



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Pedro Ribeiro Martins

Circuito Para Leitura e
Aquisição de Dados de Um Sensor Químico

Rui Pedro Ribeiro Martins | Circuito Para Leitura e
Aquisição de Dados de Um Sensor Químico



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Pedro Ribeiro Martins

Circuito Para Leitura e
Aquisição de Dados de Um Sensor Químico

Tese de Mestrado
Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor José Gerardo Vieira da Rocha

e coorientação do
Professor Senentxu Lanceros Mendez

DECLARAÇÃO

Rui Pedro Ribeiro Martins

Endereço Eletrónico: a40462@alunos.uminho.pt

Número de Bilhete de Identidade: 12820627

Título da Tese: **Circuito Para Leitura e Aquisição de Dados de Um Sensor Químico**

Orientador: Doutor José Gerardo Vieira da Rocha

Coorientador: Doutor Senentxu Lanceros Mendez

Ano de conclusão: 2013

Tese submetida na Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

“Ninguém faz cadeados sem chaves, do mesmo modo que não há problemas sem solução”

Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem o apoio e a contribuição, direta ou indiretamente, de algumas pessoas, às quais quero começar por transmitir os meus mais sinceros agradecimentos.

As primeiras palavras de agradecimento vão para o orientador e coorientador desta dissertação, Professor Doutor Gerardo Rocha, e coorientador Professor Senentxu Lanceros Mendez que me propuseram o presente trabalho, e me orientaram durante todo o processo de desenvolvimento da dissertação aqui apresentada. Deixo também uma palavra de apreço para o Vítor Correia pelo apoio dado durante a preparação da componente laboratorial através da transmissão de importantes conselhos e conhecimentos

Quero também agradecer aos técnicos e restantes pessoas do Departamento de Eletrónica Industrial, nomeadamente ao Sr. Carlos, Sr. Joel e Dona Ângela pela ajuda fornecida na execução da componente prática descrita nesta dissertação.

Por último, uma enorme palavra de gratidão à minha família pela ajuda, disponibilidade e compreensão durante todo o meu percurso académico, bem como a todos os amigos e colegas de curso pelas trocas de ideias que em muito contribuíram para a resolução de problemas e ultrapassagem de obstáculos com que me fui deparando no decorrer da realização do projeto.

Resumo

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma estrutura, base, capaz de ler, ou seja, fazer a aquisição de um sinal, proveniente de um sensor químico. A base pode adquirir sinal de um sensor químico que seja baseado na técnica resistiva bem como na técnica capacitiva. Para tal é constituído por dois circuitos em ponte, um baseado na ponte de Wheatstone para ler o sensor resistivo, e o outro na ponte capacitiva para ler sinais de sensores capacitivos. Possui posteriormente um bloco de acondicionamento de sinal constituído por dois amplificadores numa montagem inversora com realimentação capacitiva, que dizem respeito aos andares de pré-amplificação e de ganho. São ainda apresentados alguns testes realizados para comprovar o bom funcionamento do circuito de leitura.

Para efeitos de testes, foram numa fase inicial, simulados os comportamentos de um sensor resistivo e de um sensor capacitivo, com o auxílio de um potenciómetro e de um conjunto de condensadores, respetivamente. Por fim foi utilizado um sensor “real”, neste caso um sensor de humidade baseado na técnica resistiva.

Palavras-Chave: Sensor Químico, Sensor Resistivo, Sensor Capacitivo, Circuitos Ponte, Ponte de Wheatstone, Ponte Capacitiva.

Abstract

This thesis presents the development of a structure, a base, capable of reading a signal from a chemical sensor. The base may capture a signal from a chemical sensor that is based on the resistive technique, as well as on the capacitive technique. For this purpose, the base is made of two bridge circuits, one based on the Wheatstone bridge circuit for the reading of the resistive sensor, and the other one based on the capacitive bridge for the reading of capacitive sensors. In addition, it also possesses a signal-conditioning block made of two inverted amplifiers with capacitive feedback, which concern the pre-amplification and gain floors. A few test results are also presented in order to prove the proper functioning of the reading circuit.

At an early stage and for the purposes of testing, the behavior of a capacitive sensor and of a resistive sensor was simulated with the assistance of a potentiometer and a set of capacitors, respectively.

Finally, it was used a “real” sensor and, in this case, the sensor used was a humidity sensor based on the resistive technique.

Keywords: Chemical Sensors, Resistive Sensors, Capacitive Sensors, Bridge Circuits, Wheatstone Bridge, Capacitance Bridge

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Acrónimos	xi
Nomenclatura	xii
Prefixos	xii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Objetivos e Motivação.....	1
1.2 Enquadramento	2
1.2.1 Utilização dos Sensores Químicos	4
1.2.2 Exemplos de Utilização de Sensores Químicos	5
1.3 Organização e Estrutura da Dissertação	6
Capítulo 2 Estado da Arte	8
2.1 Sensores	8
2.2 Sensores Analógicos <i>versus</i> Sensores Digitais.....	9
2.2.1 Sensores Resistivos <i>versus</i> Sensores Capacitivos.....	9
2.3 Circuitos de interface com os sensores.....	10
2.3.1 Divisor de Tensão	10
2.3.2 Circuitos em Ponte	13
2.3.3 Ponte de Wheatstone	14
2.3.4 Ponte Capacitiva.....	16
Capítulo 3 Implementação	19
3.1 Descrição da Estrutura do Circuito.....	19
3.2 Material Utilizado.....	20
3.3 Andar de Pré-Amplificação e de Ganho.....	21
3.4 Ponte Capacitiva	23
3.5 Ponte Resistiva	24

3.6 ArduinoUno – Microcontrolador	26
3.6.1 Sinal de <i>Clock</i>	26
3.6.2 Controlo dos Amplificadores de Ganho Programável	28
3.7 Base Final	30
Capítulo 4 Testes e Resultados	32
4.1 Testes Sinal <i>Clock</i>	32
4.2 Testes Ligação Arduino – PGA’s.....	33
4.3 Testes das Pontes de Medida.....	35
4.3.1 Testes Ponte Resistiva.....	35
4.3.2 Testes Ponte Capacitiva	38
4.4 Teste ao Circuito de Leitura com Sensor Químico.....	40
Capítulo 5 Conclusões e Trabalho Futuro.....	43
Referências	46

Lista de Figuras

Figura 1 – Controlo do nível da água num tanque [4]	2
Figura 2 – Circuito elétrico equivalente	5
Figura 3 - Circuito Divisor de Tensão	11
Figura 4 - Divisor de Tensão com LDR	12
Figura 5– Circuito em Ponte	13
Figura 6 - Circuito de Ponte de Wheatstone	14
Figura 7 - Método de Substituição.....	15
Figura 8– Circuito para medição de uma capacitância	17
Figura 9 - Ponte Capacitiva	18
Figura 10 - Diagrama de Blocos do Circuito de Leitura.....	19
Figura 11 - Andar de Pré-Amplificação e de Ganho	21
Figura 12 - Diagrama Sinal <i>Clock</i>	22
Figura 13 - a) Andar de Pré-Amplificação b) Andar de Ganho.....	22
Figura 14–Circuito da Ponte Capacitiva	23
Figura 15–Circuito da Ponte Resistiva	25
Figura 16 - Registo de Controlo A do Timer0.....	27
Figura 17 - Registo de Controlo B do Timer0	28
Figura 18 - Registo de Controlo da interface série/paralelo	29
Figura 19 - Esquema do circuito implementado	31
Figura 20 - Sinal de <i>Clock</i> testado	33
Figura 21 - Esquema Ligação Microcontrolador–PGA.....	34
Figura 22 - Ponte Resistiva com Acondicionamento de Sinal.....	36
Figura 23- Ponte Capacitiva com Acondicionamento de Sinal	39
Figura 24 - Circuito teste Sensor Químico	41

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Seleção da Frequência do <i>timer</i>	32
Tabela 2 - Valores de Testes dos PGA's	35
Tabela 3 - Valores Teste Ponte Resistiva do primeiro ensaio	37
Tabela 4 - Valores de Testes Ponte Resistiva do segundo ensaio	38
Tabela 5 - Valores Teste Ponte Capacitiva	40
Tabela 6 - Valores Teste do Sensor Químico	42

Lista de Acrónimos

<i>PGA</i>	<i>Amplificador de Ganho Programável</i>
<i>SPI</i>	<i>Interface Série/Paralelo</i>
<i>LDR</i>	<i>Light Dependent Resistor</i>
<i>ADC</i>	<i>Conversor Analógico-Digital</i>

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidade
<i>R</i>	Resistência	Ω
<i>V</i>	Tensão	V
<i>I</i>	Corrente	A
<i>f</i>	Frequência	Hz
<i>L</i>	Indutância	H
<i>C</i>	Capacitância	F

Prefixos

Símbolo	Significado	Valor
<i>k</i>	<i>kilo</i>	10^3
<i>n</i>	<i>nano</i>	10^{-9}
<i>m</i>	<i>mili</i>	10^{-3}
<i>M</i>	<i>Mega</i>	10^6

Capítulo 1

Introdução

Neste Capítulo são expostas as motivações e são apontados os objetivos do trabalho proposto. É feito um enquadramento sobre sensores e as suas utilidades para a vida quotidiana. Por último é descrita a estrutura e organização da presente dissertação.

1.1 Objetivos e Motivação

A presente dissertação está inserida no âmbito da obtenção de grau do 2º ciclo de estudos do curso Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores da Universidade do Minho. Trata-se de um projeto individual de investigação, promovendo dessa forma a capacidade pessoal de iniciativa, decisão e espírito crítico, pondo à prova os conhecimentos adquiridos no decorrer dos 2 ciclos de ensino do curso.

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma plataforma, um circuito, para receber sinal de um sensor químico e que seja capaz de realizar a sua leitura de forma a ser possível interpretá-lo. O requisito principal da estrutura é que esta possua alguma versatilidade, ou seja, como a nível de sensores químicos estes podem ser quer resistivos quer capacitivos, é pretendido que o circuito seja capaz de receber sinais provenientes de qualquer um destes tipos de sensores.

O circuito irá ser desenvolvido e implementado e por fim será testado. Para efeitos de testes irá ser utilizado um potenciómetro para simular o comportamento de um sensor resistivo, e um conjunto de condensadores para simular o comportamento de um sensor capacitivo. Irá posteriormente ser utilizado um sensor de humidade, sendo que este sensor será baseado na técnica resistiva, de forma a testar o circuito numa situação em que recebe sinal proveniente de um sensor real.

A motivação que levou à escolha deste tema recaiu em vários fatores. Enquadra-se numa área de interesse e gosto pessoal, área de eletrónica e instrumentação, e tem uma forte componente prática e experimental, pois para além de todo o estudo de pesquisa efetuado, são também feitas experiências práticas após implementação de todos os circuitos. O facto de o trabalho a desenvolver incidir sobre a utilização dos

sensores químicos, foi também um aspeto preponderante para a escolha do tema, pois apesar de os sensores químicos não serem uma área nova, existe ainda muito por onde evoluir e as suas aplicações são muito diversas. Estes sensores têm aplicação, entre muitas outras, por exemplo, na área da saúde em termos da monitorização do ar ambiente, tais como no controlo da humidade, ou deteção da presença, ou de certos níveis, de gases tóxicos que podem ser nocivos às pessoas, proporcionando desta forma uma melhoria no bem-estar e segurança. São também utilizados na área da medicina para realizarem diagnósticos clínicos e mesmo na indústria para controlo de produção entre muitas outras.

A elaboração desta dissertação iniciou-se por uma recolha de informação e revisão bibliográfica acerca de sensores químicos e circuitos para realizarem a aquisição do seu sinal. Posteriormente foi planeada e executada a componente laboratorial, que consistiu na implementação da estrutura. Por fim foi escrito o presente documento que descreve toda a execução deste trabalho.

1.2 Enquadramento

Um sensor é muitas vezes definido, de um modo muito geral, como um dispositivo que recebe e responde a um sinal ou estímulo. Esta definição é muito geral, pois pode ser aplicada a inúmeras situações, tais como ao olho humano, a um interruptor ou a uma válvula no controlo do nível de água num tanque, como ilustrado na figura 1. [4]

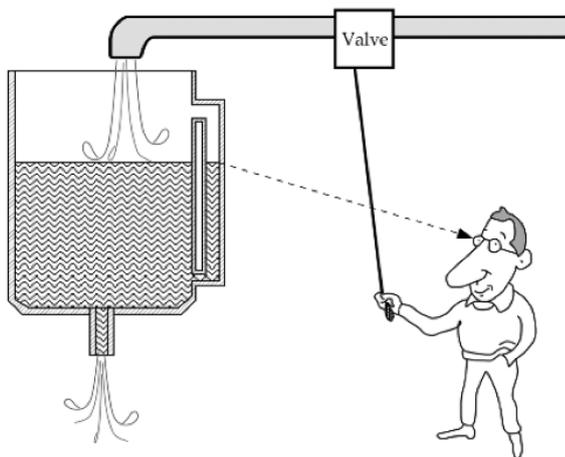


Figura 1 – Controlo do nível da água num tanque [4]

Nesta situação o olho e a mão funcionam como o dispositivo que recebe informação e responde, respetivamente. Através do olhar é verificado o nível da água e com a mão é controlada a válvula para impedir ou permitir a passagem da água. O controlo do nível da água é totalmente feito pelo homem. Através do olhar é retirada informação sobre o nível do líquido no tanque em tempo real, essa informação é processada, e é atuada a válvula, controlada pela mão, consoante o que foi processado pelo olhar, isto é, é aberta a válvula caso o tanque tenha pouco fluido e fechado caso tenha em demasia. Neste processo é possível controlar o nível do líquido para que o tanque não transborde ou pelo contrário, que fique seco.

Nesta situação mencionada pode então dizer-se que quer o olho humano quer a mão que controla a válvula não são sensores, mas o conjunto dos dois pode ser definido como um sensor, pois o olho humano obtém informação acerca do nível da água, ou seja recebe um sinal, e o outro, a mão que controla a válvula, responde a essa informação. Neste caso está-se perante o que se pode chamar de sensor natural.

O mundo onde vivemos pode ser dividido em sensores naturais e sensores artificiais que são fabricados pelo homem. Os sensores naturais, tais como os que se podem encontrar em organismos vivos, normalmente respondem com sinais eletroquímicos. Nos dispositivos artificiais, tal como um sensor elétrico, a informação é transmitida e processada através de eletrões. Os sensores que são usados em sistemas artificiais devem “falar a mesma linguagem” que os dispositivos com os quais interagem. Esta linguagem, nos sensores artificiais, especificamente nos sensores elétricos, é de natureza elétrica, e os sensores devem de ser capazes de responder com sinais da mesma natureza em que a informação é transportada, ou seja, sinais igualmente elétricos.

Um sensor elétrico pode ser definido como um “dispositivo que recebe e responde a um sinal ou um estímulo¹, com um sinal elétrico” [4], ou seja, tem como propósito responder a uma entrada com uma propriedade física, e convertê-la num sinal elétrico que possa ser lido e posteriormente encaminhado, amplificado e modificado por dispositivos eletrónicos. Pode até mesmo dizer-se que um sensor é uma espécie de “tradutor” de valores geralmente não elétricos em valores elétricos.

O sinal de saída do sensor pode ser na forma de tensão, corrente ou mesmo carga, podendo ser ainda descrito, variar, em termos de amplitude, frequência, fase ou

¹ Como estímulo, recebido pelo sensor, entende-se a grandeza, propriedade ou condição que é sentida/detetada e convertida num sinal elétrico, sinal esse que pode ser, tensão, corrente ou carga.

código digital. Um sensor tem propriedades de entrada de qualquer tipo e propriedade elétrica na saída.

O sinal de entrada dos sensores é uma forma de energia, por essa razão podem ser divididos consoante o tipo de energia que vão detetar. Entre os vários tipos existentes podem mencionar-se os sensores de luz, som, temperatura, movimento, pressão e sensores químicos, entre muitos outros. Os sensores químicos, são o tipo de sensores em que esta dissertação se vai focar. Um sensor químico é um dispositivo que fornece informação acerca do tipo, concentração e estado químico de uma determinada espécie presente numa amostra. Por outras palavras pode ser definido como um dispositivo constituído por um transdutor e uma membrana quimicamente sensível que gera um sinal relacionado com a concentração de uma determinada espécie de partícula existente numa amostra.

Neste tipo de sensor a informação é expressa através de variações provocadas essencialmente em dois tipos de grandezas elétricas, capacitância e/ou resistência, e são estas duas grandezas que vão ser o alvo de estudo da presente dissertação.

1.2.1 Utilização dos Sensores Químicos

Os sensores químicos são amplamente utilizados em várias áreas tais como: monitorização atmosférica, segurança e higiene na indústria, controlo do conforto humano, controlo de humidade, monitorização de emissões de gases, diagnósticos clínicos, alarmes de segurança domésticos, cuidados de saúde ao nível da vigilância entre muitas outras.

Na indústria são utilizados no controlo do processo e qualidade de produção, como por exemplo, na fabricação de plásticos e na produção de metais fundidos onde a quantidade de um certo gás pode afetar as características dos metais, tais como o brilho. Na medicina são utilizados para determinar a saúde dos pacientes através da monitorização do oxigénio e rastreamento de gás, em amostras de sangue e dos pulmões. São também utilizados em aparelhos que através do ar expirado fazem a deteção da presença de álcool no sangue ou de problemas ou anomalias de digestão de um paciente. São também utilizados no exército para deteção de depósitos de combustível e armas químicas.

Apesar das várias áreas de utilização, um dos grandes focos de desenvolvimento dos sensores químicos é na monitorização do ar ambiente possibilitando uma melhoria na qualidade do ar, que se traduz numa melhoria na vida das pessoas. São utilizados

para detetar e controlar a exposição a gases tóxicos que são nocivos e podem pôr em risco a saúde das pessoas, principalmente de trabalhadores em certos ambientes laborais. Um exemplo deste tipo de gases tóxicos é o Césio. O Césio é um elemento químico bastante perigoso à saúde humana pois pode causar infertilidade, cancro, insuficiência da medula óssea e pode mesmo levar à morte.

1.2.2 Exemplos de Utilização de Sensores Químicos

Como foi dito, muito do desenvolvimento dos sensores químicos tem em vista a monitorização do ar, em especial a humidade nele existente. A monitorização e controlo da humidade são um fator chave para um grande número de indústrias tais como no processamento de químicos, comida, produtos farmacêuticos, eletrónicos e têxteis. É também feita a monitorização de humidade para o conforto e mesmo segurança das pessoas, quer no ambiente doméstico quer no ambiente industrial.

Existe uma grande variedade de técnicas para efetuar a medição da humidade, e dentro de todos os sensores, os que utilizam para a medição as propriedades elétricas, resistência e capacitância, são os mais fáceis de implementar e por essa razão o seu uso tem sido cada vez mais extenso. Em relação a sensores de humidade cerca de 75% dos existentes utilizam a técnica capacitiva [3].

Em geral, a resposta do sensor é analisada através do circuito elétrico equivalente de um condensador, C , e uma resistência, R , em paralelo, tal como pode ser visto na figura 2, o que permite realizar medições nas alterações dessas duas grandezas.

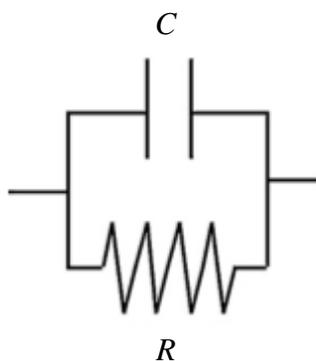


Figura 2 – Circuito elétrico equivalente

Como já foi mencionado os sensores químicos são muitas vezes utilizados para a monitorização ambiental. Um dos sistemas existentes, é um sistema designado por “Nariz Electrónico”(EnoseSystem). É utilizado, por exemplo, na medição da poluição,

na deteção de gases tóxicos que possam ser nocivos à saúde, bem como na indústria alimentar e cosmética para assegurar qualidade de processamento. São também utilizados na ciência forense e mesmo na área da saúde para a ajudar à realização de diagnósticos médicos.

ElectronicNoses, ou *e-noses*, não se apresentam tanto como um sensor ou instrumento mas mais como uma estratégia de medição. Tem-se tornado cada vez mais popular o seu uso, e combinam sensores inovadores e estratégias de conjuntos de sensores com técnicas de Quimiometria para produzirem uma vasta gama de instrumentos de análise.

Os *EnoseSystem* são constituídos por duas partes, os sensores resistivos de dois tipos, sensores de metal-óxido e sensores de polímero condutor, e os circuitos de interface. [5]

Em comparação com outros sistemas similares, nomeadamente o Cromatógrafo de Gás ou o Espetrómetro de Massa, os *EnoseSystem* possuem a vantagem de serem mais pequenos, logo de mais fácil transporte e bastante mais económicos.

Estes sistemas são utilizados nas situações apresentadas, bem como em muitas outras, onde é necessário a deteção de odor de uma forma muito mais eficaz do que a capacidade que o nariz humano é capaz de detetar. Através destes sistemas é possível, quase, duplicar a perceção e capacidade de deteção de odor dos humanos [4], e em alguns deles é possível também quantificar o odor, algo que o nariz humano é incapaz de fazer.

1.3 Organização e Estrutura da Dissertação

A presente Dissertação apresenta a seguinte estrutura de organização;

Capítulo 1 - Neste Capítulo são expostas as motivações e são apontados os objetivos do trabalho proposto. É feito um enquadramento sobre sensores e as suas utilidades para a vida quotidiana. Por último é descrita a estrutura e organização da presente dissertação

Capítulo 2 - É apresentada alguma da revisão literária que foi feita durante o percurso de elaboração desta dissertação, em que são apresentadas as grandezas que variam nos sensores resistivos e capacitivos, bem como algumas técnicas para realizar a sua medição

Capítulo 3 - Neste Capítulo é apresentada e detalhada a base desenvolvida para aquisição de dados de um sensor químico. É identificado o material utilizado e são descritos os circuitos e funcionamento das pontes resistiva e capacitiva e o andar de ganho e pré-amplificação. É também apresentado como foi gerado o sinal de *clock* e descrita a sua importância para este sistema.

Capítulo 4 - Neste Capítulo estão descritos os testes realizados para verificar o bom funcionamento do circuito implementado. São apresentados os testes e resultados efetuados às partes constituintes do circuito e que são fundamentais ao funcionamento correto do mesmo. Os testes que são apresentados, são os testes realizados ao sinal de *clock* aplicado a todos os blocos do circuito, às ligações e comunicação da placa Arduino com os amplificadores de ganho programável, os testes realizados às pontes resistiva e capacitiva, utilizando um potenciômetro e um conjunto de condensadores para simular o comportamento de um sensor resistivo e capacitivo, respetivamente, e é também apresentado um teste efetuado com um sensor de humidade.

Capítulo 5 - É feita uma conclusão acerca de todo trabalho elaborado, com base no estudo feito, na estrutura desenvolvida e implementada bem como nos teses a que foi submetida. É também feita uma conclusão sobre os resultados obtidos, bem como apontado um trabalho futuro para melhoramento do circuito.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste Capítulo é apresentada alguma da revisão literária que foi feita durante o percurso de elaboração desta dissertação. São apresentadas as grandezas que variam nos sensores químicos, bem como algumas técnicas para realizar a sua medição.

2.1 Sensores

Os sensores fazem a ponte entre o mundo real, analógico, e o mundo digital, que é o mundo dos computadores e das comunicações de hoje em dia. Com eles, é possível obter informação em tempo real acerca de várias coisas que se conseguem ver, ouvir, sentir, cheirar, e mesmo as que não se conseguem detetar com nenhum dos nossos sentidos. Pode definir-se um sensor como um dispositivo que responde a um estímulo físico/químico, de uma maneira específica e que pode ser medida e interpretada analogicamente [6]. Tratando-se de um sensor elétrico, essa resposta é obtida através de variações das suas grandezas elétricas, tais como resistência, capacitância, ou indutância. Existem vários tipos de sensores que podem ser divididos consoante o tipo de energia que analisam, tais como sensores de temperatura, pressão, luminosidade, velocidade, entre muitos outros como sensores químicos, que serão o foco de desenvolvimento desta dissertação, para realizar a sua leitura.

Um sensor químico é um dispositivo que fornece informação acerca do tipo, concentração e estado químico de uma determinada espécie presente numa amostra. Funcionam emitindo um sinal em resposta a um “evento/acontecimento”, como uma ligação entre duas moléculas. [6]

Os sensores químicos respondem, medindo e caracterizando, um estímulo produzido por produtos químicos ou reações químicas. Estes sensores tem como objetivo a identificação e quantificação de espécies químicas quer no estado líquido quer no estado gasoso. No estado sólido não é tão comum [4]. As suas áreas de utilização são diversas, desde a indústria, a medicina, o exército e mesmo em ambiente doméstico, entre outras, e um dos grandes focos de desenvolvimento é relativo à monitorização do ar ambiente, no controlo de humidade ou deteção de presença de gases tóxicos, por exemplo.

2.2 Sensores Analógicos *versus* Sensores Digitais

Existe uma extensa diversidade de sensores elétricos, e dentro dessa vasta gama, podem dividir-se em duas categorias, sensores analógicos e sensores digitais, que diferem no tipo de sinal em que se baseiam.

Os sensores digitais baseiam-se no sistema de funcionamento dos sistemas digitais ou seja, lógica binária. Lidam com níveis de tensão que são normalmente conhecidos como nível Alto (*High*) e nível Baixo (*Low*), ou “1” e “0” respetivamente. Estes níveis de tensão são bem definidos, e o sensor vai alternando os seus valores entre esses estados, não podendo variar entre valores intermédios.

Os sensores analógicos apresentam a sua resposta na forma de um sinal analógico, podendo portanto, ao contrário dos sensores digitais, apresentar valores intermédios entre dois valores de tensão, máximo e mínimo, valores esses que definem o intervalo de funcionamento do sensor. Este tipo de sensores são os mais comuns. Isto deve-se ao facto de que grande parte dos parâmetros que o sensor irá medir é analógica.

Os sensores analógicos são classificados em função do modo como realizam a resposta às variações a que são sujeitos. A resposta deste sensor é “lida”/obtida através de variações nas suas propriedades elétricas, tais como resistência, tensão, capacitância, entre outros.

No processo de revisão literário para esta dissertação foram apenas focados sensores analógicos em que as variações são em termos da resistência e da capacitância, isto é, sensores resistivos, e sensores capacitivos.

2.2.1 Sensores Resistivos *versus* Sensores Capacitivos

Como foi atrás mencionado, existem vários tipos de sensores analógicos, classificados segundo a grandeza que sofre variações no processo de medição de uma certa propriedade, dentro dos quais, sensores resistivos e sensores capacitivos.

Um sensor resistivo é um dispositivo que se comporta como uma resistência, mas devido à sua constituição, ou seja, às suas propriedades físicas ou químicas, como resposta a um sinal ou estímulo, o valor da sua resistência vai variando.

Os sensores capacitivos são dispositivos que em resposta a um sinal ou estímulo, variam a sua capacitância. Esta variação proporciona uma mudança na tensão ou na frequência do sinal de saída do sensor. Enquanto os sensores resistivos medem a resistência, estes sensores medem electronicamente a capacitância entre dois ou mais

condutores, normalmente no ar ou num líquido, ou seja, em ambientes isoladores de eletricidade, podendo ser úteis para medir propriedades de materiais. [7]

Os sensores resistivos e os capacitivos são muito úteis e muito utilizados para diversas situações onde é pretendido obter resposta a determinado acontecimento como por exemplo, medir a luminosidade numa via pública ou mesmo em ambiente doméstico para controlar as luzes para só acenderem quando fica noite. Também são utilizados para a monitorização do ar ambiente, quer no ambiente doméstico quer no industrial, para controlar a humidade existente, ou mesmo, níveis de gases tóxicos que são nocivos à saúde, entre muitas outras situações. Tal como foi dito, estes sensores, produzem na saída uma resposta a um determinado estímulo, e para essa resposta poder ser interpretada, é necessário usar conjuntamente com os sensores, circuitos que permitam encaminhar, ler e amplificar o sinal de saída, isto é, circuitos de interface. Existem vários tipos de circuitos para este fim, que através da resposta do sinal, condicionam esse sinal, de forma a se obter uma tensão que traduz as alterações das propriedades que o sensor está a medir.

2.3 Circuitos de interface com os sensores

Existe uma grande variedade de configurações de circuitos que permitem medir o valor, ou as variações de valor, de resistência e capacitância, e que conjugados com um sensor químico, resistivo ou capacitivo, formam uma “ferramenta” para medir variações de uma certa propriedade, tais como, a temperatura, humidade, luminosidade entre outros. Dentro dessas configurações existem o Divisor de Tensão, e os circuitos em ponte, tais como a Ponte Capacitiva e a Ponte de Wheatstone.

2.3.1 Divisor de Tensão

O valor da variação de uma resistência, como por exemplo uma resistência de temperatura, pode ser determinado com um circuito divisor de tensão, cujo esquema elétrico está representado na figura 3 e consiste em duas resistências ligadas em série, R_1 e R_2 , onde é aplicada uma tensão de entrada V_{in} .

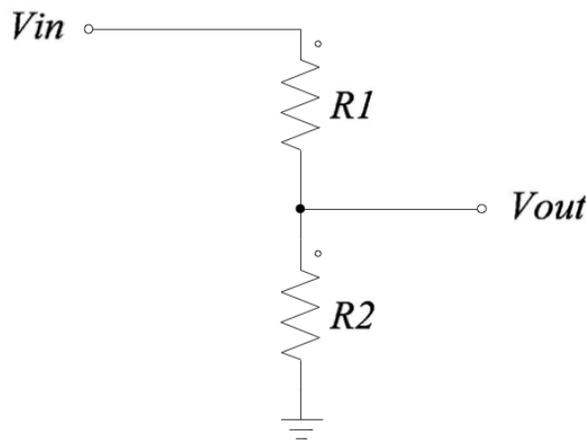


Figura 3 - Circuito Divisor de Tensão

A tensão de saída, representada por V_{out} , corresponde à tensão da resistência R_2 . O seu valor pode ser obtido através da seguinte equação [14]:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

Para explicar o funcionamento deste circuito vai ser utilizado o exemplo de uma resistência de temperatura, LDR (*Light Dependet Resistor*²). O LDR é um componente, em que o valor da sua resistência vai variando consoante a intensidade de luz que nele incide. Para poder refletir-se as variações da resistência numa tensão, e dessa forma, caracterizar as alterações na luminosidade, pode utilizar-se o circuito Divisor de Tensão.

Em relação ao circuito representado na figura 3, substitui-se a resistência R_1 pelo LDR. A resistência R_2 deve de ter valor fixo, valor esse que deve de estar entre o valor máximo e mínimo que o LDR pode tomar. Com este circuito obtém-se uma saída, V_{out} , que vai alterando o seu valor, consoante as alterações do valor da resistência do LDR. Na figura 4 que se segue, está representado o circuito para esta situação apresentada.

² <http://en.wikipedia.org/wiki/Photoresistor>

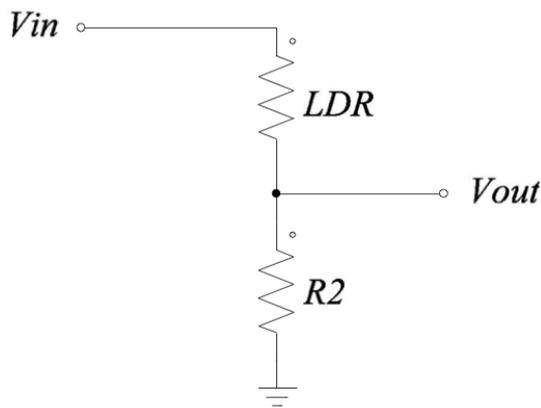


Figura 4 - Divisor de Tensão com LDR

O valor da resistência do LDR vai variando numa relação inversa à luz que nele incide, isto é, o valor da resistência vai diminuindo com o aumento da luz que nele incide, e vai aumentando à medida que fica exposto a menos luz. Desta forma, com esta montagem obtém-se um valor de saída V_{out} que reflete o aumento e diminuição da luminosidade num certo espaço.

O LDR não tem de ser ligado no lugar da resistência R_1 , em relação à figura 3, se por sua vez, se liga-se no lugar de R_2 , o circuito iria traduzir na mesma as variações de luminosidade no entanto, o processo seria contrário, isto é, V_{out} apresentaria valores mais baixos consoante a luminosidade fosse aumentando. Este tipo de circuitos podem ser utilizados, por exemplo, para o controlo da iluminação pública, ou mesmo doméstica, bem como em muitas outras situações, onde é utilizado um sensor resistivo para monitorizar determinado evento.

Esta montagem de circuito é muito simples, e bastante útil, quando não é preciso medir pequenas variações de valor de resistência, pois, não possui uma grande resolução, principalmente, quando comparado com outras tipologias de circuito, nomeadamente a Ponte Wheatstone, que irá ser apresentada de seguida. A falta de resolução para variações de resistência muito pequenas é a grande desvantagem dos divisores de tensão.

2.3.2 Circuitos em Ponte

Um circuito em ponte é constituído basicamente por um par de divisores de tensão onde a saída expressa a diferença de potencial entre os dois divisores de tensão [15]. O circuito elétrico pode ser desenhado segundo o esquema da figura 5 apresentado a seguir:

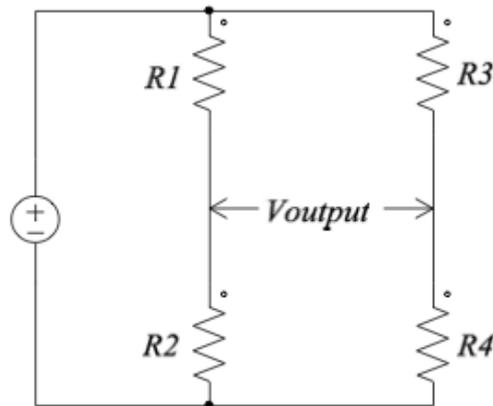


Figura 5 – Circuito em Ponte

Os componentes que compõem a ponte não tem de ser obrigatoriamente resistências, podem também ser sensores, por exemplo, entre outros, dependendo da aplicação a que se destina o circuito.

Os circuitos em ponte são normalmente utilizados como um elemento de conversão variável em sistemas de medida e, produzem uma saída sob a forma de tensão que varia mediante alterações no valor da quantidade física que é medida. É um método bastante preciso para medir valores de resistência, capacitância e indutância, e muito utilizado pois, muitos sensores, como os sensores químicos, que medem quantidades físicas têm saídas expressas pelas alterações destas grandezas elétricas e são capazes de medir alterações muito pequenas. Normalmente a alimentação da ponte é feita através de uma fonte de corrente contínua (CC) quando é pretendida a medição das alterações de valores de resistência, e por uma fonte em corrente alternada (AC) para medição de indutâncias ou capacitâncias. [8]

2.3.3 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone foi inventada por Samuel Hunter Christie³ em 1833, e posteriormente foi melhorada e popularizada em 1843 pelo físico Charles Wheatstone⁴.

Utiliza o conceito de medição da diferença de potencial entre dois pontos e pode ser usada para medir variações de resistência, capacitância, indutância, impedâncias e mesmo outras grandezas [9]. Trata-se de um método bastante preciso para realizar medições nas alterações de valores destas grandezas. A montagem do seu circuito elétrico pode ser observada na figura 6:

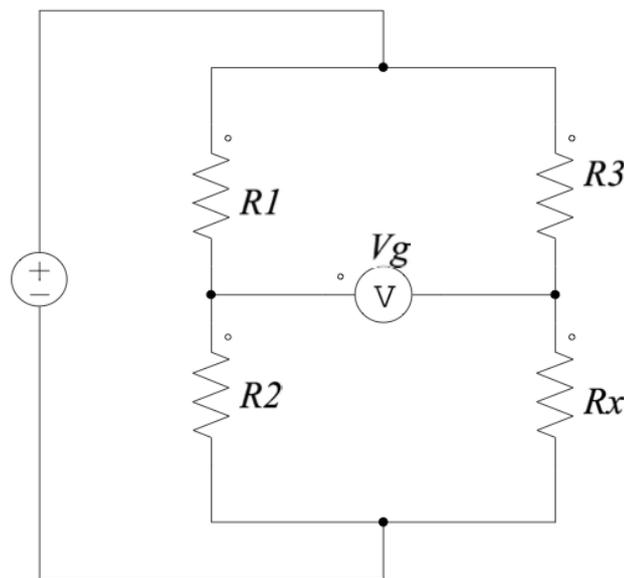


Figura 6 - Circuito de Ponte de Wheatstone

Na figura 6 acima está representada a montagem de um circuito em Ponte de Wheatstone. Este circuito é constituído por 4 braços onde se colocam os componentes, resistência ou impedâncias, e uma alimentação de corrente contínua ou alternada consoante a grandeza que se pretende medir. A resistência ou impedância que se quer medir é colocada num dos braços do circuito, na Figura 6 está representada por R_x , nos outros braços são colocados componentes de natureza idêntica à impedância que se quer medir mas de valor conhecido.

³ Samuel Hunter Christie nasceu a 22 de Março de 1784, foi um matemático, físico e astrónomo britânico, e o seu principal interesse foi o magnetismo.

⁴ Sir Charles Wheatstone físico Britânico, nasceu a 6 de Fevereiro de 1802 em Gloucester, e faleceu em Paris a 19 de Outubro de 1875

Para realizar a medição utiliza um método por comparação, ou seja, a grandeza a medir é comparada com outra grandeza da mesma natureza e com valor conhecido. Existem vários exemplos de métodos de comparação, tais como método de substituição, diferencial e zero [10].

No método de substituição, a grandeza que se pretende medir vai sendo substituída por outra da mesma natureza até que se registre os mesmos valores no aparelho de medida. A figura 7 apresenta o circuito elétrico para utilização deste método na medição de uma resistência.

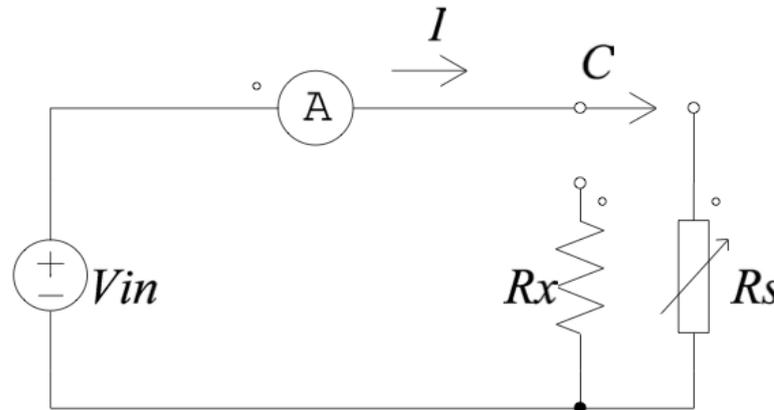


Figura 7 - Método de Substituição

Para realizar a medição primeiro liga-se o comutador C à resistência R_x , cujo valor é o que se pretende medir, e é registado o valor da corrente, I , com o auxílio de um amperímetro, na figura representado por A . Posteriormente, liga-se o comutador C à resistência variável R_s , e esta vai sendo variada até obter-se uma leitura de corrente igual à medida de quando estava ligado a R_x . Ao obter-se um valor de corrente igual, indica que o valor da resistência R_x tem o mesmo valor que R_s , sendo então esse o valor da resistência que se pretendia medir.

O método diferencial consiste em calcular a diferença entre a grandeza que se pretende medir com outra grandeza da mesma natureza mas com valor conhecido.

A ponte de Wheatstone, representada na figura 6, utiliza o método zero. Neste método a medição é registada quando se verifica uma condição nula, isto é, quando através de um instrumento de medição, como por exemplo um multímetro, é verificado o valor de tensão de 0 V entre dois nós da ponte, na figura $V_g = 0\text{ V}$. Nesta condição, tensão $V_g = 0\text{ V}$, diz-se que a ponte está em equilíbrio ou balanceada, e as seguintes condições são verificadas:

$$R_1 R_x = R_2 R_3 \text{ e } V_a - V_b = V_0 = 0$$

Nesta situação o valor da resistência R_x , ou seja do sensor, é facilmente calculado recorrendo à seguinte equação:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Qualquer alteração provocada por um desequilíbrio resistivo, ou seja, alterações no valor das resistências R_1 , R_2 , R_3 e R_x , é refletida na tensão de saída V_{out} . Pequenas variações nos valores das resistências colocam a ponte numa situação de não equilíbrio originando portanto uma diferença de potencial não nula [10]. Nesta situação, com a ponte não equilibrada, é possível converter uma variação de uma resistência numa variação de tensão. Por esta razão, uma aplicação em que se usa este tipo de configuração em ponte é para converter o sinal de saída de um sensor elétrico em tensão de maneira a representar a medição física que está a fazer.

Tendo em conta a figura 6, em que R_x representa um sensor resistivo (R_{sensor}), a ponte apenas estará em equilíbrio para um certo valor de R_{sensor} . Por essa razão maior parte das vezes a ponte estará não equilibrada, pois o valor de R_{sensor} irá estar a variar consoante as alterações nas propriedades que está a detetar, e a tensão de saída irá também variar mediante as alterações do valor da resistência do sensor, tornando assim a tensão de saída um reflexo da condição do sensor físico a cada instante.

Este circuito em ponte descrito é um instrumento de medição bastante utilizado para ler o sinal de um sensor. Dá a possibilidade de medir variações de resistência ou mesmo capacitância entre outros, e é capaz de detetar pequenas variações em qualquer uma das grandezas elétricas, ao contrário do divisor de tensão. Devido à sua fácil implementação e utilização, bem como à sua boa resolução, esta montagem em ponte, é um elemento essencial e muitas vezes utilizado para acondicionamento de sinal de um sensor químico.

2.3.4 Ponte Capacitiva

Os métodos para realizar medições de capacitância de uma maneira mais precisa são através de circuitos em ponte com alimentação em corrente alternada, tal como a Ponte de Wheatstone já referida, ou a Ponte Capacitiva que irá ser descrita à frente. No entanto se apenas se precisar de uma medição aproximada, existem alguns métodos

mais simples como o caso da montagem de um condensador em série com uma resistência [8] como ilustra a figura 8:

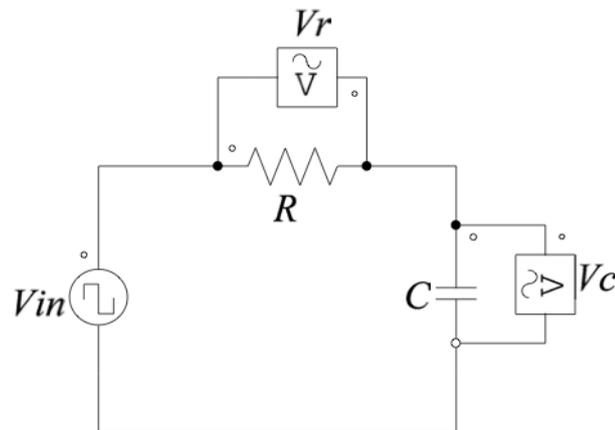


Figura 8 – Circuito para medição de uma capacitância

Em relação à montagem do circuito da figura 8, o valor do condensador é desconhecido e o valor da resistência é conhecido. O circuito é alimentado por uma tensão em corrente alternada com valor conhecido da sua frequência.

Com o auxílio de um voltímetro mede-se a queda de tensão na resistência e no condensador. O valor da capacitância que se pretende saber é depois calculado pela seguinte equação:

$$C = \frac{V_r}{2\pi f R V_c}$$

Onde V_R e V_C são os valores da queda de tensão medidos com o voltímetro na resistência e no condensador. R é o valor da resistência e f é a frequência da tensão de alimentação.

É um método possível para dar o valor de um condensador, mas, para ser usado num circuito para ler o sinal de um sensor, não é muito apropriado visto que não possui uma saída de forma a refletir as alterações do valor do condensador como alteração da propriedade física que este está a medir.

Para obter-se uma medição mais precisa, e cuja saída é sob a forma de variações de tensão, existem outras configurações de pontes alimentadas por uma tensão de corrente alternada, para além da Ponte Wheatstone apresentada na secção anterior, como o caso da Ponte Capacitiva, cujo circuito está representado na figura 9. [7]

Este circuito é constituído por 2 condensadores e um amplificador numa montagem inversora com realimentação capacitiva. Aos dois condensadores, C_1 e C_2 , é

aplicada uma tensão em corrente alternada, sendo que a um é aplicado V , neste caso a C_1 , e a C_2 é aplicado $-V$, isto é, a C_2 é aplicada a mesma tensão que a C_1 mas simétrica.

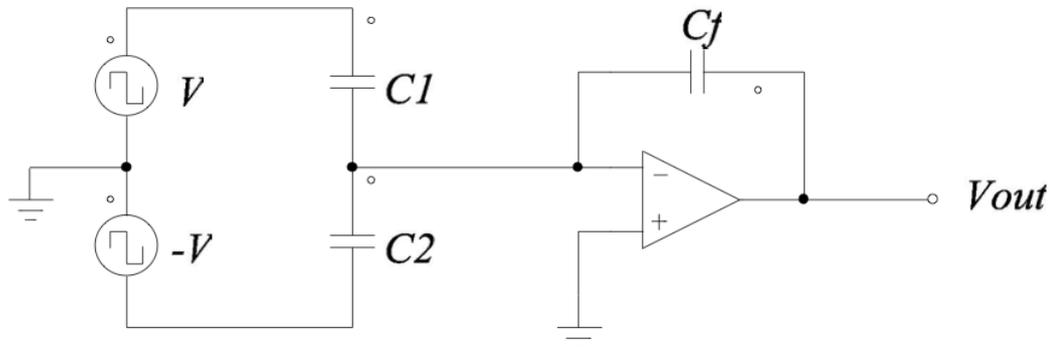


Figura 9 - Ponte Capacitiva

Esta alimentação simétrica dos condensadores é umas das peças fundamentais para o funcionamento deste circuito pois desta forma, quando C_1 está a carregar, C_2 está a descarregar, e vice-versa, sendo assim refletida na entrada do amplificador a diferença de capacitância entre os dois condensadores.

Em relação a este circuito da figura 9, pode-se obter uma condição que dá o valor de V_{out} , sendo este expresso pela seguinte equação;

$$V_{out} = -V \frac{C_1 - C_2}{C_f}$$

Para esta equação ser precisa, o ganho do amplificador deverá ser alto. Qualquer capacitância parasita na entrada do amplificador não afeta a tensão de saída, mas reduz o ganho disponível do amplificador para altas frequências, portanto, estas devem ser minimizadas. Para o equilíbrio da ponte ser estável C_1 e C_2 devem ser idênticos ao nível da construção [7].

Capítulo 3

Implementação

Neste Capítulo é apresentada e detalhada a base desenvolvida para aquisição de dados de um sensor químico. É identificado o material utilizado, e são descritos os circuitos e funcionamento das pontes resistiva e capacitiva e o andar de ganho e pré-amplificação. É também apresentado como foi gerado o sinal de *clock* e descrita a sua importância para este sistema.

3.1 Descrição da Estrutura do Circuito

Como foi mencionado no Capítulo 1, esta dissertação tem como objetivo implementar um circuito que faça a leitura de um sinal adquirido por um sensor químico. É pretendido que o circuito seja capaz de analisar o sinal proveniente quer de sensores baseados na técnica resistiva bem como na técnica capacitiva, ou seja, sensores resistivos e sensores capacitivos, pois grande parte dos sensores químicos baseiam-se nestas duas técnicas [3].

A estrutura do circuito [11] que foi desenvolvida pode ser observada no seguinte diagrama de blocos da figura 10 onde é descrita a constituição de todas as partes que formam o circuito para leitura de um sensor.

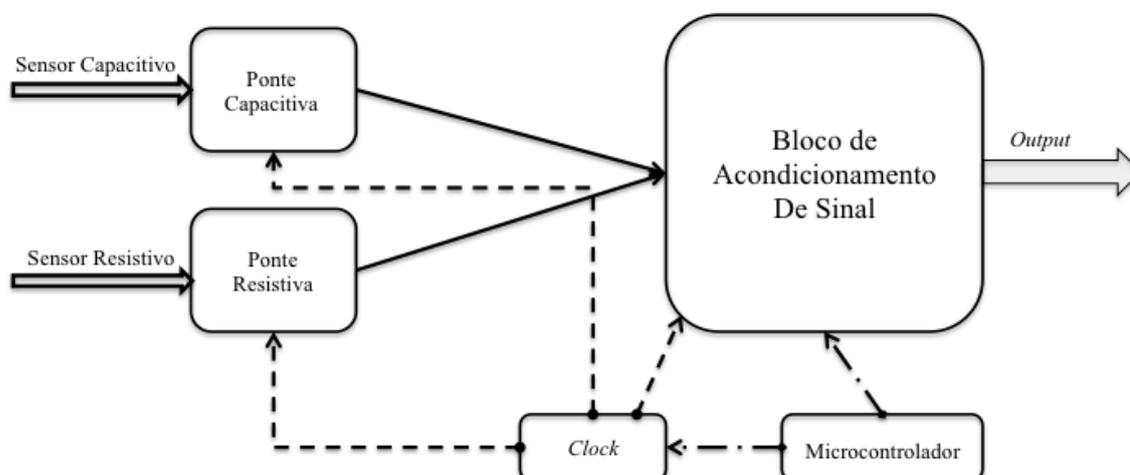


Figura 10 - Diagrama de Blocos do Circuito de Leitura

O diagrama da figura 10 apresenta a estrutura adotada, que tem como característica principal, a partilha de quase todos os blocos que constituem o circuito.

É composto por duas pontes, uma resistiva e uma capacitiva, para a aquisição de sinal de sensores resistivos e sensores capacitivos. Existe depois um bloco de acondicionamento de sinal, composto pelos andares de pré-amplificação e de ganho. Possui ainda um microcontrolador que irá controlar os Amplificadores de Ganho Programável (PGA) e gerar o sinal de *clock*, que é uma das partes fundamentais para o processo de leitura do sinal. Este sinal de *clock* é aplicado a todos os andares do circuito. É aplicado na ponte resistiva e capacitiva e no andar de pré-amplificação e de ganho.

Apenas os blocos da ponte composta por resistências passivas e elementos capacitivos para converter diferentes entradas num sinal uniforme são diferentes para as entradas resistivas e capacitivas. As pontes resistiva e capacitiva alimentam o bloco de acondicionamento de sinal composto pelo andar de pré-amplificação que controla o andar de ganho programável.

3.2 Material Utilizado

Para a implementação do circuito da estrutura apresentada na secção anterior foi utilizado o seguinte material;

- Resistências variáveis (potenciómetros) com valor de 100k Ω ;
- Amplificadores de Ganho Programável (PGA), mais especificamente – LTC6915;
- Condensadores;
- *Switch*, mais especificamente - IDTQS3245;
- Uma tensão de corrente contínua de 5 V para alimentação da ponte resistiva;
- Tensões de -5 V e 5 V para alimentação dos amplificadores.

Foi também utilizado um microcontrolador, *Arduino Uno* - “*ATmega328*”. Este microcontrolador é utilizado para realizar a comunicação com os PGA, para definir o seu ganho. Esta comunicação é feita através do protocolo SPI. O microcontrolador é utilizado também para gerar o importante sinal de *clock*, elemento fundamental durante o processo de aquisição de sinal do sensor pelo circuito, pois vai ser este sinal que vai controlar os interruptores para o processo de leitura e aquisição de sinal. Este

microcontrolador possui 3 *timers*, dois de 8-bit, Timer0 e Timer2, e um de 16-bit, Timer1.

3.3 Andar de Pré-Amplificação e de Ganho

Os andares de pré-amplificação e de ganho formam o bloco de acondicionamento de sinal e são partilhados pela ponte resistiva e pela ponte capacitiva. São compostos por 2 andares de condensadores comutados, como pode ser observado na seguinte figura 11 que representa o seu esquema elétrico.

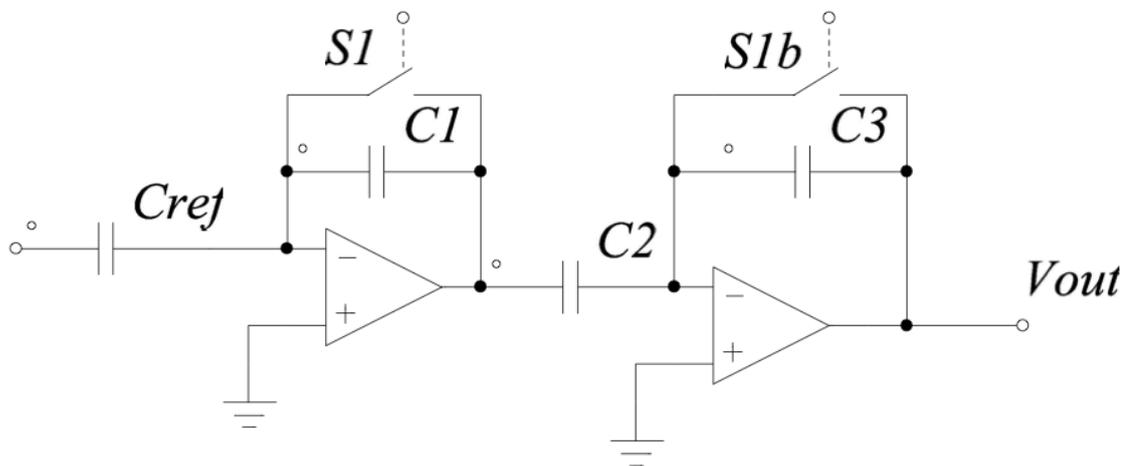


Figura 11 - Andar de Pré-Amplificação e de Ganho

O bloco de acondicionamento de sinal é constituído da seguinte maneira, tem um andar de pré-amplificação, composto por um amplificador numa montagem inversora com realimentação capacitiva através do condensador C_1 , e um andar de ganho, igualmente composto por um amplificador numa montagem inversora com realimentação capacitiva através do condensador C_3 . Os amplificadores utilizados na implementação deste circuito foram Amplificadores de Ganho Programável (PGA), controlados pela placa *ArduinoUno* através da ligação SPI⁵. Estes 2 andares funcionam em modo sequencial, por essa razão o circuito possui ainda o condensador C_2 que armazena a tensão do andar de pré-amplificação durante a fase de transição.

Estes 2 andares são partilhados pela ponte resistiva e pela ponte capacitiva através do componente C_{ref} . Este componente é fundamental no processo de conversão

⁵ Protocolo que permite comunicação de um microcontrolador com diversos componentes - http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus

da tensão da ponte resistiva em carga, pois só existindo esta conversão é possível as duas pontes partilharem os andares de pré-amplificação e de ganho. Este processo é descrito numa secção à frente, onde é detalhada a ponte resistiva.

Como foi dito anteriormente os 2 andares funcionam em modo sequencial. Para tal, é necessário um sinal de *clock* que controle os interruptores S_1 e S_{1b} de modo a que estes liguem e desliguem em sequência. Foi implementado um *clock* composto por 2 sinais complementares que não se sobrepõem, são sinais idênticos mas o inverso um do outro como pode ser visto na figura 12, onde está ilustrado o diagrama do sinal de *clock*. Este sinal foi gerado com a placa ArduinoUno, como é explicado numa secção à frente.

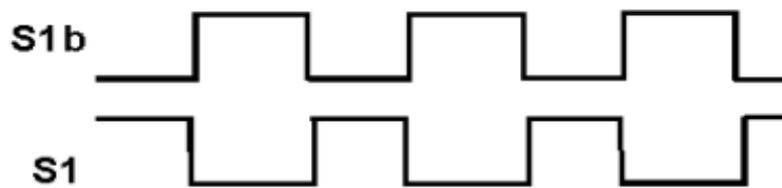


Figura 12 - Diagrama Sinal Clock

Para analisar o funcionamento deste circuito pode-se dividi-lo no andar de pré-amplificação e andar de ganho.

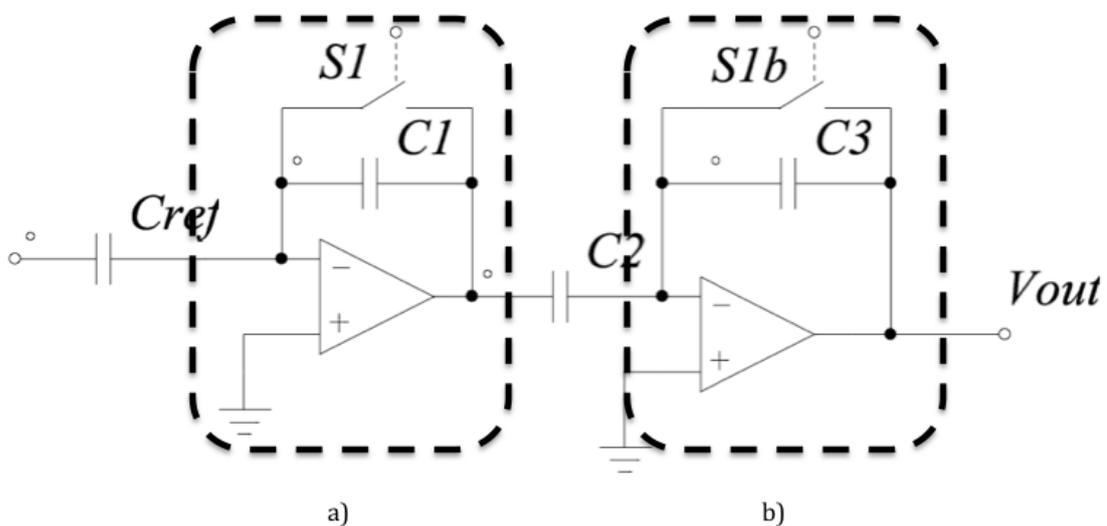


Figura 13 - a) Andar de Pré-Amplificação b) Andar de Ganho

Em cada ciclo de relógio o andar de pré-amplificação passa por duas fases, fase de *Reset* e fase de Trabalho.

Quando S_1 está a ‘alto’, interruptor ligado, e S_{1b} a ‘baixo’, interruptor desligado, o andar está na sua fase de *Reset*, ou seja, C_1 está curto-circuitado pelo interruptor S_1 .

Quando está ζ_a ‘baixo e ζ_b a ‘alto’ está na fase de trabalho, e a carga que é introduzida neste andar, isto é, a tensão que C_{ref} tem armazenada, é carregada em C_1 , e a tensão de saída do pré-amplificador é a queda de tensão em C_1 . Esta tensão de saída é carregada no condensador C_2 , e quando ζ_1 transita de baixo para alto, ζ_b transita de alto para baixo, essa tensão é transferida para C_3 , sendo esta a tensão de saída do andar de ganho.

Como já foi dito anteriormente o sinal de relógio é um dos elementos fundamentais dos circuitos que formam esta base que faz a aquisição de sinal de um sensor. Em relação a estes dois andares, como foi visto, os dois sinais de *clock* complementares são aplicados nos 2 andares consecutivos de condensadores comutados para fazerem o *reset* ao andar de pré-amplificação e de ganho em sequência. Na fase de relógio com ζ_1 a ‘baixo’ e ζ_b a ‘alto’ C_2 amostra a saída do andar de pré-amplificação. Na outra fase, ζ_1 a ‘alto’ e ζ_b a ‘baixo’, a carga armazenada em C_2 é transferida para C_3 , passando a ser a tensão de saída do andar de ganho e é mantida enquanto ζ_1 estiver a ‘alto’. Esta tensão V_{out} , é a tensão de saída do circuito de leitura que representa a resposta do sensor a um estímulo que sofre.

3.4 Ponte Capacitiva

A figura 14 que se segue representa o circuito da ponte capacitiva responsável pela medição da capacitância de um sensor capacitivo.

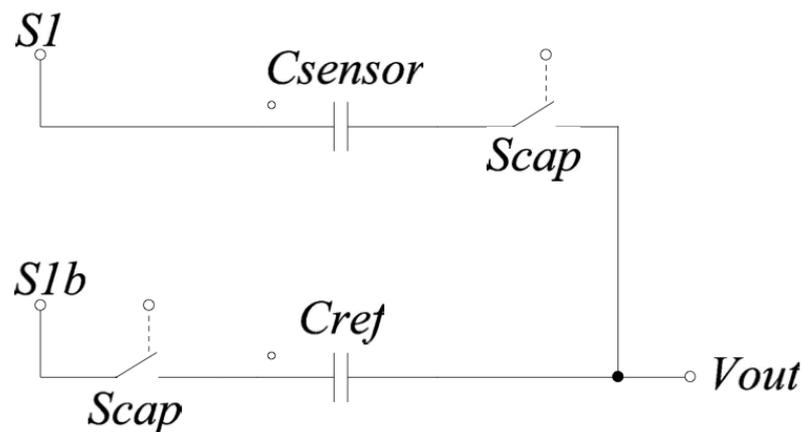


Figura 14 – Circuito da Ponte Capacitiva

No circuito da figura 14, C_{sensor} representa o sensor capacitivo e C_{ref} o condensador de referência utilizado para a medição capacitiva. S_{cap} é um interruptor que habilita e desabilita o modo de leitura capacitiva no circuito. S_1 e S_b representam interruptores controlados pelos sinais de *clock* complementares.

Para o processo de leitura capacitiva é primeiramente habilitado esse modo através do interruptor S_{cap} . Ao ser ligado o interruptor, um dos lados do sensor capacitivo fica ligado ao condensador de referência, C_{ref} . O outro lado do C_{sensor} fica ligado a S_1 , e o outro de C_{ref} fica ligado a S_b . Durante a medição, quando S_1 transita de alto, interruptor ligado, para baixo, interruptor desligado, a carga de C_{sensor} é absorvida por C_{ref} , pois S_b é o inverso de S_1 .

Se a ponte estiver equilibrada, isto é $C_{sensor} = C_{ref}$, toda a carga é absorvida caso contrário há um excesso de carga, e é este excesso de carga que é “introduzido” no bloco de acondicionamento de sinal, mais especificamente no andar de pré-amplificação.

Em vez de tentar forçar a ponte a equilibrar, que é quase impossível, este circuito utiliza um novo método que não requer uma ponte equilibrada. A carga em excesso é usada para aumentar a resolução [11].

Como pode ser visto no diagrama da figura 10 que representa a estrutura do circuito de leitura, a ponte capacitiva é sucedida de um bloco de acondicionamento de sinal, composto pelo andar de pré-amplificação e de ganho, cujo funcionamento foi descrito na secção anterior.

3.5 Ponte Resistiva

A ponte resistiva para adquirir o sinal proveniente do sensor resistivo é baseada na ponte de Wheatstone. O esquema do seu circuito elétrico é representado pela figura 15.

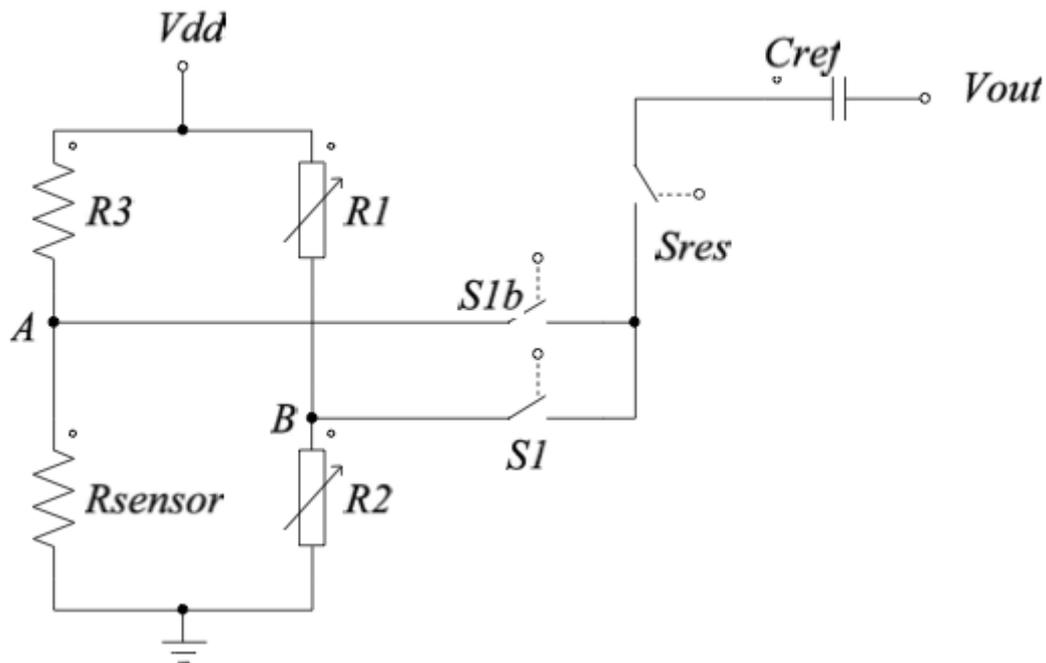


Figura 15–Circuito da Ponte Resistiva

No esquema elétrico da figura 15, R_{sensor} representa o sensor resistivo, R_1 e R_2 são resistências ajustáveis, potenciômetros, que neste caso tem o valor de $100\text{k}\ \Omega$ e R_3 é uma resistência de valor fixo de $100\text{k}\ \Omega$. V_{dd} representa a alimentação da ponte onde foi aplicada uma tensão de corrente contínua de 5 V. S_{res} representa um interruptor que habilita e desabilita a medição resistiva do circuito. S_1 e S_{1b} , são interruptores controlados pelo sinal de *clock* que irá ser descrito na secção seguinte.

Para o processo de medição resistivo começa-se por o ativar através do interruptor S_{res} . As resistências R_1 e R_2 são ajustadas de forma a minimizar a diferença de potencial entre os pontos A e B. Com o auxílio de multímetro, varia-se o seu valor de forma a obter uma tensão de aproximadamente 0 V.

Para ser possível a entrada resistiva e a entrada capacitiva partilharem o mesmo andar de pré-amplificação e de ganho, é necessário converter a tensão de saída da ponte resistiva em carga, para tal ambas partilham o componente C_{ref} , componente esse que é peça fundamental para este processo de conversão.

O processo que converte a tensão da ponte resistiva em carga ocorre da seguinte maneira; quando S_1 está a alto, interruptor ligado, o andar de pré-amplificação está na sua fase de *reset* e C_{ref} fica ligado ao braço de referência da ponte resistiva, o nó B, figura 15. Quando S_1 transita para baixo, S_{1b} transita para alto, e C_{ref} passa a estar

ligado ao nó A da ponte, neste momento o andar de pré-amplificação está na fase de trabalho, qualquer diferença de tensão na ponte é convertida em excesso de carga, positiva ou negativa, em C_{ref} , que de seguida, na próxima transição do sinal de *clock*, produz uma tensão na saída no andar de pré-amplificação [11].

Após o equilíbrio da ponte, isto é, após de se terem ajustadas as resistências R_1 e R_2 de forma a obter uma tensão de aproximadamente 0 V entre os nós A e B, qualquer diferença de tensão verificada entre estes dois pontos será devido a variações no valor da resistência do sensor, R_{sensor} . Esta diferença de tensão que é convertida em carga e aplicada ao andar de pré-amplificação e por sua vez ao andar de ganho, irá representar a resposta do sensor resistivo a um certo estímulo, isto é, às variações da propriedade física para a qual o sensor foi desenvolvido para ser sensível.

3.6 ArduinoUno – Microcontrolador

Além da parte analógica dos circuitos que constituem o circuito da base que faz a aquisição de sinal de um sensor químico já apresentada, existe ainda mais um componente fundamental para este processo. Esse componente é um microcontrolador que serve para definir o ganho dos amplificadores programáveis e também para gerar o importante sinal de *clock* aplicado a todas as partes da estrutura. O microcontrolador utilizado foi o ATmega328 presente na placa *Arduino Uno*. Algumas das suas características foram apresentadas numa secção anterior.

3.6.1 Sinal de *Clock*

Como foi dito anteriormente, o sinal de *clock* é um dos elementos fulcrais para o processo de aquisição de sinal do sensor nesta estrutura desenvolvida. O sinal é aplicado em ambas as pontes, resistiva e capacitiva, bem como nos andares de pré-amplificação e de ganho.

Este sinal é formado por 2 sinais complementares iguais mas em que um é o inverso do outro, o espelho, ou seja, quando um está com nível lógico ‘1’ ou a ‘alto’, o outro está a um nível lógico ‘0’ ou a ‘baixo’.

Para gerar estes dois sinais foi utilizado o microcontrolador “Arduino Uno”, uma placa baseada no ATmega328. Possui 3 Timer’s, dois de 8-bit, Timer0 e Timer2 e um de 16-bit, Timer1. O Timer utilizado foi o Timer0 de 8-bit que tem uma resolução de

256. Sendo que o microcontrolador possui um cristal de 16 MHz, significa que o Timer permite uma frequência máxima de 62,5 KHz.

Para programar o Timer0 de modo a gerar os dois sinais pretendidos, é necessário realizar as seguintes configurações, consultando para tal o *datasheet* do microcontrolador ATmega326 [13];

- As saídas de sinal do Timer0 são os pinos 5 e 6. Como é pretendido gerar dois sinais, são declarados esses dois pinos como saídas através das seguintes condições;

DDRD |= (1 << PORTD5);

DDRD |= (1 << PORTD6);

- Os dois sinais pretendidos, que formam o sinal de *clock* a aplicar ao circuito de leitura, são no fundo duas ondas quadradas com *Duty-Cycle*⁶ de 50%, por isso é preciso definir esse *Duty-Cycle*. Como a resolução é de 256, define-se a parte ‘alta’ com 128 e a parte ‘baixa’ igualmente com 128, fazendo assim, com que a onda esteja metade do tempo a ‘alto’ e a outra metade a ‘baixo’, por outras palavras, um *Duty-Cycle* de 50%. Estes limites são definidos através destas duas linhas de código;

OCR0A=128;

OCR0B=128;

- Para o Timer0 gerar um sinal com as especificações pretendidas, isto é, dois sinais idênticos, mesma frequência mas simétricos, é preciso configurá-lo utilizando dois registos de controlo, o registo TCCR0A, e o registo TCCR0B. Os bits constituintes de ambos os registos podem ser visto nas duas figuras que se seguem.

TCCR0A – Registo A do controlo do timer;

COM0A1	COM0A0	COM0B1	COM0B0	-	-	WGM01	WGM00
---------------	---------------	---------------	---------------	---	---	--------------	--------------

Figura 16 - Registo de Controlo A do Timer0

⁶ Percentagem de tempo que um sistema está na fase ativa.

TCCR0B – Registo B do controlo do timer;

FOC0A	FOC0B	-	-	WGM02	CS02	CS01	CS00
--------------	--------------	---	---	--------------	-------------	-------------	-------------

Figura 17 - Registo de Controlo B do Timer0

Através destes 2 registos, ativando ou desativando certos bits, ou seja, colocando-os a ‘1’ ou ‘0’, configura-se o *Timer* para gerar os sinais pretendidos. Neste caso é configurado para gerar dois sinais, um invertido e outro não, desse modo são gerados 2 sinais em que um é o simétrico do outro. As seguintes linhas de código exemplificam a configuração das especificações pretendidas;

TCCR0A=0b10110011;

TCCR0B=0b00000100;

Com o auxílio do osciloscópio é possível verificar que são gerados os dois sinais pretendidos, ou seja, dois sinais de frequência igual mas simétricos um do outro. No Capítulo seguinte em que são descritos e apresentados os testes e resultados efetuados, é possível visualizar os sinais gerados. Este sinal de *clock* vai controlar a abertura ou fecho dos interruptores, processo esse fundamental para o circuito. Os *switchs* utilizados fornecem cada um até um máximo de 8 interruptores que são ativados todos por igual consoante o sinal que lhe é aplicado [16]. A um dos *switch* é aplicado o sinal \mathfrak{S} e ao outro o sinal \mathfrak{S}_b .

3.6.2 Controlo dos Amplificadores de Ganho Programável

Nos andares de pré-amplificação e de ganho são utilizados 2 amplificadores de ganho programável (PGA), ganho esse definido através do microcontrolador. Os amplificadores usados (LTC6915) fazem a comunicação com o microcontrolador através do interface série/paralelo. O interface SPI é um protocolo que permite a comunicação entre um microcontrolador e outros componentes, podendo mesmo ser outro microcontrolador. Neste protocolo existem dois modos, o modo *Slave* (escravo) e o modo *Master* (mestre). Neste caso é pretendido que o microcontrolador controle o PGA, por isso o microcontrolador será o *Master* e o amplificador o *Slave*.

A placa *Arduino Uno* já possui uma biblioteca dedicada à comunicação SPI com funções próprias, e para as usar apenas é preciso incluir no código a biblioteca “**SPI.h**”.

Toda a configuração da comunicação SPI é feita recorrendo à definição dos seguintes parâmetros;

- É necessário configurar e declarar como saída os pinos que realizam a ligação física entre o microcontrolador e o amplificador que são fulcrais para toda a comunicação. Para tal é declarado como saída o pino 11, que corresponde à linha dedicada para envio de dados por parte do *Master* para o *Slave*, e o pino 13, que corresponde à linha de *clock* para sincronização de transmissão dos dados enviados pelo *Master*.
São ainda declarados como saída os pinos 9 e 10 que servem para o *Master* comunicar com cada um dos amplificadores pretendidos. É declarado o pino 9 para a comunicação com o amplificador do andar de pré-amplificação, e o pino 10 para a comunicação com o amplificador do andar de ganho.
- Para a configuração da comunicação SPI, o microcontrolador possui um registo de controlo que pode ser visto na figura que se segue.

SPCR – Registo de controlo da interface série paralelo

SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0
------	-----	------	------	------	------	------	------

Figura 18 - Registo de Controlo da interface série/paralelo

Através deste registo habilita-se a comunicação SPI e configura-se no modo *Master*. Define-se também que os dados são enviados na forma ascendente, ou seja, nas transições de ‘baixo’ para ‘alto’. Esta configuração é feita através das seguintes linha de código que coloca a ‘1’ os bits referentes à configuração desejada;

$$\mathbf{SPCR = (1 \ll \text{SPE}) | (1 \ll \text{MSTR}) | (1 \ll \text{CPOL}) | (1 \ll \text{CPHA});}$$

- O valor do ganho do amplificador é definido através do envio de um número binário pelo microcontrolador. Consultando o *datasheet* [12] do fabricante do PGA, é possível verificar que os valores de ganhos já estão atribuídos a certos números binários, isto é, ao enviar, por exemplo, o número binário ‘0010’, o PGA fica definido com ganho de ‘2’, ou ainda se enviar o número ‘0011’, o ganho fica definido com o sendo ‘4’. O ganho deste amplificador pode ser programado para ‘0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 ou 4096’.

Este valor binário que define o ganho é enviado através da função “**SPI.transfer**”, função essa que pertence à biblioteca “**SPI.h**”.

Na configuração do modo da comunicação é especificado que os dados são enviados durante a transição ascendente, de ‘baixo, para ‘alto’, algo que tem de ser tomado em consideração na implementação desta função. Por esse motivo é necessário primeiro colocar a ‘LOW’ o pino de envio de dados e posteriormente voltá-lo a colocar a ‘HIGH’.

As linhas de código que fazem o envio dos dados para definir um ganho no PGA, neste caso exemplificado a seguir de 2, são as seguintes;

```
digitalWrite(10,LOW);  
SPI.transfer(0b0010);  
digitalWrite(10,HIGH);
```

Todo este processo é idêntico para a configuração de ganho em ambos os amplificadores de ganho programável utilizados, é apenas necessário utilizar 2 pinos para envio de dados, um para cada um dos PGA, os pinos 10 e 9. Os pinos 11 e 13, que dizem respeito à linha dedicada para envio de dados do *Master* e sinal de *clock* para sincronização da transmissão, são partilhados pelos 2 componentes.

Após a configuração da comunicação, na parte do microcontrolador, as ligações que são necessárias entre a placa Arduino e os PGA para a realização do controlo do amplificador, podem ser consultadas no Capítulo 4 em que são apresentados os testes efetuados e resultados obtidos.

3.7 Base Final

Na figura 19 está representado o esquema do circuito implementado. Como é possível ver possui duas pontes de leitura, uma ponte resistiva e outra capacitiva. R_{sensor} e C_{sensor} representam os sensores resistivos e capacitivos, respetivamente, que se pretendem medir. A ponte resistiva possui ainda mais uma resistência, R_3 , de valor fixo e duas resistências variáveis, R_1 e R_2 , para ajustar o equilíbrio da ponte. A esta ponte é aplicada uma tensão de corrente contínua de 5 V. A ponte capacitiva é alimentada pelos dois sinais complementares implementados.

Os interruptores S_{res} e S_{cap} , habilitam e desabilitam os modos de leitura resistivo e capacitivo, respetivamente. Os restantes interruptores indicados no esquema, são controlados pelo sinal de *clock*, composto por dois sinais complementares, S_1 e S_{1b} .

Aos amplificadores é aplicada uma tensão de alimentação de -5 V e 5 V, e estes são controlados pela placa Arduino Uno.

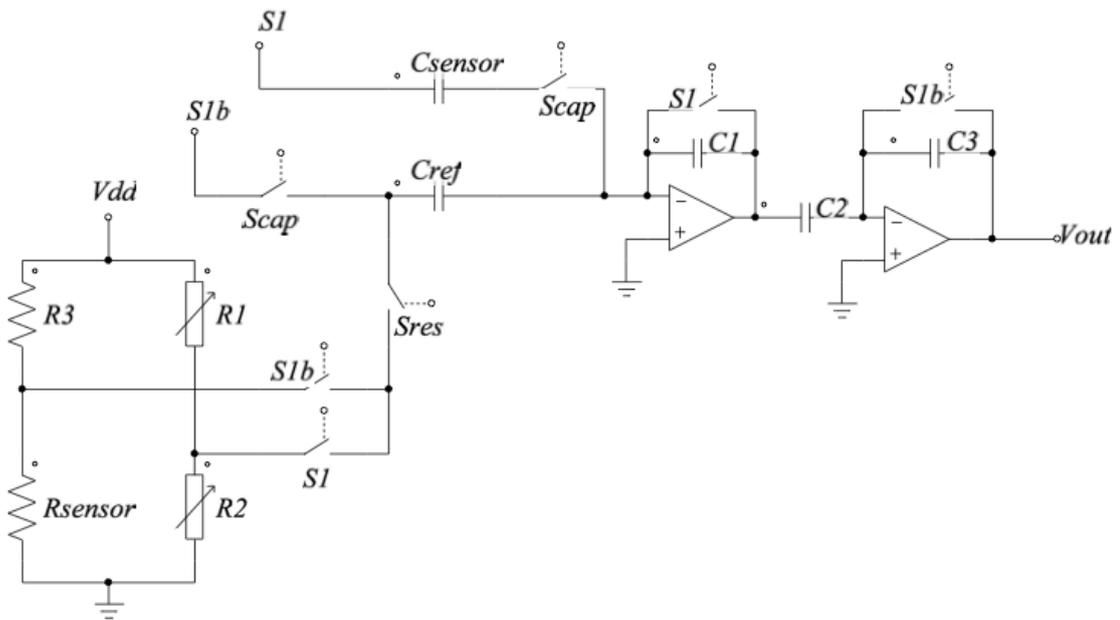


Figura 19 - Esquema do circuito implementado

Capítulo 4

Testes e Resultados

Neste Capítulo são descritos os testes realizados para verificar o bom funcionamento do circuito implementado. São apresentados os testes e resultados efetuados; ao Sinal de *clock*, à ligação da placa Arduino com os PGA's, às pontes resistiva e capacitiva, com sensores simulados, e um teste efetuado com um sensor de humidade.

4.1 Testes Sinal *Clock*

Como já foi explicado no Capítulo anterior, o sinal de *clock* é uma peça fundamental para o processo de aquisição do sinal proveniente do sensor. Este sinal é constituído por 2 sinais complementares de frequência igual mas simétricos um do outro, e é aplicado a todos os blocos constituintes do circuito, pontes capacitiva e resistiva e bloco de acondicionamento de sinal. Este sinal é gerado a partir da placa Arduino, programando o *timer* do microcontrolador com recurso às configurações igualmente apresentadas no Capítulo 3.

Após a configuração do *timer* para gerar os dois sinais é possível alterar o valor da frequência. Para tal, basta altear os bits **CS02**, **CS01**, **CS00**, do registo TCCR0B. Na tabela 1 podem ver-se as possíveis configurações que geram diferentes valores de frequência.

Tabela 1 - Seleção da Frequência do *timer*

CS02	CS01	CS00	Frequência (Hz)
0	0	1	62,50k
0	1	0	7,81k
0	1	1	980,40
1	0	0	243,90
1	0	1	60,98

Após a configuração do *timer* e com o auxílio de um osciloscópio, pode-se verificar e comprovar que o sinal gerado corresponde ao pretendido, isto é, são gerados os dois sinais complementares, de frequência igual e simétricos, correspondendo um a ζ_a e o outro a ζ_b . Na figura 20 que se segue, está representado um dos testes realizados.

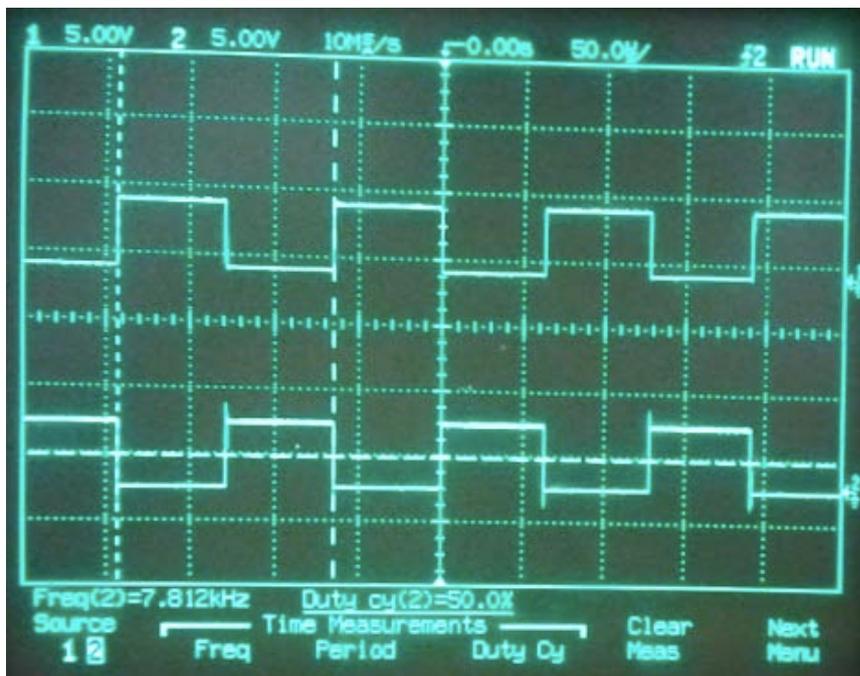


Figura 20 - Sinal de *Clock* testado

Neste caso, para efeitos de testes, no registo **TCCR0B**, os bits **CS02**, **CS01** e **CS00**, estão configurados para gerarem uma frequência de 7,812 kHz, através da seguinte linha de código;

TCCR0B=0b00000010;

Como é possível verificar pela figura 20, o sinal gerado corresponde à configuração pretendida, provando desse modo o seu bom funcionamento.

4.2 Testes Ligação Arduino – PGA's

O bloco de acondicionamento de sinal é composto por 2 andares consecutivos de pré-amplificação e de ganho. Estes dois andares são formados por 2 amplificadores numa montagem inversora com realimentação capacitiva. Os amplificadores utilizados são amplificadores de ganho programável (PGA), mais especificamente os LTC6915.

Como foi descrito no Capítulo 3, estes PGA são programados através de um microcontrolador, e a sua comunicação é feita pelo interface Série-Paralelo. Nesse mesmo Capítulo estão descritas as configurações necessárias para essa comunicação.

Após todas as configurações feitas, é necessário realizar a ligação física entre a placa Arduino e o PGA. As ligações necessárias à comunicação estão representadas na imagem da figura 21 que se segue.

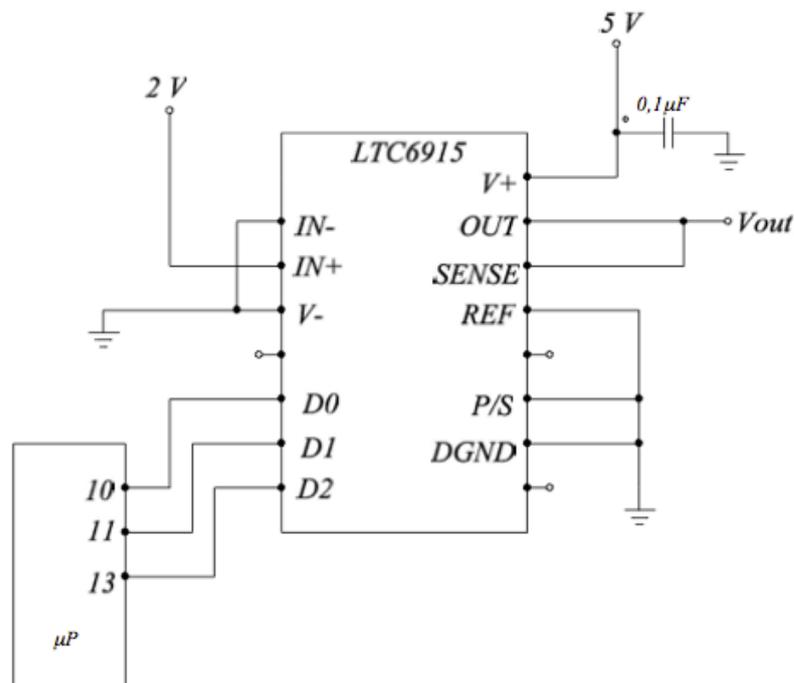


Figura 21 - Esquema Ligação Microcontrolador-PGA

Na figura 21 é possível verificar as ligações necessárias e que foram feitas entre a placa Arduino, representada por μP , e os dois amplificadores programáveis (PGA), LTC6915. A placa Arduino está ligada a um computador por USB, e é através do computador que se programa o microcontrolador, e por sua vez se altera o valor do número binário a enviar para os PGA de forma a alterar o valor de ganho pretendido.

Para efeitos de teste, o amplificador foi montado numa montagem seguidor de tensão, tal como exemplificado na figura 21. Para tal a entrada IN^- , pino2 do PGA, foi ligada à massa, e à entrada IN^+ , pino3 do PGA, foi aplicada uma tensão constante. Nesta montagem é esperado que se registre à saída do PGA o mesmo valor de entrada multiplicado pelo valor do ganho, isto é, ao aplicar, por exemplo, 2 V à entrada e com um ganho de 1, é esperado verificar na saída uma tensão de 2 V, com um ganho de 2 é esperado medir à saída uma tensão de 4 V e por aí adiante, consoante o valor de ganho

aplicado. Consultando o *datasheet* do PGA do fabricante [12] verifica-se que o envio do valor do ganho é alterado consoante um número binário que se envia.

Com o auxílio de um multímetro, para medir a tensão de saída do amplificador, e após ter sido aplicada à entrada uma tensão constante de 1,5 V com recurso a uma fonte de corrente contínua, foram verificados os seguintes valores consoante os diferentes valores de ganho estabelecidos.

Tabela 2 - Valores de Testes dos PGA's

Tensão Entrada (V)	Ganho	Tensão Saída Esperada (V)	Tensão Saída Medida (V)
1,5	0	0	0
1,5	1	1,5	1,50
1,5	2	3	3,02
1,5	4	6	6,05

Ambos os amplificadores de ganho programável foram sujeitos ao mesmo teste, e ambos apresentaram os mesmos resultados. Como se pode verificar pela tabela 2, os valores medidos aproximam-se dos valores teóricos esperados, demonstrando desse modo o bom funcionamento das ligações entre a placa Arduino e os PGA's, bem como da configuração da comunicação Série-Paralelo.

4.3 Testes das Pontes de Medida

O circuito desenvolvido, como já explicado num Capítulo anterior, é dotado de duas pontes de medida, uma resistiva e uma capacitiva, para possibilitar a aquisição de dados de sensores baseados quer na técnica resistiva bem como na técnica capacitiva, respetivamente.

O funcionamento das pontes foi comprovado através de testes realizados em que foram simulados o comportamento de um sensor resistivo através de um potenciómetro de 100 k Ω , e o comportamento de um sensor capacitivo com um conjunto de condensadores.

4.3.1 Testes Ponte Resistiva

Para testar o funcionamento da ponte resistiva foi simulado o comportamento de um sensor resistivo com o auxílio de um potenciómetro com valor de 100 k Ω . O

potenciômetro admite valores dentro da sua gama, isto é, pode ter valores entre 0Ω até $100 \text{ k}\Omega$, dessa forma é possível ir variando o seu valor como se tratasse de um sensor, simulando dessa forma as suas variações.

A ponte resistiva, como foi descrito no Capítulo 3, é baseada na ponte de Wheatstone, e a montagem do seu circuito elétrico juntamente com os andares de pré-amplificação e de ganho foi feita como demonstra a seguinte imagem da figura 22. Foi através deste circuito que foram realizados os testes à ponte Resistiva.

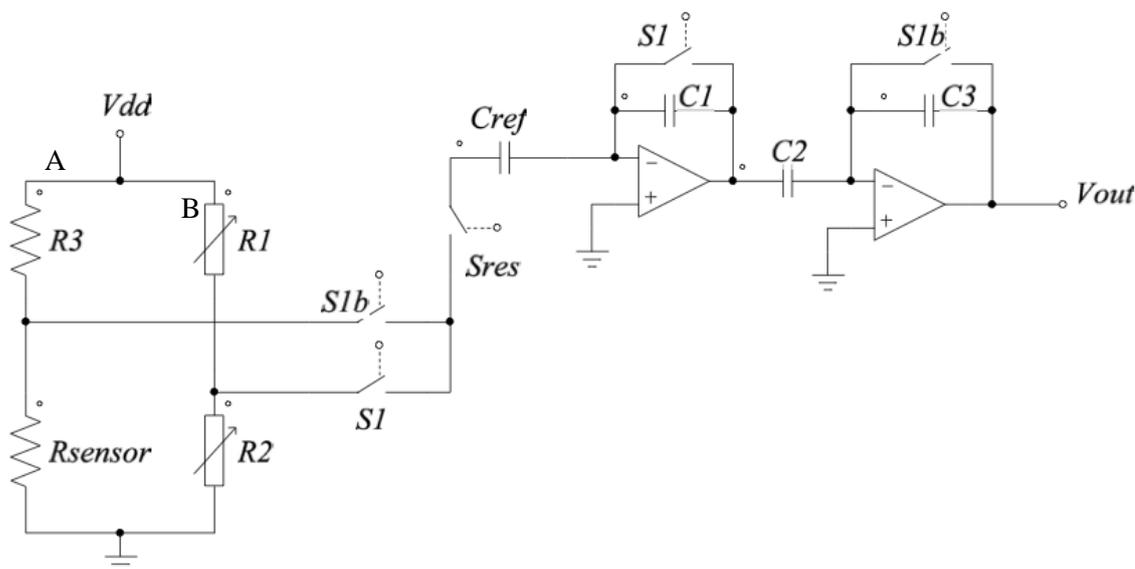


Figura 22 - Ponte Resistiva com Acondicionamento de Sinal

Antes de iniciar os testes foram definidos os valores da frequência do sinal de *clock* e de ganho a aplicar aos dois amplificadores. O valor da frequência definido foi de $62,5 \text{ kHz}$, recorrendo às configurações descritas no Capítulo 3 na secção referente ao sinal de *clock*. Para o andar de pré-amplificação foi definido um ganho de 2, e para o andar de ganho, foi definido um ganho de 4.

Após estas configurações, os testes efetuados para verificar o bom funcionamento desta ponte de medida foram realizados seguindo o seguinte procedimento:

- Ligou-se na ponte resistiva o potenciômetro para simulação do sensor, na figura 22 representado por R_{sensor} . C_{ref} é um condensador de capacidade = 39 nF . Os interruptores, S_1 e S_{1b} foram obtidos com um *switch*, ao qual foi aplicado o

sinal de *Clock* complementar, e foi habilitado o modo de leitura resistivo através do interruptor S_{res}

- Após terem sido ligadas as alimentações, as resistências R_1 e R_2 foram ajustadas até ser verificada uma tensão, com o auxílio de um multímetro, de aproximadamente 0 V entre os pontos A e B. No teste descrito, o valor registado foi de 0,04 V;
- De seguida registaram-se os valores de tensão lidos, V_{out} , consoante as variações do valor da resistência do sensor, neste caso, do potenciómetro. Esses valores estão registados na tabela 3. Os valores, quer de resistência quer de tensão de saída, foram lidos com recurso a um multímetro. Para este primeiro ensaio, foi-se variando o valor da resistência, registado o seu valor e verificado o valor de tensão de saída correspondente.

Tabela 3 - Valores Teste Ponte Resistiva do primeiro ensaio

Valor Resistência (Ω)	Tensão Saída - V_{out} (V)
25k	-1,00
15k	-0,83
10k	-0,67
7,5k	-0,52
6,0k	-0,46
5,0k	-0,41
4,0k	-0,34
3,5k	-0,31

Após este ensaio, procedeu-se a um novo teste. O procedimento do novo teste baseou-se nos mesmos moldes do anterior, mas numa lógica contrária. Começou-se por ajustar as resistências R_1 e R_2 de forma a obter-se uma tensão de aproximadamente 0 V entre os nós A e B, tendo-se verificado uma tensão de 0,01 V. A diferença deste novo ensaio em relação ao anterior incide no facto que desta vez foram primeiramente registados os valores de tensão de saída, e de seguida verificados os valores de resistência correspondentes. Na tabela 4 estão descritos os resultados obtidos.

Tabela 4 - Valores de Testes Ponte Resistiva do segundo ensaio

Tensão Saída - V_{out} (V)	Valor Resistência (Ω)
-0,86	19,4 k
-0,78	14,8k
-0,70	12,8k
-0,68	12,2k
-0,62	11,0k
-0,57	9,5k
-0,54	9,1k
-0,50	8,32k

Como é possível verificar através da análise dos resultados obtidos expressos nas tabelas 3 e 4, as variações de resistências são refletidas em variações de uma tensão, sendo esta tensão o sinal de saída do circuito de leitura.

Tendo-se obtido estes resultados, pode-se concluir que a ponte resistiva, apresenta um bom funcionamento e cumpre o seu objetivo, adquire um sinal que varia consoante alterações de resistência e traduz num sinal de saída sob a forma de tensão, cujas variações são o reflexo dessas alterações, sendo possível dessa forma ler essas mesmas alterações.

4.3.2 Testes Ponte Capacitiva

Para testar o funcionamento da ponte capacitiva, o comportamento de um sensor capacitivo foi simulado recorrendo a um conjunto de condensadores ligados em paralelo. Para os testes realizados utilizou-se, um osciloscópio para visualizar o sinal de saída, um multímetro para registar os valores da tensão de saída e uma ponte RLC⁷ para medir os diferentes valores do condensador formado por um conjunto de condensadores.

Como foi descrito no Capítulo 3, onde é apresentada toda a estrutura do circuito implementado, a aquisição de sinal proveniente de um sensor baseado na técnica capacitiva é feita com recurso a uma ponte capacitiva. O circuito seguido do bloco de acondicionamento de sinal é apresentado na figura 23. O condensador C_{ref} tem uma capacidade de 39 nF, é o mesmo condensador utilizado na ponte resistiva, pois este componente é partilhado por ambas as pontes.

⁷Ponte RLC – Ferramenta para medir valores de resistência, bobines e condensadores.

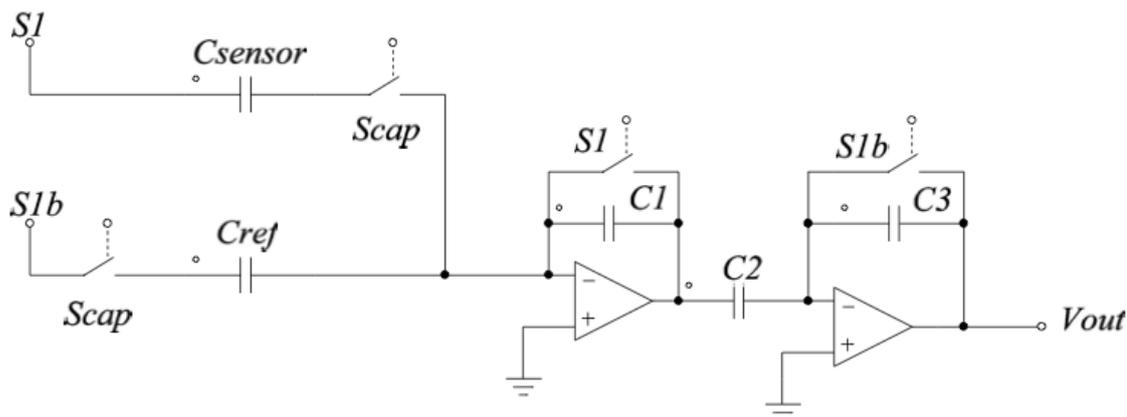


Figura 23- Ponte Capacitiva com Acondicionamento de Sinal

Antes de se iniciar o registo de valores, ajustaram-se alguns parâmetros do circuito, nomeadamente o valor da frequência do sinal de *clock*, e os ganhos dos 2 amplificadores de ganho programável. Foi ainda habilitado o modo de leitura capacitiva através dos interruptores S_{cap} .

O valor da frequência que foi estabelecido foi de 62,5 kHz, pois foi com este valor de frequência que se pode visualizar um sinal de saída mais “limpo”, isto é, com menos ruído. Este valor é alterado conforme foi descrito na secção anterior que diz respeito ao sinal de *clock*, recorrendo às configurações presentes na tabela 1 da mesma secção. Os amplificadores foram programados um com valor de ganho de 2 e o outro com valor 4 de ganho.

O teste realizado, e cujo valores estão registados na tabela 5, foi efetuado com o seguinte procedimento; registou-se o valor de um condensador com o auxílio da ponte RLC, e com o auxílio do multímetro verificou-se o valor da tensão de saída. De seguida colocou-se mais um condensador, em paralelo com o anterior, e dessa forma foi simulado um valor superior de capacidade, e novamente registados os valores de capacidade e conseqüente tensão de saída. Este procedimento foi repetido para vários valores de capacidade, como pode ser verificado na tabela 5, que se segue, que apresenta esses mesmos resultados.

Tabela 5 - Valores Teste Ponte Capacitiva

Valor Condensador (F)	Tensão Saída - V_{out} (V)
48p	-1,786
82p	-1,454
93p	-1,378
147,4p	-1,222
254,3p	-1,185
496,2p	-1,161
868,2p	-1,155

Através dos resultados registados na tabela 5, é possível verificar que a cada variação no valor do condensador há uma variação no valor de tensão de saída.

Esta ponte tem com objetivo receber sinal de um sensor capacitivo, que vai sofrer variações no valor da sua capacidade, e fornecer à saída uma tensão cujas alterações reflitam essas mesmas variações. Tendo em conta o objetivo do circuito composto pela ponte capacitiva e bloco de acondicionamento de sinal e os resultados obtidos, pode-se concluir que o circuito apresenta um bom funcionamento e cumpre o seu propósito.

4.4 Teste ao Circuito de Leitura com Sensor Químico

Após a implementação da estrutura que faz a aquisição de sinal de um sensor químico e ter sido testado o funcionamento de todas as partes que a constituem, testou-se o circuito com recurso a um sensor químico. O sensor utilizado foi um sensor de humidade baseado na técnica resistiva. Este sensor varia o valor da sua resistência inversamente à quantidade de humidade que deteta, isto é, o valor da sua resistência vai diminuindo consoante vai aumentando o valor da humidade.

O teste realizou-se mergulhando o sensor num recipiente com água, em intervalos de 0,5 centímetros, começando com o sensor fora do recipiente, e posteriormente mergulhado até ficar totalmente imerso. A figura 24 apresenta o esquema elétrico do circuito testado com o sensor químico. Sendo o sensor que foi utilizado resistivo, o mesmo foi ligado à parte dedicada à leitura resistiva, ou seja, à ponte resistiva, baseada na ponte de Wheatstone.

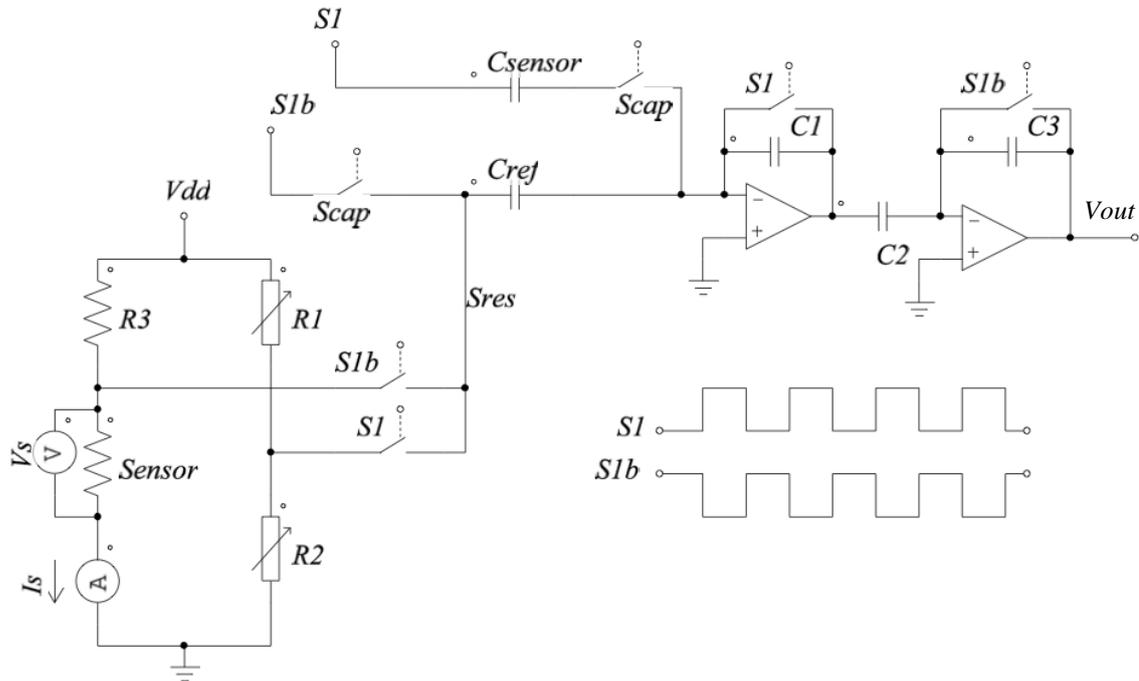


Figura 24 - Circuito teste Sensor Químico

Para registar o valor da tensão de saída, V_{out} , do circuito de leitura utilizou-se um multímetro, e registou-se também os valores de tensão no sensor bem como o valor da corrente. Estes valores, corrente I_s e tensão V_s , foram registados de forma a calcular o valor da resistência do sensor à medida que ia sendo mergulhado no recipiente. O cálculo foi feito com recurso à lei de Ohm, que diz que $V = R \cdot I$, sendo então calculado o valor da resistência com os valores registados de corrente e tensão.

Na tabela 6 estão registados os valores lidos durante o processo experimental com o sensor. Na tabela está indicado o “Estado Sensor” que diz respeito à profundidade a que está mergulhado começando com o estado “seco”, que indica que o sensor esta fora do recipiente, e terminando no estado “imerso”, situação em que todo o sensor estava mergulhado dentro do recipiente. Os valores intermédios estão em intervalos de 0,5 centímetros. Na tabela estão também registados os valores de tensão e corrente lidos no sensor, seguidos do valor de resistência calculado utilizando esses dois valores. Por fim são apresentados os valores de tensão de saída lidos.

Tabela 6 - Valores Teste do Sensor Químico

Estado Sensor	Tensão V_S (V)	Corrente I_S (A)	Resistência R_S (Ω)	Tensão V_{out} (V)
Seco	4,15	$\cong 100n$	41,5M	-0,95
0,5 cm	1,04	0,0392m	26,53k	-0,93
1 cm	0,87	0,04m	20,25k	-1,10
1,5 cm	0,79	0,041m	19,27k	-1,09
2 cm	0,73	0,042m	17,38k	-1,08
2,5 cm	0,67	0,043m	15,58k	-1,07
3 cm	0,65	0,043m	15,12k	-1,05
3,5 cm	0,62	0,043m	14,42k	-1,03
4 cm	0,57	0,043m	13,26k	-1,02
4,5 cm	0,51	0,043m	11,86k	-1,01
Imerso	0,46	0,043m	10,7k	-0,95

Este circuito desenvolvido e testado tinha como objetivo adquirir o sinal proveniente de um sensor químico, e traduzir as suas variações num sinal de saída sob a forma de variações de uma tensão. Como se pode verificar pela tabela, o valor da resistência do sensor vai diminuindo consoante a profundidade a que está submetido. Esta variação do valor da resistência vai provocar uma variação na tensão de saída do circuito. Desta forma, obtém-se um sinal de saída sob a forma de tensão que é o reflexo das variações sofridas pelo sensor, comprovando assim o bom funcionamento da estrutura que faz a leitura e aquisição de dados de um sensor químico, tendo então sido atingido o objetivo principal do projeto desenvolvido.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Os dispositivos sensores cada vez mais têm um papel fundamental no dia-a-dia das pessoas. É com o seu auxílio que é possível detetar inúmeras coisas que os sentidos não são capazes, e dessa forma ajudar ou até mesmo proporcionar uma maior segurança, um maior conforto, um melhor bem-estar possibilitando assim viver num ambiente mais saudável e seguro. Estes dispositivos são a ponte entre o mundo analógico e o mundo digital, detetando os sinais analógicos e convertendo-os numa propriedade, por exemplo elétrica.

Os sensores apresentam um sinal de saída que varia consoante as variações de uma grandeza elétrica, provocadas pelas variações da propriedade física que estão a medir, grandezas essas que podem ser resistência, capacitância ou indutância. De forma a traduzir este sinal de saída do sensor, num sinal sob a forma de tensão cujas variações refletem as alterações da propriedade física, é necessário fazer a aquisição desse mesmo sinal.

Esta dissertação tinha como objetivo principal, desenvolver e implementar uma estrutura que fizesse a aquisição do sinal proveniente de um sensor de modo a que pudesse ser lido, ou seja, convertido numa variação de tensão. O tipo de sensor a ter em conta, foi um sensor químico, e o requisito pretendido, foi que possibilitasse a aquisição de dados proveniente de um sensor químico baseado quer na técnica resistiva bem como na técnica capacitiva. Dessa forma foi desenvolvida uma estrutura dotada de duas pontes de medida. Uma ponte resistiva, baseada na ponte de Wheatstone, para ler sinais de um sensor com variações de resistência, e uma outra ponte, uma ponte capacitiva, para adquirir o sinal de um sensor capacitivo. As duas pontes de medida partilham, posteriormente, um bloco de acondicionamento de sinal composto por 2 andares, um de pré-amplificação e outro de ganho. Para ser possível esta partilha, as duas pontes possuem um componente em comum, um condensador, e este condensador tem a função de transformar as diferenças de tensão da ponte resistiva em carga, a fim de esta ser encaminhada para o bloco de acondicionamento de sinal.

O circuito de leitura foi desenvolvido implementado e posteriormente testado. Numa primeira fase foram testadas em separado as partes que o constituem, e de seguida testado todo conjunto.

Nos testes iniciais efetuados às pontes resistiva e capacitiva, foram simulados os comportamentos do sensor. O sensor resistivo, que apresenta variações de resistência, foi simulado com um potenciómetro de 100 k Ω . Ajustou-se o seu valor para o máximo, e foi-se registando os valores de tensão de saída consoante se diminuía a resistência. Para o sensor capacitivo, foi utilizado um conjunto de condensadores para simular o seu comportamento. Registou-se o valor da tensão de saída do circuito, com um condensador, e posteriormente foi-se ligando mais condensadores em paralelo, todos de valores conhecidos para dessa forma se saber o valor do “condensador global”.

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que os valores corresponderam ao esperado, pois o circuito apresentou na saída variações de tensão consoante as variações da grandeza elétrica.

Tendo toda a estrutura ter sido testada, e verificado o seu bom funcionamento, procedeu-se a um novo teste mas num “ambiente real”. Utilizou-se um sensor químico baseado na técnica resistiva que deteta a presença de humidade. Este sensor varia o valor da sua resistência consoante a maior ou menor deteção de humidade, sendo esta variação inversa à presença de humidade, dessa forma apresenta valores mais baixo de resistência quanta mais humidade estiver em contacto com o sensor. Os testes realizaram-se registando primeiro o valor que o sensor apresentava quando estava seco. De seguida mergulhou-se o sensor num recipiente com água e os valores foram registados em intervalos de 0,5 cm até este ficar completamente imerso.

Tendo em conta os resultados obtidos, verifica-se que o circuito cumpre os objetivos propostos. O circuito implementado adquire o sinal proveniente de um sensor químico, sinal esse que são variações de uma grandeza elétrica, que para o caso testado e apresentado são variações de resistência, e reflete-o num sinal de saída sob a forma de tensão cujas variações traduzem as variações dessa mesma grandeza.

Como trabalho futuro existem algumas alterações que podem ser feitas e dessa forma conduzir a um melhoramento da base de leitura. Através da introdução na entrada do circuito de um *multiplexer* de 8 entradas poderá ser possível a aquisição de sinal até um máximo de 8 sensores. [11]

Em relação ao sinal de saída do circuito, utilizando um conversor de analógico para digital (ADC) na saída, será possível encaminhar o sinal para um computador, e dessa forma, através de um *interface*, traduzir o valor de tensão de saída num valor, por

exemplo, em termos de percentagem, conseguindo assim uma resposta perceptível a qualquer pessoa, sem a utilização de aparelhos de medida, tais como o multímetro que foi utilizado para os testes apresentados nesta dissertação. Desta forma será possível utilizar esta estrutura no nosso quotidiano para a deteção da presença ou da quantidade presente de humidade num certo espaço, por exemplo.

Referências

- [1] P. Hauptmann, *Sensors: Principles and Applications*. Prentice Hall, 1993.
- [2] J. R. Stetter, W. R. Penrose, and S. Yao, “Sensors, Chemical Sensors, Electrochemical Sensors, and ECS,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 150, no. 2, p. S11, 2003.
- [3] M. Urbiztondo, I. Pellejero, a. Rodriguez, M. P. Pina, and J. Santamaria, “Zeolite-coated interdigital capacitors for humidity sensing,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 157, no. 2, pp. 450–459, Oct. 2011.
- [4] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2010.
- [5] C. Wu and K. Tang, “A Polymer-Based Gas Sensor Array and Its Adaptive Interface Circuit,” no. 101, pp. 355–358, 2010.
- [6] P. Ripka and A. Tipek, *Modern Sensors Handbook*. Wiley, 2013.
- [7] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*. John Wiley & Sons, 1996.
- [8] A. S. Morris, *Principles of measurement and instrumentation*. Prentice Hall PTR, 1993.
- [9] ponte de Wheatstone. In Infopédia. Porto: Porto Editora, 2003-2013. [Consult. 2013-09-10]
- [10] A. Campilho, *Instrumentação electrónica: métodos e técnicas de medição*. FEUP Edições.
- [11] C. Yang, A. Mason, J. Xi, and P. Zhong, “Configurable Hardware-Efficient Interface Circuit for Multi-Sensor Microsystems,” pp. 41–44, 2006.
- [12] L. T. Corporation, “LTC6915 - Zero Drift, Precision Instrumentation Amplifier with Digitally Programmable Gain,” pp. 1–18.
- [13] H. Performance, L. Power, A. V. R. Microcontroller, A. R. Architecture, I. Programming, O. B. Program, S. P. W. M. Channels, O. A. Comparator, S. Sleep, M. Idle, and A. D. C. N. Reduction, “Features – 32 x 8 General Purpose Working Registers – Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits True Read-While-Write Operation – Programming Lock for Software Security – Internal Calibrated Oscillator – External and Internal Interrupt Sources and Extended Standby I / O and Packages Operating Voltage□: Temperature Range□: Speed Grade□: Microcontroller Bytes In-System Programmable Flash ATmega88PA ATmega168PA ATmega328P.”

- [14] W. C. Dunn, *Introduction To Instrumentation, Sensors and Process Control*. Artech House, Incorporated, 2006.
- [15] B. T. R. Kuphaldt, *Lessons In Industrial Instrumentation*. 2009.
- [16] F. B. Diagram, “INDUSTRIAL TEMPERATURE RANGE QUICKSWITCH ® PRODUCTS HIGH-SPEED CMOS QUICKSWITCH 8-BIT BUS SWITCH FEATURES DESCRIPTION □: APPLICATIONS □:,” pp. 1–5, 2006.
- [17] N. Yazdi, A. Mason, K. Najafi, and K. D. Wise, “A generic interface chip for capacitive sensors in low-power multi-parameter microsystems,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 84, no. 3, pp. 351–361, Sep. 2000.
- [18] Z. M. Rittersma, “Recent achievements in miniaturised humidity sensors – A review of transduction techniques,” vol. 96, pp. 196–210, 2002.
- [19] K. Govardhan [1] B. George and V. J. Kumar, “Switched Capacitor Signal Conditioning for Push-Pull Type Capacitive Sensors,” *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, vol. 2, no. 2, pp. 809–812, 2005.
- [20] K. Govardhan and Z. C. Alex, “Mems Based Humidity Sensor,” no. 37, pp. 20–27, 2005.
- [21] M. Arvand-Barmchi, M. F. Mousavi, M. a. Zanjanchi, and M. Shamsipur, “A PTEV-based zeolite membrane potentiometric sensor for cesium ion,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 96, no. 3, pp. 560–564, Dec. 2003.
- [22] K. N. Kumar, “Future Sensors and Utilization of Sensors in Chemical Industries with Control of Environmental Hazards,” vol. 4, pp. 224–228, 2011.
- [23] T. A. Emadi, C. Shafai, M. S. Freund, D. J. Thomson, D. S. Jayas, and N. D. G. White, “Development of a Polymer-based Gas Sensor - Humidity and CO₂ Sensitivity,” pp. 112–115, 2009.
- [24] U. Frey, M. Graf, S. Taschini, K.-U. Kirstein, and A. Hierlemann, “A Digital CMOS Architecture for a Micro-Hotplate Array,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 2, pp. 441–450, Feb. 2007.
- [25] J. Xi, C. Yang, A. Mason, and P. Zhong, “Adaptive Multi - Sensor Interface System-On-Chip,” pp. 50–53, 2006.
- [26] M. J. Usher and D. A. Keating, *Sensors and Transducers: Characteristics, Applications, Instrumentation, Interfacing*. Palgrave Macmillan Limited, 1996.