidas nas duas condutas, em determinado instante. Deste modo obtém-se um historial da diferença de temperaturas nas duas condutas. Na

Tabela 1 na secção (2.1) **Princípios de funcionamento** estão apresentados os valores típicos de temperatura das duas condutas para funcionamento normal ou no caso de falha. Verifica-se que em caso de falha a diferença de temperatura entre as condutas será menor, uma vez que em operação incorreta a temperatura das condutas tende a aproximar-se. No caso de se detetar essa diminuição deverá -se consultar o valor absoluto da temperatura da conduta de purga para identificar qual o tipo de falha que está a ocorrer. Caso seja um valor superior à temperatura de operação típica estamos na presença de uma fuga ou em caso contrário de um bloqueio. O historial permite ainda fazer um exame ao longo do tempo sabendo se se trata de uma falha ou de uma oscilação de temperatura habitual.

Além disso, através do uso de um historial de dados de temperatura consegue-se que a solução seja auto-calibrável, i.e., seja capaz de determinar de forma autónoma o valor típico de operação do sistema de vapor onde for implementado. Como já foi referido anteriormente os purgadores podem ser implementados nas mais variadas áreas e para uma grande diversidade de fins, portanto a solução deve estar preparada para se adaptar a qualquer situação e identificar de forma autónoma as temperaturas de operação típica do purgador a monitorizar.

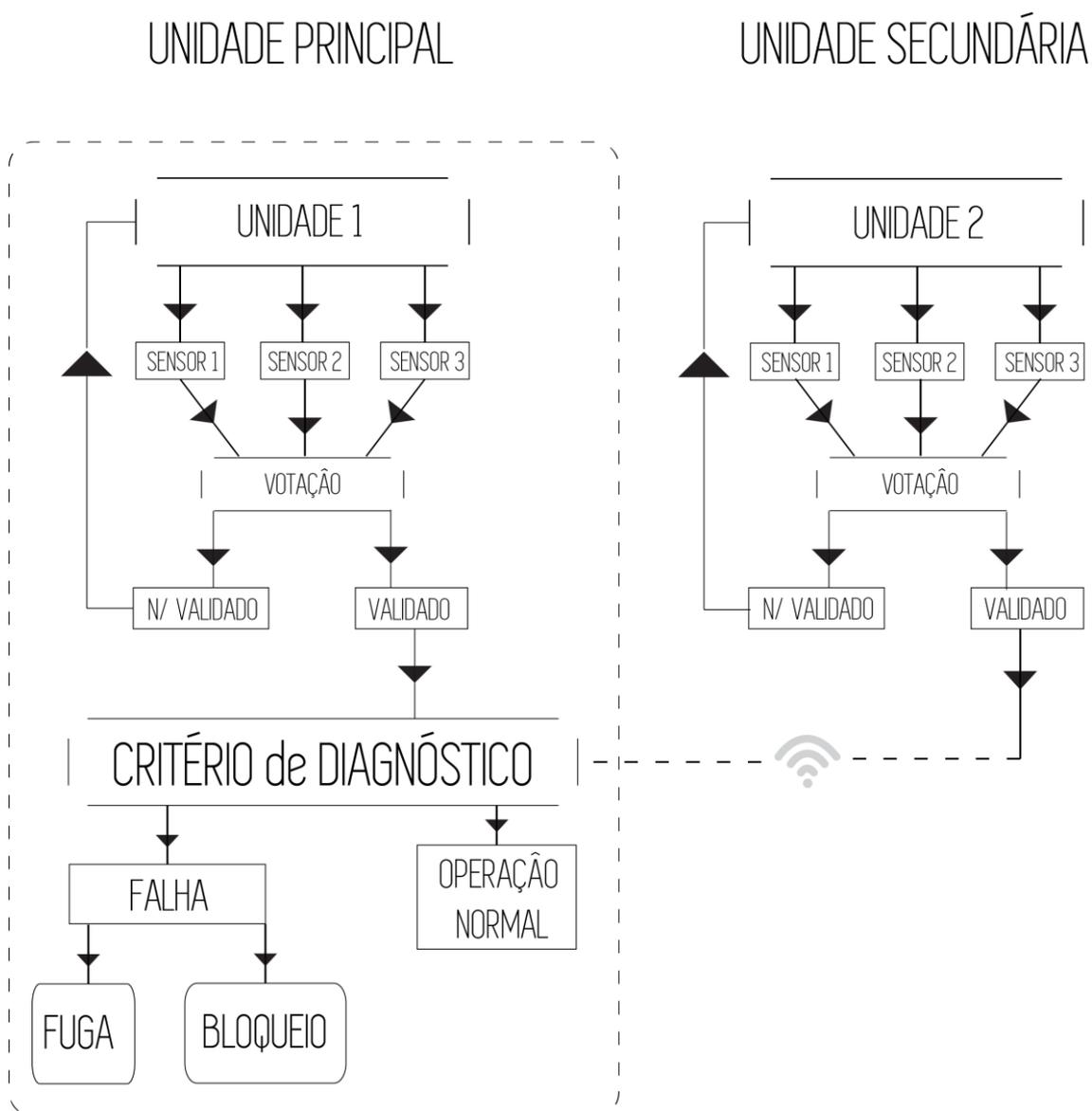


FIGURA 17 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SOFTWARE IMPLEMENTADO

Na Figura 17 está apresentado um resumo do código desenvolvido. Uma vez finalizado o código procedeu-se à realização dos testes do módulo de sensorização para estudar o comportamento dos sensores de temperatura na gama de temperaturas em causa e do respetivo *software* associado.

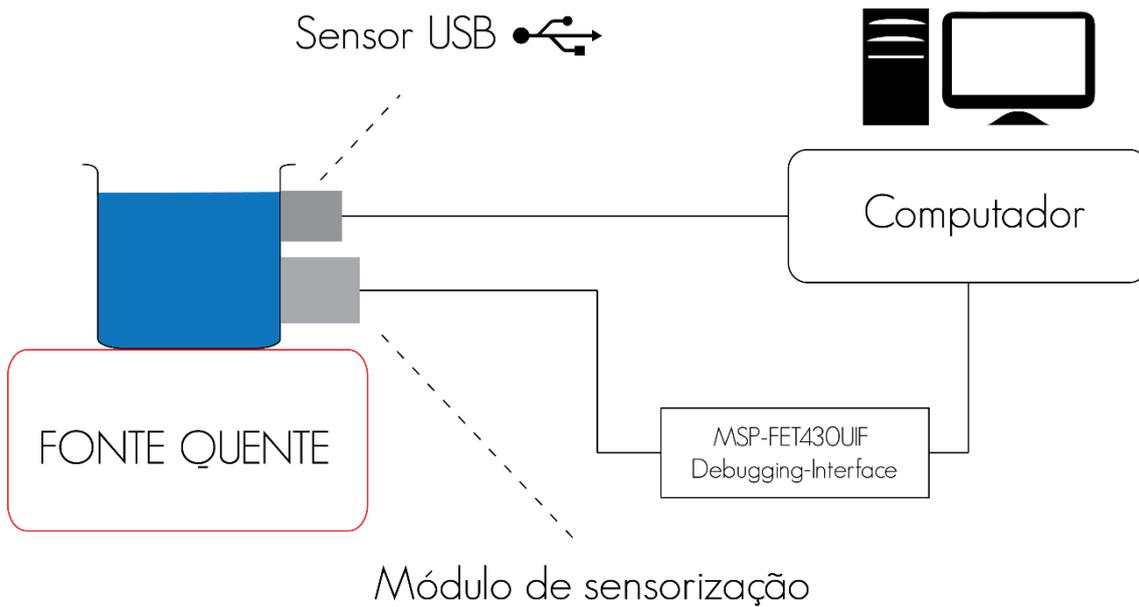


FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE TESTES

4.2.2 Testes e resultados

O primeiro sistema de testes desenvolvido consistia no acoplamento da placa de testes a um recipiente metálico, com água no seu interior, variando-se a temperatura do sistema através de uma fonte de calor ajustável. Na Figura 19 podemos observar a placa de testes em (1), o corpo em aquecimento (2), fonte de calor (3), a *debugging interface* em (4), computador (5) e a fonte de tensão (7). Além disso, utilizou-se um sensor de temperatura com conexão USB de modo a obter-se, em tempo real, uma referência de temperatura; na Figura 19 está referenciado como (7).



FIGURA 19 - FOTOGRAFIA DO PRIMEIRO SISTEMA DE TESTES DO MÓDULO DE SENSORIZAÇÃO

Como se pode observar na Figura 19 o módulo de sensorização foi acoplado na vertical e portanto os três sensores de temperatura irão registar valores de temperatura díspares devido ao facto da temperatura do corpo não ser uniforme verticalmente, i.e., quanto mais próximo estivesse da fonte de calor (mais próximo da zona inferior do copo metálico) maiores valores de temperatura registaria. Portanto optou-se por alinhar horizontalmente o sensor auxiliar com o sensor de temperatura central do módulo e considerar apenas estas duas medidas.

O primeiro teste consistiu na monitorização das temperaturas no processo de aquecimento até um máximo de 100°C. Verificou-se que o sensor de temperatura funcionava corretamente na gama em análise, sensivelmente entre os 30 e os 100 graus Celsius. Na Figura 20 podemos observar o comportamento do sensor de temperatura central, na imagem T, que estava alinhado horizontalmente com o sensor de temperatura externo, na imagem Ts.

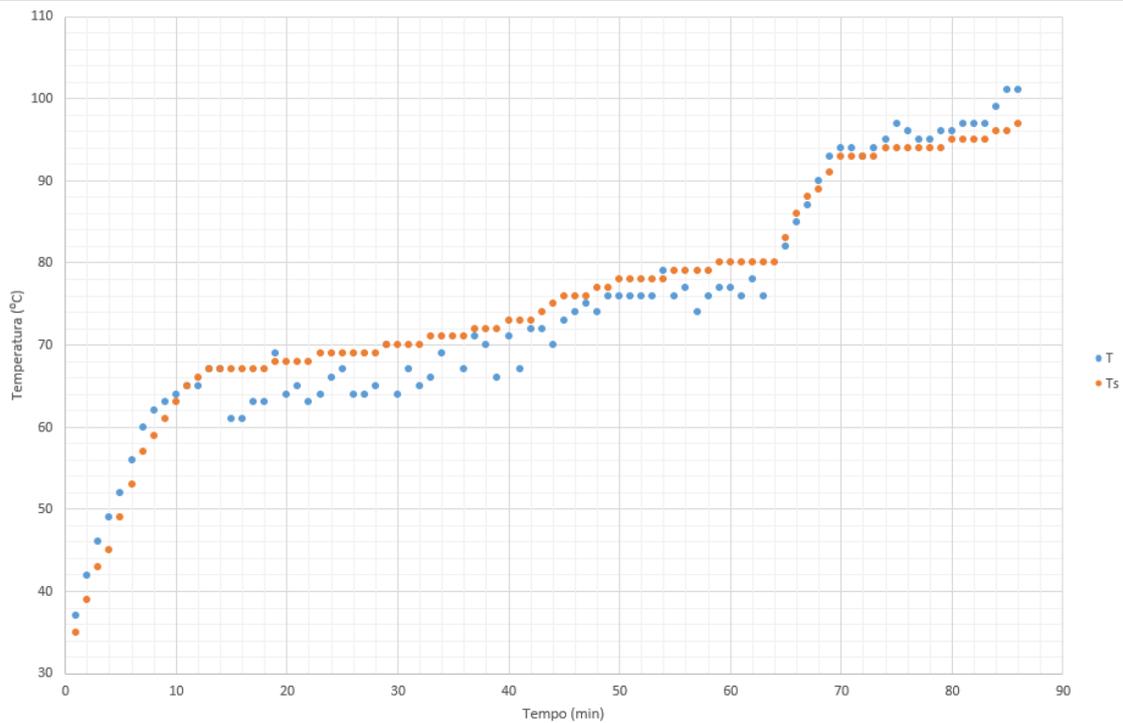


FIGURA 20 - GRÁFICO DA TEMPERATURA (TESTE 1)

Seguidamente adaptou-se o sistema de testes de modo a que os três sensores de temperatura estivessem termicamente alinhados, i.e., optou-se por analisar a temperatura de uma tampa colocada no topo do corpo em aquecimento no sistema anterior. Deste modo, a superfície em análise é maioritariamente aquecida pelo vapor de água formado no interior do copo. Contudo esta montagem não permite alcançar temperaturas tão elevadas como o sistema anterior. Na Figura 21 está apresentado o novo acoplamento do módulo de sensorização.

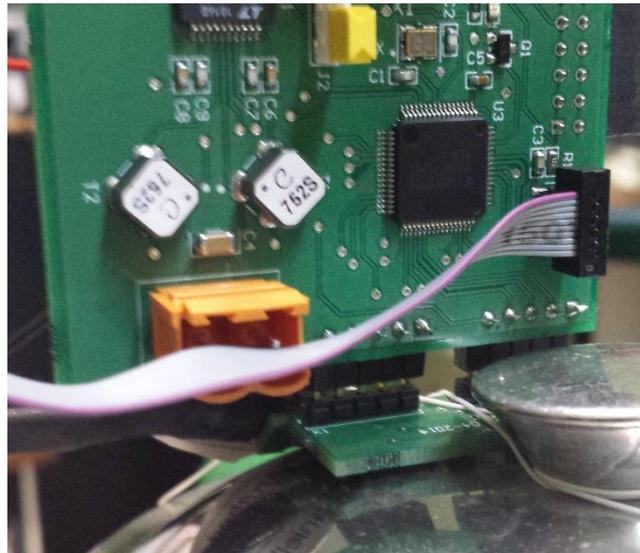


FIGURA 21 - FOTOGRAFIA DO NOVO SISTEMA DE TESTES

Com esta nova montagem estudou-se o comportamento dos sensores de temperatura no processo de aquecimento e arrefecimento. É importante analisar estes dois processos uma vez que no caso de ocorrência de falha as temperaturas das condutas podem aumentar ou diminuir consoante o tipo de falha em causa.

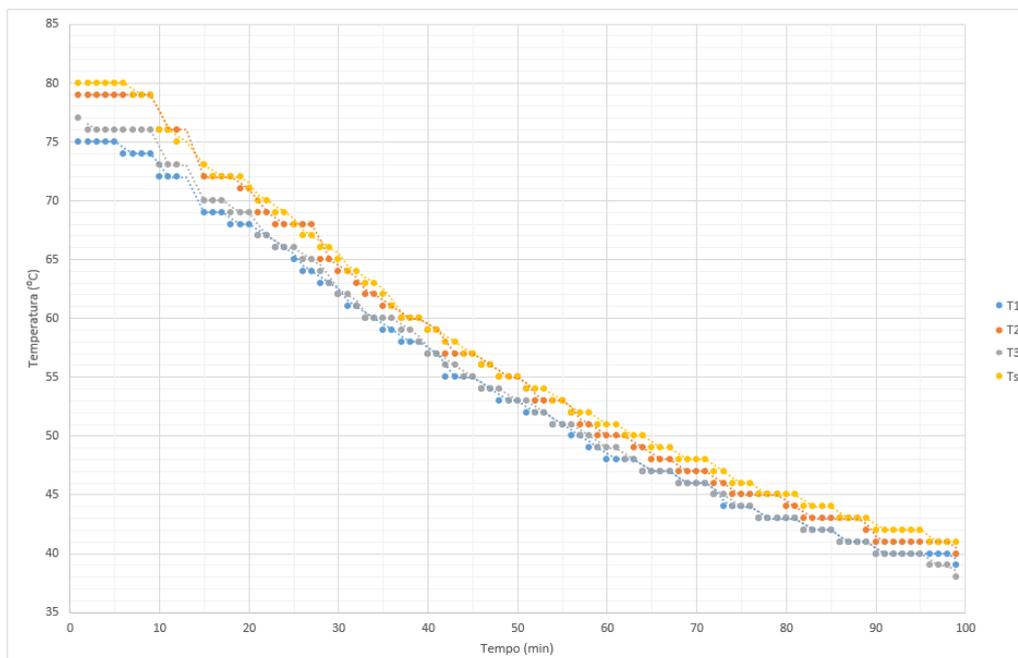


FIGURA 22 - GRÁFICO DO PROCESSO DE ARREFECIMENTO

No processo de arrefecimento (Figura 22) verificou-se uma boa concordância nas medidas dos três sensores (T1, T2 e T3), nunca distaram mais do que 2°C. Contudo para temperaturas superiores a 70°C pode observar-se maior discrepância de resultados (máximo de 3°C) o que pode ser facilmente resolvido através do desenvolvimento de uma curva de calibração aplicada por *software*.

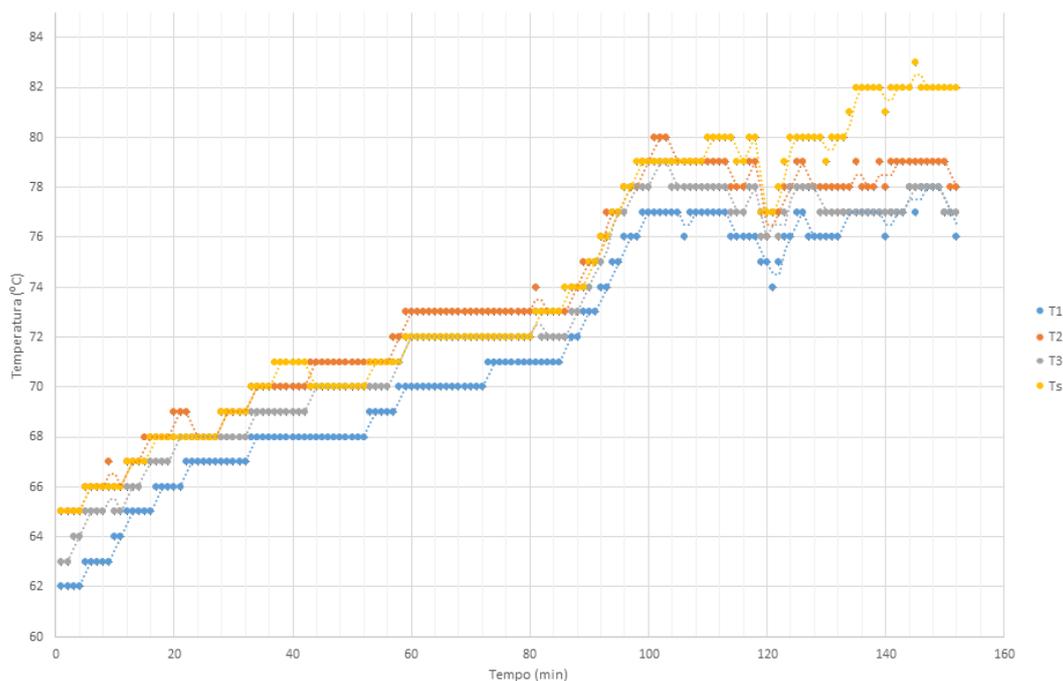


FIGURA 23 - GRÁFICO DO PROCESSO DE AQUECIMENTO

No processo de aquecimento (Figura 23) verifica-se uma boa concordância entre as medições, porém, tal como no processo de arrefecimento, verifica-se uma maior disparidade para temperaturas superiores a 70°C, constatando-se novamente a necessidade de calibração por *software*.

Além disso, pode assim concluir-se que o método de redundância modular tripla é importante para prevenir erros nas medições e consequentes erros de diagnóstico, uma vez que se registou maior disparidade no primeiro sistema de testes onde apenas se tinha em conta um sensor de temperatura. Por fim, a decisão de considerar nas

medições de temperatura uma incerteza de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ é adequada para estes sensores, dado que apenas se registaram variações superiores em casos isolados.

4.3 Alimentação

A alimentação de cada unidade da solução deve ser independente de modo a eliminar a necessidade de cabos entre as duas partes. A decisão mais comum é a de utilização de baterias. Como esta iria acarretar custos de manutenção para a substituição das mesmas está em contradição com o principal objetivo da solução da supressão da necessidade de manutenção dos purgadores. Portanto, a opção mais favorável é a de utilização de tecnologia de *energy-harvesting*, que consiste na recuperação de energia disponível no meio ambiente. No nosso caso, os sensores irão estar acoplados às condutas de vapor, que se encontram a elevadas temperaturas. Assim, pode-se tirar partido do diferencial térmico existente entre a superfície dos tubos e o meio exterior. Consequentemente, a fonte de alimentação de ambas as unidades será baseada em tecnologia de *energy-harvesting* por diferencial térmico. Uma vez que uma das condutas (a de entrada no purgador) está continuamente a uma temperatura superior e a temperatura externa é sensivelmente idêntica, esta deve ser a unidade principal, pois espera-se que consiga extrair mais energia graças ao maior diferencial térmico.

O sistema de alimentação é constituído por um gerador termoelétrico, ou termopilha, que consiste num dispositivo que converte diferenciais térmicos em energia elétrica através de um fenómeno geralmente designado por efeito de *Seebeck*. Estes dispositivos, apesar de apresentarem uma eficiência reduzida são robustos, duradouros e fiáveis o que os torna ideais para aplicações sem manutenção. Acoplado à termopilha surge um módulo de gestão energética que permite o armazenamento da energia num supercondensador.

Cada parte da solução possui um módulo de alimentação idêntico de extração energética através do diferencial térmico entre a conduta de vapor (lado quente) e o ar interno da solução (lado frio), através de uma termopilha. O sistema inclui um *ultralow*

voltage step-up converter and power manager, o LTC 3109 da *Linear Technology*, ideal para fontes de energia de baixa tensão como termopilhas. Este circuito integrado associado a dois transformadores elevadores, vários condensadores e a um elemento externo para armazenamento energético constitui uma solução completa de gestão de energia para sensorização sem fios e aquisição de dados. Na Figura 24 está apresentada a implementação típica deste circuito integrado, a qual foi adotada.

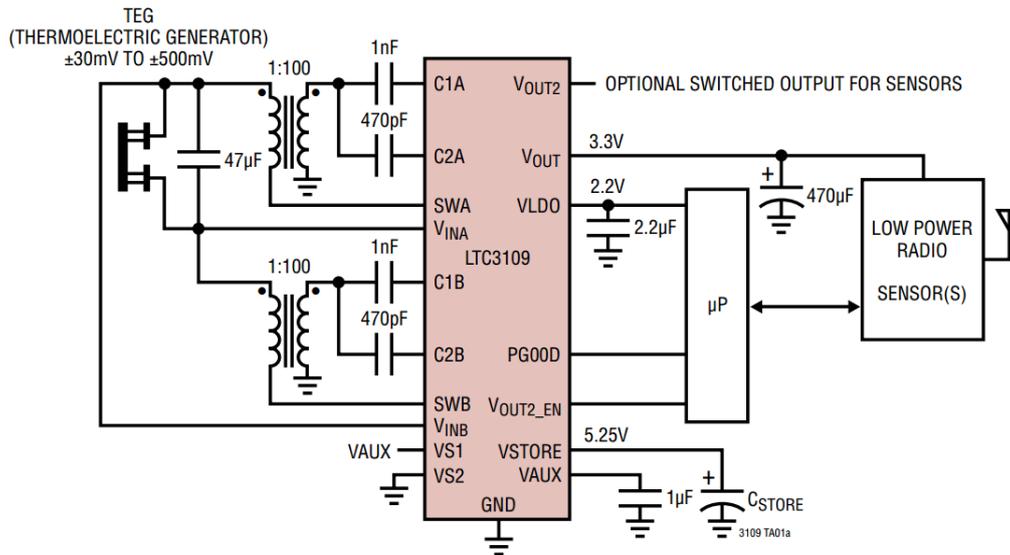


FIGURA 24 - APLICAÇÃO TÍPICA DO CIRCUITO INTEGRADO LTC3109 (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, 2014)

Seguindo os equipamentos aconselhados para implementação com o circuito integrado (Linear Technology Corporation, 2014) selecionou-se o transformador LPR6235-752SML (Figura 25) da *Coilcraft* com uma relação de transformação de 1:100, e a termopilha PT8.12.F2.4040.TA.W6 (Figura 26) da Laird Technologies com dimensões de 4x4 (cm²). A unidade de armazenamento escolhida foi um supercondensador da *Nec Tokin* de 0.22 F @5.2 V.

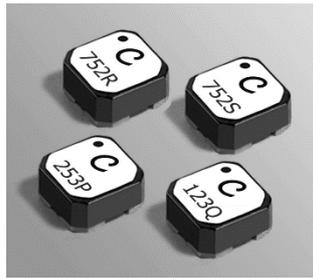


FIGURA 25 - IMAGEM DE TRANSFORMADORES COILCRAFT

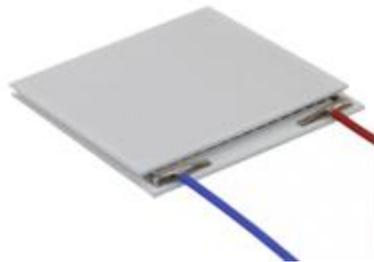


FIGURA 26 - IMAGEM DE TERMOPILHA DA LAIRD TECHNOLOGIES

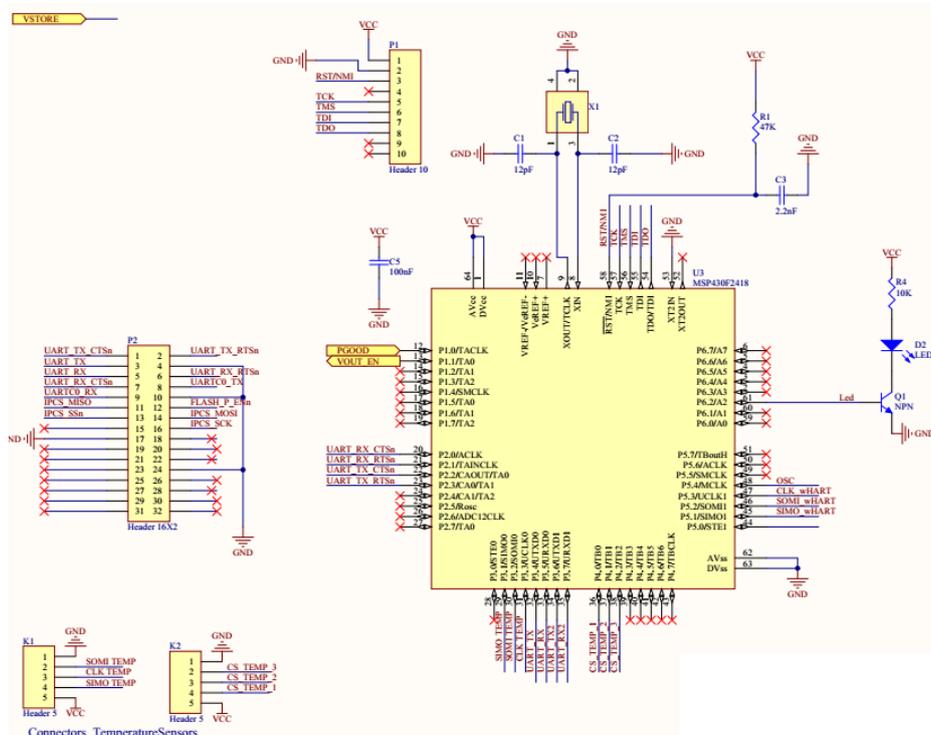


FIGURA 27 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS LIGAÇÕES DO MICROPROCESSADOR MSP430F2418

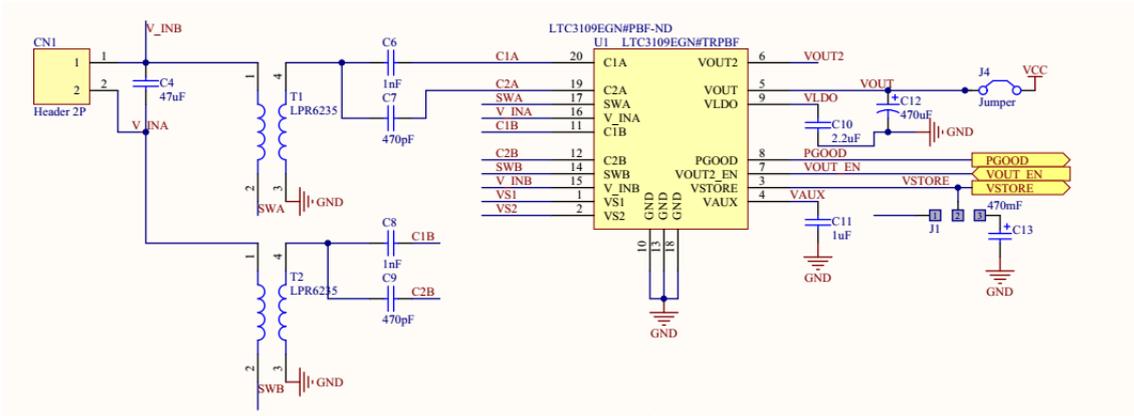


FIGURA 28 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO

Na Figura 28 está apresentado o diagrama esquemático do módulo de alimentação, os botões a amarelo: PGOOD, VOUT_EN e VSTORE são os que vão estar ligados ao microprocessador.

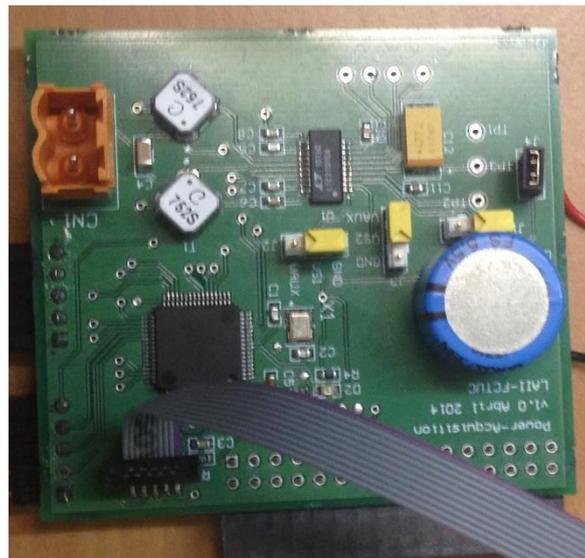


FIGURA 29 - FOTOGRAFIA DO MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO

Apesar de já terem sido desenvolvidos vários estudos acerca da aplicabilidade e desempenho de redes de soluções constituídas por geradores termoeletrônicos, o seu exercício depende naturalmente da aplicação e da localização da implementação. No

nosso caso é particularmente importante porque se trata de sustentar a operação completa do sistema, mesmo no caso extremo de ausência de uma fonte de calor.

Das três partes em que subdividimos a solução, o elemento crítico é o módulo de alimentação, uma vez que tem de ter capacidade para suportar todo o funcionamento da unidade e não existem registos de alguma vez ter sido testado para esta aplicação. Portanto, não é determinístico que a energia extraída seja suficiente para sustentar a operação contínua da solução completa. Então, surge um conjunto de questões que têm de ser respondidas: (i) será o sistema capaz de produzir a energia necessária? (ii) quanto tempo demorará o processo de carga do supercondensador? (iii) quantas comunicações seriam passíveis de realização com o supercondensador completamente carregado, i.e., qual é a autonomia do supercondensador em termos de número de comunicações? (iv) qual é o diferencial térmico mínimo que permite a produção da energia necessária pela unidade?

Com o intuito de responder às questões anteriores e demonstrar a viabilidade do sistema completo, através da validação do sistema de alimentação, desenvolveu-se o sistema apresentado na Figura 30. Este sistema de testes inclui os três módulos previamente descritos, uma fonte de calor e um dissipador.

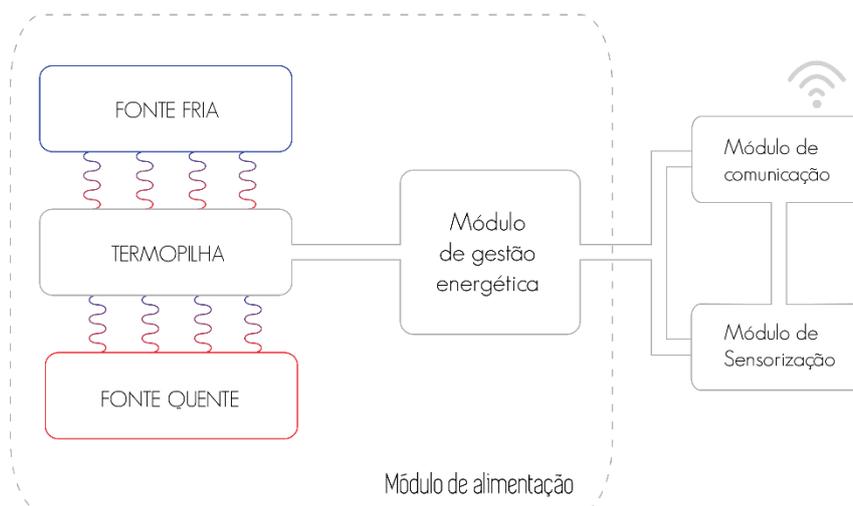


FIGURA 30 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE TESTES

4.3.1 Testes e resultados

O sistema de testes desenvolvido incluía como fonte quente um radiador e, na superfície superior do gerador termoelétrico, um dissipador de dimensões consideráveis para maximizar o diferencial térmico entre as superfícies e simular a presença de uma fonte fria. Na verdade, na operação de um gerador termoelétrico o importante não é a temperatura a que se encontra, quer a fonte quente quer a fonte fria, mas sim o diferencial térmico entre as duas superfícies do componente, que admite a produção de energia tanto maior quanto maior for o diferencial. Então, na tentativa de monitorizar em tempo real o diferencial térmico entre as superfícies utilizaram-se dois sensores de temperatura LM335 da Texas Instruments acoplados às respetivas superfícies. As medidas foram recolhidas em tempo real através do sistema de aquisição de dados NIUSB 6211 da *National Instruments* (National Instruments, 2009).

Uma fotografia do sistema de testes utilizado está apresentada na Figura 31, sendo (A) o radiador, (B) a placa de testes do módulo energético, (C) o gerador termoelétrico e (D) o dissipador.

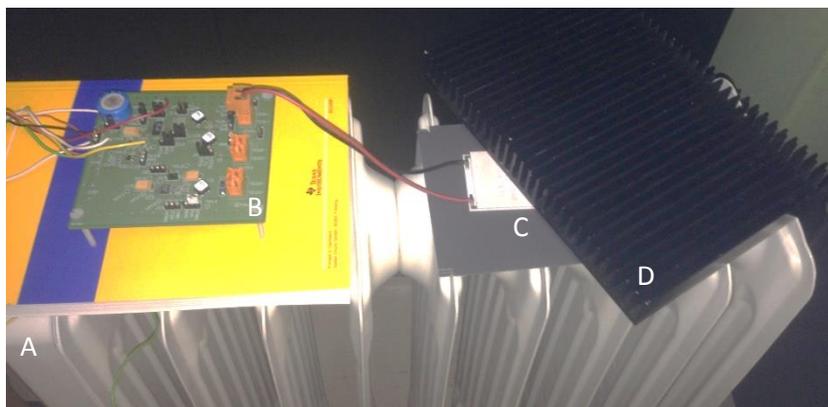


FIGURA 31 - FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE TESTES INICIAL

Em primeiro lugar estudou-se o processo de carga do supercondensador para diferentes diferenciais térmicos. Nesta montagem apenas é permitido controlar a temperatura da fonte quente até a um máximo de sensivelmente 50°C, o que limitava a capacidade de

eivar o diferencial térmico, então para esse efeito adicionou-se mais um elemento dissipador ao sistema, como se pode observar na Figura 32.

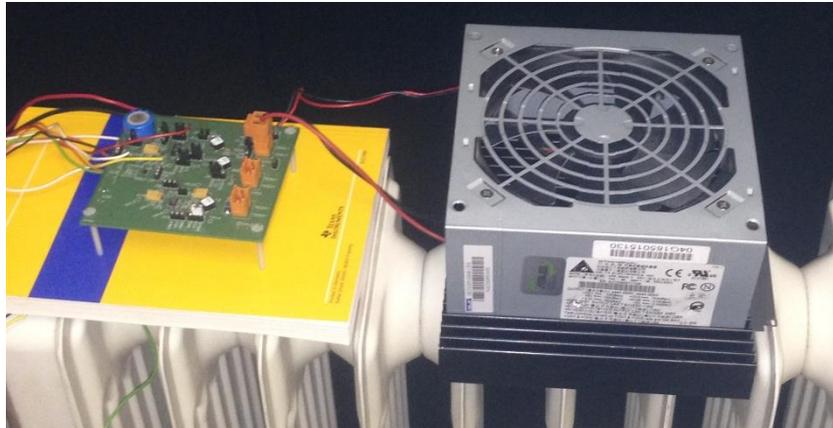


FIGURA 32 - FOTOGRAFIA DO NOVO SISTEMA DE DISSIPACÃO

Os resultados obtidos para dois diferenciais estão apresentados na Figura 33.

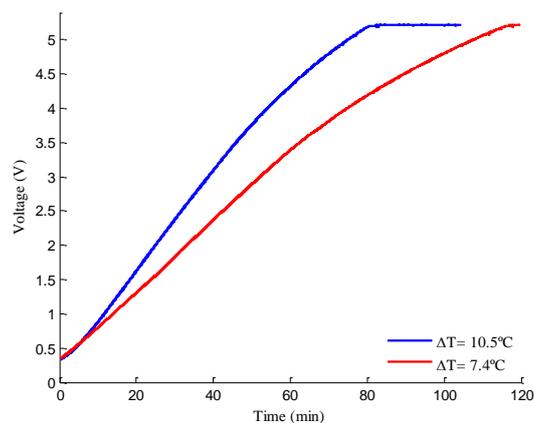


FIGURA 33 - CURVA DE CARGA DO SUPERCONDENSADOR PARA DIFERENTES DIFERENCIAIS TÉRMICOS

Tal como previsto, quanto maior for a temperatura da fonte quente maior é o diferencial térmico e menor será o tempo de carga do supercondensador. Além disso, verificou-se que é possível carregar totalmente o supercondensador para diferenciais térmicos inferiores a dez graus. Este resultado é promissor, uma vez que as temperaturas envolvidas nas condutas de vapor são superiores às testadas. Contudo, o uso de um radiador como fonte quente não permite a simulação da operação a temperaturas superiores; a temperatura máxima atingível foi a utilizada no teste anterior. Portanto, tornou-se imperativo encontrar uma fonte quente diferente que permita temperaturas

na ordem dos cem graus Celsius, tal como se encontra nas tubagens adjacentes aos purgadores.

Assim sendo, nos testes seguintes foi utilizado um sistema de aquecimento de placas de cerâmicas (ST 300 Ceramic Jaguar) que possibilita a realização de testes com temperaturas mais elevadas, até cerca de 120°C. Estas duas placas maciças permitem uma distribuição rápida e uniforme da temperatura, a qual é regulada através de um botão rotativo ajustável. Na Figura 34 está apresentada a nova montagem, e como se pode constatar é utilizado um novo dissipador por ser mais adequado a esta disposição.

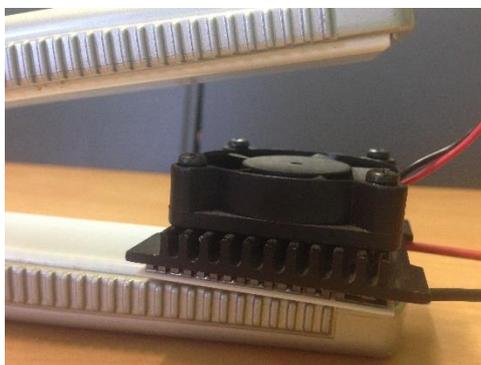


FIGURA 34 – NOVA MONTAGEM DA FONTE DE CALOR

Porém, nesta disposição não é possível acoplar os sensores de temperatura que permitiam a medição em tempo real do diferencial térmico, porque a área de contacto entre o gerador termoelétrico e a fonte de calor seria reduzida e a introdução dos sensores de temperatura iria influenciar significativamente o resultado. Assim sendo, apenas conhecemos a temperatura média da fonte de calor durante a realização dos testes, o que é satisfatório pois esta é a única condição conhecida da aplicação final. A medição da temperatura média da placa de cerâmica foi realizada através de um termómetro digital. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 35.

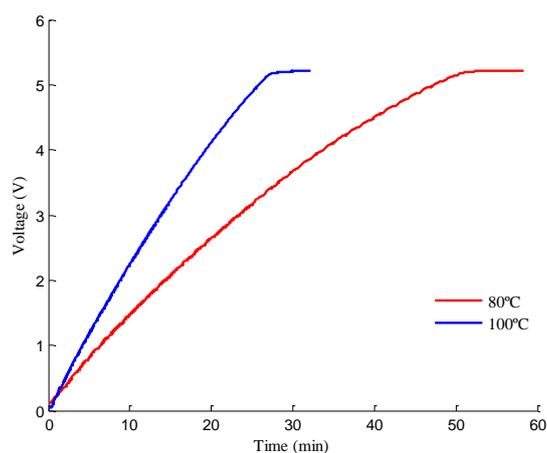


FIGURA 35 - CURVA DE CARGA DO CONDENSADOR PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DA FONTE DE CALOR

Tendo em conta que as temperaturas médias das tubagens onde as unidades serão aplicadas são da ordem do 70°C ou 110°C estes resultados são bastante promissores. Verificou-se que a carga do supercondensador pode ser concluída em menos de trinta minutos quando a temperatura da fonte de calor está próxima dos 100°C ou em menos de uma hora para sensivelmente 80°C.

Seguidamente estudou-se o processo de descarga do supercondensador pelo consumo dos módulos de sensorização e comunicação a operarem simultaneamente. Na Figura 36 podemos observar o sistema de testes completo, sendo (A) gerador termoelétrico e as suas respectivas fontes de calor, (B) a placa de testes referente ao módulo de alimentação, (C) módulo de comunicação e sensorização e (D) MSP430 USB Debug Interface (MSP-FET430UIF) da Texas Instruments.

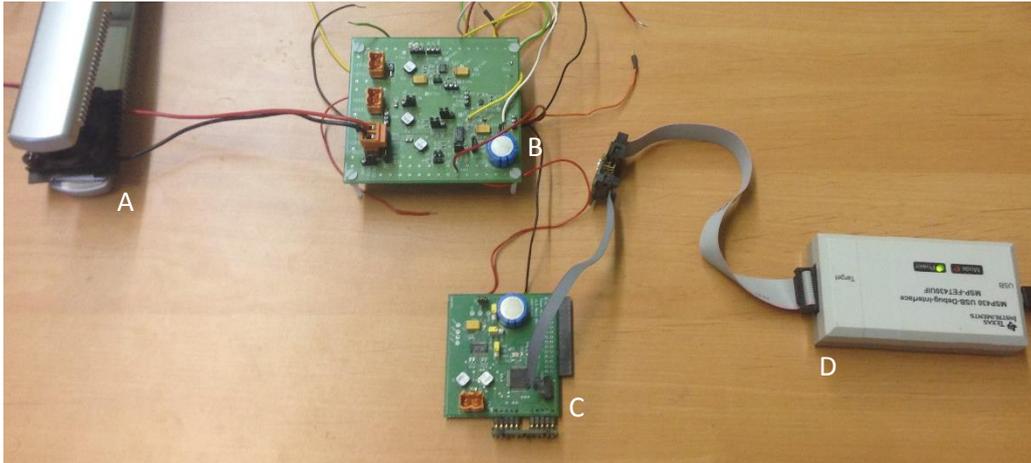


FIGURA 36 – FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE TESTES COMPLETO

Os testes apresentados de seguida estudam frequências de comunicação diferentes e a influência da presença ou ausência de fonte de calor.

Os resultados da descarga com comunicações a cada 10 segundos e a cada minuto na ausência de fonte de calor estão apresentadas na Figura 37. No primeiro caso, a comunicar de 10 em 10 segundos, foram enviadas 127 mensagens de forma bem-sucedida durante um período superior a vinte minutos. No segundo caso, como expectável, o tempo de descarga aumentou sensivelmente por um fator de seis, e foram enviadas 118 mensagens com sucesso. Esta diferença no número de mensagens enviadas deve-se à energia consumida pelo módulo de sensorização, que é idêntica em ambas as situações.

Portanto, pode-se concluir que o sistema terá sempre capacidade de enviar, pelo menos, uma mensagem de aviso, mesmo que exista algum problema no módulo de alimentação.

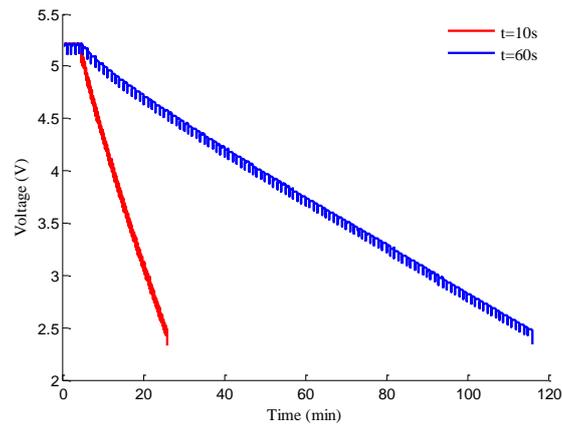


FIGURA 37 - CURVA DE DESCARGA DO SUPERCONDENSADOR PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE COMUNICAÇÃO

Relativamente ao estudo da influência da presença ou ausência da fonte de calor, realizaram-se dois testes de descarga do supercondensador, com a mesma frequência de comunicações. Os resultados, apresentados na Figura 38, foram adquiridos para regimes de comunicação de 10 em 10 segundos.

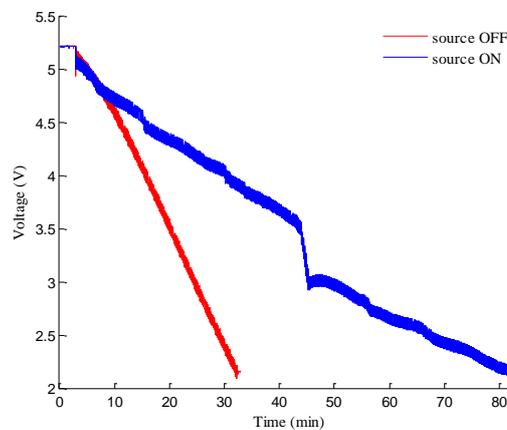


FIGURA 38 - DESCARGA DO SUPERCONDENSADOR NA PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE UMA FONTE DE CALOR

Na Figura 38 pode observar-se, tal como seria previsto, que o tempo de descarga do supercondensador aumenta significativamente, por cerca de um fator de dois, na presença de uma fonte de calor.

Contudo, nenhum resultado dos testes previamente realizados permite comprovar que a solução seria auto-suficiente, isto é, que conseguiria recarregar o condensador no intervalo de tempo entre comunicações por forma a assegurar um funcionamento contínuo. A primeira tentativa realizada provou que para comunicações de 10 em 10 segundos o sistema não tinha capacidade de se restabelecer. Portanto, realizaram-se testes adicionais com outras frequências de comunicação até se encontrar uma que permitisse a continuidade da operação da solução. Na Figura 39 pode-se constatar que o sistema é capaz de recarregar o supercondensador entre comunicações consecutivas quando comunica uma vez por minuto. Assim sendo, pode concluir-se que o sistema pode ser energeticamente auto-suficiente. Além disso, na prática, devido à inércia térmica da temperatura das condutas considera-se satisfatória a verificação de 5 em 5 minutos para corretamente monitorizar o purgador.

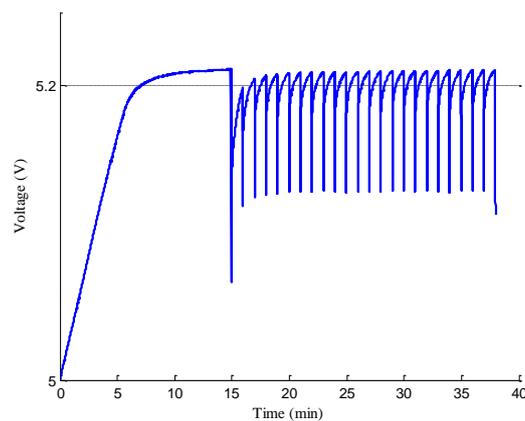


FIGURA 39 - TENSÃO NO SUPERCONDENSADOR A COMUNICAR A CADA MINUTO

Para concluir, na Figura 40 está apresentado um esquema resumo onde se pode facilmente verificar que a única diferença entre as duas partes da mesma solução, relativamente a constituintes, é a inclusão de um módulo de comunicação externa,

tecnologia *wirelessHART*, para que a solução possa comunicar com outras soluções vizinhas e integrar uma rede de sensores sem fios.



FIGURA 40 - RESUMO DOS COMPONENTES DA SOLUÇÃO DIVIDA EM DUAS PARTES

5. Conclusão

O sensor inteligente desenvolvido é inovador pelo critério de monitorização e diagnóstico escolhido, bem como na tecnologia de alimentação em potência, conduzindo a uma total auto-suficiência, na forma de um sistema autónomo capaz de tomar decisões localmente e em tempo real. É inovador pelo recurso a três formas de comunicação sem fios: local (entre as duas unidades em cada sensor), “regional” (abarcando cada agregado de sensores) e global (espraiando-se por toda uma área fabril), deste modo assegurando uma cobertura extensível da rede e evitando conflitos de comunicação decorrentes de congestão de rede. A utilização de um critério de redundância modular tripla permitirá evitar equívocos de diagnóstico e os consequentes falsos alarmes.

A próxima fase de desenvolvimento do produto compreende o acabamento do produto, i.e., encapsulamento industrial e a realização de testes em ambiente industrial real, para tal estando previstos testes na refinaria de Sines da Galp.

6. Bibliografia

A 120-mV Input, Fully Integrated Dual-Mode Charge Pump in 65-nm CMOS for Thermoelectric Energy Harvester. **P.-H. Chen, K. Ishida, X. Zhang, Y. Okuma, Y. Ryu, M. Takamiya and T. Sakurai. 2012.** s.l. : IEEE, 2012.

A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage. **Chandrakasan, Y. Ramadass and A. 2011.** 1, s.l. : IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, Vol. 46, pp. 333-341.

Analog devices. 2011. Temperature sensors. *Analog devices Web site.* [Online] 2011. [Cited: May 5, 2014.] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADT7301.pdf.

Analysis and design of ultra low power thermoelectric energy harvesting systems. **C. Lu, S. P. Park, V. Raghunathan and K. Roy. 2010.** Austin, TX, USA : International Symposium on Low - Power Electronics and Design (ISLPED), 2010.

ARI - Armaturen. 2012. Products: ARI - Armaturen. *ARI - Armaturen.* [Online] Agosto 2012. [Cited: Janeiro 15, 2014.] http://www.ari-armaturen.com/_appl/files_tb/files/630001-2.pdf.

ARI Valve Corporation. Steam Traps: ARI Valve Corporation. *ARI Valve Corporation.* [Online] [Cited: Abril 4, 2014.] http://www.arivalve.com/steam_traps.htm.

Armstrong. Steam eye and steam star product datasheet. *Armstrong Web Site.* [Online] [Cited: Junho 16, 2014.] <http://www.armstronginternational.com/files/common/allproductscatalog/steameye.pdf>.

Bahadori, Alireza. 2012. A simple predictive tool for monitoring steam loss in traps. *Chemical Engineering Research and Design.* 2012, Vol. 90, pp. 1896–1900.

Bestobel Steam Traps. *Bestobellsteamtraps.* [Online] [Cited: Janeiro 15, 2014.] <http://www.bestobellsteamtraps.com/sites/default/files/tector2.pdf>.

Bhatia, A. *CED Engineering.* [Online] [Cited: Janeiro 2014, 15.] <https://www.cedengineering.com/upload/Overview%20of%20Steam%20Traps.pdf>.

Bürkert Fluid Control Systems. Bürkert Fluid Control Systems - Steam site Guide. <http://www.burkert.co.uk/>. [Online] [Cited: Fevereiro 27, 2014.] http://www.burkert.co.uk/media/CI_Steam-Site_Guide_RZ_110318_print.pdf.

Cooper Atkins. Products: Temp Trank. *Cooper Atkins.* [Online] [Cited: Janeiro 15, 2014.] <http://www.cooper-atkins.com/customer-content/www/CMS/files/documentation/SlickSheets/67-1070.pdf>.

Cypress. 2008. Products: Wireless Steam Trap Monitor. *Cypress Web site.* [Online] 2008. [Cited: Janeiro 15, 2014.] <http://www.cypresenvirosystems.com/wp-content/uploads/2010/07/PBWSTM070901.pdf>.

Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique. **Noonyaroonate, J. Eakburanawat and I. 2005.** 7, s.l. : Applied Energy, 2005, Vol. 83, pp. 687-704.

Emerson. *Emerson Industrial Automation.* [Online] [Cited: Janeiro 15, 2014.] http://www.ascoval.com.br/www.ascoval.com.br/completo_purgador.pdf.

Emerson Process Management. 2012. Rosemount 708, Product Datasheet. *Emerson Process Website.* [Online] Setembro 2012. [Cited: Junho 16, 2014.] <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4708.pdf>.

Emerson. 2012. Product: Rousemont 708 Wireless Acoustic Transmitter. *Emerson Web site.* [Online] Setembro 2012. [Cited: Janeiro 15, 2014.] <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4708.pdf>.

Faria, Sérgio Paulo Salgado. 2009. *SENSOR INTELIGENTE DE VIBRAÇÃO E TEMPERATURA PARA MANUTENÇÃO CONDICIONADA DE MÁQUINAS ROTATIVAS.* Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra : s.n., 2009.

FLOWERVE Gestra. 2006. Steam Traps and Steam traps testing. *Flowserve Website.* [Online] 2006. [Cited: Maio 2014, 15.]

IEC. 2011. International Electrotechnical Commission 60079 standard, Suíça. *IEC Website.* [Online] Junho 22, 2011. <http://www.iecex.com/standards.htm>.

Linear Technology Corporation. 2014. LTP5900-WHM SmartMesh WirelessHART Node Wireless Mote Module. *Linear Technology Website.* [Online] 2014.

Linear technology. 2010. LTC3109 datasheet. *Linear Technology's Web site.* [Online] 2010. [Cited: May 1, 2014.] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3109fb.pdf>.

M. Kocoloski, C. Eger, R. Mccarty, K. Hallinan and K. Kissock. 2007. Industrial Solid-State Energy Harvesting: Mechanisms and Examples. 2007, pp. 55-68.

National Instruments. 2009. NI USB-621x User Manual. *National Instruments Web Site.* [Online] Abril 2009.

Pentair. 2013. Valves: Pentair Valves. *Pentair Valves.* [Online] Fevereiro 2013. [Cited: Abril 8, 2014.] http://valves.pentair.com/valves/Images/YAWMC-0771-US_tcm106-37019.pdf.

Recharging batteries using energy harvested from thermal gradients. **H. A. Sodano, G. E. Simmers, R. Dereux and D. J. Inman. 2006.** s.l. : Journal of Intelligent material systems and structures, 2006, Vol. 18, pp. 3-10.

Risko, James R. 2011. Understanding Steam Traps. *Chemical Engineering Process.* Fevereiro 2011.

Schneider Eletric . 2011. Accutech AM20, Wireless acoustic monitor field unit. *Schneider Electric.* [Online] Agosto 2011. [Cited: Junho 16, 2014.]

<http://www.controlmicrosystems.com/media/product-literature/accutech/SE-DataSheets-Accutech-AM20-Letter-TBU-V009.pdf>.

Sonotec. 2012. *Sonotec*. [Online] Janeiro 2012. [Cited: Janeiro 15, 2014.] http://www.sonotec.eu/marken/sonaphone_k.htm.

Spirax Sarco. 2006. *Spirax Sarco Web Site*. [Online] 2006. [Cited: Janeiro 15, 2014.] http://www.spiraxsarco.com/pdfs/sb/s34_01.pdf.

—. *Spirax Sarco Web Site*. [Online] [Cited: Abril 2014, 4.] <http://www.planar.ind.br/pdf/eletronico.pdf>.

—. **2006.** Spiraxtec System datasheet. *Spirax Sarco web site*. [Online] 2006. [Cited: Junho 16, 2014.] http://www.spiraxsarco.com/pdfs/sb/s34_01.pdf.

Texas Instruments. 2012. MSP430F2418, 16-Bit Ultra-Low-Power Microcontroller. *Texas Instruments*. [Online] 2012. <http://www.ti.com/product/msp430f2418>.

—. **2011.** TRF7970A Evaluation Module. *Texas Instruments Web site*. [Online] 2011.

Thermal Energy Harvesting for WSNs. **Yang, X. Lu and S.-H. 2010.** s.l. : IEEE, 2010.

Thermoelectric Microconverter for Energy Harvesting Systems. **J. P. Carmo, L. M. Gonçalves and J. H. Correia. 2010.** 3, s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, March 2010, Vol. 57, pp. 861-867.

Using thermoelectric energy harvesting to power a self-sustaining temperature sensor in body area networks. **R. Kappel, W. Pachler, M. Auer and W. Pribyl. 2013.** Cape Town : International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2013.