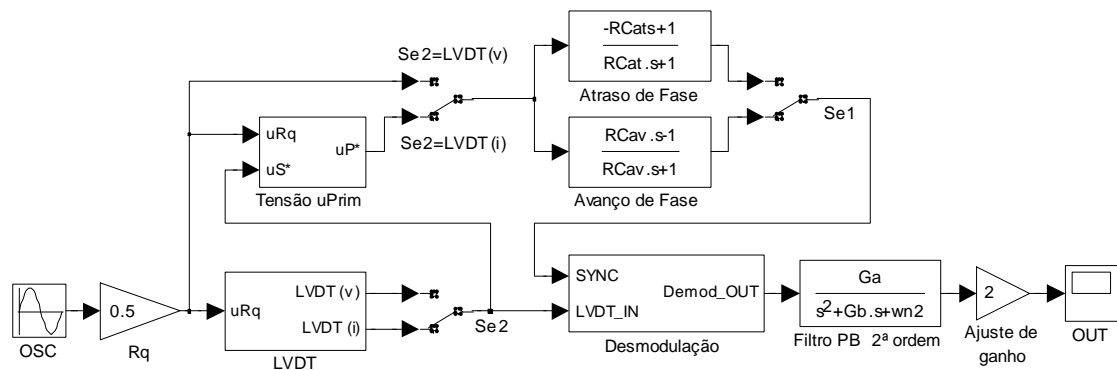




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação



Transformador Diferencial de Variação Linear – Condicionamento de Sinal e Desmodulação Síncrona

ROGÉRIO PAULO FERRAZ DIAS
(Bacharel)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Automação e Eletrónica Industrial

Orientadores:

Professor Vasco Emanuel Anjos Soares
Professor Nuno Paulo Real da Veiga Cardoso

Júri:

Presidente: Professora Maria da Graça Vieira de Almeida
Vogais: Professor Vasco Emanuel Anjos Soares
Professor Armando José Leitão Cordeiro

Junho de 2015

Aos meus pais e irmãos

À Clara

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida em torno de uma técnica para desmodulação (desmodulação síncrona) capaz de obter a informação necessária do sinal de saída de um sensor indutivo de posição (Transformador Diferencial de Variação Linear).

Foram estudadas duas topologias de excitação do transdutor: excitação em tensão e em corrente. Para cada uma, foi analisada a sensibilidade à variação de posição e à frequência de excitação.

Foram realizados ensaios para a obtenção dos parâmetros associados ao sensor em estudo. Foram efetuados vários dimensionamentos, nomeadamente associados ao condicionador de sinal, tratamento do sinal de saída e circuitos de desfasamento.

Para a simulação do circuito projetado, foi utilizado o *software MatLab Simulink*.

A componente experimental consistiu na realização de um protótipo numa placa de circuito impresso, incluindo o circuito desmodulador, do qual foram recolhidas curvas da saída para vários pontos de funcionamento e comparadas com as homólogas obtidas por simulação.

Palavras-chave: LVDT, desmodulação síncrona, condicionador de sinal, circuitos de desfasamento, *MatLab Simulink*.

Abstract

This work was developed around a technique for demodulation (synchronous demodulation) able to get the necessary information from the output signal of an inductive position sensor (Linear Variation Differential Transformer).

Two transducer connection topologies were studied: excitation in tension and current. For each one, the sensibility to the position variation and the excitation frequency were analysed.

Tests were performed to obtain the parameters associated to the sensor in study. Several dimensioning calculations were made, mostly associated to the signal conditioner, the output signal processing and fase-shifting circuits.

To simulate the built circuit, it was used the *Matlab Simulink* software.

An experimental part, a printed circuit board prototype, including a demodulator circuit, was prepared. Curves from the output were obtained for several operating points and compared with the counterpart obtained by simulation.

Key-words: LVDT, synchronous demodulation, signal conditioner, fase-shifting circuits, *MatLab Simulink*.

Agradecimentos

Ao dar uma etapa por concluída esta deve-se, não só ao esforço e dedicação individual mas, em boa parte, também a um conjunto de pessoas a quem quero expressar aqui a minha gratidão.

Começo por agradecer ao meu orientador Professor Vasco Soares pela oportunidade que me deu de realizar a tese de mestrado numa área pela qual tenho muito interesse – a Instrumentação. De enaltecer a sua orientação, disponibilidade e ensinamentos que muito contribuíram para o sucesso desta dissertação.

Ao Professor Nuno Cardoso pelo apoio dado e orientação na execução deste trabalho. Agradeço o tempo disponibilizado ao longo do desenvolvimento do mesmo, tanto a nível de esclarecimento de algumas dúvidas como na sua organização.

Ao Rodrigo Breno, pelo seu apoio e experiência partilhada.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) por continuar a apostar na formação de futuros engenheiros, tentando ser uma referência a nível nacional.

Aos meus colegas e amigos que contribuíram, de alguma forma, para o meu sucesso.

Aos meus pais, pela educação e valores transmitidos, que durante toda a minha vida me apoiaram na minha realização, quer a nível pessoal, quer a nível profissional.

O meu agradecimento final vai para a Clara, pela sua paciência e compreensão nos momentos de ausência e por estar sempre presente quando mais precisei.

A todos, os meus sinceros agradecimentos,

Rogério Dias

Convenções

Notação

Neste trabalho, para minimizar a possibilidade de interpretações ambíguas, utilizam-se as seguintes notações:

Para valores instantâneos das grandezas usam-se as letras minúsculas, com ou sem índice. Exemplos: u_{Rp} , u_r , u_p e u_{SYNC} .

Para amplitudes, valores de pico e valores contínuos, usam-se letras maiúsculas, com ou sem índice. Exemplos: U_M e U_{CC} .

Para o valor médio das grandezas usam-se letras minúsculas, com ou sem índice, antecedidas pelo sinal “<” e precedidas pelo sinal “>”. Exemplo: $\langle u_d \rangle$.

Para valores apresentados no domínio da frequência complexa s (Transformada de Laplace) usam-se letras maiúsculas, com ou sem índice. Por norma, estes valores têm o mesmo índice que os respetivos valores instantâneos, mas como se tratam de valores no domínio da Transformada de Laplace, são usadas letras maiúsculas. Exemplos: U_i e U_o e I_i .

Devido às limitações impostas pelo *MatLab Simulink* no que diz respeito à impossibilidade de introdução de índices ou caracteres especiais para as variáveis, consideram-se os índices como texto normal ou omitem-se os caracteres especiais. Exemplos: P , S e uP^* (no *Simulink*) correspondem a P^* , S^* e u_{p^*} (na dissertação).

Símbolos

Nesta dissertação apresenta-se um Glossário com os símbolos mais relevantes. Não obstante, constam nesta dissertação outros símbolos que apesar de não estarem ali referidos, são definidos no corpo do texto aquando da sua utilização.

Sistema de unidades de medida

Nesta dissertação é utilizado o Sistema Internacional (SI) de unidades de medida, bem como a escrita de unidades, segundo as normas em vigor.

Por ser um sistema de unidades bem conhecido, as abreviaturas relativas às unidades das grandezas utilizadas não são citadas no Glossário deste trabalho.

Estrangeirismos

São utilizados estrangeirismos fundamentalmente por duas razões: primeiro, por a palavra ainda não estar definida no nosso vernáculo; em segundo, por serem palavras que a mera tradução linguística faça perder o seu significado técnico atribuído às mesmas na língua original.

Neste trabalho são utilizadas palavras provenientes do inglês *design*, *hardware*, *ripple*, *Butherford* e *layout*. Por não possuírem um significado equivalente e adequado ao nosso vernáculo, será utilizado o anglicismo.

Será também utilizada a locução latina, *a priori*.

Todos os estrangeirismos referidos neste ponto, são assinalados ao longo do texto em itálico.

Bibliografia

Ao longo desta dissertação as referências bibliográficas são citadas, por convenção, colocando entre parêntesis retos o número da referência, de acordo com o número que lhe está atribuído na Bibliografia.

Glossário

Acrónimos e Siglas

- AO - Amplificador Operacional
- DC-LVDT - Transformador Diferencial de Variação Linear acionado por corrente contínua (do Inglês: *Direct Current – Linear Variable Differential Transformer*)
- fem* - Força Eletromotriz
- LVDT - Transformador Diferencial de Variação Linear (do Inglês: *Linear Variable Differential Transformer*)
- VCVS - *Voltage-Controlled Voltage Source*

Operadores

- \approx - Operador de aproximadamente
- \pm - Operador de soma e subtração algébrica
- \Rightarrow - Operador de implicação
- \equiv - Operador de equivalente
- $\frac{d}{dx}, \frac{d}{d\omega}$ - Operador de derivada
- _{ef} - Referência a um valor eficaz
- _{pp} - Referência a um valor pico-a-pico
- _{REF} - Referência da grandeza
- s* - Operador de Transformada de Laplace
- sgn, cos, sen, tg, arctg - Funções matemáticas

Símbolos

- a - Dependência linear das indutâncias mútuas com a posição do núcleo móvel
- C_{at} - Capacidades usadas no circuito para atraso de fase
- C_{av} - Capacidades usadas no circuito para avanço de fase
- C_T - Capacidade do circuito oscilador
- C_{f1}, C_{f2} - Capacidades usadas no filtro passa-baixo de 2ª ordem
- $CH1$ - Canal 1 do osciloscópio
- $CH2$ - Canal 2 do osciloscópio
- e_p - Força eletromotriz do enrolamento primário
- e_{s1} - Força eletromotriz do enrolamento secundário 1
- e_{s2} - Força eletromotriz do enrolamento secundário 2
- f - Frequência de funcionamento do LVDT
- f_c - Frequência de corte do filtro passa-baixo de 2ª ordem
- f_o - Frequência para obtenção de fase nula
- i_i - Corrente no enrolamento primário
- i_p - Corrente no primário
- i_s - Corrente no secundário
- L_p - Indutância do enrolamento primário
- L_s - Indutância equivalente do enrolamento secundário
- L_{s1} - Indutância do enrolamento secundário 1
- L_{s2} - Indutância do enrolamento secundário 2
- M_1 - Indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 1
- M_2 - Indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 2
- M_3 - Indutância mútua entre os enrolamentos, secundário 1 e secundário 2
- P - Enrolamento primário do LVDT
- R_a, R_b, R_c, R_d - Resistências usadas na montagem para ajuste de zero do sinal de saída

Glossário

- $R_{at1}, R_{at2}, R_{at3}, R_{at4}$ - Resistências usadas no circuito para atraso de fase
- $R_{av1}, R_{av2}, R_{av3}, R_{av4}$ - Resistências usadas no circuito para avanço de fase
- R_c - Resistência de carga
- R_{exc} - Resistência de excitação do primário do LVDT
- $R_{f1}, R_{f2}, R_{f3}, R_{f4}$ - Resistências usadas no filtro passa-baixo de 2ª ordem
- R_{o1}, R_{o2} - Resistências usadas na montagem amplificadora do sinal de saída
- R_p - Resistência do enrolamento primário
- R_q - Potenciômetro que permite a redução da tensão à saída do módulo NE5521D
- R_s - Resistência equivalente do enrolamento secundário
- R_{s1} - Resistência do enrolamento secundário 1
- R_{s2} - Resistência do enrolamento secundário 2
- R_T - Resistência do circuito oscilador
- S_1 - Sensibilidade à posição, para excitação em tensão
- S_2 - Sensibilidade à frequência, para excitação em tensão
- S_3 - Sensibilidade à posição, para excitação em corrente
- S_4 - Sensibilidade à frequência, para excitação em corrente
- $S1$ - Enrolamento secundário 1 do LVDT
- $S2$ - Enrolamento secundário 2 do LVDT
- $Se1$ - Seletor que promove o avanço ou atraso de fase
- $Se2$ - Seletor que promove uma excitação em tensão ou corrente
- u_{AMP_OUT} - Tensão no pino 1 (AMP_OUT) do módulo NE5521D
- u_d - Tensão contínua à saída do desmodulador
- u_{Demod_OUT} - Tensão no pino 5 (Demod_OUT) do módulo NE5521D
- u_{exc} - Tensão aos terminais da resistência R_{exc}
- u_i - Tensão de entrada de uma montagem
- u_o - Tensão de saída de uma montagem
- u_{OSC} - Tensão no pino 12 (OSC) do módulo NE5521D
- u_{OUT} - Tensão à saída da montagem projetada

Glossário

- u_p - Tensão aos terminais do enrolamento primário
- u_{p*} - Tensão entre o ponto de entrada do primário para a massa
- u_r - Tensão de referência do desmodulador
- U_{REF} - Tensão de referência
- u_{Rq} - Tensão no potenciômetro R_q
- u_S - Tensão diferencial aos terminais dos enrolamentos secundários
- u_{S*} - Tensão entre o ponto de entrada do secundário para a massa
- u_{S1} - Tensão aos terminais do enrolamento secundário 1
- u_{S2} - Tensão aos terminais do enrolamento secundário 2
- u_{Se1_1}, u_{Se1_7} - Tensões à saída do seletor Se1. Se1_1 e Se1_7 fazem o atraso e avanço de fase, respetivamente
- $-V_{cc}, +V_{cc}$ - Tensões contínuas de alimentação do circuito
- x - Percurso ao longo do qual a haste do LVDT se desloca
- ω - Frequência angular

Índices

Índice Geral

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
1.1	INTRODUÇÃO	3
1.2	OBJETIVOS	4
1.3	NOTA HISTÓRICA	4
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2	LVDT – SENSOR DE DESLOCAMENTO INDUTIVO	7
2.1	INTRODUÇÃO	9
2.2	CONSTITUIÇÃO	9
2.3	CARACTERÍSTICAS DO LVDT	10
2.4	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	13
2.5	ANÁLISE ELÉTRICA	15
2.5.1	<i>Excitação em tensão</i>	15
2.5.2	<i>Excitação em corrente</i>	22
2.6	PARÂMETROS DO LVDT	25
CAPÍTULO 3	DESMODULAÇÃO SÍNCRONA	31
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	CONDICIONADOR DE SINAL	33
3.2.1	<i>Circuito oscilador</i>	34
3.2.2	<i>Desmodulador</i>	34
3.2.3	<i>Filtro passa-baixo de 2ª ordem</i>	37
3.3	TRATAMENTO DO SINAL DE SAÍDA	40

Índices

3.4	EXCITAÇÃO DO LVDT	41
3.5	CIRCUITOS DE DESFASAMENTO.....	42
3.5.1	<i>Circuito para avanço de fase</i>	42
3.5.2	<i>Circuito para atraso de fase</i>	43
3.6	RESUMO DE VALORES E ESQUEMA UTILIZADO	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....		47
4.1	INTRODUÇÃO.....	49
4.2	EXPRESSÕES ANALÍTICAS.....	49
4.3	SIMULAÇÃO DO MODELO A IMPLEMENTAR	52
4.3.1	<i>Diagrama de blocos</i>	52
4.3.2	<i>Código auxiliar</i>	54
4.4	IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL	55
4.5	RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES		63
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
5.2	PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTUROS	66
BIBLIOGRAFIA.....		67
APÊNDICE 1 – MATLAB SIMULINK: CÓDIGO PRINCIPAL (MAIN.M)		69
APÊNDICE 2 – MATLAB SIMULINK: CÓDIGO AUXILIAR (DADOS.M).....		73
ANEXO 1 – FOLHA DE CARACTERÍSTICAS DO LVDT		77

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Constituição de um LVDT.....	9
Figura 2.2 – LVDT: Esquema representativo.	13
Figura 2.3 – Amplitude das tensões no secundário, em função da posição do núcleo móvel.....	14
Figura 2.4 – Esquema elétrico equivalente de um LVDT. a) Excitação em tensão; b) Excitação em corrente.	15
Figura 2.5 – Diagrama de Bode: excitação em tensão.	20
Figura 2.6 – Sensibilidade à frequência, para excitação em tensão.....	21
Figura 2.7 – Diagrama de Bode: excitação em corrente.	23
Figura 2.8 – Sensibilidade à frequência, para excitação em corrente.....	24
Figura 2.9 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Esquema elétrico para Ensaio 1: R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$	26
Figura 2.10 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Diagramas vetoriais para Ensaio 1.....	26
Figura 2.11 – Determinação de parâmetros: formas de onda retiradas do ensaio 1.....	28
Figura 2.12 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Esquema elétrico para Ensaio 2: R_s e $(L_s - 2M_3)$	28
Figura 2.13 – Determinação de parâmetros: formas de onda retiradas do ensaio 2.....	30
Figura 3.1 – Diagrama de blocos para obtenção de uma tensão contínua proporcional ao deslocamento do núcleo do LVDT.	33
Figura 3.2 – Diagrama de blocos com desmodulador e filtro.....	35
Figura 3.3 – Desmodulador síncrono do NE5521D [13].	35
Figura 3.4 – Filtro passa-baixo de 2ª ordem, com ajuste de zero.	37
Figura 3.5 – Resposta em frequência de um filtro ativo construído com um AO.	39
Figura 3.6 – Montagem amplificadora (AO3b).	40
Figura 3.7 – Montagem para ajuste do zero (AO3a).	40
Figura 3.8 – LVDT: Montagens possíveis para a excitação do primário. a) em tensão; b) em corrente.	41
Figura 3.9 – Circuito para avanço de fase.....	43
Figura 3.10 – Circuito para atraso de fase.....	44
Figura 3.11 – Esquema elétrico utilizado para fazer a desmodulação síncrona do LVDT.	46
Figura 4.1 – Montagem para fazer a excitação em corrente, do LVDT.	50
Figura 4.2 – Diagrama de blocos em <i>MatLab Simulink</i> : modelo geral.	52
Figura 4.3 – Diagrama de blocos em <i>MatLab Simulink</i> : Bloco “LVDT”.	53
Figura 4.4 – Diagrama de blocos em <i>MatLab Simulink</i> : Bloco “Tensão uPrim”.	53
Figura 4.5 – Diagrama de blocos em <i>MatLab Simulink</i> : Bloco “Desmodulação”.....	54

Índices

Figura 4.6 – LVDT fixo num suporte para medição.	55
Figura 4.7 – Placa do circuito desmodulador em circuito impresso.....	55
Figura 4.8 – <i>Layout</i> da placa do circuito desmodulador. a) sem plano de massa; b) com plano de massa	56
Figura 4.9 – <i>Layout</i> da placa adaptadora para o módulo NE5521D.	56
Figura 4.10 – Esquema elétrico simplificado da montagem implementada: tensões a simular e a obter experimentalmente.	57
Figura 4.11 – Módulo NE5521D: tensão de saída do oscilador e sua atenuação (externa).	58
Figura 4.12 – LVDT: tensões para a excitação do primário.	58
Figura 4.13 – LVDT: tensão do secundário, para várias posições do núcleo.	59
Figura 4.14 – LVDT: tensões no primário e secundário.	59
Figura 4.15 – LVDT: Ajuste de fase.	60
Figura 4.16 – LVDT: Desmodulação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.	61
Figura 4.17 – LVDT: Retificação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.	61
Figura 4.18 – LVDT: Amplificação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.	62

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Resumo das características do LVDT a ensaiar [7].	12
Tabela 2.2 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Ensaio 1: R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$	27
Tabela 2.3 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Ensaio 2: R_s e $(L_s - 2M_3)$	29
Tabela 3.1 – Resumo dos valores dimensionados para o esquema da Figura 3.11.	45

CAPÍTULO 1 **Introdução**

Resumo:

Neste capítulo serão mencionados os objetivos deste trabalho, será feito o enquadramento teórico e apresentada uma nota histórica.

1.1 Introdução

Em aplicações industriais ou domésticas, pode existir a necessidade de monitorização do funcionamento de ferramentas. Existem diversos sensores que podem ser usados para determinar os valores de variáveis importantes para a realização rigorosa de uma tarefa. Para a medição de deslocamentos lineares retilíneos destaca-se um sensor, o Transformador Diferencial de Variação Linear (LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*) [1].

O LVDT, basicamente um transformador de núcleo móvel com dois secundários associados em oposição série, é um transdutor de elevadas características metrológicas, adequado para um grande número de aplicações onde se pretenda a avaliação de deslocamentos lineares.

Com este dispositivo obtém-se, através da tensão diferencial entre os seus dois secundários, informação do deslocamento do núcleo móvel a partir de uma posição central designada de zero elétrico. Constata-se contudo que através da avaliação direta dos sinais alternados de saída de um LVDT, apenas se obtêm valores de tensão em amplitude ou em valor eficaz, portanto valores em módulo, que nada nos dizem sobre os sentidos dos deslocamentos do núcleo. A informação recolhida é portanto ambígua, logo insuficiente para a maioria das aplicações.

A resolução desta ambiguidade pode ser efetuada através da observação da fase do sinal de saída, uma vez que a sua avaliação permitirá determinar o sentido do deslocamento. Para atingir este objetivo é então necessário que o sinal seja condicionado de modo a que sejam efetuadas operações de desmodulação, retificação e filtragem da saída do transformador.

A informação completa do sinal de saída do transdutor em estudo pode ser obtida através de uma de duas técnicas de desmodulação: síncrona ou assíncrona.

A desmodulação assíncrona apresenta o inconveniente de exigir o acesso a todos os terminais dos dois secundários do LVDT. Tendo em conta o condicionalismo imposto à partida pelo equipamento disponível para estudo – LVDT apenas com a saída diferencial disponível – foi realizado apenas o estudo da desmodulação síncrona.

1.2 Objetivos

A presente dissertação foi elaborada no âmbito da graduação de Mestre em Engenharia Eletrotécnica, desenvolvendo-se em torno de uma técnica para desmodulação capaz de obter a informação necessária do sinal de saída.

A dissertação tem como objetivo geral, realizar a análise de uma técnica de desmodulação síncrona aplicada ao condicionamento de sinal de transdutores indutivos do tipo Transformador Diferencial de Variação Linear.

São definidos dois objetivos específicos para o trabalho. O primeiro consiste em comparar, sob o ponto de vista das topologias de ligação de transdutores, diferentes condições de funcionamento e sensibilidade à variação de parâmetros. O segundo objetivo passa por elaborar um protótipo experimental com circuitos específicos de desmodulação de sinal nos LVDT.

1.3 Nota histórica

A ideia inicial, para o LVDT, foi proposta a patente por George B. Hoadly com o nome *Telemetric Systems*, intitulado como “um sistema para transmissão elétrica inteligente à distância” [2].

Em 1946 Herman Schaevitz publicou *The Linear Variable Differential Transformer*, um artigo que descreve um *design* semelhante aos atualmente comercializados e que proporcionou a divulgação das características e ampliou as possibilidades de aplicação do LVDT [3][4].

Depois da 2ª Guerra Mundial, o LVDT foi reconhecido pela indústria, como um sensor para o controlo de processos, resultado do seu uso em aeronaves e em sistemas de armas, tal como os torpedos [5]. O LVDT passou a ser essencialmente usado na área militar e em controlo de qualidade devido à sua robustez aliada a uma elevada resolução.

Nas décadas de 50 e 60 o LVDT já era usado em muitas aplicações industriais.

Nos anos 70 foi a eletrónica para a excitação e para o condicionamento de sinal que teve um maior desenvolvimento. Nesta década aparecem também os DC-LVDT

que eram difíceis de projetar e fabricar por terem um espaço limitado para abrigar os circuitos necessários. Contudo, esse problema foi resolvido com o aparecimento dos circuitos integrados na década de 80, permitindo assim impulsionar a sua divulgação.

Desde então, o sensor LVDT tem aplicações várias, tais como aferição industrial em máquinas-ferramenta, aplicações automóveis, aeronáuticas e militares, equipamentos de teste de materiais, entre outras. Pode ser usado para medição do nível de um fluido usando boia, medição da pressão por deformação de um diafragma, testes estruturais, monitorização de espessuras, transdutores de força, monitorização multiponto de contornos, classificação de produtos por tamanho e controlo de abertura de válvulas [1][6].

1.4 Estrutura do trabalho

A dissertação está organizada em 5 capítulos, bibliografia, 2 apêndices e 1 anexo.

No capítulo 1 é apresentado o tema deste trabalho, são mencionados os objetivos gerais e específicos, é feita uma breve nota histórica e apresentada a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 são abordados, a constituição, características e princípio de funcionamento do LVDT.

No capítulo 3 é realizado um estudo acerca da desmodulação síncrona, onde serão abordados o condicionador de sinal e os circuitos de defasamento.

No capítulo 4 são referidos os resultados obtidos nas componentes simulada e experimental.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e perspetivados alguns desenvolvimentos possíveis.

Espera-se que a presente dissertação contribua para uma melhor compreensão da desmodulação síncrona e das soluções que melhor se aplicam ao sensor em estudo.

CAPÍTULO 2 **LVDT – Sensor de deslocamento indutivo**

Resumo:

Neste capítulo aborda-se a constituição, características e princípio de funcionamento do LVDT.

2.1 Introdução

No presente capítulo será efetuado o estudo de um sensor de deslocamento indutivo, o LVDT, com o objetivo de estabelecer a formulação básica necessária à abordagem dos diferentes tipos de desmodulação. Será utilizado, na realização deste trabalho, o LVDT modelo L50R da marca Enerdis com a gama nominal de $\pm 25\text{mm}$ [7][8].

2.2 Constituição

O LVDT consiste num dispositivo cilíndrico onde estão instalados os enrolamentos de um transformador com um primário (P) e dois secundários ($S1$ e $S2$) dispostos de forma a envolver o percurso retilíneo de um núcleo móvel, de acordo com a Figura 2.1.

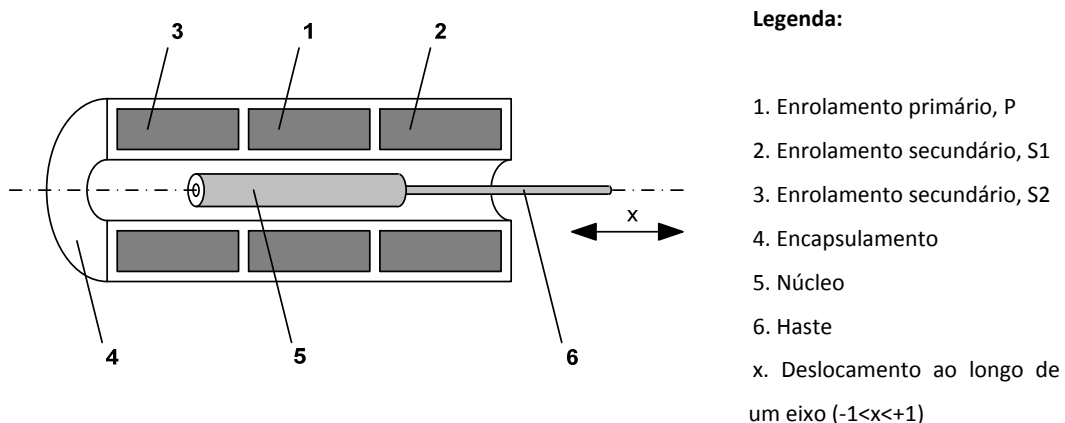


Figura 2.1 – Constituição de um LVDT.

A parte móvel do sensor é composta por um núcleo de material ferromagnético, ligada ao exterior através de uma haste de material não magnético [9][10]. Este núcleo móvel pode deslocar-se num percurso retilíneo no interior do cilindro, acionado pela extremidade exterior da haste, solidária com o elemento do qual se pretende conhecer a posição.

2.3 Características do LVDT

O LVDT é um transdutor com elevado desempenho devido às excelentes características metrológicas.

O LVDT é utilizado em muitas aplicações o que se justifica pelo facto de ser um transformador eléctrico com o núcleo separável e sem contacto. De seguida serão apresentadas as suas principais características metrológicas:

Medição sem atrito

Como não há oposição ao movimento do núcleo no interior do transformador, praticamente não há atrito.

Resolução infinita

O funcionamento sem atrito permite-lhe uma resolução infinita, uma vez que o núcleo móvel pode assumir qualquer posição entre os limites do seu curso.

A resolução de uma medida será apenas limitada pela resolução do dispositivo externo a utilizar como observador.

Excelente robustez

Os materiais utilizados na construção do LVDT e as técnicas utilizadas na sua montagem conferem-lhe uma grande robustez.

Vida mecânica infinita

A ausência de atrito entre o núcleo e os enrolamentos, manifesta-se na inexistência de desgaste. Por esta razão pode-se dizer que o LVDT tem uma vida mecânica infinita.

Repetibilidade nula

A simetria inerente à construção do LVDT, confere-lhe a característica de repetibilidade nula.

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

Rejeição de movimentos radiais

O LVDT é predominantemente sensível aos efeitos dos movimentos axiais do núcleo e praticamente insensível aos movimentos radiais do mesmo.

Separação entre núcleo e bobinas

Entre o núcleo e as bobinas existe uma membrana amagnética, que protege as bobinas da corrosão e dos líquidos sobre pressão. Esta membrana garante o isolamento hermético entre núcleo e bobinas.

Compatibilidade com o meio envolvente

O LVDT é um sensor que pode ser utilizado nos mais variados tipos de ambiente, por mais extremos que sejam, por ser robusto e hermeticamente isolado. Pode trabalhar imerso em líquidos sob pressão, em ambientes com vapores corrosivos ou inflamáveis, em ambientes criogénicos ou com temperaturas elevadas ou na presença de radiação.

Isolamento entre entrada e saída

O facto de o LVDT se tratar de um transformador, garante o isolamento eléctrico entre os enrolamentos do primário e do secundário.

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

Na Tabela 2.1 apresentam-se algumas especificações do LVDT utilizado – modelo L50R da marca Enerdis com a gama nominal de $\pm 25\text{mm}$ – de acordo com a folha de características apresentada no Anexo 1.

Tabela 2.1 – Resumo das características do LVDT a ensaiar [7].

Características	Valores
Linearidade	$L = \pm 0,2\%$
Resolução	Infinita
Histerese	0
Isolamento	$R_{isol.} = 100\text{M}\Omega$
T.min	$T_{min} = -20^\circ$
T.máx	$T_{máx} = 80^\circ$
Proteção	IP55
Frequência de funcionamento	$f = 2000\text{Hz}$
Excitação	$I_{exc} = 10\text{mA}$
Sensibilidade	$S = 25 \frac{\text{mV/mm}}{\text{Vexc}}$
Tensão residual de zero a 2000 Hz	Negligenciável
Influência da temperatura - no zero elétrico - na gama de medição	$C_{Temp.} = 0\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ $C_{Temp.} \leq 250\text{ ppm}/^\circ\text{C}$

2.4 Princípio de funcionamento

O LVDT é um transformador de núcleo móvel, com um enrolamento no primário (excitado em tensão ou em corrente) e dois enrolamentos iguais no secundário ligados em oposição de fase (oposição série), como se mostra na Figura 2.2.

O funcionamento do LVDT assenta na lei geral da indução e na influência da posição do núcleo móvel nas indutâncias mútuas existentes entre enrolamentos (M_1 , M_2 e M_3 – Figura 2.4).

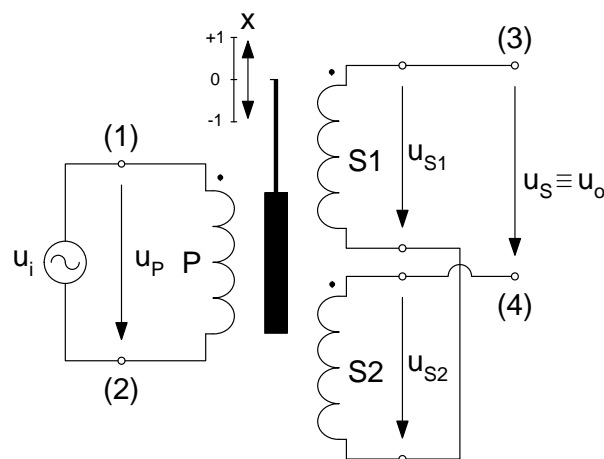


Figura 2.2 – LVDT: Esquema representativo.
Os pontos (1),(2),(3),(4) são os terminais elétricos acessíveis.

O funcionamento do LVDT pode ser genericamente descrito, considerando o deslocamento do núcleo no intervalo $-1 < x < 1$, da seguinte forma:

- $x = 0$ corresponde ao zero elétrico, onde as ligações magnéticas entre o enrolamento P e cada um dos enrolamentos $S1$ e $S2$ são iguais;
- $x = +1$ corresponde à posição máxima (haste em extensão), onde a ligação magnética entre os enrolamentos P e $S1$ é maior;
- $x = -1$ corresponde à posição mínima (haste recolhida), onde a ligação magnética entre os enrolamentos P e $S2$ é maior.

Quando o núcleo móvel está numa posição central, $x = 0$, a bobina do primário induz uma força eletromotriz (fem) igual em cada um dos secundários ($e_{S1} = e_{S2}$).

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

Se o núcleo móvel passar para uma posição diferente, por exemplo para $x = +0,7$, a bobina do primário vai induzir uma *fem* maior na bobina *S1* do secundário, do que na bobina *S2*.

As tensões de saída de cada secundário, u_{s1} e u_{s2} , variam de forma simétrica, dependendo da ligação magnética do respetivo enrolamento ao primário e, por conseguinte, da posição do núcleo.

Uma vez que os secundários estão associados em oposição de fase, a amplitude da tensão diferencial de saída a obter, $U_0 = U_{s1} - U_{s2}$, é proporcional à posição do núcleo. Na Figura 2.3 estão representadas as amplitudes das tensões no secundário do LVDT em função da posição do núcleo móvel [19][20].

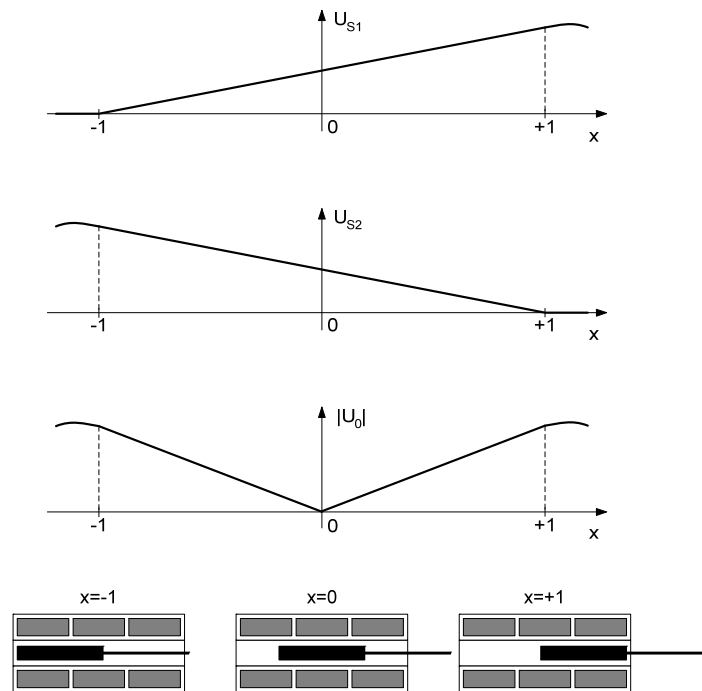


Figura 2.3 – Amplitude das tensões no secundário, em função da posição do núcleo móvel.

2.5 Análise elétrica

Neste subcapítulo será analisado o funcionamento do LVDT enquanto circuito elétrico. Para tal, considerem-se os circuitos elétricos equivalentes representados na Figura 2.4 a) e b) (excitação em tensão e corrente, respetivamente) e com uma carga resistiva R_C ligada aos terminais de u_o , tensão de saída [21][22].

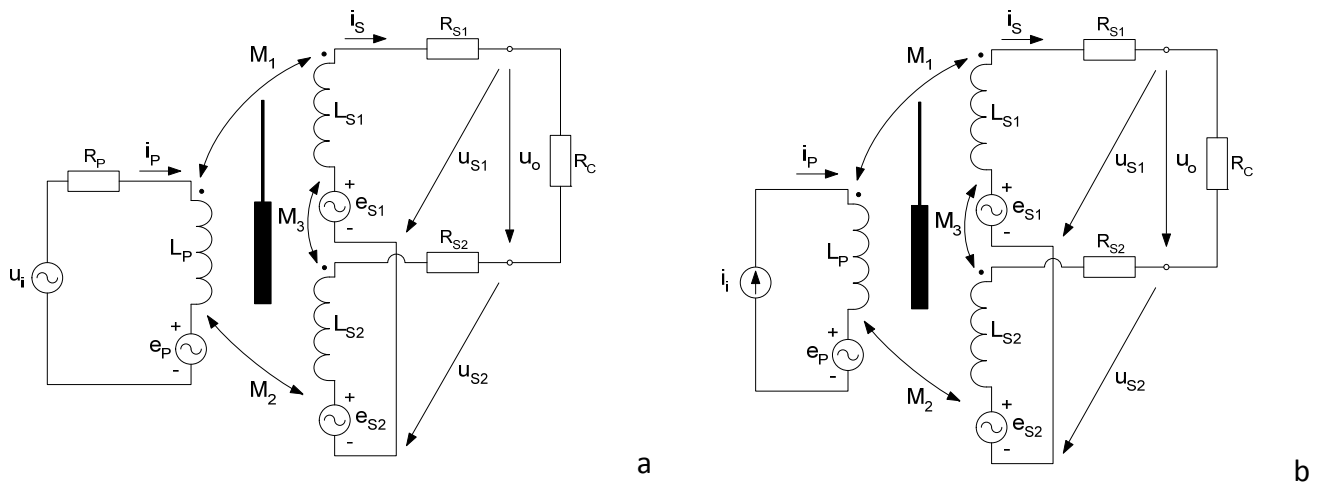


Figura 2.4 – Esquema elétrico equivalente de um LVDT. a) Excitação em tensão; b) Excitação em corrente.

Esta análise será realizada no domínio da frequência complexa s (Transformada de Laplace).

2.5.1 Excitação em tensão

Circulando na malha do primário, obtém-se a seguinte expressão em função da tensão de entrada, U_i :

$$U_i = (R_p + sL_p)I_p + E_p \quad (2.1)$$

em que e_p é a força eletromotriz induzida pela corrente I_s , que atravessa as bobinas do secundário, e é dada por,

$$E_p = -sM_1I_s + sM_2I_s = -s(M_1 - M_2)I_s \quad (2.2)$$

obtendo-se assim

$$U_i = (R_p + sL_p)I_p - s(M_1 - M_2)I_s \quad (2.3)$$

Na malha dos secundários temos as tensões de cada secundário, U_{S1} e U_{S2} ,

$$\begin{cases} U_{S1} = -(R_{S1} + sL_{S1})I_s + E_{S1} \\ U_{S2} = (R_{S2} + sL_{S2})I_s + E_{S2} \end{cases} \quad (2.4)$$

em que as forças eletromotrizes induzidas são dadas por,

$$\begin{cases} E_{S1} = sM_1I_p + sM_3I_s \\ E_{S2} = sM_2I_p - sM_3I_s \end{cases} \quad (2.5)$$

resultando em,

$$\begin{cases} U_{S1} = sM_1I_p - (R_{S1} + sL_{S1})I_s + sM_3I_s \\ U_{S2} = sM_2I_p + (R_{S2} + sL_{S2})I_s - sM_3I_s \end{cases} \quad (2.6)$$

Como a tensão de saída é dada por,

$$U_o = U_{S1} - U_{S2} \quad (2.7)$$

vem que,

$$U_o = s(M_1 - M_2)I_p - (R_{S1} + sL_{S1} + R_{S2} + sL_{S2})I_s + s2M_3I_s \quad (2.8)$$

De forma a simplificar a expressão (2.8), considere-se que,

$$\begin{cases} R_s = R_{S1} + R_{S2} \\ L_s = L_{S1} + L_{S2} \end{cases} \quad (2.9)$$

obtendo-se a expressão para a tensão de saída do secundário,

$$U_o = s(M_1 - M_2)I_p - (R_s + sL_s)I_s + s2M_3I_s \quad (2.10)$$

A tensão de saída também está relacionada com a carga R_c , pela expressão,

$$U_o = R_c I_S \quad (2.11)$$

resultando na seguinte equação para o secundário,

$$s(M_1 - M_2)I_p - (R_S + R_c + sL_S)I_S + s2M_3I_S = 0 \quad (2.12)$$

A partir das equações obtidas para o primário (2.3) e secundário (2.12), pode escrever-se o seguinte sistema de equações,

$$\begin{cases} U_i = (R_p + sL_p)I_p - s(M_1 - M_2)I_S \\ s(M_1 - M_2)I_p - (R_S + R_c + sL_S)I_S + s2M_3I_S = 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

a partir do qual se obtém para a corrente no secundário,

$$I_S = \frac{s(M_1 - M_2)}{\left[L_p(L_S - 2M_3) - (M_1 - M_2)^2 \right] s^2 + \left[R_p(L_S - 2M_3) + (R_S + R_c)L_p \right] s + R_p(R_S + R_c)} U_i \quad (2.14)$$

e para a tensão de saída, tendo em conta a expressão (2.11),

$$U_o = \frac{sR_c(M_1 - M_2)}{\left[L_p(L_S - 2M_3) - (M_1 - M_2)^2 \right] s^2 + \left[R_p(L_S - 2M_3) + (R_S + R_c)L_p \right] s + R_p(R_S + R_c)} U_i \quad (2.15)$$

Dado não se ter acesso ao ponto médio dos enrolamentos do secundário, não é possível determinar separadamente as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas. Contudo, estas aparecem sempre como $(L_S - 2M_3)$.

Se se considerar que $L_p(L_S - 2M_3) \gg (M_1 - M_2)^2$, pode-se fazer a aproximação

$$\left[L_p(L_S - 2M_3) - (M_1 - M_2)^2 \right] \approx L_p(L_S - 2M_3), \text{ resultando,}$$

$$U_o = \frac{sR_c(M_1 - M_2)}{L_p(L_S - 2M_3)s^2 + \left[R_p(L_S - 2M_3) + (R_S + R_c)L_p \right]s + R_p(R_S + R_c)} U_i \quad (2.16)$$

vindo, portanto, para a função de transferência,

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{sR_c(M_1 - M_2)}{L_p(L_S - 2M_3)s^2 + \left[R_p(L_S - 2M_3) + (R_S + R_c)L_p \right]s + R_p(R_S + R_c)} \quad (2.17)$$

Os valores M_1 e M_2 dependem da posição x do núcleo [11], segundo as relações,

$$\begin{cases} M_1(x) = M(0) + ax + bx^2 + \dots \\ M_2(x) = M(0) - ax + bx^2 - \dots \end{cases} \quad (2.18)$$

onde $M(0)$ é a parcela fixa das indutâncias mútuas e os coeficientes a e b representam as dependências linear e quadrática das indutâncias em relação à posição, x , do núcleo móvel. Considera-se suficiente uma aproximação de 1ª ordem, uma vez que as dependências de ordem superior à quadrática são muito inferiores a esta, vindo então:

$$M_1(x) - M_2(x) \approx 2ax \quad (2.19)$$

Desta forma, de acordo com (2.19), pode-se escrever a função de transferência,

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{s2axR_c}{As^2 + Bs + C}, \quad \text{onde} \quad \begin{cases} A = L_p(L_S - 2M_3) \\ B = R_p(L_S - 2M_3) + (R_S + R_c)L_p \\ C = R_p(R_S + R_c) \end{cases} \quad (2.20)$$

No domínio do tempo, o módulo da tensão de saída é,

$$|U_o(\omega)| = 2aR_c U_i \frac{\omega}{\sqrt{(C - A\omega^2)^2 + (\omega B)^2}} |x| \quad (2.21)$$

com,

$$\omega = 2\pi f \quad (2.22)$$

onde f corresponde à frequência de excitação do LVDT.

Passando o denominador da equação (2.20) para o domínio do tempo ($s = j\omega$), vem,

$$(As^2 + Bs + C)\Big|_{s=j\omega} = (C - \omega^2 A) + j\omega B \quad (2.23)$$

De onde se pode retirar a expressão para a fase, em função da frequência,

$$\varphi(\omega) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega B}{C - \omega^2 A} \quad (2.24)$$

Verifica-se a partir da expressão anterior que existe um valor de frequência para o qual a fase é nula, isto é, $\varphi(\omega) = 0$, para $x > 0$. Esse valor ocorre quando se verifica a relação $C - \omega^2 A = 0$ e é dado por,

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_p(R_s + R_c)}{L_p(L_s - 2M_3)}} \quad (2.25)$$

A equação (2.20) é comparável à função de um filtro passa banda,

$$\frac{U_o}{U_i} = G \frac{2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.26)$$

onde ζ e ω_0 são constantes do modelo. A amplitude e fase de $\frac{U_o}{U_i}$ encontram-se representadas na Figura 2.5.

Para avaliar o andamento da amplitude e fase à custa das expressões (2.21) e (2.24), realizou-se o gráfico, apresentado na Figura 2.5, admitindo os parâmetros (obtidos em ensaios apresentados adiante): $R_p = 105\Omega$, $L_p = 6,62\text{mH}$, $R_s = 95\Omega$, $(L_s - 2M_3) = 5,00\text{mH}$, $R_c = 1\text{k}\Omega$, $U_i = 14\text{V}$, $a = 3,21\text{mH}$, $x = +1$ e $f = 2000\text{Hz}$.

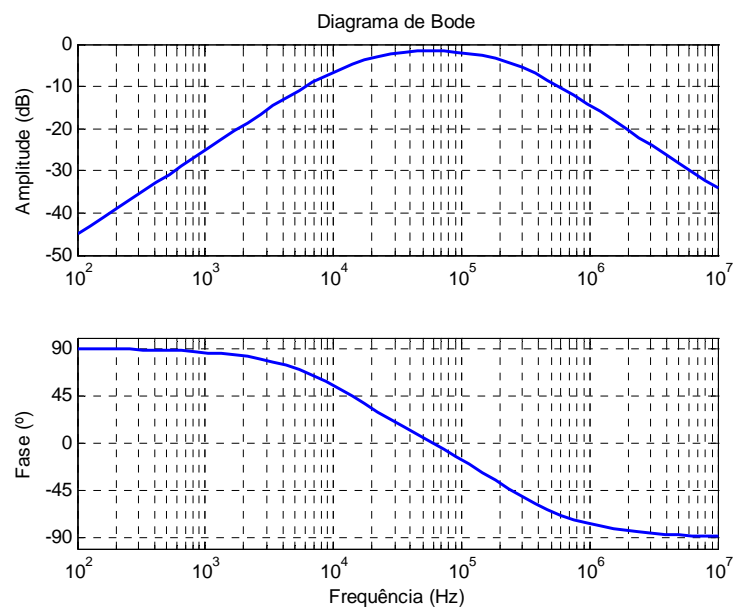


Figura 2.5 – Diagrama de Bode: excitação em tensão.

A sensibilidade do LVDT obtém-se derivando o módulo da tensão de saída em ordem a uma determinada grandeza. Tendo em conta a expressão (2.21) pode-se calcular a sensibilidade em ordem à frequência ω – equação (2.27) – ou em ordem à posição x – equação (2.28).

A sensibilidade à posição é dada pela expressão:

$$S_1 = \frac{d|U_o(\omega)|}{dx} = 2aR_cU_i \frac{\omega}{\sqrt{(C - A\omega^2)^2 + (\omega B)^2}} \quad (2.27)$$

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

De acordo com ensaios realizados para a determinação de parâmetros do LVDT (Tabela 2.2), sabe-se que para a posição extrema de $x=+1$, $M_1 - M_2 = 6,42\text{mH}$. Partindo da expressão (2.19), obtém-se um valor de $a = 3,21\text{mH}$.

Assumindo uma frequência constante, $f = 2000\text{Hz}$, verificou-se que a sensibilidade não depende da posição x , e tem um valor constante de

$$S_1 = 7,69 \frac{\text{mV}/\text{mm}}{\text{V}_{\text{exc}}}$$

A sensibilidade à frequência é dada por:

$$S_2 = \frac{d|U_0(\omega)|}{d\omega} = 2a|x|R_c U_i \frac{C^2 - A^2\omega^4}{\sqrt[3]{(C - A\omega^2)^2 + (\omega B)^2}} \quad (2.28)$$

A sensibilidade à frequência para uma excitação em tensão, para várias posições x , segue um andamento típico, mostrado na Figura 2.6.

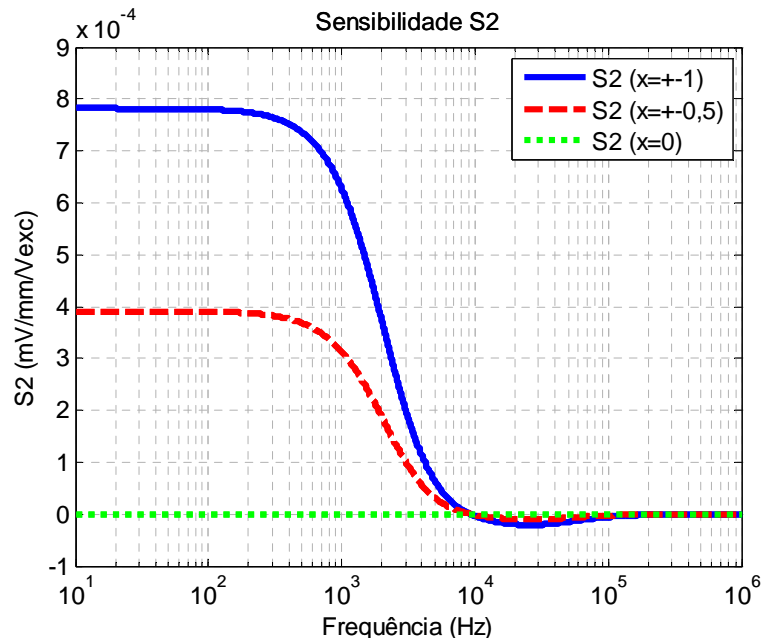


Figura 2.6 – Sensibilidade à frequência, para excitação em tensão.

2.5.2 Excitação em corrente

As forças eletromotrizes induzidas no secundário, para uma montagem com excitação em corrente, são iguais às obtidas para a excitação em tensão, conforme expressão (2.10), onde

$$U_o = s(M_1 - M_2)I_p - (R_s + sL_s)I_s + s2M_3I_s \quad \text{com} \quad I_p = I_i \quad (2.29)$$

A tensão à saída (aos terminais do secundário do LVDT) é,

$$U_o = R_c I_s \quad (2.30)$$

A substituição da expressão (2.30) na equação (2.29), resulta na seguinte expressão que traduz o valor da tensão de saída, U_o , em função da corrente de entrada, I_i :

$$U_o = s(M_1 - M_2) \frac{R_c}{R_c + R_s + s(L_s - 2M_3)} I_i \quad (2.31)$$

Por conseguinte, pode-se escrever a função transferência para este sistema,

$$\frac{U_o}{I_i} = \frac{sR_c(M_1 - M_2)}{s(L_s - 2M_3) + (R_c + R_s)} \quad (2.32)$$

Com uma fonte de corrente i_i , a excitar o LVDT em vez da fonte de tensão u_i , para o módulo da tensão de saída, recorrendo de novo a (2.19), vem:

$$|U_o(\omega)| = 2aR_c I_i \frac{\omega}{\sqrt{(R_c + R_s)^2 + \omega^2(L_s - 2M_3)^2}} |x| \quad (2.33)$$

e para a fase,

$$\varphi(\omega) = \text{sgn}(x) \frac{\pi}{2} - \text{arctg} \frac{L_s - 2M_3}{R_s + R_c} \quad (2.34)$$

Na Figura 2.7 são apresentadas a amplitude e fase relativa à expressão (2.32). Os valores usados, são os mesmos utilizados no subcapítulo acima – 2.5.1 Excitação em tensão. Neste caso e para uma excitação em corrente, considerou-se uma corrente de excitação de $I_i = 10 \text{ mA}$.

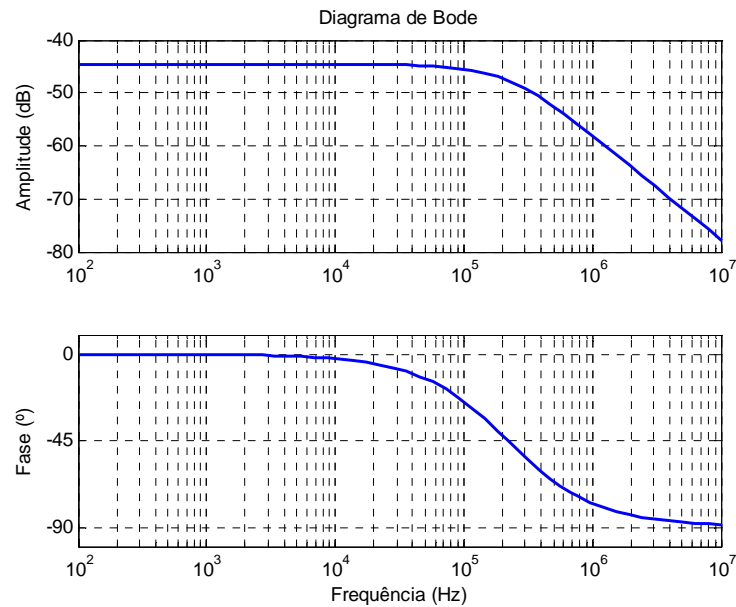


Figura 2.7 – Diagrama de Bode: excitação em corrente.

A sensibilidade do LVDT à posição, será calculada de acordo com a expressão,

$$S_3 = \frac{d|U_0(\omega)|}{dx} = 2aR_c I_i \frac{\omega}{\sqrt{(R_c + R_s)^2 + (L_s - 2M_3)^2 \omega^2}} \quad (2.35)$$

Para uma frequência constante, $f = 2000 \text{ Hz}$, a sensibilidade é igual a

$$S_3 = 0,74 \frac{\text{mV/mm}}{\text{A}_{\text{exc}}}$$

A sensibilidade à frequência é dada por:

$$S_4 = \frac{d|U_0(\omega)|}{d\omega} = 2a|x|R_c I_i \frac{(R_c + R_s)^2}{\sqrt[3]{(R_c + R_s)^2 + (L_s - 2M_3)^2 \omega^2}} \quad (2.36)$$

A sensibilidade à frequência para uma excitação em corrente, para várias posições x , é mostrada na Figura 2.8.

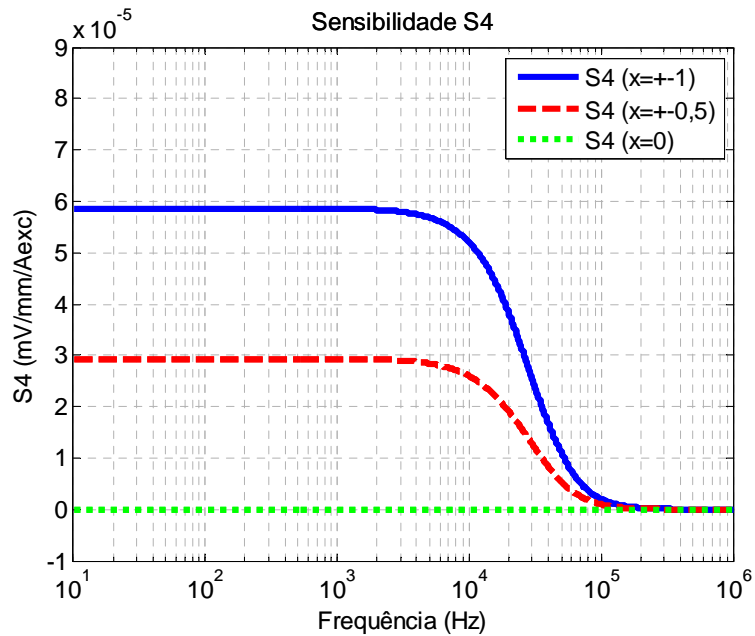


Figura 2.8 – Sensibilidade à frequência, para excitação em corrente.

2.6 Parâmetros do LVDT

De forma a conhecer os parâmetros do LVDT foram realizados dois ensaios, conforme os esquemas da Figura 2.9 e Figura 2.12. O primeiro ensaio permitiu determinar os valores de R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$, enquanto o segundo, os valores de R_s e $(L_s - 2M_3)$.

Os ensaios foram realizados, recorrendo a um gerador de sinais, impondo uma tensão sinusoidal de $U_{ef} = 1\text{ V}$, i.e., $U_{i\ pp} = 2,83\text{ V}$, a uma frequência de 2000 Hz. Em série com o gerador de sinais colocou-se uma resistência, $R = 100\ \Omega$, com 1% de tolerância.

Para cada um dos ensaios, foram medidas as tensões envolvidas para 10 posições do núcleo, com o multímetro (Fluke 45) na gama nominal de 3V.

Pretendendo-se que o erro associado à medição das várias tensões fosse mínimo, era crucial que os ensaios e medições fossem feitos nas mesmas condições. Para tal, foi utilizado o mesmo aparelho de medida – multímetro (Fluke 45) – na mesma gama nominal de 3V.

Enquanto na montagem com excitação em tensão, a tensão de alimentação se divide pela resistência R e pelo enrolamento primário do LVDT, na montagem com excitação em corrente todos os elementos são percorridos pela mesma corrente.

A vantagem de fazer estes ensaios com excitação do LVDT em corrente, é permitir a circulação de uma corrente constante, definida pela resistência R .

Ensaio 1: Determinação dos parâmetros do LVDT – R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$

O esquema de montagem relativo a este ensaio apresenta-se na Figura 2.9. Neste ensaio foi excitado o enrolamento primário do LVDT, u_p , ficando o secundário em aberto.

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

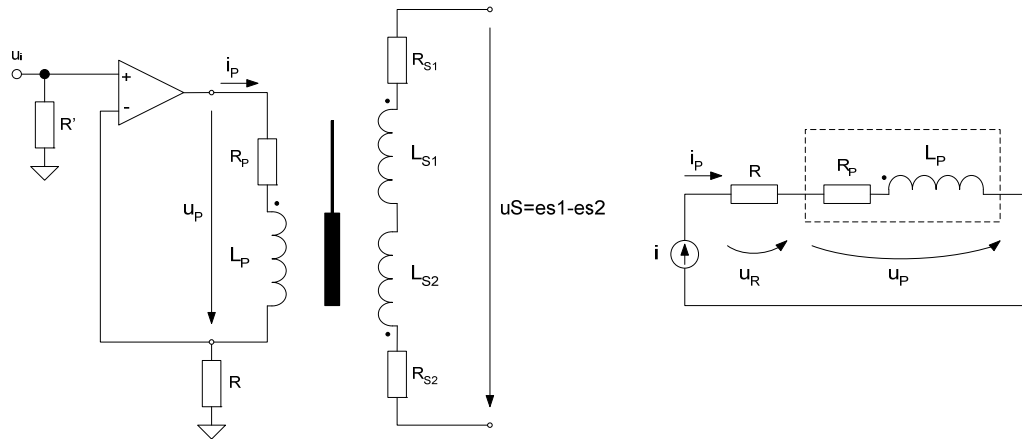


Figura 2.9 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Esquema elétrico para Ensaio 1: R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$.

Para a determinação dos parâmetros R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$ foi feita a análise vetorial das tensões. Tendo em conta a Figura 2.10 a) e de acordo com o “Teorema dos cossenos”, sabe-se que a relação dos lados com o ângulo α é dada por:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha \quad (2.37)$$

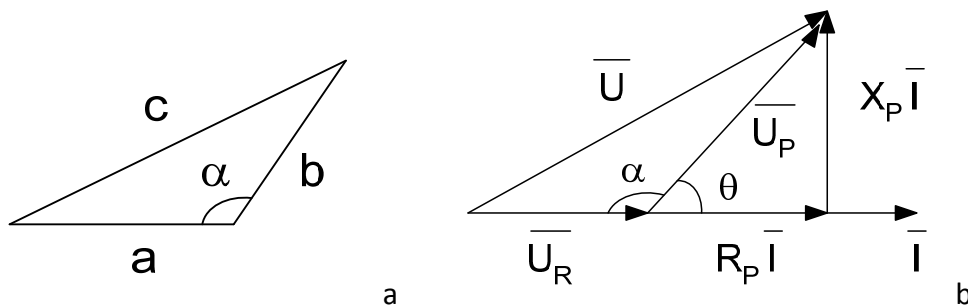


Figura 2.10 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Diagramas vetoriais para Ensaio 1.
a) Teorema dos cossenos; b) Tensões presentes no esquema da Figura 2.9.

Na Figura 2.10 b) é apresentado o diagrama de tensões deste ensaio. De acordo com o teorema dos cossenos,

$$\cos \alpha = \frac{U^2 - U_R^2 - U_P^2}{-2U_R U_P} \quad (2.38)$$

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

Sabendo que $\alpha + \theta = 180^\circ$ e de acordo com as propriedades dos cosenos, $\cos \alpha = -\cos \theta$. Assim obtém-se,

$$\cos \theta = \frac{U^2 - U_R^2 - U_P^2}{2U_R U_P} \quad (2.39)$$

A resistência e indutância do primário são dados por,

$$\begin{cases} R_p = R \frac{U_P}{U_R} \cos \theta \\ L_p = \frac{1}{\omega} R \frac{U_P}{U_R} \sin \theta \end{cases} \quad (2.40)$$

Por fim, a diferença entre as indutâncias mútuas, entre o enrolamento primário e cada secundário será calculada de acordo com a expressão,

$$(M_1 - M_2) = R \frac{e_{S1} - e_{S2}}{2\pi f U_R} \quad (2.41)$$

Na Tabela 2.2 abaixo, apresentam-se os valores obtidos e calculados a partir do Ensaio 1, para a determinação dos parâmetros do LVDT. De acordo com esta tabela foram construídos os gráficos apresentados na Figura 2.11.

Tabela 2.2 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Ensaio 1: R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$.

	Posição (mm)	U (V)	U _r (V)	U _p (V)	R _p (Ω)	L _p (mH)	Z _p (Ω)	X _p (Ω)	es1-es2 (V)	M1-M2 (mH)	I _p (mA)
x=+1	0,00	2,2916	1,0277	1,3946	106,53	6,69	135,7	84,1	0,8289	6,42	10,28
	1,36	2,2920	1,0277	1,3946	106,62	6,68	135,7	83,9	0,7850	6,08	10,28
	9,02	2,2867	1,0277	1,3901	106,07	6,68	135,3	83,9	0,5358	4,15	10,28
	16,69	2,2781	1,0277	1,3799	105,54	6,60	134,3	83,0	0,2886	2,23	10,28
	24,38	2,2697	1,0277	1,3729	104,65	6,61	133,6	83,0	0,0471	0,36	10,28
x=0	25,00	2,2689	1,0277	1,3723	104,55	6,61	133,5	83,1	0,0279	0,22	10,28
	32,02	2,2669	1,0277	1,3710	104,29	6,62	133,4	83,2	0,1971	1,53	10,28
	39,66	2,2708	1,0277	1,3759	104,49	6,66	133,9	83,7	0,4407	3,41	10,28
	47,31	2,2730	1,0277	1,3792	104,54	6,70	134,2	84,2	0,6913	5,35	10,28
x=-1	50,00	2,2709	1,0277	1,3771	104,36	6,69	134,0	84,1	0,7792	6,03	10,28

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

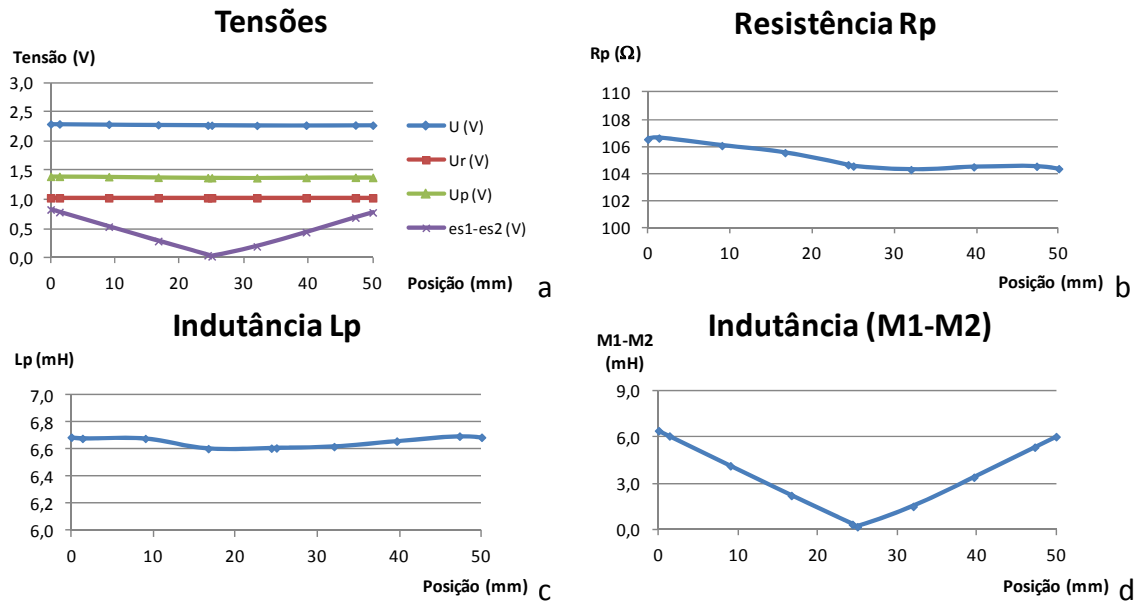


Figura 2.11 – Determinação de parâmetros: formas de onda retiradas do ensaio 1.

a) Tensões; b) Resistência Rp; c) Indutância Lp; d) Indutância M1-M2.

Ensaio 2: Determinação dos parâmetros do LVDT – R_S e $(L_S - 2M_3)$

O esquema de montagem relativo a este ensaio apresenta-se na Figura 2.12. Neste ensaio foram excitados os enrolamentos secundários do LVDT, $u_s = u_{s1} - u_{s2}$, e o primário ficou em circuito aberto.

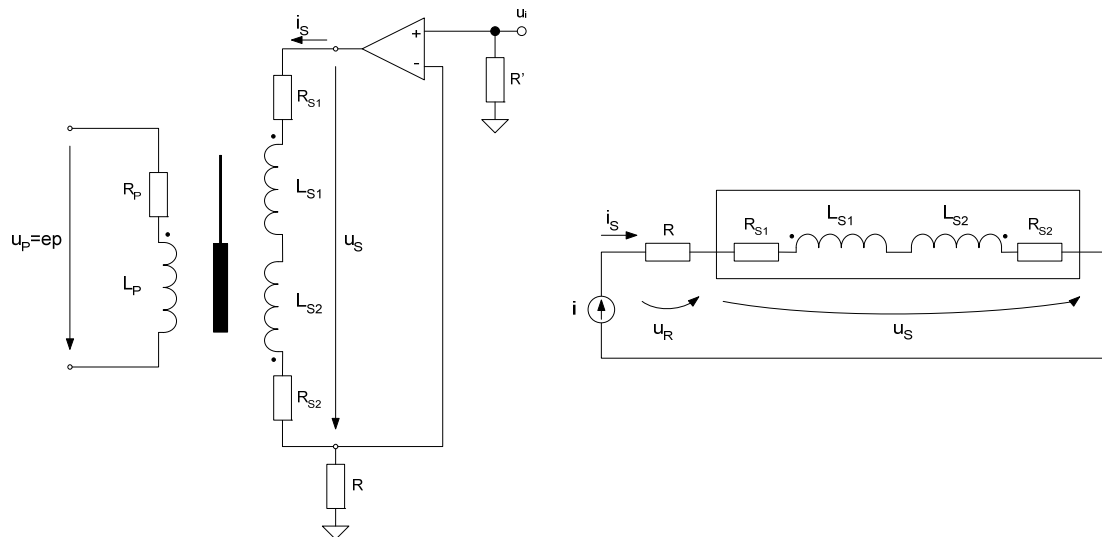


Figura 2.12 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Esquema elétrico para Ensaio 2: R_S e $(L_S - 2M_3)$.

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

Analogamente ao ensaio 1, para este ensaio vem:

$$\cos \theta = \frac{U^2 - U_R^2 - U_S^2}{2U_R U_S} \quad (2.42)$$

Considerando que

$$\begin{cases} R_S = R_{S1} + R_{S2} \\ L_S - 2M_3 = L_{S1} + L_{S2} \end{cases} \quad (2.43)$$

obtêm-se os valores para a resistência e impedância do secundário:

$$\begin{cases} R_S = R \frac{U_S}{U_R} \cos \theta \\ L_S - 2M_3 = \frac{1}{\omega} R \frac{U_S}{U_R} \operatorname{sen} \theta \end{cases} \quad (2.44)$$

Na Tabela 2.3 abaixo, apresentam-se os valores obtidos e calculados a partir do Ensaio 1, para a determinação dos parâmetros do LVDT. De acordo com esta tabela foram construídos os gráficos apresentados na Figura 2.13.

Tabela 2.3 – Determinação dos parâmetros do LVDT. Ensaio 2: R_S e $(L_S - 2M_3)$.

	Posição (mm)	U (V)	U _r (V)	U _s (V)	R _s (Ω)	L _s -2M ₃ (mH)	Z _s (Ω)	X _s (Ω)	ep (V)	I _s (mA)
x=+1	0,00	2,5308	1,0210	1,6788	122,03	8,77	164,4	110,2	0,8377	10,21
	1,36	2,4420	1,0210	1,5809	116,15	8,15	154,8	102,4	0,7848	10,21
	9,02	2,0709	1,0210	1,1498	92,29	5,14	112,6	64,5	0,4986	10,21
	16,69	1,8721	1,0210	0,9156	77,89	3,54	89,7	44,4	0,2406	10,21
	24,38	1,8004	1,0210	0,8350	72,03	3,08	81,8	38,7	0,0360	10,21
x=0	25,00	1,7993	1,0210	0,8342	71,91	3,09	81,7	38,8	0,0212	10,21
	32,02	1,8281	1,0210	0,8697	74,02	3,36	85,2	42,2	0,1557	10,21
	39,66	1,9789	1,0210	1,0501	84,94	4,62	102,9	58,0	0,3972	10,21
	47,31	2,2948	1,0210	1,4179	106,16	7,13	138,9	89,5	0,6805	10,21
x=-1	50,00	2,4601	1,0210	1,6051	116,71	8,38	157,2	105,3	0,7852	10,21

CAPÍTULO 2 LVDT – Sensor de deslocamento indutivo

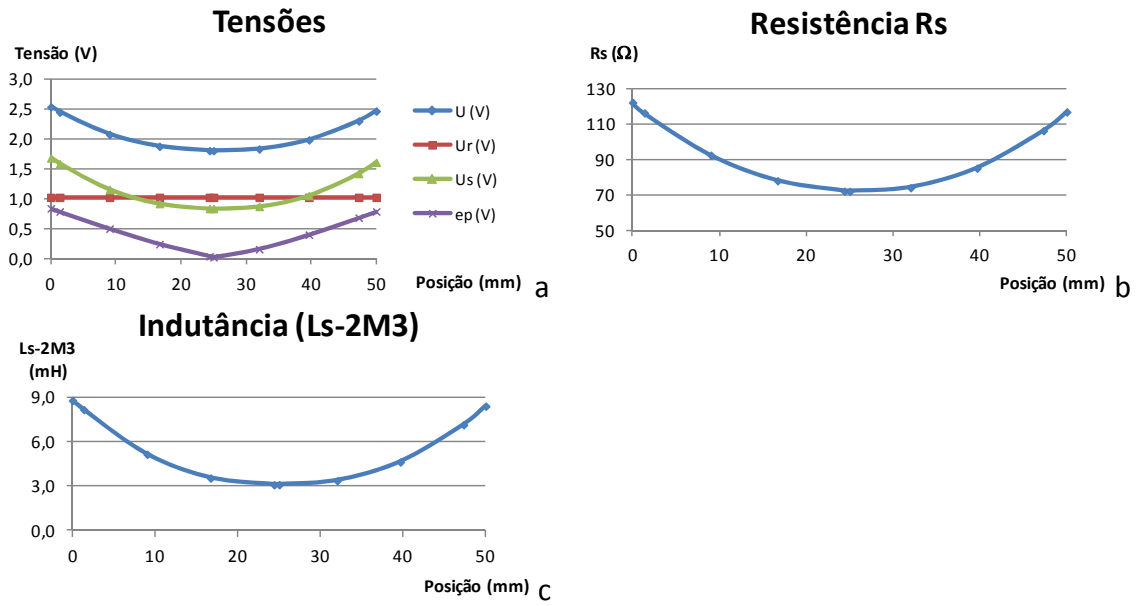


Figura 2.13 – Determinação de parâmetros: formas de onda retiradas do ensaio 2.
a) Tensões; b) Resistência Rs; c) Indutância Ls-2M3.

CAPÍTULO 3 **Desmodulação síncrona**

Resumo:

Neste capítulo apresenta-se um estudo acerca da desmodulação síncrona, onde serão utilizados um condicionador de sinal e circuitos de desfasamento.

3.1 Introdução

A desmodulação síncrona é sensível à fase, uma vez que o desmodulador se comporta como um retificador de onda completa operando em sincronismo com o sinal de excitação ou com o sinal de sincronismo do circuito.

No mercado existem módulos para o condicionamento de sinal do LVDT, como por exemplo, o NE5521 da Philips [12] e o AD698 da Analog Devices.

No presente estudo será utilizado o condicionador de sinal NE5521D, que inclui oscilador, desmodulador e filtro [13][14].

A desmodulação síncrona da tensão de saída do LVDT corresponde apenas a um bloco, representado na Figura 3.1, do processo que visa a obtenção de uma tensão contínua proporcional ao deslocamento do núcleo do LVDT [15].

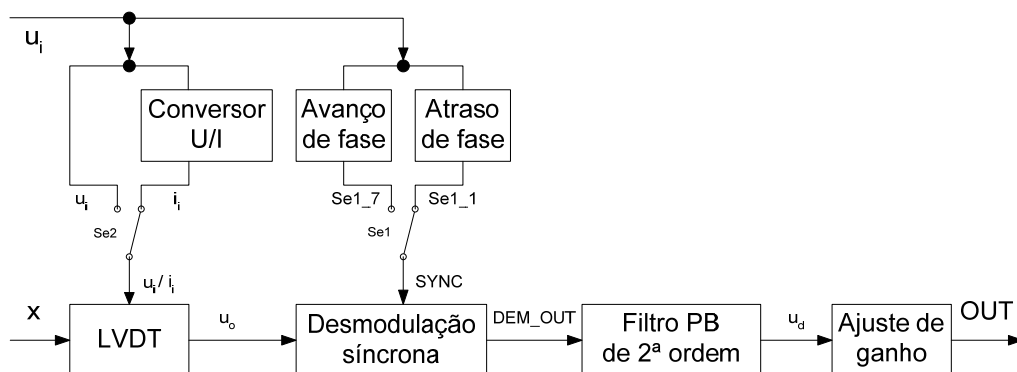


Figura 3.1 – Diagrama de blocos para obtenção de uma tensão contínua proporcional ao deslocamento do núcleo do LVDT.

3.2 Condicionador de sinal

O condicionador de sinal NE5521D consiste em três blocos essenciais: circuito oscilador, desmodulador e filtro.

O circuito oscilador é constituído por uma resistência R_T e uma capacidade C_T . O desmodulador tem aos terminais de entrada a tensão do secundário do LVDT e uma tensão de referência e à saída uma tensão já desmodulada, que irá ser filtrada utilizando um amplificador incluído no NE5521D.

3.2.1 Circuito oscilador

O circuito oscilador associado ao integrado NE5521D é composto por uma resistência R_T e uma capacidade C_T externas. De acordo com a respetiva folha de características, a frequência de oscilação é dada pela expressão [12]:

$$f_{OSC} = \frac{U_{REF} - 1,3}{U_{REF} (R_T + 1500) C_T} \quad (3.1)$$

A excitação do LVDT foi dimensionada para uma frequência de oscilação $f = 2000 \text{ Hz}$. Tipicamente, a capacidade é estimada em 10 vezes o inverso da frequência de oscilação, de acordo com (3.2):

$$C_T = \frac{10}{f} (\mu\text{F}) \quad (3.2)$$

Assim obtém-se uma capacidade com $C_T = 5 \text{ nF}$. Para um valor de $U_{REF} = 8,0 \text{ V}$ e substituindo em (3.1), escolheu-se o melhor par de valores para R_T e C_T :

$$\begin{cases} R_T = 47 \text{ k}\Omega \\ C_T = 8,2 \text{ nF} \end{cases}$$

que garante uma frequência de oscilação $f = 2106 \text{ Hz}$.

3.2.2 Desmodulador

A desmodulação do sinal de saída do LVDT pode ser feita recorrendo a diferentes tipos de montagens e depende do número de terminais do secundário acessíveis. Como o L50R [7] apenas tem disponíveis dois terminais do secundário acessíveis, a desmodulação síncrona é a melhor solução a implementar.

De forma a obter um sinal contínuo que traduza o deslocamento do núcleo, ter-se-á que desmodular e filtrar o sinal presente aos terminais do secundário do LVDT.

Na Figura 3.2 apresenta-se o diagrama de blocos que permite fazer a conversão da tensão aos terminais do secundário (u_s) na tensão contínua (u_d) proporcional ao deslocamento, x .

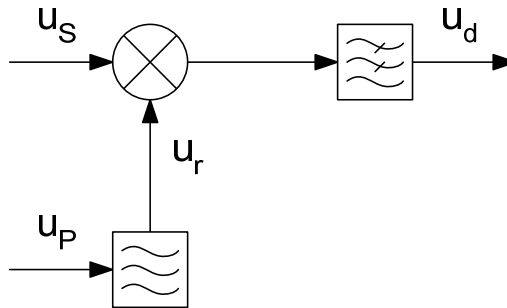


Figura 3.2 – Diagrama de blocos com desmodulador e filtro.

No desmodulador utilizado, a retificação é obtida em sincronismo com as tensões u_r , que provém da tensão de excitação u_p , e u_s , também síncronas.

Assim, quando a tensão u_r (SYNC na Figura 3.3) é inferior a uma dada referência, o sinal (DEM_IN na Figura 3.3) é invertido e quando a tensão u_r é superior à referência, o sinal passa por um seguidor de tensão. A tensão u_r é obtida a partir da defasagem da tensão u_p e a forma de o fazer será abordado de seguida.

O esquema representativo do circuito, integrante do NE5521D, que faz a desmodulação, é apresentado na Figura 3.3.

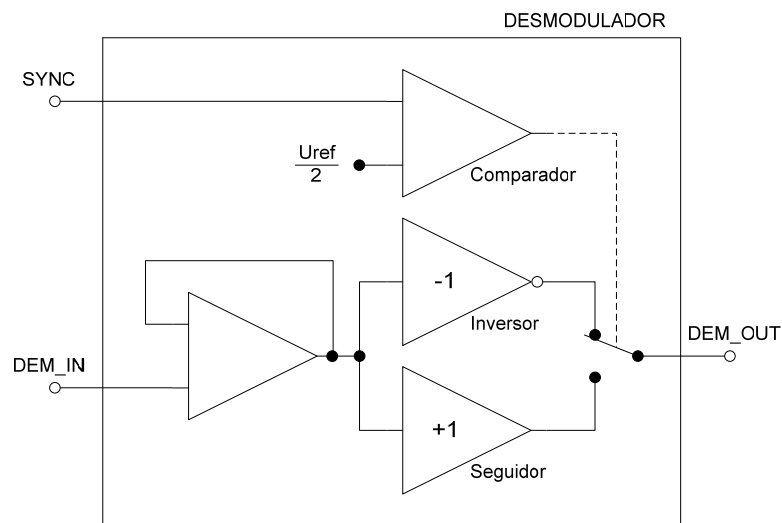


Figura 3.3 – Desmodulador síncrono do NE5521D [13].

CAPÍTULO 3 Desmodulação síncrona

A tensão aos terminais do secundário, u_s , é dada por

$$u_s(t) = U_s \cos \omega t \quad (3.3)$$

com $\omega = 2\pi f$ e U_s a amplitude.

Os desmoduladores síncronos usam como referência uma forma de onda quadrada simétrica com amplitude $+U_r$ e $-U_r$. A sua série de Fourier é

$$u_r(t) = \frac{4U_r}{\pi} \sum_0^{\infty} (-1)^n \frac{\cos 2\pi(2n+1)f_r t}{2n+1} \quad (3.4)$$

e o seu espetro consiste nas harmónicas ímpares de f_r com amplitude decrescente. Considerando, *à priori*, $U_r=1$ e $f_r=f$, a tensão de referência para $n=0$ (1ª harmónica), será

$$u_r(t) = \frac{4}{\pi} \cos \omega t \quad (3.5)$$

De acordo com a Figura 3.2 a tensão à saída do desmodulador é dada por

$$u_d(t) = u_s(t)u_r(t) \quad (3.6)$$

Substituindo as equações (3.3) e (3.5) em (3.6), a tensão desmodulada é dada por

$$u_d(t) = \frac{2}{\pi} U_s (1 + \cos 2\omega t) \quad (3.7)$$

O valor médio de u_d é igual a

$$\langle u_d \rangle = \frac{2}{\pi} U_s \quad (3.8)$$

Como interessa apenas a componente contínua da equação (3.7), a componente alternada será filtrada por um filtro passa-baixo de 2ª ordem.

3.2.3 Filtro passa-baixo de 2ª ordem

O filtro passa-baixo elimina a frequência da portadora e outras harmónicas de frequência superior à frequência de corte, originando uma saída sem ruído. A amplitude do sinal retificado e filtrado refere a magnitude do deslocamento, x .

Para eliminar a componente alternada da equação (3.7), dimensionou-se um filtro VCVS (*Voltage-Controlled Voltage Source*) passa-baixo de 2ª ordem com resposta em frequência do tipo *Butherworth*, apresentado na Figura 3.4.

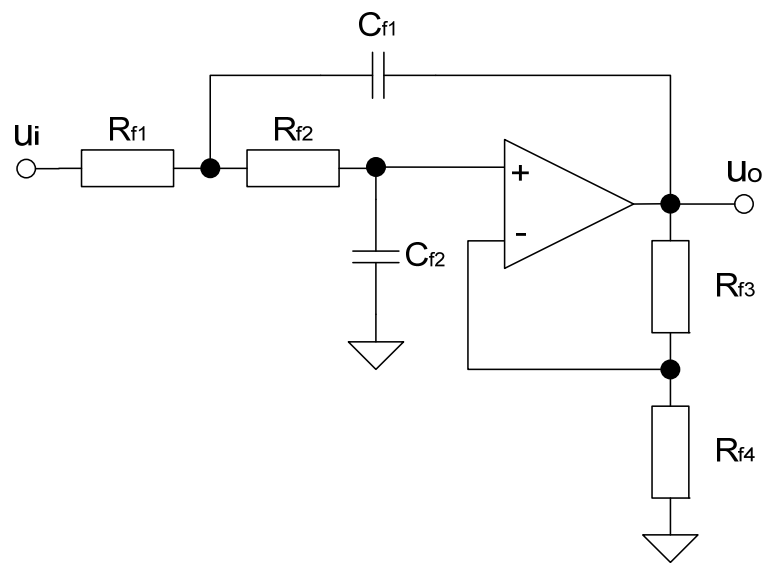


Figura 3.4 – Filtro passa-baixo de 2ª ordem, com ajuste de zero.

A função típica desse filtro é dada pela expressão,

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{G\omega_c^2}{s^2 + \alpha\omega_c s + \omega_c^2} \quad (3.9)$$

onde G é o ganho da montagem amplificadora, ω_c é a frequência de corte, α é o fator de amortecimento ($\alpha = 2\zeta$) e

$$\begin{cases} \omega_c^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \\ \alpha\omega_c = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} + \frac{1-G}{R_2 C_2} \end{cases} \quad (3.10)$$

O dimensionamento do filtro foi efetuado, tendo em conta [11]:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{2} \\ G = 3 - \alpha \\ R_{f1} = R_{f2} \\ C_{f1} = C_{f2} \end{cases} \quad (3.11)$$

e sabendo que:

$$R_{f1} = \frac{1}{\omega_c C_{f1}} \quad (3.12)$$

Para que o filtro garanta uma atenuação $A = 60 \text{ dB}$ a uma frequência $\omega_0 = 4000 \text{ Hz}$, calculou-se a frequência de corte ω_c , de acordo com a expressão:

$$\frac{G(\omega)}{G(0)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (3.13)$$

O ganho inicial da montagem é igual a:

$$G(0) = 3 - \sqrt{2} = 1,586 \frac{\text{V}}{\text{V}} \Rightarrow G(0)(\text{dB}) = 20 \log(3 - \sqrt{2}) = 4,0 \text{ dB}$$

Para uma montagem com uma atenuação $A = 60 \text{ dB}$, o mesmo é dizer que se tem um ganho $G'(\omega) = -60 \text{ dB}$.

Deste modo, o ganho para uma dada frequência ω , será igual a:

$$\begin{aligned} G(\omega) &= G(0)(\text{dB}) + G'(\text{dB}) = 4 - 60 = -56 \text{ dB} \\ \Rightarrow G(\omega) &= 10^{\frac{-56}{20}} = 1,585 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \end{aligned}$$

A Figura 3.5 mostra uma resposta típica, em frequência, do filtro a implementar.

Resolvendo a equação (3.13) em ordem à frequência de corte, vem:

$$f_c = f \times 10^{\frac{-1}{2n} \log \left[\left(\frac{G(0)}{G(\omega)} \right)^2 - 1 \right]} \quad (3.14)$$

onde substituindo os valores atrás obtidos, se obtém a frequência de corte $f_c = 126,46\text{Hz}$ (f_c dimensionada).

Desta forma e atendendo à expressão (3.12) foi escolhido o melhor par de valores para R_{f1} e C_{f1} , tendo em atenção que a frequência de corte real teria que ser inferior à dimensionada.

$$\begin{cases} R_{f1} = R_{f2} = 20\text{k}\Omega \\ C_{f1} = C_{f2} = 68\text{nF} \end{cases}$$

Com estes valores, vem para a frequência de corte $f_c = 117,03\text{Hz}$ (f_c real).

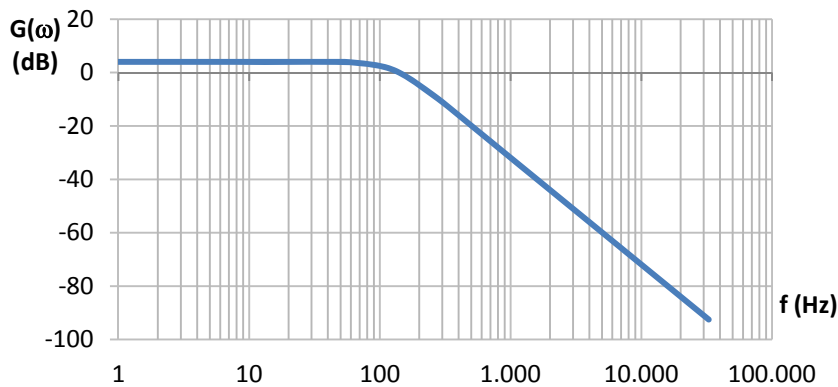


Figura 3.5 – Resposta em frequência de um filtro ativo construído com um AO.

De acordo com as expressões:

$$\begin{cases} R_{f3} = (G_A - 1)R \\ R_{f4} = R \end{cases} \quad (3.15)$$

e sabendo que R é uma resistência genérica, obteve-se o valor das resistências R_{f3} e R_{f4} :

$$\begin{cases} R_{f3} = 30\text{k}\Omega \\ R_{f4a} = 47\text{k}\Omega \\ R_{f4b} = 4,7\text{k}\Omega \end{cases}$$

onde R_{f4a} e R_{f4b} são duas resistências em série, que representam R_{f4} .

3.3 Tratamento do sinal de saída

À tensão de saída do módulo NE5521D (pino 1) foi adicionada uma montagem amplificadora (Figura 3.6) e uma montagem para o ajuste do zero (Figura 3.7).

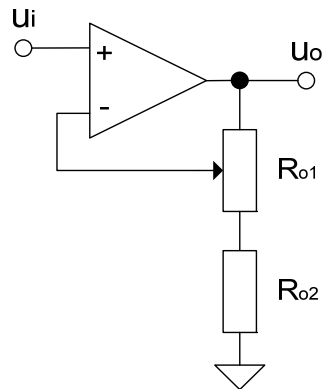


Figura 3.6 – Montagem amplificadora (AO3b).

Através da montagem amplificadora, Figura 3.6, variou-se o ganho à saída de uma a duas vezes o sinal de entrada, através das resistências:

$$\begin{cases} R_{o1} = 10 \text{ k}\Omega \\ R_{o2} = 10 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

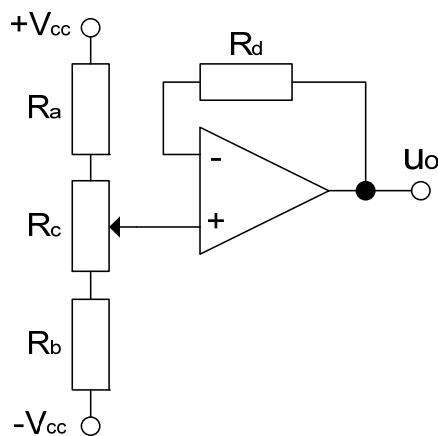


Figura 3.7 – Montagem para ajuste do zero (AO3a).

De acordo com a Figura 3.7, escolheram-se as resistências R_a , R_b e R_c que permitem eliminar o *offset* na situação de zero elétrico do condicionador de sinal do LVDT. Serão assumidos os seguintes valores:

$$\begin{cases} R_a = R_b = 10\text{k}\Omega \\ R_c = 0,5\text{k}\Omega (1\text{k}\Omega) \end{cases}$$

A resistência $R_d = 5,1\text{k}\Omega$ tem como função equilibrar as impedâncias das entradas, inversora e não inversora, do amplificador.

3.4 Excitação do LVDT

A excitação do primário do LVDT pode ser feita em tensão ou em corrente. Na Figura 3.8 apresentam-se possíveis montagens para excitação em tensão e em corrente.

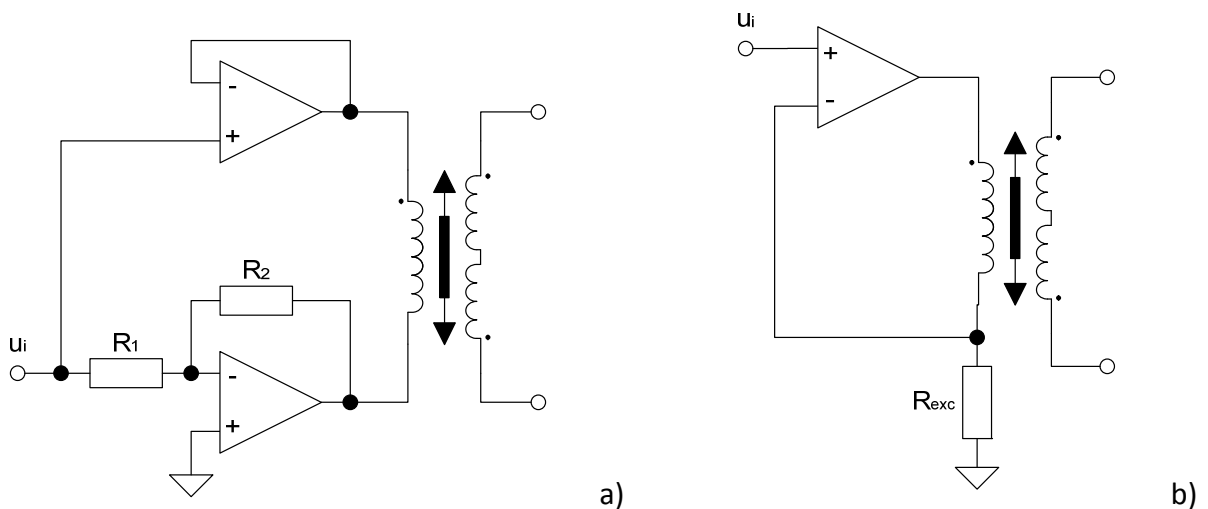


Figura 3.8 – LVDT: Montagens possíveis para a excitação do primário. a) em tensão; b) em corrente.

Quanto ao tipo de alimentação, as montagens podem ter alimentação simples (mono-alimentada) ou alimentação simétrica. Numa montagem com alimentação simples, a alimentação é feita através das tensões $\{0, +V_{CC}\}$. Já numa montagem com alimentação simétrica, esta é feita com as tensões $\{-V_{CC}, 0, +V_{CC}\}$.

Da mesma forma, a alimentação dos amplificadores operacionais (AO) é feita através das tensões $\{0, +V_{CC}\}$ ou das tensões $\{-V_{CC}, 0, +V_{CC}\}$ conforme se trate de uma alimentação simples ou simétrica, respetivamente.

Em todas as montagens será utilizada uma alimentação simétrica, estando assim o ponto médio em torno de zero Volt.

3.5 Circuitos de desfasamento

A tensão diferencial de saída do LVDT não se encontra normalmente em fase com a tensão de excitação do primário. Para promover a desmodulação síncrona será necessário ajustar a diferença de fase de forma a torna-las síncronas.

A tensão u_r , referida na Figura 3.2, resultará da tensão do primário do LVDT aplicada a um circuito de desfasamento. Esse circuito fará o avanço ou atraso de fase, conforme os pontos enunciados abaixo.

3.5.1 Circuito para avanço de fase

O circuito para avanço de fase, representado na Figura 3.9, tem como objetivo anular o desfasamento provocado pelo LVDT. A sua função de transferência é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\overline{u_o}}{\overline{u_i}} = \left| \frac{\overline{u_o}}{\overline{u_i}} \right| \left| \varphi = 1 \right| 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1}{2\pi fRC} \right) \quad (3.16)$$

onde

$$R = R_{av3} + \rho \cdot R_{av4}, \text{ com } 0 \leq \rho \leq 1 \quad (3.17)$$

Resolvendo a equação (3.16) em ordem ao par de valores RC , foram encontrados os valores de R e C para uma variação do ângulo de desfasamento definido aproximadamente no intervalo $0^\circ < \varphi < +90^\circ$.

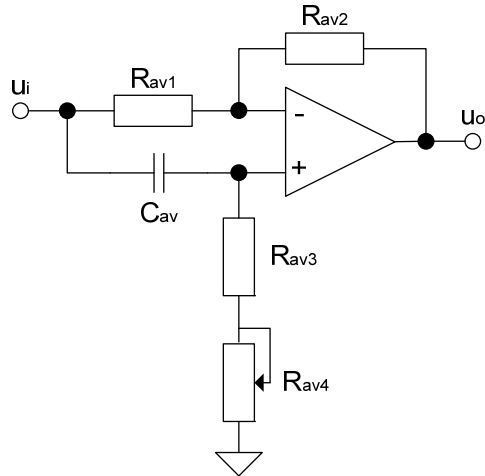


Figura 3.9 – Circuito para avanço de fase.

Tendo como base o circuito da Figura 3.9 e tendo em conta a expressão (3.17), onde R_{av3} representa a parte fixa e R_{av4} a parte variável da resistência R , obtiveram-se os seguintes valores:

$$\begin{cases} R_{av1} = R_{av2} = 20 \text{ k}\Omega \\ C_{av} = 82 \text{ nF} \\ R_{av3} = 1 \text{ k}\Omega \\ R_{av4} = 100 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Estes valores permitem um ajuste de fase no intervalo $+1,1^\circ < \varphi < +88,3^\circ$.

$$\begin{cases} R_{av3} = 1 \text{ k}\Omega \\ R_{av4} = 0 \Omega \end{cases} \Rightarrow \varphi = +88,3^\circ$$

$$\begin{cases} R_{av3} = 1 \text{ k}\Omega \\ R_{av4} = 100 \text{ k}\Omega \end{cases} \Rightarrow \varphi = +1,1^\circ$$

3.5.2 Circuito para atraso de fase

O circuito para atraso de fase, representado na Figura 3.10, tem também como objetivo anular o desfasamento provocado pelo LVDT. Esse desfasamento é dado pela seguinte equação:

$$\frac{\overline{u_o}}{\overline{u_i}} = \left| \frac{\overline{u_o}}{\overline{u_i}} \right| \varphi = 1 \left| -2 \text{tg}^{-1}(2\pi fRC) \right| \quad (3.18)$$

onde,

$$R = R_{at3} + \rho \cdot R_{at4}, \text{ com } 0 \leq \rho \leq 1 \quad (3.19)$$

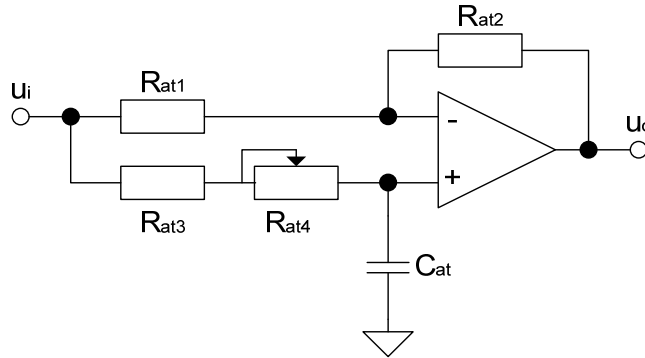


Figura 3.10 – Circuito para atraso de fase

Resolvendo a equação (3.18) em ordem ao par de valores RC , foram encontrados os valores de R e C para uma variação do desfasamento definido aproximadamente no intervalo $0^\circ < \varphi < +90^\circ$.

Tendo como base o circuito da Figura 3.10 e tendo em conta a expressão (3.19), onde R_{at3} representa a parte fixa e R_{at4} a parte variável da resistência R , obtiveram-se os seguintes valores:

$$\begin{cases} R_{at1} = R_{at2} = 20 \text{ k}\Omega \\ R_{at3} = 100 \Omega \\ R_{at4} = 10 \text{ k}\Omega \\ C_{at} = 6,8 \text{ nF} \end{cases}$$

Estes valores permitem um ajuste de fase no intervalo $-81,6^\circ < \varphi < -1,0^\circ$.

$$\begin{cases} R_{at3} = 100 \Omega \\ R_{at4} = 0 \Omega \end{cases} \Rightarrow \varphi = -1,0^\circ$$

$$\begin{cases} R_{at3} = 100 \Omega \\ R_{at4} = 10 \text{ k}\Omega \end{cases} \Rightarrow \varphi = -81,6^\circ$$

3.6 Resumo de valores e esquema utilizado

Neste ponto apresentam-se os valores dimensionados para a montagem com desmodulação síncrona e o respetivo esquema elétrico (ver Figura 3.11). Esses valores encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo dos valores dimensionados para o esquema da Figura 3.11.

Bloco	Valores
Circuito oscilador	$\begin{cases} R_T = 47 \text{ k}\Omega \\ C_T = 8,2 \text{ nF} \end{cases}$
Circuito para avanço de fase $+1,1^\circ < \varphi < +88,3^\circ$	$\begin{cases} R_{av1} = R_{av2} = 20 \text{ k}\Omega \\ C_{av} = 82 \text{ nF} \\ R_{av3} = 1 \text{ k}\Omega \\ R_{av4} = 100 \text{ k}\Omega \end{cases}$
Circuito para atraso de fase $-81,6^\circ < \varphi < -1,0^\circ$	$\begin{cases} R_{at1} = R_{at2} = 20 \text{ k}\Omega \\ R_{at3} = 100 \Omega \\ R_{at4} = 10 \text{ k}\Omega \\ C_{at} = 6,8 \text{ nF} \end{cases}$
Filtro passa-baixo de 2ª ordem	$\begin{cases} R_{f1} = R_{f2} = 20 \text{ k}\Omega \\ C_{f1} = C_{f2} = 68 \text{ nF} \\ R_{f3} = 30 \text{ k}\Omega \\ R_{f4a} = 47 \text{ k}\Omega \\ R_{f4b} = 4,7 \text{ k}\Omega \end{cases}$
Amplificação do sinal de saída	$\begin{cases} R_{o1} = 10 \text{ k}\Omega \\ R_{o2} = 10 \text{ k}\Omega \end{cases}$
Ajuste de zero	$\begin{cases} R_a = R_b = 10 \text{ k}\Omega \\ R_c = 1 \text{ k}\Omega \\ R_d = 5,1 \text{ k}\Omega \end{cases}$
Outros valores	$\begin{cases} R_p = 10 \text{ k}\Omega \\ R_{exc} = 100 \Omega \end{cases}$

NOTA: Todas as resistências utilizadas, exceto R_d , têm uma tolerância de 1%.

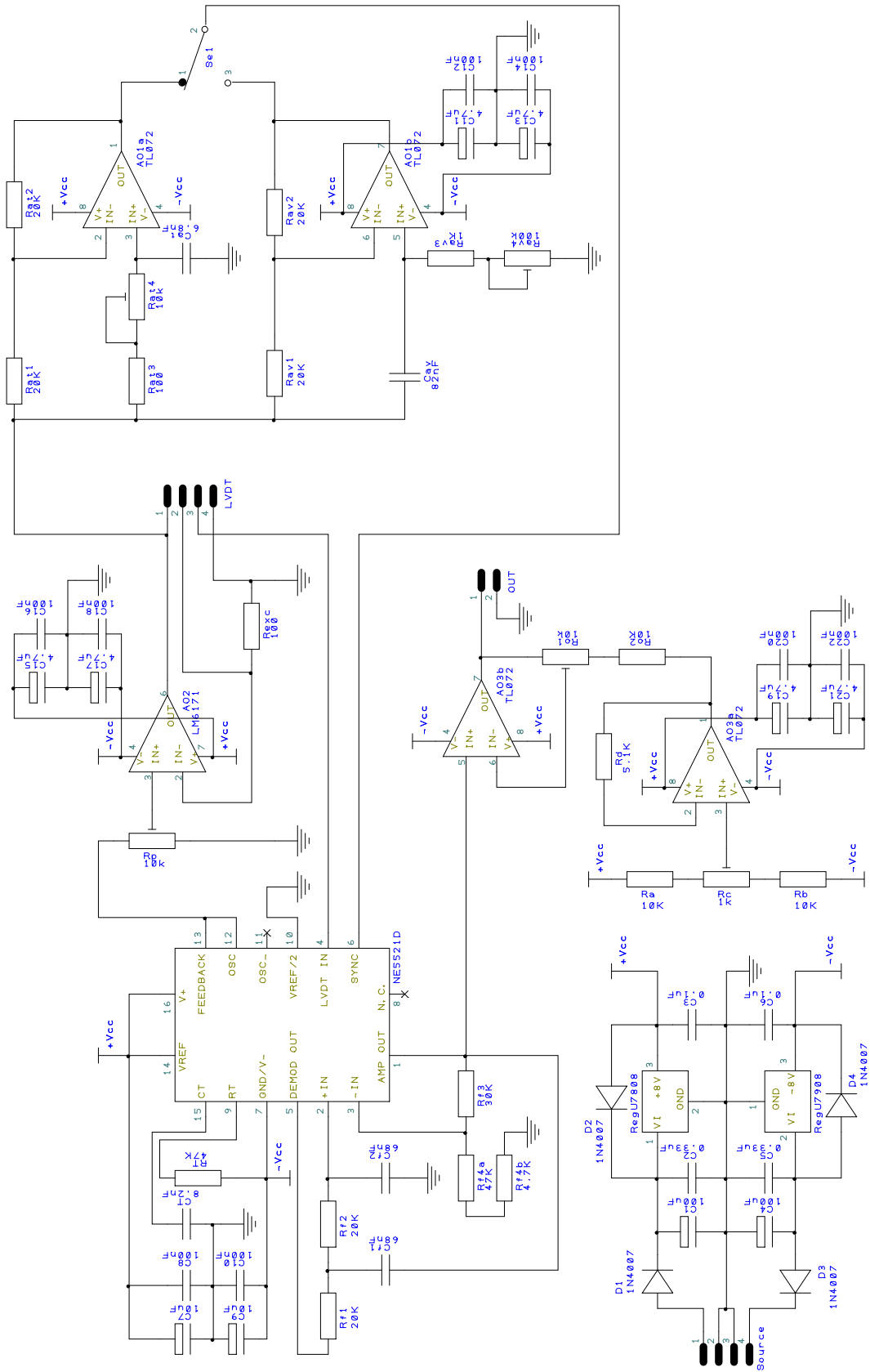


Figura 3.11 – Esquema elétrico utilizado para fazer a desmodulação síncrona do LVDT.

CAPÍTULO 4 Resultados

Resumo:

Neste capítulo são apresentados os resultados associados às componentes simulada e experimental.

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados analíticos, simulados e experimentais obtidos ao longo deste trabalho.

Será descrita a implementação experimental do processo em estudo, será apresentado o circuito elétrico e respetiva placa de circuito impresso efetuada e ainda será feita a validação dos resultados experimentais recorrendo ao *software* de simulação *MatLab Simulink*.

4.2 Expressões analíticas

Podem-se realizar, de forma analítica, os cálculos que permitem obter os valores de saída em função do deslocamento do LVDT.

Tendo como base a Figura 3.11 (apresentada no subcapítulo 3.6 Resumo de valores e esquema utilizado), serão analisadas todas as partes do circuito. A análise é feita para uma alimentação simples ($V_{CC} = +8\text{ V}$), excitação em corrente.

No pino 12 do integrado NE5521D, tem-se uma tensão sinusoidal, com uma amplitude máxima (da componente alternada), U_M , igual a,

$$u_{osc} = U_M \text{sen}(\omega t) \quad (3.20)$$

aplicada a um potenciómetro R_p (potenciómetro a meio do curso nominal). Aos terminais de saída do potenciómetro tem-se uma tensão

$$u_{Rp} = \frac{U_M}{2} \text{sen}(\omega t) \quad (3.21)$$

Esse potenciómetro está ligado à entrada não inversora de um amplificador que, através da resistência R_{exc} , permite fazer a excitação em corrente do enrolamento primário do LVDT, de acordo com a Figura 4.1.

CAPÍTULO 4 Resultados

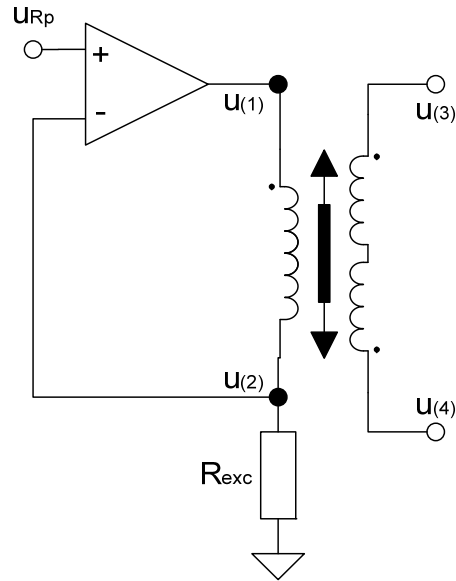


Figura 4.1 – Montagem para fazer a excitação em corrente, do LVDT.

Assim, no terminal (2) do LVDT (ver Figura 2.2 apresentada no subcapítulo 2.4 Princípio de funcionamento), tal como aos terminais do potenciômetro, ter-se-á:

$$u_{(2)} = \frac{U_M}{2} \text{sen}(\omega t) \quad (3.22)$$

No terminal (1) do LVDT ter-se-á uma tensão com uma amplitude $U_A = \frac{U_M}{2}$ e desfasada de α_1 graus, relativamente à tensão no ponto (2), devido à bobina que constitui o primário do LVDT,

$$u_{(1)} = \frac{U_M}{2} \text{sen}(\omega t + \alpha_1) \quad (3.23)$$

Desta forma, teremos uma tensão aos terminais do primário,

$$u_P = u_{(1)} - u_{(2)} = \frac{U_M}{2} [\text{sen}(\omega t + \alpha_1) - \text{sen}(\omega t)] \quad (3.24)$$

De forma a simplificar pode-se dizer que

$$u_P = U_A \text{sen}(\omega t + \alpha_P) \quad (3.25)$$

CAPÍTULO 4 Resultados

No terminal (3) do LVDT ter-se-á uma tensão desfasada de α_{PS} graus, relativamente à tensão do primário,

$$u_{(3)} = u_S = \pm U_A \text{sen}(\omega t + \alpha_P + \alpha_{PS}) \quad (3.26)$$

As parcelas da tensão $u_{(3)}$, de acordo com o operador “ \pm ”, assumem sinal positivo (“+”) para $x > 0$ e sinal negativo (“-”) para $x < 0$.

Os terminais de saída do LVDT, (3) e (4), estão ligados aos pinos 4 (LVDT IN) e 10 ($U_{ref}/2$) do módulo NE5521D, respetivamente.

No pino 6 (SYNC) entra um sinal de sincronismo com origem no terminal (1) do LVDT. Este sinal é aplicado, *à priori*, a um circuito de ajuste de fase, avanço ou atraso (Figura 3.9 ou Figura 3.10), mediante a posição do seletor S1, de modo a obter o sincronismo com o sinal de saída do LVDT. Ambos os circuitos têm como objetivo impor um desfasamento que compense o desfasamento entre primário e secundário, α_D . A tensão que se terá no pino 6 será,

$$u_{SYNC} = U_A \text{sen}(\omega t + \alpha_P + \alpha_{PS} - \alpha_D) \quad (3.27)$$

e como $\alpha_{PS} - \alpha_D = 0$, tem-se

$$u_{SYNC} = U_A \text{sen}(\omega t + \alpha_P) \equiv u_P \quad (3.28)$$

À saída do desmodulador (interno ao integrado NE5521D), no pino 5, tem-se uma onda retificada, que depois de passar por um filtro passa-baixo de 2ª ordem permite obter uma tensão contínua à saída, no pino 1, dada por,

$$u_{AMP OUT} = \pm U_A \quad (3.29)$$

4.3 Simulação do modelo a implementar

A simulação do modelo a implementar foi efetuada através do *software MatLab Simulink* da MathWorks, usando método de cálculo do *Simulink* (*Type: Variable-step; Solver: ode45 (Dormand-Prince)*).

4.3.1 Diagrama de blocos

Na Figura 3.1 (ver subcapítulo 3.6 Resumo de valores e esquema utilizado) foi apresentado o esquema elétrico que representa o funcionamento do LVDT utilizando a desmodulação síncrona. O diagrama de blocos, que o simula, será apresentado na Figura 4.2.

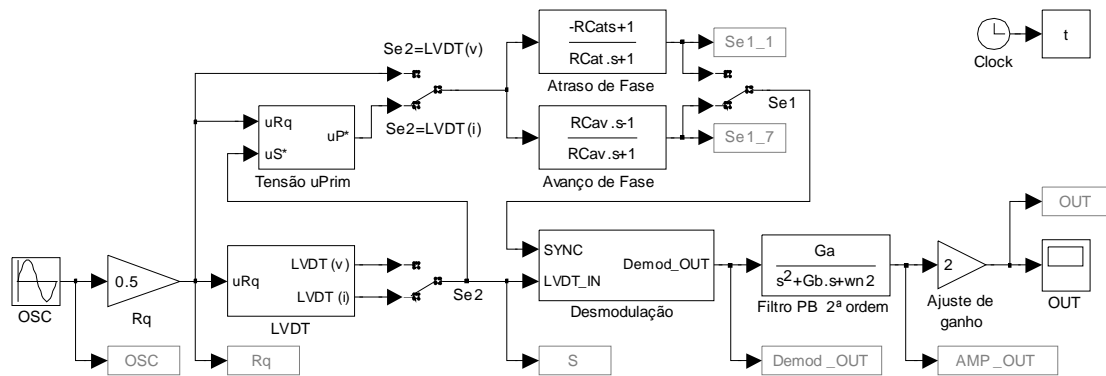


Figura 4.2 – Diagrama de blocos em *MatLab Simulink*: modelo geral.

Na figura acima, o bloco “OSC” corresponde à tensão u_{OSC} , que é a tensão à saída do pino 12 do condicionador de sinal NE5521D. Essa tensão é reduzida através do potenciômetro Rq .

O seletor $Se1$ permite a opção de selecionar um atraso ou avanço de fase em relação à tensão de entrada, u_{Rq} .

O bloco com o nome “LVDT” incorpora as equações que permitem simular a excitação do LVDT em tensão, saída “LVDT (v)”, ou em corrente, saída “LVDT (i)” e o seu diagrama de blocos interno é apresentado na Figura 4.3. O seletor $Se2$ a jusante, permite selecionar o tipo de excitação a utilizar.

CAPÍTULO 4 Resultados

O modelo do LVDT, para uma excitação em corrente, foi estudado de uma forma genérica (de acordo com a Figura 2.4), após o qual se obteve uma função de transferência (ver expressão (2.32)), que foi implementada no modelo *Simulink* através do bloco “LVDT (Exc. em corrente)” apresentado na Figura 4.3. Enquanto que na Figura 2.4 um dos terminais do primário do LVDT está diretamente ligado à massa, no esquema elétrico da Figura 3.8 b) esse terminal do primário do LVDT está ligado a uma resistência que liga posteriormente à massa. Tal situação implica que, a tensão $u_{p*} = u_{Prim} + u_{exc}$, onde u_{Prim} é a tensão diretamente aos terminais do enrolamento primário do LVDT e tendo em conta que $u_{exc} = u_{Rq}$.

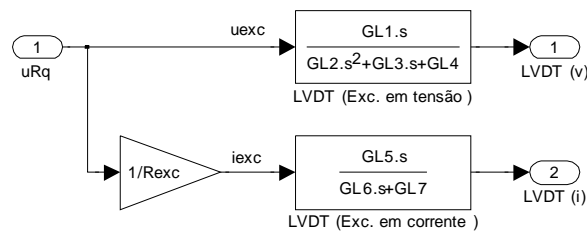


Figura 4.3 – Diagrama de blocos em MatLab Simulink: Bloco “LVDT”.

Como a função de transferência obtida, dada pela expressão (2.32), relaciona apenas a tensão de saída do secundário com a corrente de excitação do primário foi necessário criar o bloco “Tensão uPrim” (Figura 4.4) para assim obter a tensão u_{p*} e relacioná-la com as formas de onda noutros pontos do circuito, uma vez que esta tensão não se encontra diretamente disponível em nenhum ponto do diagrama de blocos do modelo geral.

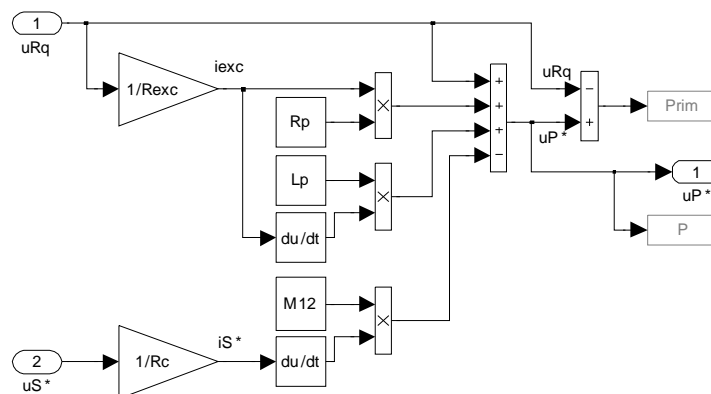


Figura 4.4 – Diagrama de blocos em MatLab Simulink: Bloco “Tensão uPrim”.

O seletor a jusante do bloco “Tensão uPrim” é acionado em concordância com o seletor Se2, aquando da seleção do tipo de excitação do LVDT.

O Bloco “Desmodulação” tem dois sinais de entrada: o primeiro é aplicado a partir do seletor Se1, que impõe que o sincronismo seja feito através de uma forma de onda com atraso ou avanço de fase; o segundo a partir do seletor Se2, decide se a excitação é em tensão ou corrente. O diagrama de blocos interno, do bloco “Desmodulação”, é apresentado na Figura 4.5.

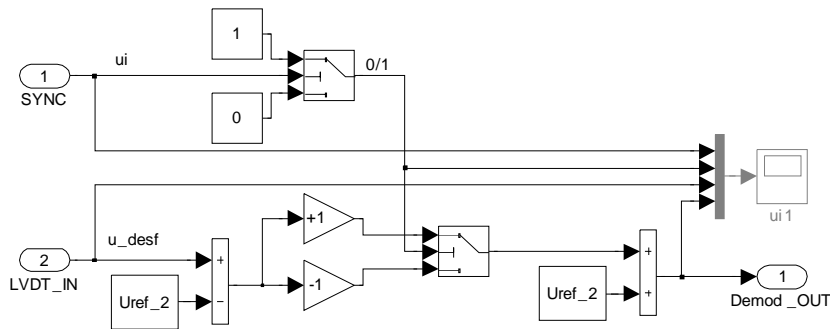


Figura 4.5 – Diagrama de blocos em MatLab Simulink: Bloco “Desmodulação”.

4.3.2 Código auxiliar

Neste subcapítulo é mencionado o código presente nos ficheiros auxiliares ao *Simulink*, também conhecidos por “m file” e que se apresentam nos Apêndices 1 e 2.

No Apêndice 1 será apresentado o código que permite gerar as figuras presentes nesta dissertação, referentes à simulação em *Simulink*. Também foi feita uma pequena rotina para que se pudesse visualizar uma certa tensão, várias vezes no mesmo gráfico, apenas com a variação de um parâmetro (posição do núcleo, x).

No código apresentado no Apêndice 2 atribuem-se valores às constantes usadas, são definidas algumas funções de cálculo e foram realizadas pequenas rotinas para validação de resultados.

4.4 Implementação experimental

A implementação prática da montagem apresentada na Figura 3.11 foi feita fazendo a ligação do LVDT (Figura 4.6) à placa do circuito desmodulador em circuito impresso (Figura 4.7).

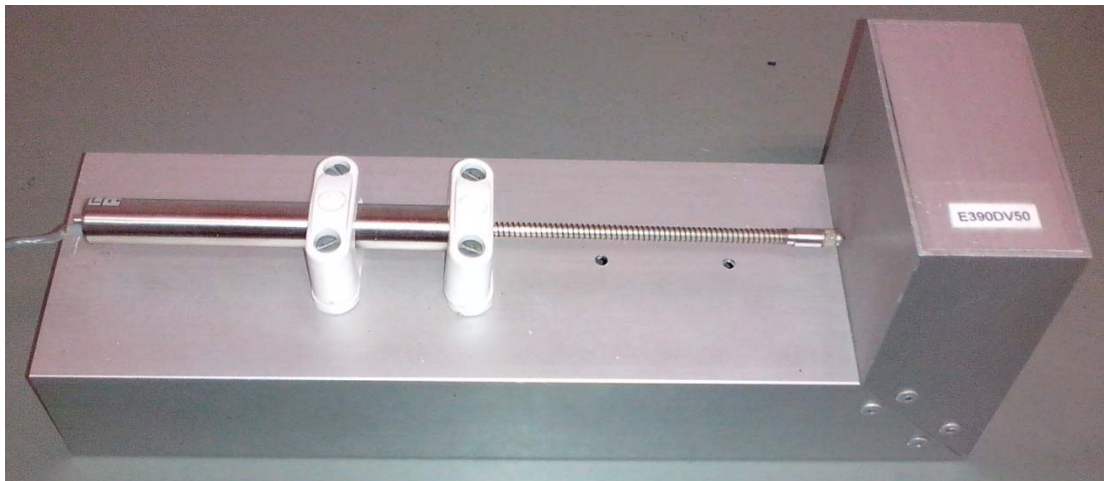


Figura 4.6 – LVDT fixo num suporte para medição.

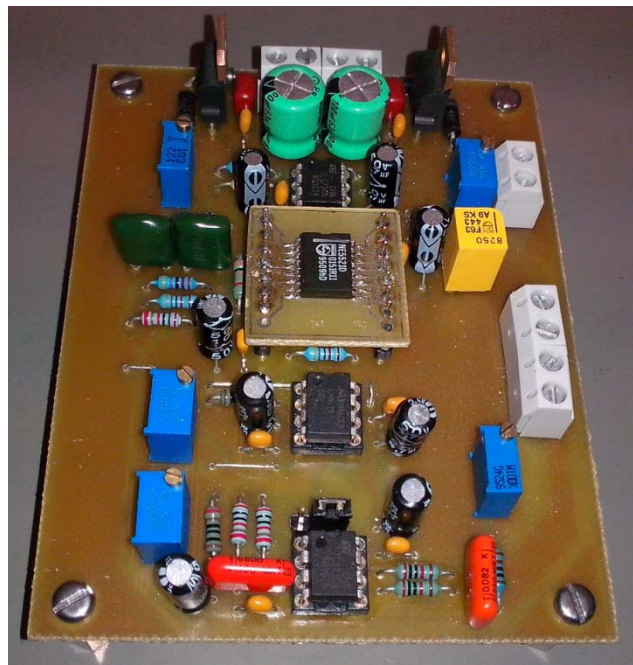


Figura 4.7 – Placa do circuito desmodulador em circuito impresso.

CAPÍTULO 4 Resultados

Na Figura 4.8 apresenta-se a disposição dos componentes na placa de circuito impresso e na Figura 4.9 o *layout* de uma placa adaptadora para o módulo condicionador de sinal NE5521D que efetua a interligação do integrado NE5521D à placa do circuito desmodulador (Figura 4.8). Este adaptador foi criado para permitir a fácil separação do condicionador de sinal do restante circuito.

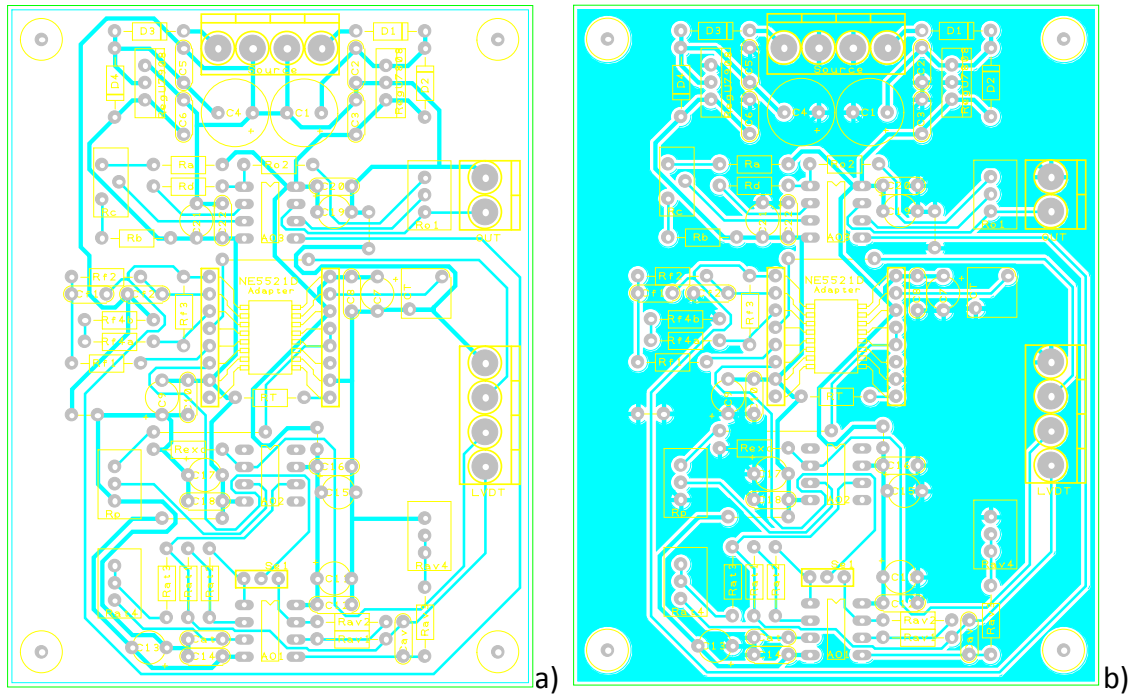


Figura 4.8 – *Layout* da placa do circuito desmodulador. a) sem plano de massa; b) com plano de massa.

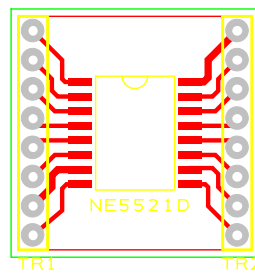


Figura 4.9 – *Layout* da placa adaptadora para o módulo NE5521D.

4.5 Resultados simulados e experimentais

Os resultados obtidos foram lidos num osciloscópio, com as pontas de prova em pontos específicos da montagem (ver Figura 4.10). O osciloscópio usado foi o DSO3062a da Agilent Technologies [18]. A fonte de alimentação foi regulada para uma tensão simétrica de $\pm 14V$ com limitação de corrente a $100mA$. Para assegurar uma tensão $V_{cc} = \pm 8V$ foram usados dois reguladores de tensão – L7808 e L7908 – para tensões positivas e negativas, respetivamente.

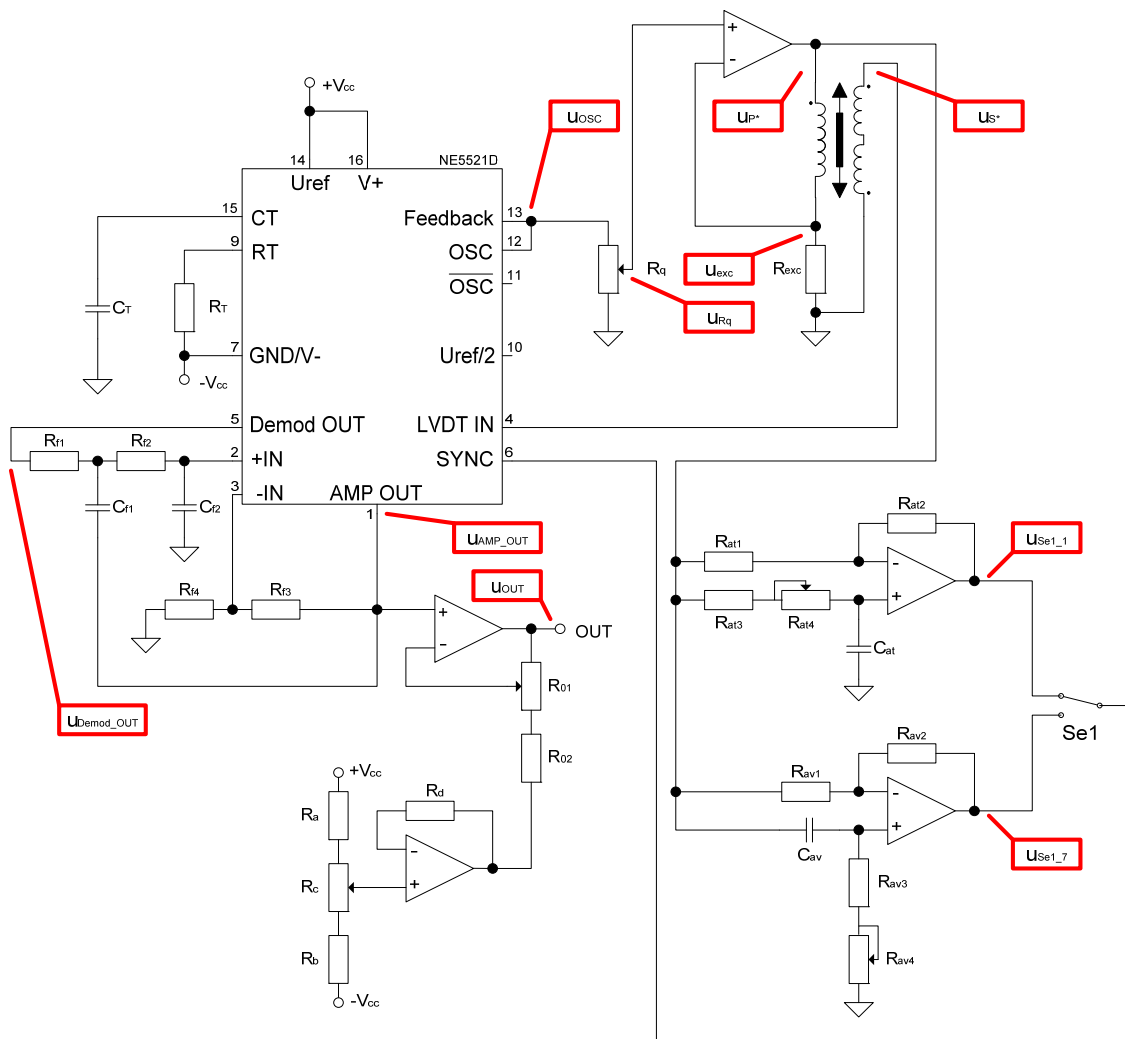


Figura 4.10 – Esquema elétrico simplificado da montagem implementada: tensões a simular e a obter experimentalmente.

Na Figura 4.10 são apresentados, o esquema elétrico simplificado da placa utilizada na parte experimental, bem como os pontos onde foram colocadas as pontas

CAPÍTULO 4 Resultados

de prova (canal 1 e 2 – CH1 e CH2 respetivamente) que estavam ligadas ao osciloscópio, bem como os pontos simulados em *MatLab Simulink*. Todas as medidas foram efetuadas entre o ponto em questão e a massa. Os pontos indicados (tensões) são: u_{OSC} , u_{Rq} , u_{exc} , u_{p*} , u_{s*} , u_{se1_1} , u_{se1_7} , u_{Demod_OUT} , u_{AMP_OUT} e u_{OUT} .

O módulo condicionador de sinal NE5521D, ao ser alimentado com uma tensão diferencial (-8V, 0V, +8V), apresenta no pino 12 (u_{OSC}) uma tensão alternada sinusoidal como se pode constatar na Figura 4.11. Essa tensão foi reduzida para metade através do potenciômetro u_{Rq} .

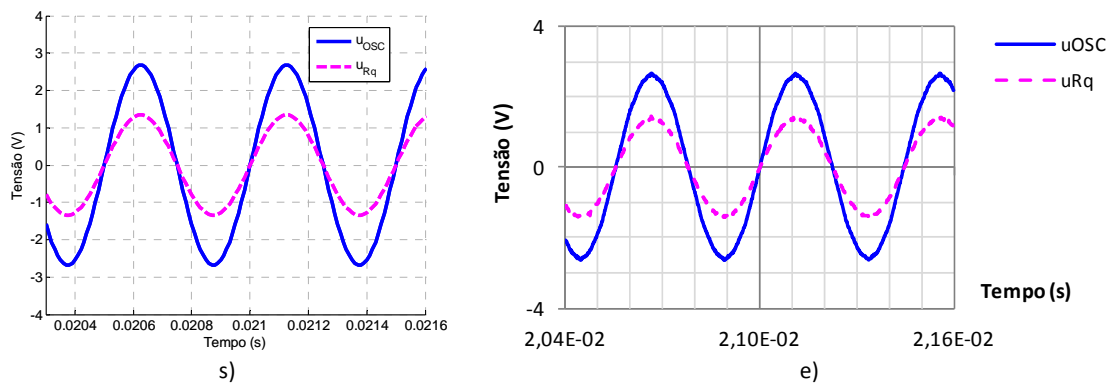


Figura 4.11 – Módulo NE5521D: tensão de saída do oscilador e sua atenuação (externa).
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

Na Figura 4.12 são apresentadas as formas de onda associadas à excitação do LVDT. Sendo $u_{Exc}=u_{Rq}$ e considerando u_{Prim} a tensão aos terminais do enrolamento primário do LVDT, podem-se relacionar as tensões presentes na Figura 4.12 da seguinte forma, $u_{p*} = u_{Prim} + u_{Rq}$.

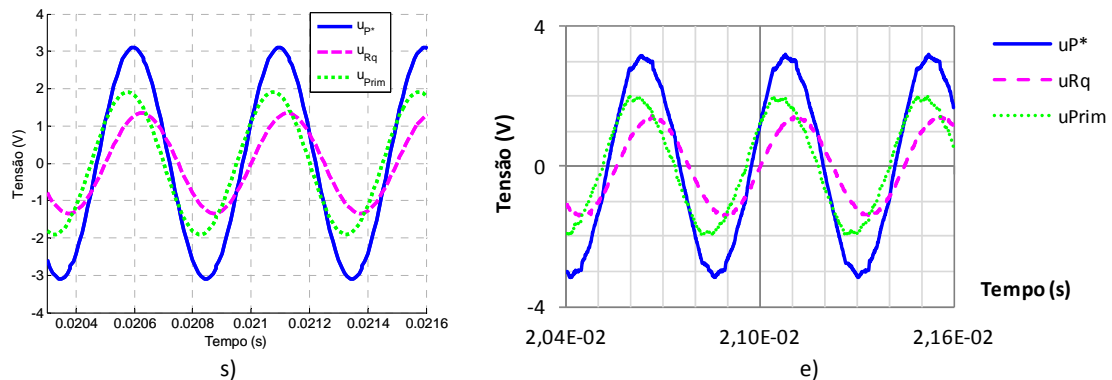


Figura 4.12 – LVDT: tensões para a excitação do primário.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

CAPÍTULO 4 Resultados

Na Figura 4.13 é apresentada a tensão aos terminais dos enrolamentos secundários (u_{S^*} - tensão diferencial), para várias posições do núcleo móvel do LVDT, $x=\{-1;-0,5;0;+0,5;+1\}$.

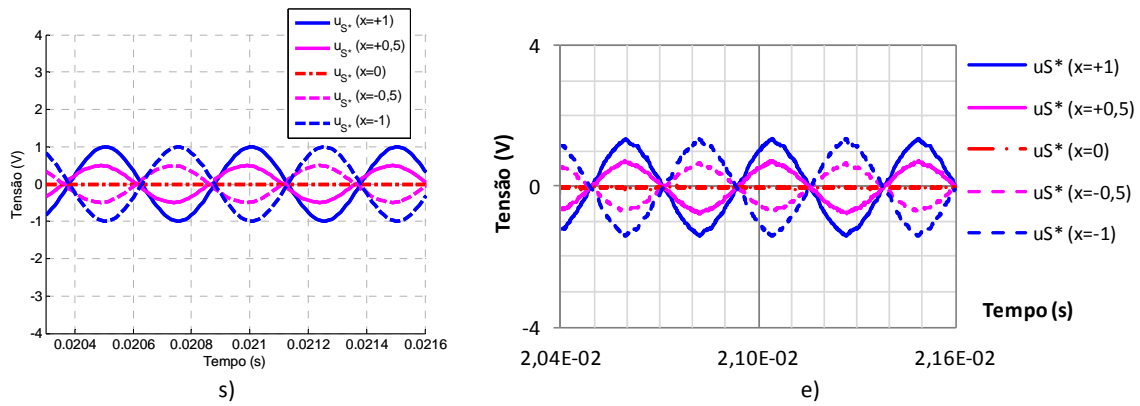


Figura 4.13 – LVDT: tensão do secundário, para várias posições do núcleo.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

Por uma questão de simplificação e facilidade de leitura das figuras, deste ponto em diante, as curvas foram comparadas com a tensão u_{S^*} apenas para a situação ($x=+1$).

A tensão aos terminais do enrolamento primário (u_{P^*}) e dos enrolamentos secundários (u_{S^*}) estão representados na Figura 4.14. Pode observar-se que existe um desfasamento entre os dois enrolamentos, que se verifica tanto no resultado simulado como no experimental, o qual será compensado adiante através do ajuste de fase.

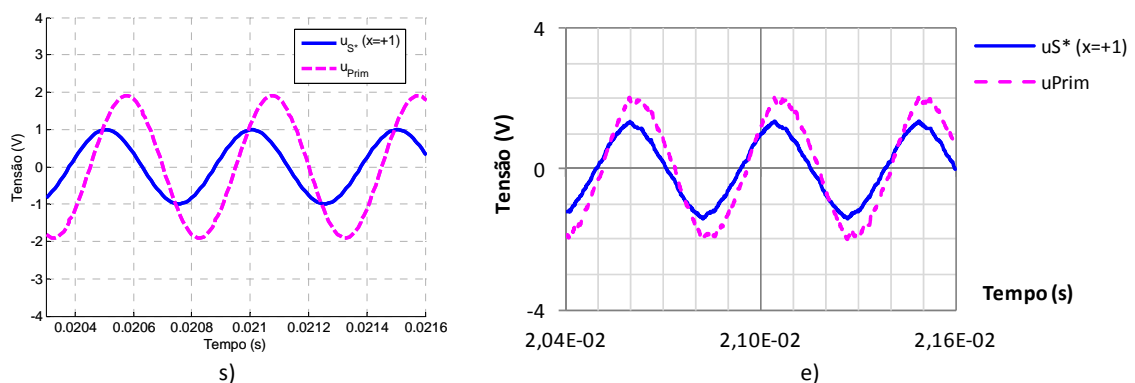


Figura 4.14 – LVDT: tensões no primário e secundário.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

CAPÍTULO 4 Resultados

O esquema elétrico apresentado da Figura 4.10 permite o ajuste de fase para qualquer dispositivo, possibilitando fazer o atraso ou avanço. A seleção do tipo de ajuste é feita através do seletor $Se1$, sendo $Se1_1$ a posição relativa ao atraso de fase e $Se1_7$ relativa ao avanço de fase, onde u_{Se1_1} e u_{Se1_7} correspondem às suas tensões respectivas.

No caso do presente trabalho, com o LVDT ensaiado, teve que se promover o avanço de fase da tensão u_{p^*} de forma a ficar em fase com a tensão u_{s^*} . Assim, depois de fazer o ajuste, a tensão do sinal de entrada no condicionador de sinal (u_{Se1_7}) deveria estar em fase com a tensão do secundário (u_{s^*}), como mostra a Figura 4.15.

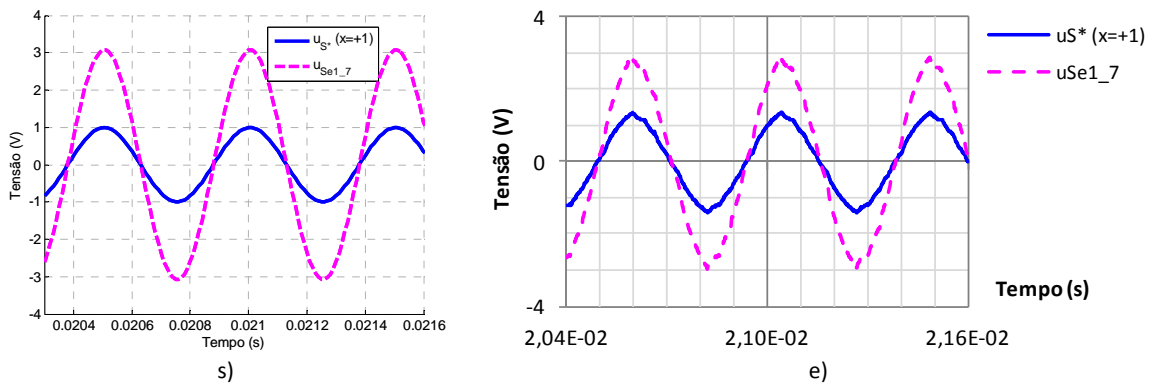


Figura 4.15 – LVDT: Ajuste de fase.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

A tensão do secundário e a tensão do primário com a fase corretamente ajustada são impostas ao condicionador de sinal NE5521D e fazem uso do desmodulador interno, colocando no terminal 5 (Demod_OUT) uma tensão desmodulada, u_{Demod_OUT} .

A forma de onda desmodulada (Figura 4.16) fica com este aspeto retificado depois de fazer o ajuste de fase corretamente, caso contrário a forma de onda, u_{Demod_OUT} , teria deformações ou transições bruscas nas passagens por zero da tensão u_{s^*} .

CAPÍTULO 4 Resultados

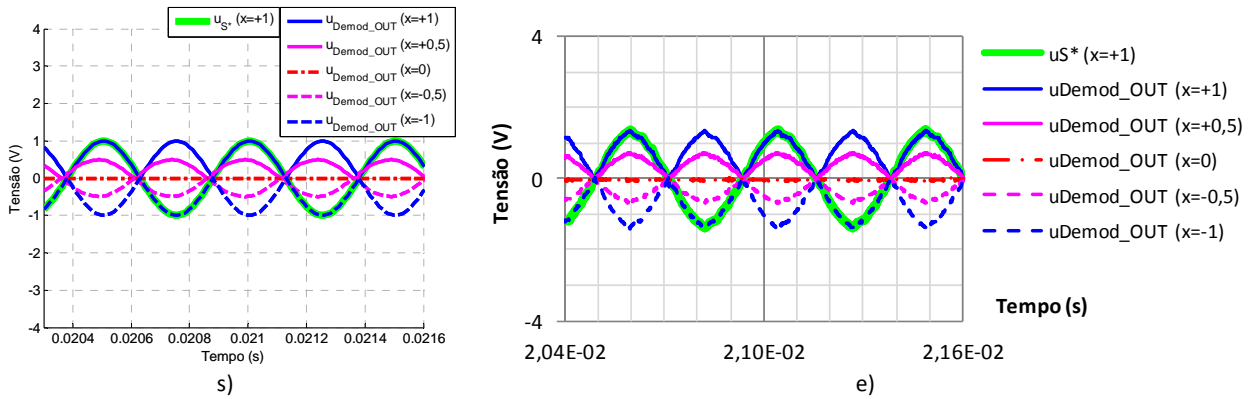


Figura 4.16 – LVDT: Desmodulação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

Depois de desmodulado, o sinal é filtrado usando um amplificador operacional interno do NE5521D, próprio para o efeito.

Verifica-se na Figura 4.17 que a filtragem garante um andamento da forma de onda da tensão u_{AMP_OUT} muito próximo de um sinal contínuo, sendo o *ripple* imperceptível ao olho humano.

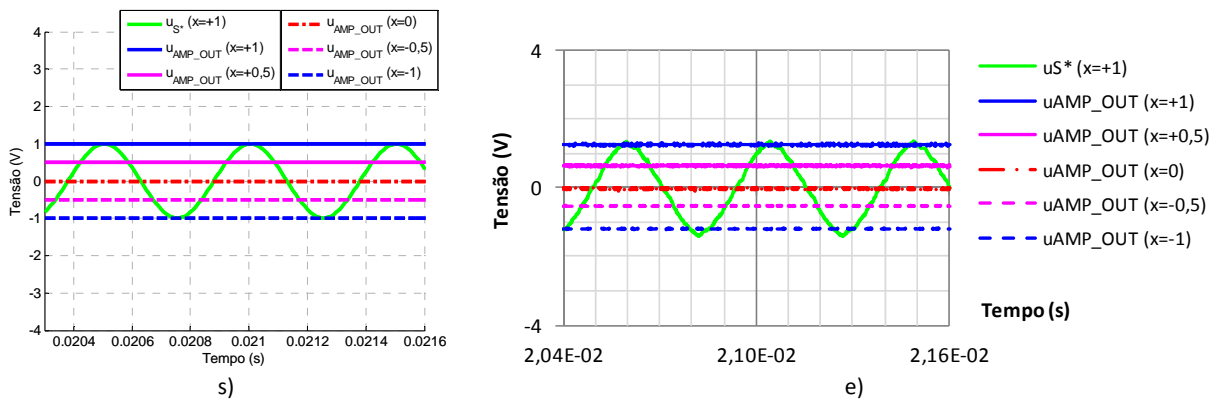


Figura 4.17 – LVDT: Retificação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

Depois do sinal devidamente desmodulado e filtrado foi necessário fazer uma pequena amplificação do sinal de saída presente no terminal 1 do condicionador de sinal (AMP_OUT), para desta forma se obter uma melhor resolução aquando da variação da posição da haste do LVDT.

Foi feita uma ampliação desta tensão, u_{AMP_OUT} , de duas vezes, garantindo à saída do circuito uma tensão u_{OUT} contínua com amplitude de 2,64V, que equivale a uma tensão pico-a-pico de 5,28V para os 50mm de curso da haste do LVDT, como pode ser verificado na Figura 4.18.

CAPÍTULO 4 Resultados

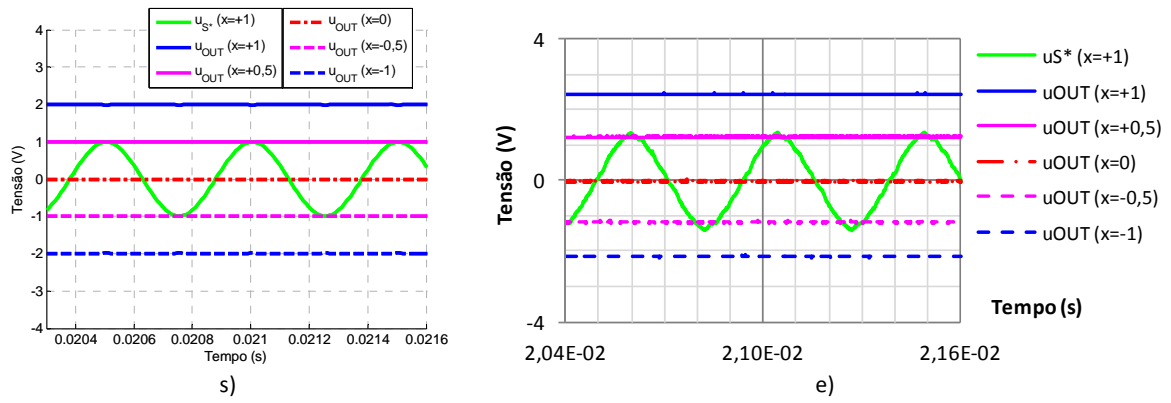


Figura 4.18 – LVDT: Amplificação do sinal de saída, para várias posições do núcleo.
s) Resultado simulado; e) Resultado experimental.

CAPÍTULO 5 **Conclusões**

Resumo:

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões da dissertação e são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

5.1 Considerações finais

Nesta dissertação evidenciou-se a necessidade do recurso a um processo de desmodulação para, na sua saída, se completar a informação relativa ao sinal de entrada, x , através da determinação do seu sentido de deslocamento.

Foram estudadas duas topologias de excitação do transdutor: excitação em tensão e em corrente. Para cada uma foram analisados dois parâmetros de sensibilidade: variação da posição e frequência de excitação.

Ao realizar, com sucesso, a análise de uma técnica de desmodulação síncrona aplicada ao condicionamento de sinal de um transdutor indutivo do tipo Transformador Diferencial de Variação Linear (LVDT), pode-se afirmar que o objetivo deste trabalho foi atingido. Foram comparados, sob o ponto de vista das topologias de ligação de transdutores, diferentes condições de funcionamento e sensibilidade à variação de parâmetros (diferentes tipos de excitação do LVDT) e foi elaborado um protótipo experimental com circuitos específicos de desmodulação de sinal no LVDT.

Concluiu-se que a excitação em tensão dos enrolamentos do primário do LVDT originariam um valor para a fase dependente da frequência. Portanto, foi estudada a possibilidade da excitação ser feita em corrente. Esse estudo resultou em dois aspetos: primeiro, a fase não dependia da frequência; segundo, a fase não dependia dos parâmetros do enrolamento primário do LVDT.

Pôde-se concluir também que, a uma frequência constante, a sensibilidade do LVDT à posição não depende da posição x e tem um valor constante, o que, apesar dos valores distintos, se verifica tanto para a excitação em tensão como em corrente.

A sensibilidade do LVDT à frequência é variável. Tem um valor constante até um determinado valor de frequência. Após este valor de frequência, a sensibilidade tende para zero. A sensibilidade tem a mesma amplitude para posições simétricas relativamente ao zero elétrico.

A sensibilidade à frequência é máxima nas situações extremas, onde $x = \pm 1$ e mínima (igual a zero) quando $x = 0$. Para situações em que $-1 < x < +1$, a curva da sensibilidade em ordem à frequência segue o mesmo andamento que a curva para as situações extremas, acrescida de um fator de escala.

Nos resultados experimentais as curvas seguem o andamento previsto analiticamente e esse andamento é observável nos resultados simulados.

5.2 Perspetivas de desenvolvimento futuros

Apesar dos objetivos desta dissertação terem sido atingidos, existe margem para melhorias passíveis de serem feitas em trabalhos futuros. Algumas dessas melhorias são apresentadas neste subcapítulo.

Poderá ser feito um estudo mais completo em relação aos tipos de desmodulação. Ao dispor de um LDVT com acesso a todos os terminais dos enrolamentos secundários, poderá ser realizado o estudo para a desmodulação assíncrona.

Após o estudo das técnicas de desmodulação síncrona e assíncrona, poderá ser criado um protótipo experimental implementando a técnica mais robusta, com recurso a um microcontrolador.

O modelo de simulação em *MatLab Simulink* pode ser mais detalhado. Na realização da simulação foram usados valores constantes para as resistências e indutâncias do LVDT, quando na realidade, de acordo com os gráficos apresentados na Figura 2.11 e na Figura 2.13, estes parâmetros não são constantes, apresentando uma ligeira variação para diferentes valores de x .

Bibliografia

- [1] Brum Diego; Rodrigues Igor; Silva Luiz; Barbosa Rodolpho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, *Sensor de Posição LVDT*, 7 Maio 2014
- [2] Hoadly George B., *Telemetric System*, Patente EUA 2196809 atribuída a 9 Abril 1940
- [3] http://www.macrosensors.com/about_macro_sensors.html (acedido a 22 de Abril de 2014)
- [4] Schaevitz Herman, *The Linear Variable Differential Transformer: Proceedings of the SASE*, Volume IV, Nº.2, 1946
- [5] Kester Walt, Analog Devices, *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning*, 1999
- [6] Bhatia Gagandeep, *LVDTs and Interfacing*
- [7] Enerdis Chauvin Arnoux, *Guide "produits": Capteurs de déplacement LVDT*, Janeiro 2003
- [8] Chauvin Arnoux, *Displacement sensors and processing devices: LVDT sensors. User's Manual*
- [9] Pallàs Ramon; Webster John G., *Sensors and signal conditioning*, Second Edition, John Wiley & sons, 2001
- [10] Nyce David S., *Linear Position Sensors: Theory and Application*, Wiley-Interscience, 2004
- [11] Soares Vasco, *Aquisição e Processamento de Sinais (folhas de apoio à disciplina)*
- [12] Philips semiconductors, *Data sheet NE/SA5521: LVDT signal conditioner*, 5 Novembro 2002
- [13] Rahim Zahid, Philips semiconductors, *Application note AN1182: Using the NE5521 signal conditioner in multi-faceted applications*, Dezembro 1988
- [14] Turlea Mitel D., *Philips semiconductors, AN1183: NE/SA/SE5521 position measurement*, 6 Janeiro 1993
- [15] Szczyrbak Jackson; Schmidt Dr. Ernest D. D., Lucas Control Systems, *LVDT Signal Conditioning Techniques*, Abril 1997

Bibliografia

- [16] Schaevitz Engineering, *Handbook of Measurement and Control*, terceira edição, Outubro 1983
- [17] Asch Georges, Dunod, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 5 edition
- [18] Agilent Technologies, *3000 Series Oscilloscopes: Data Sheet*
- [19] Dahlmann Prof. Dr., Versuch 4 LVDT, *Labor für Messund Sensortechnik*, disponível em <http://mslab.et-it.fh-offenburg.de/Downloads.html> (acedido a 13 de Maio de 2013)
- [20] Sensotec, *DLD series LVDT demodulators*, Revisão B, Dezembro 2001
- [21] Texas Instruments, *Aplication Report: Stability Analysis of Voltage-Feedback Op Amps – Including Compensation Techniques*, Março 2001
- [22] Carter Bruce; Huelsman L.P., Texas Instruments, *Aplication Report: Handbook of Operational Amplifier Active RC Networks*, Outubro 2001

Apêndice 1 – MatLab Simulink: código principal (Main.m)

```

clear all;
clc;
xx=[-1 -0.5 0 +0.5 +1];
Dsinc_21; % Abre o ficheiro no Simulink (*.mdl)

for i=1:5
    x=xx(i);
    Dados_15; % Executa o ficheiro no Editor (*.m)
    sim('Dsinc_21.mdl'); % Simula o ficheiro no Simulink

    if i==1;
        Sx1=S; Sx1(5206)=0;
        Demod_OUTx1=Demod_OUT; Demod_OUTx1(5206)=0;
        AMP_OUTx1=AMP_OUT; AMP_OUTx1(5206)=0;
        OUTx1=OUT; OUTx1(5206)=0;
    elseif i==2;
        Sx2=S; Sx2(5206)=0;
        Demod_OUTx2=Demod_OUT; Demod_OUTx2(5206)=0;
        AMP_OUTx2=AMP_OUT; AMP_OUTx2(5206)=0;
        OUTx2=OUT; OUTx2(5206)=0;
    elseif i==3;
        Sx3=S; Sx3(5206)=0;
        Demod_OUTx3=Demod_OUT; Demod_OUTx3(5206)=0;
        AMP_OUTx3=AMP_OUT; AMP_OUTx3(5206)=0;
        OUTx3=OUT; OUTx3(5206)=0;
    elseif i==4;
        Sx4=S; Sx4(5206)=0;
        Demod_OUTx4=Demod_OUT; Demod_OUTx4(5206)=0;
        AMP_OUTx4=AMP_OUT; AMP_OUTx4(5206)=0;
        OUTx4=OUT; OUTx4(5206)=0;
    elseif i==5;
        Sx5=S; Sx5(5206)=0;
        Demod_OUTx5=Demod_OUT; Demod_OUTx5(5206)=0;
        AMP_OUTx5=AMP_OUT; AMP_OUTx5(5206)=0;
        OUTx5=OUT; OUTx5(5206)=0;
    end;
end;

%% Apresentação de figuras no trabalho

% figure(10) % Figura 4.11 da dissertação % uOSC, uRq
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on
% plot(t,OSC,'-b',t,Rq,'--m','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% legend({'u_O_S_C','u_R_q'},'Location',[0.25,0.32,1,1]), grid
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(20) % Figura 4.12 da dissertação % uP*, uRq, uPrim
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on
% plot(t,P,'-b',t,Rq,'--m',t,Prim,':g','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% legend({'u_P_*','u_R_q','u_P_r_i_m'},'Location',[0.25,0.32,1,1]),
grid
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')

```

Apêndice 1 – MatLab Simulink: código principal (Main.m)

```

%
% figure(30)          % Figura 4.13 da dissertação % uS*(x=1:-1)
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% plot(t,Sx5,'-b',t,Sx4,'-m',t,Sx3,'-.r',t,Sx2,'--m',t,Sx1,'--
b','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% legend({'u_S_* (x=+1)','u_S_* (x=+0,5)','u_S_* (x=0)','u_S_* (x=-
0,5)','u_S_* (x=-1)'},'Location',[0.25,0.32,1,1]), grid
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(40)          % Figura 4.14 da dissertação % uS*(x=1), Prim
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% plot(t,Sx5,'-b',t,Prim,'--m','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% legend({'u_S_* (x=+1)','u_P_r_i_m'},'Location',[0.25,0.32,1,1]),
grid
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(50)          % Figura 4.15 da dissertação % uS*(x=1), uSel_7
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% plot(t,Sx5,'-b',t,Sel_7,'--m','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% legend({'u_S_* (x=+1)','u_S_e_l_\__7'},'Location',[0.20,0.32,1,1]),
grid
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(60)          % Figura 4.16 da dissertação % uS*(x=1),
uDemod_OUT(x=1:-1)
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% k=plot(t,S,'-g','LineWidth',6)
% h=plot(t,Demod_OUTx5,'-b',t,Demod_OUTx4,'-m',t,Demod_OUTx3,'-
.r',t,Demod_OUTx2,'--m',t,Demod_OUTx1,'--b','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(70)          % Figura 4.17 da dissertação % uS*(x=1),
uAMP_OUT(x=1:-1)
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% h=plot(t,Sx5,'-g',t,AMP_OUTx5,'-b',t,AMP_OUTx4,'-m',t,AMP_OUTx3,'-
.r',t,AMP_OUTx2,'--m',t,AMP_OUTx1,'--b','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(80)          % Figura 4.18 da dissertação % uS*(x=1), uOUT(x=1:-
1)
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;
% h=plot(t,Sx5,'-g',t,OUTx5,'-b',t,OUTx4,'-m',t,OUTx3,'-.r',t,OUTx2,'-
-m',t,OUTx1,'--b','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')
%
% figure(99)          % Várias
% axes('FontSize',12);
% set(gcf,'color','w'); hold on;

```

Apêndice 1 – MatLab Simulink: código principal (Main.m)

```
% h=plot(t,Rq,'-b',t,Sx5,'--m',t,Se1_7,':g',t,Demod_OUTx5,'-
.y',t,AMP_OUTx5,'--c',t,OUTx5,'-r','LineWidth',3)
% axis([2.03e-2 2.16e-2 -4 4])
% ylabel('Tensão (V)'), xlabel('Tempo (s)')

% set grid=gray
set(gca,'Xcolor',[0.7 0.7 0.7],'Ycolor',[0.7 0.7
0.7],'LineWidth',0.75)
Caxes = copyobj(gca,gcf);
set(Caxes,'color','none','xcolor','k','xgrid','off','ycolor','k','ygrid',
'd','off');
grid

% ah1=axes('position',[-0.38,0.00,1,1],'visible','off','FontSize',12);
% ah2=axes('position',[0.60,0.00,1,1],'visible','off','FontSize',12);
% f60
% legend(ah1,k,'u_S_* (x=+1)',1)
% legend(ah2,h(1:5),'u_D_e_m_o_d\_O_U_T
(x=+1)','u_D_e_m_o_d\_O_U_T (x=+0,5)','u_D_e_m_o_d\_O_U_T
(x=0)','u_D_e_m_o_d\_O_U_T (x=-0,5)','u_D_e_m_o_d\_O_U_T (x=-
1)',2)
% f70
% legend(ah1,h(1:3),'u_S_* (x=+1)','u_A_M_P\_O_U_T
(x=+1)','u_A_M_P\_O_U_T (x=+0,5)',1)
% legend(ah2,h(4:6),'u_A_M_P\_O_U_T (x=0)','u_A_M_P\_O_U_T (x=-
0,5)','u_A_M_P\_O_U_T (x=-1)',2)
% f80
% legend(ah1,h(1:3),'u_S_* (x=+1)','u_O_U_T (x=+1)','u_O_U_T
(x=+0,5)',1)
% legend(ah2,h(4:6),'u_O_U_T (x=0)','u_O_U_T (x=-0,5)','u_O_U_T (x=-
1)',2)
% f99
% ah1=axes('position',[-0.30,0.00,1,1],'visible','off','FontSize',12);
% ah2=axes('position',[0.45,-0.65,1,1],'visible','off','FontSize',12);
% legend(ah1,h(1:3),'u_R_q','u_S_* (x=+1)','u_S_e_1_7',1)
% legend(ah2,h(4:6),'u_D_e_m_o_d\_O_U_T (x=+1)','u_A_M_P\_O_U_T
(x=+1)','u_O_U_T (x=+1)',2)
```


Apêndice 2 – MatLab Simulink: código auxiliar (Dados.m)

```

clc;

%% Parâmetros do LVDT

Rp=105;
Lp=6.62e-3;
a=3.21*10^-3;    % Para x=+1 -> M12=6.42*10^-3mH -> a=3.21*10^-3mH
M12=2*a*x;      % M12=(M1-M2)~2a|x|
Rs=95;
LM=5.00e-3;     % LM=(Ls-2*M3)
Rc=1e3;         % Resistência de Carga considerada
Rexc=100;

% Excitação em tensão (Ev) FT=[GL1 0]/[GL2 GL3 GL4]
GL1=Rc*M12;      % GL1==cte % GL1-GL4 usado no MatLab
GL2=Lp*LM;       % GL2==A % A, B, C usado no trabalho
GL3=Rp*LM+(Rs+Rc)*Lp; % GL3==B
GL4=Rp*(Rs+Rc); % GL4==C

% Excitação em corrente (Ei) FT=[GL5 0]/[GL6 GL7]
GL5=Rc*M12;      % GL5-GL7 usado no MatLab
GL6=LM;
GL7=Rc+Rs;

% Outros Valores
Uref_2=0;        % V
f=2000;          % Hz
w=2*pi*f;       % rad/s
Ui=14;           % V
Ii=10e-3;       % A

%% Diagramas de Bode: excitação em tensão e corrente

% Excitação em tensão - TF_Ev=tf([GL1 0],[GL2 GL3 GL4]); figure(8);
bode(TF_Ev)

% DBa=[GL1 0]; DBb=[GL2 GL3 GL4]; ww=logspace(2,7);
DB1=freqs(DBa,DBb,ww);
% mag=20*log10(abs(DB1)); phase=180/pi*angle(DB1);
% figure(5),
% subplot(2,1,1), semilogx(ww,mag,'LineWidth',2), grid,
ylabel('Amplitude (dB)'),
% title('Diagrama de Bode')
% subplot(2,1,2), semilogx(ww,phase,'LineWidth',2), grid, ylabel('Fase
(°)'),
% xlabel('Frequência (Hz)')
% set(gca,'YTick',[-90 -45 0 45 90]); axis([1e2 1e7 -100 100]),

% Excitação em corrente - TF_Ei=tf([GL5],[GL6 GL7]); bode(TF_Ei)

% DBc=[GL5]; DBd=[GL6 GL7]; ww=logspace(2,7); DB2=freqs(DBc,DBd,ww);
% mag=20*log10(abs(DB2)); phase=180/pi*angle(DB2);
% figure(6),
% subplot(2,1,1), semilogx(ww,mag,'LineWidth',2), grid,
ylabel('Amplitude (dB)'),

```

Apêndice 2 – MatLab Simulink: código auxiliar (Dados.m)

```

% title('Diagrama de Bode')
% subplot(2,1,2), semilogx(ww,phase,'LineWidth',2), grid, ylabel('Fase
(°)'),
% xlabel('Frequência (Hz)')
% set(gca,'YTick',[-90 -45 0]); axis([1e2 1e7 -100 10]),

%% Sensibilidades

fs=2000;                ws=2*pi*fs;        % Para f=cte
fs2=linspace(10,1e6,1000000); ws2=2*pi*fs2; % Para f<>cte

% S1 : f=2kHz === Excitação em tensão
S1=2*a*Rc*Ui*ws/sqrt((GL4-GL2*ws^2)^2+(ws+GL3)^2);

% S2 : x=cte
S2=M12*Rc*Ui*(GL4^2-GL2^2*ws2.^4).*((GL4^2+(GL3^2-
2*GL2*GL4)*ws2.^2+GL2^2*ws2.^4).^(-3/2));
S25=0.5.*S2;          % x=+-0,5
S20=0.0.*S2;          % x=0,0

% S3 : f=2kHz === Excitação em corrente
S3=2*a*Rc*Ii*ws/sqrt((Rs+Rc)^2+LM^2*ws^2);

% S4 : x=cte
S4=M12*Rc*Ii*(Rs+Rc)^2.*(((Rs+Rc)^2+LM^2*ws2.^2).^(-3/2));
S45=0.5.*S4;          % x=+-0,5
S40=0.0.*S4;          % x=0,0

% figure(1)
% axes('FontSize',12);
% semilogx(fs2,S2,'-b',fs2,S25,'--r',fs2,S20,':g','LineWidth',3),
% axis([10 1e6 -1e-4 9e-4]), legend('S2 (x=+-1)', 'S2 (x=+-0,5)', 'S2
(x=0)'), grid
% title('Sensibilidade S2'), ylabel('S2 (mV/mm/Vexc)'),
xlabel('Frequência (Hz)')

% figure(2)
% axes('FontSize',12);
% semilogx(fs2,S4,'-b',fs2,S45,'--r',fs2,S40,':g','LineWidth',3),
% axis([10 1e6 -1e-5 9e-5]), legend('S4 (x=+-1)', 'S4 (x=+-0,5)', 'S4
(x=0)'), grid
% title('Sensibilidade S4'), ylabel('S4 (mV/mm/Aexc)'),
xlabel('Frequência (Hz)')

% Formatação das grelhas: cor=cinza
% set(gca,'Xcolor',[0.7 0.7 0.7]);
% set(gca,'Ycolor',[0.7 0.7 0.7]);
% set(gca,'LineWidth',0.75)
% Caxes = copyobj(gca,gcf);
%
set(Caxes,'color','none','xcolor','k','xgrid','off','ycolor','k','ygrid',
'd','off');

%% Circuito para Atraso de fase

Rat3=5000;
Cat=6.8e-9;
RCat=Rat3*Cat;
TFat=tf([-RCat 1],[RCat 1]);

```

Apêndice 2 – MatLab Simulink: código auxiliar (Dados.m)

```
% margin(TFat);

% Circuito para Avanço de fase

Cav=6.8e-9;
Rav3=18200;
RCav=Cav*Rav3;
TFav=tf([RCav -1],[RCav 1]);
% margin(TFav);

% Filtro PB de 2ª ordem Butterworth

Rf1=470e3;
Rf2=470e3;
Cf1=2.7e-9;
Cf2=2.7e-9;

G=3-sqrt(2);
wn2=1/(Rf1*Rf2*Cf1*Cf2);
wn=sqrt(wn2);
Ga=G*wn2;
Gb=(Rf1+Rf2)/(Rf1*Rf2*Cf1)+(1-G)/(Rf2*Cf2);

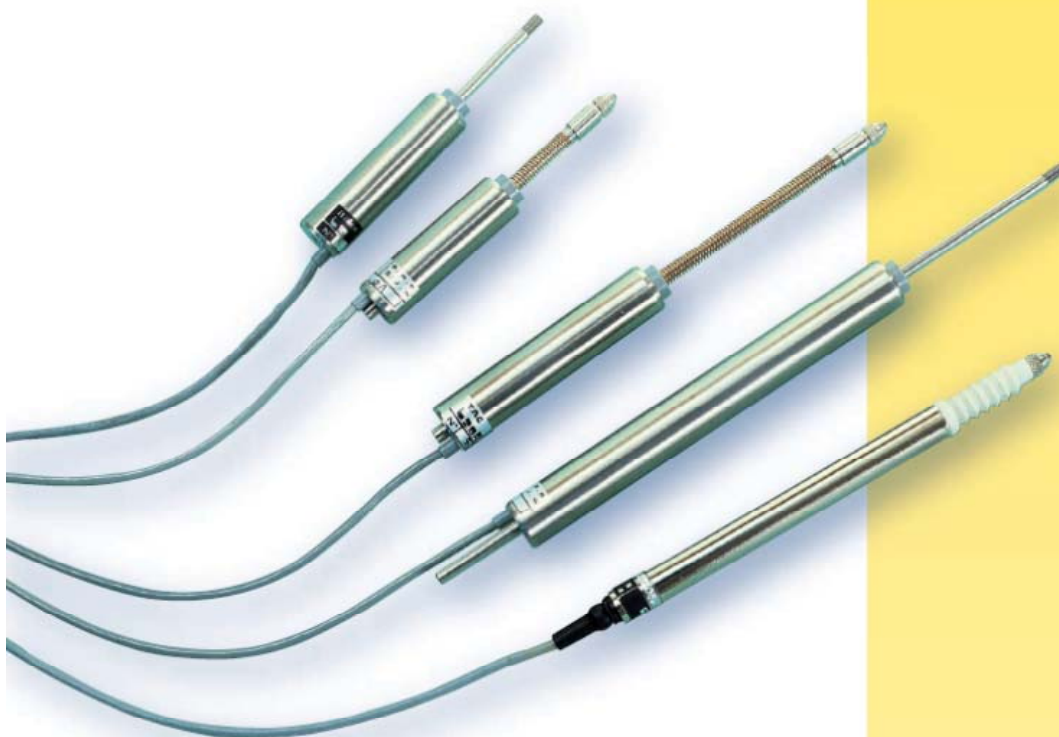
% Validação
fc=126.46;
F1=(2*pi*fc)^2;
Alfa=sqrt(2);
F2=Alfa*wn;
TFf=tf([G*wn2],[1 Gb wn2]);
% margin(TFf);
TF1=tf([100],[1 14.1 100]);
% margin (TF1);

% Tempo de estabelecimento
wc=2*pi*126.46;
csi=sqrt(2)/2;
ts=(1/wc)*(csi/2-log(5/100)/csi);
```


Anexo 1 – Folha de características do LVDT

Guide “produits”

Capteurs de déplacement LVDT



- Large étendue de mesure
- Produits spécifiques sur demande (étendues de mesure, IP, pointes de touche...)
- Excellente résistance aux chocs et aux vibrations
- Insensibilité à des perturbations dues aux conditions d'environnement telles que champs magnétiques, poussières, lumière...

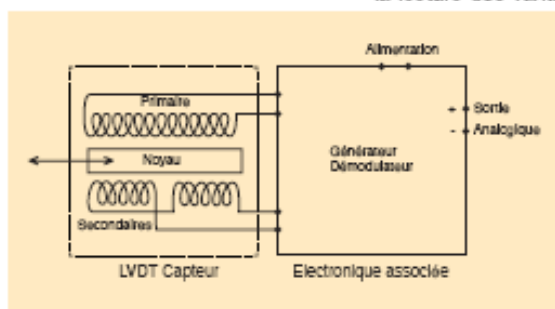
Introduction aux capteurs de déplacement LVDT

Le vocable "capteurs de déplacement" englobe tous les dispositifs fournissant un signal électrique proportionnel à la valeur d'un déplacement.

Les capteurs décrits dans ce guide sont basés sur le principe du Transformateur différentiel (technologie LVDT : Linear Voltage Differential Transformer).

Technologie

Le transformateur différentiel est constitué d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires placés symétriquement par rapport à ce dernier et reliés en opposition. Lorsqu'un courant alternatif parcourt l'enroulement primaire, le déplacement d'un noyau ferromagnétique dans l'axe médian des bobines modifie le couplage entre les enroulements primaire et secondaire. La tension résultante aux bornes des enroulements secondaires est fonction de la position du noyau par rapport aux enroulements. Une répartition judicieuse des spires des bobinages primaire et secondaire permet d'obtenir un capteur performant.



Electronique associée

L'électronique à associer au capteur LVDT présente une double fonction :

- alimenter le circuit primaire du capteur en courant alternatif. Dans le cas de nos capteurs, le courant d'alimentation sinusoïdal affranchit la lecture des variations de résistance liées à la température (coefficient de température nul au zéro mécanique).
- traiter le signal issu des enroulements secondaires afin d'obtenir un signal analogique en tension ou en courant, représentatif de la position du noyau.

Avantages

Déplacement sans contact

Nos capteurs de déplacement LVDT sont montés de façon à ce que le noyau et les bobinages ne soient pas en contact physique. Le coefficient de frottement et la masse du noyau confèrent à l'ensemble une faible inertie. Cette caractéristique en fait le produit idéal pour mesurer des flèches, faire des tests de vibration de produits fragiles ou des mesures de tension et de glissement de fibres ou autres produits extrêmement élastiques.

Longue durée de vie mécanique

En raison de leur coefficient de frottement très faible, nos LVDT possèdent une durée de vie très longue. Ceci est important lors de tests de fatigue des matériaux et de structures et, en particulier, pour les mesures effectuées dans les avions, missiles ou autres véhicules spatiaux ainsi qu'en environnement industriel très sévère.

Résolution infinie

Le fonctionnement du LVDT est basé sur l'induction. Ceci, ajouté au très faible frottement, donne au capteur une résolution infinie.

Erreur de répétabilité nulle

La symétrie de la conception du capteur fournit un signal zéro stable et reproductible à un point précis donné. Ce qui permet de l'utiliser comme un excellent indicateur de zéro dans une boucle à haut gain.

Réjection transversale

Le signal issu du capteur est très sensible au déplacement axial du noyau, mais relativement insensible à son déplacement radial. En conséquence, nos LVDT sont utilisables pour des applications dans lesquelles le mouvement du noyau n'est pas unidirectionnel. Par exemple, en robotique pour la mesure de déplacement le long d'un axe, d'un support dont le mouvement est bi- ou tridimensionnel.

Excellente robustesse

La nature des matériaux utilisés et la qualité de leur assemblage rendent nos capteurs LVDT très résistants aux chocs et vibrations importantes souvent rencontrés en environnement industriel.

Séparation noyau-bobinage

Une gaine amagnétique est insérée entre le corps, le noyau et les bobinages. Elle permet de protéger les bobinages de l'action des liquides sous pression et corrosifs. La construction du capteur autorise une étanchéité hermétique des bobinages, évitant la réalisation d'un ensemble mobile dynamiquement étanche. Un joint statique est nécessaire dans le cas de travail en atmosphère pressurisée.

Insensibilité aux milieux hostiles

Nos LVDT peuvent travailler dans les milieux hostiles les plus divers. Le corps étanche en acier inoxydable peut résister à la corrosion chimique des liquides et des gaz, autorisant son utilisation en atmosphère explosive, dans la mesure où le câble de liaison au conditionneur est blindé. Ils sont aussi conçus pour résister à l'immersion en milieu cryogénique tel que l'oxygène et l'azote liquides. D'autres types peuvent être développés pour résister à l'action des fortes températures, des radiations nucléaires, ou des deux.

Isolation entre entrée et sortie

Le capteur à transformateur différentiel présente une isolation totale entre l'excitation du primaire et la sortie du secondaire.

Capteurs de déplacements standards

Sommaire

Capteurs de déplacement standards

Série L3
 Série LP4
 Série LG4
 Série LR5

Capteurs de déplacement spéciaux

Série LRC5
 Autres réalisations5

Chaîne de mesure

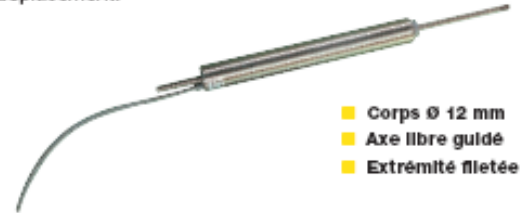
Générateur démodulateur GDL6
 Boîtier de seuils SL6
 Filtre FL 200 P7

Accessoires pour capteurs

Attelages7
 Fixations7

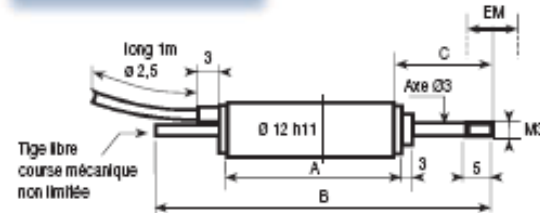
Série L

Les capteurs de la série L sont recommandés pour toute mesure de déplacement demandant une fixation de l'axe du capteur à la pièce dont on veut mesurer le déplacement.



- Corps Ø 12 mm
- Axe libre guidé
- Extrémité fletée

Caractéristiques mécaniques



Guide choix

Série	L	LP	LG	LR	LRC
Technologie	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT
Ø du corps	12	8	21,3	12	12
Tige	libre	captivé	captivé	captivé	captivé
Guidage	2 paliers	2 paliers	2 paliers	2 paliers	2 paliers
Extrémité	fletage M3 x 5	palpeur	fletage M5 x 10	palpeur	palpeur
Ressort					
Soufflet					
Connecteur					
Etlendu de mesure	0,5 (±0,25)	L0,5	L0,5P	L0,5R	L0,5RC
	2 (±1)	L2	L2P	L2R	L2RC
	5 (±2,5)	L5	L5P	L5R	L5RC
	10 (±5)	L10	L10P	L10R	L10RC
	20 (±10)	L20		L20R	L20RC
	25 (±12,5)				L25RC
	50 (±25)	L50		L50R	L50RC
	60 (±30)				L60RC
	100 (±50)	L100			
	200 (±100)			L200G	
	300 (±150)			L300G	
	400 (±200)			L400G	
	500 (±250)			L500G	
	600 (±300)			L600G	
	800 (±400)			L800G	
1000 (±500)			L1000G		

Modèle	L0,5	L2	L5	L10	L20	L50	L100
Etlendu de mesure EM (mm)	0,5	2	5	10	20	50	100
	± 0,25	± 1	± 2,5	± 5	± 10	± 25	± 50
Course totale CT (mm)	non limité						
Force du ressort en fin d'échelle (tige rentrée)	pas de ressort de rappel						
Longueur du corps A	35	35	40	45	57	100	172
Longueur totale maxi B	59	59	65	75	90	170	292
Sortie de l'axe au zéro mécanique C*	16	14,5	16	19,5	23,5	39	65
Poids (g)	27	27	28	32	40	64	110

* Position du milieu de l'étlendu de mesure

Caractéristiques générales

Linéarité	± 0,2% de l'étlendu de mesure
Hystérésis	nulle
Résolution	infinie
Blindage	intégré
Câble de sortie	longueur 1 m, Ø 2,5 mm (4 conducteurs blindés)
Excitation primaire	10 mA eff. - 2000 Hz (assuré par le GDL)
Isolément	primaire par rapport au secondaire ou enroulement par rapport à la masse ≥ 100 MΩ sous 500 Vdc
Tolérance sur Ø extérieur	h11
Température de fonctionnement	-20...+80°C
Coefficient de température	250 ppm/K
Protection	IP 55
Corps	acier inoxydable calibré
Enroulements	enrobés dans la résine époxy

Pour commander

Modèles	Références	Modèles	Références
L 0,5	01 NC 8051	L 20	P07 8051 05
L 2	P07 8051 02	L 50	P07 8051 06
L 5	P07 8051 03	L 100	P07 8051 07
L 10	P07 8051 04		

Capteurs de déplacements standards

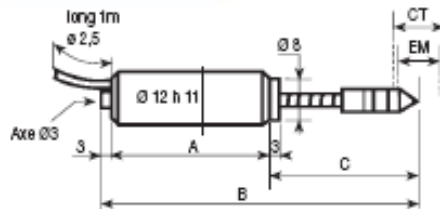
Série LR

Les capteurs de la série LR sont recommandés pour toute mesure de déplacement demandant un contact étroit entre l'axe du capteur et la pièce dont on veut mesurer le déplacement sans liaison fixe.

- Corps Ø 12 mm
- Axe guidé captif
- Touche de palpé
- Ressort de rappel



Caractéristiques mécaniques



Modèle	L0,5R	L2R	L5R	L10R	L20R	L50R
Etlendue de mesure EM (mm)	0,5	2	5	10	20	50
	± 0,25	± 1	± 2,5	± 5	± 10	± 25
Course totale CT (mm)	5,5	6,5	9	12	20	50
Force du ressort en fin d'échelle (tige rentrée)	100 g	110 g	120 g	150 g	150 g	290 g
Longueur du corps A	35	35	40	45	57	100
Longueur totale maxi B	54	55	63	73	111	164
B pour zéro mécanique	29,5	30	31,5	34,5	55	70
Poids (g)	27	28	29	34	43	68

Caractéristiques générales

Linéarité ± 0,2% de l'étendue de mesure
 Hystérésis nulle
 Résolution infinie
 Blindage intégral
 Câble de sortie longueur 1 m, Ø 2,5 mm (4 conducteurs blindés)
 Excitation primaire 10 mA eff - 2000 Hz (assuré par le GDL)
 Isolement primaire par rapport au secondaire ou enroulement par rapport à la masse, ≥ 100 MΩ sous 500 Vdc
 Tolérance sur Ø extérieur h11
 Temp. de fonctionnement -20...+80°C
 Coefficient de temp. 250 ppm/K
 Protection IP 55
 Corps acier inoxydable calibré
 Ressort de rappel bronze beryllium
 Touche de palpé avec pointe en carbure de tungstène
 Enroulements enrobés dans la résine époxy

Pour commander

Modèles	Références	Modèles	Références
L 0,5R	01 NC 8052	L 10R	P07 8052 04
L 2R	P07 8052 02	L 20R	P07 8052 06
L 5R	P07 8052 03	L 50R	P07 8052 08

Exemple de série spéciale :

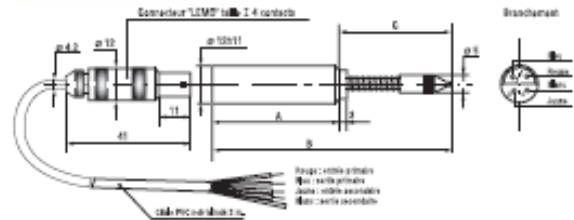
Série LRC

Les capteurs de la série LRC sont des capteurs de la série LR dont la longueur du corps a été volontairement augmentée de façon à pouvoir loger un connecteur en son extrémité.

- Corps Ø 12 mm
- Axe guidé captif
- Touche de palpé
- Ressort de rappel
- Connecteur type LEMO



Caractéristiques mécaniques



Modèle	L0,5RC	L2RC	L5RC	L10RC	L20RC	L25RC	L50RC	L50R
Etlendue de mesure EM (mm)	0,5	2	5	10	20	25	50	60
	± 0,25	± 1	± 2,5	± 5	± 10	± 12,5	± 25	± 30
Force du ressort en fin d'échelle (tige rentrée)	70 g	70 g	75 g	80 g	85 g	90 g	160 g	170 g
Longueur du corps A	73	73	81	86	115	120,5	168	217
Longueur totale maxi B	106	107	116	129	182	180,5	265	326
B pour zéro mécanique	30,5	30,5	32	35	55	44	70	76
Poids (g)	47	48	49	54	63	66	85	100

Caractéristiques générales

Mêmes caractéristiques que les capteurs de déplacement de la série LR

Autres capteurs spéciaux

Nous réalisons des capteurs "sur mesure" adaptés à toutes vos applications.

Quelques exemples de spécifications :

- des capteurs d'encombrement réduit
- des capteurs pour environnement hostile (immersion, haute température) jusqu'à IP 68
- des capteurs avec étendue de mesure spécifique (maxi 1 m)
- des capteurs avec tout type d'adaptations mécaniques (sortie câble latérale, rotules aux extrémités, connecteurs spéciaux...)

Pour commander

Modèles	Références
Tous	nous consulter

Exemples d'applications des capteurs de déplacement LVDT

Génie civil

- Mesure d'évolution de fissures dans le béton armé
- Mesure de déformation d'échantillon de sol sous pression (études de fondations)
- Mesure de flèche de tablier de pont
- Mesure de flèche de grue

Industrie automobile

- Mesure de côtes en automatique
- Contrôle de profil de jante
- Contrôle de la planéité des capots pour automobiles

Industrie électronique

- Contrôle dimensionnel sur composants, mesure du diamètre des coupelles de résistances
- Contrôle de profil des tubes de télévision et des paraboles de radars

Aéronautique

- Contrôle de déplacement de gouvernes sur avions et fusées
- Mesure de déformations

Médical

- Contrôle de pression sanguine (capteur associé à une capsule manométrique)

Bâtiment

- Mesure de déformations d'ouvrage ou des éléments de composition d'ouvrage

Industrie mécanique

- Contrôle dimensionnel, épaisseur, diamètre, etc...
- Contrôle de diamètre de câble
- Equipement d'extensiomètre
- Machine de mesure de dureté
- Machine de traction
- Asservissement de vérin
- Contrôle de position de vanne
- Contrôle d'amplitude de pots vibrants

Autres domaines d'applications :
Agricole, Alimentaire, Ferroviaire, Chimie...

POLE EQUIPEMENT ELECTRIQUE DE  CHAUVIN AMOUX

FRANCE
Enerdis Charvin Amoux
1-4, rue d'Arcueil - BP 675
92542 MONTROUGE Cedex
Tél : (33) 01 47 46 78 00
Fax : (33) 01 42 53 54 79
e-mail : info@enerdis.fr
www.enerdis.fr

SUISSE
Charvin Amoux
Emsiedlerstrasse 535
6910 HORGEB
Tél : 01/727 75 55
Fax : 01/727 75 55
e-mail : info@chauvin-amoux.ch
www.chauvin-amoux.ch

LIBAN
Charvin Amoux Middle East
P.O. BOX 93-154
1241 2020 JAL EL DIG (BEYROUTH)
Tél : +961 1 850 425
Fax : +961 1 850 424
e-mail : cemia@chauvin-amoux.com
www.chauvin-amoux.com



