

Controlo de uma transmissão hidrostática rotativa

Sérgio Filipe Maio da Cunha

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Francisco Freitas



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Automação**

Julho 2015

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo apresentar um desenvolvimento de um equipamento laboratorial para o estudo do comportamento de uma transmissão hidrostática rotativa perante uma carga imposta pelo utilizador.

Este trabalho envolveu a utilização de uma central hidráulica, com duas bombas, sendo uma de cilindrada variável e outra de cilindrada fixa.

A transmissão hidrostática inclui dois motores utilizados diretamente acoplados um ao outro, sendo um utilizado como elemento de carga frenante. O primeiro motor, de came periférica, recebe caudal da bomba de cilindrada variável, enquanto o segundo motor, do tipo trocoidal recebe caudal da bomba de cilindrada fixa, é responsável pela aplicação de uma determinada carga.

Todo o sistema é comandado por um autómato programável (PLC), que foi programado por forma a possibilitar ao utilizador ajustar algumas das características fundamentais (tais como o sentido de rotação e a velocidade) e observar qual o comportamento do sistema.

A monitorização e comando do sistema são efectuados através de armário de uma Human Machine Interface (HMI).

No final são apresentados alguns exercícios realizados para demonstrar o comportamento do comando da transmissão, face a diferentes cenários possíveis, nomeadamente variações de carga.

Abstract

The present study aims at the development of a equipment which allows the university students to have a better understanding of the behavior of a hydrostatic transmission when a load is imposed.

This study involved the use of a central hydraulic, with two pumps, one with variable displacement and the other with fixed displacement.

The others components of the hydrostatic transmission are the two motors used directly attached to each other, one of which acting like a brake. One motor receives the flow from the variable displacement pump, while the second motor, receives flow from the fixed displacement pump.

The entire system is controlled by a PLC, which is used by the user to adjust some of the properties of a hydrostatic, such as speed and the direction of the flow by acting the valves existing at the transmission (reversing the orientation).

The monitoring and control system are carried out through the Human Machine Interface (HMI).

At the end, there are some exercises to demonstrate the behavior of the Transmission, in different possible scenarios facing load variations.

“The only place where success comes before work is in dictionary”

Vidal Sasson

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente, e dedicar o primeiro parágrafo, à minha família que muito lutou e que sempre me apoiou em todo o tipo de decisão.

De seguida terei de referenciar o meu orientador, Prof. Engº. Francisco Freitas que sempre me apoiou na realização deste trabalho e disponibilizou a sua ajuda para quando fosse precisa.

A minha namorada e futura esposa também tenho de referenciar, pois foi a força e a teimosia dela que obrigou-me a avançar sempre até ao final, mesmo passando noitadas comigo no laboratório somente a fazer companhia mesmo quando o Inverno era o mais rigoroso.

Dedico também este parágrafo a duas pessoas muito importantes na realização deste trabalho. Essas pessoas são o Sr. Joaquim Silva e o Sr. Ramalho. Estas duas pessoas além de serem pessoas que se disponibilizam no que for preciso também oferecem um bom ambiente no local de trabalho e partilham experiências enriquecedoras uteis para o futuro.

Também merecem uma menção honrosa aos meus amigos e companheiros de laboratório que não poderei mencionar todos uma vez que são muitos, mas terei de referir dois amigos que me ajudaram muito. E eles são Jorge Sousa e Pedro Ricardo Carneiro.

Índice de Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Motivação	10
1.3	Objetivos.....	10
1.4	Estrutura do relatório	11
2.	Transmissões hidrostáticas rotativas	13
2.1	Tipos de transmissão hidrostática e suas caraterísticas	13
2.1.1	Circuito aberto.....	14
2.1.2	Circuito Fechado	19
2.2	Tipos de controlo existentes nas transmissões hidrostáticas	22
2.3	Transmissões hidrostáticas existentes no laboratório de óleo-hidráulica	23
2.4	Aplicações de Transmissões hidrostáticas.....	25
3.	Transmissão hidrostática rotativa em estudo.....	29
3.1	Caraterização do circuito idealizado para a construção de uma transmissão hidrostática rotativa	29
3.2	Descrição dos diferentes elementos existentes na transmissão hidrostática em estudo	32
3.2.1	Bombas e motor elétrico (central hidráulica).....	32
3.2.2	Motores.....	36
3.2.2	Válvulas.....	39
3.3	Circuito hidráulico construído da transmissão hidrostática em estudo	45
4.	Automatização da transmissão hidrostática.....	47
4.1	Armário elétrico de comando	48
4.1.1	Autómato programável.....	49

4.1.2 Interface homem máquina (HMI).....	53
4.2 Armário elétrico de potência	54
4.3 Codificador digital	55
4.4 Transdutor de pressão	60
4.5 Sensor de temperatura.....	62
5. Interface gráfica do utilizador: configuração e comando manual	69
5.1 Configuração da interface gráfica.....	69
5.1.1 Hierarquia da programação da interface gráfica	70
5.1.2 Formato geral dos painéis da interface gráfica.....	71
5.2 Comando Manual.....	73
6. Exercícios demonstrativos do comportamento da transmissão hidrostática perante uma carga.....	79
6.1 Exercícios A.....	81
6.1.1 Exercício A.1.....	82
6.1.2 Exercício A.2.....	87
6.2 Exercícios B.....	93
6.2.1 Controlo de velocidade utilizado na execução dos exercícios B	94
6.2.2 Ensaios prévios para visualização de diferentes comportamentos para diferentes cargas	95
6.2.3 Exercício B.1.....	99
6.2.4 Exercício B.2.....	103
7. Conclusão e proposta para trabalhos futuros	107
7.1 Conclusões.....	107
7.2 Propostas futuras.....	109
8. Bibliografia e Referências	111
9. ANEXO A – Graficets funcionais	113
10. ANEXO B – Telas HMI.....	115

Índice de figuras

Fig. 1.1 Esquema de uma transmissão de energia entre uma fonte primária de energia e uma carga	2
Fig. 1.2 Esquema dos diferentes componentes existentes na transmissão de um helicóptero (3)	4
Fig. 1.3 Esquema de funcionamento da transmissão de energia de uma torre eólica	5
Fig. 1.4 Gráfico sobre os elementos responsáveis das falhas existentes nas torres eólicas (em percentagem) (4)	6
Fig. 1.5 Caixa de engrenagens de um automóvel (5)	6
Fig. 1.6 Diagrama do fluxo energético de uma transmissão hidrostática (1).....	7
Fig. 1.7 Esquema representativo de uma transmissão hidrostática na área automóvel (8).....	9
Fig. 2.1 Configuração de um circuito aberto (esquerda) e de um circuito fechado (direita) ...	14
Fig. 2.2 Circuito aberto constituído com um motor elétrico com variador de frequência (responsável pelo ajuste da velocidade do circuito), bomba e motor de cilindrada fixa (10)..	15
Fig. 2.3 Circuito aberto com uma reguladora de caudal em <i>meter-in</i> , válvula direcional e limitadora de pressão (10).....	16
Fig. 2.4 Circuito aberto constituída com uma válvula reguladora de caudal em <i>meter-out</i>	16
Fig. 2.5 Circuito aberto constituído com uma bomba de cilindrada variável e um motor de cilindrada fixa.....	17
Fig. 2.6 Circuito aberto constituído por uma válvula direcional de centro "aberto"	18
Fig. 2.7 Circuito aberto constituído por uma válvula direcional de centro fechados para frear cargas de alta inércia	19
Fig. 2.8 Transmissão hidrostática do tipo circuito fechado.....	19
Fig. 2.9 Circuito fechado constituído pela bomba auxiliar e a bomba e motor principal	20
Fig. 2.10 Bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo de prato inclinado (8)	21

Fig. 2.11 Exemplo de uma transmissão hidrostática através do comando manual através de uma alavanca, existente no laboratório (neste caso a bomba é do tipo de êmbolos radiais de cilindrada variável).....	23
Fig. 2.12 Motor hidráulico (esquerda) existente na banca Gustavo Cudell e seu posto de comando (direita)	24
Fig. 2.13 Motor hidráulico (figura da esquerda) existente na banca Hidromática (figura da direita)	24
Fig. 2.14 Sistema de transmissão hidrostática da tração das rodas de um trator	25
Fig. 2.15 Tambor de enrolamento de redes de uma embarcação pesqueira.....	26
Fig. 2.16 Esquema hidráulico de um guincho hidráulico (esquerda);guincho hidráulico de uma embarcação pesqueira	26
Fig. 2.17 Sistema de tracção das rodas de uma empilhadora.....	27
Fig. 3.1 Circuito hidráulico idealizado na concepção da transmissão hidrostática.....	30
Fig 3.2 Esquema simplificado dos diferentes elementos da fonte de energia hidráulica, com duas bombas	33
Fig. 3.3 Enumeração e legenda dos elementos constituintes da central hidráulica em estudo	34
Fig 3.4 Esquema de montagem do freio hidráulico e enumeração dos diferentes elementos que o constituem	36
Fig. 3.5 Motores acompanhados pela sua legenda	37
Fig. 3.6 Válvula direcional responsável pela definição do sentido de rotação do motor de came periférica	39
Fig. 3.7 Válvula direcional responsável pela comutação da carga.....	40
Fig. 3.8 Válvula reguladora de caudal proporcional e seu símbolo hidráulico	41
Fig. 3.9 Curva característica retirada do catálogo da respetiva válvula fluxométrica proporcional (15).....	42
Fig. 3.10 Limitadora da pressão responsável por estabelecer a pressão máxima do circuito ..	43
Fig. 3.11 Simbologia do bloco distribuidor acompanhada pela foto do elemento em estudo .	43
Fig. 3.12 Limitadora de pressão proporcional responsável pelo comando da cilindrada da bomba.....	44
Fig. 3.13 Circuito hidráulico construído para elaboração do sistema hidrostático em estudo.	45
Fig. 4.1 Disposição de todos os elementos que irão garantir a automatização do sistema e os sinais digitais/analógicos disponíveis.....	48
Fig. 4.2 Armário de comando.....	49

Fig.4.3 Autómato programável instalado no armário de comando	50
Fig. 4.4 Base modular TWDLMDA40TDK (20).....	51
Fig. 4.5 Figura ilustrativa das ligações entre as duas bases de relés e o autómato	51
Fig. 4.6 Módulo de entradas/saídas analógicas (21)	52
Fig. 4.7 Módulo de comunicação TWDNOZ485D (22)	53
Fig. 4.8 HMI STU 655	53
Fig. 4.9 Vista traseira da HMI demonstrando as ligações existentes.....	54
Fig. 4.10 Armário de potência e sua legenda	54
Fig. 4.11 Faixa afixada no disco na construção do disco codificador.....	56
Fig. 4.12 Esquema de funcionamentos dos dois tipos de sensores (sensores por interrupção (esquerda) e sensores por reflexão (direita)	57
Fig. 4.13 Esquema construído para funcionamento de um codificador linear ótico refletor (direita) e o codificador digital elaborado empregado neste estudo.....	57
Fig. 4.14 Figura ilustrativa dos sensores óticos e seu esquema representativo dos sensores óticos de reflexão (24).....	58
Fig 4.15 Sinal sinusoidal originário dos sensores ópticos.....	59
Fig 4.16 Esquema simplificado do conversor de sinal sinusoidal em sinal quadrado	59
Fig 4.17 Esquema do circuito utilizado para conversão do sinal sinusoidal em sinal quadrado	60
Fig. 4.18 Figura ilustrativa de um transdutor de pressão da STW. (21)	61
Fig. 4.19 Curva característica do transdutor de pressão STW	61
Fig 4.20 Pt100 de 3 condutores	62
Fig 4.21 Diferentes configurações dos cabos de ligação	63
Fig 4.22 Transmissor de temperatura de 2 condutores (PR electronics).....	63
Fig 4.23 Modo de conetar o transmissor de temperatura com o dispositivo de leitura.....	64
Fig 4.24 Sensor de temperatura utilizado na realização do presente trabalho	65
Fig 4.25 Esquema demonstrativo dos diferentes elementos do sensor de temperatura utilizado	65
Fig 4.26 Reta característica do sinal do transmissor em corrente	66
Fig 4.27 Esquema de montagem do transmissor de temperatura para se adquirir uma leitura do sinal em tensão	67
Fig 4.28 Característica do transmissor de temperatura 5333QA02	67
Fig 4.29 Posicionamento Pt100 na linha que se direcciona para o reservatório	68

Fig.5.1 Janela introdutória.....	70
Fig.5.2 Menu Principal da interface	70
Fig. 5.3 Figura ilustrativa da hierarquia da interface gráfica e demonstrativa dos vários níveis dessa mesma.....	71
Fig.5.4 Configuração tipo dos painéis existentes na HMI	71
Fig.5.5 Painel de entrada no módulo de comando manual.....	74
Fig.5.6 Painel de Comando e monitorização da central hidráulica e monitorização do disjuntor e nível do óleo	74
Fig. 5.7 Tela do comando das saídas digitais.....	75
Fig.5.8 Painel do comando manual das saídas analógicas	75
Fig.5.9 Janela responsável pela monitorização das entradas digitais e disposição dos sinais digitais provenientes dos sensores.....	76
Fig.5.10 Popup responsável pela monitorização da velocidade.....	76
Fig.5.11 Janela responsável pela monitorização das entradas analógicas.....	77
Fig. 6.1 Circuito hidráulico simplificado da transmissão hidrostática.....	80
Fig.6.2 Estrutura do controlador de velocidade utilizado na execução dos exercícios B acompanhado da sua legenda	94
Fig. 6.3 Curva característica do comportamento da válvula reguladora de caudal existente no sistema em estudo.....	95
Fig. 6.4 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 4 bar.....	96
Fig. 6.5 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 5 bar.....	97
Fig. 6.6 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 15 bar.....	97
Fig. 6.7 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 20 bar.....	98
Fig. 6.8 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 30 bar.....	98
Fig. 6.9 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 35 bar.....	99
Fig. 6.10 Curva característica da válvula limitadora de pressão proporcional responsável pela pressão de comando da bomba.....	103

Índice de tabelas

Tabela 1 Eficiência de diferentes dispositivos de transmissões de energia (7).....	8
Tabela 2 Especificações retiradas do catálogo da bomba de êmbolos (10)	34
Tabela 3 Especificações retiradas do catálogo do motor trifásico	35
Tabela 4 Especificações retiradas do catálogo da bomba de barrilete rotativo c/ compensador de pressão (11)	35
Tabela 5 Especificações técnicas do motor de came periférica (12).....	37
Tabela 6 Especificações técnicas do motor trocoidal (13).....	38
Tabela 7 Características da válvula direcional responsável pelo sentido de rotação do motor (16)	40
Tabela 8 Características da válvula de comutação da carga do motor (16).....	40
Tabela 9 Características da válvula reguladora de caudal proporcional Duplomatic (17)	41
Tabela 10 Especificações da válvula limitadora de pressão responsável pelo ajuste da pressão do circuito (18).....	43
Tabela 11 Limitadora de pressão responsável pelo comando da cilindrada da bomba de êmbolos axiais (17)	44
Tabela 12 Especificações dos sensores óticos Philips	58
Tabela 13: Especificações técnicas do transmissor de temperatura 5333 (PReletronics).....	66
Tabela 14: Enumeração dos botões existentes e suas respetivas funções	72
Tabela 15 Tabela sobre os máximos e mínimos de velocidades e frequências.....	77
Tabela 16 Resultados do exercício A.1. para velocidades baixas	86
Tabela 17 Resultados do exercício A.1. para velocidades intermédias	86
Tabela 18 Resultados do exercício A.1. para velocidades altas.....	86
Tabela 19 Resultados do exercício A.2. para velocidades baixas	91
Tabela 20 Resultados do exercício A.2. para velocidades intermédias	92
Tabela 21 Resultados do exercício A.2. para velocidades intermédias	92

1 Introdução

1.1 Enquadramento do tema

O presente trabalho consiste na conceção, desenvolvimento e comando de uma transmissão hidrostática rotativa, inserido na área de óleo-hidráulica, pelo que inicialmente é apresentado um breve enquadramento do tema na área dos meios de transmissão de energia para a realização de movimento.

A movimentação de uma carga requer a disponibilidade de energia sob a forma mecânica com as características impostas pelos requisitos da carga. Essa energia deve ser fornecida por uma fonte de energia adequada. Na maior parte dos casos, as características impostas pela carga não são compatíveis com as disponibilidades naturais da fonte de energia, pelo que devemos compatibilizá-las através de uma solução adequada de “transmissão/conversão de energia” entre uma fonte e uma carga, o que em muitos casos pode envolver a conversão de uma energia primária em outra forma de energia. Posteriormente poderá existir uma outra conversão na forma final de energia mecânica que a carga necessita.

Uma transmissão de energia, neste contexto, estabelece a ligação entre uma fonte de energia e a carga (receptor de energia) provocando o movimento desta mesma carga.

Este movimento pode ser linear ou rotativo. Os movimentos lineares, quando são efetuados por atuadores lineares, têm as suas limitações naturais de curso enquanto o movimento rotativo tem a possibilidade de ser contínuo, não tendo as mesmas limitações em relação ao primeiro movimento.

Neste trabalho pretende-se realizar uma aplicação de uma transmissão com o objetivo de efetuar o movimento rotativo de cargas.

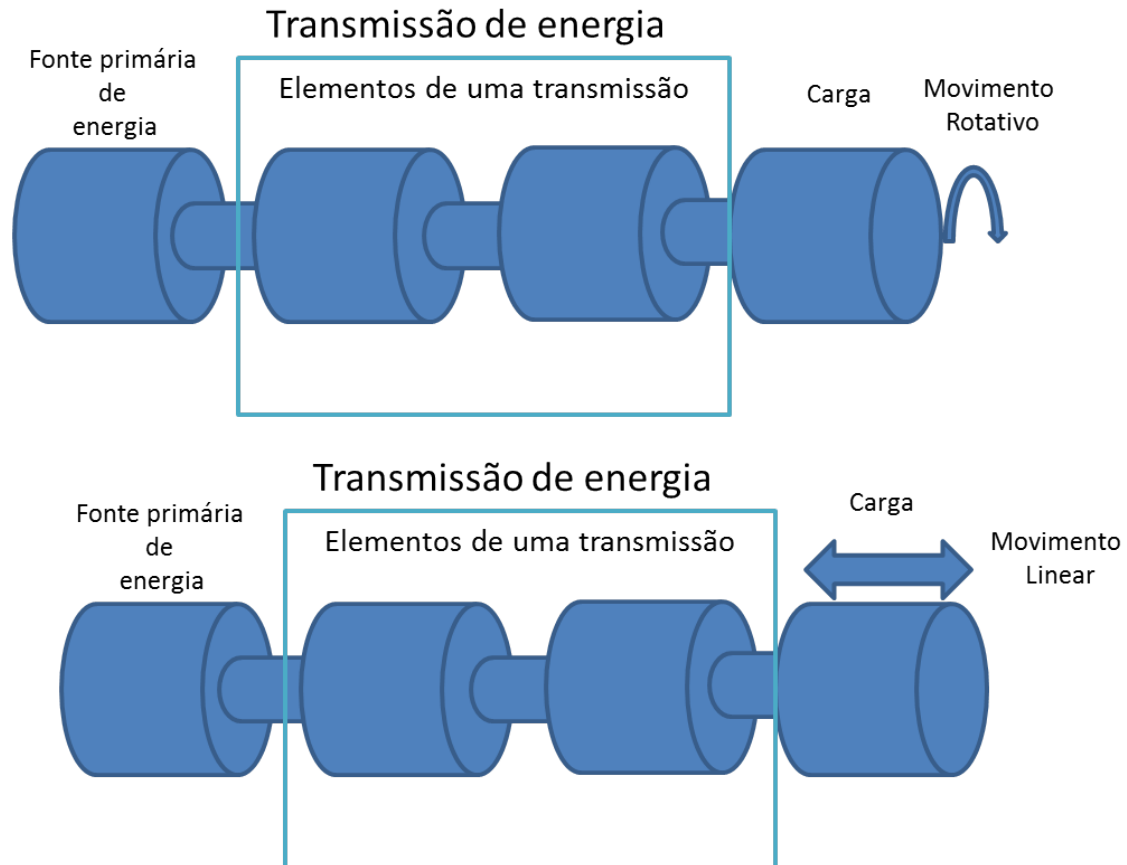


Fig. 1.1 Esquema de uma transmissão de energia entre uma fonte primária de energia e uma carga

A especificação e a conceção de uma transmissão devem ter em consideração as diversas restrições impostas pela carga que poderão ser, entre outras:

- Valor da carga: binário elevado ou pequeno;
- Velocidade da carga: velocidade baixa ou elevada;
- Potência requerida pela carga: combinações possíveis das duas características anteriores;
- Sentido do movimento: uni ou bidirecional;
- Dinâmica da carga: carga pouco variável ou muito variável;
- Requisitos de travagem: travagem dinâmica ou somente estática;
- Tipo de carga: carga ativa ou passiva, cargas tratora ou resistente;
- Dinâmica da velocidade: velocidade constante ou velocidade variável discreta ou continuamente.

A função principal de uma transmissão é tornar os requisitos (binário, velocidade, aceleração/desaceleração) da fonte primária (motor elétrico ou servomotor) compatíveis com as características da carga ou recetor de energia.

As soluções tecnológicas que constituem uma transmissão de energia podem ser de diferentes naturezas tais como: mecânica, hidráulica, pneumática e elétrica.

Tendo em perspetiva a aplicação de transmissões de energia para a criação de movimento em máquinas e equipamentos de produção, pode-se listar da seguinte forma:

- Transmissão mecânica (por exemplo: por engrenagens, cintas ou correias)
- Transmissão hidráulica (por exemplo: com motores hidráulicos e bombas)
- Transmissão pneumática (por exemplo: actuadores pneumáticos)
- Transmissão elétrica (por exemplo: motor e alternador elétrico)

De seguida vão-se caracterizar os dois primeiros tipos de transmissão (mecânica e hidráulica) para assim se poderem comparar os dois tipos de transmissão e poder tirar algumas conclusões. É de salientar que as transmissões pneumáticas e elétricas não são desenvolvidas no presente estudo.

As transmissões mecânicas são as transmissões mais tradicionais e que contêm uma grande panóplia de opções, tais como: veios, cardans, engrenagens, pinhão, cremalheira, fusos, correias, correntes e redutores.

A principal vantagem, de uma transmissão mecânica reside na circunstância de ser uma solução mecânica para a conversão direta de energia mecânica em energia mecânica. Em complemento, são reconhecidas as vantagens da sua alta eficiência, a sua robustez e o seu eventual menor custo de implementação.

Entre as desvantagens reconhecem-se as exigências geométricas que impõem entre os seus elementos, a necessidade de boa lubrificação, a sua suscetibilidade a ingressões de matérias contaminantes e, conseqüentemente, a necessidade de uma boa manutenção e as limitações de transmissões a grandes distâncias. (1)

Existe um variado leque de equipamentos que empregam elementos de transmissão mecânicos para conseguir o propósito de transmissão de energia. De seguida são enumeradas algumas aplicações especiais onde é utilizado este tipo de transmissão: helicóptero, torres eólicas e por fim na transmissão de energia dos meios automóveis.

A transmissão de energia por meio mecânico, mais especificamente através de engrenagens, é utilizada para girar os rotores existentes no helicóptero (principal e da cauda). Este princípio é conseguido através de um sistema complexo de engrenagens, que converte a

velocidade de rotação conseguida através do motor *diesel* em velocidades baixas para ser possível controlar a velocidade das pás principais e as pás da cauda (Fig. 1.2). (2)

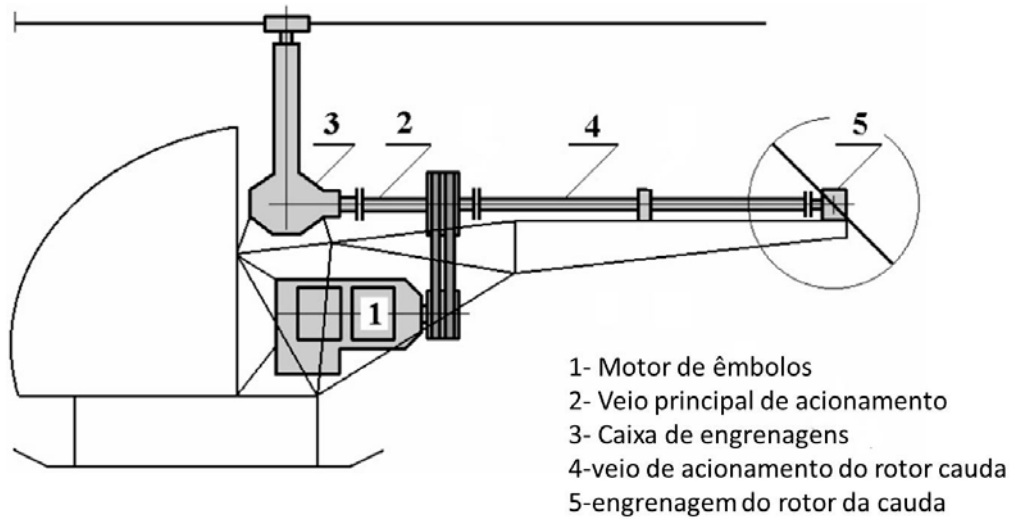


Fig. 1.2 Esquema dos diferentes componentes existentes na transmissão de um helicóptero (3)

A vantagem deste tipo de transmissão é a grande possibilidade de desmultiplicação de forças (binários) como neste caso, onde existe a possibilidade de distribuir o binário disponível pela fonte primária (motor diesel) pelo rotor da cauda e pelo veio principal.

A principal desvantagem das transmissões por engrenagens é a constante necessidade de manutenção, especialmente a mudança de lubrificante. A maior causa de acidentes de helicóptero é o encravamento da caixa de engrenagens.

Outra aplicação deste tipo de sistema de transmissão é a rotação das pás das torres eólicas que estão acopladas ao rotor, que através de uma caixa de engrenagens converte a energia mecânica do movimento das pás provocado pelo vento, no accionamento do conversor de energia mecânica em energia eléctrica através do alternador (Fig. 1.3). (2)

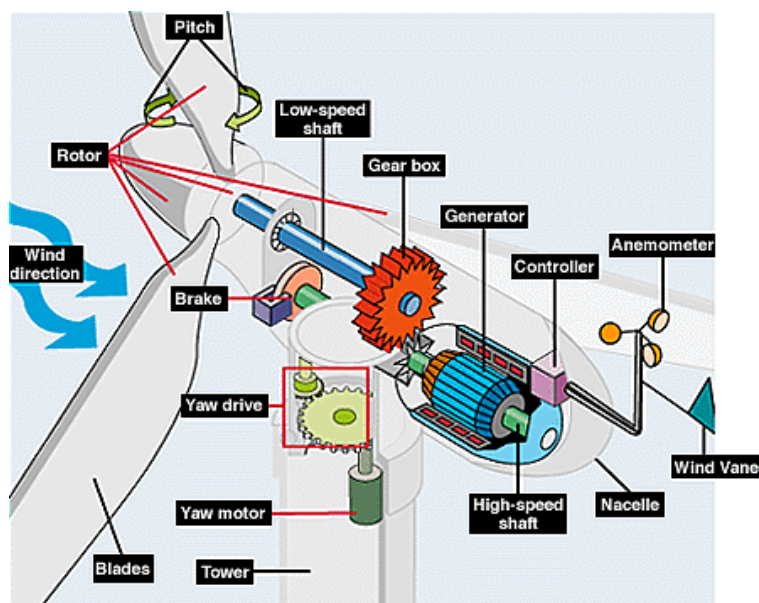


Fig. 1.3 Esquema de funcionamento da transmissão de energia de uma torre eólica

Este tipo de transmissão aplicado às pás eólicas, tem como grande vantagem a sua grande eficiência energética bem como a possibilidade de multiplicar a velocidade de entrada (velocidade do rotor) para obtenção de uma grande velocidade de saída (velocidade do gerador/alternador). Uma das principais desvantagens é a sua grande e permanente necessidade de lubrificação, tal como no exemplo anterior. De acordo com a Fig. 1.4, onde estão representadas as causas das falhas das torres eólicas verifica-se que apenas 5% dessas falhas são devidas à caixa de engrenagens. No entanto, são estas as avarias mais dispendiosas em termos de reparação. Outra desvantagem é a sua durabilidade, enquanto uma torre eólica tem uma durabilidade de 20 anos, as caixas de engrenagens desenvolvem problemas após 5 anos de funcionamento. (4)

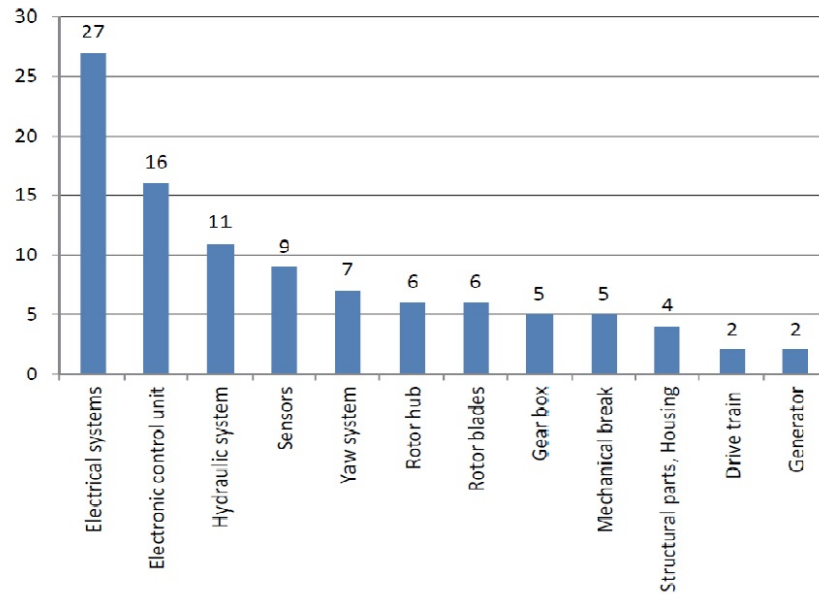


Fig. 1.4 Gráfico sobre os elementos responsáveis das falhas existentes nas torres eólicas (em percentagem) (4)

Por último, este tipo de transmissão no ramo automóvel também merece referência. Este tipo de transmissão é responsável pela transmissão da velocidade e binário do motor (resultante da combustão de combustível) para as rodas do veículo. A aplicação deste tipo de transmissão deve-se à sua grande eficiência comparativamente a outro tipo de transmissões (principalmente hidrostática). A desvantagem é a indisponibilidade de variar continuamente a velocidade ou binário sem comutar a engrenagem (Fig. 1.5).

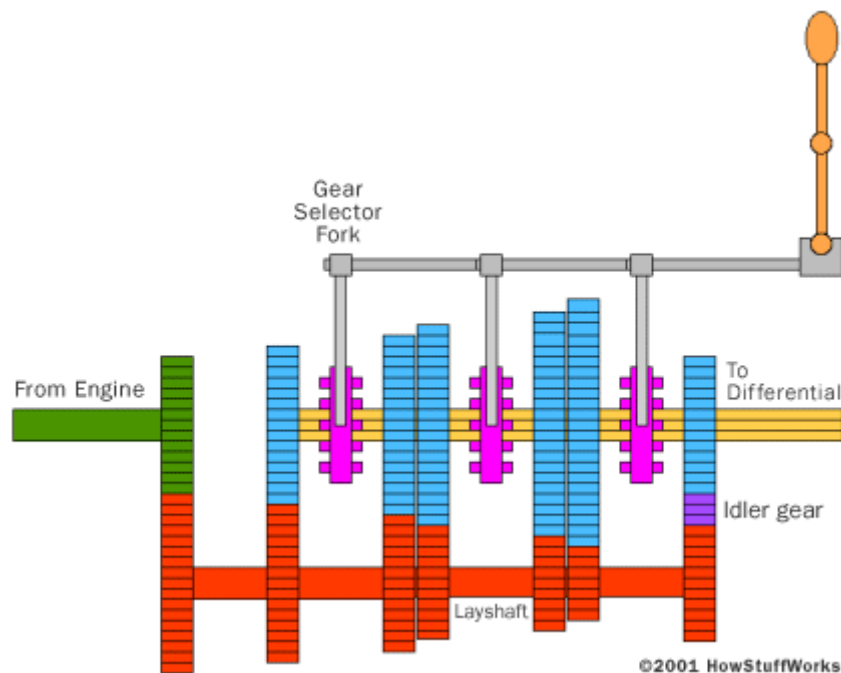


Fig. 1.5 Caixa de engrenagens de um automóvel (5)

Depois de uma breve descrição de algumas aplicações deste tipo de transmissão (transmissão mecânica) pode-se concluir que a principal vantagem é o seu rendimento energético e como sua grande desvantagem a sua incapacidade de resposta para casos em que requer uma relação continuamente variável entre a velocidade de entrada e a de saída.

Uma outra alternativa de solução de transmissão são as transmissões hidráulicas hidrostáticas.

Segundo KORN, J. (1), uma transmissão hidrostática é constituída pela transmissão de energia através de um fluido utilizando bombas volumétricas e motores.

A bomba é acionada por um motor primário. Este motor primário pode ser um motor elétrico embora na maior parte das vezes é usado um motor a *diesel* ou a gasolina. A energia do motor primário fornecido à bomba é convertida em fluido sujeito a alta pressão o qual é transmitido através de mangueiras e/ou condutas até ao motor, voltando essa energia a ser convertida em energia mecânica. Neste processo de transmissão as variáveis da energia hidráulica consistem no caudal e pressão enquanto as variáveis da energia mecânica são o binário e a velocidade de rotação. Neste tipo de transmissão o motor primário é o responsável pela criação da energia mecânica. Enquanto a bomba converte a energia mecânica proveniente do motor primário em energia hidráulica, o motor é responsável pela conversão dessa mesma energia (hidráulica) em energia mecânica. Com base do diagrama do fluxo energético (Fig. 1.6), onde se dá a conversão de energia (motor e bomba) é sempre acompanhada por perda energética (sob a forma de calor).

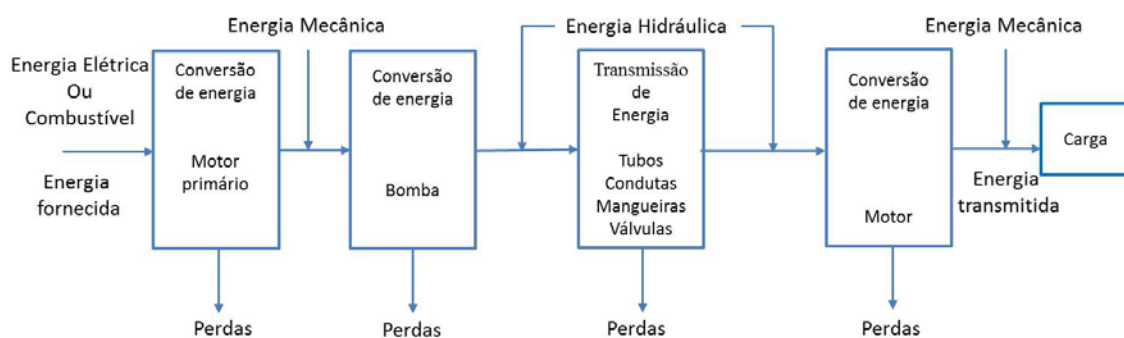


Fig. 1.6 Diagrama do fluxo energético de uma transmissão hidrostática (1)

Existem também outras componentes neste tipo de transmissão que merecem referência, que são as válvulas, que possibilitam controlar as seguintes variáveis:

- O sentido de rotação do motor;
- A velocidade de rotação do motor;

- O binário máximo do motor;
- O caudal à saída da bomba.

Segundo KORN, J. (1), este tipo de transmissão contém algumas características que tornam favoráveis a sua aplicação tais como:

- Uma unidade hidrostática proporciona o controlo continuamente variável sobre uma gama de velocidades maior do que qualquer outra forma de transmissão;
- Eliminação ou redução do uso de travões;
- Eliminação da necessidade do uso de engrenagens ou embraiagens na inversão de sentido;
- Tamanho e peso reduzidos tendo em conta a densidade de potência do motor hidráulico;
- Possibilidade de variar a velocidade sob qualquer binário;
- Controlo remoto.

Segundo uma publicação “Lubrication Engineers Technical Department” (6), este tipo de transmissão contém algumas desvantagens tornando mais atrativas outras transmissões, tais como:

- A menor eficiência em relação a algumas transmissões mecânicas (conforme Tabela 1);
- O seu elevado custo em relação à maioria das transmissões existentes;
- Todas as perdas no circuito são convertidas em calor;
- Necessidade de verificação do nível do fluido mais assídua em comparativamente às outras transmissões.

Tabela 1 Eficiência de diferentes dispositivos de transmissões de energia (7)

Dispositivo de transmissão de energia	Eficiência (%)
Motor elétrico - 10HP	85
Motor elétrico - 20HP	93
Cinta em "V"	95
Cinta lisa	98
Redução parafuso sem fim	70
Transmissão por corrente	98
Bomba hidráulica	80
Motor hidráulico	80
Compressor pneumático	70

As transmissões hidrostáticas são conhecidas como bons transmissores de energia quando se requer uma variação da velocidade contínua. As transmissões hidrostáticas são muito utilizadas em maquinaria de trabalho pesado, como por exemplo bulldozers, tratores etc.

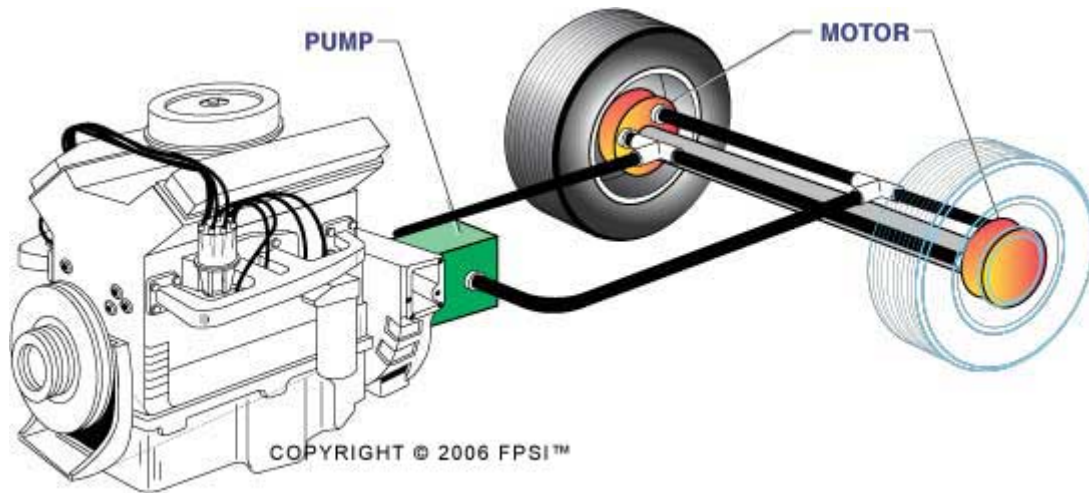


Fig. 1.7 Esquema representativo de uma transmissão hidrostática na área automóvel (8)

As principais vantagens que levam à escolha deste tipo de transmissão são:

- A transmissão hidrostática permite que as rodas possam ser controladas independentemente (como se pode ver na Fig. 1.5);
- A máquina pode acelerar e desacelerar suavemente, tanto numa direção como na outra sem obrigar o motor primário a ter esse mesmo tipo de comportamento;
- A ausência de uma caixa de velocidades significa que a máquina necessita de menos manutenção;
- Possibilidade de uma travagem dinâmica.

A principal desvantagem é a sua eficiência em relação às transmissões mecânicas, uma vez que as transmissões mecânicas têm eficiências típicas superiores a 90 % e a eficiência de uma transmissão hidrostática bem projetada dificilmente ultrapassará os 85 %. (7)

Portanto, em termos de conclusão verifica-se que as transmissões hidrostáticas têm na sua versatilidade de domínio das variáveis que permitem configurar a transmissão de energia a sua principal vantagem, permitindo que o motor primário possa trabalhar na sua melhor gama de funcionamento e a carga dispor das características adequadas aos seus requisitos.

A controlabilidade de uma transmissão hidrostática de energia é, assim, a sua principal característica diferenciadora, pese embora a desvantagem de potencialmente ter rendimentos energéticos mais baixos.

1.2 Motivação

Devido ao interesse em estudar equipamentos hidráulicos utilizados em aplicações correntes industriais, surgiu a hipótese de conceber e construir uma transmissão hidrostática que fosse possível comandar, de um modo eventualmente automático, bem como de dispor de uma capacidade de simular cargas que pudessem ser alteráveis por algum processo.

A possibilidade de se conceber uma transmissão hidrostática que pudesse ser controlada através da utilização de um autómato e de uma consola com capacidades de interface gráfica, deu o complemento de motivação necessário.

Desta forma, houve a ambição de conceber este equipamento para funcionar em ambiente laboratorial por forma a analisar a capacidade de resposta de uma transmissão hidrostática perante a presença de várias situações de carga.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a conceção, desenvolvimento e colocação em funcionamento de uma transmissão hidrostática incorporando um gerador/simulador de carga, num meio laboratorial, realizando assim uma banca com intuítos de demonstração didática para aperfeiçoamento do conhecimento, e portanto com objetivos formativos.

A transmissão a construir tem um objetivo adjacente, que é o de tornar este mesmo tipo de transmissão hidrostática comandável eletricamente por meio de elementos gráficos de cariz industrial (HMI) tornando assim a transmissão mais flexível e mais fácil de comandar por parte de qualquer utilizador.

1.4 Estrutura do relatório

Este relatório, após a presente introdução, inicia no segundo capítulo, com uma descrição das transmissões hidrostáticas, onde são apresentados os tipos existentes, e a tecnologia utilizada entre outras características.

No terceiro capítulo é descrita a transmissão hidrostática rotativa concebida e desenvolvida no presente estudo, bem como toda a sua caracterização tais como os princípios de funcionamento dos motores e bombas, sendo estes os principais elementos da transmissão hidrostática.

No quarto capítulo é explicado como é concebida e implementada a automatização da transmissão em estudo e a descrição dos elementos fundamentais para essa automatização.

No quinto capítulo é efetuada a descrição da configuração da interface gráfica (HMI) e a explicação detalhada do módulo de comando manual programado.

No sexto capítulo são descritos os diferentes exercícios elaborados e executados assim como observações sobre os resultados obtidos.

No sétimo capítulo são expostas as conclusões retiradas bem como a apresentação de propostas de trabalhos futuros.

No oitavo e último capítulo é onde são expostos as referências e a bibliográfica de onde a presente dissertação foi fundamentada.

2. Transmissões hidrostáticas rotativas

No presente capítulo são referenciados os diferentes tipos de transmissão hidrostática e as configurações existentes dentro de cada tipo de transmissão.

No seguimento do assunto anteriormente retratado, também se vão enumerar os diferentes tipos de soluções de controlo possíveis para cada transmissão hidrostática.

Por último são referidos alguns exemplos de transmissões hidrostáticas didáticas já existentes no laboratório da FEUP, expondo também algumas aplicações práticas industriais de transmissões hidrostáticas, em diferentes atividades (piscatória, agrícola e industrial).

2.1 Tipos de transmissão hidrostática e suas características

Este subcapítulo tem como objetivo a descrição dos diferentes tipos de transmissões hidrostáticas bem como as suas características acompanhadas das vantagens e desvantagens na sua utilização.

Como já foi referido anteriormente, numa transmissão hidrostática a energia mecânica é convertida em hidráulica pela utilização de uma ou mais bombas e a energia hidráulica é convertida de volta em mecânica pela utilização de um ou mais motores. Esta combinação de diferentes tipos de bombas com diferentes tipos de motores permite a construção de circuitos hidráulicos com diferentes potencialidades.

Numa primeira fase de classificação dos tipos de transmissão, são caracterizados quando à forma de circulação do caudal em transmissões de circuito aberto ou fechado (Fig. 2.1).

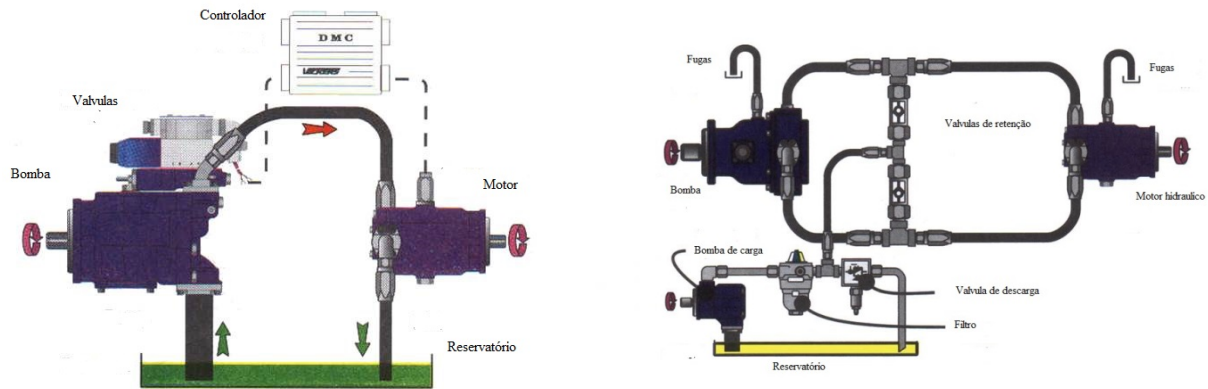


Fig. 2.1 Configuração de um circuito aberto (esquerda) e de um circuito fechado (direita)

De seguida são apresentadas as possíveis combinações que estão de acordo com o tipo de bombas e motores que entram na constituição de cada tipo de circuito (fechado e aberto) e suas características:

- Bomba e motor de cilindrada fixa;
- Bomba de cilindrada variável e motor de cilindrada fixa;
- Bomba de cilindrada fixa e motor de cilindrada variável;
- Bomba e motor de cilindrada variável.

2.1.1 Circuito aberto

Nos circuitos abertos, a bomba efetua a sucção do óleo de um reservatório e o motor executa o retorno desse mesmo óleo para o reservatório.

Numa transmissão de circuito aberto, o caudal proveniente da bomba tem a possibilidade de ser controlado por três formas:

- Por variação da velocidade de rotação do motor primário;
- Pela utilização de válvulas de regulação (reguladora de caudal ou estranguladora de caudal);
- Pela regulação da cilindrada da bomba;
- Pela regulação da cilindrada do motor

O retorno desse mesmo caudal ao reservatório proveniente do motor também pode ser controlado por parte de válvulas.

Como se pode ver na figura seguinte (Fig. 2.2), uma transmissão hidrostática rotativa pode ser constituída por um motor de acionamento (motor eléctrico, por exemplo), por uma

bomba e um motor de cilindrada fixa, com uma válvula direcional, entre a bomba e o motor, para assim possibilitar a mudança de sentido de rotação do motor. O caudal é constante, bem como a velocidade de saída do veio do motor. Para ser possível efetuar o controlo da velocidade neste tipo de circuito pode-se utilizar um variador de frequência, por exemplo, conseguindo regular a velocidade do motor de acionamento e como consequência disso existe a variação do caudal da bomba.

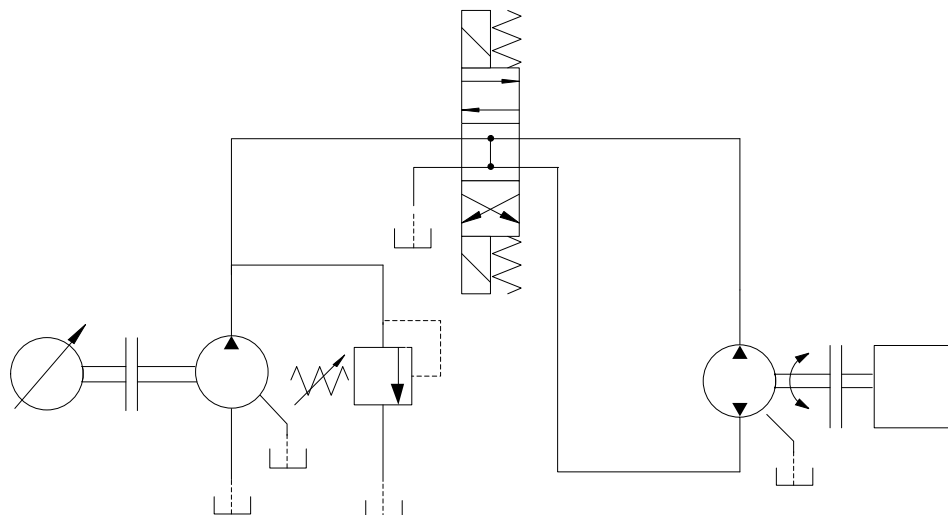


Fig. 2.2 Circuito aberto constituído com um motor elétrico com variador de frequência (responsável pelo ajuste da velocidade do circuito), bomba e motor de cilindrada fixa (10)

Certamente que esta solução é mais adequada para cargas resistivas, e que sejam de valor pouco significativo, nomeadamente a baixa velocidade de rotação.

De seguida encontram-se alguns exemplos de circuitos abertos onde o comando da velocidade é conseguido através do uso de válvulas fluxométricas. As válvulas fluxométricas que podem ser usadas no controlo de velocidade de uma transmissão hidrostática são:

- Válvulas estranguladoras de caudal;
- Válvulas reguladoras de caudal;

As válvulas estranguladoras de caudal, perante uma variação de carga, influenciam a variação da pressão e conseqüentemente variação do caudal, o que representa uma desvantagem que pode resultar num mau controlo de velocidade do motor. Esta desvantagem é contornada através da utilização das válvulas reguladoras de caudal.

O posicionamento deste tipo de válvulas pode ser classificado em: *meter-out*; *meter-in* ou *bleed-off*.

No circuito aberto seguinte (Fig. 2.3) adiciona-se uma válvula reguladora de caudal em *meter-in* (controlo primário) para assim possibilitar ao utilizador variar a velocidade do motor, e conseqüentemente da carga, nos dois sentidos de rotação (velocidade de saída) ainda que a velocidade de entrada (motor primário) seja constante. Também pode ser adicionada uma válvula limitadora de pressão que tem como objetivo proteger o circuito de sobrecargas. Esta disposição não garante um controlo de velocidade rigoroso pois existe variação da velocidade devido à existência de fugas existentes. Estas mesmas são resultado da variação da carga.

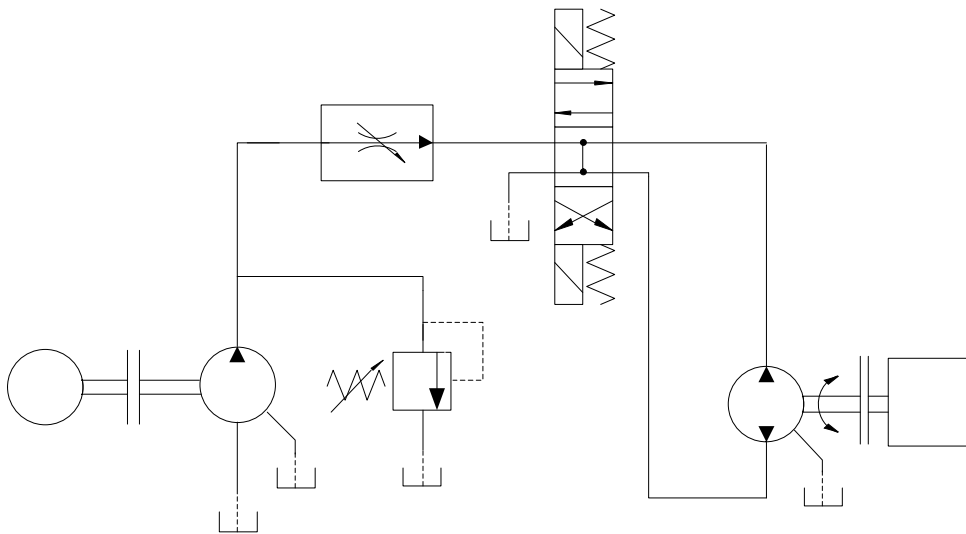


Fig. 2.3 Circuito aberto com uma reguladora de caudal em *meter-in*, válvula direcional e limitadora de pressão (10)

A válvula também pode ser posicionada em *meter-out* (Fig. 2.4). Este tipo de disposição, em controlo secundário, oferece a possibilidade de controlar a velocidade do motor sem ser influenciada pela variação da carga para valores negativos.

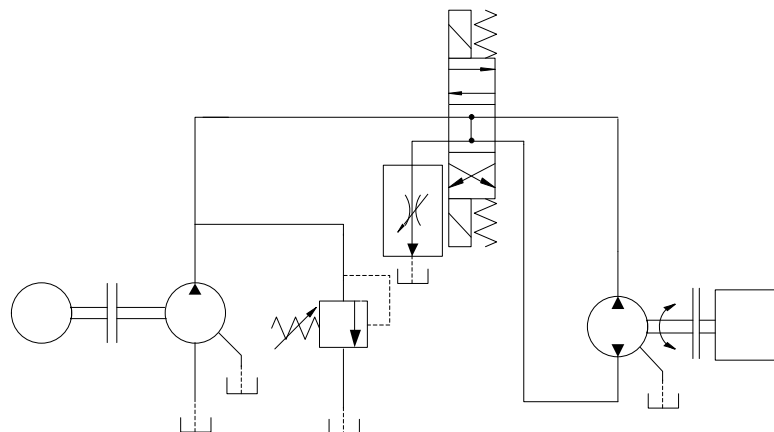


Fig. 2.4 Circuito aberto constituída com uma válvula reguladora de caudal em *meter-out*

A colocação de uma válvula reguladora de caudal em *bleed-off* (em derivação) requer menos dispêndio de energia pois a pressão a que a bomba está sujeita é a pressão devida à carga. Este tipo de controlo de velocidade muito menos rigoroso, em comparação com os casos atrás referidos (*meter-in* e *meter-out*), e só é possível para cargas resistivas e de valor não muito reduzido.

Também existe a possibilidade de controlar a velocidade de um **motor de cilindrada fixa** utilizando uma **bomba de cilindrada variável** (Fig. 2.5). O controlo da velocidade é conseguido através da variação da cilindrada resultando assim no fornecimento de um caudal infinitamente variável ao motor. O binário disponível no motor, para este tipo de configuração, é constante para toda a gama de velocidades da transmissão. Esta característica (binário constante) deve-se a que o binário depende da cilindrada do motor (que é fixa) e do valor da pressão do fluido, que tem um valor máximo fixo.

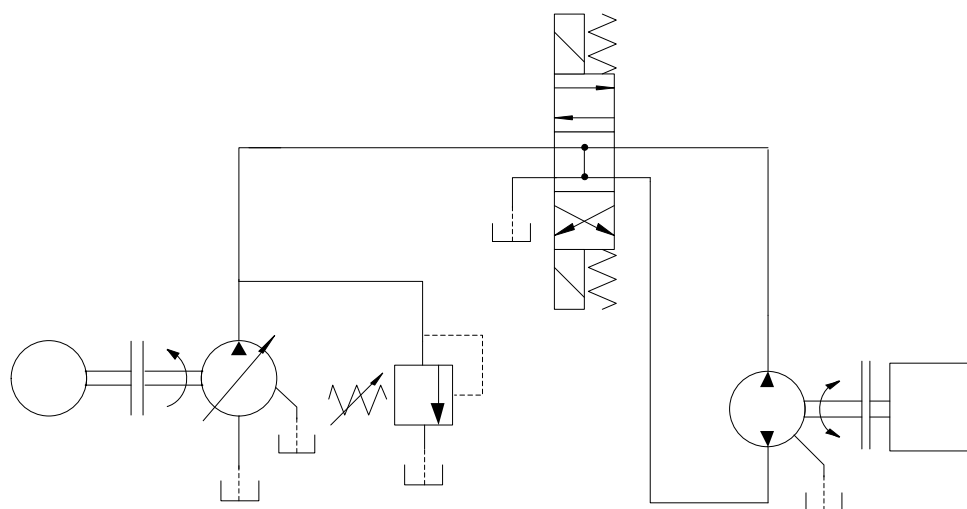


Fig. 2.5 Circuito aberto constituído com uma bomba de cilindrada variável e um motor de cilindrada fixa

Este tipo de solução de transmissão hidrostática tem um maior rendimento energético e permite controlar velocidades, mesmo a carga máxima, a partir de velocidades nulas.

Uma das formas de aumentar a gama de velocidades das combinações anteriormente referidas é substituir o **motor** de cilindrada fixa por um de **cilindrada variável**. No circuito que utiliza motores de cilindrada variável tem-se que ter em atenção que a velocidade aumenta com a diminuição da cilindrada do motor, e assim o motor não pode trabalhar a cilindradas reduzidas (nem nulas). Neste tipo de transmissões à variação de cilindrada de um motor corresponde uma também diminuição do binário disponível no motor.

De seguida vai ser analisado o comportamento de alguns circuitos abertos quando se pretende realizar a frenagem de uma carga (baixa inércia e alta inércia).

O principal elemento para garantir a forma de frenagem da carga é a configuração da posição central da válvula direcional. O centro da válvula direcional pode ser “aberto” ou “fechado”.

Para garantir a frenagem de uma carga de baixa inércia, a válvula direcional poderá ter centro “aberto” (Fig. 2.6). A movimentação da válvula para a posição central vai resultar numa quase ausência de frenagem. Isto é, as forças de fricção vão abrandar a carga até a sua paragem completa.

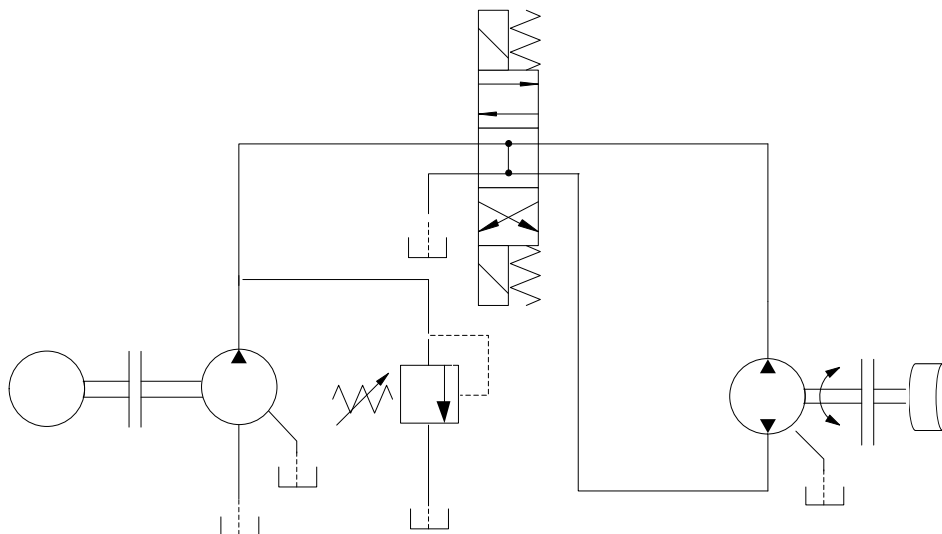


Fig. 2.6 Circuito aberto constituído por uma válvula direcional de centro "aberto"

No entanto quando se pretende frear cargas de inércia elevada já não se pode utilizar uma válvula direcional de centro “fechados” pois, assim, a carga vai demorar muito tempo até à sua paragem completa. A inserção de uma válvula de centro em fechado origina uma repentina resistência ao binário devido à inércia, pelo que causaria um “pico” de pressão na linha de saída do motor. Este aumento repentino de pressão resultaria na danificação das condutas, acoplamentos e provavelmente do próprio motor.

A solução para este problema é a adição duas válvulas de contra pressão nas linhas do motor. Estas válvulas de contrapressão situadas em linha, garantem a frenagem da carga (de alta inércia), sem ocorrer picos de pressão ou cavitação, como se pode visualizar na Fig. 2.7.

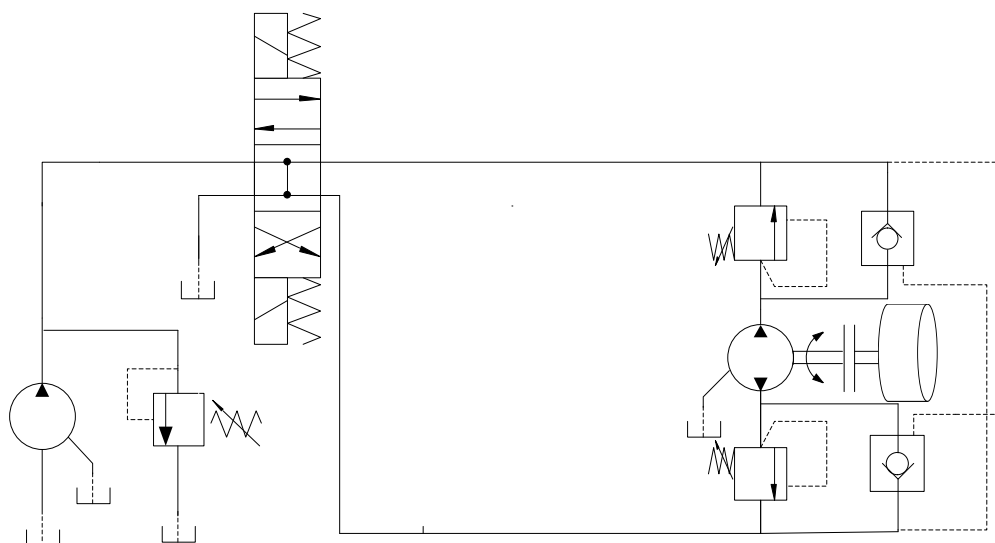


Fig. 2.7 Circuito aberto constituído por uma válvula direcional de centro fechados para frear cargas de alta inércia

2.1.2 Circuito Fechado

Outro tipo de solução de circuito para uma transmissão hidrostática rotativa consiste no circuito fechado (Fig. 2.8), que consiste no retorno de todo o fluido proveniente do motor à linha de aspiração da bomba.

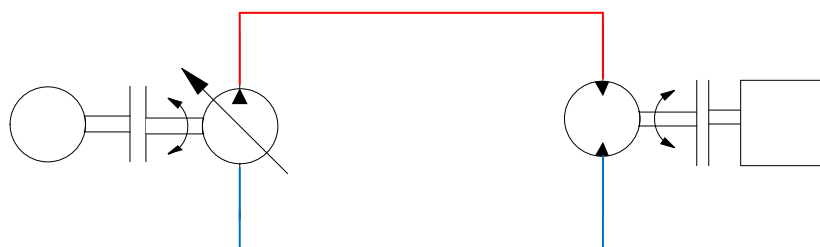


Fig. 2.8 Transmissão hidrostática do tipo circuito fechado

Como o caudal à saída do motor é reconduzido para a entrada da bomba, este facto traz algumas vantagens, tais como:

- Ambas as linhas (tanto à saída da bomba como à entrada da bomba), podem estar sujeitas a alta pressão;
- A reversibilidade pode ser atingida sem a necessidade de válvulas, uma das possibilidades é utilizando uma bomba de cilindrada variável, com inversão de cilindrada.

O circuito fechado acima esquematizado encontra-se incompleto devido à possibilidade de ocorrência de fugas no motor e na bomba. Essas perdas têm de ser compensadas no circuito ou repostas no mesmo. Esta compensação é garantida através de uma bomba auxiliar, de compensação. Para existir prevenção devido a grandes variações de carga utiliza-se uma válvula limitadora de pressão ligada na linha de entrada do motor (alta pressão) para evitar picos de pressão existentes quando a transmissão está a ser submetida a grandes cargas, como se pode verificar na Fig. 2.9.

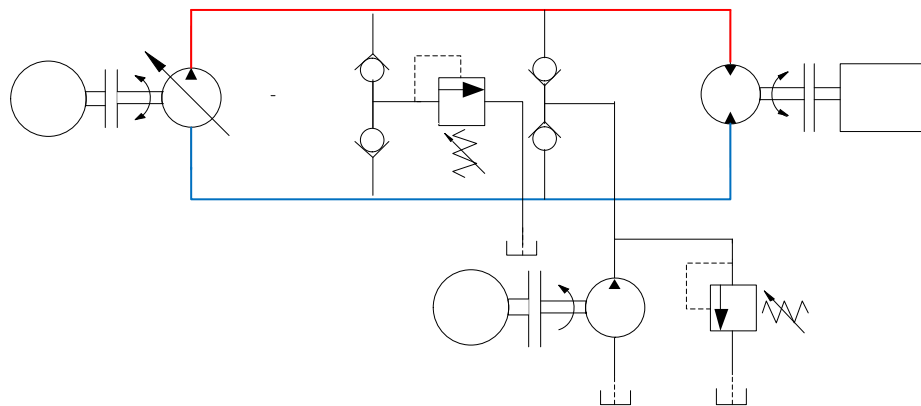


Fig. 2.9 Circuito fechado constituído pela bomba auxiliar e a bomba e motor principal

O controlo da velocidade de um circuito fechado constituído por uma **bomba e um motor de cilindrada fixa**, como foi referido na análise anterior do circuito aberto, pode ser conseguido por intermédio da variação de velocidade do motor primário, motor elétrico, através da utilização de um variador de frequência.

O circuito fechado mais utilizado é, provavelmente, o circuito constituído por uma **bomba de cilindrada variável e um motor de cilindrada fixa**. Este circuito tem como vantagem a garantia além do controlo de velocidade mas também do sentido de rotação do motor através de um único sistema de controlo da cilindrada da bomba (posicionamento do

prato). Além das características atrás referidas também podemos parar o motor através da variação da cilindrada da bomba.

As bombas/motores (reversibilidade) de circuitos fechados têm diferentes configurações que merecem uma especial referência.

2.1.2.1 Bombas típicas de uma transmissão de circuito fechado

A principal característica deste órgão de um circuito fechado é a sua versatilidade, pois tanto podem funcionar como bomba ou como motor, sendo que esta característica se denomina reversibilidade hidráulica.

O principal tipo de bombas usado neste tipo de circuito (circuito fechado) são as bombas de êmbolos axiais de barrilete rotativo e prato inclinado devido à sua grande capacidade de controlo de cilindrada quer para valores negativos.

As bombas de êmbolos axiais de barrilete rotativo de prato inclinado (Fig. 2.10) são, provavelmente, o tipo construtivo mais utilizado no circuito fechado. A possibilidade de instalação de bombas secundárias com acionamento através da árvore da bomba principal, de integração válvulas e aparelhos de controlo permite atingir as mais variadas vantagens. O projeto da bomba é feito de modo a facilitar o acoplamento de várias bombas.

Todo o tipo de válvulas e a bomba auxiliar estão integrados no mesmo corpo que a bomba principal para bombas de circuito fechado.

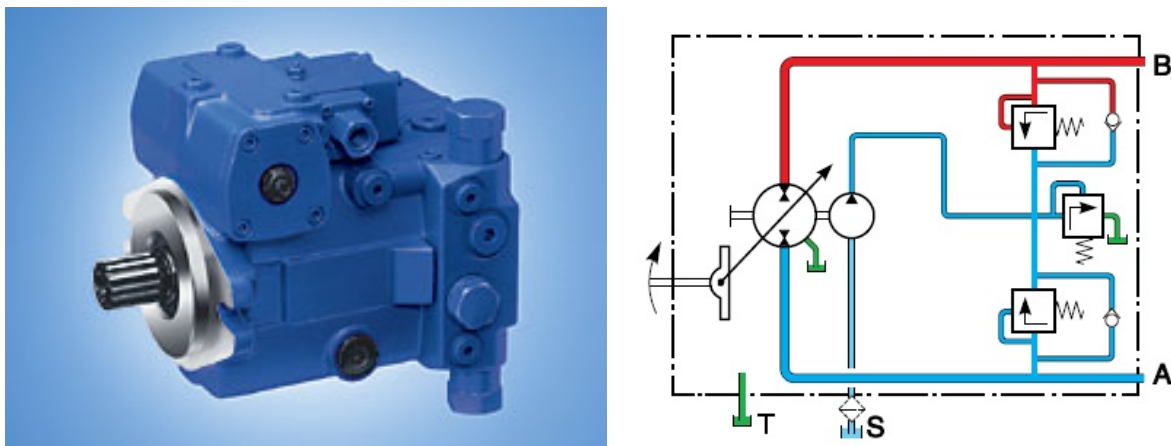


Fig. 2.10 Bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo de prato inclinado (8)

Uma vez descritos os diferentes tipos de circuitos, bem como as suas diferentes configurações, no capítulo seguinte são descritos os controlos possíveis numa transmissão hidrostática.

2.2 Tipos de controlo existentes nas transmissões hidrostáticas

Depois de se referirem os diferentes tipos de bombas, bem como as diferentes configurações e tipos de transmissões hidrostáticas, é necessário analisar os diferentes tipos de controlo existentes neste tipo de transmissões de modo a atingir as características desejadas, que tornam este tipo de transmissão tão atrativo para diferentes aplicações, mais fácil e convenientemente.

O controlo de uma transmissão hidrostática pode ser efetuado das seguintes formas:

- Controlo manual;
- Controlo através de servo válvulas;
- Controlo a pressão constante.

O controlo manual consiste no posicionamento do prato da bomba de êmbolos axiais de cilindrada variável, através da utilização de uma alavanca que assim assegura o posicionamento do prato. Esta característica apresenta algumas limitações quando se pretende controlar bombas de cilindrada elevada, pois é necessário dispor de um grande binário na alavanca, existindo também a transferência de vibração da alavanca para o utilizador. (11)

Para se conseguir o controlo de bombas de maior cilindrada, o controlo pode ser assegurado através de servo-válvulas de forma a garantir o posicionamento do prato. Com esta passagem é possível eliminar a transferência de vibração do prato para o utilizador. A utilização de servo-válvulas além de eliminar a passagem de vibração no controlo do prato torna possível o controlo remoto por parte do utilizador.

No contexto do controlo através servo-válvulas existem três diferentes naturezas de sinais de atuação das mesmas, a enumerar:

- Mecânica;
- Hidráulica;
- Elétrica;

O comando mecânico é preferível à atuação indirecta, uma vez que não é necessário alto binário para garantir o posicionamento do prato para bombas de êmbolos de cilindradas

altas ou intermédias, ou o comando manual (alavanca) de uma bomba de cilindrada variável como o caso existente no laboratório. A bomba que se encontra na Fig. 2.11 é uma bomba de cilindrada variável de êmbolos radiais, para circuito fechado.



Fig. 2.11 Exemplo de uma transmissão hidrostática através do comando manual através de uma alavanca, existente no laboratório (neste caso a bomba é do tipo de êmbolos radiais de cilindrada variável).

Com o sinal de origem hidráulica consegue-se adicionar válvulas lógicas (“e” e “ou”) e controlar com pressões baixas a atuação de servo-válvulas.

Outro tipo de sinal de comando é o elétrico onde se concilia a grande capacidade de controlo da energia hidráulica com a flexibilidade do comando electrónico, facilitando assim a automatização do sistema (11).

2.3 Transmissões hidrostáticas existentes no laboratório de óleo-hidráulica

Este subcapítulo tem como objetivo enumerar as transmissões hidrostáticas existentes no laboratório de Óleo-Hidráulica da FEUP, indicando as suas características mais relevantes.

Existem vários tipos de bancas didáticas onde estão inseridas transmissões hidrostáticas, como é o caso da banca Gustavo Cudell (Fig. 2.12) que contém um motor hidráulico onde existe a possibilidade de adicionar ou retirar carga através da adição ou subtração de discos de inércia. Este motor hidráulico pode ser movido através da energia hidráulica que é criada em um dos grupos hidráulicos existentes, sendo a transmissão completada por válvulas a inserir no circuito e montadas em painel apropriado.

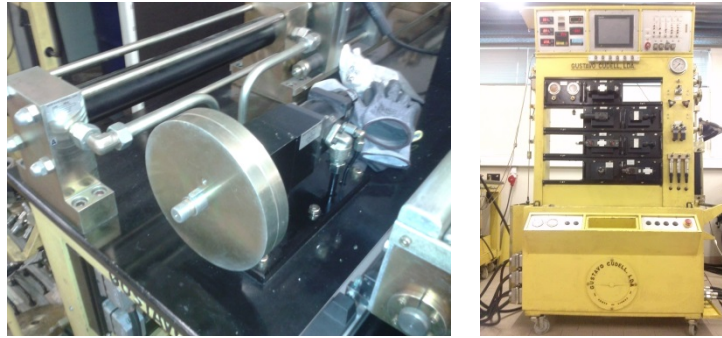


Fig. 2.12 Motor hidráulico (esquerda) existente na banca Gustavo Cudell e seu posto de comando (direita)

Outro exemplo de banca existente no laboratório onde está presente uma transmissão hidrostática são as bancas Hidromática. Como se pode verificar na Fig. 2.13, nesta, existe um motor hidráulico. No entanto não há a possibilidade de criar nenhum tipo de carga.



Fig. 2.13 Motor hidráulico (figura da esquerda) existente na banca Hidromática (figura da direita)

Depois da caracterização das transmissões hidrostáticas existentes no laboratório de óleo-hidráulica pode-se concluir que a aplicação de uma carga para meios laboratoriais ou didáticos não é fácil de construir e disponibilizar. Então ainda mais difícil se torna quando se coloca a hipótese de variação dinâmica de carga aplicada por parte do utilizador. Devido à grande dificuldade de simular a aplicação de uma carga em meio laboratorial, tornou-se assim interessante considerar uma transmissão hidrostática para este meio com a possibilidade de além da aplicação da carga, possibilitar a sua variação.

2.4 Aplicações de Transmissões hidrostáticas

As transmissões hidrostáticas oferecem soluções apetecíveis em diversas atividades, tais como:

- Agricultura;
- Pesca;
- Indústria;

Na agricultura, este tipo de transmissão é usado para a tração das rodas dos tratores como se pode ver na Fig. 2.14, devido ao seu alto binário e à sua flexibilidade na mudança de sentido.

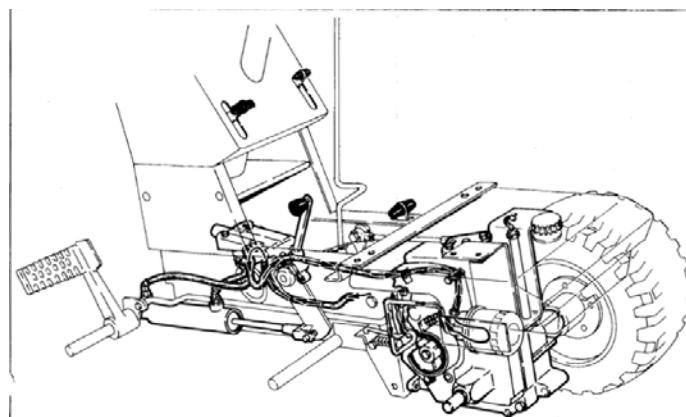


Fig. 2.14 Sistema de transmissão hidrostática da tração das rodas de um trator

Na pesca, este tipo de transmissão tem algumas aplicações devido às suas características, como o caso do tambor de enrolamento de redes e o guincho.

O tambor de enrolamento de redes (Fig. 2.15) contém este tipo de transmissão, e assim, requer uma boa resposta na variação de velocidade e sentido de rotação, bem como uma boa resposta perante a existência de carga ou não.



Fig. 2.15 Tambor de enrolamento de redes de uma embarcação pesqueira

O guincho hidráulico (Fig. 2.16) também é um bom exemplo de uma transmissão hidrostática e uma boa demonstração do comportamento deste tipo de transmissão perante uma carga resistiva (na situação de recolha da rede de pesca) e também perante uma carga tratora (quando se lança a rede ao mar).

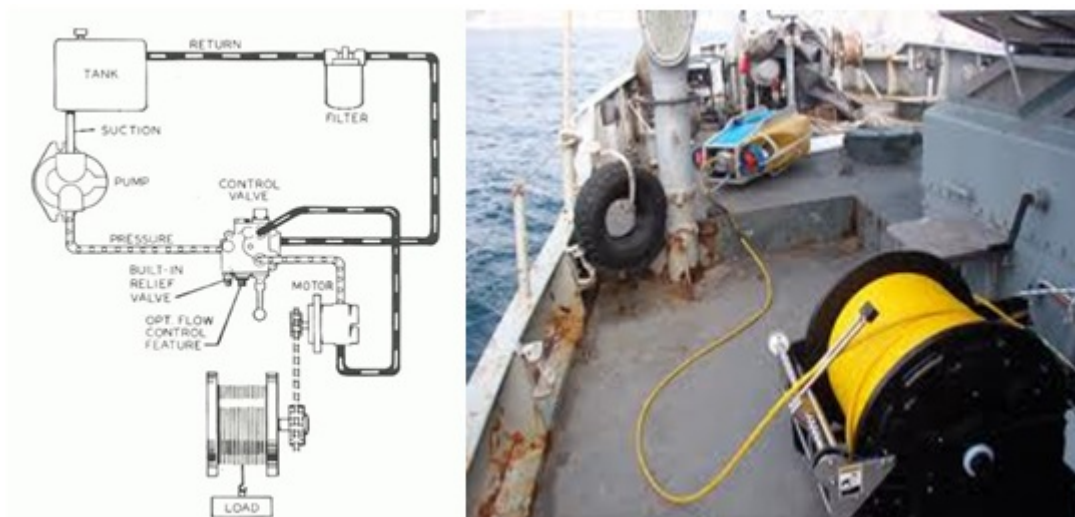


Fig. 2.16 Esquema hidráulico de um guincho hidráulico (esquerda); guincho hidráulico de uma embarcação pesqueira

Na atividade industrial é usado, por exemplo, nos empilhadores em circuito fechado, trazendo algumas vantagens como uma condução suave, desgaste mínimo, longa vida dos componentes e baixo consumo de combustível.

O número de elementos de ligação entre os motores e as bombas é reduzido. Neste tipo de transmissão não são necessárias engrenagens nem embraiagens tornando assim a

manutenção destes sistemas muito simples. A Fig. 2.17 é uma boa demonstração do sistema de tracção das rodas das empilhadoras.



Fig. 2.17 Sistema de tracção das rodas de uma empilhadora

3. Transmissão hidrostática rotativa em estudo

Neste presente capítulo é apresentada a transmissão hidrostática concebida no presente trabalho, para fins didáticos.

Numa primeira fase é feita uma análise prévia ao circuito hidráulico desenvolvido para a realização deste estudo.

De seguida encontra-se a caracterização do material disponível para a conceção da transmissão hidrostática, tendo em conta as características anteriormente especificadas finalizando no circuito de transmissão hidrostática em estudo.

3.1 Caracterização do circuito idealizado para a construção de uma transmissão hidrostática rotativa

A bomba e o motor hidráulico são os elementos fundamentais utilizados para a caracterização de uma transmissão hidrostática.

Na realização deste estudo foi utilizada uma bomba de cilindrada variável, para circuito aberto, e um motor hidráulico de cilindrada fixa, criando-se assim, uma transmissão que oferece a possibilidade de variar a velocidade de rotação do motor mantendo o binário disponível constante. Assim sendo, na figura abaixo apresentada (Fig. 3.1), encontra-se o circuito principal da transmissão hidrostática proposta.

circuito principal será colocada uma válvula reguladora de caudal em “*Meter-in*” garantindo assim uma capacidade de controlo de velocidade de forma continuamente variável.

Outra característica que se pretende obter é a possibilidade de inversão do sentido de rotação do motor sem recorrer a um circuito fechado, sendo que para obter essa característica pode-se colocar também uma válvula direccional de quatro orifícios e três posições. Com especial atenção para o facto de esta válvula ter o centro “aberto” para assim, quando a válvula se encontrar na posição central, esta garantir a inativação do motor.

Para que esta transmissão hidrostática tenha uma eficiência energética interessante, a bomba é de cilindrada automaticamente variável, a pressão constante. Como a pressão necessária no circuito depende do valor da carga aplicada, a eficiência energética da transmissão depende da coerência entre a pressão da bomba e a pressão requerida pela carga.

Esta coerência é possível porque a pressão a que a bomba funciona pode ser variável através de uma válvula proporcional de pressão existente no seu comando.

Fazendo agora uma análise ao circuito secundário, responsável pela simulação de carga no sistema, esta é conseguida através de uma válvula limitadora de pressão, a realizar uma função de contrapressão, que se encontra à saída do motor de carga, de cilindrada fixa, que efetivamente funciona como um gerador hidráulico, assegurando assim a frenagem do motor do circuito principal. Isto acontece uma vez que está acoplado ao motor de cilindrada fixa constituinte do circuito secundário, e o ajuste da carga é realizado através desta mesma válvula manométrica.

Também se pode simular uma comutação rápida de carga, entre uma carga nula e uma ajustada, com uma válvula direccional. Esta válvula oferece a opção de o fluido se encaminhar todo para o reservatório sem “passar” pela limitadora de pressão garantindo assim a não frenagem do motor do circuito primário. Porém, quando se dá a comutação desta mesma válvula direccional o fluido passa pela válvula limitadora de pressão dando a possibilidade de ajustar a pressão do fluido que passa para o reservatório.

Por fim, foi incluída uma ponte de válvulas de retenção de modo a garantir que a função de frenagem se verifica nos dois sentidos de rotação.

Uma vez descrita no essencial a funcionalidade pretendida para a transmissão hidrostática, são seguidamente apresentados os elementos que a constituem.

3.2 Descrição dos diferentes elementos existentes na transmissão hidrostática em estudo

Numa primeira fase da conceção serão caracterizados e identificados os diferentes elementos constituintes da transmissão hidrostática no estudo realizado. Como já foi referido anteriormente, uma transmissão hidrostática é constituída fundamentalmente por quatro tipos de elementos, de modo a atingir as características desejadas:

- Bombas hidráulicas;
- Motores hidráulicos;
- Válvulas;
- Motor elétrico.

A ligação destes elementos constitui uma transmissão hidrostática, sendo conseguida através de mangueiras e condutas de diferentes diâmetros e materiais, dependendo da pressão do fluido.

3.2.1 Bombas e motor elétrico (central hidráulica)

A fonte de energia é constituída pelo motor eléctrico, de veio duplo, e duas bombas hidráulicas. O motor eléctrico é o fornecedor de energia mecânica à bomba, e a bomba é o elemento conversor da energia mecânica em energia hidráulica.

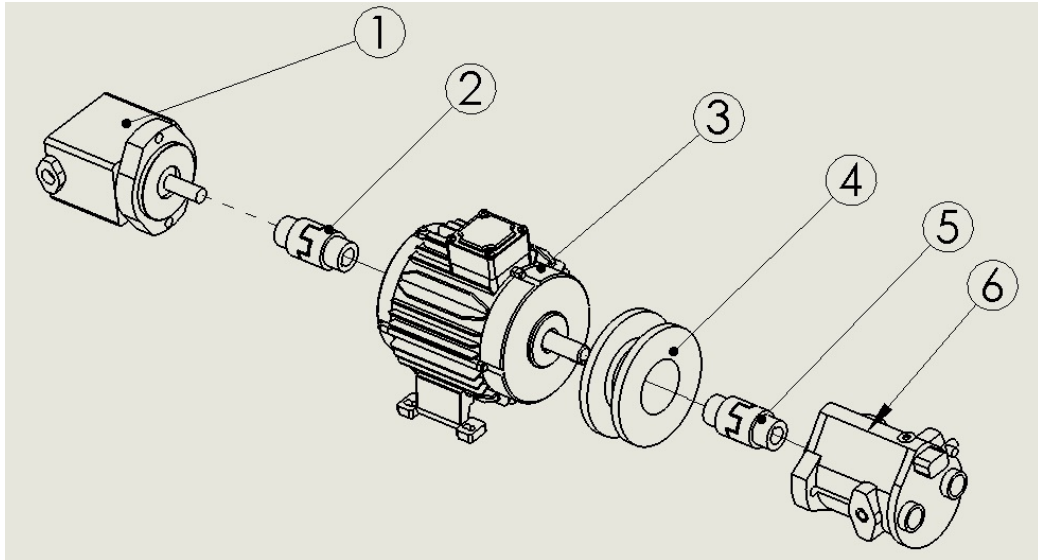


Fig 3.2 Esquema simplificado dos diferentes elementos da fonte de energia hidráulica, com duas bombas

As bombas são ligadas ao motor por acoplamentos elásticos (5 e 2) montadas sobre o reservatório de óleo hidráulico como mostrado na Fig. 3.3. Esta central hidráulica constituída por duas bombas: uma bomba de cilindrada variável (6) e uma bomba de cilindrada fixa (1), accionada pelo motor elétrico trifásico (1).

As bombas que constituem esta central hidráulica são as seguintes:

- Bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo e compensador automático de pressão (cilindrada variável);
- Bomba de palhetas simétrica (cilindrada fixa).

A seguinte imagem (Fig. 3.3) mostra a central hidráulica utilizada e a respetiva montagem sob o seu reservatório.



Legenda:

- 1- Bomba de palhetas simétricas;
- 2- Motor trifásico (M);
- 3- Bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo com compensador automático de pressão.

Fig. 3.3 Enumeração e legenda dos elementos constituintes da central hidráulica em estudo

A bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo com compensador automático de pressão é uma bomba que garante um bom controlo de pressão, uma vez que através de um parafuso conseguimos estabelecer um *preset* em termos de pressão, uma vez que a bomba realiza um ajuste automático do caudal à saída mantendo assim a pressão constante no sistema.

Como já foi referido anteriormente, a bomba de cilindrada variável é uma bomba do circuito principal e a bomba de cilindrada fixa entra na constituição do circuito secundário (circuito responsável pela simulação de carga).

As especificações da central hidráulica utilizada na realização deste estudo estão representadas nas seguintes tabelas.

Tabela 2 Especificações retiradas do catálogo da bomba de êmbolos (10)

1-Bomba de palhetas simétricas (B2)	
Marca	Vickers
Modelo	V101B7B1C20
Pressão Máxima	210 bar
Cilindrada Máxima	22.8 cm ³

Tabela 3 Especificações retiradas do catálogo do motor trifásico

2-Motor trifásico (M)	
Marca	EFACEC
Potência	4 kW
Corrente nominal	9.1 A
Tensão Alimentação	380 V

Tabela 4 Especificações retiradas do catálogo da bomba de barrilete rotativo c/ compensador de pressão (11)

3-Bomba de êmbolos axiais de barrilete rotativo c/ compensador de pressão (B2)	
Marca	Vickers
Modelo	PVQ10A2RSE1S
Pressão Máxima	138 bar
Cilindrada Máxima	10 cm ³

Através das especificações técnicas retiradas dos catálogos referentes a cada bomba volumétrica e motor elétrico pode-se iniciar o estudo teórico sobre que caudal cada bomba disponibilizará a cada circuito (principal e secundário) para a realização da transmissão de energia.

A obtenção do caudal de alimentação é conseguida através da utilização da cilindrada (Cg) da bomba da qual está a ser bombeado o óleo e da velocidade de rotação do motor de acionamento (n). A velocidade de rotação vem expressa em rotações por minuto (RPM), a cilindrada em cm³ e o caudal em litros por minuto (l/min)

$$Q = Cg * n/1000 \tag{1}$$

De acordo com o catálogo, para o cálculo do caudal disponível da bomba considerando a cilindrada da bomba de êmbolos axiais de 10 cm³ e a velocidade de rotação do motor elétrico de 1410 RPM, o caudal máximo de alimentação do motor de came periférica será:

$$Q = \frac{1410 * 10}{1000} = 14,1 \text{ l/min} \tag{2}$$

Para ao cálculo do caudal de alimentação do motor trocoidal considera-se a cilindrada da bomba de palhetas simétrica, de $22,8 \text{ cm}^3$, e a velocidade de rotação do motor elétrico de 1410 RPM, então este caudal será de:

$$Q = \frac{1410 * 22,8}{1000} = 32,14 \text{ l/min} \quad (3)$$

Com o valor do caudal máximo disponível por cada bomba já pode ser analisado outro tipo de elemento essencial: os motores.

3.2.2 Motores

Os motores são essenciais para se obter a conversão de energia hidráulica em energia mecânica.

Para a execução deste estudo empregaram-se dois motores acoplados entre si, de modo a rodarem à mesma velocidade (Fig 3.4). Esta ligação é garantida através do acoplamento (1) existente, que irá permitir assim o movimento solidário entre motores. Outro elemento que garante a fixação dos motores um ao outro é a flange de ligação (4).

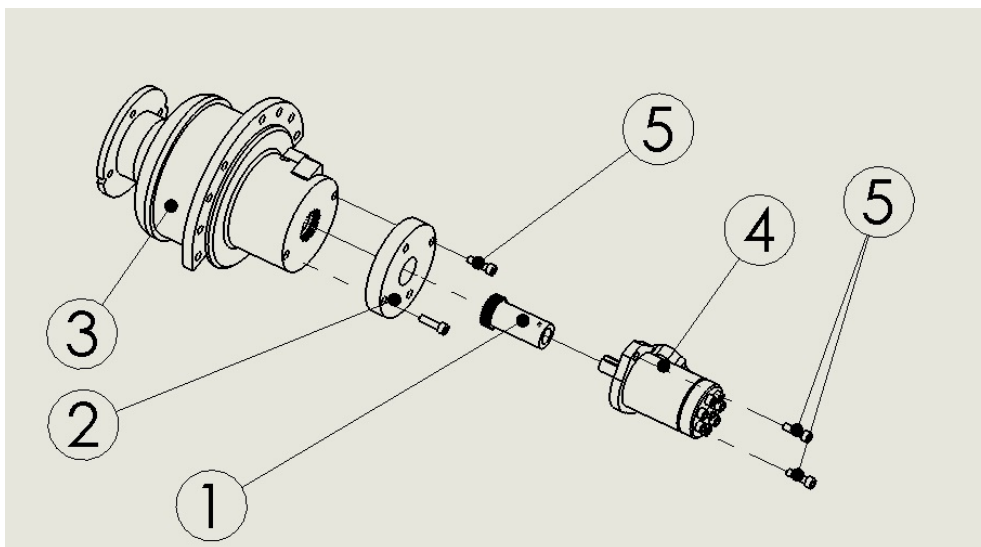


Fig 3.4 Esquema de montagem do freio hidráulico e enumeração dos diferentes elementos que o constituem

Este freio hidráulico (Fig. 3.5) é constituído por dois motores de cilindrada fixa e têm a seguinte denominação:

- Motor de êmbolos radiais de came periférica (motor principal) (M1).
- Motor trocoidal (motor secundário e carga) (M2).

Estes dois tipos de motores são de velocidades lentas ou intermédias, e de alto ou médio binário.

O motor trocoidal (2) vai entrar na constituição do circuito secundário, o qual vai ser responsável pela simulação de carga a aplicar ao motor de came periférica. O motor de êmbolos radiais de came periférica (1) entra na constituição do circuito principal, é alimentado pela bomba de êmbolos axiais de cilindrada variável.



Legenda:

- 1- Motor de came periférica (M1);
- 2- Motor Trocoidal (M2).

Fig. 3.5 Motores acompanhados pela sua legenda

De acordo com o catálogo de cada motor teve-se a possibilidade de retirar as suas especificações técnicas. Estas especificações estão apresentadas nas seguintes tabelas:

Tabela 5 Especificações técnicas do motor de came periférica (12)

Motor de came periférica (M1)	
Cilindrada máxima	468 cm ³
Pressão máxima	450 bar
Marca	Poclain
Modelo	S546XM

Tabela 6 Especificações técnicas do motor trocoidal (13)

Motor trocoidal (M2)	
Cilindrada máxima	99 cm ³
Pressão máxima	224 bar
Marca	Adan Limited
Modelo	AVM100

Através das especificações retiradas dos catálogos referentes a cada motor pode-se iniciar o estudo da velocidade máxima de cada motor em relação ao caudal disponível por cada bomba a que está conectada.

O cálculo da velocidade de rotação dos motores é obtido através do valor do caudal de alimentação atrás calculado e da cilindrada de cada um:

$$n = \frac{Q * 1000}{C} \quad (4)$$

O cálculo da velocidade de rotação do motor de came periférica é obtido através do seu caudal de alimentação 14,1 l/min, e da sua cilindrada de 468 cm³/rev, obtendo-se o seguinte valor de velocidade máxima:

$$n_{m\acute{a}x} = \frac{14,1 * 1000}{468} = 30,12 \text{ rpm} \quad (5)$$

A velocidade de rotação do outro motor (trocoidal) é obtida através do caudal de alimentação de 32,14 l/min e da cilindrada de 99 cm³.

$$n_{m\acute{a}x} = \frac{32,14 * 1000}{99} = 324 \text{ rpm} \quad (6)$$

Assim, estas serão as velocidades máximas possíveis nos motores. Como o valor máximo possível de velocidade no motor de carga é maior do que a máxima velocidade a que este pode ser conduzido pelo motor principal, nunca haverá lugar a cavitação.

3.2.2 Válvulas

As válvulas têm também um papel fundamental numa transmissão hidrostática, de modo a conseguir um fácil e flexível controlo das seguintes características:

- Sentido de circulação do fluido (válvulas direcionais);
- Pressão máxima do sistema ou de algumas partes do sistema (válvulas manométricas);
- Quantidade de fluido em várias partes do sistema (válvulas fluxométricas).

Este subcapítulo vai incidir na válvulas escolhidas para garantir as diferentes funções que se pretendem obter de modo a atingir os objetivos pretendidos.

3.2.2.1 Válvulas direcionais

Na construção da transmissão utilizaram-se válvulas direcionais para diferentes funções.

No circuito hidráulico principal, a mudança de sentido de rotação do motor de came periférica é garantida utilizando uma válvula direcional de quatro orifícios e três posições (Fig. 3.6).

Símbolo hidráulico:

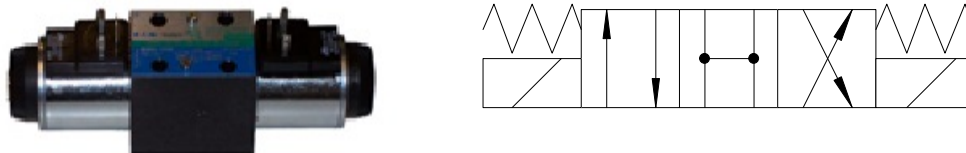


Fig. 3.6 Válvula direcional responsável pela definição do sentido de rotação do motor de came periférica

A outra válvula direcional tem a função de uma válvula *on/off* que dá a opção do motor trabalhar com um binário resistivo (i.e. frear ou não frear o motor). A válvula referida consiste numa válvula de quatro orifícios e duas posições (Fig. 3.7), encontrando-se à saída do motor trocoidal.



Símbolo hidráulico:

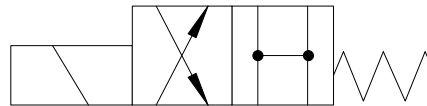


Fig. 3.7 Válvula direcional responsável pela comutação da carga

Na tabela seguinte estão apresentadas as características mais importantes destas válvulas

Tabela 7 Características da válvula direcional responsável pelo sentido de rotação do motor (16)

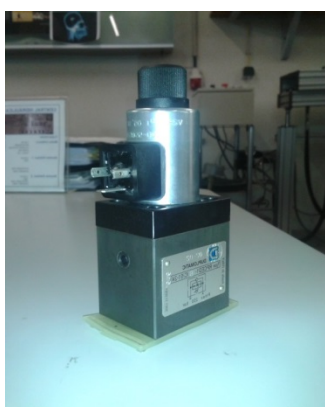
Modelo	DG4V-3 (S) -0CMUH560
Marca	Vickers
Designação	Válvula direcional 4 vias e 3 posições
Tipo de montagem	Placa base ou bloco distribuidor
Caudal máximo	40 l/min
Pressão máxima	350 bar
Fonte alimentação	24 V DC

Tabela 8 Características da válvula de comutação da carga do motor (16)

Modelo	DG4V-3 (S) - 0BMUH560
Marca	Vickers
Designação	Válvula direcional 4 vias e 2 posições
Tipo de montagem	Placa base ou bloco distribuidor
Caudal máximo	40 l/min
Pressão máxima	350 bar
Tensão alimentação	24 V DC

3.2.2.2 Válvulas fluxométricas

A válvula fluxométrica utilizada é uma válvula reguladora de caudal proporcional (17) permitindo regular o caudal de alimentação ao motor de came periférica por forma a variar a velocidade de rotação do mesmo. Esta válvula encontra-se colocada em *meter-in* para assim conseguir um controlo primário do motor que constitui o circuito principal (motor de came periférica).



Símbolo hidráulico:

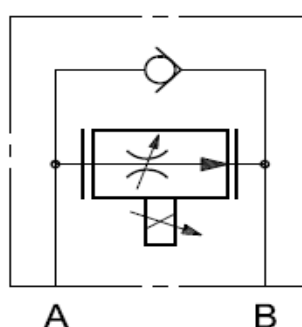


Fig. 3.8 Válvula reguladora de caudal proporcional e seu símbolo hidráulico

Esta válvula controla o caudal com compensação de pressão e térmica eliminando assim a influência da velocidade devido ao diferencial de pressões (Fig. 3.8). O controlo desta válvula é conseguido através da existência de um eletroímã proporcional controlado por um amplificador de corrente.

Tabela 9 Características da válvula reguladora de caudal proporcional Duplomatic (17)

Código de identificação	RPCED/8/C/51-247
Designação	Reguladora de caudal proporcional
Tipo de montagem	Placa base
Fonte de alimentação	24 V DC
Caudal máximo	9 l/min
Pressão máxima	250 bar
Marca	Duplomatic

A bomba de êmbolos disponibiliza um caudal máximo de 14 l/min, e a válvula reguladora de caudal só pode controlar até um caudal máximo de 9 l/min. Deste modo, a totalidade da gama de caudal controlada pela válvula vai poder ser utilizada até o caudal máximo estipulado pelo caudal máximo da válvula reguladora de caudal. Assim a velocidade do motor vai poder ser controlada numa gama de velocidades ente 0 até ± 19.2 RPM.

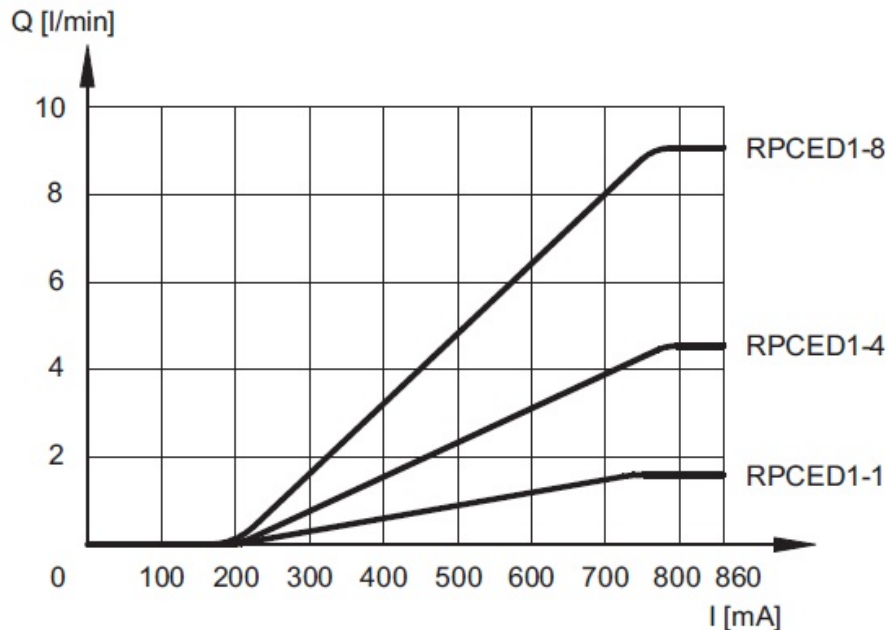


Fig. 3.9 Curva característica retirada do catálogo da respetiva válvula fluxométrica proporcional (15)

3.2.2.3 Válvulas Manométricas

Este tipo de válvulas é essencial para a elaboração do sistema de transmissão, de modo a controlar a pressão.

Assim, são utilizados dois tipos de válvulas manométricas no presente sistema:

- Válvulas manométricas convencionais (de ajuste manual);
- Válvulas manométricas proporcionais (de comando elétrico).

Ambas as válvulas manométricas convencionais que existem no sistema em estudo são válvulas limitadoras de pressão de comando manual.

A válvula limitadora de pressão (Fig. 3.10) que existe à saída da bomba de cilindrada variável é responsável pelo estabelecimento da pressão máxima do circuito. Se o fluido

ultrapassar a pressão estabelecida por esta válvula, o fluido vai ser descarregado para o reservatório.



Símbolo hidráulico:

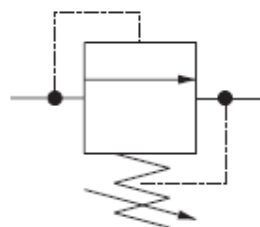


Fig. 3.10 Limitadora da pressão responsável por estabelecer a pressão máxima do circuito

Na tabela seguinte são apresentadas as características da válvula limitadora da pressão:

Tabela 10 Especificações da válvula limitadora de pressão responsável pelo ajuste da pressão do circuito (18)

Modelo	VME07
Marca	Comatrol
Designação	Válvula limitadora de pressão de ajuste manual
Pressão máxima	315 bar
Caudal máximo	50 l/min
Tipo de ajuste	Parafuso interno

Outra válvula limitadora de pressão convencional contida no bloco distribuidor simples é ajustável manualmente e tem como finalidade o ajustamento da carga do motor trocoidal (Fig. 3.11).

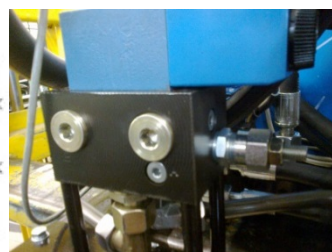
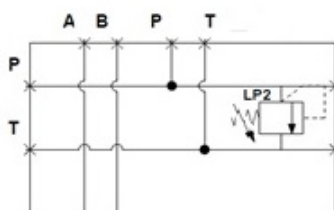


Fig. 3.11 Simbologia do bloco distribuidor acompanhada pela foto do elemento em estudo

No sistema existe também uma válvula manométrica proporcional que consiste numa válvula limitadora de pressão proporcional. A utilização desta válvula justifica-se pela sua baixa histerese e boa repetibilidade. Este tipo de válvula (proporcional) garante um controlo da pressão proporcional à corrente, garantindo assim o fácil manuseio da pressão em concordância com a corrente que alimenta o solenóide proporcional e assim permitir o seu controlo através de um autómato como é o caso.



Símbolo hidráulico:

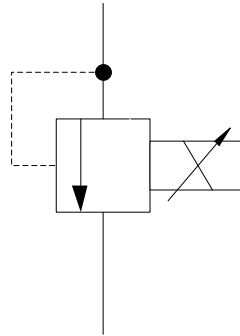


Fig. 3.12 Limitadora de pressão proporcional responsável pelo comando da cilindrada da bomba

Esta válvula limitadora de pressão proporcional (Fig. 3.12) tem como objetivo o controlo da cilindrada através do manuseio da pressão que assim irá controlar a posição do prato através do equilíbrio de forças entre a mola existente na bomba de cilindrada variável, garantindo o posicionamento do prato, estipulando a cilindrada máxima, e a força resultante do eletroíman.

Na tabela seguinte (Tabela 11) encontram-se as características fundamentais da válvula limitadora de pressão proporcional utilizada.

Tabela 11 Limitadora de pressão responsável pelo comando da cilindrada da bomba de êmbolos axiais (17)

Modelo	KCG3250DZMUH110
Marca	Vickers
Designação	Válvula limitadora de pressão proporcional
Caudal máximo	5 l/min
Pressão máxima	350 bar
Tipo de montagem	Placa base
Tensão alimentação	24 V DC

3.3 Circuito hidráulico construído da transmissão hidrostática em estudo

De acordo com o material disponível no laboratório, o circuito hidráulico concebido terá a seguinte disposição, como se pode verificar na Fig. 3.13, garantindo assim as características do circuito idealizado inicialmente.

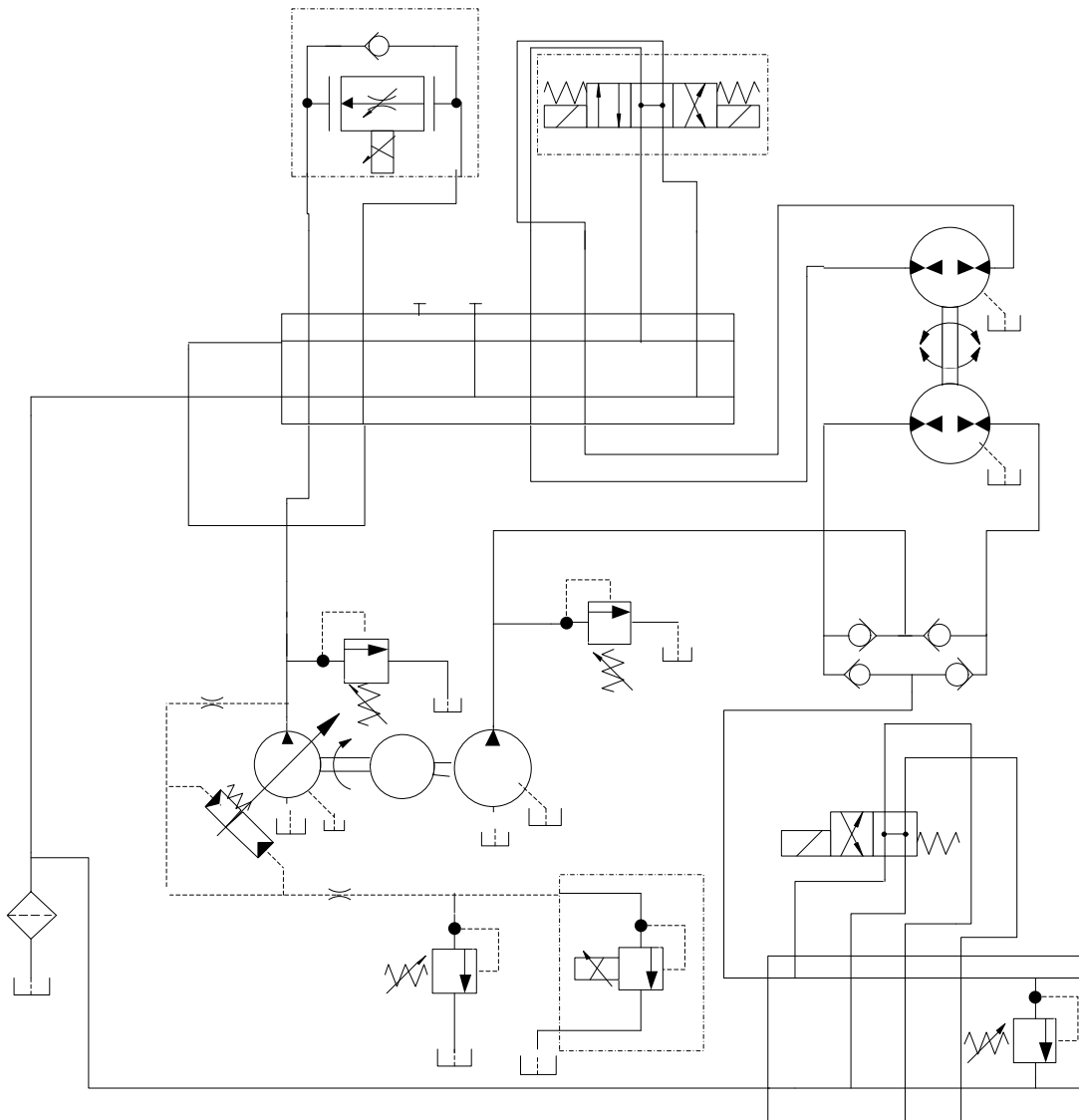


Fig. 3.13 Circuito hidráulico construído para elaboração do sistema hidrostático em estudo

Como poderemos ver a válvula limitadora de pressão do circuito secundário, responsável pela simulação da carga, vai estar incorporada num bloco distribuidor duplo.

Uma vez realizada a descrição dos elementos contidos na transmissão hidrostática rotativa utilizada neste estudo, seguidamente será descrita a automatização da transmissão em estudo.

4. Automatização da transmissão hidrostática

Uma vez que este trabalho está inserido no ramo de automação, é de todo o interesse automatizar a transmissão em estudo tornando-a totalmente controlável pelo utilizador de modo a facilitar a sua flexibilidade.

A automatização da transmissão é conseguida através da adição de algumas componentes. Estes elementos são:

- Armário elétrico de comando;
- Armário elétrico de potência;
- Codificador digital;
- Transdutor de pressão;
- Sensor de temperatura

Estes componentes têm um papel fundamental na automatização da transmissão em estudo (Fig. 4.1).

No **armário elétrico de comando** pode-se encontrar:

- 1 Automato
- 1 HMI

O armário elétrico permitirá realizar o comando e a monitorização das diferentes características da transmissão.

O **armário elétrico de potência** consiste no elemento de ligação entre o circuito hidráulico e o armário de comando, pois consiste no elemento onde estão disponíveis todos os sinais de atuação e monitorização das diferentes componentes constituintes do sistema sobre os quais se foca este estudo.

O **codificador digital** monitoriza uma das variáveis fundamentais da transmissão hidrostática que é a sua velocidade de rotação.

Para a monitorização da carga simulada é usado um **transdutor de pressão** que permite quantificar a carga que está a ser aplicada no motor de came periférica.

Por último também se encontra um **sensor de temperatura** com o seu respetivo transmissor para disponibilizar uma leitura da temperatura do fluido hidráulico, através do qual se podem avaliar as perdas energéticas no sistema.

Neste capítulo estão caracterizados os elementos fundamentais na automatização do sistema de transmissão.

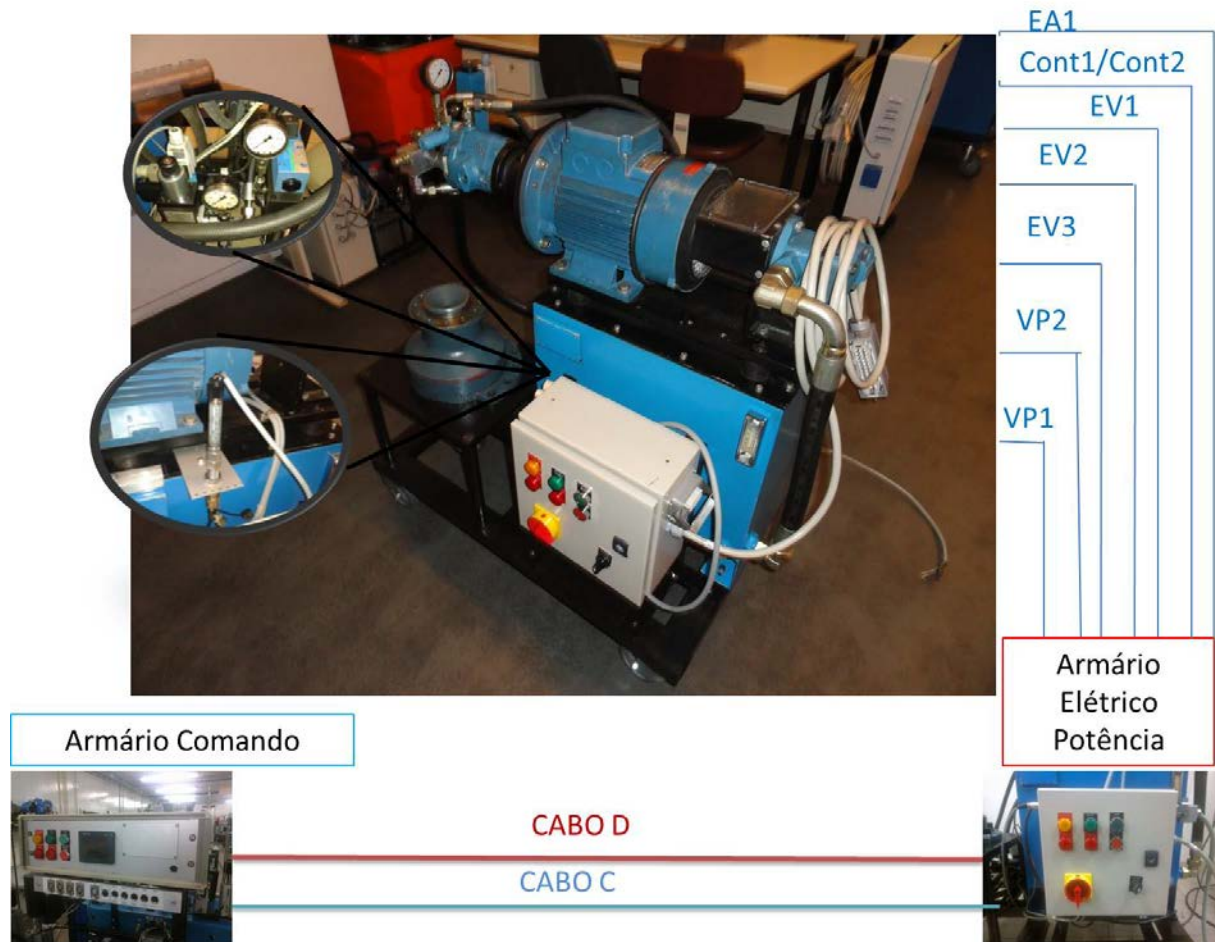


Fig. 4.1 Disposição de todos os elementos que irão garantir a automatização do sistema e os sinais digitais/analógicos disponíveis

Uma vez feita a apresentação genérica dos elementos constituintes da transmissão, seguidamente são seguidamente estudados com algum pormenor todos os elementos já expostos.

4.1 Armário elétrico de comando

No armário elétrico de comando (Fig. 4.2) é onde se encontra localizado o autómato, a HMI, e as botoneiras de arranque e de paragem, responsáveis pelo comando da central

hidráulica (comando à distância) e algumas monitorizações da central que são efetuadas a partir de sinalizadores (nível, motor ligado, disparo de relé térmico do motor e ainda a possibilidade de monitorizar o filtro de óleo). Neste armário existe ainda a possibilidade de monitorização da central hidráulica e o comando de potência desta mesma.



Fig. 4.2 Armário de comando

O arranque ou paragem do motor eléctrico só é possível efetuar se forem atuados um dos botões correspondentes, situado no armário de comando.

4.1.1 Autómato programável

No interior do armário de comando encontra-se um autómato programável da Schneider modelo TWIDO, do tipo de construção modular com 24 entradas digitais e 16 saídas digitais.

A este tipo de autómato podem-se acoplar mais módulos, tendo no autómato usado sido utilizados os seguintes módulos:

- Base modular TMDLMDA40DTK;
- Módulo de entradas/saídas analógicas TM2AMM6HT;
- Módulo Comunicação Série TWDN0Z485D.

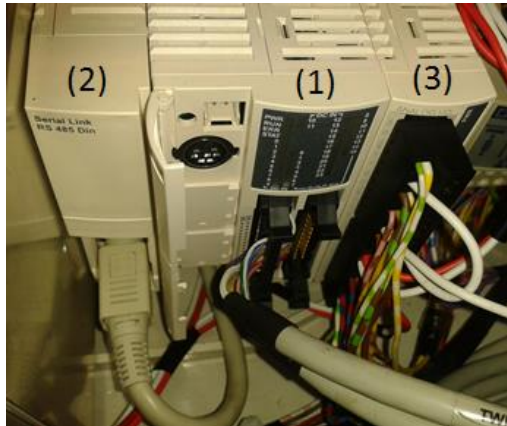


Fig.4.3 Autômetro programável instalado no armário de comando

Legenda:

1- Base modular (24 entradas digitais / 16 saídas digitais)

TMDLMDA40DTK

2- Módulo Comunicação

TWDN0Z485D

3- Módulo de entradas/saídas analógicas

(4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas) TM2AMM6HT

Todos os componentes do autômetro são do fabricante *Schneider Electric* e o programa que suporta a programação destes componentes é o software *Twido Suite*, que nos dá a possibilidade de programar em dois tipos de linguagem:

- Ladder;
- Lista de instruções.

4.1.1.1 Base Modular

O autômetro de base modular oferece grandes benefícios devido à sua flexibilidade de adicionar módulos para aumentar o número de entradas/saídas digitais ou analógicas.

Este tipo de autômetro é alimentado a 24 V DC. O autômetro de base modular inserido no armário de comando (Fig. 4.4) dispõe de 24 entradas digitais e de 16 saídas digitais por transistor e as ligações são estabelecidas por conectores do tipo HE10. Este autômetro também disponibiliza uma porta de comunicação RS485 que permite a transferência do programa do computador para o autômetro e de modo a possibilitar a sua monitorização. (20)



Fig. 4.4 Base modular TWDLMDA40TDK (20)

As entradas e saídas digitais estão conectadas a duas bases de conexão TELEFAST (Fig. 4.5). O sistema TELEFAST é de conexão rápida para os autómatos, incluindo um sistema integrado de LED's sendo que também pode ser considerado modular.

A base de relés ABE7R08S111 é a responsável pelas saídas digitais, para as válvulas de hidráulica convencional, designadas por EV1, EV2, EV3.

Existe também uma base de relés ABE7H20E000 onde estão ligadas as entradas digitais ED1-2,ED3-4.

A entrada digital Cont1-2 (sinal proveniente do codificador digital) é onde se disponibiliza o acesso às entradas dedicadas do autómato de base onde se encontra a opção de contadores muito rápidos %VFC (contagem de impulsos a uma frequência até 20 kHz) e os contadores rápidos %FC (contagem de impulsos a uma frequência até 5 kHz).



Fig. 4.5 Figura ilustrativa das ligações entre as duas bases de relés e o autómato

Ambas as bases TELEFAST são alimentadas a 24 V DC digital.

O cabo pré-formado que garante a ligação das duas bases de relés (ABE7H20E00 e ABE7R08S111) em que uma das extremidades é constituído por um ligador HE10 (26 pinos) responsável pela ligação ao TWIDO e na outra extremidade com dois ligadores HE10 (20 pinos) que ligará à base TELEFAST.

4.1.1.2 Módulos do autómato

Os módulos que estão acoplados ao módulo de base são os seguintes:

- Módulo de entradas/saídas analógicas;
- Módulo de comunicação.

O módulo de entradas/saídas analógicas (TM2AMM6HT), que se pode visualizar na Fig. 4.6, disponibiliza quatro entradas analógicas e duas saídas analógicas. A resolução tanto das entradas e saídas analógicas é de 12 bits. O módulo faz leitura em tensão num intervalo de 0 até 10 V.



Fig. 4.6 Módulo de entradas/saídas analógicas (21)

O módulo de comunicação (TWDNOZ485D), como se pode ver na Fig. 4.7, é o módulo responsável pela ligação do autómato à HMI (interface homem-máquina). Esta comunicação é conseguida através de uma porta RS485. Assim, o módulo de comunicação dá a possibilidade de comandar as variáveis existentes no autómato através da interface, logo a interface é o *Master* e o autómato é o *slave*.



Fig. 4.7 Módulo de comunicação TWDNOZ485D (22)

4.1.2 Interface homem máquina (HMI)

No armário de comando também se encontra uma interface homem-máquina da *Schneider Electric* modelo HMI STU 655 (Fig. 4.8).

A interface homem-máquina de 8.9 centímetros (3.5 inches) possibilita o diálogo do utilizador com o sistema a comandar. A interface gráfica é do tipo TFT LCD é policromático e com uma superfície táctil.

Esta interface oferece uma ótima visualização através do seu painel 320 X 240 pixels (QVGA) de 65 mil cores. (23)



Fig. 4.8 HMI STU 655

A comunicação de e para a HMI é possível através de diferentes portas existentes no dispositivo, como se pode verificar (Fig. 4.9):

- 2 Portas USB;
- 1 Porta de comunicação série COM1;
- 1 Porta Ethernet.

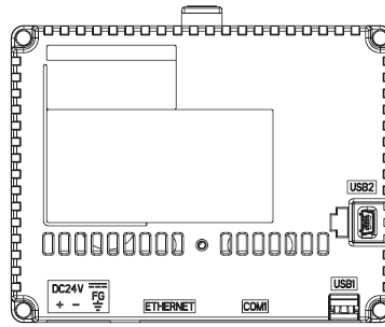
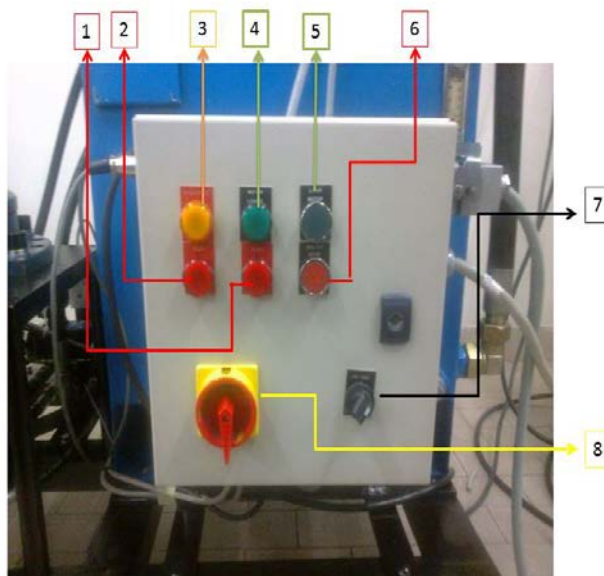


Fig. 4.9 Vista traseira da HMI demonstrando as ligações existentes

Por fim é de salientar que para a configuração dos painéis da interface por parte do utilizador utiliza-se o *software* “*Vijeo Designer*” da Schneider.

4.2 Armário elétrico de potência

O armário elétrico de potência (Fig. 4.10) tem um papel importante neste trabalho, pois é a partir dele que se fornece energia ao armário de comando possibilitando também a existência de um 2º posto de comando (arranque/paragem) da central hidráulica.



Legenda:

- 1- Sinalizador de monitorização do filtro
- 2- Sinalizador de monitorização do nível do óleo
- 3- Sinalizador de monitorização do disjuntor
- 4- Sinalizador de monitorização da central hidráulica
- 5- Botoneira Arranque da central
- 6- Botoneira Paragem central
- 7- Seletor de escolha de comando local ou à distância
- 8- Interruptor geral

Fig. 4.10 Armário de potência e sua legenda

O armário de comando também nos permite monitorizar e comandar através de botoneiras e sinalizadores:

- Duas botoneiras – uma de arranque e outra de paragem;
- Quatro sinais sinalizadores de monitorização: nível de óleo, disparo de relé térmico, motor ligado e filtro;
- Seletor de comando local e distância;
- Um interruptor geral.

Além destas características referidas, todos os sinais digitais e analógicos das diferentes componentes constituintes estão disponíveis no armário, disponibilizando estes sinais ao armário de comando e ao respetivo automático.

4.3 Codificador digital

O codificador digital do tipo incremental, que também se pode intitular de transdutor de posição angular, é o responsável pela conversão de incrementos de posição angular em impulsos elétricos possibilitando assim uma leitura da velocidade de rotação através do número de impulsos por rotação do disco por unidade de tempo. Esta funcionalidade dos codificadores possibilita a leitura da velocidade de rotação através de contador de impulsos de um controlador lógico programável (PLC).

O codificador digital do tipo incremental é constituído por dois elementos:

- Disco com elementos a ser lidos;
- Sensores de leitura.

Tendo em atenção a natureza didática do presente trabalho, o codificador foi construído, e não adquirido, e na elaboração do codificador digital foi utilizado um disco em cujo perímetro foi colocada uma faixa com listas refletoras e não refletoras. Uma das grandes características nominais de um codificador é a sua resolução. A resolução de um codificador digital é definida pelo número de faixas (N) opacas ou transparentes.

A faixa que irá ser suportada pelo disco é constituída por quarenta e cinco faixas opacas e quarenta e cinco faixas transparentes, espaçadas entre si aproximadamente por 7,7 mm tal como na Fig. 4.11.

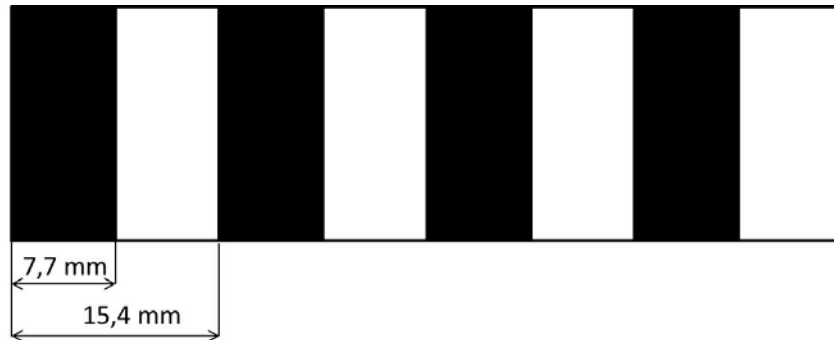


Fig. 4.11 Faixa afixada no disco na construção do disco codificador

Na construção de um codificador digital deve-se ter em conta a escolha dos sensores e de como os empregar. Existem dois tipos de sensores que podem ser empregues:

- Magnéticos;
- Óticos.

Os sensores óticos são constituídos por dois componentes:

- Emissor (LED infravermelho);
- Receptor.

Os sensores empregados nesta construção são do tipo ótico.

Dentro desta gama existem dois tipos de funcionamento:

- Sensores de reflexão;
- Sensores de interrupção.

Os sensores de reflexão têm como princípio de funcionamento a emissão de um feixe de luz a um alvo (disco codificado) em que se dá de seguida a leitura do feixe refletido (Fig. 4.12).

Os sensores de interrupção operam através da absorção do feixe de luz do alvo (disco codificado) do emissor ao receptor.

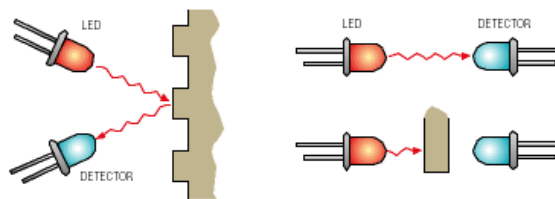


Fig. 4.12 Esquema de funcionamentos dos dois tipos de sensores (sensores por interrupção (esquerda) e sensores por reflexão (direita))

Os sensores por interrupção têm como vantagem o seu custo em relação ao outro tipo de sensores, a principal desvantagem é a exigência do alinhamento entre o emissor e o receptor.

Os sensores por reflexão oferecem uma maior flexibilidade pois garantem uma boa leitura da velocidade de rotação através da intensidade de luz que o receptor irá receber como também possibilita a leitura da distância do sensor ao elemento em que se quer ler a velocidade.

O princípio de funcionamento deste tipo de codificadores é o início do movimento do disco constituído por faixas refletoras e opacas ao impedirem a passagem de luz ou não a passagem de luz ao receptor o que origina na entrada digital do PLC de um valor lógico “alto” aquando da passagem de luz e de um valor lógico “baixo” quando existe absorção de luz. Os sensores estão posicionados lado a lado. No posicionamento dos sensores tem se de ter em atenção a distância que o separa do alvo (disco) e em simultâneo ao perímetro do disco para garantir a informação do sentido de rotação através da sequência dos impulsos que os sensores irão receber, como se pode visualizar na Fig. 4.13.

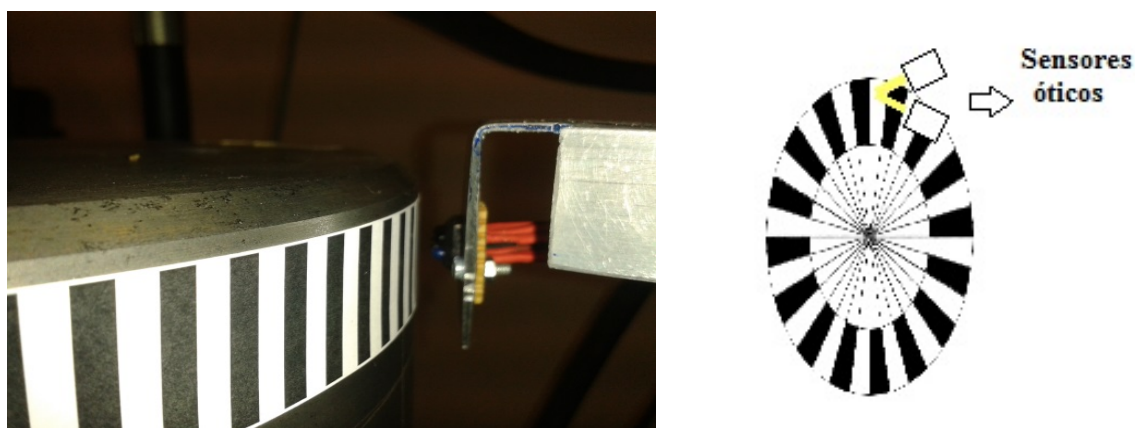


Fig. 4.13 Esquema construído para funcionamento de um codificador linear ótico refletor (direita) e o codificador digital elaborado empregado neste estudo

Existem algumas propriedades em relação aos sensores a ter em conta que são as seguintes:

- **Fatores mecânicos** – A distância do sensor ao alvo é um fator importante para a sua escolha, porém deve-se ter atenção as vibrações e evitar o choque do disco codificado com os sensores;
- **Fatores ambientais** – Como os sensores óticos utilizam foto transístores como recetores, estes componentes perdem alguma das suas capacidades a altas temperaturas (70°C). Por último a possível contaminação devido a ambientes grosseiros.

Os sensores usados na leitura da velocidade do disco são sensores óticos de reflexão (Fig. 4.14).



Fig. 4.14 Figura ilustrativa dos sensores óticos e seu esquema representativo dos sensores óticos de reflexão (24)

Na tabela seguinte encontram-se as especificações do sensor utilizado.

Tabela 12 Especificações dos sensores óticos Philips

Marca	Philips
Referência	TCRT5000
Distância	0.2-15 mm
Dimensões	10.2 x 5.8 x 7.0 [mm]
Corrente do receptor	100 mA
Corrente do emissor	60mA

Como os sensores óticos utilizados também têm a possibilidade de medir distância devido ao gradiente de cores do disco, o sinal proveniente desse mesmo é sinusoidal como verificado na Fig 4.15.

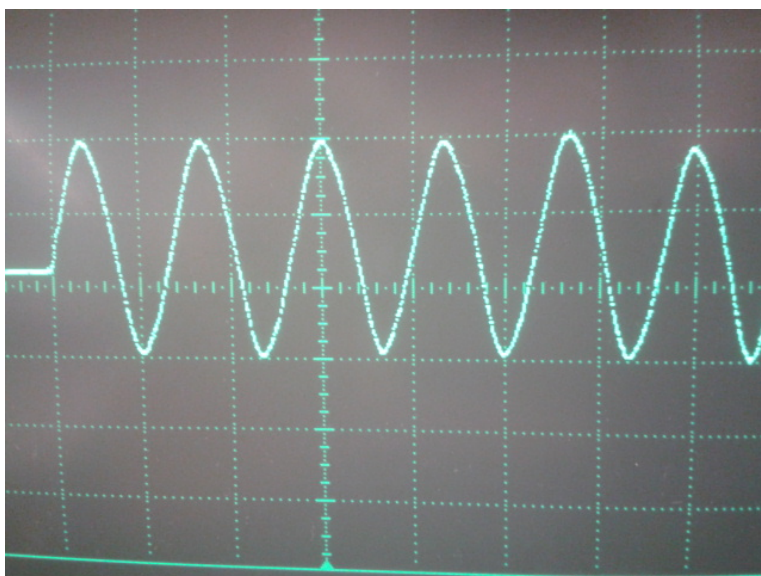


Fig 4.15 Sinal sinusoidal originário dos sensores ópticos

Para este sistema se aproximar de um encoder, fez-se um tratamento desse sinal (conversão do sinal sinusoidal para sinal quadrado) através da montagem de um circuito intitulado por “comparador” ou conversor de onda quadrada.

Os elementos essenciais deste circuito é o amplificador operacional (TL074) e o potenciômetro.

Então o amplificador operacional utilizado como “comparador” tem à entrada inversora (-) o sinal sinusoidal proveniente do sensor óptico e na entrada não inversora (+) encontra-se a tensão de referência ajustada através de um potenciômetro. Assim, o funcionamento do comparador (esquema simplificado na Fig 4.16) baseia-se no seguinte:

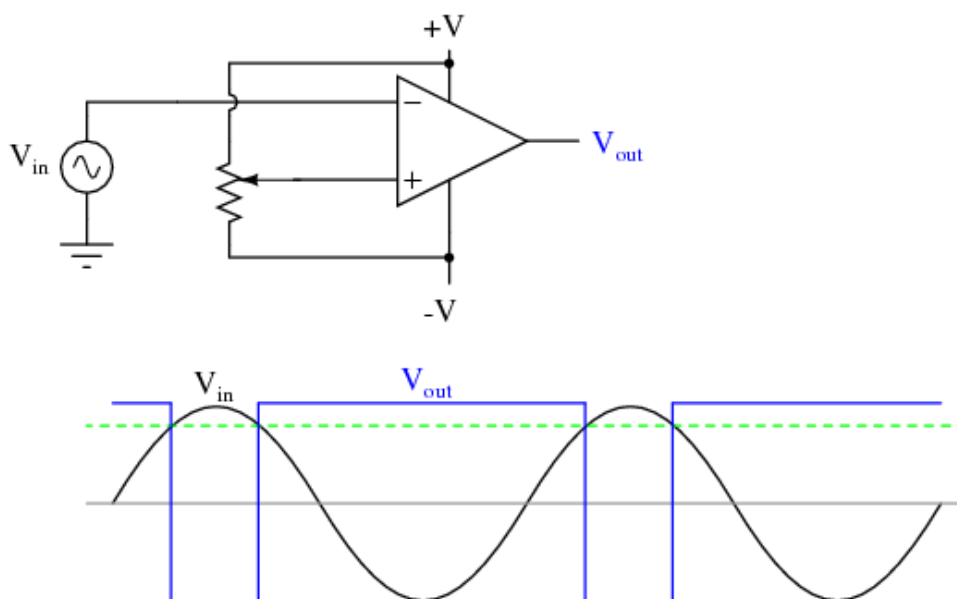


Fig 4.16 Esquema simplificado do conversor de sinal sinusoidal em sinal quadrado

A saída do amplificador operacional (V_{out}) irá saturar-se positivamente se o sinal proveniente dos sensores (V_{in}) for menor que o sinal de referência proveniente do ajuste do potenciômetro. No entanto se o sinal originário dos sensores for maior que o sinal de referência natural do potenciômetro a saída do operador operacional irá saturar-se negativamente.

O circuito, esquema demonstrado na Fig 4.17, foi duplicado, pois são usados dois sensores ópticos. Este tratamento do sinal é essencial para assim garantir uma quadratura, dos sinais originários dos sensores ópticos, mais fiável.

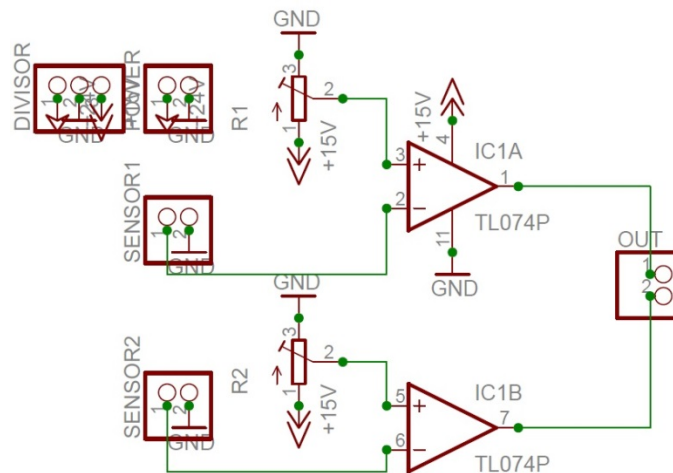


Fig 4.17 Esquema do circuito utilizado para conversão do sinal sinusoidal em sinal quadrado

4.4 Transdutor de pressão

O transdutor de pressão utilizado neste estudo tem como objetivo conceber uma monitorização da pressão existente na saída do motor de came periférica quando está a ser frenado pelo motor trocoidal através da ativação da válvula direcional VD2. Esta informação vai ser importante para quantificar, em termos de pressão, a carga simulada pelo utilizador através da limitadora de pressão de ajuste manual.



Fig. 4.18 Figura ilustrativa de um transdutor de pressão da STW. (21)

O transdutor de pressão torna-se fundamental para comandar a bomba de cilindrada variável mantendo a velocidade constante mesmo perante uma carga (carga variada pelo utilizador).

O transdutor de pressão empregado no sistema é um A08 da *Sensor Technik Wiedemann* (STW). Este transdutor específico (Fig. 4.18) trabalha numa gama de pressões no intervalo [0-160] bar e tem como correspondente um sinal de saída compreendido entre [0-10] V.

Na Fig. 4.19 pode-se verificar a característica do transdutor utilizado e como se pode verificar este transdutor de pressão não está ajustado optimamente para este sistema pois não se utiliza a sua gama na totalidade sendo a máxima carga simulada de 75 bar. Também se pode retirar informação da Fig. 4.19 que a curva característica entre 4 e 75 bar é linear e que contém um ganho de 0.0419 [V/bar].

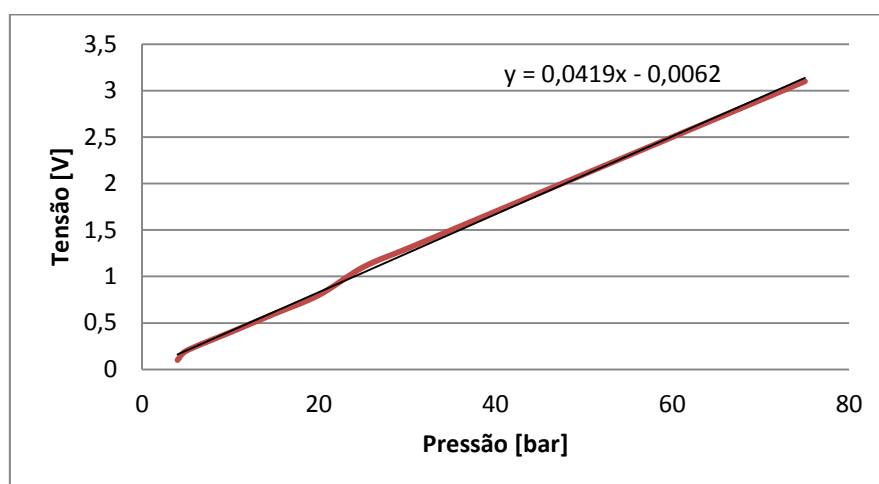


Fig. 4.19 Curva característica do transdutor de pressão STW

4.5 Sensor de temperatura

Existe uma vasta gama de sensores de temperatura. Dentro deste existem dois grandes grupos que se pode destacar sendo eles:

- Termopares;
- RTDs (*Resistance Temperature Device*).

Entre estes dois grupos foi escolhido um sensor RTD para a leitura de temperatura, logo será dado maior realce a esse tipo de sensores de temperatura

Os sensores RTD (Fig 4.20) baseiam-se na utilização de materiais metálicos que exibem uma alteração de resistência com a variação de temperatura.



Fig 4.20 Pt100 de 3 condutores

As principais vantagens deste tipo de sensor são: grande exatidão; grande estabilidade; boa linearidade e uma medição absoluta de temperatura (não necessita de uma temperatura de referência).

Por outro lado têm um custo elevado; resposta lenta; necessita de alimentação e problema de auto-aquecimento.

Os RTD's podem ser constituídos de diferentes metais, no entanto, a platina, o cobre e o níquel são os mais utilizados. Estes metais são utilizados com alguma frequência devido a ser possível adquirir na sua forma mais pura, o que assim diminui os erros devido às impurezas do material.

Depois de umas breves considerações em relação aos diferentes materiais que podem constituir os sensores concluiu-se que a platina (mesmo sendo a mais cara) é o material mais usado em RTD's e por isso o escolhido na elaboração do trabalho aqui retratado.

O sensor RTD escolhido denomina-se PT100

Estes mesmos sensores (Pt100) são normalmente apresentados em diferentes configurações no que respeita a cabos de ligação: configuração de dois, três e quatro condutores.

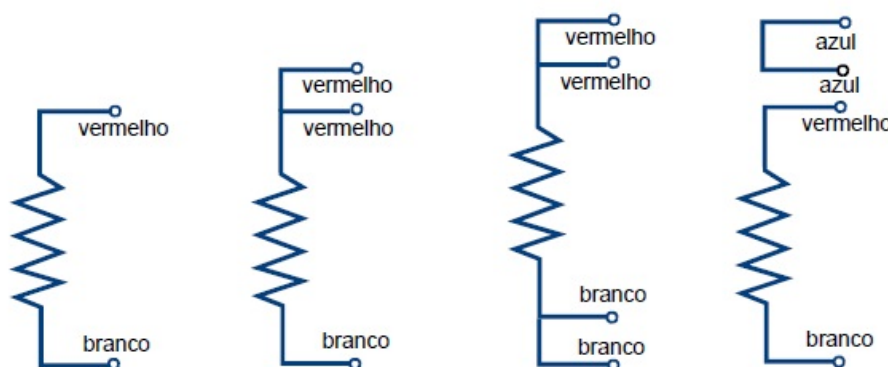


Fig 4.21 Diferentes configurações dos cabos de ligação

A configuração utilizada no estudo, também geralmente usada no ambiente industrial, é a de três condutores em que um dos extremos do elemento sensor tem dois cabos (exemplificado na Fig 4.21). Esta configuração destina-se a minimizar a resistência dos condutores em relação com a temperatura ambiente.

Para facilitar o envio à distância de sinais de muito baixo nível torna-se adequado o condicionamento de sinais provenientes dos sensores de temperatura (RTD) através da utilização dos “transmissores de temperatura de dois condutores”.



Fig 4.22 Transmissor de temperatura de 2 condutores (PR electronics)

Estes transmissores de dois condutores (Fig 4.22) são geralmente usados como amplificadores e sistemas de condicionamento para sinais de baixo nível gerados pelos sensores sendo particularmente vantajosas para medições remotas tornando-se a solução mais indicada para o meio industrial.

Neste dispositivo usam um sistema de *feedback* para balanceamento automático de uma montagem em ponte para configurações de sensores de três condutores. Este tipo de sensor possui, normalmente, um sinal de saída em corrente entre 4 e 20 mA linearmente proporcional à temperatura.

São alimentados em tensão d.c., têm uma pequena dimensão, estanques e diretamente ligados ao sensor (normalmente de três condutores). Devido à sua saída em corrente têm uma boa imunidade ao ruído em ambientes industriais e também têm a possibilidade de serem controlados remotamente (Fig 4.23).

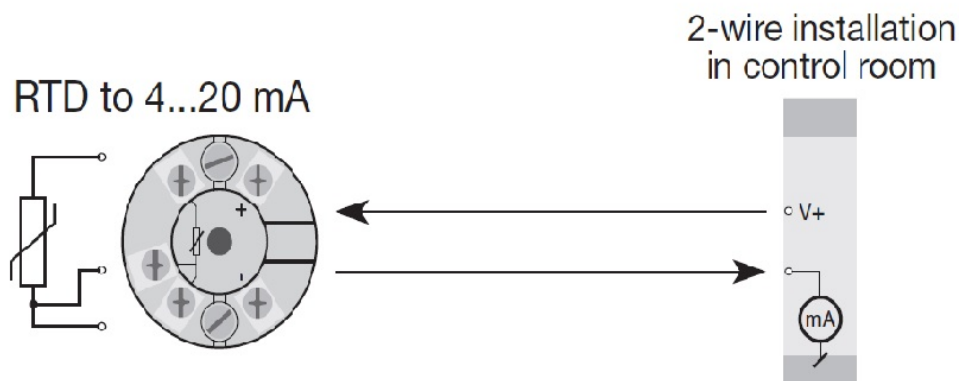


Fig 4.23 Modo de conectar o transmissor de temperatura com o dispositivo de leitura

A designação de transmissor de dois condutores resulta do facto dos dois condutores de saída serem usados quer para alimentação do transmissor quer para a transmissão do sinal.

A utilização deste dispositivo de condicionamento de sinal deve-se às seguintes características:

Seguidamente encontra-se uma caracterização mais específica do sensor utilizado neste estudo (Fig 4.24).



Fig 4.24 Sensor de temperatura utilizado na realização do presente trabalho

O sensor de temperatura usado foi um RTD em que a ponta de prova é de imersão e o respetivo transmissor de temperatura de dois condutores (PR5333) que se encontra montado numa “cabeça” de alumínio (esquema de montagem demonstrado na Fig 4.25). Esta ligação também garante total proteção do transmissor de ambientes agressivos através da sua ligação estanque. Esta solução é muito usada na monitorização da temperatura em processos químicos, petroquímicos e alimentares devido à suas características.

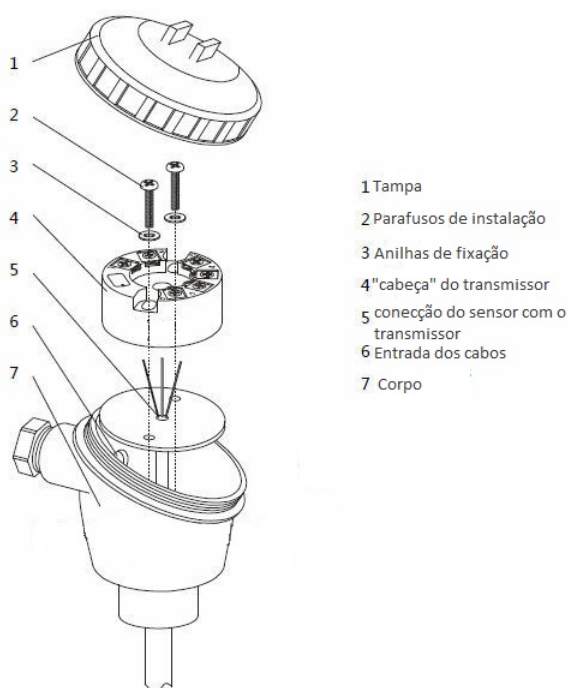


Fig 4.25 Esquema demonstrativo dos diferentes elementos do sensor de temperatura utilizado

O transmissor de temperatura utilizado é um dispositivo fabricado pela PR electronics de dois condutores da série 5333 em que vai converter a variação linear da resistência para um

sinal analógico linear em corrente (como se pode ver no gráfico da Fig 4.26) garantindo assim uma boa imunidade ao ruído.

Tabela 13: Especificações técnicas do transmissor de temperatura 5333 (PReletronics)

Referência	5333QA02
Dimensão	Ø44 X 20.2 mm
Peso aproximado	50 g
Tensão de alimentação	8.0:35 V DC
Corrente de saída: limite do sinal	4:20 mA

O transmissor de temperatura disponibilizado é um transmissor de dois condutores em que tem como limites de corrente 4 e 20 mA (concluído através das especificações técnicas do catálogo demonstrado resumidamente na Tabela 13).

O transmissor de temperatura foi previamente calibrado garantindo assim uma gama de temperaturas entre 0 e 100°C.

Sabendo o mínimo e o máximo do sinal em corrente que o transmissor garante bem como a respetiva temperatura retira-se o seguinte gráfico, onde se obtém a sensibilidade do sensor (Pt100).

Numa fase inicial fez-se um estudo do sinal de saída em corrente traçando um gráfico (Fig 4.26) para demonstrar o seu comportamento linear. Através do estudo deste mesmo gráfico determinou-se que o valor da sensibilidade do sensor é 0.16 mA/°C e o valor do seu *offset* que é 4 mA.

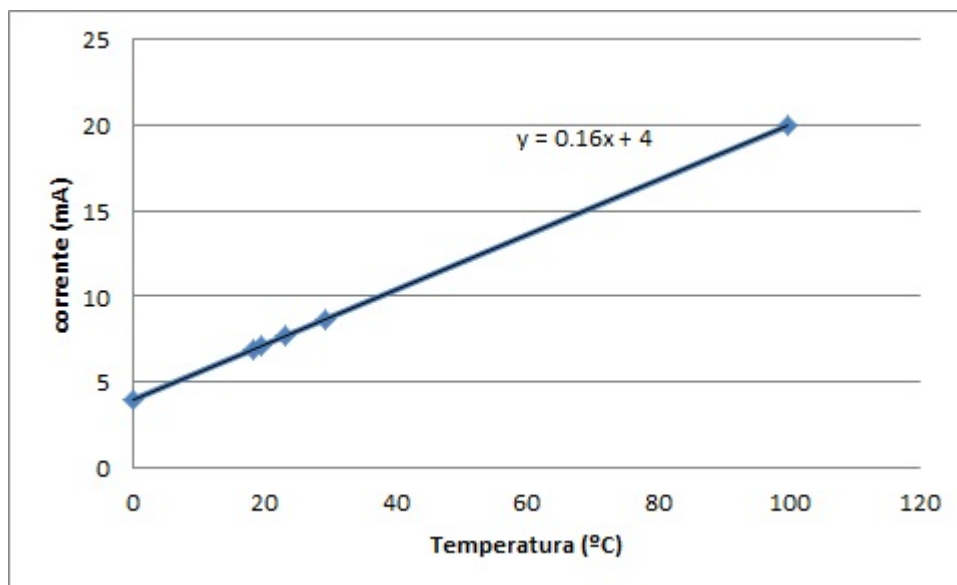


Fig 4.26 Reta característica do sinal do transmissor em corrente

De seguida, como o autómato foi configurado para só ler sinais analógicos em tensão, para converter este modo de leitura teve de se inserir uma resistência garantindo assim, uma leitura do sinal em tensão (do modo representado esquematicamente na Fig 4.27).

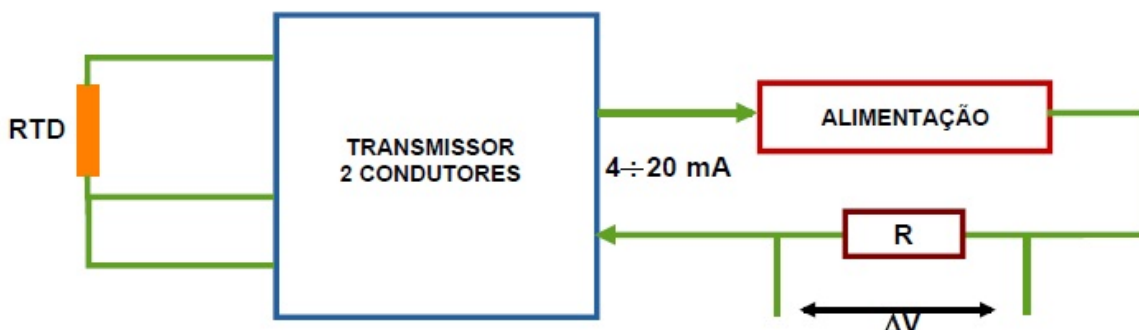


Fig 4.27 Esquema de montagem do transmissor de temperatura para se adquirir uma leitura do sinal em tensão

Ao inserir a resistência, logo a leitura do sinal em tensão, a sensibilidade irá ser diferente. Usando uma resistência de 460 Ω a sensibilidade irá ser 0.0741 V/°C (como se pode verificar na Fig 4.28) e um *offset* de 1.852 V.

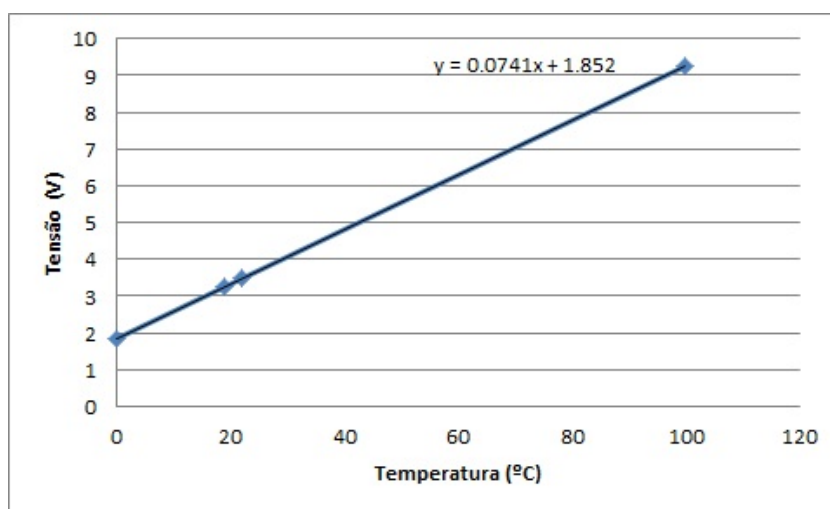


Fig 4.28 Caraterística do transmissor de temperatura 5333QA02

O sensor foi colocado na linha que se direciona ao reservatório para não haver influência das quedas de pressão (como se pode ver na Fig 4.29).



Fig 4.29 Posicionamento Pt100 na linha que se direcciona para o reservatório

5. Interface gráfica do utilizador: configuração e comando manual

Neste capítulo estabelece-se a hierarquia das interfaces gráficas, bem como a configuração-tipo das páginas inseridas na interface para melhor compreensão do utilizador.

Antes de se dar início à elaboração dos exercícios demonstrativos do comportamento do sistema hidrostático é importante mencionar o módulo de comando manual que inicialmente é muito útil para verificar o comportamento dos diferentes sinais digitais e analógicos através da sua atuação manual.

5.1 Configuração da interface gráfica

A interface gráfica de utilizador é o meio de comunicação e monitorização do utilizador com o sistema que se está a inserir no estudo (transmissão hidrostática). A interface gráfica é constituída por diversos elementos (botões, campos numéricos e sinais luminosos) que facilita a comunicação e visualização do comportamento do sistema em estudo.

A interface também é constituída por janelas de ajuda e de informação com o objetivo de auxiliar o utilizador e facilitar a sua aplicação.

Para ajudar o melhor entendimento e manuseio dos diferentes sinais existem diversas janelas introdutórias que têm como objetivo demonstrar o exercício respetivo, bem como as janelas de ajuda para elucidar os utilizadores o objetivo da janela.

A interface gráfica através de campos numéricos, também tem a capacidade de realizar cálculos simplificando a realização de exercícios, permitindo a obtenção de resultados fiáveis e com alguma rapidez.

5.1.1 Hierarquia da programação da interface gráfica

As interfaces gráficas estão organizadas na seguinte hierarquia (nível 1) em que no topo dessa hierarquia está localizada uma janela introdutória que contém informações sobre a dissertação na qual se insere (Fig.5.1).



Fig.5.1 Janela introdutória

De seguida podem-se encontrar diferentes menus (Fig.5.2) onde, quando se escolhe o comando manual, se tem o poder de escolher o comando dos diferentes tipos de sinais para controlar a transmissão em estudo, bem como a sua visualização. A escolha do Menu de exercícios possibilita a escolha de diferentes exercícios catalogados com as letras “A” e “B”.

Estes exercícios estão catalogados com as letras “A” e “B” uma vez que estão de acordo com o grau de dificuldade e também com conteúdos de unidades curriculares do curso de Engenharia Mecânica.



Fig.5.2 Menu Principal da interface

As restantes interfaces estão organizadas como está ilustrado na Fig. 5.3.

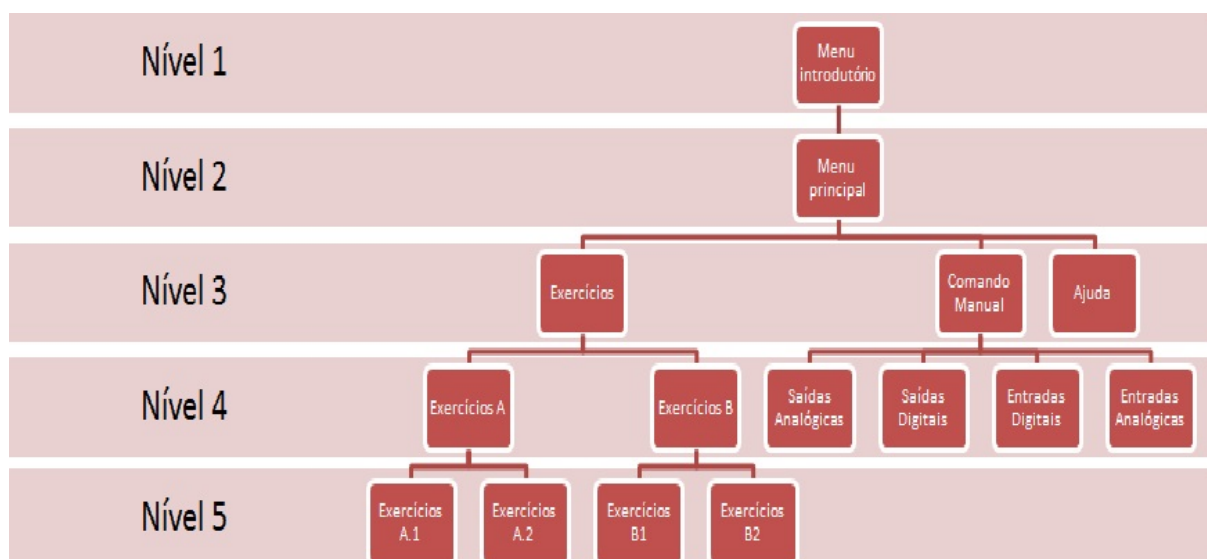


Fig. 5.3 Figura ilustrativa da hierarquia da interface gráfica e demonstrativa dos vários níveis dessa mesma

5.1.2 Formato geral dos painéis da interface gráfica

Toda a interface gráfica segue uma estrutura-tipo mantida ao longo dos vários níveis da hierarquia, tal como se pode visualizar na Fig.5.4.

Neste painel demonstrativo da configuração tipo pode-se ver um botão no canto inferior esquerdo que permite ao utilizador mudar para um painel de nível inferior; no canto inferior direito existe um botão que consiste num botão de paragem de emergência.

No lado esquerdo do painel situa-se uma banda que dá a possibilidade de transportar o utilizador ao longo de painéis do mesmo nível.

Na parte superior central encontra-se o título do painel onde o utilizador se encontra, bem como o logótipo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

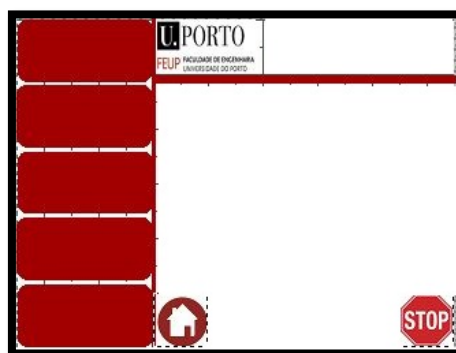





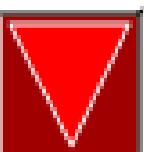



Fig.5.4 Configuração tipo dos painéis existentes na HMI

Na Tabela 14 encontram-se descritos alguns Botões acompanhados pelas suas nomenclaturas e funções nas várias telas que constituem a HMI.

Tabela 14: Enumeração dos botões existentes e suas respetivas funções

<i>Botão</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Função</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão de emergência 	<ul style="list-style-type: none"> • Fazer <i>reset</i> a todas variáveis existentes; • Desligar a central Hidráulica; • Abrir a janela de emergência.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão “Home” 	<ul style="list-style-type: none"> • Desligar a central quando é mais adequado; • Retomar à janela do nível anterior.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão “seguinte” 	<ul style="list-style-type: none"> • Executar a passagem para a janela seguinte dentro do mesmo nível de navegação.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão anterior 	<ul style="list-style-type: none"> • Executar a passagem para a janela anterior dentro do mesmo nível de navegação.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão incrementa 	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar um valor.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão decremento 	<ul style="list-style-type: none"> • Decrementar um valor.
	<ul style="list-style-type: none"> • Botão <i>clear</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Colocar o campo numérico a “0”.

5.2 Comando Manual

O comando manual possibilita a atuação das válvulas de modo independente. Este módulo permite o manuseio dos diferentes sinais bem como a verificação do seu funcionamento. Existe também a possibilidade de comandar e monitorizar a central através da HMI.

O comando manual permite manipular os seguintes sinais:

- Sinais digitais:
 - Entradas digitais - **Cont1** e **Cont2** (sensores foto transístores);
 - Saídas digitais - **EV1** e **EV2** (solenóides responsáveis pela comutação da válvula direcional que é responsável pelo sentido de rotação do motor);
- **EV3** (acionamento do travão).
- Sinais analógicos:
 - Entradas Analógicas - **ED2** (transdutor de pressão)
- **ED3** (sensor de temperatura)
 - Saídas Analógicas - **VP1** (limitadora de pressão proporcional);
- **VP2** (reguladora de caudal proporcional).

Quando selecionada a opção comando manual, no painel inicial (Fig.5.5), o utilizador é guiado para um painel onde são disponibilizados, na barra lateral, todos os sinais (analógicos e digitais) que estão disponíveis no nosso sistema como também a monitorização de central e o comando da mesma.



Fig.5.5 Painel de entrada no módulo de comando manual

Se o utilizador seleccionar a opção “central hidráulica” (Fig.5.6) o utilizador tem ao seu dispor dois botões que são responsáveis pelo arranque e paragem da central. Também dispõe da monitorização da central, do disjuntor e do nível de óleo.



Fig.5.6 Painel de Comando e monitorização da central hidráulica e monitorização do disjuntor e nível do óleo

Selecionando a opção “saídas digitais” aparece a tela (Fig. 5.7) onde o utilizador tem a possibilidade de manusear os sinais digitais existentes no sistema. O EV1 e o EV2 são os sinais digitais responsáveis pela comutação da electroválvula e assim definem o sentido de rotação do motor (sentido direto ou sentido retrógrada). O EV3 é outro sinal digital que resulta na comutação da electroválvula que dará a possibilidade ao utilizador de acionar ou não o frenagem do motor.



Fig. 5.7 Tela do comando das saídas digitais

Seguidamente encontra-se a opção “saídas analógicas” (Fig.5.8) que possibilita a atuação das válvulas proporcionais existentes (VP1 e VP2). O campo numérico intitulado VP1 será responsável pela válvula proporcional onde dá a possibilidade através das setas situadas ao lado (válvula proporcional nº1) de aumentar ou diminuir a tensão de referência do eletroímã da válvula proporcional e assim comandar a cilindrada do motor de cilindrada variável através do equilíbrio de forças. O campo numérico intitulado de VP2 (Válvula Proporcional nº2) é idêntico ao VP1 sendo que a primeira irá comandar a reguladora de caudal em que irá aumentar ou diminuir a tensão de referência do eletroímã e assim aumentar o estrangulamento do caudal ou diminuir.



Fig.5.8 Painel do comando manual das saídas analógicas

Por fim o utilizador depara-se com as entradas digitais onde se informa sobre o número de impulsos que o autómato lê, bem como os impulsos por segundo i.e. a frequência à

qual se encontra a trabalhar o motor. O impulso é lido quando o sinal está em fase ascendente como se pode verificar na Fig.5.9 .

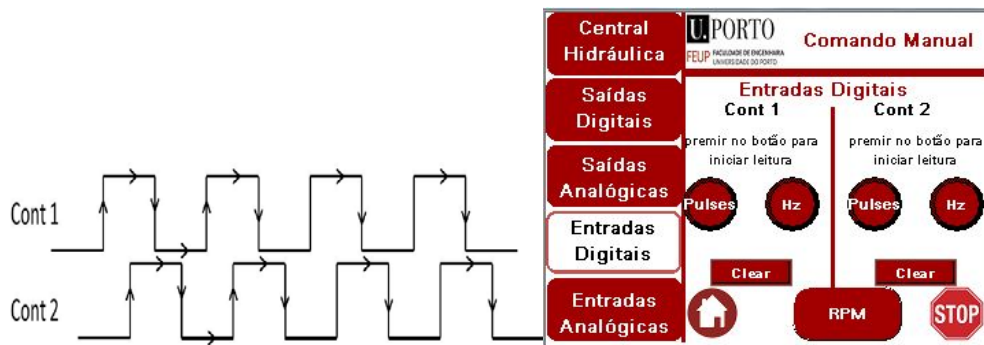


Fig.5.9 Janela responsável pela monitorização das entradas digitais e disposição dos sinais digitais provenientes dos sensores

Existe também a possibilidade de leitura da velocidade a que se encontram a funcionar os motores sem necessitar de executar qualquer tipo de exercício. O utilizador ao pressionar o botão responsável pela leitura de velocidade vai abrir uma janela *popup* (Fig.5.10) com o valor da velocidade, do motor (motor de came periférica) do circuito primário, num campo numérico.



Fig.5.10 Popup responsável pela monitorização da velocidade

Através desta janela é possível obter-se o valor da velocidade mínima possível do sistema em estudo bem como a velocidade máxima. Esta opção também permite informar o utilizador das frequências de funcionamento (máxima e mínima) do nosso sistema como se pode ver na Tabela 15.

Tabela 15 Tabela sobre os máximos e mínimos de velocidades e frequências

Velocidade Mínima [RPM]	0.2 RPM
Velocidade Máxima [RPM]	20.0 RPM
Frequência Mínima [Hz]	1 Hz
Frequência Máxima [Hz]	15 Hz

Por fim existe a opção de monitorização das entradas analógicas onde se encontra a monitorização da pressão de carga através da utilização de um transdutor de pressão e a temperatura através do sensor de temperatura.

Assim, através desta janela (Fig.5.11) no campo numérico (EA1- Entrada Analógica nº1), teremos a possibilidade de visualizar a conversão da pressão existente sinal eléctrico, bem como a possibilidade de visualizar a pressão de carga existente no sistema através de um mostrador analógico.

Para a EA2 (Entrada Analógica nº2) faz-se uma leitura de temperatura, onde mais uma vez teremos um campo numérico (EA2) que nos informa sobre a conversão da temperatura num sinal em tensão, também temos um termómetro para facilitar a visualização da temperatura por parte do utilizador.



Fig.5.11 Janela responsável pela monitorização das entradas analógicas

Uma vez apresentada a interface gráfica do comando manual e a respetiva configuração, seguidamente serão apresentados os exercícios desenvolvidos e realizados para o presente estudo.

6. Exercícios demonstrativos do comportamento da transmissão hidrostática perante uma carga

No presente capítulo estão descritos os exercícios realizados, que têm como objetivo demonstrar ao nível didático uma transmissão hidrostática perante a presença ou não de uma carga, bem como retirar os resultados e respetivas conclusões inerentes aos exercícios em causa.

Os exercícios foram elaborados num misto de hidráulica proporcional e hidráulica convencional para assim se poderem retirar conclusões a abranger estes dois tipos de hidráulica bem como demonstrar as suas vantagens. Os exercícios mais simples estão catalogados de A e inserem-se no meio de aprendizagem da unidade curricular de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos; os exercícios B inserem-se em unidades curriculares mais específicas, como por exemplo, Servomecanismos e Sistemas de Controlo.

Os exercícios são elaborados de acordo com o circuito hidráulico já montado (Fig. 6.1) e sem a possibilidade de adicionar ou retirar qualquer tipo de componente hidráulica.

As principais componentes do circuito hidráulico na execução dos exercícios são:

- Válvula reguladora de caudal à saída do motor de came periférica (*meter-in*) possibilitando o controlo da velocidade do motor;
- Válvula limitadora de pressão proporcional responsável pelo ajuste automático da cilindrada da bomba de cilindrada variável, i.e. pressão de comando ;
- Válvula direcional 4/3 que garante a definição do sentido de rotação do motor;
- Válvula direcional 4/2 que garante a comutação da simulação de carga;
- Válvula limitadora de pressão de comando manual que responsável pelo ajuste da carga no sistema;
- Transdutor de pressão.

Para cada exercício são apresentadas as telas fundamentais, de modo ao utilizador poder executar os exercícios e observações aos resultados obtidos em cada exercício.

6.1 Exercícios A

Os exercícios A caracterizam-se por serem exercícios didáticos mais simples e automatizados, porém de igual importância para uma melhor compreensão do comportamento do sistema em estudo.

Através dos exercícios A podem-se retirar algumas observações e conclusões dos diferentes comportamentos do sistema em estudo perante vários cenários.

Os exercícios A estão divididos em dois grupos de exercícios: A.1. e A.2. Estes exercícios oferecem dois tipos diferentes de escolha ao utilizador, os quais:

- Exercício A.1. - Neste exercício o utilizador tem a possibilidade de escolher com quantos impulsos o exercício irá ser efetuado. De seguida será apresentada uma tabela com resultados obtidos neste exercício.
- Exercício A.2. – Neste exercício existe a possibilidade de o utilizador colocar o motor a rodar até um determinado ângulo, que é estabelecido previamente, sendo que posteriormente o disco inverte o sentido até à posição inicial, e o utilizador retirará uma leitura sobre as várias características do sistema.

Para estes exercícios os elementos essenciais são os seguintes:

- Válvula reguladora de caudal proporcional que irá ser responsável pelo comando da velocidade por parte do utilizador;
- Codificador digital por forma a permitir ao utilizador quantificar a velocidade;
- Válvula limitadora de pressão de comando manual que é a responsável pela simulação de carga no sistema;
- Transdutor de pressão;
- Válvula direcional 4/3 para definição do sentido de rotação;
- Válvula direcional 4/2 para acionamento da carga.

6.1.1 Exercício A.1.

Este exercício tem como principal interesse verificar o comportamento da transmissão perante uma carga. Este interesse foca-se mais na influência da carga na velocidade do motor de came periférica.

O utilizador tem a possibilidade de estabelecer uma carga através do manuseio da limitadora de pressão de ajuste manual e assim pode verificar os resultados para diferentes gamas de velocidades (velocidade rápida, velocidade intermédia e velocidade lenta).

Este exercício demonstra a rapidez de cálculo da velocidade e do caudal através do autómato comparativamente à utilização de um cronómetro para a verificação desses mesmos resultados.

O exercício presente dá a possibilidade de escolher quantos impulsos o sensor deve detetar, sendo que no final do exercício é possível que o utilizador obtenha resultados, através da tabela que surge no ecrã da HMI. De modo a realizar o exercício, o utilizador inicialmente terá de escolher que gama de velocidades pretende.

De notar que este exercício apenas será efetuado no sentido de rotação de avanço.

Este exercício irá notificar o utilizador sobre as seguintes características:

- Velocidade de avanço;
- Tempo de avanço;
- Carga;
- Caudal de avanço.

6.1.1.1 Apresentação das telas da HMI essenciais no exercício A.1


Este capítulo tem como o objetivo apresentar as telas de HMI fundamentais para a comunicação Homem-Máquina, sua interação e respetiva explicação. Enquanto as restantes telas inseridas neste exercício encontram-se nos anexos (telas informativas, telas de desligar/ligar central).

O exercício encontra-se estruturado da seguinte forma:

Tela de escolha da velocidade a estipular na execução do exercício por parte do utilizador. Aqui o utilizador só poderá prosseguir com o exercício escolhendo a velocidade da que pretende.


Tela de escolha de velocidades inserido no exercício A1	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha da velocidade de execução do exercício; • O utilizador só terá a possibilidade de avançar para a tela seguinte se escolher a velocidade.

Na janela seguinte encontra-se o início do exercício. Nesta janela existe um campo numérico no qual o utilizador insere o número de impulsos que o contador irá identificar através do movimento do motor.

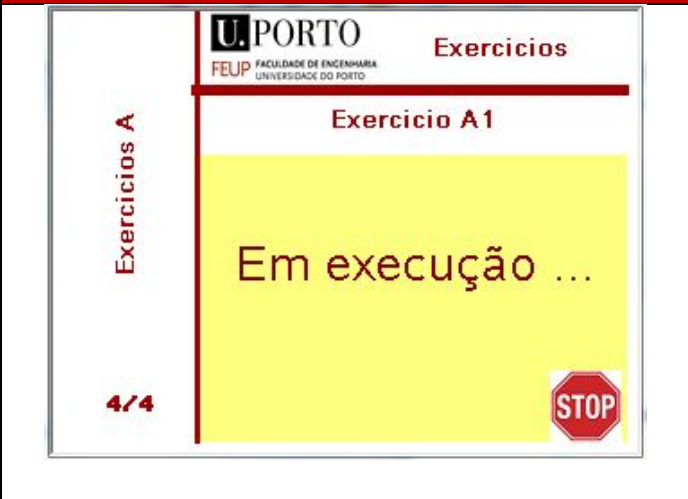
Tela de escolha no número de impulsos	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • A botoneira intitulada posicionamento tem como objetivo garantir o mesmo posicionamento do motor de exercício para exercício. • Quando o posicionamento é atingido é ativado o sinal luminoso

O utilizador pode iniciar o exercício através do botão “iniciar”.Este botão “iniciar” só aparecerá se pulsar inicialmente no botão “posicionamento” e a ativação do sinal luminoso

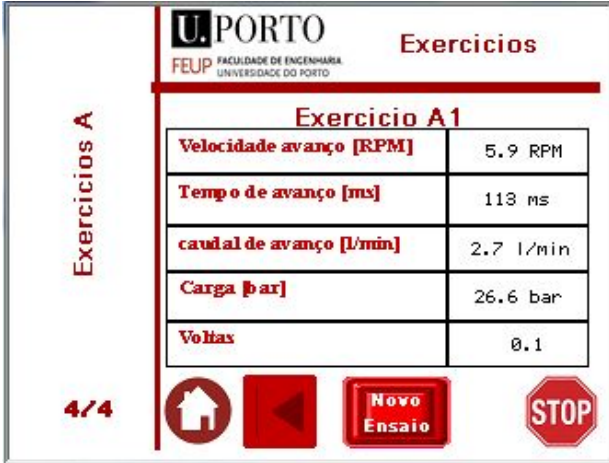
que assim garante que o motor sempre que se iniciar o exercício esteja sempre na mesma posição.

Tela de iniciação do exercício A1	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • O utilizador insere o número de impulsos através de um teclado <i>popup</i> • O utilizador está impossibilitado de inserir o número 0 de impulsos • O número máximo de impulsos que o utilizador poderá estabelecer será 999 impulsos

Continuando na janela anterior, depois de premir o botão “iniciar”, o utilizador irá visualizar o aparecimento de uma janela *popup* que irá permanecer enquanto o exercício estiver a ser efetuado.

Janela de execução do exercício A1	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • A janela <i>Popup</i> onde se encontra a mensagem “em execução” encontra-se intermitente; • O botão de “Stop” que se encontra na janela <i>popup</i> realiza a paragem do exercício e concede a possibilidade ao utilizador de repor outro número de impulsos

Quando o exercício termina, os resultados são exibidos numa tabela. O utilizador poderá repetir o exercício premindo no botão “Novo exercício” oferecendo a possibilidade de o utilizador inserir outro valor no campo numérico inicialmente indicado.

Janela de finalização do exercício	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • Quando aparecer a tabela de resultados desaparece a janela <i>popup</i>; • Carregando no botão de novo ensaio a tabela de resultados desaparece e o campo numérico onde o utilizador irá escolher o número de impulsos está inicialmente a zero; • Esta tabela irá informar o utilizador sobre o caudal, velocidade e a pressão de carga.

6.1.1.2 . Resultados e observações

Para a análise de resultados foi realizada uma série de exercícios para diferentes gamas de velocidades (velocidade alta, intermédia e baixa) para diferentes ajustes de carga através da limitadora de pressão de ajuste manual.

Também é essencial referir que os exercícios foram efetuados com o óleo a 25°C para evitar variações de resultados devido à influência da temperatura.

Para velocidades baixas (0.8 RPM) foram realizados três exercícios para diferentes ajustes de carga sendo que na seguinte tabela (Tabela 16) estão expostos os resultados:

Tabela 16 Resultados do exercício A.1. para velocidades baixas

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	824	824	824
Velocidade de avanço [RPM]	0.8	0.8	0.8
Caudal de avanço [l/min]	0.4	0.4	0.4
Carga [bar]	1.3	10.5	10.6

Através destes resultados podemos concluir que a baixas velocidades a existência de uma carga não influencia a velocidade. Isto deve-se ao facto de o caudal ser demasiado pequeno, logo irá igualar ao caudal de fugas, dirigindo-se para o tanque.

De seguida foi repetido o mesmo procedimento, mas para velocidades intermédias (6 RPM) completando a Tabela 17.

Tabela 17 Resultados do exercício A.1. para velocidades intermédias

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	110	113	116
Velocidade de avanço [RPM]	6.1	5.9	5.7
Caudal de avanço [l/min]	2.8	2.7	2.6
Carga [Bar]	1.3	24	29.3

Aqui já se pode verificar, na Tabela 17, que a existência de uma carga já influencia a velocidade. A velocidade intermédia a uma carga alta já garante uma diminuição da velocidade de cerca de 3 % para carga média e de 6 % para uma carga máxima.

Por último foi repetido o exercício, para altas velocidades (20 RPM), sendo que os resultados foram os seguintes:

Tabela 18 Resultados do exercício A.1. para velocidades altas

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	32	34	40
Velocidade de avanço [RPM]	20	19	16.7
Caudal de avanço [l/min]	9.36	8.89	7.82
Carga [Bar]	1.3	28.5	53.6

Como se pode observar, na Tabela 18, a existência de carga influencia de uma maneira sensível a velocidade, se esta for substancialmente grande. Pode-se visualizar que a uma carga média o motor irá diminuir a velocidade normal em 6 % e a grandes cargas a velocidade irá diminuir a 17 % da velocidade sem carga.

Depois da realização deste exercício torna-se essencial desenvolver um exercício A.2 no qual se pode verificar a influência da carga nos dois movimentos do motor (avanço e recuo).

6.1.2 Exercício A.2.

Depois da elaboração de um exercício unicamente focado no estudo da influência da velocidade de avanço perante uma carga, foi elaborado o presente exercício por forma a analisar o desempenho do motor perante uma inversão de sentido na presença de uma carga. Assim sendo será possível estudar não só a velocidade de avanço como também a velocidade de recuo.

Teoricamente a velocidade terá de ser similar uma vez que a cilindrada é constante, a velocidade de recuo deverá ser idêntica à velocidade de avanço.

Este exercício é interessante para o utilizador verificar a inversão de sentido e poder comparar com outros tipos de transmissão em termos sonoros e visuais.

O utilizador neste exercício tem a possibilidade de estabelecer um ângulo incrementado de 4 em 4°; este ângulo estabelecido pelo utilizador é o ponto de inversão de sentido. Assim, este exercício irá informar o utilizador os seguintes fatores:

- Tempo de avanço;
- Velocidade de avanço;
- Caudal de avanço;
- Tempo de recuo;
- Velocidade de recuo;
- Caudal de recuo;
- Relação de velocidades.


De modo a facilitar a confirmação do ponto de inversão estabelecido pelo utilizador no início do exercício A.2, o disco contém um círculo devidamente graduado, para assim o utilizador poder confirmar a amplitude estabelecida previamente.

6.1.2.1 Representação das telas da HMI essenciais no exercício A.2.


Como no exercício A.1., no presente capítulo, é onde se encontra uma breve descrição da configuração da interface que o utilizado vai encontrar na realização deste mesmo exercício.

As interfaces encontram-se organizadas da seguinte forma:


Na primeira interface o utilizador tem a oportunidade de escolha de diferentes gamas de velocidades em que pode realizar o exercício, tal como no exercício A.1.

Tela de escolha de velocidades inserido no exercício A2	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha da velocidade de execução do exercício; • O utilizador só terá a possibilidade de avançar para a tela seguinte se escolher a velocidade.

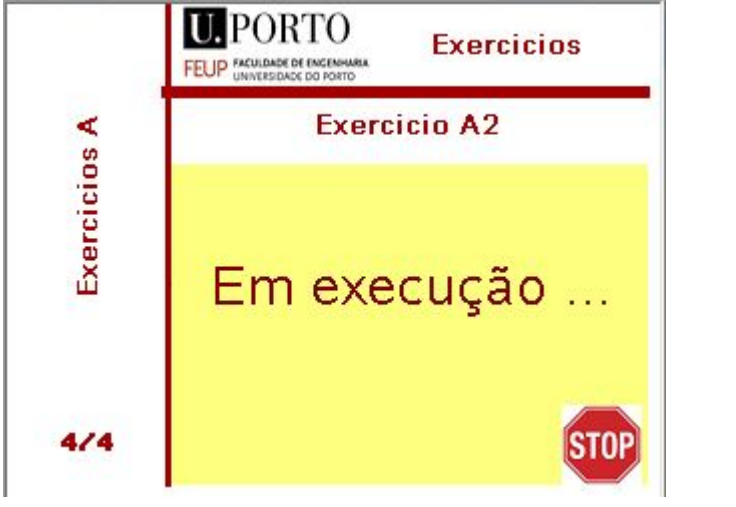
De seguida o utilizador irá encontrar uma janela na qual poderá estabelecer o ângulo no qual deseja que exista a inversão de movimento, através do manuseio das setas que se encontram de lado do campo numérico. Para dar-se o início ao exercício, o utilizador tem de pulsar o botão “iniciar”. Mas para o aparecimento do botão “iniciar” (botão que garante o início do exercício) tem-se de garantir o posicionamento do motor através de uma botoneira (de cor verde) e o accionamento de um sinal luminoso e o utilizador saberá através da luz de sinalização que assim garantirá o início do exercício sempre na mesma posição.

Tela de escolha de velocidades inserido no exercício A2	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • A botoneira de posicionamento irá garantir o posicionamento igual no início de cada exercício • Quando o posicionamento é garantido é accionado o sinal de luminoso e assim pode-se iniciar o exercício


Depois de o utilizador seguir os procedimentos anteriormente descritos, o botão iniciar irá aparecer e assim o exercício poderá iniciar, como já referido.

Tela de início do exercício A.2.	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • As setas irão incrementar 4° em 4°; • Impossibilidade de inserir 0° no exercício, pois o botão “iniciar” só aparecerá quando o utilizador pulsar na setas. • O botão “clear” vai fazer <i>reset</i> ao campo numérico;

Depois de se dar início ao exercício, o utilizador vai-se deparar com uma janela *popup* com uma mensagem intermitente a dizer “Em execução”. Nesta janela *popup* além da mensagem intermitente também contém um botão de emergência no caso de o utilizador querer parar o exercício e iniciar os mesmos procedimentos.

Tela de execução do exercício	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • O botão <i>stop</i> irá executar uma paragem de emergência, na qual irá transportar o utilizador para a tela de iniciação do exercício.

Quando o exercício terminar, o utilizador ir-se-á deparar com uma tabela que expõe os resultados para o utilizador tirar as suas próprias conclusões.

Tela de finalização do exercício/exposição de resultados	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • Somente desaparecendo a janela <i>popup</i> de execução de exercício irá aparecer a tabela de resultados; • A aparição da tabela de resultados irá ser acompanhada também do aparecimento do “botão novo ensaio”; • O botão de “novo ensaio” irá fazer <i>reset</i> ao campo numérico.

6.1.2.2 Resultados e observações

Para a análise de resultados do exercício A.2 foi efetuado, como no exercício A.1, para as diferentes velocidades e para diferentes ajustes de carga (baixa, média e alta).

Para uma velocidade baixa como já foi verificado no exercício A.1. a velocidade de avanço não é influenciada pela existência de uma carga. Através da análise da Tabela 19 pode-se verificar que também a velocidade de recuo não é influenciada.

A relação de velocidades (velocidade de avanço e velocidade de recuo) é igual não existindo sobrecurso ou se existir é mínimo. A variação dos tempos de avanço e dos tempos de recuo estão associados ao tempo de ciclo do autómato.

Tabela 19 Resultados do exercício A.2. para velocidades baixas

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	1906	1929	1925
Velocidade de avanço [RPM]	0.8	0.8	0.8
Caudal de avanço [l/min]	0.3	0.3	0.3
Tempo de recuo [ms]	1973	1906	1930
Velocidade de recuo [RPM]	0.8	0.8	0.8
Caudal de recuo [l/min]	0.3	0.3	0.3
V1/V2	1	1	1
Carga [bar]	1.1	1.1	1.1

De seguida repetiu-se o exercício para uma velocidade intermédia onde já se pode verificar, a partir da Tabela 20, que já existe alguma variação das velocidades perante a presença de uma carga intermédia.

A influência da carga mantêm-se idêntica para os dois sentidos de rotação mantendo-se a relação de velocidades, aproximadamente iguais a um, demonstrando que a velocidade mais uma vez não varia com a mudança de sentido e as variações que podem existir é devido ao factor de conversão de impulsos por segundo para rotações por minuto. A HMI demonstra alguns problemas de truncatura.

Tabela 20 Resultados do exercício A.2. para velocidades intermédias

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	255	327	338
Velocidade de avanço [RPM]	6.3	4.9	11.4
Caudal de avanço [l/min]	2.95	2.3	2.2
Tempo de recuo [ms]	250	320	328
Velocidade de recuo [RPM]	6.4	5	4.9
Caudal de recuo [l/min]	2.99	2.34	2.3
V1/V2	0.98	0.98	0.98
Carga [bar]	1.2	24.9	43

Este exercício foi repetido para velocidades grandes. Como se pode observar na Tabela 21 onde estão contidos os resultados, a velocidade é influenciada seriamente pela carga comparativamente à velocidade intermédia.

Tabela 21 Resultados do exercício A.2. para velocidades altas

Gama de cargas	Carga mínima	Carga média	Carga alta
Tempo de avanço [ms]	79	84	140
Velocidade de avanço [RPM]	20	19	14
Caudal de avanço [l/min]	9.5	8.892	5.3
Tempo de recuo [ms]	76	84	117
Velocidade de recuo [RPM]	20	19	13.7
Caudal de recuo [l/min]	9.5	8.89	6.41
V1/V2	1	1	0.83
Carga [bar]	1.1	32.6	72.3

Com a realização deste exercício pode-se concluir que com o aumento das velocidades a influência da carga aumenta, devido à preponderância da queda de pressão no cálculo do caudal.

6.2 Exercícios B

Os exercícios B caracterizam-se por serem mais complexos do que os exercícios A. Estes exercícios didáticos demonstram o comportamento da transmissão hidrostática perante um controlo de velocidade e a sua dinâmica de resposta perante a necessidade do utilizador (exercícios demonstrativos).

Este tipo de exercícios já se insere numa fase mais adiantada do curso Engenharia Mecânica e vão de encontro com os conhecimentos adquiridos nas unidades curriculares de Servomecanismos e Sistemas de Controlo para uma melhor compreensão do objetivo e elaboração do exercício.

Os exercícios B estão divididos em duas secções intitulados de exercícios B.1 e B.2, sendo que os objetivos da elaboração de cada exercício são os seguintes:

- Exercício B.1. - Este exercício oferece ao utilizador a possibilidade de controlar a velocidade e de posteriormente acionar a carga, onde posteriormente terá a possibilidade de compensar a influência desta carga na velocidade através da compensação da mesma, conseguida através do ajuste por parte do utilizador da válvula limitadora de pressão proporcional (responsável pelo ajuste automático da cilindrada da bomba e consequentemente do caudal da bomba mantendo assim a pressão constante).
- Exercício B.2 – Este exercício permite ao utilizador as mesmas possibilidades do exercício B.1.. Porém , neste caso, a compensação de carga já não é garantida manualmente (pelo utilizador) mas sim automaticamente.

Nestes exercícios os elementos essenciais são os seguintes:

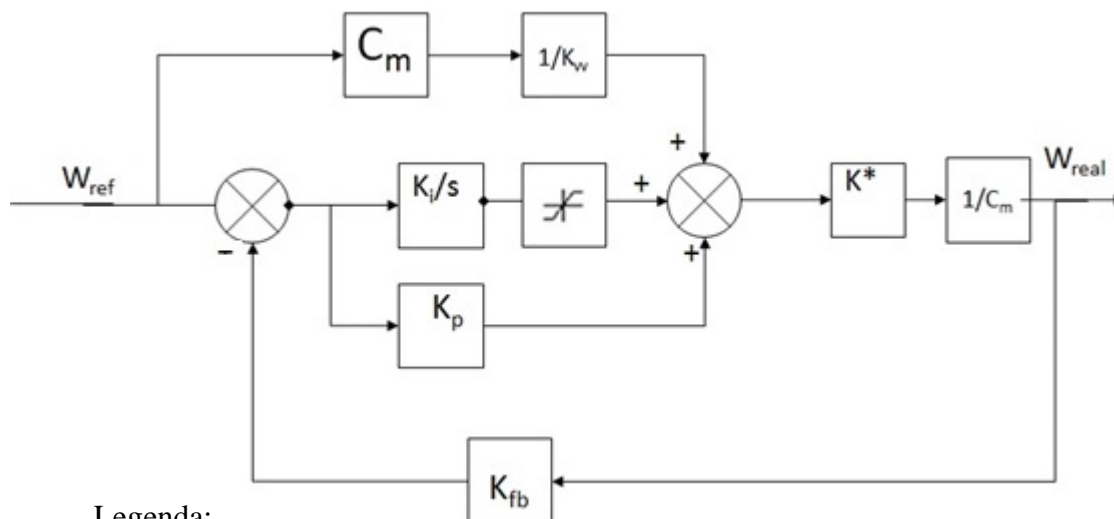
- Válvula reguladora de caudal proporcional que irá ser responsável pelo comando da velocidade por parte do utilizador;
- Codificador digital por forma a permitir ao utilizador quantificar a velocidade;
- Válvula limitadora de pressão de comando manual que é a responsável pela simulação de carga no sistema;
- Transdutor de pressão;
- Válvula direcional 4/3 para definição do sentido de rotação;
- Válvula direcional 4/2 para acionamento da carga;
- Válvula limitadora de pressão proporcional responsável pela compensação de carga.

6.2.1 Controlo de velocidade utilizado na execução dos exercícios B

Para a elaboração dos exercícios B foi precisa uma maior contribuição dos elementos da hidráulica proporcional (limitadora de pressão proporcional e reguladora de caudal proporcional) de forma a garantir o controlo de velocidades.

O controlo de velocidade, estrutura demonstrada na Fig.6.2, é garantido através de uma ação integral e proporcional. Estas ações são ainda acompanhadas por um controlo *feedforward*, através do uso da válvula reguladora de caudal.

O *feedback* é garantido através da leitura de velocidades do autómato de 2 segundos em 2 segundos.



Legenda:

K^* - Característica da válvula K_{fb} - Ganho de feedback K_p - Ganho proporcional

K_i - ganho integral C_m - cilindrada do motor W_{ref} - velocidade estabelecida pelo utilizador

Fig.6.2 Estrutura do controlador de velocidade utilizado na execução dos exercícios B acompanhado da sua legenda

O *feedforward* é garantido através da curva característica da válvula reguladora de caudal (Fig. 6.3). Enquanto a ação integral tem de conter uma saturação para limitar a ação integral e conseqüentemente diminuir a sobrelongação, esta saturação foi estabelecida para $\pm 20\%$ da ação integral ($\pm 2V$).

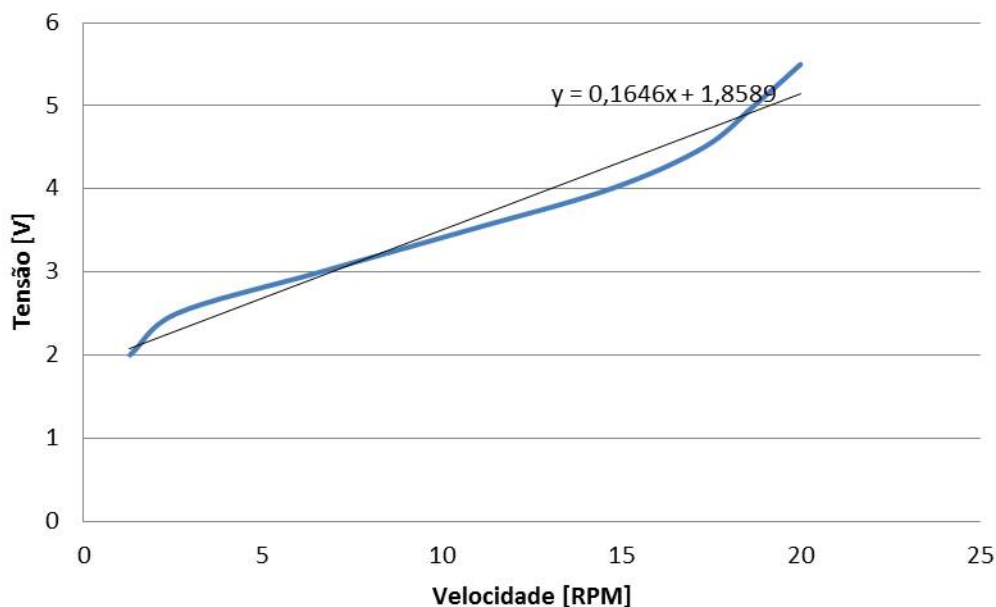


Fig. 6.3 Curva característica do comportamento da válvula reguladora de caudal existente no sistema em estudo

6.2.2 Ensaio prévios para visualização de diferentes comportamentos para diferentes cargas

Este ensaio é de extrema importância para o desenvolvimento dos exercícios B.

O ensaio é realizado através do módulo de comando manual, consistindo na verificação da velocidade, através de vários ajustes da tensão de alimentação da válvula reguladora de caudal proporcional, perante as mais variadas cargas aplicadas (ajustadas pela limitadora de pressão), retirando a velocidade em consonância com a pressão de comando, sendo este ajuste da pressão de comando garantido através da válvula limitadora de pressão proporcional. Através das mais variadas combinações pode-se tirar conclusões sobre o comportamento geral da transmissão perante as mais variedades de valores de carga.

Com a realização deste ensaio podem-se observar os diferentes comportamentos através dos gráficos abaixo demonstrados. Cada gráfico é representativo das diferentes velocidades perante as mais variadas cargas para cada pressão do comando estabelecida.

Cada gráfico é função de três variáveis: tensão de referência da válvula reguladora de caudal; velocidade de rotação do motor e a carga aplicada.

O primeiro gráfico (Fig. 6.4) consiste na evolução da velocidade perante um variado conjunto de cargas, sem influência da válvula limitadora de pressão (pressão de comando de 4

bar). Como se pode ver, a velocidades reduzidas a aplicação de carga não influênciava a velocidade do motor; somente a partir de 5 RPM é que a velocidade é influenciada pela ação da carga. Também a partir do gráfico se pode ver que somente a partir de um valor da carga (pressão de carga de 25 bar) a velocidade diminui.

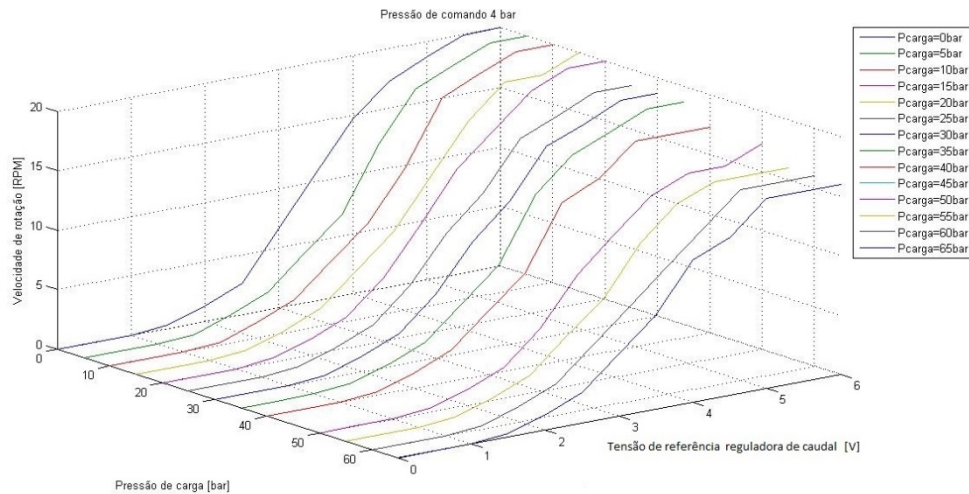


Fig. 6.4 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 4 bar

De seguida foram repetidos os mesmos procedimentos para uma pressão de comando de 5 bar. Com a repetição da medição da velocidade e aquisição dessas mesmas medidas, foram dispostas num gráfico 3-D de modo a facilitar a sua comparação com o gráfico anterior. Como se pode ver na Fig. 6.5 as velocidades já demonstram uma ligeira subida a pressões de carga altas em comparação com as condições anteriores (Pressão de comando de 4 bar).

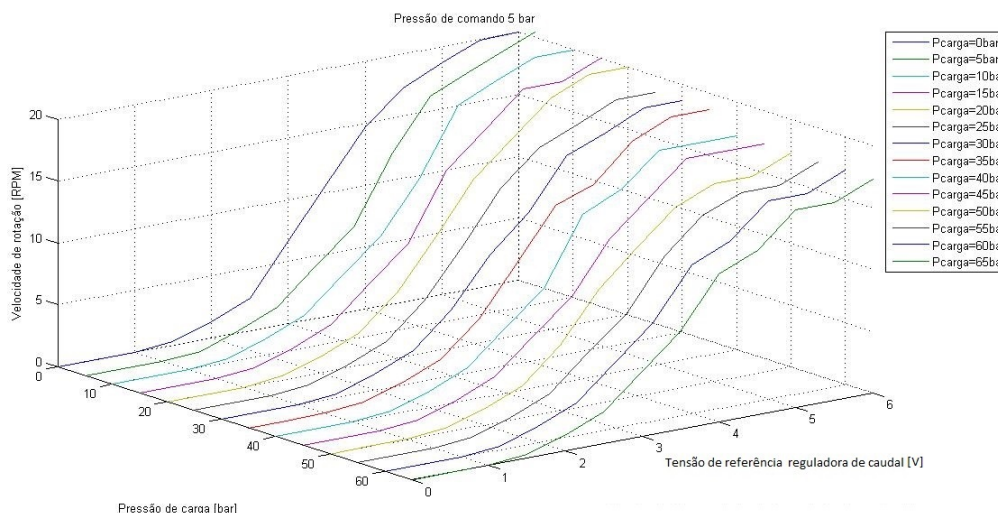


Fig. 6.5 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 5 bar

Passando a uma leitura do gráfico para uma pressão de comando de 15 bar, é possível verificar que as curvas tendem a ser iguais independentemente da carga aplicada.

Na Fig. 6.6, porém podemos visualizar uma certa diminuição da velocidade a cargas altas. Mas em comparação com o gráfico anterior já podemos observar uma certa tendência ascendente das velocidades em consonância com o aumento da pressão de comando (pressão de comando de 15 bar).

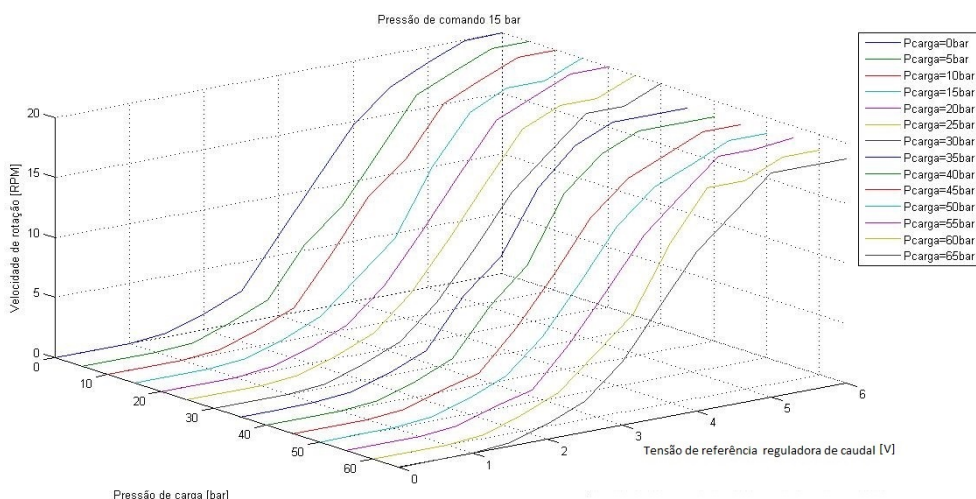


Fig. 6.6 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 15 bar

Como já foi dito anteriormente as curvas têm a tendência a tornarem-se uniformes, mesmo que a carga aumente. No gráfico da Fig. 6.7 já é bem notória a uniformização das curvas ao longo do aumento da carga.

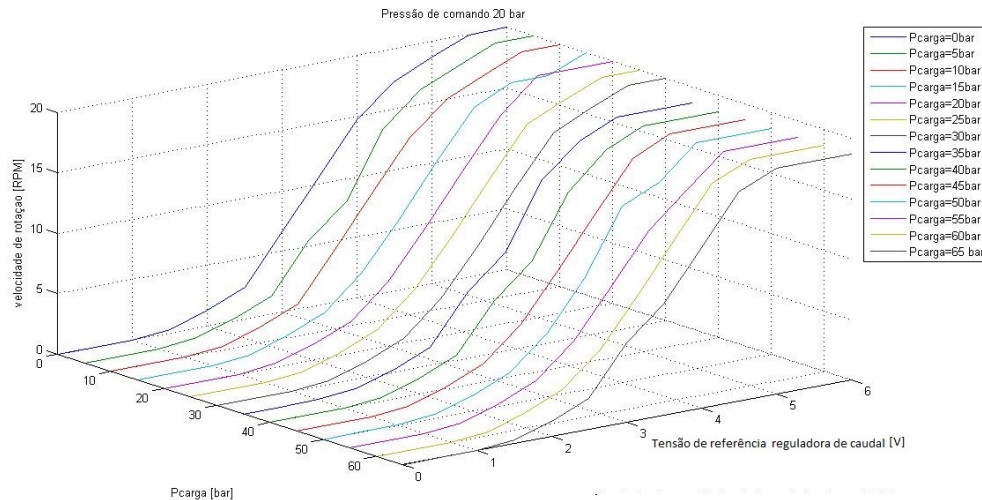


Fig. 6.7 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c / pressão de comando de 20 bar

No gráfico da Fig. 6.8, as velocidades máximas já são atingidas mesmo que sejam aplicadas as pressões de carga altas. Provando que ajustando as pressões de comando da bomba (cilindrada da bomba) pode-se manter a velocidade constante (independente da carga aplicada).

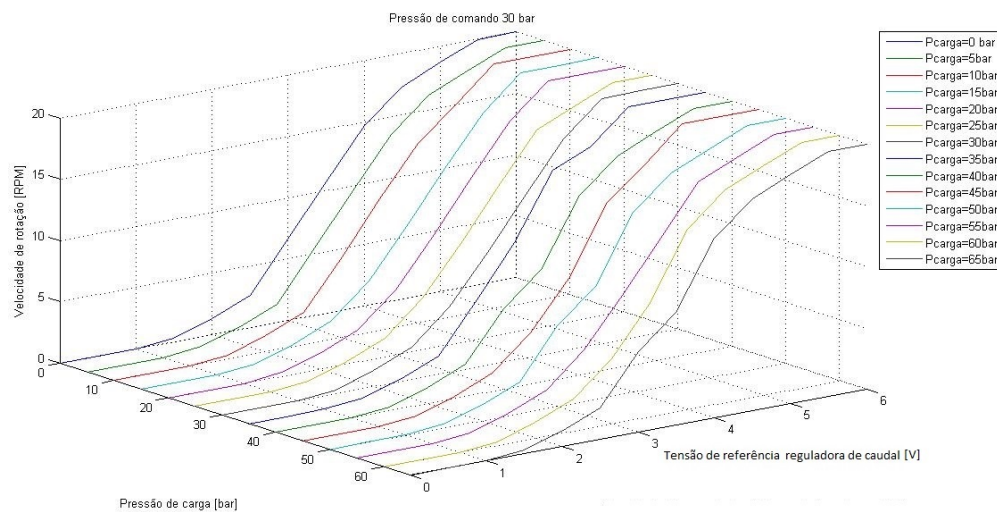


Fig. 6.8 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c / pressão de comando de 30 bar

Por fim encontra-se o gráfico da Fig. 6.9 onde está aplicada a pressão máxima de comando possível do nosso sistema (cilindrada máxima). Como se pode verificar as curvas são todas uniformes mesmo com o aumento de carga.

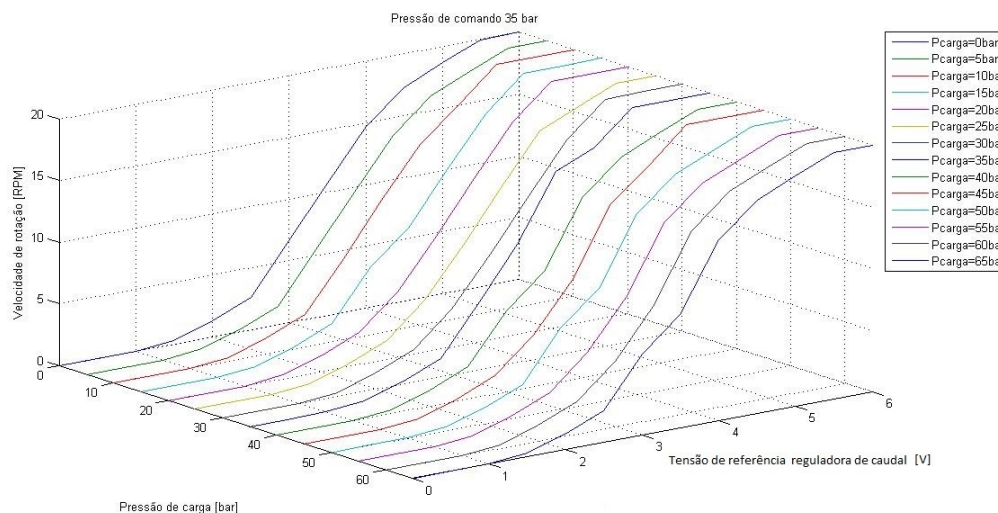


Fig. 6.9 Gráfico representativo da influência da velocidade (RPM) com aplicação de carga c/ pressão de comando de 35 bar

Depois desta análise prévia do comportamento do sistema perante as diferentes combinações de velocidade com várias cargas e também em simultâneo com as várias pressões de comando da bomba.

Depois de análise exaustiva mas fundamental sobre o comportamento do sistema pode-se avançar para a elaboração dos exercícios B.

6.2.3 Exercício B.1.

Os exercícios B.1. são interessantes, uma vez que permitem ao utilizador verificar o comportamento da transmissão hidrostática perante uma carga e qual o seu comportamento através do ajuste da válvula limitadora de pressão proporcional responsável pelo ajuste automático da cilindrada da bomba e conseqüente caudal que irá alimentar o motor (a pressão constante), onde estamos a fazer leitura da velocidade

Com aplicação da carga o controlo de velocidade somente pela reguladora de caudal pode ser insuficiente.

Assim torna-se possível o controlo de velocidade através de aplicação da carga acompanhado de um ajuste da válvula limitadora de pressão proporcional.


No presente exercício este ajuste da limitadora de pressão proporcional pode ser realizado pelo utilizador.

6.2.3.1 Apresentação das telas da interface gráfica (HMI) do exercício B.1.

Este capítulo tem como objectivo demonstrar as telas que o utilizador irá encontrar na execução do exercício B.1 (exercício demonstrativo) deixando para anexo (ANEXO B) as telas de arranque da central como as janelas de introdução ao exercício para o utilizador perceber de que se trata o exercício.


Na tela de iniciação do exercício o utilizador depara-se com um campo numérico onde poderá inserir o valor de velocidade de referência através do manuseio das setas que se encontram na parte lateral do campo numérico. O utilizador também tem a possibilidade de quantificar a carga existente no sistema e bem como o erro da velocidade em RPM.

Quando o utilizador deseja iniciar o controlo carregando no botão “controlo velocidade”, vai aparecer uma janela *popup* que possibilita ao utilizador escolher o sentido de rotação no qual deseja realizar o exercício.

Tela de execução do exercício B1 com <i>popup</i> da escolha do sentido de rotação	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> A janela <i>Popup</i> só desaparece quando se carrega no botão “confirmar”

Para dar início ao exercício tem de carregar no botão “iniciar controlo de velocidade”, terá também um botão no qual pode acionar a carga.

Por fim, o utilizador, também poderá manusear o comando da válvula limitadora de pressão proporcional que é responsável pelo posicionamento do prato através das setas localizadas ao lado do campo numérico.

Tela de execução do exercício B1	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • O botão “Home” desliga o botão que aciona o controlo de velocidade e todas variáveis ativas neste exercício.

6.2.3.2 Resultados e observações

Este exercício foi realizado para diferentes gamas de velocidades com aplicação de carga verificando os diferentes erros, através do ajuste “manual” da limitadora de pressão proporcional. Através da execução do exercício para três valores de carga (35 bar, conseguiu-se retirar os seguintes dados demonstrados nas tabelas.

Para um ajuste da válvula limitadora de pressão manual para três gamas diferentes de carga (35 bar, 45 bar e 65 bar) podendo-se assim tirar algumas conclusões.

Ajustando a carga para 35 bar observou-se o seguinte:

- Para pressões de carga abaixo dos 35 bar o controlador de velocidade consegue compensar a diminuição da velocidade através da reguladora de caudal;
- Para a pressão de carga de 35 bar a reguladora de caudal abaixo das 19 RPM consegue também manter a velocidade inalterável;
- A 19 RPM a reguladora de caudal não consegue manter a velocidade de referência, somente necessita aproximadamente de 30 % da alimentação máxima da válvula limitadora de pressão proporcional.

Com o aumento de carga (45 bar) realizou-se o mesmo procedimento da análise e possibilitou tirar as seguintes conclusões:

- Com o aumento da pressão de carga para 45 bar, como já esperado o controlador de velocidade empregue utilizando a válvula reguladora de caudal

para 17 RPM já necessita da compensação por parte da válvula limitadora de pressão proporcional para conseguir um erro nulo. Para isso a válvula limitadora de pressão necessita de ser alimentada 10 % da sua tensão máxima;

- Para a mesma pressão de carga, mas para velocidades mais altas, como por exemplo 19 RPM e 20 RPM, o controlador de velocidade já necessita da válvula limitadora de pressão proporcional em 60% (aproximadamente) da sua tensão máxima (10 V).

Para finalizar a observação do exercício B.1. a carga foi aumentada (65bar), repetiram-se os procedimentos anteriores e concluindo-se o seguinte:

- Para a pressão de carga máxima empregue no sistema (65 bar), a velocidade mínima para o controlador de velocidade funcionar sem necessidade de variar a cilindrada da bomba (atuação da válvula limitadora de pressão proporcional) é de 15 RPM. Para 16 RPM o erro mantém-se a 1 RPM somente com o controlador de velocidade.
- Para velocidades maiores como 18 e 19 RPM o controlador de velocidade mantém-se a 3 e 4 RPM de erro; para eliminar este erro é necessário que a limitadora de pressão proporcional seja alimentada a 50% da sua tensão máxima de alimentação.
- Para a velocidade máxima (20 RPM) aplicando uma carga resistiva máximo (65 bar) com o controlador de velocidade a funcionar sozinho, o erro mantém-se a 6 RPM e necessita de 70 % da alimentação máxima da limitadora de pressão proporcional para o erro manter-se a zero.

Depois de efetuar este exercício e ter tirado algumas conclusões torna-se interessante conciliar a atuação da válvula reguladora de caudal com a limitadora de pressão proporcional, tornando a compensação de carga automática. Este assunto será retratado no próximo capítulo através da elaboração dos exercícios B.2.

6.2.4 Exercício B.2.

O exercício B.2. é muito idêntico ao exercício B.1., sendo que difere quando se dá o acionamento da carga, o utilizador ao pulsar o botão responsável pela compensação de carga irá verificar que o erro diminui devido a esta opção. Na realidade, esta opção é um compensador de carga ajustado automaticamente sem ação do utilizador (sendo esta a questão que o diferencia do exercício B.1.). Este compensador de carga realmente consiste num ajuste automático da válvula limitadora de pressão proporcional.

Este ajuste automático é conseguido através da curva característica da válvula limitadora de pressão proporcional, conseguida experimentalmente como se pode ver na Fig. 6.10.

O compensador de carga consiste no estabelecimento de valores programados no autómato para alimentar a válvula limitadora de pressão proporcional de acordo com a velocidade de referência e a pressão de carga (este valor é retirado pelo transdutor de pressão).

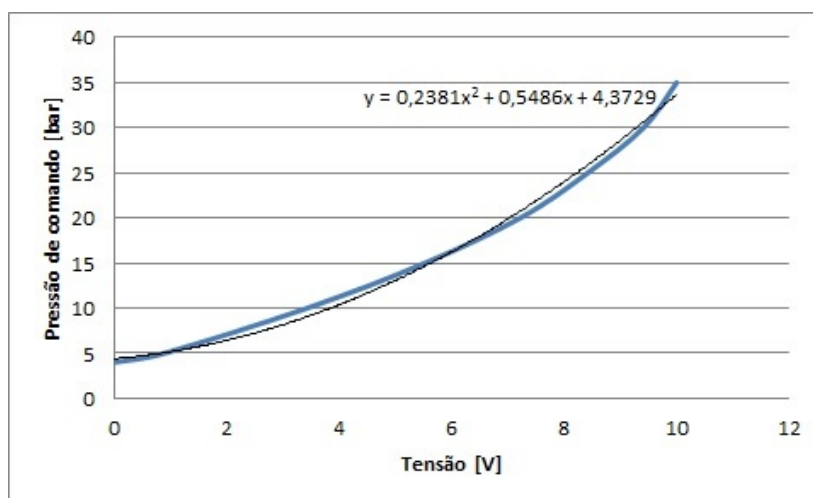



Fig. 6.10 Curva característica da válvula limitadora de pressão proporcional responsável pela pressão de comando da bomba


6.2.4.1 Configuração das janelas das janelas principais da HMI

No presente capítulo encontra-se a descrição dos painéis da HMI que aparecem na realização deste exercício, deixando o painel de descrição do exercício e de comando da central para os anexos.

A tela de execução do exercício é quase idêntica à tela de execução do exercício anteriormente descrito. Como já foi descrito anteriormente o utilizador para iniciar o exercício ao carregar no botão “controlo de velocidade” vai aparecer uma janela *popup* através da qual se procede à escolha do sentido de rotação para a execução do exercício.

Tela de execução do exercício B2	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • O popup encerra quando o utilizador pulsar o botão “confirmar”

A única diferença é que já não existe a possibilidade do utilizador comandar a válvula limitadora de pressão proporcional sendo substituída por um botão que aciona o compensador de carga, que realiza a compensação da carga automaticamente.

Tela de execução do exercício B2	Observações:
	<ul style="list-style-type: none"> • O botão que realiza a navegação das telas existentes no exercício irá fazer <i>reset</i> ao campo numérico onde se encontra a velocidade de referência e também “desatua” todos os botões existentes neste exercício.

6.2.4.2 Resultados e observações

Neste ponto é elaborada uma análise mais profunda do comportamento do controlador de velocidade perante uma gama de cargas resistentes. Na elaboração deste exercício os resultados vão incidir mais no comportamento do controlo de velocidade em relação com o compensador de carga.

Repetindo os mesmos procedimentos (vários ajustes da tensão de referência da válvula reguladora de caudal e também vários níveis de carga) observou-se os seguintes comportamentos:

- Para velocidades mínimas (1 RPM até 7 RPM) a função “compensador de carga” não faz qualquer tipo de efeito pois o caudal é mínimo e a queda de pressão não é suficiente para influenciar a velocidade do motor, mesmo que a carga seja máxima
- Para velocidades entre 8 até 15 RPM, o erro tende para zero mais rapidamente com o compensador de carga em relação à não ativação da mesma função eliminando a grande influência da carga através do ajuste em rampa;
- Para velocidades superiores a 15 RPM até 20 RPM o compensador de carga estabiliza melhor o erro de velocidade e também diminui o seu tempo de acomodação (*setting time*) tornando-se menos instável.

7. Conclusão e proposta para trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo conceber e construir uma transmissão hidrostática para demonstrações didáticas, perante a presença de uma carga, sendo que esta pode ser ajustada pelo utilizador.

A transmissão hidrostática é totalmente controlável por um autómato, que tem uma interface táctil de diálogo com o utilizador.

Para verificação do comportamento da transmissão hidrostática construída foram elaborados alguns exercícios para demonstração didática. Este objetivo foi conseguido através da elaboração de 4 exercícios, sendo que foram divididos em dois grupos de exercícios, catalogados com as letras “A” e “B”.

Inicialmente foram elaborados os exercícios A, que consistiram em dois exercícios simples (exercícios A.1 e A.2.) para diferentes gamas de velocidade (velocidade baixa, velocidade média e velocidade alta) por forma a verificar qual a influência que a carga poderia ter na velocidade definida pelo utilizador.

No exercício A.1 é pretendido realizar um movimento angular de valor definido pelos impulsos a ser lidos pelo codificador incremental. Neste exercício foi, previamente, estabelecida a velocidade a que se pretendia realizar o exercício. Através do exercício A.1 pôde-se concluir que a carga estabelecida para velocidade baixa não influencia em nada a velocidade. Para velocidades altas, a carga influencia bastante a velocidade, comparativamente às velocidades médias.

Depois da elaboração do exercício A.1. verificou-se o comportamento da carga para os dois sentidos de rotação.

No exercício A.2. foi pretendido demonstrar a realização de um movimento alternativo definido por um ângulo a percorrer seguido da inversão de sentido, sendo estabelecida a gama de velocidade previamente, para executar o exercício. Com este exercício verificou-se que a

carga influencia de igual modo a rotação em ambos os sentidos, mesmo que se verifique uma variação de velocidade para um dos sentidos de rotação.

Depois dos exercícios A foi realizado um grupo de exercícios catalogados de exercícios B, sendo estes mais complexos e também demonstrativos para alunos de unidades curriculares mais avançadas no curso de Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, uma vez que consiste num controlo de velocidade. Este controlo de velocidade foi conseguido através da válvula de caudal proporcional.

O primeiro exercício do grupo de exercícios B consiste nos exercícios B.1. Este exercício possibilitou controlar a velocidade do motor de came periférica para ambos os sentidos de rotação, permitindo também a aplicação ou não de uma carga. Assim, com a opção de aplicação de carga foi possível visualizar a variação da velocidade que a aplicação da carga provoca.

Com a elaboração destes exercícios verificou-se que o controlo de velocidade consegue compensar a aplicação de uma carga resistente até uma velocidade significativa (17 RPM). A partir do estabelecimento de uma carga alta para uma velocidade acima das 17 RPM o controlo de velocidade evidencia erro ao compensar a carga.

Através da realização do exercício B.1 conseguiu-se verificar que quando se aplicam cargas baixas, o controlador de velocidade consegue compensar as variações de velocidade (devido à aplicação da carga) sem necessitar da regulação da cilindrada da bomba (através da válvula limitadora de pressão proporcional). Para cargas maiores, entre 45 e 65 bar, é necessário que o utilizador regule um valor entre 40 % e 60 % da tensão máxima aplicada à válvula limitadora de pressão proporcional (responsável pela cilindrada da bomba) por forma a compensar essa variação resultante da aplicação da carga resistente.

Em consequência da realização do exercício anterior foi elaborado o exercício B.2. onde existiu a compensação dessa variação resultante da aplicação da carga automaticamente.

Esta compensação foi conseguida através do estabelecimento de condições que relacionaram um valor da pressão de comando resultante da combinação da pressão da carga resistente e do valor da velocidade de referência. Através do estabelecimento de diferentes combinações entre a pressão de carga e a velocidade de referência resultou o estabelecimento de uma pressão de comando para obter a compensação de carga. Outra peculiaridade no estabelecimento dos valores de pressão de comando é que este valor foi atingido em rampa de modo a diminuir a sobreelongação.

Por fim pode-se concluir que estes exercícios podem ser uma ferramenta importante para a demonstração, em termos didáticos dos diferentes comportamentos que uma transmissão hidrostática rotativa pode desenvolver perante uma grande variedade de gamas de cargas resistentes.

7.2 Propostas futuras

Depois da elaboração deste trabalho foram surgindo ideias para propostas de trabalhos futuros inseridos neste tema.

De modo a melhorar a leitura da velocidade pode-se sugerir uma diminuição da espessura das faixas do codificador digital por forma a melhorar a resolução ou por outro lado um taquímetro acoplado ao disco codificador para assim garantir um bom feedback de velocidade e , conseqüentemente, um bom controlo de velocidade.

Outra proposta é a substituição do transdutor de pressão por um transdutor de gama mais baixa para assim tirar um melhor aproveitamento de toda a gama, bem como colocar mais um transdutor de pressão na entrada do motor trocoidal para assim se obter uma leitura do binário aplicado pela carga que o utilizador poderá variar.

Para tornar o sistema mais flexível, substituir a válvula limitadora de pressão de atuação manual por uma limitadora de pressão proporcional garantindo assim um controlo da carga aplicada utilizando o autómato e a HMI.

Por fim adicionar um permutador de calor para assim reduzir os efeitos do aumento rápido da temperatura e a conseqüente variação dos resultados.

8. Bibliografia e Referências

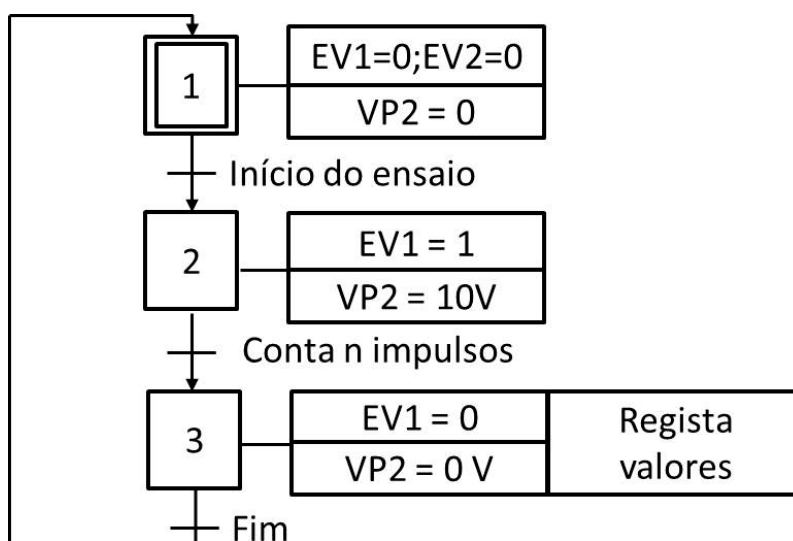
1. **Korn, J. e Phil., M.** *Hydrostatic Transmission Systems* . London : International Textbook Company Ltd., 1969. 0 7002 0080 0.
2. Wikipedia. [Online] 13 de 09 de 2013. [Citação: 15 de 09 de 2013.] http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrostatic_transmission#Hydrostatic_CVTs.
3. *Research on dynamics of a supercritical propulsion shaft equipped with a dry friction damper.* **Zbigniew Dzygadło, Witold Perkowski.** s.l. : Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2002, Vol. 4.
4. *Wind turbine Gearbox Technologies.* **Ragheb, Adam M. e Ragheb, Magdi.** Illinois, United States of America : s.n.
5. **Brain, Marshall.** How Stuff Works. [Online] 1998-2013. [Citação: 17 de Setembro de 2013.] <http://auto.howstuffworks.com/sequential-gearbox1.htm>.
6. Lubrication Engineers Technical Department. *Hydrostatic Transmission.* 96, 75.
7. **Scott, Thomas E.** *Power transmission : mechanical, hydraulic, pneumatic, and electrical.* Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 2000. ISBN 0-13-095386-5.
8. **McLaren, Rory S.** Fluid Power Safety Institute. *Fluid Power Safety Institute.* [Online] FPSI.[Citação:15 de Setembro de 2013.] <http://www.gyrodynehelicopters.com/description.htm>.
9. **Cundiff, John S.** Hydrostatic Transmission. *Fluid Power Circuits and Controls.* 2001.
10. **Rexroth, Mannesmann.** *Hydraulic-training Axial Piston Units.*
11. **Klocke, Craig.** *Control Terminology for Hydrostatic Transmission.* United States : Sauer-Danfoss.
12. **Vickers/EATON.** Single and Double Vane Pumps. *Model Series V10, V20, V2010, and B2020.* 1995.
13. **EATON/Vickers.** Q series Piston Pumps. *Technical Catalog.* 2002.
14. **Poclair Hydraulics.** Hydraulic Motors. *MS05-MSE05.* 2012.
15. **ADAN LIMITED.** Adan Hydraulic Motor. *V series.* 2012.
16. **Vickers.** Solenoid Operated Directional Valves . *Catalog.*

17. **Duplomatic Oleodinamica.** Direct Operated Flow Control Valve With Electric Proportional Control. *series 52*.
18. **Comatrol .** Cartridge Valves Technical Information. *relief Valves*. 2010.
19. **Vickers.** Proportional Valves. *Proportional Pressure Relief Valves*. 1997.
20. **Schneider Electric.** Product data Sheet. *TWDLMDA40DTK extendable PLC base Twido*. 2013.
21. —. Modicon TM2. *Analog I/O Modules Hardware Guide*. 2011.
22. —. Product data Sheet. *TWDNOZ485D optional serial interface module-RS 485 - mini-DIN*.
23. **Schneider Electric .** Magnelis HMI STU 655/855. *Especificações gerais*. 2011.
24. **Vishay.** Vishay Semiconductors. *TCRT5000, TCRT5000L*. 2009.
25. **Sensor Technik Wiedemann.** Pressure Transmitter. *Pressure transmitter A08*.
26. **Freitas, Francisco Jorge.** *Sistemas Hidraulicos e Pneumaticos*. Porto : Secção de Automação, Instrumentação e controlo, 2008.

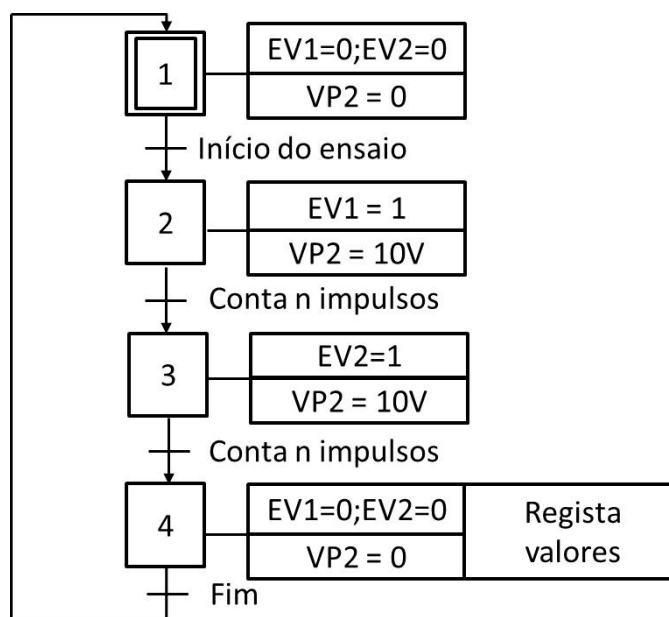
9. ANEXO A – Graficets funcionais

Os exercícios A tiveram como base de ideia GRAFCETS funcionais que foram os seguintes:

GRAFCET funcional Exercício A.1.:



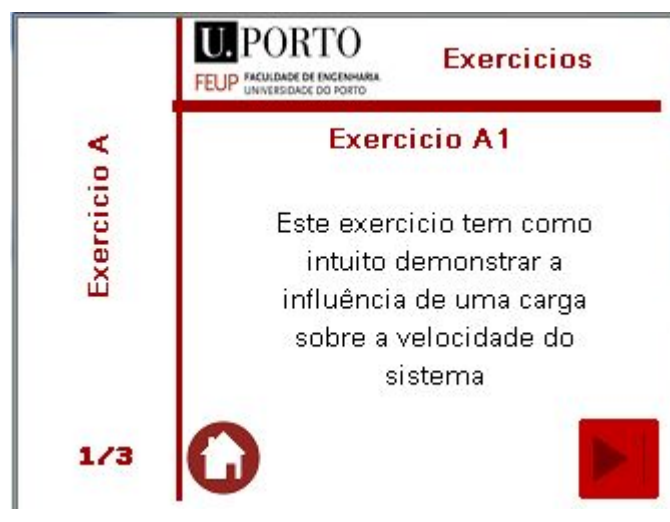
GRAFCET funcional Exercício A.2.:



10. ANEXO B – Telas HMI

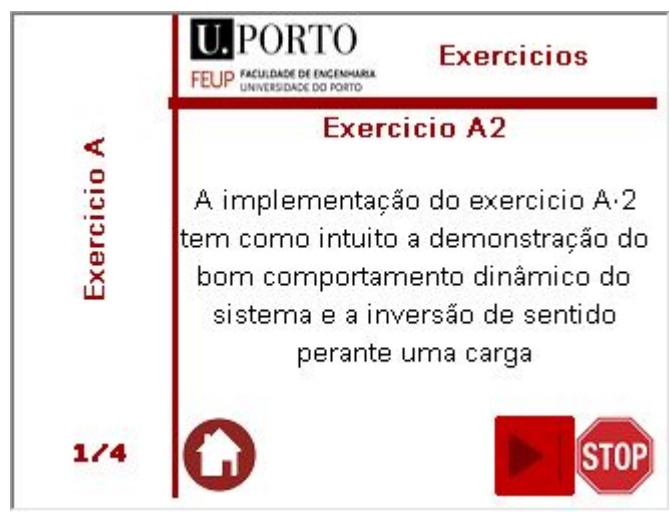
Telas Informativas:

Janela introdutória A.1.



- Janela introdutória, esta janela permite informar ao utilizador do objetivo da realização do exercício A.1.

Janela introdutória A.2.



- Janela introdutória, esta janela permite informar ao utilizador do objetivo da realização do exercício A.2.

Janela introdutória B.1.

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Exercicios

Exercicio B.1.

Controlo de velocidade perante a existência de uma carga ou não e também demonstração da compensação da existência desta carga através do controlo do posicionamento do prato. Este posicionamento é garantido através da valvula limitadora proporcional ajustada "manualmente" pelo utilizador

1/3

Home icon, Play button icon, STOP sign icon

- Janela introdutória, esta janela permite informar ao utilizador do objetivo da realização do exercício B.1.

Janela introdutória B.2.

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Exercicios

Exercicio B.2.

Controlo de velocidade perante a existência de uma carga ou não e também demonstração de compensação dessa mesma carga automaticamente através do posicionamento do prato da bomba de cilindrada variável

1/3

Home icon, Play button icon, STOP sign icon

- Janela introdutória, esta janela permite informar ao utilizador do objetivo da realização do exercício B.2.

Janela central hidráulica A.1.



- Janela pertencente ao exercício A.1. que permite o arranque da central para se dar inicio ao exercício A.1.

Janela central hidráulica A.2.



- Janela pertencente ao exercício A.2. que permite o arranque da central para se dar inicio ao exercício A.2.

Janela central hidráulica B.1.



- Janela pertencente ao exercício B.1. que permite o arranque da central para se dar inicio ao exercício B.1.

Janela central hidráulica B.2.



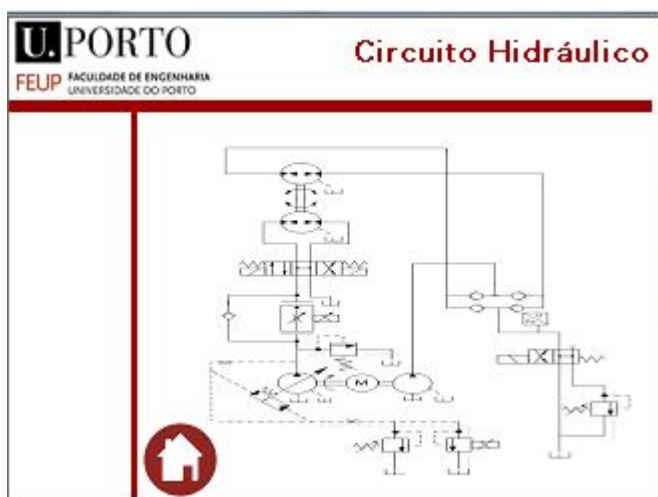
- Janela pertencente ao exercício B.2. que permite o arranque da central para se dar início ao exercício B.2.

Painel de paragem de emergência.



- Janela que surge quando é pulsado o botão de “paragem de emergência”.
- Esta janela só é encerrada quando o utilizador premir o botão confirmar

Painel informativo sobre o circuito hidráulico



- Painel onde se situa a informação sobre o circuito hidráulico concebido na realização deste trabalho

