

Prefazione

“Passi nell’Oleodinamica” testimonia un cammino di conoscenza molto esteso nel tempo che è iniziato nei primi anni ‘80 al Politecnico di Torino. Questa esperienza, che non ha mai subito pause e che tuttora è ricca di nuovi stimoli, è nata e si è formata nell’intento di riuscire a trasmettere ai tantissimi allievi ingegneri l’entusiasmo e la curiosità per una disciplina allora relativamente sconosciuta che ancora oggi non riceve quella attenzione che, per certo, meriterebbe.

Questo volume ha anche le sue peculiarità che il lettore attento potrà progressivamente porre in luce. Il contenuto è assai vasto ed in qualche modo testimonia un approccio metodologico originale. Ciò è frutto sia degli aspetti didattici sia delle molte e fruttuose collaborazioni di ricerca che, nel tempo, si sono sviluppate.

Sussiste l’auspicio che possa risultare di aiuto a quanti per studio o per professione avranno la passione e la volontà di servirsene. A coloro che lo faranno va il pensiero riconoscente e le scuse per le indubie manchevolezze ed omissioni unitamente all’augurio sincero di un proficuo lavoro.

Nicola Nervegna (1942-2019), già Ordinario di Oleodinamica

Torino, febbraio 2018

La struttura di questo libro è stata concepita per fornire sia i concetti di base dell’Oleodinamica che le loro applicazioni negli impianti reali. Grande attenzione è stata posta nell’illustrare le soluzioni costruttive tramite disegni di componenti reali realizzati nel corso degli anni presso il laboratorio di Oleodinamica. Di alcuni sistemi, oltre a un’analisi qualitativa, viene anche presentato uno studio quantitativo ottenuto tramite software di simulazione commerciali, che consentono al lettore di comprenderne in maniera più efficace il funzionamento, oltre che fornire lo spunto per ulteriori approfondimenti.

Il livello di dettaglio nella spiegazione dei vari argomenti, che in alcuni casi è molto particolareggiato, è strettamente legato alle attività di ricerca che sono state condotte tramite contratti o tesi di laurea; pertanto, non necessariamente componenti o sistemi trattati in maniera meno esauriente devono essere considerati meno importanti.

Nel primo volume sono illustrati principalmente i componenti, con particolare attenzione alle macchine volumetriche e alle valvole oleodinamiche, spiegandone sia il funzionamento teorico che le cause di non idealità. Nel secondo volume si passa ad analizzare interi sistemi, sia di tipo industriale che per applicazioni su veicoli.

Molto spesso si fa uso di schemi simbolici equivalenti secondo la normativa ISO che permettono di comprendere il funzionamento del componente svincolandosi dalla particolare soluzione costruttiva adottata. Questo approccio si spera possa essere utile al lettore per imparare una metodologia di analisi applicabile a qualsiasi sistema oleodinamico.

Un particolare ringraziamento va a Giorgio Altare e Alessandro Corvaglia per il prezioso lavoro di revisione e ottimizzazione dei disegni dei componenti riportati nei due volumi.

Questo libro esce a pochi mesi dalla scomparsa del Prof. Nicola Nervegna che ha lavorato alla sua stesura fino a quando ne ha avuto la forza. È il frutto del suo lavoro trentennale nel campo dell’Oleodinamica, portato avanti con grande passione ed entusiasmo, che adesso vede finalmente compimento e manterrà ancor più vivo il suo ricordo.

Massimo Rundo, Professore Associato

Torino, gennaio 2020

Presentazione

È avvolto di mestizia il privilegio di partecipare al battesimo di quest'opera a due mesi dalla scomparsa del professor Nervegna, a cui mi ha legato una lunga e profonda amicizia. Posso testimoniare che la concepì nell'infanzia del Corso di Oleodinamica - qualunque nome abbia assunto nel tempo - e poi, anno dopo anno, la integrò ripensò espanse corresse valorizzando anche il contributo di studenti e collaboratori che seppe sempre coinvolgere con l'impegno personale e l'esemplare perseveranza.

Scorrendo o studiando queste pagine, chiunque si accosti all'oleodinamica per la prima volta o sia già familiare con l'argomento avrà modo di apprezzarne i contenuti ma non dovrà trascurare di soffermarsi sul rigore espositivo che viene dall'esperienza diretta e talvolta faticosa su componenti e sistemi. Per il professor Nervegna questa era una indiscutibile conseguenza del dovere di chi svolge un servizio pubblico di mettere a disposizione i migliori strumenti di conoscenza possibili: un prezioso imperativo per chi deve continuare.

Un ringraziamento particolare è dovuto al professor Rundo che ha a lungo collaborato con il professor Nervegna e ha curato la revisione finale dell'opera, che resterà come silenziosa ma tangibile commemorazione.

G. Luca Zarotti

Torino, gennaio 2020

INDICE

Volume 1

1. NOTE INTRODUTTIVE	1
1.1 Campi d'impiego dell'oleodinamica	1
1.2 Sistemi di trasmissione della potenza	1
2. BLOCCHI FUNZIONALI.....	4
2.1 Regole per il tracciamento dello schema a blocchi funzionali	4
2.2 Blocchi funzionali dei principali componenti.....	4
2.2.1 Motore elettrico.....	4
2.2.2 Pompa e serbatoio	5
2.2.3 Motore idraulico.....	6
2.2.4 Giunzioni a 2 e a 3 bocche	6
2.2.5 Valvola limitatrice di pressione	7
2.2.6 Strozzatore.....	7
2.2.7 Valvola unidirezionale (o di non ritorno).....	8
2.2.8 Accumulatore	8
2.3 Esempio applicato a una trasmissione idrostatica in circuito aperto	9
3. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEI BLOCCHI FUNZIONALI	10
3.1 Circuito idraulico di riferimento	10
3.2 Schema a blocchi funzionali	11
3.3 Calcolo della potenza assorbita dalla pompa	11
3.4 Caratteristica meccanica (F-v) e caratteristica (F-p).....	12
3.4.1 Carico resistente e limitatrice chiusa.....	12
3.4.2 Carico resistente e limitatrice in regolazione	12
3.4.3 Carico resistente e annullamento della velocità.....	13
3.4.4 Carico resistente e inversione del moto	14
3.4.5 Carico trascinate per inversione della forza con contropressione allo scarico.....	15
3.4.6 Carico trascinate e intervento della valvola anticavitazione	15
4. GRUPPI DI ALIMENTAZIONE	17
4.1 Gruppo di alimentazione a portata fissa (GAQF).....	17
4.1.1 Analisi qualitativa del funzionamento	17
4.1.2 Analisi quantitativa	18
4.1.2.1 Schema a blocchi.....	18
4.1.2.2 Caratteristica stazionaria ideale e rendimento	19
4.1.2.3 Caratteristica reale	20
4.1.3 Simulazione di un GAQF.....	21
4.1.4 GAQF con limitatrice pilotata e distributore di Vent.....	21
4.2 Gruppo di alimentazione a portata variabile per valori discreti (GAQVD)	22
4.2.1 Analisi qualitativa del funzionamento	22
4.2.2 Analisi quantitativa	23
4.2.2.1 Schema a blocchi.....	23
4.2.2.2 Caratteristica stazionaria ideale e rendimento	24
4.2.3 GAQVD con limitatrice di pressione a pilotaggio remoto.....	25
4.2.4 Simulazione di un GAQVD	25
4.2.5 Esempio di GAQVD	27
4.3 Gruppi di alimentazione a portata variabile per valori continui (GAQVC)	28
4.3.1 Gruppo di alimentazione per circuiti aperti (GAQVCA).....	28
4.3.2 Gruppo di alimentazione per circuiti chiusi (GAQVCC)	29
4.4 Gruppi di alimentazione a pressione fissa (GAPF)	31
4.4.1 Gruppo di alimentazione a pressione fissa vera (GAPFV)	31
4.4.1.1 Principio di funzionamento	31
4.4.1.2 Caratteristica reale del limitatore ad azionamento diretto	32
4.4.1.3 Limitatore ad azionamento pilotato - prima configurazione	33

4.4.1.4 Limitatore ad azionamento pilotato - seconda configurazione	35
4.4.1.5 Caratteristica reale.....	35
4.4.2 Gruppo di alimentazione a pressione fissa approssimata (GAPFA).....	36
4.4.2.1 Circuito con valvola di esclusione	36
4.4.2.2 Simulazione del GAPFA con valvola di esclusione	38
4.4.2.3 Circuito con pressostato	39
4.5 Logiche di connessione dei gruppi di alimentazione	40
4.6 Esempio di gruppo di alimentazione reale	41
4.6.1 Circuito idraulico	41
4.6.2 Funzionamento.....	42
5. GRUPPI DI UTILIZZAZIONE.....	43
5.1 Blocchi funzionali per attuatori lineari	43
5.1.1 Condizioni di carico resistente.....	43
5.1.2 Condizioni di carico trascinante	43
5.2 Caratteristica meccanica di attuatori lineari	44
5.3 Caratteristica meccanica di motori (attuatori rotativi).....	45
5.3.1 Cilindrata fissa	45
5.3.2 Cilindrata variabile manualmente.....	46
5.3.3 Cilindrata variabile automaticamente	47
5.4 Sistemi per il controllo di carichi trascinanti.....	48
5.4.1 Valvole di controbilanciamento (VCB).....	49
5.4.1.1 Schema circuitale	49
5.4.1.2 Esempio di valvola VCB.....	51
5.4.2 Valvole overcentre (OVC).....	51
5.4.2.1 Schema circuitale	51
5.4.2.2 Esempi di valvole OVC	53
5.5 Analisi di un organo ad azionamento idraulico	56
5.5.1 Circuito idraulico e funzionamento	56
5.5.2 Analisi stazionaria e criteri di dimensionamento.....	57
5.5.3 Simulazione dinamica.....	58
5.5.4 Banco prova per caratterizzazione sperimentale	64
5.5.4.1 Circuito idraulico	64
5.5.4.2 Fase di sollevamento del carico	66
5.5.4.3 Fase di discesa del carico	66
5.5.4.4 Risultati	67
6. ATTUATORI LINEARI CON RIGENERAZIONE DI PORTATA.....	68
6.1 Principio di funzionamento	68
6.2 Selezione automatica della configurazione rigenerativa	69
6.3 Soluzioni diverse di impianti con rigenerazione	72
7. SISTEMI MULTIUTENZA CON PRIORITÀ.....	73
7.1 Considerazioni generali.....	73
7.2 Valvola di sequenza.....	73
7.2.1 Principio di funzionamento.....	73
7.2.2 Esempi	74
7.3 Valvola di priorità.....	76
8. CIRCUITI PER SINCRONISMI.....	78
8.1 Problematiche legate all'alimentazione in parallelo di due attuatori	78
8.2 Divisore di flusso.....	79
8.2.1 Funzionamento.....	79
8.2.2 Alcuni commenti sui blocchi funzionali	81
8.2.3 Valutazione della potenza dissipata nel divisore di flusso	81
8.2.4 Esempi di divisori di flusso	81
8.2.4.1 Divisore di flusso Gresen	81
8.2.4.2 Divisore/ricombinatore Fluid Controls	82
8.3 Martinetto dosatore.....	84

9. CIRCUITI CON MOTORI IDRAULICI.....	86
9.1 Controllo in velocità di motori.....	86
9.1.1 Ipotesi di carico costante.....	86
9.1.1.1 Circuito con strozzatore in serie.....	86
9.1.1.2 Circuito con strozzatore in parallelo.....	86
9.1.2 Ipotesi di carico variabile.....	87
9.1.2.1 Circuito con RQ2 in meter-in.....	87
9.1.2.2 Circuito con RQ2 in meter-out.....	87
9.1.2.3 Circuito con RQ2 in by-pass.....	88
9.1.2.4 Circuito con RQ3.....	89
9.1.3 Studio del controllo in velocità di un motore mediante simulazione.....	89
9.1.3.1 Ipotesi di carico costante.....	89
9.1.3.2 Ipotesi di carico variabile.....	92
9.2 Connessione serie-parallelo di motori idraulici.....	92
9.2.1 Connessione in parallelo.....	92
9.2.2 Connessione in serie.....	93
9.2.3 Considerazioni generali.....	94
10. TRASFORMATORI IDRAULICI.....	95
10.1 Trasformatori a una linea verso l'utenza.....	95
10.1.1 Amplificatore di pressione.....	95
10.1.2 Amplificatore di portata.....	96
10.2 Trasformatore a due linee verso l'utenza (divisore di flusso rotativo).....	97
10.3 Banco prova rigenerativo.....	98
10.3.1 Circuito idraulico.....	98
10.3.2 Equazioni dai blocchi funzionali del banco rigenerativo.....	99
10.3.3 Risoluzione con metodo alternativo.....	100
10.3.4 Un caso applicativo mediante simulazione.....	100
11. MACCHINE VOLUMETRICHE.....	102
11.1 Classificazione.....	102
11.2 Cilindrata.....	107
11.3 Ciclo di lavoro.....	107
11.4 Grandezze istantanee e medie.....	108
11.4.1 Portata di una pompa.....	108
11.4.2 Coppia di una pompa.....	110
11.4.3 Grado di irregolarità di portata.....	111
11.4.4 Velocità e pressione di un motore.....	113
12. CARATTERISTICHE REALI DELLE POMPE VOLUMETRICHE.....	114
12.1 Perdite in una pompa volumetrica.....	114
12.2 Cicli di lavoro reali.....	114
12.2.1 Ciclo limite.....	114
12.2.2 Ciclo indicato.....	115
12.3 Portata reale.....	116
12.3.1 Perdite di portata volumetrica.....	116
12.3.1.1 Trafilamenti.....	116
12.3.1.2 Comprimibilità.....	116
12.3.1.3 Incompleto riempimento.....	117
12.3.2 Dipendenza dalla pressione.....	118
12.3.3 Dipendenza dalla velocità.....	119
12.4 Coppia reale.....	120
12.4.1 Perdite di coppia.....	120
12.4.2 Dipendenza dalla velocità e dalla pressione.....	121
12.5 Misure indirette di cilindrata.....	121
12.5.1 Metodo ISO.....	122
12.5.2 Metodo Toet.....	123
12.6 Analisi dei rendimenti.....	123
12.6.1 Rendimento volumetrico.....	123
12.6.2 Rendimento meccanico-idraulico.....	124

12.7 Modelli delle prestazioni	126
12.7.1 Modello di Wilson	126
12.7.2 Modello di Schlösser	128
12.7.3 Modello di Thoma	129
12.7.4 Modello di Pacey-Turnquist-Clark (Wilson modificato).....	129
12.7.5 Modello di Olsson.....	129
12.7.6 Quadro riassuntivo	130
12.7.7 Confronto tra i modelli	131
13. MACCHINE A PISTONI ASSIALI.....	132
13.1 Introduzione.....	132
13.2 Calcolo della cilindrata.....	132
13.3 Pompa a piastra inclinata Casappa LVP.....	133
13.3.1 Descrizione della pompa.....	133
13.3.2 Approfondimenti sui particolari.....	134
13.3.2.1 Piastra di distribuzione	134
13.3.2.2 Tamburo porta-pistoni.....	135
13.3.2.3 Pattini e pistoni.....	135
13.3.2.4 Piastra inclinata e attuatori	136
13.3.3 Sistemi di variazione della cilindrata.....	137
13.3.3.1 Limitatore di pressione assoluto.....	137
13.3.3.2 Limitatore di pressione differenziale (controllo load sensing)	138
13.3.3.3 Limitatore di coppia - principi generali	140
13.3.3.4 Limitatore di coppia per pompe del tipo LVP	141
13.3.3.5 Considerazioni sul funzionamento del limitatore di coppia.....	144
13.3.4 Applicazione del modello di perdite secondo Wilson	145
13.3.4.1 Introduzione	145
13.3.4.2 Modello di simulazione e risultati ottenuti.....	145
13.4 Pompa Casappa DVP	147
13.5 Motore a pistoni assiali Vickers	148
13.6 Effetti inerziali del fluido all'interno di una pompa a pistoni assiali	149
14. MACCHINE A PISTONI RADIALI.....	152
14.1 Introduzione.....	152
14.2 Calcolo della cilindrata e della portata istantanea	152
14.3 Esempio di pompa a corpo cilindri fisso	153
14.3.1 Descrizione	153
14.3.2 Cilindrata e portata media della macchina.....	155
14.3.3 Considerazioni sulla irregolarità della portata istantanea	156
14.4 Esempio di pompa a corpo cilindri rotante.....	157
14.4.1 Descrizione	157
14.4.2 Limitatore di pressione assoluto	158
15. MACCHINE A PALETTE	161
15.1 Introduzione.....	161
15.2 Calcolo della cilindrata.....	161
15.2.1 Rotore equilibrato	161
15.2.2 Rotore non equilibrato	162
15.3 Irregolarità di portata teorica con rotore non equilibrato	163
15.3.1 Numero pari di palette	164
15.3.2 Numero dispari di palette.....	165
15.3.3 Confronti tra numeri pari e dispari	167
15.4 Variazione del volume di una camera di una pompa a rotore non equilibrato	168
15.5 Esempi di macchine a rotore equilibrato	171
15.5.1 Pompa Denison Hydraulics T6C	171
15.5.2 Motore Denison M5C	173
15.5.3 Pompa Vickers con intra-vane.....	174
15.5.4 Pompa ZF per impiego autoveicolistico	175
15.6 Esempi di macchine a rotore non equilibrato	177
15.6.1 Pompa a palette Continental	177

15.6.2 Pompa di lubrificazione a palette Pierburg	179
15.6.3 Pompa a palette a cilindrata variabile Glyco (Chrysler)	181
16. MACCHINE GEROTOR	183
16.1 Introduzione	183
16.2 Cicli al giro e cilindrata	183
16.3 Profili ad arco di cerchio	184
16.3.1 Parametri geometrici	184
16.3.2 Determinazione del profilo interno	185
16.3.3 Influenza dei parametri geometrici	187
16.4 Calcolo diretto della derivata del volume di una camera	189
16.4.1 Metodo dei raggi vettori	189
16.4.2 Metodo della coppia	191
16.4.3 Applicazioni	192
16.5 Calcolo del volume di una camera	193
16.6 Esempi di macchine gerotor	194
16.6.1 Pompa di lubrificazione	194
16.6.2 Motore Gresen	195
17. MOTORI ORBITALI	196
17.1 Introduzione	196
17.2 Principio di funzionamento	196
17.2.1 Cinematica e cilindrata	196
17.2.2 Metodo alternativo per il calcolo del numero di cicli al giro	197
17.2.3 Confronto tra gerotor e orbitali	197
17.3 Esempi costruttivi	199
17.3.1 Motore Danfoss OMM 32	199
17.3.2 Motore Danfoss OMT 160	201
17.3.3 Motore Danfoss OMT 250 FH con freno di stazionamento	204
18. MACCHINE A INGRANAGGI	206
18.1 Introduzione	206
18.2 Cilindrata	206
18.2.1 Macchine a ingranaggi esterni	206
18.2.2 Macchine a lunetta	207
18.3 Geometria del rotismo	208
18.3.1 Richiami sui profili a evolvente di cerchio	208
18.3.2 Parametri delle ruote dentate	208
18.3.3 Spessore del dente della ruota motrice	210
18.3.4 Calcolo del fattore di correzione dei profili	211
18.3.5 Condizione di sottotaglio	211
18.4 Disegno dei profili	212
18.4.1 Ruota a dentatura esterna	212
18.4.1.1 Sistemi di riferimento e matrici di rotazione	212
18.4.1.2 Tratto a evolvente	213
18.4.1.3 Raccordo di piede	214
18.4.1.4 Esempio di profilo	215
18.4.2 Ruota a dentatura interna	216
18.4.2.1 Sistemi di riferimento e matrici di rotazione	216
18.4.2.2 Geometria dell'utensile	216
18.5 Derivate dei volumi	217
18.5.1 Macchine a ingranaggi interni	217
18.5.2 Macchine a ingranaggi esterni	220
18.5.3 Calcolo dei raggi vettori	221
18.5.4 Fattore di ricoprimento	222
18.6 Portata istantanea e grado di irregolarità	223
18.6.1 Determinazione analitica	223
18.6.2 Confronto tra ingranaggi esterni e interni	225
18.7 Ottimizzazione della cilindrata di macchine a ingranaggi esterni	226
18.7.1 Parametri di progetto	226

18.7.2	Interasse e raggio di testa imposto	226
18.7.3	Interasse imposto e raggio di testa variabile	227
18.7.4	Interasse e raggio di testa variabili	228
18.8	Esempi di pompe a ingranaggi	229
18.8.1	Casappa PPL51/HDP51	229
18.8.2	Pompa John S. Barnes	231
18.9	Modelli di pompe a ingranaggi esterni	234
18.9.1	Introduzione	234
18.9.2	Modello 3V (3 volumi variabili).....	235
18.9.2.1	Definizione dei volumi di controllo	235
18.9.2.2	Struttura del modello	236
18.9.3	Modello 2N+2 (2N+2 volumi variabili)	237
18.9.3.1	Definizione del volume di controllo	237
18.9.3.2	Variazione dei volumi di controllo	237
18.9.3.3	Aree di passaggio	239
18.9.3.4	Struttura del modello	239
18.9.4	Confronto dei modelli	240
18.9.5	Validazione sperimentale.....	241
19.	CARATTERISTICHE REALI DEI MOTORI.....	243
19.1	Metodo di prova	243
19.2	Esempio di banco prova	243
19.2.1	Catena cinematica	243
19.2.2	Circuito idraulico	245
19.3	Esecuzione delle prove	246
19.3.1	Prove con salto di pressione ai capi del motore costante.....	246
19.3.2	Prove con portata in ammissione al motore costante.....	247
19.3.3	Elaborazione delle caratteristiche e commento dei risultati	247
20.	ATTUATORI LINEARI	248
20.1	Generalità	248
20.2	Impiego degli attuatori lineari	248
20.2.1	Attuatori a doppio e semplice effetto.....	249
20.2.2	Attuatori per usi speciali	249
20.2.2.1	Attuatori a stelo passante	249
20.2.2.2	Attuatori con antirotazione dell'asta	249
20.2.2.3	Attuatori telescopici	249
20.2.2.4	Servoattuatori	249
20.2.2.5	Attuatori doppi	250
20.3	Standardizzazione dei cilindri	250
20.4	Sistema frenante a fondocorsa.....	250
20.4.1	Principio di funzionamento.....	250
20.4.2	Utilizzo di corpi frenanti interni all'attuatore	250
20.5	Esempio: cilindro ATOS	254
20.5.1	I componenti	255
20.5.1.1	Testata posteriore	255
20.5.1.2	Bussola freno posteriore.....	257
20.5.1.3	Snodo sferico.....	257
20.5.1.4	Testa anteriore	258
20.5.1.5	Bussola freno anteriore	258
20.5.1.6	Bussola di guida	259
20.5.1.7	Spilli di regolazione	259
20.5.1.8	Pistone	259
20.5.1.9	Boccola o pistone freno anteriore	260
20.5.1.10	Stelo e pistone freno posteriore.....	260
20.5.1.11	Camicia	260
20.5.2	Le tenute	261
20.5.2.1	Guarnizione del pistone.....	261
20.5.2.2	Guarnizione dello stelo	261
20.5.2.3	Raschiatore.....	262

20.5.2.4 Pattini antifrizione	263
20.5.3 Modelli e analisi delle prestazioni	263
20.5.3.1 Influenza della viscosità	266
20.5.3.2 Andamenti teorico-sperimentali della pressione in camera di frenatura	266
20.5.3.3 Variazione del grado di apertura dello spillo	267
21. VALVOLE DI CONTROLLO DELLA PRESSIONE	268
21.1 Valvola limitatrice di pressione a comando diretto	268
21.1.1 Caratteristica stazionaria	268
21.1.2 Strozzatori dinamici	270
21.1.3 Esempio di valvola limitatrice a comando diretto	271
21.1.4 Simulazione di una valvola limitatrice a comando diretto	271
21.1.4.1 Costruzione del modello	271
21.1.4.2 Comportamento in condizioni stazionarie: caratteristiche adimensionalizzate	272
21.1.4.3 Comportamento in transitorio	274
21.1.5 Osservazioni sulla limitatrice di pressione con pilotaggio remoto	275
21.2 Valvola limitatrice di pressione pilotata	276
21.2.1 Principio di funzionamento	276
21.2.2 Messa a vent e regolazioni su più livelli di pressione	277
21.2.3 Esempi	278
21.2.3.1 Valvola Denison con montaggio a piastra	278
21.2.3.2 Valvola Denison con stadio proporzionale	279
21.2.3.3 Valvola Fluid Controls a cartuccia	279
21.3 Valvola riduttrice di pressione a comando diretto	280
21.3.1 Caratteristica stazionaria	280
21.3.2 Esempi	282
21.3.2.1 Valvola Sun Hydraulics a cartuccia	282
21.3.2.2 Valvola Fluid Controls	283
21.4 Valvola riduttrice di pressione pilotata	284
21.4.1 Principio di funzionamento	284
21.4.2 Esempi	285
21.4.2.1 Valvola ATOS con montaggio a piastra	285
21.4.2.2 Valvola a cartuccia	286
21.4.2.3 Valvola Denison con regolatrice di portata sullo stadio pilota	286
21.4.3 Studi sulla riduttrice pilotata Denison Hydraulics R4R03	289
21.4.3.1 Modello matematico	289
21.4.3.2 Analisi sperimentale	290
21.4.3.3 Caratteristiche stazionarie	291
22. VALVOLE DI REGOLAZIONE DELLA PORTATA	293
22.1 Introduzione	293
22.2 Valvola regolatrice di portata a 2 bocche (RQ2)	294
22.2.1 Principio di funzionamento	294
22.2.2 Caratteristica stazionaria	294
22.2.3 Modello matematico adimensionale	296
22.2.4 Esempi	298
22.2.4.1 ATOS QV-06	298
22.2.4.2 Denison 2F1C compensata in temperatura	299
22.3 Valvola regolatrice di portata a 3 bocche (RQ3)	301
22.3.1 Principio di funzionamento	301
22.3.2 Modello adimensionale	301
22.3.3 Esempi	303
22.3.3.1 ATOS QV-10	303
22.3.3.2 Fluid Controls 2F96	304
22.3.3.3 Oleostar VPR	304
22.4 Strozzatore proporzionale	306
23. VALVOLE DI CONTROLLO DELLA DIREZIONE	308
23.1 Introduzione	308
23.2 Distributori a centri aperti	311
23.3 Distributori a centri chiusi	313

23.4 Distributori a sezioni Gresen V20	314
23.5 Distributori monoblocco Walvoil SD5	315
23.6 Prestazioni dei distributori a posizionamento discreto	318
24. DISTRIBUTORI A POSIZIONAMENTO CONTINUO	321
24.1 Caratteristiche generali	321
24.2 Caratteristiche stazionarie di cassette a posizionamento continuo	323
24.2.1 Modello matematico	323
24.2.2 Centro critico	325
24.2.3 Ricoprimento positivo	326
24.2.4 Ricoprimento negativo	327
24.3 Stabilità del sistema	329
24.4 Manipolatore per distributori a posizionamento continuo	329
24.4.1 Descrizione	329
24.4.2 Risultati della simulazione	331
24.5 Distributore elettroidraulico proporzionale ATOS	332
24.5.1 Descrizione	332
24.5.2 Posizioni fondamentali di lavoro	333
24.5.3 Aree di efflusso	334
24.5.4 Forze di flusso	336
25. SERVOVALVOLE	338
25.1 Introduzione	338
25.2 Servovalvole per il controllo della portata	338
25.2.1 Servovalvole nozzle-flapper	338
25.2.2 Servovalvole jet-pipe	341
25.3 Servovalvola a tre stadi	342
25.4 Caratteristiche delle servovalvole	344
25.4.1 Diagramma portata-corrente	344
25.4.2 Criteri distintivi tra servovalvole e valvole proporzionali	345
25.5 Riflessioni sulle servovalvole	346
25.5.1 Portata attraverso un distributore a posizionamento continuo	346
25.5.2 Potenza massima trasferibile al carico da una servovalvola	347
25.5.2.1 Approccio dimensionale	349
25.5.2.2 Studio adimensionale	350
25.5.3 Criteri di scelta di una servovalvola	350
26. BANCO PROVA SERVOVALVOLE ELETTROIDRAULICHE	353
26.1 Introduzione	353
26.2 Descrizione del sistema	353
26.2.1 Circuito idraulico	353
26.2.2 Rack di comando	355
26.2.3 Funzionamento	355
26.3 Prove stazionarie	356
26.3.1 Prova portata-corrente	356
26.3.2 Prova portata-pressione	357
26.3.3 Prova delle fughe interne (prova di leakage)	357
26.4 Prove dinamiche	359
26.4.1 Descrizione	359
26.4.2 Programma di controllo e acquisizione	359
26.4.2.1 Definizione dei parametri del ciclo	359
26.4.2.2 Posizionamento iniziale dell'attuatore	360
26.4.2.3 Esecuzione della prova dinamica	360
26.4.2.4 Analisi dei dati	361
27. EQUILIBRAMENTO ASSIALE DI CASSETTI E OTTURATORI	363
27.1 Origine delle forze di flusso	363
27.2 Forze di flusso nelle valvole a cassetto	364
27.2.1 Applicazione della conservazione della quantità di moto	364
27.2.2 Analisi della dipendenza delle forze di flusso dallo spostamento del cassetto	366

27.2.2.1 Sistema a pressione costante (piccole aperture del cassetto).....	366
27.2.2.2 Sistema a portata costante (grandi aperture del cassetto).....	366
27.3 Compensazione delle forze di flusso	367
27.3.1 Fori di efflusso radiali	368
27.3.2 Generazione di caduta di pressione.....	368
27.3.3 Inclinazione della superficie del risalto.....	368
27.3.4 Ricircolo.....	369
27.3.5 Profilatura dello stelo	369
27.3.6 Inclinazione della bocca d'ingresso	370
27.4 Applicazioni reali dei metodi di compensazione.....	370
27.4.1 Valvola regolatrice di portata a tre bocche	370
27.4.2 Valvola limitatrice di pressione diretta	371
27.4.3 Distributori per il controllo del calettamento delle pale in turbine idrauliche	372
27.4.4 Forze di flusso in una valvola con otturatore a bicchiere.....	374
27.5 Forze di flusso in otturatori conici	376
27.5.1 Studio analitico.....	376
27.5.2 Studio CFD.....	378
28. ALTRE VALVOLE OLEODINAMICHE.....	380
28.1 Valvole di non ritorno pilotate	380
28.1.1 Valvola pilotata in apertura ATOS	380
28.1.2 Valvola pilotata in apertura a cartuccia Fluid Controls	381
28.1.3 Valvola pilotata in apertura Denison Hydraulics	381
28.1.4 Valvola di non ritorno a doppio stadio elettropilotata	382
28.2 Valvola di decelerazione.....	383
29. ACCUMULATORI.....	385
29.1 Generalità.....	385
29.2 Caratteristica pressione-volume.....	386
29.2.1 Accumulatori a gravità e a molla	386
29.2.2 Accumulatori a gas compresso.....	386
29.3 Dimensionamento dell'accumulatore a gas	387
29.4 Applicazioni.....	389
29.4.1 Dimensionamento della pompa e dell'accumulatore in una pressa oleodinamica.....	389
29.4.2 Applicazione degli accumulatori idraulici a trasmissioni ibride parallele	390
29.4.3 Riduzione oscillazioni di pressione su una linea idraulica.....	391
29.5 Frequenza naturale di un accumulatore	392

INDICE

Volume 2

30. SISTEMI LOAD SENSING (LS)	393
30.1 Il problema.....	393
30.2 Principio di funzionamento.....	394
30.2.1 Sistemi LS con pompa a cilindrata variabile.....	394
30.2.2 Sistemi LS con pompa a cilindrata fissa.....	395
30.2.3 Distributore proporzionale LS.....	396
30.2.4 Passaggio a più utenze controllate in velocità.....	397
30.2.4.1 Carichi identici.....	397
30.2.4.2 Carichi diversi.....	397
30.2.5 I compensatori locali.....	398
30.3 Riflessioni ulteriori sui sistemi LS: interazione fra i carichi.....	399
30.3.1 Sistema LS senza compensatori.....	399
30.3.2 Sistema LS pre-compensato.....	400
30.3.3 Sistema LS post-compensato (o con compensatori anti-saturazione).....	401
30.3.4 Configurazione a riposo dei compensatori locali.....	402
30.3.5 Taratura dei compensatori: impianti pre-compensati.....	403
30.3.6 Taratura dei compensatori: impianti post-compensati.....	404
30.3.7 Differenze nel comportamento dei compensatori locali in saturazione di portata.....	404
30.4 Esempio di controllo load sensing per pompa a pistoncini assiali.....	405
30.4.1 Descrizione del componente.....	405
30.4.2 Modello di simulazione.....	406
30.5 Esempi di distributori load sensing commercializzati.....	407
30.5.1 Distributori pre-compensati: modulo PVB60 del gruppo Danfoss PVG60.....	408
30.5.2 Distributori pre-compensati: modulo PVB32 del gruppo Danfoss PVG32.....	409
30.5.3 Distributori post-compensati: modulo Linde WV18.....	411
30.5.3.1 Principio di funzionamento.....	411
30.5.3.2 Saturazione in portata.....	412
30.5.3.3 Saturazione in pressione.....	412
30.5.3.4 Particolarità costruttive.....	413
30.5.4 Distributori post-compensati: modulo PVB100 del gruppo PVG100 di Danfoss.....	415
30.5.5 Distributori post-compensati: modulo DPX160 di Walvoil.....	417
30.5.5.1 Comportamento del compensatore durante i transitori.....	418
30.5.5.2 Comportamento del compensatore a regime.....	419
30.5.5.3 Azionamento del carico massimo.....	419
30.5.5.4 Azionamento di un carico che non è il massimo.....	420
30.5.6 Distributori ibridi: modulo Komatsu.....	420
30.5.6.1 Compensatore locale.....	421
30.5.6.2 Comportamento del compensatore durante i transitori.....	422
30.5.6.3 Comportamento del compensatore a regime.....	423
30.5.6.4 Condizione di carico massimo.....	423
30.5.6.5 Gestione di un carico che non è il massimo.....	424
31. IMPIANTO LOAD SENSING PER CARRELLO A FORCHE	425
31.1 Schema generale dell'impianto.....	425
31.2 Distributore proporzionale PVG60.....	427
31.2.1 Modulo PVP.....	427
31.2.1.1 Modulo per unità a cilindrata variabile.....	427
31.2.1.2 Modulo per unità a cilindrata fissa.....	428
31.2.2 Modulo PVB.....	429
31.2.2.1 Cassetto principale.....	430
31.2.2.2 Modulo di azionamento elettroidraulico PVE.....	430
31.2.2.3 Compensatore locale per carichi trascinanti.....	431
31.2.2.4 Limitatrici locali.....	432
31.2.2.5 Valvole antishock e anticavitazione.....	433
31.3 Pompa a cilindrata variabile a pistoncini radiali load sensing.....	434

31.4 Valvola di priorità.....	435
31.5 Tarature dei componenti.....	436
31.5.1 Compensatori locali di pressione.....	436
31.5.2 Valvola di priorità.....	436
31.5.3 Valvole limitatrici di pressione.....	437
31.5.3.1 Limitatrice sulla linea LS.....	437
31.5.3.2 Limitatrice sulla linea dell'utenza secondaria.....	437
32. CONTROLLI NEI SISTEMI IDRAULICI DI VEICOLI “OFF ROAD”	438
32.1 Hydraulic Load Sensing (HLS).....	438
32.2 Electronic Load Sensing (ELS).....	438
32.3 Electronic Flow Matching (EFM).....	439
32.3.1 EFM: prima soluzione.....	439
32.3.2 EFM: seconda soluzione.....	440
32.4 Negative Flow Control (NFC).....	441
32.5 Negative Flow Control (NFC) e limitazione della coppia.....	441
32.6 Positive Flow Control (PFC).....	442
32.7 Electro Positive Flow Control (EPC).....	444
32.8 Impiego dei distributori “twin spools”.....	445
32.9 Pump Controlled Actuation (PCA).....	446
33. SERVOSISTEMI	448
33.1 Introduzione.....	448
33.2 Controllo della cilindrata di una pompa.....	448
33.3 Idrocopiatore.....	449
33.3.1 Analisi con i blocchi funzionali.....	451
33.3.2 Modello matematico.....	451
33.3.2.1 Equazioni del sistema.....	451
33.3.2.2 Analisi della velocità.....	452
33.3.2.3 Analisi dinamica con segnale a gradino.....	453
33.3.2.4 Analisi dinamica con segnale sinusoidale.....	453
34. SISTEMI DI STERZATURA IDROSTATICI	456
34.1 Il servosterzo.....	456
34.1.1 Principio di funzionamento.....	456
34.1.2 Il sistema TRW.....	458
34.1.2.1 I componenti principali.....	458
34.1.2.2 Geometria del distributore rotante.....	460
34.1.2.3 Descrizione delle posizioni di funzionamento.....	461
34.1.3 Un servosterzo diverso.....	462
34.1.3.1 I componenti principali.....	462
34.1.3.2 Schema simbologico equivalente.....	463
34.1.3.3 Geometria del distributore rotante.....	464
34.1.3.4 Analisi del funzionamento.....	466
34.1.3.5 Il sistema di sterzata completo.....	467
34.1.4 Gruppi di alimentazione per servosterzo.....	468
34.1.4.1 Pompa a cilindrata fissa.....	468
34.1.4.2 Pompa a cilindrata variabile.....	468
34.1.5 Simulazione del servosterzo.....	469
34.2 L'idroguida.....	471
34.2.1 Principio di funzionamento.....	471
34.2.2 Unità di sterzata idrostatica Danfoss OSPC.....	473
34.2.3 Unità di sterzata a centro aperto - non reattiva.....	475
34.2.3.1 Geometria del distributore rotante.....	476
34.2.3.2 Descrizione delle posizioni di funzionamento.....	477
34.2.3.3 Dettaglio delle valvole presenti.....	479
34.2.4 Unità di sterzata load sensing.....	481
34.2.4.1 Geometria del distributore rotante.....	482
34.2.4.2 Descrizione delle posizioni di funzionamento.....	483
34.2.4.3 Leggi di variazione delle luci di passaggio nel distributore rotante.....	485

34.2.5 Caratteristiche indesiderate	487
34.2.5.1 Kick-back	487
34.2.5.2 Hardening	488
34.2.6 Unità di sterzata LS dinamica con amplificatore di portata.....	489
34.2.6.1 Principio di funzionamento	489
34.2.6.2 Idroguida Danfoss OSPQ	490
34.2.7 Unità di sterzata Danfoss OSPM power beyond	492
34.3 Confronto tra idroguida e servosterzo	493
35. AMPLIFICATORI DI PORTATA PER IDROGUIDE	495
35.1 Introduzione	495
35.2 Amplificatore Danfoss OSQ	495
35.2.1 Componenti interni e schemi simbologici equivalenti.....	496
35.2.1.1 Livello superiore.....	497
35.2.1.2 Livello intermedio	499
35.2.1.3 Livello inferiore.....	502
35.2.2 Schema simbologico equivalente complessivo.....	502
35.3 Amplificatore Danfoss OSQA8.....	503
35.3.1 Generalità	503
35.3.2 Valvole interne e loro collegamenti	504
35.3.2.1 Valvola di priorità.....	505
35.3.2.2 Stadio di amplificazione	506
35.3.2.3 Valvole antishock e anticavitazione	508
35.3.2.4 Cassetto principale.....	509
35.3.3 Schema simbologico equivalente.....	510
35.3.4 Studio del comportamento del componente in una manovra di sterzata.....	510
35.3.5 Sterzata di emergenza	512
35.3.6 Verifica del rapporto di amplificazione	513
35.3.6.1 Modello della camicia	513
35.3.6.2 Simulazione e risultati ottenuti.....	514
36. TRASMISSIONI IDROSTATICHE.....	516
36.1 Definizioni	516
36.2 Trasmissioni idrostatiche in circuito aperto e chiuso.....	517
36.2.1 Inversione del senso di rotazione dell'albero di uscita	517
36.2.2 Interventi per evitare la cavitazione della pompa	517
36.2.3 Dimensioni del serbatoio.....	518
36.2.4 Comportamento con carichi trascinanti	518
36.2.5 Variazione di cilindrata e verso di rotazione.....	518
36.3 Caratteristiche stazionarie di una trasmissione idrostatica	519
36.3.1 Primario a cilindrata variabile e secondario a cilindrata fissa (PV-SF).....	519
36.3.2 Primario a cilindrata fissa e secondario a cilindrata variabile (PF-SV).....	521
36.3.3 Primario e secondario a cilindrata variabile (PV-SV).....	522
36.3.4 Rendimento di una trasmissione idrostatica.....	523
36.3.5 Limiti al campo di utilizzazione di una trasmissione idrostatica	524
36.4 Funzione di trasferimento di una trasmissione PV-SF	524
36.5 Scelta di una trasmissione idrostatica	526
36.5.1 Scelta della taglia	526
36.5.2 Campo di Conversione di Coppia	526
36.6 Riflessioni su trasmissioni idrostatiche PV-SV	527
36.6.1 Limiti alla potenza trasmissibile	529
36.6.2 Dimensionamento delle macchine idrostatiche.....	530
36.7 Trasmissione idrostatica con cambio meccanico posto a valle.....	530
36.8 Trasmissione idrostatica con doppio motore idraulico	531
36.8.1 Confronto con la configurazione tradizionale.....	533
36.8.2 Confronto tra le principali grandezze di interesse.....	533
36.8.3 Osservazioni sul Campo di Conversione di Coppia.....	534
36.9 Trasmissioni Power-Split.....	536
36.9.1 Relazioni utili allo studio	536
36.9.2 Versione con rotismo epicicloidale a valle	536

36.9.2.1	Trasmissione puramente meccanica.....	537
36.9.2.2	Trasmissione mista idraulica-meccanica.....	537
36.9.2.3	Veicolo in stazionamento.....	538
36.9.2.4	Analisi della ripartizione della potenza.....	539
36.9.3	Versione con rotismo epicicloidale a monte.....	539
36.9.3.1	Trasmissione mista idraulica-meccanica.....	540
36.9.3.2	Veicolo in stazionamento.....	540
36.9.3.3	Trasmissione puramente meccanica.....	541
36.9.3.4	Analisi della ripartizione della potenza.....	541
36.9.4	Simulazione di una trasmissione power-split.....	542
37.	TRASMISSIONE IDROSTATICA SAUER-DANFOSS	545
37.1	Pompe serie 90.....	545
37.2	Valvola multifunzione.....	546
37.2.1	Schema simbologico equivalente.....	547
37.2.2	Funzionamento della valvola.....	549
37.2.2.1	Valvola di non ritorno.....	549
37.2.2.2	Valvola di sequenza.....	549
37.2.2.3	Comportamento dell'otturatore con valvola di sequenza in regolazione.....	549
37.2.2.4	Schema simbologico semplificato.....	549
37.2.3	Implementazione della valvola multifunzione in una pompa serie 90.....	550
37.2.3.1	Funzione by-pass.....	551
37.2.3.2	Comportamento in presenza di carichi trascinanti.....	551
37.2.4	Modello della valvola multifunzione.....	551
37.2.4.1	Spillo in regolazione (valvola di sequenza).....	552
37.2.4.2	Regolazione dell'otturatore (limitatrice differenziale).....	553
37.2.4.3	Funzionamento da valvola unidirezionale.....	554
37.3	Servocontrollo di tipo EDC.....	554
37.4	Motori serie H1.....	557
37.4.1	Descrizione.....	557
37.4.2	Variazione della cilindrata.....	559
37.4.3	I controlli del motore.....	560
37.4.3.1	Funzionamento complessivo.....	560
37.4.3.2	Valvola a pendolo e limitatrice di pressione.....	561
37.4.3.3	Controllo BPD.....	561
37.4.3.4	Controllo proporzionale della cilindrata.....	561
37.4.3.5	Controllo PCOR.....	562
38.	CONTROLLO DELLE TRASMISSIONI IDROSTATICHE	564
38.1	Controllo automobilistico per trasmissione a portata imposta.....	564
38.1.1	Controllo con strozzatore sezione costante.....	565
38.1.2	Variazione automatica dello strozzatore di controllo.....	566
38.1.3	Simulazione di un controllo automobilistico per trasmissione idrostatica.....	567
38.1.3.1	Trasmissione idrostatica senza controllo automobilistico.....	567
38.1.3.2	Trasmissioni idrostatica con controllo automobilistico.....	569
38.1.3.3	Avviamento della trasmissione con controllo automobilistico.....	571
38.1.3.4	Avviamento con variazione automatica dello strozzatore di controllo.....	573
38.2	Trasmissioni idrostatiche a pressione imposta con regolazione sul secondario.....	574
38.2.1	Controllo per trasmissioni a pressione imposta.....	575
38.2.2	Modello di trasmissione idrostatica a pressione imposta.....	577
39.	TRASMISSIONE IDROSTATICA DENISON "GOLD CUP"	579
39.1	Valvola per pressione servocomando di variazione della cilindrata.....	580
39.2	Valvola per pressione del ramo di bassa pressione.....	580
39.3	Dispositivo di variazione manuale della cilindrata del primario.....	581
39.4	Dispositivo automatico di variazione della cilindrata del primario.....	582
39.5	Controlli applicabili alla trasmissione Gold Cup.....	583
39.5.1	Avviamento del motore primo termico.....	583
39.5.2	Sistema di variazione della cilindrata.....	583
39.5.3	Variazione automatica della cilindrata del primario.....	585
39.5.4	Controllo a velocità costante del secondario.....	585

39.5.5 Controllo load sensing.....	586
39.5.6 Limitatore di potenza richiesta al motore termico	586
39.5.7 Limitatore di coppia	588
40. SISTEMI DI FRENATURA ELETTROIDRAULICI	590
40.1 Generalità.....	590
40.2 Componenti.....	590
40.2.1 Servofreno	590
40.2.2 Pompa doppia.....	595
40.2.3 Depressore.....	598
40.2.4 Sistema di frenatura antibloccaggio (ABS).....	600
40.3 ABS Bosch 2S	601
40.3.1 Principio di funzionamento	601
40.3.2 Analisi dei componenti	603
40.3.2.1 Sistema completo e collegamenti interni.....	603
40.3.2.2 Pompa di ricircolo	604
40.3.2.3 Valvola a solenoide 3/3	605
40.4 ABS Bosch 5 con ESP.....	608
40.5 ABS Bosch 8.....	611
40.5.1 Sistema complessivo	611
40.5.2 Accumulatore a molla	612
40.5.3 Elettrovalvola di ammissione EV 2/2	612
40.5.4 Elettrovalvola di scarico AV 2/2.....	613
40.5.5 Elettrovalvola USV 2/2	614
40.5.6 Elettrovalvola HSV 2/2	614
40.5.7 Pompa di ricircolo	615
40.6 ABS Nissin Honda.....	616
40.6.1 Descrizione.....	616
40.6.1.1 Corpo principale	616
40.6.1.2 Pistone modulatore	617
40.6.1.3 Elettrovalvole	618
40.6.2 Funzionamento	620
40.6.2.1 Frenatura normale (senza intervento dell'ABS).....	620
40.6.3 Funzionamento con ABS.....	620
40.6.4 Prevenzione bloccaggio ruote posteriori con ABS in avaria	622
41. SISTEMI DI ATTUAZIONE ELETTRO-IDROSTATICI (EHA)	624
41.1 Introduzione	624
41.2 Soluzioni con attuatore simmetrico	624
41.3 Soluzione con attuatore non simmetrico.....	625
41.4 Simulazione di un EHA	627
41.4.1 Attuatore a stelo passante e motore a velocità variabile	627
41.4.2 Attuatore differenziale con pompa a cilindrata variabile.....	629
42. SISTEMA ELETTROIDRAULICO DI SELEZIONE E INNESTO MARCE	631
42.1 Schema di principio	631
42.2 Simulazione dei componenti.....	632
42.2.1 Gruppo di alimentazione GAPFA.....	632
42.2.2 Distributore DF	632
42.2.3 Distributori DI.....	633
42.2.4 Distributore DS	635
42.3 Simulazione completa del sistema.....	635
43. DISPOSITIVI IDRAULICI PER ALZATA VALVOLE IN MCI.....	637
43.1 Punterie idrauliche	637
43.2 Dispositivo per valvole ad alzata variabile	638
43.2.1 Descrizione del principio del VVA.....	638
43.2.2 Una soluzione pratica del VVA	639
44. AMMORTIZZATORI.....	641

44.1 Descrizione	641
44.2 Modello funzionale di una sospensione	642
44.2.1 Fase di compressione	643
44.2.2 Fase di rimbalzo	644
44.3 I componenti dell'ammortizzatore	644
44.3.1 Gruppo boccola	644
44.3.2 Valvola di compressione.....	645
44.3.3 Valvola di rimbalzo	645
44.4 Schema simbologico equivalente	646
45. LA LUBRIFICAZIONE NEI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA	648
45.1 Introduzione	648
45.1.1 Scopi della lubrificazione	648
45.1.2 Utenze da lubrificare.....	648
45.1.3 Tipi di lubrificazione per motori a combustione interna	648
45.2 Circuito a carter umido	649
45.3 Circuito a carter secco	650
45.4 Pompa di lubrificazione.....	650
45.5 Percorso nell'albero a gomiti.....	652
45.6 Cuscinetti	654
45.6.1 Tipi di lubrificazione	654
45.6.2 Richiami di lubrificazione idrodinamica	654
45.6.3 Pattino lineare	655
45.6.4 Equazione di Reynolds	656
45.6.5 Applicazione ai cuscinetti.....	657
45.6.5.1 Cuscinetto di Sommerfeld.....	658
45.6.5.2 Cuscinetto di Ockvirk	659
45.6.6 Capacità di carico dei cuscinetti	659
45.6.7 Portata attraverso i cuscinetti.....	661
45.7 Ugelli di raffreddamento	662
45.8 Curve di funzionamento del circuito di lubrificazione.....	662
45.8.1 Caratteristiche portata-pressione.....	662
45.8.2 Andamenti in funzione della velocità	664
45.8.3 Analisi delle caratteristiche.....	664
45.8.3.1 Modelli semplificati lineari	664
45.8.3.2 Portata e pressione in funzione della velocità	665
45.8.3.3 Influenza della permeabilità del circuito.....	665
45.8.3.4 Influenza del rendimento della pompa.....	666
45.8.3.5 Influenza della temperatura.....	666
45.9 Dimensionamento del GA	667
45.9.1 Richieste del motore	667
45.9.2 Dimensionamento della cilindrata della pompa.....	668
45.9.3 Dimensionamento della pressione di regolazione della limitatrice	669
45.10 Analisi energetica	669
45.10.1 Analisi della potenza assorbita con pompa a cilindrata fissa.....	669
45.10.2 Metodi per ridurre la potenza assorbita	670
46. ANALISI DELLA DINAMICA DI UN SISTEMA OLEODINAMICO	672
46.1 Modello analitico.....	672
46.2 Analisi della stabilità	675
46.2.1 Test di Ruth-Hurwitz	675
46.2.2 Luogo delle radici	676
47. PWM IN OLEODINAMICA.....	678
47.1 Principio di funzionamento	678
47.2 Limitatrice di pressione comandata in PWM	680
48. IL FLUIDO DI LAVORO	682
48.1 Classificazione ISO dei fluidi idraulici	682
48.2 Proprietà fisiche dei fluidi idraulici	682

48.2.1	Equazione di stato	682
48.2.2	Densità.....	683
48.2.2.1	Dipendenza da temperatura e pressione	683
48.2.2.2	Misura della densità.....	685
48.2.3	Viscosità.....	685
48.2.3.1	Definizione e unità di misura	685
48.2.3.2	Misura della viscosità.....	686
48.2.3.3	Dipendenza dalla temperatura e classificazione ISO VG.....	687
48.2.3.4	Dipendenza dalla pressione	688
48.2.3.5	Influenza della viscosità sulle perdite di potenza	689
48.2.3.6	Equazioni per il calcolo della viscosità	690
48.2.4	Modulo di comprimibilità effettivo.....	691
48.2.5	Velocità di propagazione delle piccole perturbazioni.....	693
48.3	Contaminazione dei fluidi idraulici	694
48.3.1	Classi di contaminazione ISO	695
48.3.2	Variazione temporale del contaminante solido in un sistema.....	696
48.3.3	Contaminazione gassosa del fluido idraulico.....	697
48.4	Altri tipi di fluidi.....	698
48.4.1	Fluidi per lubrificazione di motori termici.....	698
48.4.1.1	Requisiti.....	698
48.4.1.2	Composizione chimica	699
48.4.1.3	Gradazioni SAE.....	699
48.4.2	Fluidi per impianti di frenatura elettroidraulici.....	700
48.4.3	Acqua	701
48.4.3.1	Vantaggi e svantaggi	701
48.4.3.2	Caratteristiche fisiche dell'acqua in rapporto ad altri fluidi	701
49.	LA CAVITAZIONE NEI COMPONENTI OLEODINAMICI	703
49.1	Aspetti generali	703
49.2	Incompleto riempimento nelle pompe	703
49.2.1	Il problema	703
49.2.2	Metodi per migliorare il riempimento.....	706
49.3	La cavitazione nelle valvole	709
49.4	Gli strozzatori e il fenomeno del "choked flow"	711
50.	CONDIZIONAMENTO TERMICO DI IMPIANTI OLEODINAMICI.....	713
50.1	Analisi della potenza persa in impianto tipo.....	713
50.2	Bilancio energetico semplificato di impianto	714
APPENDICE A.	IL LINGUAGGIO DELL'OLEODINAMICA	717
APPENDICE B.	PORTATA NELLE RESISTENZE CONCENTRATE.....	722
1.	Flusso turbolento stazionario	722
2.	Flusso laminare stazionario	723
2.1	Flusso in tubo a sezione circolare	723
2.2	Flusso in meato a sezione rettangolare.....	724
APPENDICE C.	EFFETTI INERZIALI DEL FLUIDO	725
APPENDICE D.	MODULO DI COMPRIMIBILITÀ DI UN TUBO	727
APPENDICE E.	RICHIAMI SUI ROTISMI	728
1.	Rotismi ordinari	728
2.	Rotismi ordinari composti	729
3.	Rotismi epicicloidali	729
3.1	Osservazioni sul numero di satelliti e sulla loro disposizione	731
3.2	Forza e coppie scambiate	732
APPENDICE F.	DIMENSIONAMENTO DELLE MOLLE DI TORSIONE	733
1.	Procedura	733
2.	Esempio di calcolo.....	734

APPENDICE G . NOMENCLATURA	736
BIBLIOGRAFIA	737
1. Riferimenti.....	737
2. Libri	737
2.1 Testi in lingue straniere.....	737
2.2 Testi in lingua italiana.....	738
3. Riviste scientifiche e tecniche	738
4. Siti Internet	738
5. Tesi	738