

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

TESIS DOCTORAL

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Autor: Ramon Garrigosa i Garcia

Director: Sr. Dr. Ricard Bosch i Tous

Programa de Doctorat: Màquines elèctriques
Dpt. Enginyeria Elèctrica
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

AGRAÏMENTS

Al meu professor i tutor, Sr. Dr. Ricard Bosch i Tous, voldria agrair-li la seva gran paciència i el gran ajut que m'ha donat en tot moment, Sense la seva paciència i ajut no hagués finalitzat aquest treball. També li vull agrair la seva dedicació, sobre tot quan està tan involucrat en altres temes importants. De tot cor, moltes gràcies.

A la meva dona Patri li vull agrair a seva immensa paciència, la gran confiança que ha tingut en mi, inclús "quan estava a prop de llençar la tovallola". Aprofito aquest racó per demanar-li perdó. Perdó per la gran quantitat de temps que he trigat en acabar aquesta tesis (una eternitat segons ella i així ha estat). Realment ha estat ella la que ha aconseguit que jo acabes la tesis, la que ha vist arribar els moments difícils i que amb la seva voluntat i força interior ha fet que jo finalitzes el treball. Moltíssimes gràcies.

A la meva filla Marina li vull demanar perdó pel temps ocupat desenvolupant aquest treball i, tanmateix, agrair-li la paciència que ha tingut, sobre tot quan era una nena petita. A més, degut a aquest treball, no he pogut dedicar-li el temps que ella es mereix, tan a la infantessa com a la adolescència. Perdó i moltes gràcies.

També vull agrair als meus amics que m'han acompanyat en aquest llarg camí com: Ricard Barba i Martí, Ángel F. Garcia Marné, Pau Mestres i els "amics" de les feines per les que he passat com Sr. Germà Prenyansa (Acadèmia Domenech), Sr. José Solís, Sr. Joaquim Vilaplana i Sr. Isidoro Hinojosa (Electra-Molins,s.a.), Sr. Ernesto Bermúdez, Mr. Mark R. Turner, Sr. Joaquim Castells, Sr. Carles Coca, Sr. Ramon Serrano, Sr. Armand Durich, Sr. Hortensi Ribes, Sr. Pepe Ruiz, Sr. Francesc Vendrell, Sr. Antoni Casado, Sr. Juan Antonio Estrella, Srta. Eva Bogalo, Sr. Jaume Munté, Srta. Cristina Martínez, Srta. Imna Lebrón i Sr. Olivier Pérez (Alstom Transport, s.a.), Sr. Pedro Franco, Sr. Santiago Molina, sr. Ismael Galiana, Sr, Félix Romojaro, sr. Joaquín Teruel (Tranvía de Murcia). A tots ells, moltes gràcies pel vostre ajuda, confiança i col·laboració pel vostre "granet de sorra".

No vull oblidar a totes les persones que m'han ajudat, en menor o major quantitat, en el meu desenvolupament acadèmic com son els professors de BUP, COU i d'Enginyeria Industrial i als professionals que he trobat per les empreses on he treballat.

També vull fer un nomenament especial als meus pares que m'han ensenyat tot. Per un costat, vull agrair els coneixements de mecànica i de màquines que m'ha donat el meu pare (mecànic de cotxes i camions, etc...) i va fer-me treballar des de ven petit (10 anys). Desgraciadament per meu pare, l'electricitat m'ha "cradat" més. I, per un altre costat, la meva mare.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

INDEX

Índex Figures	8
Índex Taules	14
1. INTRODUCCIÓ, OBJETIUS I ESTRUCTURA	16
1.1. Introducció	16
1.2. Objectiu	17
1.3. Estructura	17
1.4. Publicacions i Congressos	19
2. ACUMULADOR	21
2.1. Introducció	21
2.2. Procés de càrrega i descàrrega	24
2.3. Fluxos d'energia	25
2.4. Elements bàsics d'un acumulador	26
2.4.1. Volant d'inèrcia	26
2.4.2. Màquina elèctrica	27
2.4.3. Recipient	28
2.4.4. Sistemes auxiliars	30
2.5. Acumuladors elèctrics existents	30
2.5.1. Format "Màquina única"	31
2.5.2. Format "Dues Màquines"	33
2.5.3. Format "múltiples màquines"	34
2.5.4. Resum	36
2.6. Modes de funcionament	37
2.6.1. Recolzament d'energia	37
2.6.2. Estalvi energètic	41
2.7. Altres sistemes d'acumulació d'energia	42
2.8. Avantatges i desavantatges	47
2.8.1. Avantatges	47
2.8.2. Desavantatges	47
2.9. Aplicacions dels acumuladors	48
2.10. Conclusió	49
3. APLICACIÓ ALS TRANSPORTS	50
3.1. Transports terrestres	50
3.1.1. Cotxe privat	50
3.1.2. Taxi	51
3.1.3. Autobús	51
3.1.4. Troleibús	51
3.1.5. Tramvia	52
3.1.5. Metro	52
3.1.6. Tren de rodalies	52
3.1.7. Aturades	53
3.1.8. Resum	53
3.1.9. Conclusió	55
3.2. Energia en joc	56
3.3. Potència mitja i instantània	58
3.3.1. Valors d'energia	60
3.3.2. Valors instantanis	63

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

3.4.	Cicles dels vehicles.....	65
3.5.	Implantació a vehicles.....	65
3.5.1.	Fonts d'alimentació amb aportació de combustible	66
3.5.2.	Fonts d'alimentació sense aportació de combustible	67
3.5.3.	Necessitats dels vehicles.....	68
3.5.4.	Característiques de les fonts implantades	70
3.5.5.	Futur immediat.....	71
3.6.	Sistema d'estalvi i sistema regeneratiu	72
3.6.1.	Sistemes d'estalvi d'energia.....	72
3.6.2.	Sistemes regeneratius	73
3.6.2.1.	Vehicles lleugers.....	74
3.6.2.2.	Vehicles semi lleugers	74
3.6.2.3.	Vehicles pesats.....	75
3.6.2.4.	Vehicles de competició	76
3.7.	Resum dels sistemes d'estalvi i regeneratius	77
4.	NECESSITAT DE DISSENY GLOBAL DEL SISTEMA	78
4.1.	Introducció	78
4.2.	Sistemes de recuperació d'energia embarcats o fixes	78
4.2.1.	Sistema embarcat	79
4.2.2.	Exemples de sistemes de recuperació embarcats.....	80
4.2.2.1.	Autotram	80
4.2.2.2.	Sitras MES.....	80
4.2.2.3.	Sitras HES	80
4.2.2.4.	MITRAC	81
4.2.2.5.	Tramvia Nice.....	81
4.2.2.6.	Tramvia Paris.....	81
4.2.2.7.	SWIMO-X.....	82
4.2.2.8.	Sistema ACR	82
4.2.2.9.	Altres exemples	82
4.2.2.7.	Resum	84
4.2.3.	Sistema fix	85
4.2.4.	Exemples de sistemes de recuperació fixes	86
4.2.4.1.	Sitras SES	86
4.2.4.2.	Urenco	86
4.2.4.3.	RWE Piller	86
4.2.4.4.	Altres exemples	87
4.2.5.	Conclusió	87
4.2.6.	Variant del sistema fix.....	89
5.	TRANSPORT MARÍTIM.....	91
5.1.	Introducció	91
5.2.	L'ona	92
5.3.	Període de l'ona	93
5.4.	Dinàmica de l'ona trocoïdal.....	94
5.5.	Interacció entre el vaixell i l'ona	94
5.5.1.	Assentament del vaixell	94
5.5.2.	Velocitat del vaixell	95
5.5.3.	Angle de derrota	96
5.5.4.	Període des del vaixell (període aparent).....	97
5.6.	L'ona a la costa catalana	98
5.7.	Anàlisis dels esforços.....	100

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

5.7.1.	Introducció	100
5.7.2.	Valors exemple	102
5.7.3.	Efecte sobre la velocitat	104
5.7.3.	Efecte sobre el corrent	107
5.8.	Característiques d'un vaixell elèctric	109
5.9.	Tipologies energètiques bàsiques.....	109
5.10.	Balanç energètic d'un vaixell elèctric.....	110
5.11.	Alternadors dels grups generadors.....	111
	Sobrecàrrega admissible	112
5.12.	Motors elèctrics	112
5.13.	Balanç de potències	113
	RÈGIMEN ESTACIONARI	114
	RÉGIM TRANSITORI.....	115
5.14	Valors nominals en un generador síncron.....	116
5.14.1	Introducció	116
5.14.2	Corbes de capacitat d'un generador	119
5.15.	Cicles de treball dels propulsors.....	122
6.	COMPENSADOR ELÈCTRIC	123
6.1.	Estudi inicial a un vaixell remolcador elèctric	123
6.1.1.	Vaixell d'inici	123
6.1.2.	Estimació dels esforços dinàmics	124
6.2.	Millores al comportament del sistema de propulsió del vaixell elèctric...	127
6.2.1.	Augment potència alternador	127
6.2.2.	Augment de la inèrcia	128
6.2.3.	Introducció del sistema ACEE.....	129
6.2.3.	Resum	131
6.3.	Instal·lació d'un ACEE dins d'un vaixell de propulsió elèctrica	131
6.3.1.	Muntatge nº1.....	132
6.3.2.	Muntatge nº2.....	132
6.3.3.	Muntatge nº3.....	134
6.3.4.	Muntatge nº4.....	135
6.3.5.	Resum	137
6.3.6	Millores en el funcionament d'un sistema ACEE.....	138
6.4.	Variacions de funcionament del sistema ACEE	139
6.5.	Conclusió	141
7.	EL 1er ACEE.....	142
7.1.	Introducció	142
7.1.1.	Seat IBIZA	142
7.1.2.	Despertaferro	143
7.1.3.	Seat 600	143
7.2.	Acumulador V1	145
7.2.1.	Pèrdues de l'acumulador	146
7.2.2.	Potència de manteniment	148
7.2.3.	Descàrrega en resistències.....	148
7.2.4.	Descàrrega en el motor de tracció	149
7.3.	Acumulador V2	151
7.3.1.	Pèrdues de l'ACEE	152
7.3.2.	Proves damunt el cotxe Seat 600	152
7.4.	Resum 1er ACEE.....	154

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

7.5.	Conclusions 1er ACEE.....	155
8.	EL ACEE RG2.....	157
8.1.	Consideracions inicials.....	157
8.2.	Disseny del volant d'inèrcia.....	158
8.2.1.	Càlculs de resistència del material del volant	159
8.2.2.	Dimensions del volant d'inèrcia.....	166
8.3.	Màquina elèctrica.....	167
8.3.1.	Motor/Generador.....	168
8.3.2.	Càlculs corrent màxim	171
8.4.	Rodaments.....	171
8.4.1.	Velocitat del rodament	173
8.4.2.	Pèrdues del rodament.....	174
8.4.3.	Resultat.....	174
8.5.	Construcció del ACEE RG2	174
8.5.1.	Introducció	174
8.5.2.	Pre prova	175
8.5.3.	Muntatge del volant i el motor	175
8.5.4.	Quadre de control	177
8.5.5.	Característiques tècniques	178
8.6.	Proves.....	179
8.6.1.	Primera posada en marxa.....	180
8.6.1.1.	Proves amb el "rotor lliure" (velocitat en buit):	180
8.6.1.2.	Proves amb el "rotor fix" (parell d'arrancada):.....	180
8.6.2.	Pèrdues	182
8.6.3.	Càrrega de l'ACEE des de la xarxa	183
8.6.4.	Descàrrega de l'ACEE sobre el Seat 600	185
8.6.5.	Descàrrega de l'ACEE sobre el Seat 600 en un banc de rodets	189
8.6.5.1.	Assaig previ:	191
8.6.5.2.	Conclusions de l'assaig previ:.....	194
8.6.5.3.	Primer assaig:.....	194
8.6.5.4.	Segon assaig:.....	196
8.6.5.5.	Tercer assaig:.....	197
8.6.5.6.	Quart assaig:	198
8.7.	Resum de les proves	199
8.8.	Conclusions de les proves	199
8.9.	Acceleració angular del volant d'inèrcia	200
8.10.	Potències instantànies.....	201
9.	CONCLUSIONS I LÍNIES DE FUTUR.....	203
9.1.	Repàs dels conceptes i idees	203
9.2.	Anàlisi dels resultats obtinguts.....	205
9.3.	Conclusions d'aquest treball	206
9.4.	Línies de futur	206
10.	BIBLIOGRAFIA.....	208
10.1.	Bibliografia bàsica:	208
10.2.	Revistes especialitzades	209
10.3.	Pàgines d'internet.....	211
11.	ANEXE 1: BALANÇ ENERGÈTIC D'UN TRAMVIA. MÈTODE EXTERN. .	213
11.1.	Introducció.....	213

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

11.2.	Material mòbil	215
11.3.	Objectiu	216
11.4.	Mètodes de mesura.....	216
11.5.	Mètode extern.....	217
11.6.	Conclusions del mètode extern	231
12.	ANEXE 2: BALANÇ ENERGÈTIC D'UN TRAMVIA. MÈTODE EMBARCAT.	240
12.1.	Introducció.....	240
12.2.	Instal·lació	241
12.3.	Probes	244
12.4.	Resultats	245
12.5.	Anàlisi general.....	265
12.6.	Conclusions.....	266

INDEX DE FIGURES

Capítol 2

Figura 2.1. Energia emmagatzemada en funció de la velocitat angular	22
Figura 2.2. Energia emmagatzemada en funció de la velocitat angular	23
Figura 2.3. Processos d'un acumulador elèctric	24
Figura 2.4 Parts bàsiques d'un acumulador cinètic	26
Figura 2.5 Acumulador CleanSource	31
Figura 2.6. Acumulador UPT	32
Figura 2.7 Acumulador PowerBridge	34
Figura 2.8 Acumulador No-Break KS	35
Figura 2.9 Esquema connexió acumulador CleanSource	38
Figura 2.10 Esquema connexió acumulador UPT	38
Figura 2.11 Vista general de l'equip Uniblock-T	39
Figura 2.12 Esquema connexió acumulador PowerBridge	39
Figura 2.13 Esquema connexió acumulador No-Break KS	40
Figura 2.14 Vista general de l'equip No-Break KS	41
Figura 2.15 Representació recuperació d'energia amb l'acumulador PowerBridge	42
Figura 2.16. Representació de diferents acumuladors en funció de Energia emmagatzemable i Potència de sortida	46
Figura 2.17 Diagrama de blocs d'un convertidor electromecànic	48

Capítol 3

Figura 3.1. Energia teòrica alliberada per un cotxe en cada segon.	57
Figura 3.2. Potència teòrica alliberada per un cotxe en cada segon.	59
Figura 3.3. Corbes d'energia cinètica en funció de la velocitat i del pes del vehicle	61
Figura 3.4. Corbes d'energia cinètica en funció de la velocitat i del pes del vehicle.	62
Figura 3.5. Energia cinètica instantània d'un cotxe en funció de la velocitat.	63
Figura 3.6. Energia cinètica instantània d'un tramvia en funció de la velocitat.	64
Figura 3.7. Corba estàtica de polarització de la pila de combustible Ballard de 150kW.	66
Figura 3.8. Corba de descàrrega d'una bateria Li-ió de ThunderSky LFP90AHA de 90Ah de capacitat.	67

Capítol 5

Figura 5.1. Esquema simplificat d'un onatge	93
Figura 5.2. Variació de l'assentament.	94
Figura 5.3. Representació del rumb del vaixell respecte l'onatge.	96
Figura 5.4. Representació de l'efecte de l'onatge en funció de l'eslora del vaixell	97
Figura 5.5. Representació del comportament del vaixell davant l'onatge.	101
Figura 5.6. Representació del comportament del ferri Antonio Machado davant de l'onatge.	103
Figura 5.7. Representació de la diferència entre l'empenta i la força de pujada i baixada degut a l'angle de assentament.	105

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Figura 5.8. Representació del bucle de regulació de velocitats del sistema de propulsió elèctric del vaixell amb motors de gàbia d'esquirol controlats per un variador de freqüència electrònic.	106
Figura 5.9. Representació del corrent necessari per la variació de l'angle de assentament degut a l'onatge.	107
Figura 5.10. Esquema alternador STAMFORD	111
Figura 5.11. Diagrama fasorial d'un generador síncron.	117
Figura 5.12. Diagrama fasorial del generador.	118
Figura 5.13. Diagrama de potències corresponent a un generador	119
Figura 5.14. Corba de capacitat resultant del generador.	120
Figura 5.15. Corba de capacitat con el límit del motor primari	121

Capítol 6

Figura 6.1. Representació del CDG del remolcador.	125
Figura 6.2. Representació simple del grup generador amb augment d'inèrcia.	128
Figura 6.3. Representació del comportament amb un sistema ACEE	130
Figura 6.4. Esquema del muntatge n ^o 1.	132
Figura 6.5. Esquema del muntatge n ^o 2.	133
Figura 6.6. Esquema del muntatge n ^o 3.	134
Figura 6.7. Esquema del muntatge n ^o 4.	135
Figura 6.8. Exemple d'instal·lació dels propulsors auxiliars del sistema ACEE segons el muntatge n ^o 4.	136
Figura 6.9. Esquema del muntatge dels detectors al vaixell.	138
Figura 6.10. Representació de les desviacions sobre el rumb.	139
Figura 6.11. Representació de l'onatge del Mediterrani vist des del vaixell aplicant les desviacions sobre el rumb.	140

Capítol 7

Figura 7.1. Energia emmagatzemada teòrica de l'ACEE v1 segons la tensió d'alimentació.	146
Figura 7.2. Pèrdua d'energia per fricció de l'ACEE v1	147
Figura 7.3. Potència de manteniment de l'ACEE v1	147
Figura 7.4. Energia retornada de l'ACEE v1 amb descàrrega en resistències	148
Figura 7.5. Rendiment de l'ACEE v1 amb descàrrega en resistències	149
Figura 7.6. Rendiment de l'ACEE v1 descarregant al motor D1.	150
Figura 7.7. Energia emmagatzemada de l'ACEE v2 segons la tensió l'alimentació	151
Figura 7.8. Pèrdua d'energia emmagatzemada de l'ACEE v2	152
Figura 7.9. Rendiment ACEE v2 descarregant amb la 1a. Marxa	153
Figura 7.10. Distància recorreguda amb descàrrega de l'ACEE v2 amb la 1a. Marxa	154

Capítol 8

Figura 8.1. Dimensions generals del volant d'inèrcia	155
Figura 8.2. Esquema de l'esforç normal en una secció.	156

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Figura 8.3. Representació moviment circular uniforme	158
Figura 8.4. Esquema sòlid rígid d'un semicercle.	159
Figura 8.5. Esquema de forces	160
Figura 8.6. Secció general del volant d'inèrcia	161
Figura 8.7. Vista general acumulador	173
Figura 8.8. Esquema simplificat del muntatge	174
Figura 8.9. Vista general del conjunt.	175
Figura 8.10. Parell màxim de descàrrega sobre D1 amb rotor bloquejat	178
Figura 8.11. Corrent màxim de descàrrega sobre D1 amb rotor bloquejat.	179
Figura 8.12. Corrent de càrrega de l'ACEE amb tensió de consigna de 10V	180
Gràfic 8.13 Corrent de càrrega de l'ACEE amb tensió de consigna de 5V	181
Figura 8.14. Esquema de tracció simplificat del Seat 600	182
Figura 8.15. Esquema de la connexió en les primeres proves de descàrrega al Seat 600.	184
Figura 8.16. Esquema de la connexió en les primeres proves del Seat 600 amb connexió al TG i connexió al MA-55.	187
Figura 8.17. Procés de càrrega de l'ACEE a partir del MA-55 i amb l'alimentació addicional del TG a 70V.	189
Figura 8.18. Procés de càrrega de l'ACEE a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del TG a 70V i tensió de consigna 5V.	191
Figura 8.19. Regim permanent de càrrega de l'ACEE RG2.	192
Figura 8.20. Procés de càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del TG a 70V i tensió de consigna 10V.	193
Figura 8.21. Procés de càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del TG a 80V i tensió de consigna 10V.	194
Figura 8.22. Procés de càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del TG a 80V i tensió de consigna 13,5V.	195

Annexa 1:

Figura A1.1. Traçat del sistema tramviari a la ciutat de Murcia.	209
Figura A1.2. Esquema simplificat del sistema tramviari a la ciutat de Murcia.	210
Figura A1.3. Unitat mòbil de Tramvia de Murcia.	211
Figura A1.4. Esquema elèctric simplificat del tramvia.	212
Figura A1.5. Esquema elèctric de la catenària.	214
Figura A1.6. Seccions extrems: (a) Secció elèctrica extrem ZA7 de catenària. (b) Secció elèctrica extrem ZB6 de catenària. (c) Secció elèctrica extrem ZC de catenària.	215
Figura 1A.7. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 1 (del 29 de desembre de 2014 al 4 de gener de 2015).	217
Figura 1A.8. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 8 (del 14 al 22 de febrer de 2015).	219
Figura 1A.9. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 21 (del 18 al 24 de maig de 2015).	220
Figura 1A.10. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 34 (del 17 al 23 d'agost de 2015).	221
Figura 1A.11. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 40 (del 28 de setembre al 4 d'octubre de 2015).	222

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Figura 1A.12. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 51 (del 14 al 20 de desembre de 2015).	223
Figura 1A.13. Comparació del consum energètic total per dia a la secció ZC a les 6 setmanes: S1-S8-S21-S34-S40-S51.	224
Figura 1A.14. Comparació del consum energètic mig per dia i tramvia a la secció ZC a les 6 setmanes: S1-S8-S21-S34-S40-S51.	225
Figura A1.15. Consum mig d'un tramvia en la secció elèctrica ZC del 1 de gener al 31 de desembre de 2015.	226
Figura A1.16. Esquema simplificat de la Subestació SE5.	228
Figura A1.17. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:10 a 15:15 hores del dia 14 d'agost de 2016 (diumenge).	229
Figura A1.18. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:00 a 15:00 hores del dia 16 d'agost de 2016 (dimarts).	230
Figura A1.19. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:15 a 14:30 hores del dia 21 d'agost de 2016 (diumenge).	231
Figura A1.20. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:05 a 15:00 hores del dia 23 d'agost de 2016 (dimarts).	232
Figura A1.21. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:15 a 14:30 hores del dia 28 d'agost de 2016 (diumenge).	233
Figura A1.22. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:02 a 15:05 hores del dia 30 d'agost de 2016 (dimarts).	234

Annexa 2:

Figura A2.1. Esquema elèctric simplificat del tramvia amb la ubicació dels sensors de tensió i corrent.	238
Figura A2.2. Esquema simplificat del sistema de mesura embarcat.	239
Figura A2.3. Punts d'instal·lació dels sensors de corrent a l'equip de Climatització M1 i de Tensió del disjuntor principal.	239
Figura A2.4. Punts d'instal·lació dels sensors de corrent a l'equip de (a) de corrent i tensió de la resistència de frenat i (b) de corrent de l'equip de tracció de M1.	240
Figura A2.5. Punt d'instal·lació del registrador.	241
Figura A2.6. Esquema simplificat del tram estudiat.	241
Figura A2.7. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	242
Figura A2.8. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	242
Figura A2.9. Gràfic de la tensió de catenària.	243
Figura A2.10. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	243
Figura A2.11. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	243
Figura A2.12. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	244
Figura A2.13. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	244
Figura A2.14. Gràfic de la tensió de catenària.	245
Figura A2.15. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	245
Figura A2.16. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	246
Figura A2.17. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	246

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Figura A2.18. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	247
Figura A2.19. Gràfic de la tensió de catenària.	247
Figura A2.20. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	247
Figura A2.21. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	248
Figura A2.22. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	248
Figura A2.23. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	249
Figura A2.24. Gràfic de la tensió de catenària.	249
Figura A2.25. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	249
Figura A2.26. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	250
Figura A2.27. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	250
Figura A2.28. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	251
Figura A2.29. Gràfic de la tensió de catenària.	251
Figura A2.30. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	251
Figura A2.31. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	252
Figura A2.32. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	252
Figura A2.33. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	252
Figura A2.34. Gràfic de la tensió de catenària.	253
Figura A2.35. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	253
Figura A2.36. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	253
Figura A2.37. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	254
Figura A2.38. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	254
Figura A2.39. Gràfic de la tensió de catenària.	255
Figura A2.40. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	255
Figura A2.41. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	255
Figura A2.42. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	256
Figura A2.43. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	256
Figura A2.44. Gràfic de la tensió de catenària.	257
Figura A2.45. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	257
Figura A2.46. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	257
Figura A2.47. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	258
Figura A2.48. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	258
Figura A2.49. Gràfic de la tensió de catenària.	258
Figura A2.50. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	259
Figura A2.51. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	259
Figura A2.52. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	259

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Figura A2.53. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.	260
Figura A2.54. Gràfic de la tensió de catenària.	260
Figura A2.55. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.	261
Figura A2.56. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.	261

INDEX DE TAULES

Capítol 2

Taula 2.1. Resum tipus volant d'inèrcia	36
Taula 2.2. Comparació de diferents tipus acumuladors	45

Capítol 3

Taula 3.1 Resum cicles de funcionament dels mitjans de transport	54
Taula 3.2. Taula d'energies cinètiques de diferents vehicles a diferents velocitats	55
Taula 3.3. Temps de frenada a diferents velocitats	58
Taula 3.4. Potències teòriques dissipades en calor durant la frenada a diferents velocitats	59

Capítol 4

Taula 4.1. Resum de les solucions de sistemes d'estalvi energètic de diferents fabricants de material ferroviari	84
Taula 4.2 Resum dels avantatges i inconvenients de cada tipus d'instal·lació	88

Capítol 5

Taula 5.1. Valors de longitud i velocitat d'ona al Mediterrani en funció de l'alçada de l'ona.	100
Taula 5.2. Valors de la força de pujada i de baixada respecte l'angle d'assentament del ferri Antonio Machado.	102
Taula 5.3. Valors de la força de pujada i de baixada respecte l'angle d'assentament del remolcador model DHOCE Stern Drive.	103
Taula 5.4. Valors de sobrecàrrega als motors de propulsió i diferència de forces al remolcador DHOCE.	104
Taula 5.5. Valors de sobrecàrrega admissible (2).	112
Taula 5.6. Valors experimentals de sobrecàrrega de l'empresa Electra-Molins.	112
Taula 5.7 Característiques tècniques de motors marins de ABB.	112
Taula 5.8. Corrent i parell màxim de motors marins de ABB.	113
Taula 5.9. Valors de potència generals.	114
Taula 5.10. Balanç en règim estacionari d'una xarxa al vaixell tractat.	114
Taula 5.11. Balanç en règim transitori d'una xarxa al vaixell.	115
Taula 5.12. Balanç en règim transitori d'un motor.	116

Capítol 6

Taula 6.1. Característiques principals del remolcador.	123
Taula 6.2. Taula resum elèctric del remolcador.	124
Taula 6.3. Valors de força de pujada i de baixada.	125
Taula 6.4. Valors de sobrecàrrega als motors de propulsió.	126

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Taula 6.5. Taula resum possibles millores en vaixells de propulsió elèctrica.	131
Taula 6.6. Taula resum dels muntatges de sistema ACEE en vaixells de propulsió elèctrica.	137
Capítol 7	
Taula 7.1. Taula resum de les dues versions del 1er ACEE	154
Capítol 8	
Taula 8.1. Característiques tècniques motor Mavilor MSS-35	166
Taula 8.2. Distància recorreguda cotxe amb 1a marxa per varies descàrregues de l'ACEE.	185
Taula 8.3. Distància recorreguda cotxe amb 2a marxa per varies descàrregues de l'ACEE.	185
Taula 8.4. Resum de les proves de càrrega de l'ACEE RG2	196
Taula 8.5. Acceleració angular mitja durant les proves de càrrega de l'ACEE RG2	198

1. INTRODUCCIÓ, OBJETIUS I ESTRUCTURA

1.1. Introducció

Els acumuladors d'energia tenen un gran espectre de possibilitats. Això es deu a la gran varietat d'acumuladors d'energia i les diverses solucions on es poden aplicar. Els acumuladors es poden agrupar en 5 grans grups, segons la solució tècnica emprada: Hidràulics, Magnètics, Mecànics, Elèctrics i Electroquímics.

Tots ells aprofiten l'energia i la seva capacitat de conversió a diferents tipus d'energia. Per exemple: el tipus hidràulic aprofita l'energia potencial de l'aigua per moure turbines, el tipus mecànic aprofita l'energia cinètica, l'electroquímic aprofita l'energia d'una reacció química per fer electricitat, etc...

Dins d'aquest gran ventall, aquest treball es centra en acumuladors cinètics d'energia elèctrica. És a dir, acumuladors d'energia cinètica que converteixen l'energia en elèctrica per mitjà d'una màquina elèctrica.

La idea d'aquest treball és “trobar” un mitjà de transport on es pugi instal·lar un acumulador d'energia de forma eficient i pràctica. Per tant, abans començarem a conèixer els diferents acumuladors d'energia tan elèctrics.

Un cop coneguts els acumuladors, estudiarem les “característiques” associades al seu funcionament (tipus d'explotació o de circulació) dels transports terrestre amb l'intenció d'instal·lar un acumulador d'energia (mòbil i/o petit) dins d'un vehicle. Cal indicar que la tracció elèctrica comença a ser un sistema molt emprat en molts vehicles i mitjans de transport. Però encara que aquest sistema de tracció s'estèn, cada mitjà de transport és diferent segons el seu ús o funcionament.

Un cop revisats els mitjans de transport, buscarem aquell mitjà on el rendiment i l'estalvi siguin els factors pel tipus de funcionament o d'explotació. Tot això ens portarà a escollir el mitjà de transport més adient per implantar un Acumulador Cinètic d'Energia Elèctrica (ACEE).

Moltes vegades, els factors “rendiment” i “estalvi” estan lligats a moviments repetitius, cíclics i/o freqüents. Aquestes particularitats ens indicaran si la instal·lació d'un acumulador podrà ser eficaç o tindrà un bon rendiment. Amb l'estudi dels transport sota la visió d'aquests factors, ens portarà cap altre mitjà de transport amb un funcionament i característiques específiques on l'acumulador pot ser una solució real i aconseguir un estalvi energètic elevat.

Un cop finalitzat l'estudi teòric previ, es dissenya i es construeix un acumulador elèctric. El desenvolupament d'un acumulador elèctric propi com a prototipus ens permetrà fer proves al Laboratori sota unes condicions properes a la realitat. Això ens obre una oportunitat de conèixer la problemàtica de càrrega i descàrrega de ben a prop.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Dins de les condicions del Laboratori del Dpt. d'Enginyeria Elèctrica, farem càrregues i descàrregues sobre un cotxe 100% elèctric. I podrem veure els resultats d'una possible instal·lació d'un acumulador elèctric en un mitjà de transport. Per simular la realitat, emprarem els rodets del banc de potència del Laboratori del Dpt. de Màquines i Motors Tèrmics.

Els resultats d'aquestes proves ens donarà un coneixement molt acurat de la problemàtica de càrrega i descàrrega de l'acumulador cinètic d'energia elèctrica fabricat.

1.2. Objectiu

La idea d'estudiar un acumulador elèctric ve d'una pràctica d'acoblament elèctric entre dos motors elèctrics feta al Laboratori del Departament. Veure el comportament de dos motors elèctrics sincronitzats només elèctricament (sense cap element mecànic) i com l'energia emmagatzemada per un motor passava a l'altre motor, va despertar el meu interès pels acumuladors. Vaig pensar que, amb prou energia, podríem moure allò que volguéssim. És a dir, un vaig veure un gran potencial d'oportunitats i desenvolupaments.

Un cop vist que l'energia és un element important, l'objectiu d'aquest treball consisteix en conèixer la dificultat del procés de càrrega i descàrrega d'un acumulador cinètic d'energia elèctrica acoblat a un sistema de tracció elèctrica d'un mitjà de transport.

Per conèixer aquesta problemàtica de més a prop, el treball contempla el disseny i construcció d'un acumulador cinètic d'energia elèctrica (ACEE). Donat el baix pressupost, el disseny i la construcció de l'acumulador serà fet amb els materials, eines i equips a l'abast del Departament d'Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB. Les proves es faran en el Laboratori d'aquest departament i finalitzades al departament de Màquines i Motors Tèrmics (de la mateixa ETSEIB) on disposen d'un banc de rodets.

A més de conèixer la problemàtica de càrrega i descàrrega, un altre objectiu és cercar una aplicació viable per l'instal·lació i desenvolupament d'aquesta aparell. En sí, la teoria de recuperar l'energia de frenat és àmpliament coneguda però aconseguir una viabilitat industrial, és un tema més limitat i restringit.

I finalment, vaig pensar que l'acumulador podria restar al Laboratori del Departament a disposició dels futurs alumnes. Així podrien aprofitar l'acumulador, realitzar pràctiques i fer proves. A més, els alumnes podrien realitzar modificacions, millores o desenvolupaments posteriors per millorar l'acumulador o el conjunt. M'agradaria que arribes a circular aquest cotxe amb l'acumulador.

1.3. Estructura

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquesta tesi realitza un estudi teòric de l'acumulador elèctric i la seves aplicacions en el món actual (un estat de l'art), per després, veure la seva aplicació als mitjans de transports. I, al final, veure una aplicació concreta en un cotxe elèctric amb un ACEE dissenyat, construït i instal·lat per l'autor d'aquest treball. Tot això s'ha distribuït en 9 capítols i son aquests:

Capítol 1: Introducció, objectiu i estructura del treball.

Capítol 2: Dins d'aquest capítol s'ha tractat del següent:

Introducció

Estudi teòric de l'energia màxima emmagatzemable.

Fluxos d'energia (càrrega i descàrrega).

Introducció a l'acumulador cinètic d'energia elèctrica.

Acumuladors elèctrics existents.

Tipus de funcionament.

Altres sistemes d'acumulació d'energia.

Capítol 3: Dins d'aquest capítol repassem els punts següents:

Estudi teòric dels diferents mitjans de transport.

Energia màxima de cadascun dels mitjans de transport.

Potència mitja i instantània.

Cicles del vehicles de transport.

Sistemes de generació elèctrica mòbils.

Sistemes d'estalvi energètic als automòbils actuals.

Capítol 4: Per veure una possible solució global pels acumuladors elèctrics, analitzem els següents punts:

Sistemes de recuperació d'energia al sector ferroviari.

Sistemes de recuperació d'energia embarcats.

Sistemes de recuperació d'energia fixes.

Altres aplicacions d'acumuladors elèctrics

Capítol 5: Per estudiar el transport marítim, s'estudien els següents temes:

El transport marítim en general.

L'ona i el seu període.

La interacció entre el vaixell i l'ona com assentament, la velocitat, angle de derrota, etc...

Els esforços sotmesos pel vaixell.

El sistema de tracció d'un vaixell.

Els generadors elèctrics d'un vaixell.

Els motor elèctrics d'un vaixell.

El consum elèctric d'un vaixell elèctric.

Els cicles de treball dels motors de tracció.

Els valors reals del consum

Capítol 6: Dins d'aquest capítol veurem la possibilitat d'aplicació d'un acumulador elèctric en el següents punts:

Comportament de la propulsió d'un vaixell elèctric.

Estudi d'aplicació a un remolcador elèctric.

Estimació dels esforços dinàmics.

Possibles millores de la propulsió del remolcador (volant d'inèrcia, acumulador elèctric, etc...).

Instal·lació d'un acumulador elèctric al remolcador.

Possibles muntatges e instal·lacions.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Capítol 7: Durant el disseny i construcció d'un primer acumulador elèctric, es veuran els següents temes:

- Vehicles elèctrics del Departament
- Inici del acumuladors al Laboratori
- Estudi de la primera versió del primer acumulador
- Estudi de la segona versió del primer acumulador
- Anàlisi final

Capítol 8: Pel disseny del segon acumulador elèctric, es repasaran els següents punts:

- Càlculs inicials.
- Càlcul del volant d'inèrcia.
- Selecció de la màquina elèctrica.
- Rodaments necessaris.
- Proves inicials de l'acumulador elèctric.
- Proves de càrrega i descàrrega a un cotxe elèctric.
- Anàlisis de les primeres proves.
- Determinació del rendiment de l'acumulador.

Capítol 9: Com a conclusió del treball, es veu el següent:

- Repàs dels conceptes i de les idees.
- Anàlisi dels resultats obtinguts.
- Conclusions d'aquest treball.
- Línies de futur.

1.4. Publicacions i Congressos

ICREPQ 2003:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES. AND POWER QUALITY. Dels dies 9 al 12 d'abril de 2003 a Vigo. Presentació d'un pòster mural d'una ponència amb el títol: "HYBRID ELECTRICAL VEHICLE TO CHECK A KINETIC ACCUMULATOR". Autors: Sr. Dr. Ricard Bosch, Sr. Dr. Eduard Frias i Ramon Garrigosa. Ponència nº 346. ISBN:84-607-6768-X

CIREED 2003:

International Conference of Electricity Distribution (17th). Barcelona del 12 al 15 de maig de 2003. Presentació d'una ponència amb el títol: "DEVELOPMENT AND TEST OF A KINETIC ACCUMULATOR OF ELECTRIC ENERGY". Autors: Sr. Dr. Ricard Bosch, Sr. Dr. Eduard Frias i Ramon Garrigosa.

MT 2003:

Congres internacional de Transport Marítim. Dels dies 25 al 27 de novembre de 2003 a les Drassanes de Barcelona. Presentació d'una ponència amb el títol: "DEVELOPMENT AND TEST OF A KINETIC ACCUMULATOR OF ELECTRIC ENERGY". Autors: Sr. Dr. Ricard Bosch, Sr. Dr. Ricard Barba i Ramon Garrigosa.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

FISITA 2004:

World Automotive Congress. Dels dies 23 al 27 de maig de 2004 al Palau de Congressos de Barcelona (av. Diagonal). Presentació d'una ponència amb el títol: "DEVELOPMENT AND TEST OF A KINETIC ACCUMULATOR OF ELECTRIC ENERGY". Autors: Sr. Dr. Ricard Bosch, Sr. Dr. Ricard Barba, Sr. Jesús Hernández i Ramon Garrigosa. Ponència nº F2004F119. Sociedad de Técnicos de Automoción (STA) 2044, dipòsit legal: B26597-04.

2. ACUMULADOR

Els acumuladors més coneguts són els electroquímics (bateries), els elèctrics (condensadors, supercondensadors) i els cinètics (volants d'inèrcia). Però aquest treball es centrarà en els acumuladors d'energia amb volant d'inèrcia (cinètics).

La primera aplicació famosa d'un acumulador va ser el troleibús o Girobús de l'empresa Oerlikon. Desgraciadament el desenvolupament va quedar en l'oblit. No ha estat fins ara, gràcies als avanços de materials compostos i de la tecnologia, que es comença a aplicar recentment amb resultats satisfactoris. I, fa pocs anys, van tenir un gran creixement degut a la Formula 1. Encara que els acumuladors són molt específics per la seva gran potència instantània, aquests sistemes es poden aplicar a qualsevol instal·lació del món.

2.1. Introducció

L'acumulador cinètic emmagatzema energia en forma d'energia cinètica. És a dir, la massa d'un volant d'inèrcia que gira a una velocitat angular. L'energia emmagatzemada és proporcional al moment d'inèrcia per la seva velocitat angular. L'energia cinètica d'un volant d'inèrcia ve donada per l'equació:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (\text{eq. 2.1})$$

on J és el moment d'inèrcia del volant i ω és la velocitat angular de rotació.

Com veiem a l'equació, l'energia és directament proporcional al moment d'inèrcia (de la massa que gira) i directament proporcional al quadrat de la velocitat de rotació. És a dir, l'energia emmagatzemada al volant d'inèrcia depèn de la seva massa i de la seva velocitat de rotació. L'acumulador tindrà més energia emmagatzemada quan giri més depressa o quan augmenti la seva massa. I tindrà menys energia, quan hi ha menys massa o menys velocitat.

Quan més gran és el moment d'inèrcia o velocitat de gir, més energia emmagatzema l'acumulador. Ara bé, la velocitat de rotació és una variable quadràtica i, per tant, l'energia emmagatzemada augmenta molt més amb un increment de la velocitat que amb un increment de la massa.

Si considerem un volant d'inèrcia de forma cilíndrica (un volant d'inèrcia senzill), llavors l'energia emmagatzemada és:

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} MR^2 \right) \omega^2 \quad (\text{eq. 2.2})$$

on M és la massa del cilindre i R el radi del cilindre.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per fer-nos una idea més visual dels valors d'energia que es poden aconseguir amb un volant d'inèrcia de forma cilíndrica, anem a fer uns exemples senzills: Donarem valors a l'Equació 2.2.

Al primer exemple consisteix en augmentar la massa del volant d'inèrcia però mantenint constant el radi, en aquest cas, s'augmenta l'alçada del cilindre. L'augment del moment d'inèrcia es proporcional a l'augment de la massa. Si ho representem, la Figura 2.1 mostra valors d'energia (teòrica) a mida que augmenta la massa.

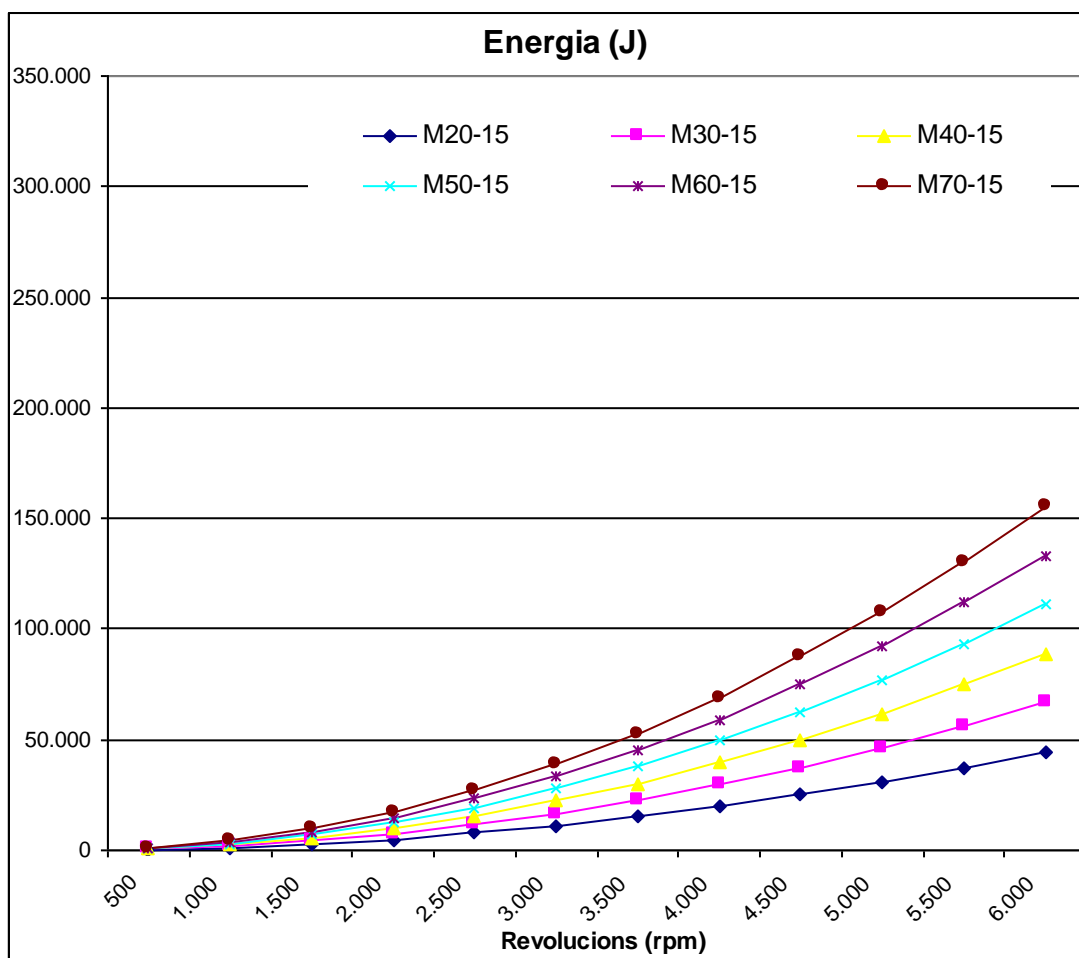


Figura 2.1. Energia emmagatzemada en funció de la velocitat angular

Com veiem, un volant de massa 70kg amb un radi de 15cm (línia M70-15) pot emmagatzemar una energia màxima de 150kJ a 6.000 revolucions.

Al segon exemple consisteix en variar el radi però mantenint constant la massa del volant d'inèrcia. Per obtenir això cal reduir l'alçada del cilindre a mida que augmentem el radi. En la Figura 2.2, observem que l'energia emmagatzemada és major que al gràfic anterior.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

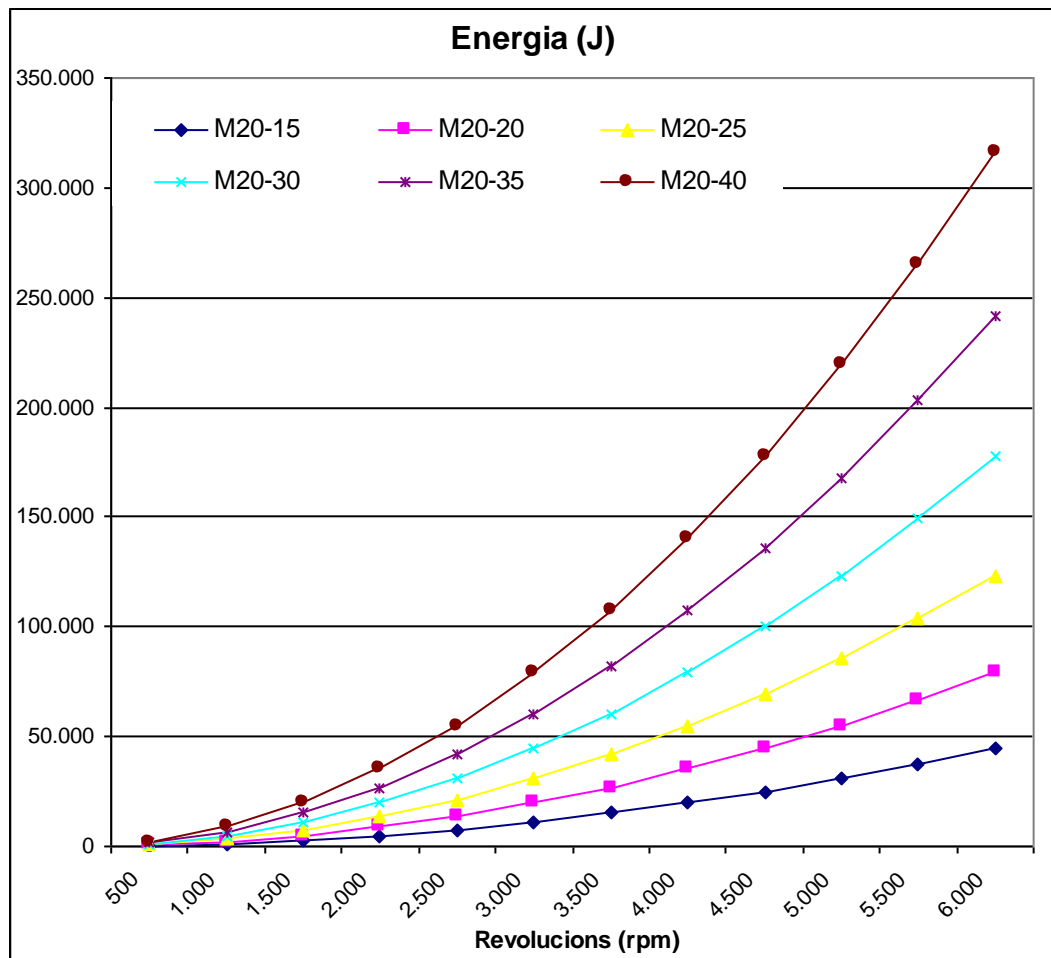


Figura 2.2. Energia emmagatzemada en funció de la velocitat angular

Com veiem, un volant de radi 40cm amb una massa de 20kg (línia M20-40) pot emmagatzemar una energia màxima de 300kJ a 6.000 revolucions. És a dir, dos vegades més que a l'exemple primer.

A les dues gràfiques s'observa que a mida que augmenta la velocitat, la quantitat d'energia s'incrementa de forma quadràtica.

Ara bé, si comparem les dues gràfiques, veiem que l'augment de massa és un increment més "lineal", mentre que l'augment del radi és un increment més "quadràtic".

Amb aquests dos exemples comprovem que a major radi i a major velocitat de rotació, major quantitat d'energia es pot emmagatzemar al volant d'inèrcia. I que la forma del volant d'inèrcia és una variable a tenir en compte a l'hora d'emmagatzemar energia.

Per tant, encara que la velocitat de rotació sigui un factor important, també ho és la forma. Evidentment, el pes (i seva la composició o densitat) del volant d'inèrcia és altre factors bàsic.

2.2. Procés de càrrega i descàrrega

Un cop repassada la teoria, anem a veure el procés de càrrega i descàrrega.

Si la velocitat del volant és molt important, encara ho és més el sistema de conversió d'energia. És a dir, on es produeix el trasvas d'energia entre l'exterior i el volant d'inèrcia. Cal comentar que la conversió d'energia és en els dos sentits.

Els mètodes més comuns de conversió d'energia son tres:

- Mecànics: Aquest mètode empra un embragatge que s'acobla al sistema de tracció. Els primers acumuladors aplicats a la Formula 1 eren així.
- Hidràulics: Aquest mètode utilitza una bomba o motor hidràulic per transmetre l'energia per un fluid a pressió. Evidentment necessita una altra bomba o motor hidràulic per aprofitar l'energia del circuit hidràulic.
- Elèctrics: Aquest mètode empra una màquina elèctrica per convertir l'energia.

Aquest treball es centrarem en el mètode elèctric per la gran utilització de l'electricitat en tots els àmbits, sobre tot en el món desenvolupat. Els dos processos d'un acumulador cinètic amb màquina elèctrica son:

- CÀRREGA. Procés on l'energia elèctrica entrant fa augmentar la velocitat del volant d'inèrcia i es converteix en energia cinètica. En aquest procés la màquina elèctrica funciona com motor.
- DESCÀRREGA. Procés on l'energia cinètica sortint fa reduir la velocitat del volant d'inèrcia i es converteix en energia elèctrica. En aquest procés, la màquina elèctrica funciona com generador.

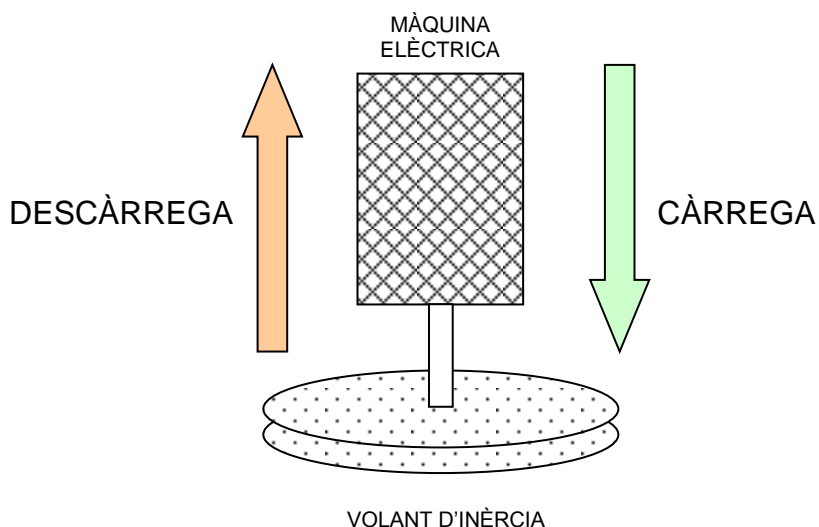


Figura 2.3. Processos d'un acumulador elèctric

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la Figura 2.3 hem representat una única màquina elèctrica acoblada al volant d'inèrcia. Ara bé, la lògica indica emprar dues màquines elèctriques: una, preparada per la càrrega i l'altre, preparada per la descàrrega. Encara que utilitzar dues màquines elèctriques específiques seria la solució més adient (des del punt de vista d'eficiència), per qüestions d'espai i senzillesa, normalment es decideix utilitzar una sola màquina elèctrica acoblada al volant d'inèrcia pels dos processos de conversió de l'energia: Càrrega i Descàrrega.

En aquest cas, una única màquina elèctrica té dues funcionalitats: motor i generador. Per tant, és molt important aconseguir un rendiment elevat en els dos modes de funcionament a la màquina elèctrica.

Donat que aquest treball està centrat en un acumulador cinètic acoblat a una màquina elèctrica, l'anomenarem Acumulador Cinètic d'Energia Elèctrica o ACEE.

2.3. Fluxos d'energia

Considerem Càrrega quan el flux d'energia va de l'exterior cap a l'interior de l'ACEE i l'energia s'emmagatzema al volant. És a dir, augmentant la velocitat de rotació del volant. I considerem Descàrrega quan el flux d'energia va de l'interior de l'ACEE cap l'exterior i l'energia surt del volant d'inèrcia. És a dir, disminuint la velocitat de rotació del volant. Aquests dos processos (Càrrega i Descàrrega) es poden veure a la Figura 2.3.

Però l'ACEE com qualsevol sistema d'acumulació, té limitacions. Aquestes les classifiquem segons siguin pròpies del volant d'inèrcia, de la màquina elèctrica o teòriques.

Per un costat, tenim el límit de destrucció. Aquest ve donada per la velocitat d'explosió centrífuga del volant d'inèrcia. És quan la força centrífuga es tan gran que pot destruir el propi volant. També hi ha el límit de disseny. Aquest ve donat pel límit dels rodaments i elements de sustentació. Per tant, el límit màxim de l'ACEE serà no introduir més energia quan el volant d'inèrcia està girant a la seva màxima velocitat (sigui el límit de destrucció o el límit de disseny).

Per un altre costat, la conversió de l'energia per part de la màquina elèctrica té uns límits. En altres paraules, quan l'ACEE està per sota d'un límit inferior de rotació, la màquina elèctrica no pot convertir l'energia degut al baix nivell de tensió entre els borns no al baix camp magnètic.

Per tant i com a conclusió, diem que l'ACEE funciona dins d'un rang de velocitats de rotació. Per un costat, el límit superior i, per l'altre, el límit inferior. D'una forma més genèrica, direm que l'ACEE només pot funcionar dins d'un rang d'energia. El nivell inferior ve donat per l'extracció d'energia, limitat per la màquina elèctrica, i el nivell superior ve donat pel límit superior

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

d'emmagatzematge d'energia, limitat per la velocitat màxima de rotació del volant d'inèrcia (sigui per destrucció o per disseny).

La descàrrega o flux de l'energia cap l'exterior pot ser total o parcial. En una descàrrega total, el volant d'inèrcia arribarà al seu límit inferior. Mentre que en una descàrrega parcial, el volant encara emmagatzemarà energia perquè no s'ha arribat al límit inferior. En aquest últim cas, hi han dues possibilitats: acceptar energia (càrrega) o donar energia (descàrrega).

2.4. Elements bàsics d'un acumulador

Un ACEE està format bàsicament per un volant d'inèrcia, una màquina elèctrica, un envoltent i elements auxiliars. Veure Figura 2.4. Encara que només es representen els tres primers elements, hi han elements/sistemes auxiliars necessaris pel correcte funcionament de l'ACEE. Aquests elements/sistemes auxiliars són molt variables segons les tecnologies o solucions tècniques emprades per cada tipus d'acumulador.

2.4.1. Volant d'inèrcia

El volant d'inèrcia és una massa que gira respecte el seu eix principal de rotació. L'energia que emmagatzema és proporcional al seu moment d'inèrcia i a la seva velocitat de rotació.

Gaire tots els volants tenen forma rodona, circular o cilíndrica. Però a partir d'aquí, el disseny i la forma depèn del material emprat, de l'energia a emmagatzemar, del nivell de seguretat, etc... La forma més senzilla és de cilindre o de disc (una varietat del cilindre amb gruix petit). Normalment el volant d'inèrcia té una massa uniforme i constant (homogènia des del centre fins l'exterior del volant) i un radi constant. Però hi han volants amb formes més complexes (forma de campana, forma de tambor, etc...), de gruixos variables (més gruixut al centre i menys a l'exterior, més gruixut a l'exterior, etc...) o amb densitat elevades o baixes (compòsits, fibra de carbó, etc...).

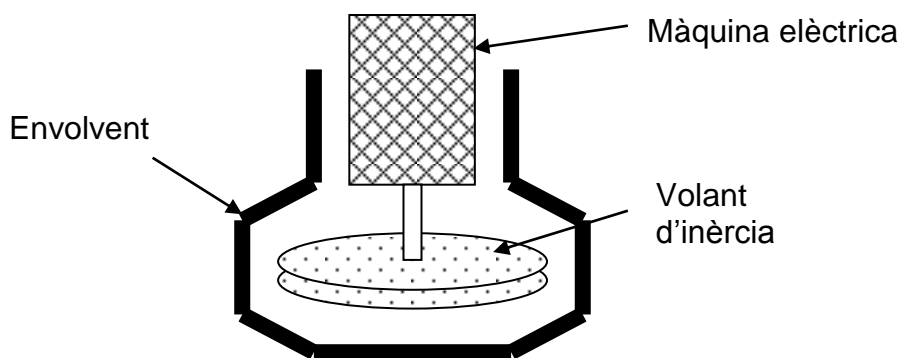


Figura 2.4 Parts bàsiques d'un acumulador cinètic

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

La majoria dels dissenys de volants d'inèrcia "juguen" amb l'eq. 2.1. És a dir, busquen obtenir el major moment d'inèrcia per poder emmagatzemar la major quantitat d'energia possible. Sota aquesta filosofia, hi ha el volant anomenat perimetral. Aquest volant d'inèrcia té la major massa concentrada al perímetre. Encara que és perfecte des del punt de vista de moment d'inèrcia, té uns efectes secundaris poc desitjables. Al tenir la massa a la perifèria, l'auto destrucció és molt alta i no pot assolir velocitats elevades de rotació. Un altre model és el volant de densitat variable. Aquest té major massa a prop de l'eix i, a mida que s'apropa al perímetre, la massa es redueix. Aquest model aconsegueix optimitzar la distribució de la massa per aconseguir més densitat d'energia sense tenir problema d'auto destrucció.

Un factor important a tenir en compte en el disseny del volant és la velocitat angular o de funcionament. És a dir, a major velocitat angular, major acceleració centrípeta. I a major acceleració centrípeta, major esforç de tracció pateix el volant d'inèrcia per la massa que hi ha al perímetre. Aquest esforç de tracció obliga a utilitzar materials amb una resistència a la tracció elevada.

Encara que el material més emprat és l'acer, també s'empren materials iso-resistents o composites. Aquests darrers tenen un avantatge en cas de trencament o destrucció. El volant es desfà en moltes fraccions petites i cap troç surt a l'exterior de l'envolvent. És a dir, és molt segur.

També hi han solucions d'ACEE enginyoses i simples. Donat que l'acumulador té màquina elèctrica, el rotor d'aquest ja és el propi volant de inèrcia. Aquesta solució opta per un màquina elèctrica de reluctància amb rotor ferromagnètic de pols sortints. D'aquesta manera té les dues parts de l'acumulador en una sola.

2.4.2. Màquina elèctrica

Com dèiem abans, la màquina elèctrica és la part més important de l'acumulador ja que treballa com a motor, quan introdueix energia al volant, i treballa com a generador, quan extreu energia del volant.

Es poden utilitzar màquines elèctriques estàndard però normalment s'empren màquines especials per aquesta duplicitat de funcionament on s'exigeix uns elevats parells i potències instantànies.

Les màquines elèctriques més emprades pels acumuladors són:

- d'imants permanents,
- de reluctància,
- d'inducció
- superconductores.

Com veiem, aquests tipus de màquines no tenen escombretes al rotor i permeten funcionar a velocitats de rotació elevades.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

La màquina d'imants permanents no té debanat inductor i la tensió s'incrementa amb la velocitat. L'avantatge d'aquesta màquina és que la eficiència és significativament més alta que els altres màquines. La geometria de HALBAG incrementa les seves prestacions magnètiques i fa que no s'escalfin els imants perquè limita la circulació de corrent induïts en el seu interior.

La màquina elèctrica de reluctància té un rotor i un estator amb pols ferromagnètics sortints. Per tant, la inductància segons l'eix directe és diferent segons el seu eix transversal. El motor de reluctància es magnetitza mitjançant un sistema de bobines a l'estator. I aquestes es magnetitzen per influència del rotor ferromagnètic. El moment de torsió per reluctància, apareix quan hi circula corrent per les bobines i és funció directe del corrent. El rotor busca la seva posició de mínima reluctància que maximitza la inductància que obté segons l'angle de rotació. La seqüència d'activació de les bobines, controla la velocitat de rotació. Donat que el rotor és de ferro e isòtrop, resisteix molt bé els esforços induïts per l'acceleració al girar a grans velocitats. Els corrents induïts al rotor, tendeixen a estabilitzar el parell de rotació.

Les màquines de flux axial son conegudes per els seus desenvolupaments de grans densitats de potència i requereixen d'imants permanents. Mentre que la majoria de les màquines normals funcionen amb camp magnètic radial, aquestes màquines funcionen amb camp magnètic axial. És a dir, el flux del camp magnètic surt d'un estator, creua el rotor i es dirigeix cap a l'altre estator. El rotor és un disc pla amb imants molt potents. Les característiques d'aquestes màquines fa que disposin d'un rendiment més alt que les màquines convencionals. La combinació del concepte de reluctància i una trajectòria de flux axial son avantatjosos per aplicacions com generador-motor d'arrencada del cigonyal (CSG) d'un motor de combustió interna. [1]

La màquina d'inducció té un debanat inductor a l'estator i un rotor amb ranures formant una gàbia d'esquirol. La velocitat d'aquest model de màquina és fixa, imposat pel nombre de pols en que ha estat bobinada i per la freqüència de la font d'alimentació. La velocitat no és totalment independent de la càrrega i el parell útil es produeix per l'efecte del lliscament entre la velocitat del camp i la velocitat del rotor. Dissenys d'inducció sense ferro al rotor permeten eliminar els esforços d'atracció entre el rotor i l'estator per reluctància. Així es pot aconseguir una levitació rotòrica parcial sense superconductors. [1]

En tots ells cal un sistema de control electrònic de freqüència de 4 quadrants amb les re-alimentacions de velocitat i/o posició rotòrica.

2.4.3. Recipient

El recipient és un element de protecció i seguretat en cas d'emergència. En cas de ruptura del volant d'inèrcia, el recipient assegura que cap fragment surti cap l'exterior.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Normalment el recipient és, a més, un element estructural de l'acumulador i sustenta el volant d'inèrcia (amb rodaments) de forma que pugi rotar sense problemes.

Els rodaments clàssics mecànics (rodaments de boles o corrons) tenen una velocitat màxima de funcionament a prop dels 15.000r.p.m o velocitat de gir relativament baixes. Aquests rodaments tenen pèrdues d'energia inherents degut al fregament de les boles, corrons o corrons cònics amb les seves pistes. Aquests models de rodaments son òptims per emmagatzemar energia durant curts períodes de temps (com a màxim 10 o 15 minuts). Per temps de emmagatzemen superiors a 15 minuts o per velocitats superiors, les pèrdues son considerables i resulten poc adequats.

Normalment els rodaments clàssics mecànics es sobre dimensionen. Aquest sobre dimensionament absorbeix qualsevol excés de càrrega i, a més, allarga la vida útil de l'acumulador. Aquests rodaments tenen problemes com oxidació, pèrdua del tractament de la superfície o sobrecàrregues puntuals que poden augmentar la temperatura i fer aparèixer vibracions que al final arriben a destruir el rodament.

També hi ha l'opció d'emprar rodaments especials a velocitats de gir superiors als 15.000r.p.m o quan el temps d'emmagatzement és llarg com els ceràmics (velocitat màxima prop dels 25.000r.p.m.). Però per damunt d'aquestes velocitats, cal anar a sistemes de sustentació sense fricció com magnètics, superconductors o hidrodinàmics.

Per reduir les pèrdues (aerodinàmiques i de fregament), es realitza el buit dins del recipient. En aquestes casos, cal indicar que els rodaments clàssics no son hermètics i cal afegir un sistema addicional de aïllament. Però aquests mètodes augmenten les pèrdues d'energia. Per tant, amb el buit s'empren altres rodaments com els rodaments magnètics o superconductors.

Els rodaments magnètics son una solució tècnica pels acumuladors cinètics de molt alta velocitat. Aquests rodaments no tenen pèrdues per fricció perquè no hi ha contacte físic i, en conseqüència, no existent pèrdues. Aquest model de rodament empra camps magnètics per sustentar la massa del volant i centrar-lo. Els camps magnètics poden ser generats per electroimants o imants permanents.

Encara que els rodaments magnètics no tenen límit màxim de velocitat de rotació, en alguns casos sí tenen un límit mínim a baixa velocitat. Els rodaments magnètics permeten fer el buit sense necessitat d'elements addicionals. Aquest model de rodaments son els únics dispositius que, treballant a altes velocitats i en buit, tenen poques pèrdues d'energia.

Dins de les suspensions magnètiques, els superconductors poden arribar a ser la solució més correcte. Els superconductors es comporten com un material diamagnètic davant un camp magnètic, el que simplifica la suspensió rotòrica. I el buit, a més, ajuda a mantenir la temperatura criogènica necessària.

2.4.4. Sistemes auxiliars

Entenem com a sistemes auxiliars tot allò necessari per tenir control, funcionament i seguretat de l'acumulador. Els sistemes auxiliars poden ser des del sistema per aconseguir el buit dins del recipient fins el sistema de connexió de la màquina elèctrica a l'exterior.

Si sigui quina sigui la màquina elèctrica de l'ACEE, es necessita un control electrònic de freqüència variable i de 4 quadrants per controlar la velocitat de rotació. Això ens permet conèixer l'energia durant el procés de càrrega/descàrrega i l'energia romanent al volant d'inèrcia.

Aquest control de l'energia ens diu si el volant d'inèrcia pot acceptar més energia de l'exterior o no. A més, el control vigila el corrent de càrrega i descàrrega. És a dir, el control vigila i limita el corrent màxim de la màquina elèctrica per evitar sobre càrregues i la destrucció de la màquina elèctrica.

Com veiem el control té una tasca important com a sistema auxiliar d'un acumulador cinètic d'energia elèctrica.

Qualsevol control de màquina elèctrica, sigui quin sigui el seu disseny o tecnologia, ha de mesurar de forma permanent els valors de les variables de f (freqüència), V (tensió) i I (corrent), variables comunes a tots els controls de màquines elèctriques. A més, en el cas dels acumuladors, el control de càrrega/descàrrega ha de llegir, mesurar i calcular variables com velocitat de rotació del volant de inèrcia, potència instantània, parell instantani, energia emmagatzemada, etc...Tot això obliga que el control d'un acumulador tingui una capacitat de lectura i de càlcul elevada així com una capacitat de reacció alta front situacions concretes.

2.5. Acumuladors elèctrics existents

Actualment existeix una ampla gama d'acumuladors cinètics d'energia elèctrica de diferents potències, així com de diferents tecnologies i solucions. Aquesta varietat d'acumuladors es deguda al gran ventall de solucions tècniques segons l'aplicació a que va destinada.

Dels acumuladors actuals, fem una primera divisió segons la quantitat de màquines elèctriques emprades:

- Format "Màquina única"
- Format "Dues màquines"
- Format "Múltiple màquines"

Aquesta divisió s'ha fet segons la complexitat de l'equip i tenint en compte que a major quantitat de màquines, els elements rotant i sistemes auxiliars augmenten.

2.5.1. Format "Màquina única"

Aquest tipus d'acumulador empra una única màquina elèctrica. Realment és un convertidor mecànic-elèctric (màquina elèctrica) i volant de inèrcia, a la vegada. És a dir, el rotor de la màquina elèctrica és el volant d'inèrcia. Això li dona una simplicitat única.

Un exemple és l'acumulador Clean Source2 de l'empresa Active Power. Aquest tipus utilitza una màquina elèctrica de reluctància amb un rotor de 8 pols sortints que és el volant d'inèrcia de l'acumulador. [18].

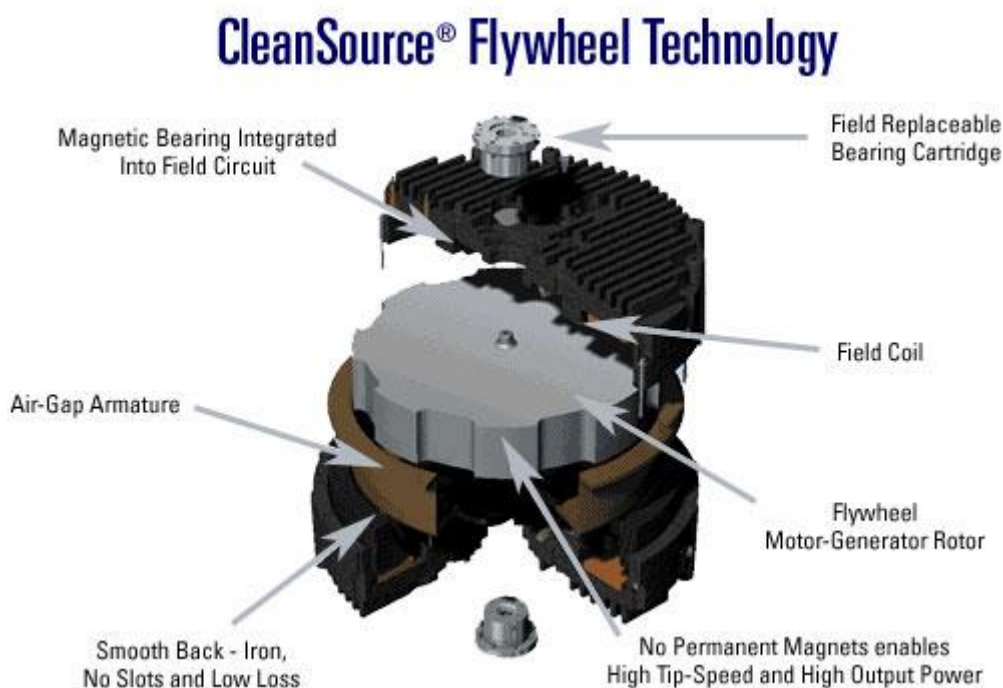


Figura 2.5 Acumulador CleanSource

Aquesta unitat d'acumulador té una potència de 250kW. Les característiques tècniques son:

- Mides: 1.100x860x1.900mm (ample x fondo x alt)
- Pes: 4.100kg
- Velocitat de rotació: 7.700rpm
- Potència: 250kW
- Temps de càrrega completa: menys de 150 segons
- Autonomia: 13 segons per 250kW a màxima potència d'extracció (energia 1.700kJ)
- Densitat de potència: 50kW/0,09m²
- Pèrdues: inferiors a 2kW (segons fabricant)
- Rendiment: 99% (segons fabricant)
- Cicle de càrrega i descàrrega: Sense límits (segons fabricant)

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

- Vida útil de l'equip: més 20 anys (segons fabricant).

Donat la seva alta velocitat de rotació, utilitza rodaments magnètics. Aquí, els rodaments clàssics són un recolzament en cas de fallida dels magnètics.

Un altre exemple de "màquina única" és l'acumulador UPT de l'empresa URENCO. Aquest acumulador deriva de la indústria nuclear. L'aparell era una màquina centrífuga que s'emprava per enriquir l'urani. Aquestes màquines centrífuges tenien una velocitat de rotació molt alta, prop de les 90.000rpm. [1].

La màquina elèctrica és un motor-generador DC Brushless de alta velocitat amb un rotor de material compost amb incrustacions de material magnètic permanent. El volant d'inèrcia és una part del rotor de la màquina elèctrica. És a dir, la part superior és el propi rotor de la màquina mentre que la part inferior és el volant d'inèrcia, format per un compost de carbó i fibra de vidre.

El rotor té forma de campana cilíndrica i, gràcies als camps magnètics, s'equilibra de forma automàtica. A dalt, té un rodament magnètic mentre que a la part de baix, només hi ha un centrador.

Tot el conjunt màquina-acumulador està dins d'un recipient d'acer on s'ha practicat el buit.

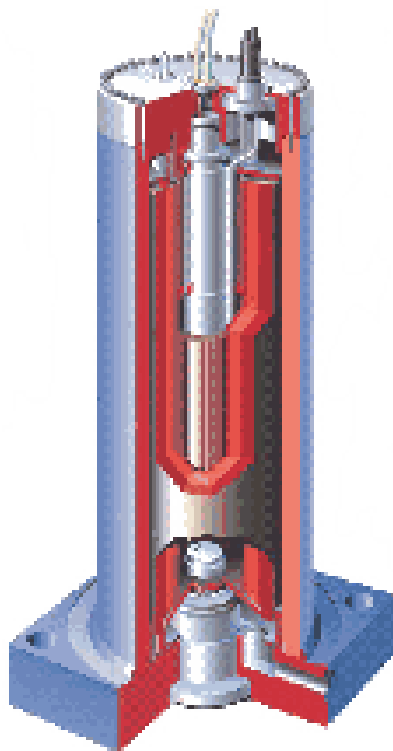


Figura 2.6. Acumulador UPT

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquest acumulador té una potència de 120kW. Les característiques tècniques son:

- Mides de l'acumulador 600x600x1.500mm (ample x fondo x alt)
- Pes de l'acumulador: 1.200kg
- Velocitat de rotació: 90.000rpm
- Potència: 120kW
- Temps de càrrega completa: 40 segons
- Autonomia: 30 segons per 100kW d'extracció (energia 1.700kJ)
- Densitat de potència:
- Pèrdues: inferiors a 1.750W (segons fabricant)
- Rendiment de l'acumulador: 98% (segons fabricant)
- Cicle de càrrega i descàrrega: (desconegut)
- Vida útil de l'equip: (desconegut).

2.5.2. Format "Dues Màquines"

Aquest tipus de sistema utilitza dues màquines elèctriques. Una com a motor i l'altre, com a generador.

Un exemple d'aquest format de "dues màquines" és el UNIBLOCK-T de l'empresa RWE Piller. [110]. Aquest acumulador d'energia està format per les següents elements:

- Una màquina síncrona (anomenada Unitat U-M)
- Un acumulador (anomenat POWERBRIDGE).
- Un circuit de potència amb bobines i transformadors.
- Un convertidor estàtic rectificador-inversor.
- Un circuit de control.

L'acumulador Powerbridge utilitza Heli per reduir les pèrdues de l'acumulador. Aquest acumulador té el disseny de màquina elèctrica compartint l'eix vertical amb el volant d'inèrcia. El volant és a la part inferior per donar més estabilitat al conjunt.

Les característiques tècniques de l'equip son:

- Mides: 5.500x1.320x2.760 (ample x fondo x alt, per tot l'equip de 1,6MVA)
- Pes: des de 10.205kg fins a 21.740kg (de tot l'equip)
- Velocitat de rotació del volant: 3.600rpm
- Energia emmagatzemada: 16,5 MJ
- Potències: 330kVA, 420kVA, 625kVA, 800kVA, 1.100kVA y 1.670kVA.
- Temps de càrrega completa: (desconegut)
- Autonomia: Des de 12 segons per 1.670kVA fins a 57 segons per 330kVA
- Rendiment: 92% (segons fabricant)



Figura 2.7 Acumulador PowerBridge

2.5.3. Format “múltiples màquines”

Em aquest cas, l'acumulador empra més de dues màquines elèctriques pel sistema convertidor d'energia.

Un exemple d'aquest format de “múltiples màquines” és el sistema d'alimentació ininterromput NO-BREAK KS del fabricant EURODIESEL. [I11] Aquest tipus està basat en un grup electrogen, és a dir, motor dièsel acoblat a un generador o alternador.

Per augmentar l'energia acumulada, el fabricant ha afegit un “acumulador d'energia” entre la màquina síncrona (alternador) i una màquina rotativa elèctrica. Aquest “acumulador” és una màquina elèctrica rotativa formada per un volant d'inèrcia més un tambor enmig de la carcassa i del rotor. Aquest tambor volant pot aconseguir una velocitat de rotació de 3.000rpm gràcies als camps magnètics generats per unes bobines i una excitatriu.

Amb el tambor girant a 3.000rpm s'obté una energia emmagatzemada considerable. Això fa que el conjunt tingui energia suficient per un arrancada del motor dièsel i una millor reacció als micro talls, pèrdues de freqüència i baixades de tensió.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

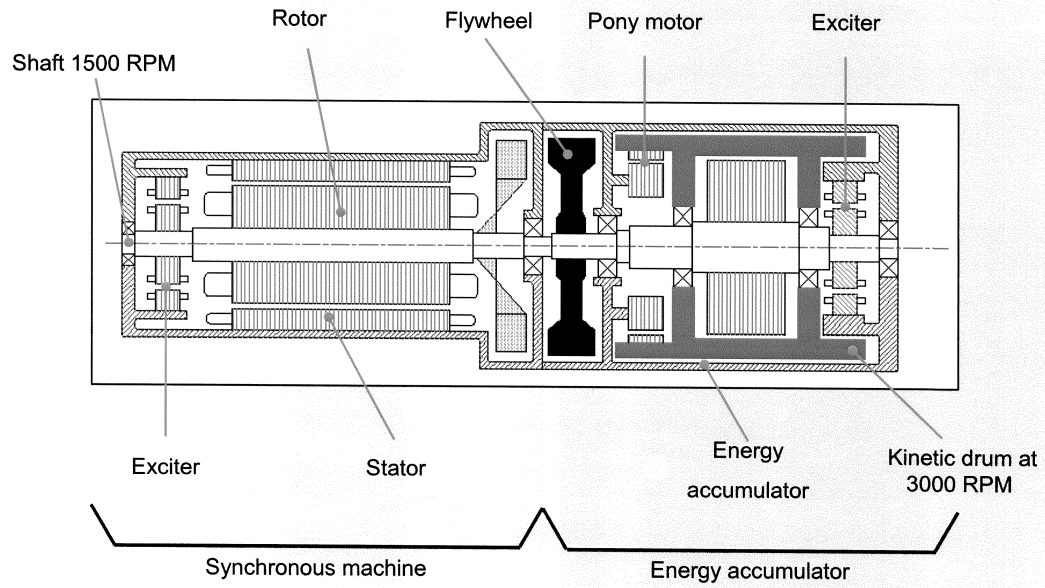


Figura 2.8 Acumulador No-Break KS

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

2.5.4. Resum

ACUMULADOR	Màquina única		Dues màquines	Múltiples màq.
	CleanSource2	UPT	Uniblock-T	No-break KS
Tipus	Rotor del motor de reluctància	Rotor del motor Brushless	Volant d'inèrcia	Volant d'inèrcia + Tambor
Velocitat de rotació de l'acumulador	7.700rpm	90.000rpm	3.600rpm	3.000rpm
Potència	250kW	50kW	1.600kW en 10s	1750kVA
Energia emmagatzemada	1.700kJ	14MJ	16,5 MJ	
Autonomia	12 segons		57 segons	
Pes de l'acumulador i recipient		1.200kg		
Material	Acer	Composite	Acer	Acer
Mides acumulador i recipient		600x600x1350		

Taula 2.1. Resum tipus volant d'inèrcia

2.6. Modes de funcionament

Bàsicament els acumuladors d'energia tenen dues principals aplicacions:

- Recolzament d'energia
- Estalvi energètic

Els dos modes de funcionament no es diferencien físicament gaire però, a la pràctica, tenen diferents tipus de connexió amb l'exterior o xarxa. Aquesta diferència de connexió afecta al control de l'equip encara que la qüestió bàsica de l'acumulador és la mateixa, emmagatzemar energia.

2.6.1. Recolzament d'energia

Una font d'energia principal (xarxa) alimenta una càrrega crítica o un procés industrial sensible. Si la font d'alimentació principal no és fiable al 100%, aquesta pot tenir micro talls, baixades de tensió o pertorbacions del corrent. Aquesta poca qualitat de la font fa que la càrrega crítica o el procés industrial es vegi seriament afectat. És en aquestes situacions on l'acumulador fa tasques de recolzament a la font d'alimentació o d'energia.

en aquests casos, la configuració és que el sistema acumulador es situa entre la font principal i la càrrega crítica o sensible. D'aquesta manera, l'acumulador intervé reduïnt o eliminant els defectes de la xarxa d'alimentació. És a dir, l'acumulador aporta energia a les baixades de tensió o micro-talls i redueix les pertorbacions del corrent. Ara bé, la font principal d'alimentació segueix proporcionant la potència i el corrent necessari perquè la càrrega funcioni.

En aquest cas, l'acumulador no té prou energia per alimentar la càrrega o el procés industrial per si sol. L'acumulador entrega l'energia que té emmagatzemada (que normalment és poca quantitat). Per tant, només pot proporcionar energia per 1 o 2 segons.

Aquí l'acumulador d'energia té una potència limitada ja que es dissenya per superar aquests defectes de la font d'alimentació i que no afecti el procés industrial ni la càrrega crítica. Així doncs, la potència de l'acumulador es calcula per la potència elèctrica del consum i per el temps en que ho fa.

Un exemple és el acumulador Clean Source2 de l'empresa Active Power. [18]. El sistema es completa amb un convertidor AC-DC al costat de la xarxa d'alimentació, i d'un convertidor DC-AC al costat de la càrrega. El motor/generador/acumulador es connecta a la barra del mig de corrent continu.

El seu funcionament és el de d'un volant d'inèrcia sempre carregat. D'aquesta manera, la reacció és instantània front qualsevol pertorbació o defecte de la xarxa.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

L'avantatge d'aquest sistema és la seva modularitat. És a dir, aquest acumulador es pot unir a altres acumuladors idèntics fins aconseguir la potència total de la càrrega. Només cal dimensionar els dos convertidors amb la potència necessària.

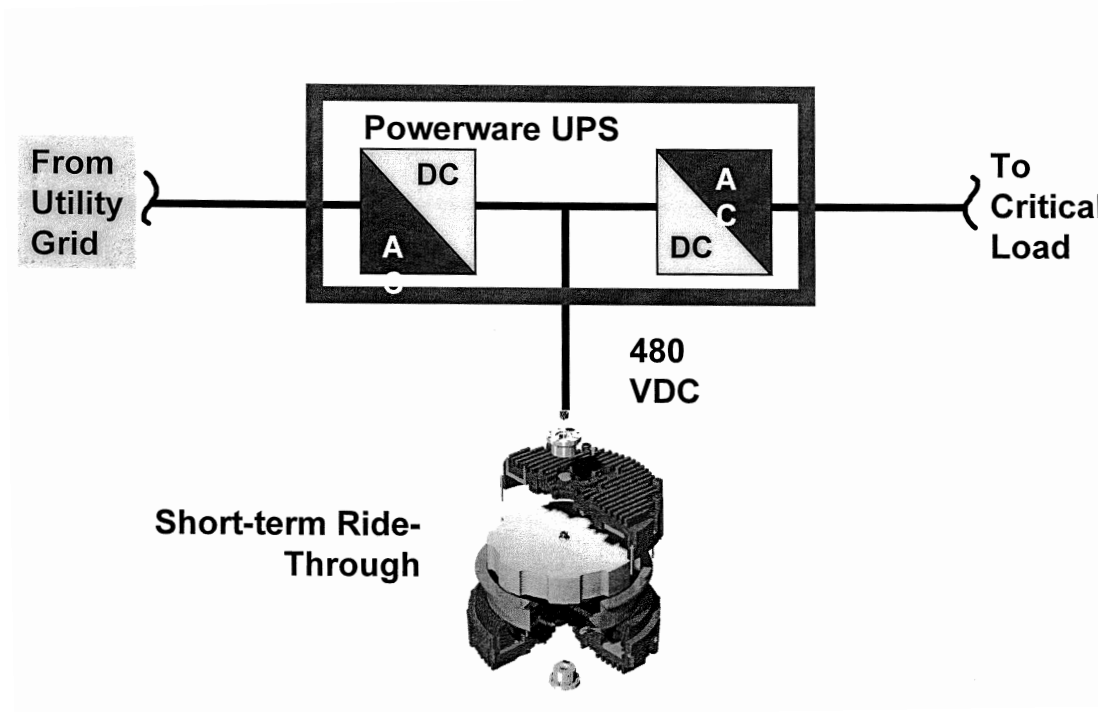


Figura 2.9 Esquema connexió acumulador CleanSource

L'altre exemple és l'acumulador UPT de l'empresa URENCO, també necessita un convertidor estàtic. [1]. Mentre el motor/generador/acumulador funciona amb corrent trifàsic (a tensió i freqüència variable fins a 700V i 600Hz), la "xarxa" o càrrega és de corrent continu.

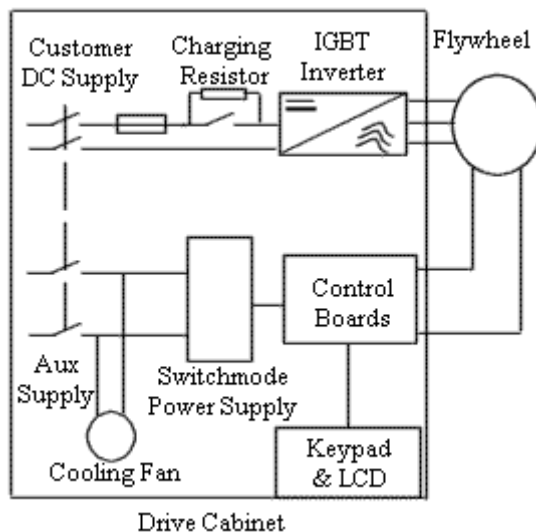


Figura 2.10 Esquema connexió acumulador UPT

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

El sistema també és modular com l'anterior exemple i es poden aconseguir potències superiors afegint més equips i augmentant la potència del convertidor.

L'acumulador POWERBRIDGE del sistema UNIBLOCK-T de l'empresa RWE Piller també funciona com a recolzament però és més complex degut a la quantitat de sistemes auxiliars i de controls que té. [110].

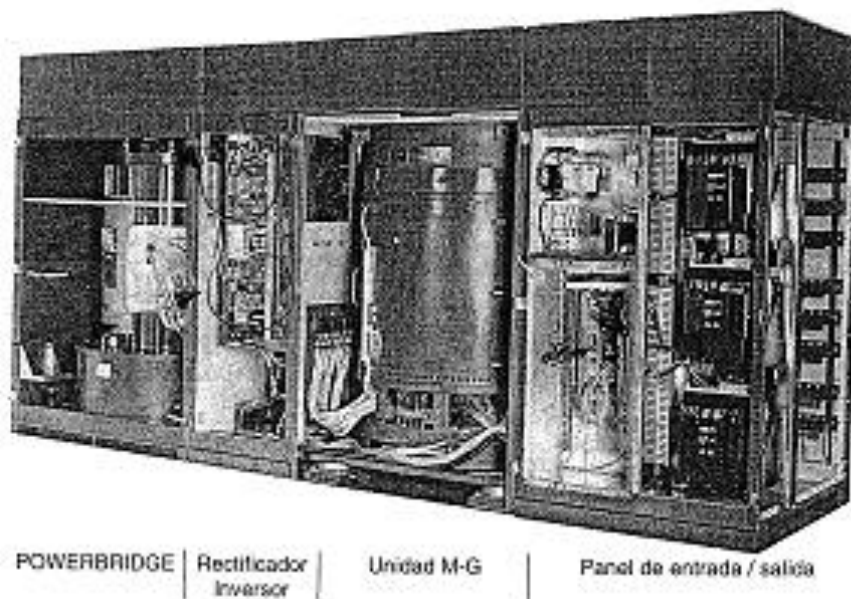


Figura 2.11 Vista general de l'equip Uniblock-T

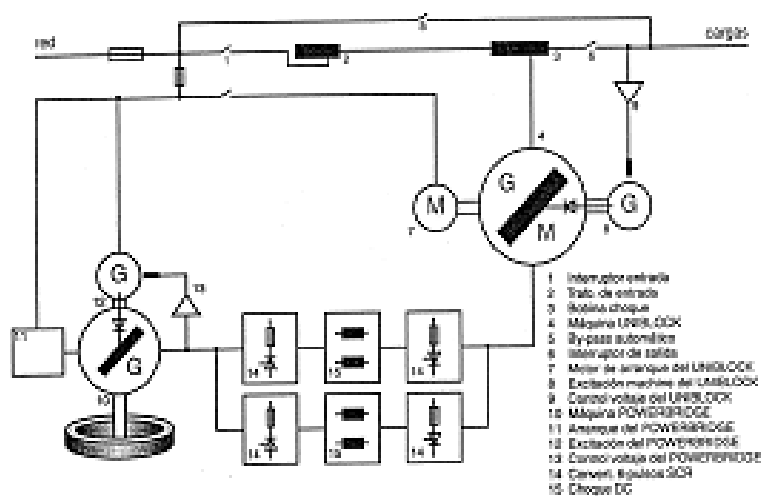


Figura 2.12 Esquema connexió acumulador PowerBridge

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Cal indicar que per poder arrancar el generador (màquina síncrona) i el motor/generador de l'acumulador (també màquina síncrona), el fabricant emprava un motor per cadascuna de les màquines de forma independent.

Aquest equip també és modular i es poden acoblar diferents equips fins obtenir la potència necessària de la càrrega.

Un altre exemple de recolzament és el sistema NO-BREAK KS del fabricant EURODIESEL. [I11]. És el més complexa dels exemples presentats. La part elèctrica s'acobla a un motor dièsel gràcies a un embragatge.

Inicialment, la màquina síncrona està alimentada des de la xarxa i l'acumulador d'energia gira de forma constant. Quan es produeix qualsevol defecte o perturbació com micro-talls, baixades de tensió o pèrdues de freqüència en curts períodes de temps, el volant d'inèrcia proporciona al generador l'energia necessària perquè s'alimenti la càrrega sense cap problema.

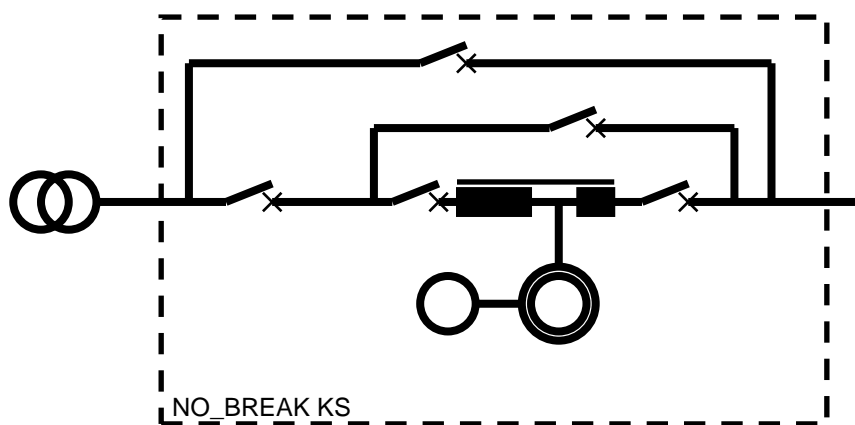


Figura 2.13 Esquema connexió acumulador No-Break KS

Quan el defecte dura més temps, el mateix volant d'inèrcia té prou energia per arrancar el motor dièsel. L'acoblament i l'arrancada del motor dièsel s'aconsegueixen per mitjà de l'embragatge. Llavors, un cop arrancat el motor dièsel, aquest proporciona l'energia per fer moure el generador i continuar subministrant corrent i tensió a la càrrega durant tot el temps necessari.

L'avantatge d'aquesta solució és l'autonomia del conjunt. Gràcies al motor dièsel, el conjunt pot proporcionar energia de forma il·limitat únicament condicionat per la quantitat de combustible del dipòsit. Com veiem, és un sistema complet però complexe.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

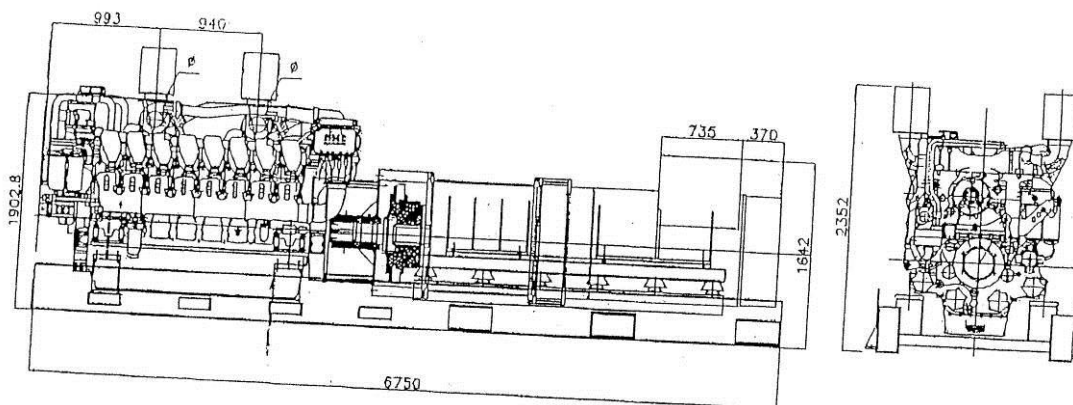


Figura 2.14 Vista general de l'equip No-Break KS

2.6.2. Estalvi energètic

En aquest modus de funcionament, l'acumulador emmagatzema energia quan la càrrega no la consumeix totalment. I quan hi ha manca d'energia, l'acumulador entrega l'energia que té emmagatzemada.

En aquest cas, la font principal d'energia subministra corrent a la càrrega. Si la càrrega té un consum oscil·lant gran, l'energia sobrant es recollida per l'acumulador que l'emmagatzema al volant de inèrcia. Quan la font principal no pot subministrar prou energia a la càrrega, llavors l'acumulador entrega l'energia que en manca.

Cal dir que en aquest mode de funcionament, l'acumulador no té energia en un primer moment i que cal esperar un cert temps perquè estigui carregat. el temps de càrrega pot variar segons sigui la quantitat d'energia sobrant.

Cal comentar que l'energia sobrant sempre ha de ser més gran que l'energia sol·licitada donat que el sistema acumulador té unes pèrdues i no genera energia extra.

Dins d'aquest mode de funcioanment, hi ha un cas d'especial interès. Algunes càrregues son tan variables que en alguns casos poden generar energia. Aquest seria el cas dels vehicles elèctrics. L'energia generada per la càrrega s'anomena energia regenerativa o recuperable.

Això passa quan els vehicles fan aturades. En aquest cas, el motor elèctric de tracció es comporta com a generador reduïnt la velocitat del vehicle i frenat el cotxe. L'energia generada pel motor es convertida pel sistema de tracció en una energia aprofitable, tan en tensió com en corrent. Aquesta energia recuperada es pot entregar al sistema d'alimentació (sigui catenària o bateria). Aquesta energia regenerada surt de l'energia cinètica del vehicle.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

L'acumulador POWERBRIDGE del sistema UNIBLOCK-T de l'empresa RWE Piller és un exemple de mode de funcionament d'estalvi energètic. [R28].

Quan es tracta de vehicles molt pesant (un tren, per exemple), els nivells d'energia són molt grans. Durant el procés de frenat d'un tren, la gran quantitat d'energia recuperada es pot aprofitar i emmagatzemar-se en un acumulador. I, durant el procés d'arrancada del tren, l'energia emmagatzemada a l'acumulador es pot entregar al tren i reduir el consum d'energia. La majoria dels trens cremen l'energia del frenat elèctric a unes resistències. Aquesta energia és una energia perduda i llançada.

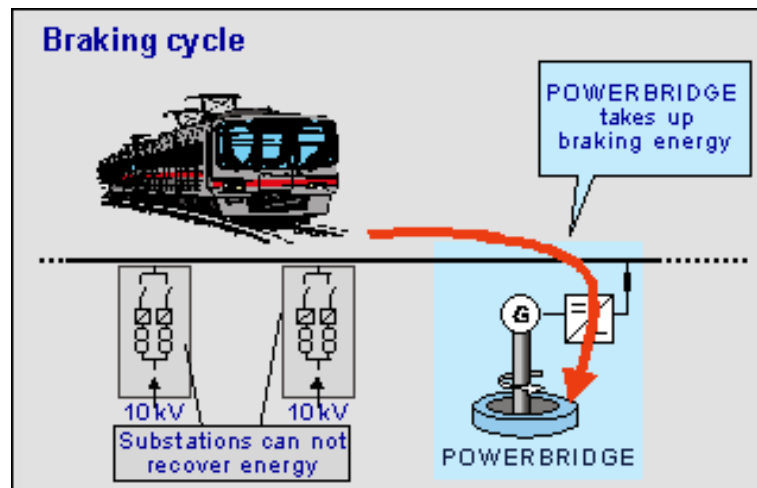


Figura 2.15 Representació recuperació d'energia amb l'acumulador PowerBridge

2.7. Altres sistemes d'acumulació d'energia

Hi ha una gran diversitat de sistemes d'acumulació d'energia aplicats al món actual. Els més coneguts són:

- Bateria electroquímica.
- Mecànics.
- Elèctrics.

Dins de les bateries electroquímiques, hi ha diverses tecnologies com: Supercondensadors, Ni-Cd, NiMH, Li-íó, Zn-Br, VRB, Plomb-àcid i NaS. Cada tecnologia té unes característiques pròpies.

Dins dels Acumuladors elèctrics hi ha els Condensadors i els Acumuladors d'energia magnètica amb superconductors (SMES).

Dins dels Mecànics hi ha els Emmagatzemen d'aire comprimit (CAES), Acumuladors mecànics (Volant d'inèrcia elèctrics i mecànics), Sistemes de bombeig d'aigua, Acumulador hidràulics, Energia potencial, etc...

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per poder comparar les diferents tecnologies i sistemes d'acumulació d'energia, es defineixen uns criteris bàsics com: Densitat d'energia, Potència, Temps de descarrega, Densitat de potència en continu, Eficiència, Cicles de vida i Cost.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

	CAES	Bombeig aigua	Volant d'inèrcia	Súper Condens.	Bateries VRB	Bateries Zn-Br	Bateries Pb-Àcid	Bateries Ni-Cd	Bateries NiMh	Bateries Li-ió	Bateries NaS
Densitat d'energia kWh/m3	----	0,9 a 1	1,9 a 20	1 a 25	12 a 13	40 a 50	20 a 90	30 a 90	100 a 105	120 a 125	90 a 500
Potència MW	10 a 102	15 a 1200	0,8 a 1,2	0,01 a 0,2	0,08 a 10	0,05 a 1,2	0,01 a 10	0,05 a 10	0,01 a 0,8	0,008 a 0,4	1 a 50
Temps de descàrrega (a ràtio de potència) en hores	6 a 80	7 a 50	0,06 a 0,09	0,004 a 0,005	7 a 9	2 a 8	0,009 a 5	0,8 a 6	0,8 a 6	0,04 a 6	6 a 8
Eficiència (sense control ni auxiliars)	46% a 48%	80% a 82%	90% a 98%	98%	80%	70% a 75%	70% a 75%	60% a 65%	80% a 90%	90% a 95%	85%
Vida útil a 80% de potència (en cicles)	105.000	100	800.000 a 1.000.000	1.000.000	80.000 a 100.000	80.000	200 a 1.000	1.000 a 50.000	800	5.000	8.000
Cost per unitat de potència en règim cont. (€/kW)	50 a 120				1.800 a 3.800	1500 a 3.000	1.000 a 2.000	1.600 a 3.800	2.100 a 4.800	2.000 a 4.500	1.800 a 2.500
Cost per unitat d'energia en règim cont. (€/kWh)	20 a 110	2.000			700 a 800	200 a 300	500 a 1.000	800 a 1.200	1.300	1.200	500

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS**

	CAES	Bombeig aigua	Volant d'inèrcia	Soper Condens.	Bateries VRB	Bateries Zn-Br	Bateries Pb-Àcid	Bateries Ni-Cd	Bateries NiMh	Bateries Li-ió	Bateries NaS
Cost per unitat de potència en règim inst. (€/kW)			250 a 300							230 a 250	
Cost per unitat d'energia en règim inst. (€/kWh)			800 a 3.500	10.000 a 20.000						800 a 2.000	

Taula 2.2. Comparació de diferents tipus acumuladors. [I10]

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

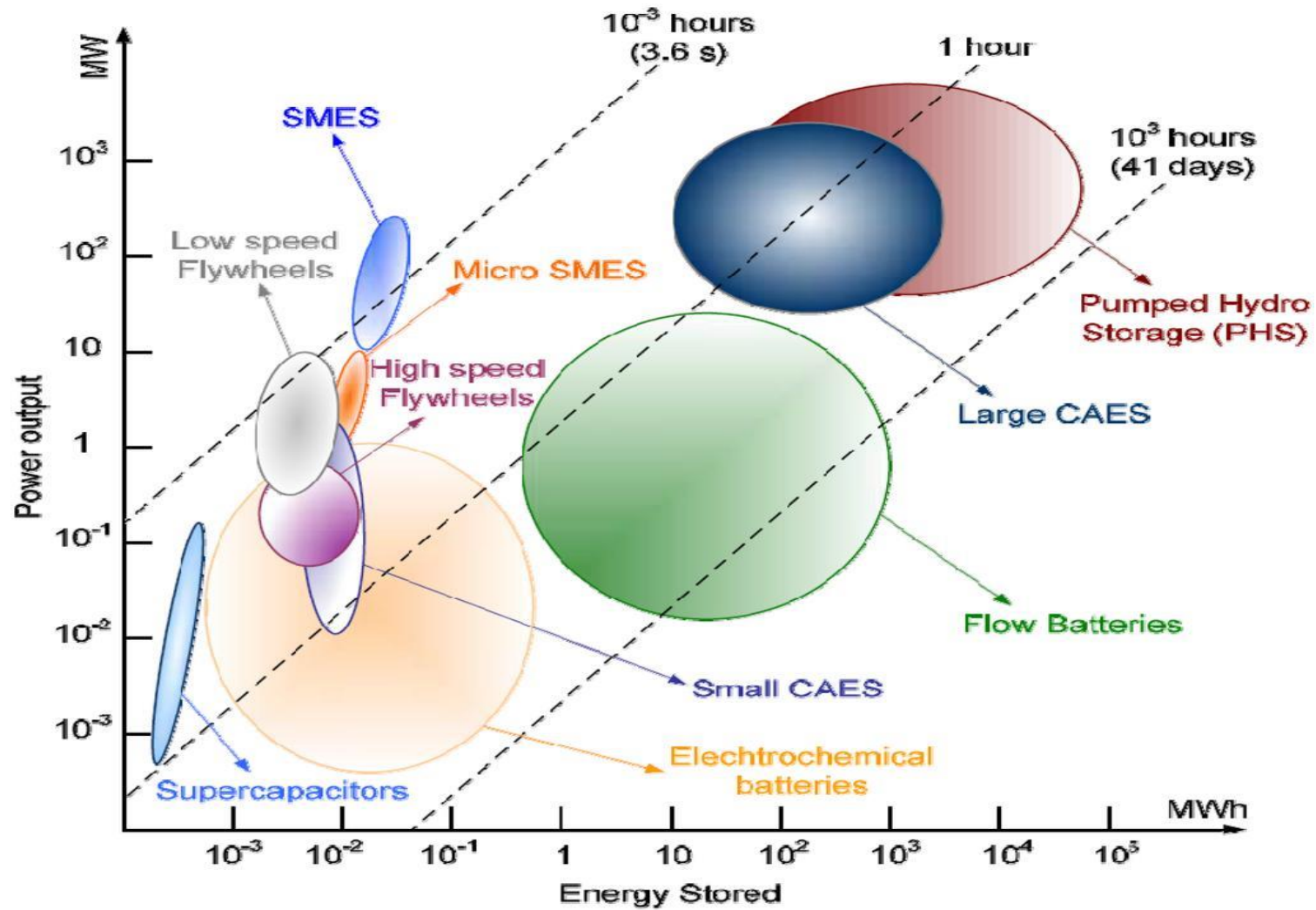


Figura 2.16. Representació de diferents acumuladors en funció de Energia emmagatzemable i Potència de sortida. [10]

2.8. Avantatges i desavantatges

Els acumuladors tenen avantatges i desavantatges respecte els altres sistema acumuladors. Anem a veure'ls.

2.8.1. Avantatges

L'acumulador pot emmagatzemar energia amb un gran nombre de cicles de càrrega i descàrrega (més de 20 milions de cicles segons tots els fabricants). Aquest és l'avantatge més gran dels acumuladors front les bateries electroquímiques.

Segons el tipus d'acumulador, la densitat d'energia emmagatzemable és superior a la de les bateries electroquímiques per igual potència d'emmagatzematge.

Encara que el cost inicial d'aquesta tecnologia sigui superior a la de les bateries electroquímiques, a la llarga és un cost molt inferior perquè tenen una major vida útil.

El manteniment d'aquest tipus d'acumuladors és inferior al de les bateries electroquímiques.

Els acumuladors poden treballar a tensions i freqüències diferents i diverses, no necessàriament han de treballar a corrent continu. Els acumuladors poden ajustar-se a les necessitats elèctriques gràcies als convertidors estàtics.

Els acumuladors en mode de funcionament d'estalvi energètic són més ràpids absorbint corrent del sistema que les bateries electroquímiques per igual potència d'emmagatzematge.

Els acumuladors són menys pesats que les bateries electroquímiques per igual potència d'emmagatzematge.

2.8.2. Desavantatges

Aquest tipus d'acumulador té varies limitacions donat. Unes per qüestions tècniques i altres per temes propis de l'acumulador.

Com totes les màquines elèctriques, el rendiment de l'acumulador és el resultat del rendiment d'un motor per el rendiment d'un generador (en el cas d'una única màquina). A més, la conversió electromecànica té un altr rendiment.

Qualsevol màquina elèctrica rotativa té el següent diagrama de blocs:

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

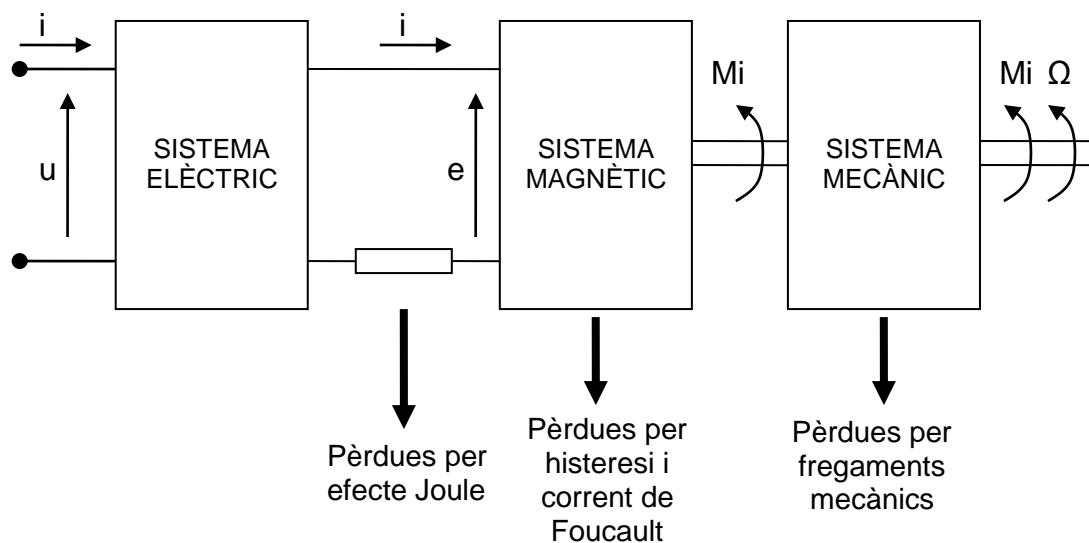


Figura 2.17 Diagrama de blocs d'un convertidor electromecànic

Segons la teoria de màquines elèctriques i de forma general, l'energia que es pren del sistema elèctric en un temps (dt), és:

$$W = \int U i \, dt \quad (\text{eq. 2.3})$$

on "U" és el valor instantani de la tensió i "i" el del corrent.

Com veiem, la limitació més important és el corrent instantani si la tensió es manté dins d'un rang. És a dir, una limitació en la potència instantània a absorbir per l'acumulador.

Per un altre costat, el volant d'inèrcia té pèrdues per fricció i aerodinàmica de fluids. Si l'acumulador té a més sistemes auxiliars pel seu funcionament com un sistema generador de buit, un sistema de suspensió, un sistema de guiat etc..., tots aquests també tindran pèrdues que es sumaran a les pèrdues de l'acumulador reduint el rendiment del conjunt.

2.9. Aplicacions dels acumuladors

Els acumuladors són més adients que els altres quan funcionen en mode d'estalvi energètic. Segons sigui l'entorn i el sistema, l'acumulador pot estar enfocat cap la potència, temps i rendiment correctes.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

I quan els acumuladors funcionen en mode de recolzament d'energia, també milloren en costos que els actuals sistemes d'emmagatzematge o sistemes secundaris de font d'energia.

2.10. Conclusió

L'acumulador presenta avantatges respecte altres mètodes en factors claus com cicles de funcionament, densitat d'energia i cost de manteniment. També tenen un cert avantatge en el pes, en la densitat de potència que pot absorbir i que admet una ample diversitat d'aplicacions.

Però el cost inicial d'un acumulador és més elevat que unes bateries electroquímiques. I encara que les pèrdues no son elevades, no es pot tenir emmagatzemat una energia un temps il·limitat. Al final, l'energia cinètica es consumirà en les pèrdues pròpies del volant.

D'altra banda, les qüestions de seguretat i fiabilitat son aspectes que s'han de tenir en compte segons sigui l'aplicació.

Encara que hi ha tecnologies sofisticades, la problemàtica de càrrega i descàrrega és la mateixa per tots els acumuladors, sigui quin sigui la tensió i corrent de funcionament.

Si orientem l'acumulador cap un mode funcionament de curt temps d'espera, de poca potència i poca capacitat d'emmagatzematge d'energia, l'acumulador tindrà molt més avantatges que desavantatges.

3. APLIACIÓ ALS TRANSPORTS

3.1 Transports terrestres

A aquest capítol, ens fixarem en els vehicles dels transports terrestres com: Cotxe, Autobús, Troleibús, Tramvia, Metro i Tren. I veurem, a més, el seu mode de comportament dins del seu entorn.

Dins d'aquest repàs dels mitjans de transports, ens fixarem en el temps d'aturada, en els temps entre dues aturades consecutives i en la freqüència d'aturades de cadascun d'ells. Això ens donarà una idea bàsica per saber si es pot aplicar un sistema acumulador d'energia en algun d'aquest tipus de transport.

Cal indicar que dins del grup dels cotxes, farem una distinció entre cotxe privat i cotxe públic o taxi. Aquesta diferència es deu a que el taxi té un nivell molt més elevat d'utilització respecte el cotxe privat.

La bicicleta no entra dins d'aquest estudi per tractar-se un mitjà de transport senzill, bàsic, de poc pes i de velocitats baixes front la resta de mitjans.

Començarem estudiant els vehicles de menor pes i acabarem amb els vehicles de major pes. Aquest ordre es deu a que durant el procés de frenat, l'energia en joc és l'energia cinètica de cada vehicle. Així tindrem un ordre de magnitud de l'energia que té cada vehicle o mitjà de transport en funció de la velocitat que adquireix.

3.1.1. Cotxe privat

El cotxe privat es mou per molts llocs i de forma molt diversa. Aquesta gran variabilitat fa impossible estudiar sota uns mateixos "paràmetres". Per aconseguir-ho, ens fixarem només en els trajectes dins de la ciutat.

A la ciutat, el cotxe es troba amb els semàfors durant el seu recorregut urbà. Els semàfors, que regulen el trànsit, provoquen aturades i engegades del cotxe. Aquest comportament es repeteix durant el trajecte del vehicle amb una freqüència molt variable. Un altre qüestió són les retencions de trànsit. Aquestes retencions augmenten la quantitat d'aturades i engegades.

Tal i com dèiem, si el cotxe privat surt de la ciutat i circular per vies ràpides, la quantitat d'aturades i engegades disminueix considerablement i inclús desapareixen respecte a un trajecte urbà. Aquesta és la raó per la que només contabilitzen els trajectes del cotxe dins de la ciutat.

Encara que ens centrem amb un trajecte urbà, hi ha altres factors, que influencien en el cicle de funcionament, com són: Tipus de conducció (ecològic, agressiu, normal, ...), Tipus de recorregut (lineal, zig-zag, amb semàfors, sense semàfors, ...), Distància recorreguda (curta, mitjana, llarga, molt llarga, ...),

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Temps d'ús (per anar la feina, només caps de setmana, només vacances, ...), a més a més dels anteriors. Tenint tot això en compte, es fa impossible esbrinar un cicle repetitiu. Sense un cilce repetitiu constant i freqüent és fa difícil implantar un sistema d'emmagatzematge d'energia del frenat regeneratiu amb una eficiència i rendiment raonable.

3.1.2. Taxi

El taxi o cotxe públic té una variabilitat similar a la del cotxe privat. La diferència és en el temps d'ús. El taxi és molt superior a la del cotxe privat.

En aquest sentit, el taxi farà més quantitat de recorreguts urbans que extra urbans o fora de la ciutat. Per tant, la quantitat d'aturades i engegades és molt superior al del cotxe privat. És a dir, l'aplicació d'un sistema de frenat regeneratiu té més possibilitats d'implantar-se al taxi que en el cotxe privat.

Però un major ús no acaba d'ajudar per esbrinar si és eficient i rentable afegir un sistema d'emmagatzematge d'energia del frenat regeneratiu. En aquest sentit, la flota de vehicles híbrids el sector del taxi ha augmentat en aquests darrers anys. Segons el propis taxistes, l'estalvi de combustible d'un vehicle híbrids està als voltants del 6% respecte a un vehicle no híbrid.

3.1.3. Autobús

Dins del serveis de transport públics per autobús, nosaltres ens centrarem en el bus urbà. Aquest vehicle realitza trajectes dins de la ciutat (encara que depèn de la línia a realitzar). Al ser un vehicle urbà, pateix les conseqüències del trànsit, és a dir, aturades i engegades degudes als semàfors o a les retencions. A més, cal afehir les aturades i engegades pròpies de les parades de la línia. Normalment, les parades estan allunyades entre 600 i 1.000 metres. Com veiem els autobusos tenen una variabilitat més restringida que els taxis.

I els autobusos tenen un major pes. Un major pes augmenta l'energia cinètica que es pot recuperar del procés de frenat. Això fa que aquest mitja de transport tingui majors possibilitats d'aplicació d'un sistema acumulador d'energia embarcat.

Desgraciadament, els autobusos amb motor de combustió son majoria dins la flota d'autobusos dels sistemes de transport públic. Encara hi ha pocs autobusos elèctrics o híbrids en servei comercial regular.

3.1.4. Troleibús

Encara que el troleibús és molt similar al autobús, la diferència principal radica en la seva font d'alimentació i el seu sistema de tracció. Mentre que l'autobús disposa d'un dipòsit amb combustible (font d'energia), el troleibús està connectat a un sistema d'alimentació exterior com és la catenària. Aquesta

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

diferència tampoc es suficient per implantar un sistema acumulador d'energia en un trolebus.

3.1.5. Tramvia

El tramvia és un mitjà de transport urbà superficial que realitza trajectes pels carrers de la ciutat amb una plataforma exclusiva de circulació. A més, el tramvia disposa d'un sistema de prioritat semafòrica. Tot plegat fa que el tramvia no pateix tantes aturades degut als semàfors o retencions de trànsit, com l'autobús. Això permet que el tramvia aconseguix una velocitat mitja més elevada que l'autobús.

Com l'autobus, el tramvia també s'atura a les parades de la línia que estan allunyades entre 600 i 1.000 metres de distància.

Per altre costat, el tramvia té una major capacitat de passatgers que l'autobús normal. I això fa que el tramvia tingui un pes més elevat que l'autobús.

Com veiem, aquest mitjà de transport encara té més possibilitats que l'autobús per implantar un sistema acumulador d'energia capaç d'aprofitar el frenat regeneratiu. Una major massa i una menor fricció de les rodes fa que l'eficiència i rendiment sigui més adient que l'autobus.

3.1.5. Metro

El metro és un mitjà de transport que realitza els seus trajectes per "camins" completament independents que els anteriors mitjans. Normalment, el metro circula per "camins" específics sense semàfors ni retencions i només s'aturen a les estacions de la línia.

Les parades del metro estan allunyades entre 1.000 i 2.000 metres i el metro pot assolir velocitats properes a 80km/h. Tot plegats fa que la velocitat mitja del metro sigui molt superior que la velocitat mitja del tramvia.

Aquest vehicle té un pes molt gran i pot assolir una velocitat molt superior. Això fa que la implantació d'un sistema acumulador d'energia tingui moltes possibilitats que la resta de mitjans.

3.1.6. Tren de rodalies

El tren de rodalies és un mitjà de transport que realitza trajectes per "camins" completament independents. Normalment els camins son exteriors i només s'aturen a les estacions de la línia.

La xarxa de rodalies està feta per recollir la població dels voltants cap el centre de la ciutat principal. Normalment les distàncies de les estacions del tren de rodalies, fora de la ciutat, son entre 3.000 a 5.000 metres. Això fa que assoleixi

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

velocitats màximes fins a 120km/h. Desgraciadament, dins de la ciutat, els trens de rodalies van per túnels i les estacions no estan tan allunyades (uns 2.000 metres). I la velocitat màxima del tren es redueix a 80km/h o menys.

Tant el metro com el tren de rodalies, són els dos vehicles de transport que tenen el pes més alt de tots els mitjans de transport terrestres.

3.1.7. Aturades

Aquest estudi inclou el temps d'aturada de tots els mitjans. És a l'aturada del vehicle quan el sistema d'acumulador d'energia pot emmagatzemar i estalviar.

Si ens centrem en els temps d'aturada, cal tenir present el següent:

- el cotxe privat, el cotxe públic i l'autobús, s'aturen els semàfors un temps mig de 20 segons.
- l'autobús, el tramvia, el metro i el tren s'aturen a les parades o estacions. En el cas de l'autobús i el tramvia, el temps d'aturada a les parades és de 22 segons (valor mig aproximat). En el cas del tren, el temps d'aturada a la parada pot arribar a 45 segons.
- el cotxe privat no realitza aturades a cap parada o estació.
- el cotxe públic s'atura al punt inicial i final del servei comercial. No té parades intermitges.
- el temps d'aturada d'una retenció és molt variable i difícil de quantificar.

En condicions normals i dins de la ciutat, els vehicles s'aturen i continuen la marxa de forma repetida, com si fos un cicle repetitiu de freqüència molt variable. Però si ens fixem amb uns tipus de transport com el tramvia, el metro o l'autobús, els cicles repetitius no són tan variables i comencen a tenir certa freqüència i constància.

És en aquesta repetició constant d'aturades i engegades on poden aplicar-se sistemes d'estalvi d'energia (sigui sistema acumulador d'energia) o sistemes regeneratius d'energia.

3.1.8. Resum

A la taula següent, s'han identificat els vehicles dels mitjans de transports urbans segons uns paràmetres bàsics per poder comparar i analitzar la implantació de sistemes acumuladors d'energia.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Tipus de mitjà	Variabilitat del seu trajecte	Afecció pels semàfors	Temps d'aturada (aprox.)	Velocitat màxima.	Hores de funcionament	Afecció per les retencions	Distància entre aturades/parades o estacions
Cotxe	Molt gran	Si	20s	50km/h	Molt baix	Si	-----
Taxi	Gran	Si	20s	50km/h	Mig	Si	-----
Autobús	Mitja	Si	25s	50km/h	Alt	Si	700m
Tramvia	Baixa	Si/No	22s	50km/h	Alt	No	800m
Metro	Molt baixa	No	30s	80km/h	Alt	No	1.500m
Tren	Molt baixa	No	45s	120km/h	Alt	No	2.500m

Taula 3.1 Resum cicles de funcionament dels mitjans de transport

3.1.9. Conclusió

Com veiem, els metros i trens son els vehicles amb més pes i amb velocitat més alta. Dos factors importants per la quantitat d'energia. També son els mitjans de transports on el cicle d'aturada i engegada es repeteix amb una freqüència similar i sense gaire variació.

Els tramvies també tenen un pes elevat però la velocitat no és tan elevada com els trens o metros. Ara bé, els tramvies tenen una gran repetició de cicle d'aturada/engegada, gaire bé com els metros i trens.

Aquests tres vehicles tenen moltes més possibilitats de poder-se implantar un sistema acumulador d'energia. La resta de vehicles tenen una gran variabilitat i és molt difícil aconseguir uns cicles "repetitius" i freqüents.

Dels vehicles més lleugers, l'autobús (o el troleibús) seria el vehicle amb més probabilitats d'instal·lació però encara seguiria patint les conseqüències del tràfic (aturades i engegades, semàfors, parades, retencions de circulació, etc...) durant tot l'horari de servei comercial. La resta de vehicles lleugers (cotxes privats i públics) tenen massa variabilitat com per poder optar a una implantació d'un sistema acumulador.

Si volem aplicar un sistema acumulador d'energia i que aquest sigui rentable, cal fixar-se en vehicles de transport públic que tinguin: Un pes alt, una velocitat màxima alta i una baixa variabilitat. La variabilitat engloba aspectes com: servei comercial cíclic, repetitiu, sense variacions, amb moltes hores de funcionament i sense imprevistos (com retencions, ocupacions de via pública, etc...).

De la taula resum, escolliríem els mitjans de transport com el tramvia, metro o tren. Per tant, aquest estudi es centrarà en aquests mitjans de transport.

El tramvia, metro i tren elèctric s'ha alimenten d'una subestació transformadora. Si la subestació transformadora disposa d'un sistema recuperador de l'energia, el tren o metro pot entregar l'energia regenerada pels motors elèctrics per mitjà de la catenària. I aquesta energia regenerada pot ser emprada per altres tramvies, metros o trens dins de la mateixa zona d'influència.

Ara bé, si les subestacions transformadores de corrent continu només tenen díodes rectificadors com sistema d'alimentació, els mateixos díodes impedeixen el frenat regeneratiu ja que no pot circular corrent en sentit contrari. Per tant, si no hi ha un altre unitat al mateix tram de catenària que pugui absorbir l'energia de frenat, l'energia regenerada (i entregada pel vehicle que frena) es perd. Això pot suposar un 60% d'energia perduda de les frenades potencialment regeneratives. [3].

Últimament s'instalen subestacions transformadores amb equips que poden recollir l'energia regenerada per un tren durant el procés de frenat. Aquests sistemes permet estalviar una part d'energia consumida per la tracció dels trens, metros o tramvies.

3.2. Energia en joc

Com deiem abans, la velocitat màxima és un factor clau. Per tenir un ordre de magnitud, la Taula 3.2 mostre l'energia teòrica que s'allibera al sistema de frens de cada vehicle quan frena des d'un velocitat concreta fins a aturar-se del tot. Nota: Els càlculs consideren que el vehicle circula a una velocitat i frena, de forma constant i uniforme, fins aturar-se del tot. Cal indicar que aquests valors teòrics i ideals, és a dir, ens donar una idea de l'energia que es transforma en calor en els frens.

Velocitat km/h	COTXE 1.200kg	FURGONETA 3.000kg	AUTOBUS 9.000kg	TRANVIA 38.000kg	TREN 230.000kg
10	4.630	11.574	34.722	146.605	887.346
20	18.519	46.296	138.889	586.420	3.549.383
30	41.667	104.167	312.500	1.319.444	7.986.111
40	74.074	185.185	555.556	2.345.679	14.197.531
50	115.741	289.352	868.056	3.665.123	22.183.642
60	166.667	416.667	1.250.000	5.277.778	31.944.444
70	226.852	567.130	1.701.389	7.183.642	43.479.938
80	296.296	740.741	2.222.222	9.382.716	56.790.123
90	375.000	937.500	2.812.500	11.875.000	71.875.000
100	462.963	1.157.407	3.472.222	14.660.494	88.734.568
110	560.185				107.368.827

Taula 3.2. Taula d'energies cinètiques (en Jouls) de diferents vehicles a diferents velocitats

Com es pot veure, a mida que augmenta la velocitat, major energia cinètica té el vehicle. I també, quan més pes, major energia. Encara que el càlcul d'energia alliberada sigui molt teòric, veiem que el tren és el vehicle que allibera més energia perquè té un pes elevat i una major velocitat.

Si escollim l'exemple del tren o metro (el pes pot variar segons la composició de la unitat) i que pot arribar a pesar uns 230.000kg, quan circula a 20km/h, té una energia a prop de 3,5MJ. I quan circula a una velocitat de 110km/h, té una energia als voltants de 107MJ.

Els valors d'energia obtinguts son independents de com ho fa el vehicle per aturar-se. Però a la realitat no és així. El sistema de fre està dissenyat per dissipar el calor o l'energia. Quan un tren s'atura a poc a poc, els frens poden dissipar l'escalfor sense gaires problemes gràcies als discos auto-ventilats. Quan un tren s'atur de forma urgent, la gran quantitat d'escalfor a dissipar pot provocar greus problemes. Els discos de frens i les pastilles s'escalfen tan que poden assolir temperatures molt altes i posar-se "al roig viu". Quan els trens o metros elèctrics frenen, fan servir primer el sistema de fré elèctric i, com a últim recurs, el fré mecànic o pneumàtic. El fré elèctric consisteix en dissipar l'escalfor en unes resistències de fré especialment dissenyades per aquesta tasca.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Anem a estudiar un cas com exemple. Si un cotxe que circula a una velocitat de 108km/h (30m/s) i pitja el fre i suposem que el procés de frenada és de uns 10 segons, llavors es produeix una desacceleració (constant idealment) i alliberen uns 540kJ en total (fins aturar-se).

Quan el vehicle és més pesat, la quantitat d'energia és molt més important. Si un tren de 90.000kg de pes circula a uns 250km/h (uns 70m/s), llavors s'alliberen uns 220,5MJ (càlcul teòric).

Però l'energia dissipada en el primer segon del procés de frenada és de uns 102kJ (un 19% de l'energia total). I l'energia alliberada en els primers 4 segons és de uns 270kJ (un 50% de l'energia total). Per tant, en els 6 segons restants, es dissipa l'altre 50% de l'energia. Aquests càlculs teòrics es poden apreciar millor en la Figura 3.1.

Com veiem, durant els primers moments s'allibera molta energia del procés de frenada. Per tant, si volem que l'acumulador estalviï energia, aquest ha de poder recollir una gran quantitat d'energia en pocs instants. És a dir, els acumuladors han d'estar dissenyats i calculats per carregar-se amb una gran quantitat d'energia amb molt poc temps.

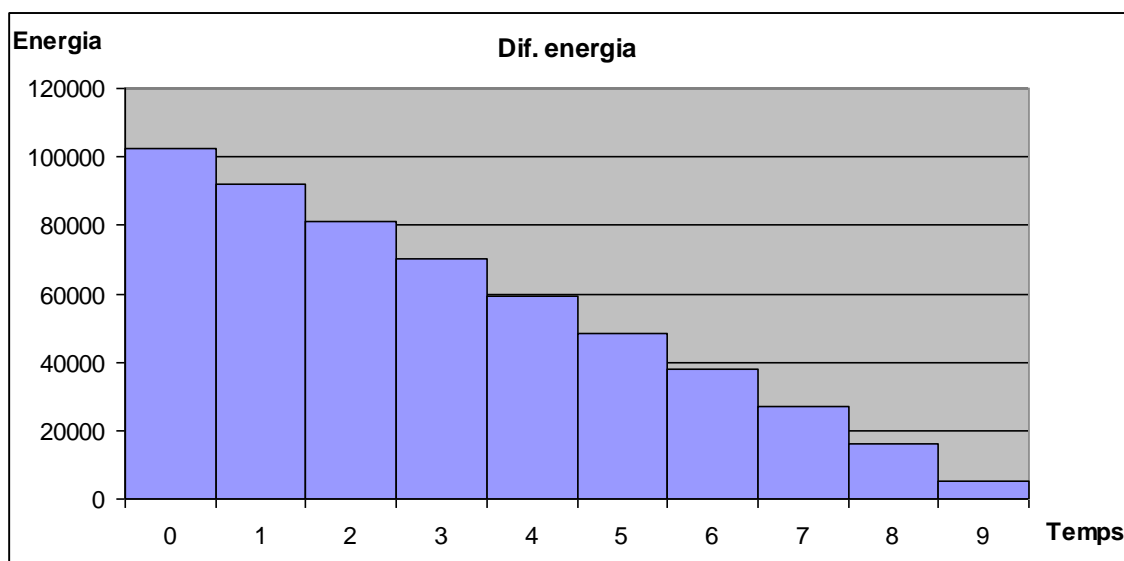


Figura 3.1. Energia teòrica alliberada per un cotxe en cada segon.

Realment la conversió d'energia es realitza a la màquina elèctrica. És a dir, la màquina elèctrica és qui recull l'energia. En altres paraules, el problema de la càrrega es tradueix en uns valors de tensió i corrent molts elevats en un curt període de temps.

En el cas dels sistemes de frens mecànics, la majoria estan limitats per la capacitat que tenen de dissipar l'escalfor que es produeix. A vegades, quan es supera el límit de calor, els discos de frens perden la seva forma inicial i es

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

torcen o doblegen la superfície de fricció. Quan els discos han superat aquest límit tèrmic, la seva superfície no es plana i les pastilles no s'acoblen bé i la capacitat de frenat es redueix.

En el cas del sistema de fre elèctric, les resistències s'ubiquen al sostre i tenen una gran superfície d'intercanvi de calor.

3.3 Potència mitja i instantània

Continuant amb el problema de la quantitat d'energia en els primers instants, anem a fer un estudi teòric sobre la potència en els primers moments.

Les hipòtesis teòriques per poder fer uns primers càlculs són les següents:

- Tota l'energia es transforma sense pèrdues en potència i de forma constant.
- Les masses rotants dels vehicles no es tenen en compte.
- Durant el temps que triga a aturar-se, el procés és constant i uniforme.
- El recorregut és lineal i sense pendent.
- El procés de fre és constant i s'aplica el fre de servei (amb desacceleracions constants i inferiors a 2m/s^2).

Si el cotxe de 1.200kg que circula a 30m/s (108km/h), triga 10 segons en aturar-se, haurà recorregut uns 150m . Durant aquest procés, s'hauran alliberat 540kJ . Així doncs, la potència dels frens serà de 54kW .

Si no importa com és el procés d'alliberament de l'energia, a l'hora de calcular la potència, aquesta sí que està condicionada pel com es fa.

Ara fem els mateixos càlculs però mirant uns altres vehicles de transport com el tramvia, metro o tren. El primer de tot és saber les distàncies de frenada d'aquests tipus de transport (posem les més estàndards).

A mida que augmenta el temps d'aturada, augmenta la distància de frenada. És a dir, el tramvia necessita 3 vegades més de distància de frenada quan dupliquem la velocitat. En el cas del tren, donat que és molt més pesant, la distància de frenada és molt més llarga.

TEMPS DE FRENADA (s)								
Velocitat km/h	30	40	50	60	70	150	200	250
TRAMVIA 38.000kg	6,1	7,8	9,5	11,2	13,7			
TREN 230.000kg	15	20	25	30	35	75	100	150

Taula 3.3. Temps de frenada a diferents velocitats

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Un cop esbrinats els temps, ja podem saber la potència mitja degut a l'energia alliberada pels sistemes de frens.

De la Taula 3.4 destaquem que el tramvia a 30km/h fa una potència teòrica d'escalfament de 217kW mentre que a 70km/h, en fa una de 525kW. I en el cas del tren, quan s'atura a 70km/h, allibera un calor de 1,24MW, a 150km/h, allibera calor a prop de 2,66MW, i a 200km/h, allibera 3,55MW i a 250km/h, una de 3,69MW.

POTÈNCIA TEÒRICA DISIPADA EN CALOR DURANT LA FRENADA (W)								
Velocitat km/h	30	40	50	60	70	150	200	250
TRAMVIA 38.000kg	217.300	300.960	385.640	469.888	525.120			
TREN 230.000kg	709.877	887.346	887.346	1.064.815	1.242.284	2.662.037	3.549.383	3.697.274

Taula 3.4. Potències teòriques dissipades en calor durant la frenada a diferents velocitats

Aquestes potències son potències teòriques durant tot el temps que triga en frenar el vehicle. El temps d'aturada és molt curt per que s'aplica el màxim fre de servei i, per això, son les distàncies mínimes de frenada.

Fins ara només hem calculat, de forma teòrica, la potència que allibera el sistema de frens quan atura el vehicle durant tot el temps que triga en aturar-se. Però, igual com passa amb l'energia, que la major quantitat d'energia es desenvolupa al inici del procés, la potència també serà major al principi del procés.

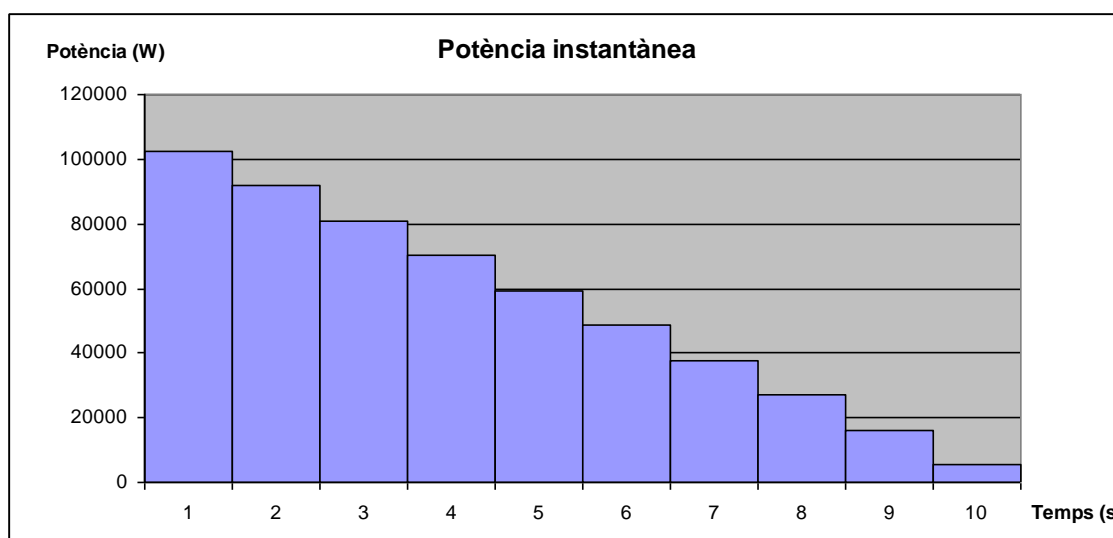


Figura 3.2. Potència teòrica alliberada per un cotxe en cada segon.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Continuant amb l'exemple del cotxe, que circula a 108km/h i frena de forma constant fins a aturar-se, recorrent una distància de 150 metres durant 10 segons. Durant aquest procés allibera una energia de 540kJ, que en potència mitja son 54kW. A la Figura es pot veure la potència instantània en cada segons. Igual que amb l'energia, la major potència instantània es produeix als primers instants. Aquesta potència instantània és la potència màxima o de pic que l'acumulador d'energia ha d'esser capaç de absorbir i emmagatzemar.

3.3.1. Valors d'energia

Per poder emprar l'acumulador, cal saber l'energia que pot arribar a dissipar durant el procés de frenada. L'energia dissipada per un mitjà de transport quan s'atura des d'una certa velocitat és la següent:

$$E = E_1 - E_0 = 0 - \frac{1}{2} * m * v^2$$

On m és la massa i v és la velocitat.

D'inici, veiem que la velocitat està al quadrat, per tant, l'energia augmenta quadràticament amb l'augment de la velocitat.

De la llista inicial de mitjans de transports, la bicicleta i la moto queden fora d'aquest estudi pel seu poc pes i, en conseqüència, per la seva petita capacitat de generar energia a partir del frenat. Per demostrar aquesta primera eliminació, anem a veure uns exemples.

Primer exemple: Una bicicleta amb conductor té un pes total de 90kg. Si circula a 40km/h i frena fins aturar-se, l'energia alliberada és:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 90 * (40 * 1000 / 3600)^2 = \\ = 5.555J \approx 5,55kJ$$

Segon exemple: Una moto amb conductor té un pes de 200kg. Si viatjant a 80 km/h i frena fins aturar-se, l'energia alliberada és:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 200 * (80 * 1000 / 3600)^2 = \\ = 49.382,71J \approx 50kJ$$

Tercer exemple: Un cotxe amb un pes de 1.200kg viatja a 80km/h. Si frena fins aturar-se, l'energia alliberada és:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 1.200 * (80 * 1000 / 3600)^2 = \\ = 296.296,296J \approx 300kJ$$

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Quart exemple: Una furgoneta amb un pes en buit de 3.000kg. Si frena des de 80km/h fins aturar-se, allibera la següent quantitat d'energia:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 3.000 * (80 * 1000 / 3600)^2 = 740.740,74J \approx 740,7kJ$$

Cinquè exemple: Un autobús amb un pes en buit de 9.000kg. Si frena des de 80km/h fins aturar-se, allibera la següent quantitat d'energia:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 9.000 * (80 * 1000 / 3600)^2 = 2.222.222,22J \approx 2,22MJ$$

Si agrupem aquests exemples en un sol gràfic i suposem que tots poden arribar a la velocitat teòrica de 100km/h, llavors les energies que dissipen durant el procés de frenat els diferents vehicles a cada velocitat son corbes de segon grau (quadràtiques).

A la Figura 3.3 s'observa que la bicicleta i la moto tenen uns nivells d'energia molt baixos comparats amb la resta de mitjans. Per aquesta raó, queden fora de l'estudi d'aquest treball.

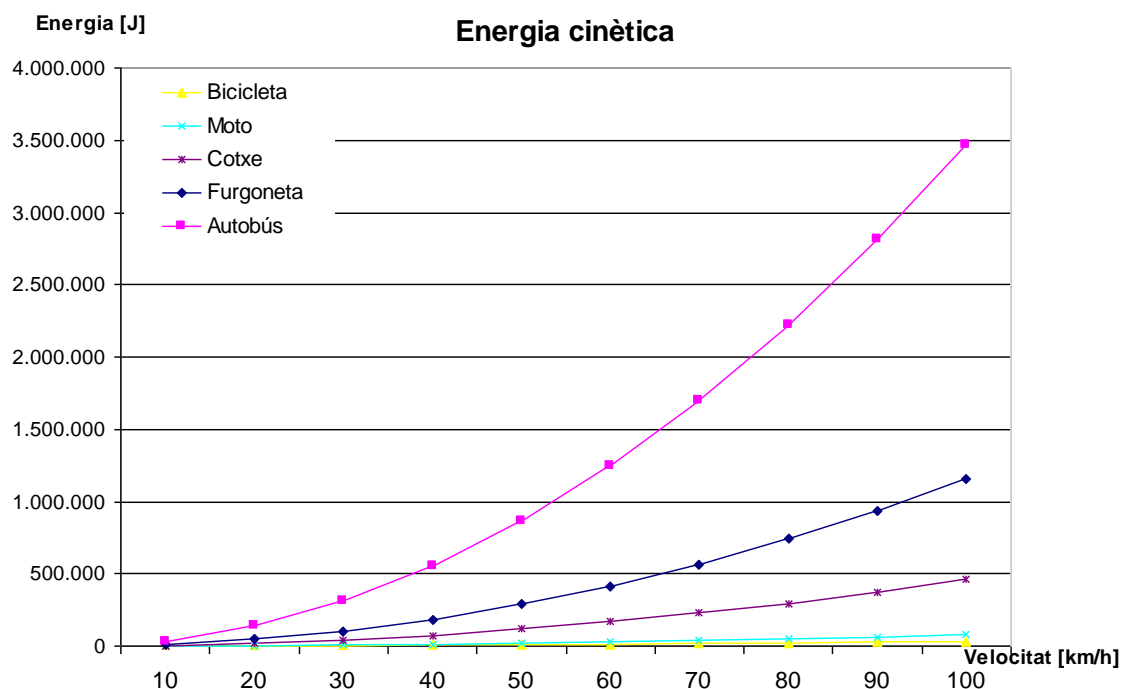


Figura 3.3. Corbes d'energia cinètica en funció de la velocitat i del pes del vehicle.

En una segona observació del gràfic, veiem que, a mida que augmenta la massa del vehicle, l'energia creix de forma lineal (tal i com diu l'equació).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Si ampliem l'estudi als vehicles més pesats, com per exemple un tramvia o tren, veiem que el nivell de energia augmenta considerablement.

Exemple Tramvia: Un tramvia, que circula a la velocitat de 80km/h, amb un pes en buit de 38.000kg allibera, en el sistema de frenat fins aturar-se, la següent energia:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 38.000 * (80 * 1000 / 3600)^2 = 9.382.716,04J \approx 9,4MJ$$

Exemple Tren: Un tren, amb un pes en buit de 230.000kg, frena des de 89km/h fins aturar-se. L'energia alliberada és:

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 = \frac{1}{2} * 230.000 * (80 * 1000 / 3600)^2 = 56.790.123,34J \approx 56,8MJ$$

Si representem l'energia d'aquest dos exemples, observem que l'energia alliberada és molt gran.

Si extrapolem a velocitats superiors a 100km/h, veiem que l'energia d'un autobús de 9.000kg de pes circulant a 140km/h, és de 6,8MJ. Si fem la mateixa extrapolació amb un tramvia de 38.000kg de pes, s'obté una energia de 57MJ. I en el cas d'un tren de 230.000kg de pes, s'obté una energia de 174MJ.

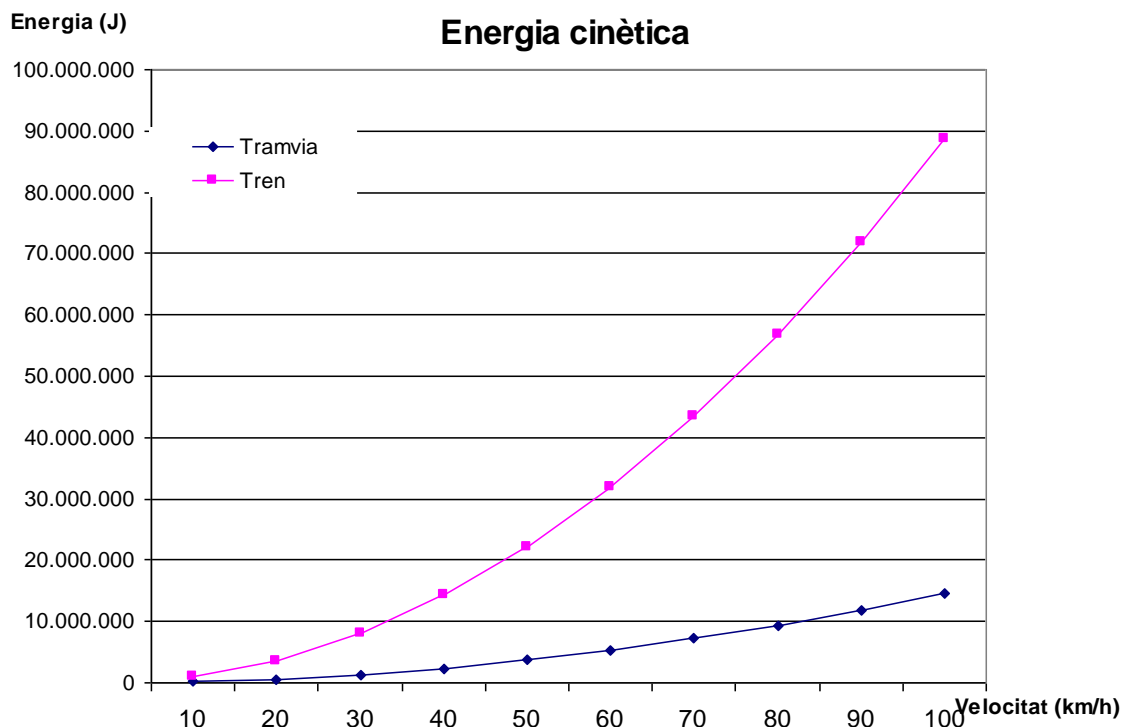


Figura 3.4. Corbes d'energia cinètica en funció de la velocitat i del pes del vehicle.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la realitat, el tramvia urbà no pot sobrepassar la velocitat de 50km/h pel codi de circulació. I, un autobús (urbà o extra urbà), tampoc pot excedir la velocitat de 100km/h. Ara bé, un tren extra urbà, sí que pot arribar als 120km/h i fins i tot a 140km/h de velocitat.

Com veiem en els diferents gràfics, l'energia alliberada per aquests vehicles de transport públic és important. Sobre tot, quan la massa és més gran i la velocitat és alta.

3.3.2. Valors instantanis

Després de l'estudi inicial d'energies, ara anem a calcular les energies instantànies en un moment concret del procés de frenat.

Una primera aproximació, consisteix en dividir el temps del frenat en fraccions d'un segon. Després podem calcular l'energia i la potència que es dissipa en cada segon.

Si calculem l'energia instantània de frenat d'un cotxe, considerant que l'acceleració de frenat és constant i uniforme durant tot el moment de frenat, llavors la representació gràfica de l'energia en cada segon es pot veure a la Figura 3.5.

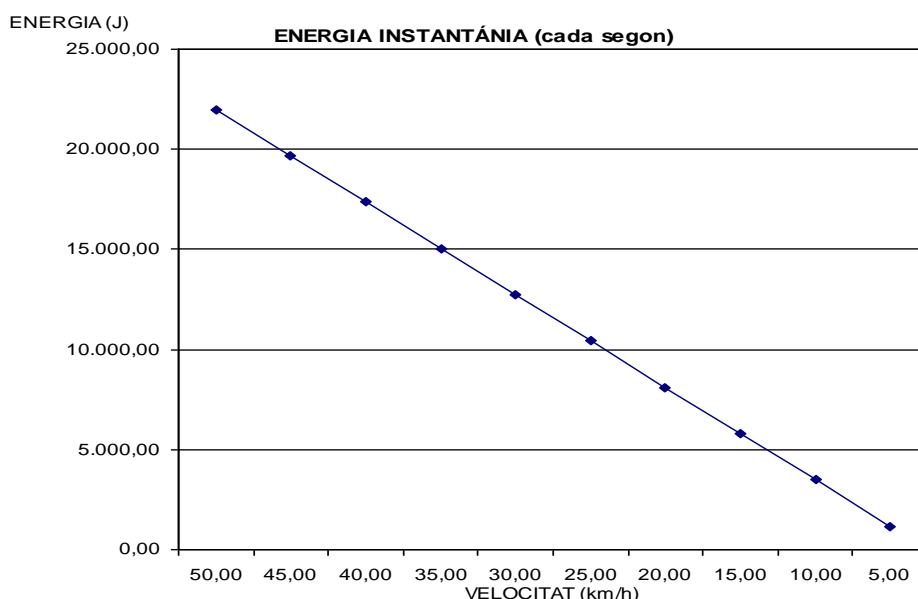


Figura 3.5. Energia cinètica instantània d'un cotxe en funció de la velocitat.

Observem que la major quantitat d'energia es dissipa durant els 4 primers segons del procés de frenat. És a dir, un 64% del total de l'energia del frenat és concentra en els primers 4 segons.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La potència total desenvolupada, en el procés de frenat d'un cotxe de 1.200kg de pes, que circula a 50km/h i s'atura en 10 segons, és:

$$P = E / t = 115.740,7 / 10 = 11.574,07W \approx 12kW$$

Ara bé, si calculem la potència en el primer segon del procés de frenat observem que és de:

$$P = E_1 / t = 21.990,74 / 1 = 21.990W \approx 22kW$$

Es pot veure que, la potència dissipada és quasi el doble que la potència mitja, al primer segon del procés de frenat. Com veiem, no és gens menys preable i convida a fer un estudi més profund.

Anem a repetir els càlculs d'energia instantània de frenat però ara amb un tramvia que pesa 38.000kg. Si aquest tramvia triga uns 15 segons a aturar-se des de 50km/h, considerant que la desacceleració de frenat és constant i uniforme durant tot el moment de frenat, llavors la representació es pot veure a la Figura 3.6.

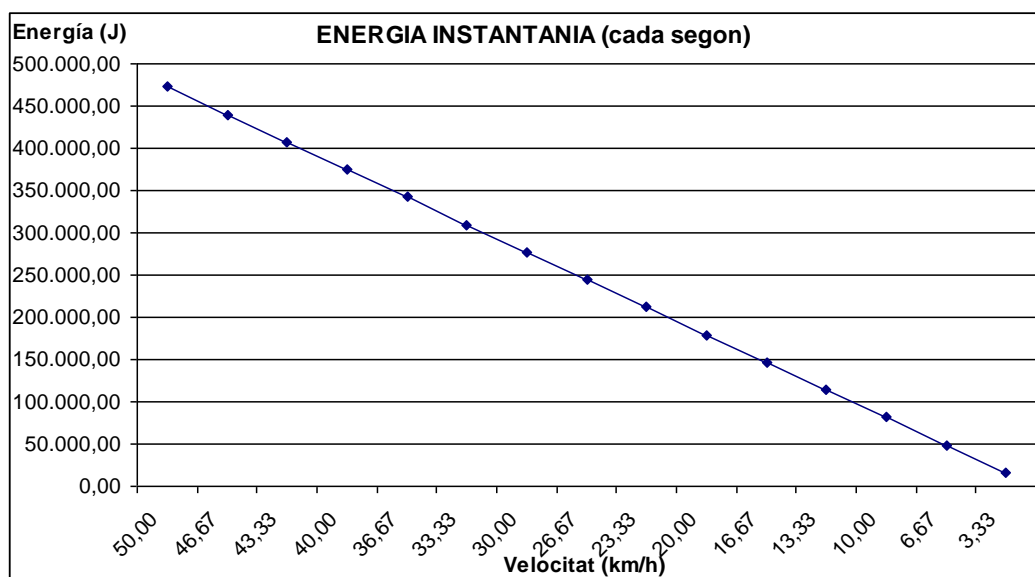


Figura 3.6. Energia cinètica instantània d'un tramvia en funció de la velocitat.

Igual que en el cas del cotxe, el tramvia dissipa la major quantitat d'energia en els primers 6 segons del procés de frenat (dels 15 segons que triga en aturar-se), uns 2,34MJ, és a dir, el 64% de tota l'energia de frenat.

I la potència total dissipada, al sistema de frenat, és:

$$P = E / t = 3.665.120 / 15 = 244.341W \approx 244kW$$

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Però com hem vist abans, aquesta potència no es dissipa de forma continua, si no gradual i proporcional a la energia d'aquell instant. Si l'energia dissipada en el primer segon, és de 472kJ, llavors, la potència produïda pel frenat és de 472kW (aproximadament).

Com podem veure, l'energia alliberada al primer segon es considerable i la potència instantània també.

Per tant, el procés de frenat és molt energètic i, actualment, pocs sistemes recuperen aquesta energia. Però encara que es pugui recuperar l'energia, cal veure si el procés de frenat és cíclic o no, si es repeteix amb freqüència o no, si l'energia de frenat és prou gran o no. Conèixer aquests paràmetres ens donarà el rendiment del sistema de recuperació i altre informació com eficiència, eficàcia, etc....

Centrant-nos als acumuladors, l'energia total que pot generar un vehicle de transport, degut a la seva energia cinètica, dimensiona la capacitat d'energia a emmagatzemar per l'acumulador. Per un altre costat, l'energia instantània ens indica el pic d'energia màxim que ha de "gestionar o tractar" el sistema acumulador (màquina elèctrica, interruptors, electrònica de potència, cablejat, connectors, etc...). El pic màxim d'energia a gestionar es tradueix com el corrent màxim que pot arribar a entregar el vehicle de transport en el primer instant del procés de frenat.

3.4. Cicles dels vehicles

A l'apartat anterior, hem vist com l'energia i la potència, en els primers instants del procés de frenat, son molt importants i gens menyspreable. Però aquesta energia (potència) no sempre és pot aprofitar, ja que hi han característiques pròpies del vehicles de transport que fan que tingui un rendiment alt o no, que el sigui rentable o no.

Ara analitzarem les característiques com cicles, repetició, freqüència, en condicions normals, de cadascun dels vehicles de transport públics. Un primer estudi serà veure el comportament d'alguns mitjans dins de la ciutat amb les limitacions i restriccions.

Un cop analitzat els diferents mitjans, omplirem una taula amb el resum de les característiques. Si volem aplicar un sistema de recuperació que aconseguixi un estalvi energètic, caldrà saber les millors opcions i medis. Per aquesta causa, no tindrem en compte la bicicleta.

3.5. Implantació a vehicles

Com veiem hi ha vehicles "candidats" per instal·lar un sistema de recuperació d'energia. Ara bé, només els sistemes petits es poden instal·lar dintre d'un vehicle com cotxe, bus, tramvia, metro, etc.... Ara anem a fer un petit repàs

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

dels sistemes i les seves fonts d'alimentació i que son: Pila de combustible, Acumulador i Grup electrogen.

Primer de tot, cal comentar que la Pila de combustible i el Grup electrogen son fonts que necessiten combustibles per funcionar. És a dir, necessiten d'un dipòsit per emmagatzemar el combustible per funcionar i, a més, el dipòsit cal instal·lar-lo al mateix vehicle. En el cas de la Pila de Combustible, els combustibles son el hidrogen i l'oxigen. En el cas dels grups electrògens, el combustible és dièsel (combustible fòssil).

Respecte l'Acumulador, aquest pot ser de dos tipus: Electroquímic i Cinètic. D'acumuladors químics o bateries hi han de: Plomb-Àcid (APb), de Níquel-Cadmi (Ni-Cd), de Níquel Metall Hidrur (NiMh), de Liti-í (Li-io), de Supercondensadors (SC), etc...

Cada tecnologia té característica singular versus la potència nominal i màxima així com el temps, rendiment i condicions de subministrament de l'energia.

Tots aquestes fonts d'energia tenen característiques diferents. D'inici, una primera diferència és l'aportació o no de combustible.

3.5.1. Fonts d'alimentació amb aportació de combustible

Per produir energia, la Pila de combustible i el Grup electrogen necessiten combustible. Sense combustible aquestes fonts no poden funcionar. Per tant, cal instal·lar un dipòsit de combustible (o dos) dins del vehicle. Evidentment, el funcionament d'aquestes fonts està limitat per la capacitat del dipòsit de combustible.

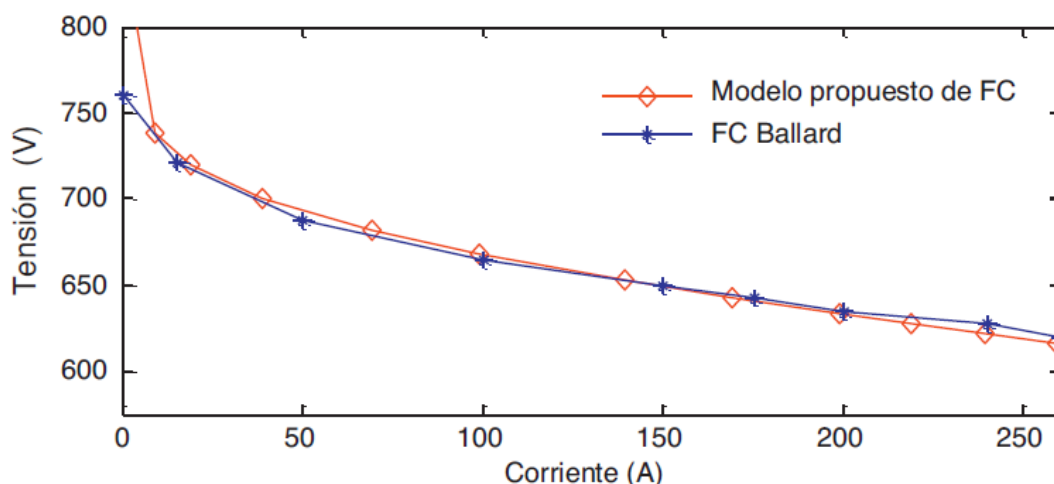


Figura 3.7. Corba estàtica de polarització de la pila de combustible Ballard de 150kW.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La Pila de combustible genera energia a mida que consumeix els gasos combustibles (hidrogen i oxigen). La producció d'energia és continua amb un corrent no gaire La producció d'electricitat està condicionada per la reacció entre oxigen i hidrogen. La membrana PEM té una capacitat limitada i no pot proporcionar més energia de la que permeti la membrana. Aquesta condició fa que no pugui subministrar pics de potència instantània per damunt del seu límit màxim. Veure Figura 3.7.

El Grup electrogen genera energia a mida que consumeix el combustible (combustible fòssil i oxigen). La producció d'energia és continua amb un corrent que depèn de la potència del motor dièsel (i de l'alternador en segon terme). És a dir, la demanda de potència instantània està limitada per la potència del motor tèrmic. Si la potència instantània supera la potència del motor, la font s'aturarà.

Respecte els motors tèrmics i els esglaons de potència, un motor tèrmic atmosfèric (sense turbocompressor) pot assumir un esglaó de potència de fins el 75% de la potència màxima. En canvi, un motor dièsel turbo-alimentat només pot assumir un esglaó de fins el 60% de la potència màxima.

De forma transitòria durant un o deu segons, l'alternador pot donar fins al seu corrent de curtcircuit, el temps que permeti l'energia cinètica acumulada en les masses rodants. La pèrdua d'energia cinètica provoca una disminució de velocitat de rotació i, per tant, de la freqüència. Al ser transitori, el generador recupera la velocitat de rotació, en altres paraules, és un fenomen reversible. Aquesta característica dels alternadors es poc aprofitat en el sector de vehicles elèctrics de transport.

3.5.2. Fonts d'alimentació sense aportació de combustible

Les Bateries i els Acumuladors no necessiten d'aportació de combustible exterior per funcionar. Per tant, només cal instal·lar el sistema dins del vehicle perquè pugui funcionar com a font d'alimentació.

Les bateries electroquímiques son fonts d'alimentació que poden subministrar energia de forma instantània. A mida que entreguen la potència, l'energia emmagatzemada disminueix i la seva capacitat per donar la potència també baixa. Tot això fa que el seu funcionament sigui limitat, és a dir, s'esgoten i necessiten d'un cert temps per carregar-se i recuperar l'energia donada. Veure Figura 3.8.

La bateria pot donar una potència instantània de 10 o més vegades el corrent nominal. Aquest fet pot arribar a provocar la seva auto-destrucció. Realment el gran corrent circula per dins de la bateria i com té una resistència interna no despreciable, genera un gran calor intern. A mida que augmenta el calor, augmenta la resistència interna i, per tant, encara genera més calor. Tot aquest pot fondre les plaques internes i fondre la bateria. Per tant, cal protegir la bateria amb un limitador de corrent màxim.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

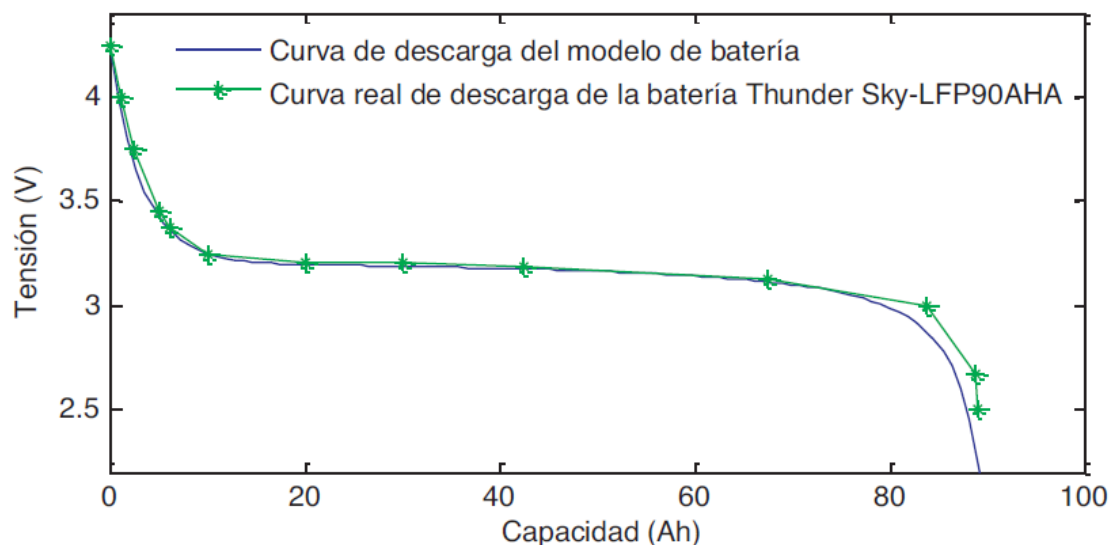


Figura 3.8. Corba de descàrrega d'una bateria Li-ió de ThunderSky LFP90AHA de 90Ah de capacitat.

A més, la resistència interna de les bateries, també augmenta a mida que es descarreguen, variant fins a deu vegades al valor de la bateria carregada al 100%. Això limita els valors dels corrents assolibles amb la bateria descarregada (veure Figura 3.8). Si es desitja extreure més potència instantània, cal augmentar la capacitat de les Bateries electroquímiques. Aquest augment de capacitat implica un augment del pes i això perjudica directament al rendiment del vehicle.

L'acumulador pot donar una potència instantània però la seva limitació està condicionada a la capacitat màxima d'emmagatzematge i a la capacitat màxima de conversió de l'energia de la màquina elèctrica.

3.5.3. Necessitats dels vehicles

Els vehicles necessiten d'una potència instantània molt important per iniciar el moviment des d'aturats. És a dir, una acceleració important per poder moure tot el pes del vehicle i vèncer les inèrcies.

Com hem vist abans, hi ha fonts d'alimentació que no poden donar una potència instantània considerable. En canvi, hi ha altres que poden subministrar un potència instantània important.

Per exemple, les Bateries electroquímiques tenen un potència instantània propera al corrent de curtcircuit. En canvi, les Piles de combustible i els Grups electrògens tenen un corrent permanent i constant (la duració depèn del combustible emmagatzemat). Per altre costat, les bateries s'esgoten aviat mentre que la Pila de Combustible i el Grup Electrogen poden durar més temps.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Si volguéssim instal·lar aquestes fonts a un vehicle elèctric, les Bateries servrien per donar potència per l'arrencada i les Piles de combustible o els Grups electrògens servrien per donar autonomia al vehicle.

Instal·lar un únic tipus de font d'alimentació en un vehicle pot limitar força la seva versatilitat. Instal·lar dues fonts diferents d'energia és una opció admissible per assolir unes prestacions properes a la dels vehicles actuals.

Si volem augmentar la potència, caldria augmentar la capacitat de la bateria. Si volem augmentar l'autonomia del vehicle, caldria augmentar les dimensions del dipòsit de combustible (de la Pila de combustible o del Grup electrogen).

Si hi ha una limitació en potència instantània (per part de la font d'energia), llavors el vehicle no tindria prou acceleració. Si hi ha una limitació en els dipòsits, llavors, el vehicle elèctric no tindria prou autonomia. Com veiem, les necessitats d'un vehicle elèctric condicionen el tipus de font d'alimentació i el seu dimensionament.

Un augment en la capacitat de la Pila de combustible o del Grup electrogen implica un augment en el pes. I l'augment en el pes d'un vehicle elèctric redueix l'autonomia del vehicle i augmenta la potència instantània per l'arrencada.

Com veiem, una millora de les prestacions d'arranc o d'autonomia implica un augment del pes en les fonts i, en conseqüència, un augment del pes del vehicle elèctric.

El més adient seria combinar dues fonts d'alimentació complementàries. Per exemple, unes Bateries electroquímiques o uns Ultra condensadors amb una Pila de combustible o un Grupo electrogen. Les primeres poden subministrar una energia instantània mentre que les segones poden subministrar energia a llarg termini d'una forma més suau.

També es poden combinar dos tipus de fonts d'alimentació semblants. Els ultra-condensadors proporcionen el corrent d'arrencada i eviten que les bateries treballin a règims de baix rendiment. Durant els frenats, els ultra-condensadors permeten recuperar més energia. És semblant al que fan els acumuladors cinètics però amb menys energia encara que més barats i lleugers.

Ara bé, la filosofia de combinació de dues fonts de diferent tipus potser diversa, és a dir, la forma de treballar les dues fonts combinades potser variada segons les necessitats i els desitjos.

Si es possible tenir dos fonts diferents dins del mateix vehicle, les fonts de baixa potència (Grups electrògens o Piles de combustible) poden subministrar energia a l'altre tipus de font (Bateries electroquímiques o Ultra condensadors) i d'aquesta manera, carregar-se lentament.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Això pot passar quan el vehicle elèctric consumeix menys energia que la produïda per les piles o els generadors. Llavors, l'energia sobrant es dirigeix per la càrrega de les altres tipus de fonts (ultra condensadors o bateries).

És evident que en aquestes situacions, l'energia sobrant és petita i, per tant, la càrrega dels ultra condensadors o bateries serà lenta. Si el temps de càrrega es suficientment llarg, llavors, l'energia emmagatzemada pot ser considerable.

Cal destacar que la potència específica dels ultra condensadors és molt superior a la de les bateries. Podríem dir que les bateries donen autonomia al vehicle i els ultra condensadors proporcionen prestacions instantànies a molt curt termini. Aquestes diferències es poden apreciar a la Figura 2.16.

Si volem competir amb els actuals vehicles (motors de combustió interna) en acceleració i autonomia, cal combinar dues fonts d'energia entre sí o buscar altres solucions que millorin les prestacions del vehicle elèctric.

La solució que aportem en aquest és la de complementar una font d'energia amb un acumulador. L'acumulador pot proporcionar aquesta potència necessària en el moment adequat. En realitat, l'acumulador donaria l'energia emmagatzemada i ajudaria a millorar les prestacions d'acceleració del vehicle. A més, podria carregar-se amb l'energia sobrant de l'altre font d'alimentació.

Els ultra condensadors son un alternativa sèria als acumuladors. Encara que tinguin de menys energia, tenen una potència instantània semblant als acumuladors. L'avantatge dels ultra condensadors consisteix en el seu cost.

L'energia per carregar l'acumulador pot arribar per dos camins diferents. Un camí pot ser la recuperació de l'energia del procés de frenat i, l'altre, recollir l'energia sobrant de la font principal (sigui Pila de combustible o Grup electrogen). Aquesta última càrrega seria lentament però permetria fer una descàrrega brusca sobre el motor de tracció.

En funció del sistema de l'opció de càrrega de l'acumulador, obtindrien dues filosofies ben diferents. Anem doncs a estudiar les dues filosofies o modes de funcionament.

3.5.4. Característiques de les fonts implantades

Com veiem, les necessitats fan que hi hagin més d'una font d'alimentació al vehicle elèctric. És a dir, el perfil de velocitats, les energies i les potències en joc no és trivial i això centrará l'esforç d'aquest treball com a solució de conjunt.

Observem que l'energia alliberada és considerable i que la potència instantània també ho és. Un sistema capaç d'emmagatzemar aquesta energia per després donar-la al mateix equip de tracció, provocaria un estalvi d'energia considerable, sobre tot, en els processos d'arrencada del vehicle de transport.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La potència útil emmagatzemable és aquella que l'acumulador cinètic pot resistir durant la càrrega de forma eficient. La seva integral al llarg del temps de càrrega ens donaria l'energia emmagatzemada. La potència que s'entrega directament, varia en funció del temps ja que a mida que es frena el volant, les prestacions de la màquina elèctrica disminueixen. La potència instantània de l'acumulador depèn del corrent màxim que dona la màquina elèctrica funcionant com generador.

L'acumulador ha de poder entregar l'energia de forma brusca. Cal conèixer la potència transitòria que resisteix la màquina elèctrica amb precisió per que el control de l'acumulador asseguri la seva integritat. Aquestes prestacions, bàsicament tèrmiques, només acostumen a ser conegudes als servomotors.

Com comprovem, la potència instantània afecta directament a la màquina elèctrica i el comportament de la màquina és vital al rendiment de l'acumulador. A l'augmentar la velocitat de gir, augmenta l'energia entregada i, per tant, l'energia específica de l'acumulador augmenta considerablement.

Per l'anterior, pot observar-ne que la màquina associada a l'acumulador i el seu control, poden ser tan sofisticats com el propi motor de tracció. Per tant, el cost del conjunt automòbil es duplica. Això pot ser una de les raons de la seva pobre implantació.

Perquè la recuperació d'energia sigui realitat, es necessita, primer, un sistema de tracció capaç de funcionar en sentit invers, és a dir, funcionar com a font d'alimentació o generador i, segon, que hi hagi un sistema que reculli l'energia bolcada. El motor del vehicle resulta tant car i complexa com el principal. És difícil de justificar la seva amortització.

Moltes vegades, l'energia recuperada no es pot aprofitar degut a que el sistema acumulador no està disponible. En aquests situacions, l'energia recuperada, provocaria sobretensions i cal dissipar-la, es perd a les resistències de frenat o en el mateix sistema de frenat.

3.5.5. Futur immediat

Degut a la contaminació, tots els vehicles han millorat els seus sistemes de propulsió, estalviant energia. Les normes europees aprovades en els últims anys, com EURO4, EURO5 o EURO6 (referent a motors de combustió interna), redueixen o reduiran els efectes de la contaminació emesos a l'atmosfera.

Alguns fabricants de cotxes han anat més enllà i han fabricat vehicles híbrids elèctrics en sèrie. També s'han fet aplicacions a autobusos amb piles de combustible a grans ciutats europees. També circulen vehicles amb gas natural com a combustible.

Totes aquestes aplicacions actuals son el resultat i conseqüències d'estudis, treballs i desenvolupaments de vehicles experimentals. La majoria d'aquests vehicles experimentals utilitzaven l'energia elèctrica com a energia. Gràcies a

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

aquests desenvolupaments, han aparegut bicicletes elèctriques, autobusos elèctrics amb pila de combustible (fent servir hidrogen), vaixells de gran tonatge amb grups electrògens i, fins i tot, avions amb motors elèctrics alimentats amb plaques solars.

3.6. Sistema d'estalvi i sistema regeneratiu

L'idea d'aplicar sistemes d'estalvi d'energia als mitjans de transport no és una novetat. Dins de la gran varietat de mètodes, classifiquen els sistemes amb sistema d'estalvi d'energia i sistema regeneratiu d'energia. Abans de tot, anem a definir o diferenciar els sistemes.

Un sistema d'estalvi és un mètode/sistema/equip/conjunt que millora el rendiment energètic de tracció fent que sigui més eficient energèticament parlant. És a dir, modifica (afegint-ne a) la tracció normal i augmenta el seu rendiment energètic. Aquest sistema és d'un nivell de complexitat baix, més aviat simple i senzill. Potser un canvi de un funcionament sobre la forma normal o quotidiana i que, al final, representa un estalvi energètic. Un exemple és el sistema STOP-GO dels cotxes actuals. Mentre el cotxe està aturat al semàfor, el control atura el motor de combustió per estalviar combustible. Quan es pitja el pedal del embragatge, el motor arranca i continua la marxa.

Un sistema regeneratiu és un sistema d'estalvi d'energia però amb més complexitat. El sistema regeneratiu recupera energia allà on normalment es perdia. Un exemple clar és l'energia en el procés de frenat. Abans aquesta energia es converteix en calor i es perd. La diferència entre un sistema d'estalvi i un sistema regeneratiu és que el regeneratiu es capaç de recuperar l'energia que, en condicions normals, es perd. Un altre procés on es perd energia és la calor del sistema de refrigeració i d'escapament dels motors tèrmics. El sistema regeneratiu converteix l'energia i l'aprofita per mateix sistema de tracció o per sistemes auxiliars del vehicle de transport. Un sistema regeneratiu augmenta molt més el rendiment energètic del conjunt.

Per tant, el sistema d'estalvi redueix les pèrdues i fa augmentar lleugerament el rendiment energètic. Però el sistema regeneratiu, augmenta directament el rendiment ja que aprofita energia que abans es perdia. Per tant, el sistema regeneratiu té una eficiència energètica superior que la del sistema no regeneratiu.

3.6.1. Sistemes d'estalvi d'energia

Donat que estem centrats en els vehicles de transport, els fabricants de cotxes han començat una cursa per obtenir cotxes més eficients, més ecològics però mantenint o, fins i tot, augmentant les prestacions.

Per aquesta raó ens fixarem en sistemes d'estalvi i regeneratius en aquest sector. Dins del sector de l'automoció, s'han introduït ude na sèrie sistemes d'estalvi d'energia. Anem a veure uns exemples:

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- 1 Sistema Stop&Go: Aquest mètode atura el motor tèrmic quan el cotxe no es mou, és a dir, quan el motor no realitza treball. El control electrònic arranca el motor quan detecta un moviment al pedal de l'accelerador o de l'embratatge. Aquest sistema d'estalvi redueix el consum de combustible.
- 2 Direcció assistida elèctrica: Abans la bomba hidràulica de servo-direcció estava acoblada permanentment al motor tèrmic per mitjà d'una corretja i la bomba hidràulica funcionava permanentment. Actualment, la bomba hidràulica està acoblada a un motor elèctric i només funciona quan el conductor mou el volant. És a dir, és un sistema que redueix les pèrdues d'un equip auxiliar acoblat al motor tèrmic.
- 3 Pneumàtics de baix coeficient de fricció: Les rodes de baixa fricció al rodament redueixen les pèrdues de fricció quan el cotxe circula però mantenent d'adherència. Aquest factor és clau per obtenir una distància de frenat curta.
- 4 Llums LED. Incorporació de la tecnologia LED als llums (frontals i posteriors) permet un estalvi energètic elèctric. Aquest estalvi fa que l'alternador del motor (font d'alimentació elèctrica del cotxe) no necessiti generar tanta electricitat i, en conseqüència, redueixi el consum del motor tèrmic.
- 5 Motor tèrmic de baixa fricció. Els motors de benzina d'última generació han millorat considerablement. Actualment han reduït la fricció en un 25%. Això es deu gràcies al gran treball sobre la corretja distribució (ara lubricada amb oli), la bomba d'oli (ara de cabal variable), en nous materials antifricció als arbres de lleves, cigonyal, engratages, etc.... Aquesta disminució en les pèrdues de fricció permet obtenir un major rendiment del motor tèrmic.

Cal comentar que els sistemes d'estalvi venen impulsats per las noves restriccions de contaminació aplicats a els fabricants de cotxes.

3.6.2. Sistemes regeneratius

El sector automobilístic va iniciar el camí cap el vehicle híbrid i elèctric fa temps. Avui ja té productes (vehicles) completament comercials. Aquests vehicles incorporen sistemes regeneratius d'energia per obtenir un major rendiment, autonomia o estalvi energètic.

Encara que el fabricants de cotxes han impulsat el sector dels cotxes privats, els fabricants de vehicles semi lleugers (furgonetes, camions, autobusos, troleibusos,...), pesats (camions de gran tonatge, maquinaria d'obres, etc...) i fabricants de material rodant per ferrocarril (tramvies, trens, metros, etc...) no s'han quedat enrere.

Anem a fer un breu repàs del ventall d'opcions i aplicacions que hi ha en el mercat actual. Comencem pels vehicles lleugers, després els vehicles semi lleugers i els vehicles pesats i finalment, els vehicles de competició.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

3.6.2.1. Vehicles lleugers

Dels vehicles híbrids lleugers, destaquem els següents:

1. Yaris, Prius i Auris de Toyota,
2. Insight i Jazz de Honda,
3. 3008 Hybrid4 i 508 Hybrid4 de Peugeot
4. DS5 Hybrid de Citroën,
5. Clase E 300 BlueTEC Hybrid de Mercedes,
6. CT 200h i IS 300h de Lexus,
7. Jetta Hybrid de Volkswagen,
8. etc...

Tots aquests vehicles híbrids, aprofiten l'energia del procés de frenat per generar energia i emmagatzemar-la als acumuladors (normalment bateries elèctriques). Aquesta mateixes bateries també son carregades pel generador acoblat al motor tèrmic.

Dels vehicles 100% elèctrics lleugers, destaquen el següents:

9. i3 i i8 de BMW,
10. NV200e de NISSAN,
11. C Zero de CITROËN,
12. iOn5 de PEUGEOT,
13. Twizy, Zoe, Fluence ZE, Kangoo ZE de Renault,
14. E-up! i e-Golf de Volkswagen
15. etc...

Tots aquests vehicles elèctrics també aprofiten l'energia del procés de frenat per carregar les bateries de tracció i augmentar l'autonomia del vehicle.

Actualment la bateria és el principal element on es concentren els majors esforços dels fabricants per reduir el volum, el pes i augmentar la capacitat. Tot per permetre una major autonomia del vehicle.

3.6.2.2. Vehicles semi lleugers

Dins dels vehicles "semi lleugers", l'autobús és el vehicle de transport on s'han fet més desenvolupaments i aplicacions de sistemes d'estalvi d'energia i regeneratives. Uns exemples son l'autobús CITARO Fuel CELL de Mercedes, l'autobús Lion's City Hybrid de MAN, l'autobús Castrosua Tempus, Aerostar de Mitsubishi, etc...

També hi ha aplicacions com un autobús elèctric amb turbina Horus. Aquest autobús va circular per Barcelona cedit per Brescia Trasporti. El fabricant EcoPower Technology va desenvolupar un sistema de tracció format per un generador elèctric (amb una micró turbina CAPSTONE de 30kW de potència màxima a 96.000 rpm), un convertidor, un motor elèctric de 120kW i unes bateries. El sistema de tracció pesa 2.000kg (uns 1.800 kg son les bateries de Plom-gel) i l'autobús tenia una autonomia de 250km.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

L'autobús Aerostar de Mitsubishi empra el motor tèrmic per moure un generador de 100kW i aquest carrega unes bateries de Li-ió (6 mòduls de 30 cèl·lules de 3,6V) de 648V. La tracció es completa amb dos motors elèctrics de 150kW acoblat a les rodes per una reductora. El consum de combustible es redueix un 30%, l'emissió de NOx es redueix en un 60% i les partícules en suspensió, es redueixen en un 70%. **[R11]**.

El fabricant Volvo està desenvolupant sistemes de tracció híbrids per camions i màquines d'obres. El L220F té un arrencador/generador (Integrated Started-Generator, ISG) localitzat entre el motor i el canvi de marxes (sistema híbrid paral·lel) amb una bateria de reforç que pot proporcionar fins a 50kW de potència addicional equivalent a 700Nm. **[R24]**.

El fabricant Caterpillar ha desenvolupant sistemes de tracció híbrids per tractors (model D7E) i camions (models 793F AC i 795F AC). El tractor D7E està equipat amb un motor dièsel de 175kW per moure un generador, que a la seva vegada, mou dos motors elèctrics de corrent altern acoblats a les rodes. La velocitat de gir del motor tèrmic baixa a 1700rpm, reduint el consum i el soroll. **[R25]**.

El camió Caterpillar d'obres híbrids 793F AC i 795F AC utilitzen un convertidor de Mitsubitshi Electric. **[R26]**.

A finals de 2013, els autobusos de Saragossa han instal·lat un sistema de d'estalvi d'energia. El sistema carrega uns ultra-condensadors durant el procés de frenat i apaga el motor tèrmic durant l'aturada a una parada de la línia. La càrrega dels ultra-condensadors manté els sistemes auxiliars (aire condicionat, els sistemes de control, etc...) en funcionament. I, al final de l'aturada, els engeguen el motor tèrmic per continuar el seu servei comercial amb el motor tèrmic. Aquest procés es realitza a cada parada de la línia i s'obté un estalvi al consum de combustible entre un 25% i un 30% (segons l'empresa instal·ladora del grup Mondragón). Els ultra-condensadors son de hidrur de potassi (KOH). Com veiem, aquest és un sistema d'estalvi amb frenat regeneratiu.

3.6.2.3. Vehicles pesats

A l'estiu de 1999, Alstom va començar a provar acumuladors cinètics per moure un tramvia. El primer model va ser un volant d'inèrcia de 200kW i 2kWh desenvolupat per Magnet Motors (Alemanya) damunt un tramvia. Les proves es van realitzar a la factoria de La Rochelle (França). Amb la potència d'aquest sistema, el tramvia va recorre uns 100 metres de forma autònoma. **[R27]**. Els assaigs es van aturar degut a un accident laboral amb l'acumulador.

Al 2006, Alstom va reiniciar les proves d'un acumulador cinètic de 300kW i 4kWh desenvolupat pel CCM (Centre for Concepts in Mechatronics, Holanda) i el va instal·lar a un tramvia de Rotterdam. El volant d'inèrcia RxV-II pesa 375kg i pot girar a 22.000rpm. Amb la potència d'aquest sistema, el tramvia de Rotterdam pot recorre 900 metres de forma autònoma. **[R27]**.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La xarxa de transports RATP (Xarxa Autoritat de Transports de París) va provar, en dels seus tramvies (de l'empresa Alstom), un ultra-condensador durant 2 anys (del 2009 fins 2011). Aquest sistema carregava els condensadors a les parades amb prou energia per recorre la distància entre dues parades de forma autònoma i amb tots els sistemes auxiliars funcionant. **[R28]**. Al final, l'Explotador va cancel·lar el projecte per diverses aturades imprevistes en mig de dues parades.

Al gener de 2013, l'empresa Alstom i Williams Hybrid Power van firmar un acord per instal·lar un acumulador de volant d'inèrcia als tramvies durant el 2014 i 2015. **[R29]**.

3.6.2.4. Vehicles de competició

L'any 2009, la FIA (Federació Internacional d'Automobilisme) va obrir la porta a emprar un sistema de recuperació d'energia o KERS als cotxes de Formula 1. La potència màxima era de 60kW i l'energia 400kJ per volta. El volant d'inèrcia pesava 5kg (acer i fibra de carbó) i podia arribar fins els 64.500 rpm. No hi havia transformació de l'energia ja que el sistema era mecànic (transmissió variable continu o CVT) amb un embragatge per acoblar-lo al canvi de marxes del cotxe. El conjunt pesava uns 25kg. El KERS estava calculat per emmagatzemar l'energia de frenat de 330km/h fins a 95km/h en 3 segons. El rendiment està al voltant dels 70% degut a les pèrdues dels sistemes hidràulics pels accionaments i per la lubricació del conjunt. Donat que només hi ha 3 segons per emmagatzemar l'energia de frenat, les dimensions i el rendiment han primat davant la potència o capacitat d'emmagatzematge. **[R31]**.

Però no va ser fins el 2011 quan els sistemes de recuperació d'energia es van instal·lar definitivament. Els constructors podien decidir el tipus de tecnologia (acumulador cinètic o elèctric). La majoria va escollir un sistema completament mecànic format per un embragatge, uns engranatges i dos volants d'inèrcia girant en sentit contrari. El pilot decidia carregar o descarregar l'acumulador en funció de les necessitats, és a dir, carregar l'acumulador a les frenades i descarregar en les rectes per tenir una acceleració més alta. Al 2011, la FIA limitava a una capacitat de 60kW i 300kJ mentre que al 2012, els acumuladors de 60kW podien generar 400kJ per volta. **[R32] - [R33]**.

A l'any 2012, un cotxe híbrid guanya per primer cop la cursa de Les 24 hores de Le Mans. En concret, l'Audi R18 e-tron quattro va quedar al primer davant d'un altre cotxe híbrid (un altre Audi). Aquest cotxe incorpora un volant d'inèrcia que donava 150kW (arribava a girar a 45.000rpm) però l'energia de recuperació estava limitada a 2 MJ per volta, segons el reglament. El generador estava acoblat a l'eix del turbocompressor del motor tèrmic a les frenades. Aquest generador carregava el volant d'inèrcia (fabricat per Williams) mentre que el motor elèctric estava acoblat a l'eix davanter del cotxe. **[R35]**.

A l'any 2014, el cotxes de Formula 1 van instal·lar sistemes de recuperació d'energia elèctrics (amb motor elèctric i bateries) amb una potència de 120kW. però el pilot continuava sent qui decidia quan i com es consumia o es

carregava. Els nous acumuladors son bateries de ultra-condensadors (amb un pes màxim de 25kg) que poden descarregar 4MJ per volta i, però en canvi, només poden carregar 2MJ per volta. [R34].

3.7. Resum dels sistemes d'estalvi i regeneratius

Des de fa forces anys, els desenvolupaments de sistemes d'estalvi i/o regeneratius s'han incrementat exponencialment. Molts dissenys han vist la llum, molts més no han arribat a ser projectes i altres han fracassat, però la veritat és que ningú dubte de l'estalvi energètic que aconseguixen.

Els sistemes d'estalvi d'energia poden arribar fins al 15% d'estalvi mentre que el sistemes regeneratius poden arribar al 40% o més.

Però per sí, els vehicles completament elèctrics, tenen una eficiència energètica molt més alta que els vehicles amb motor tèrmic. La majoria dels motors elèctrics tenen una eficiència al voltant del 90% (en qualsevol règim de gir) mentre que els motors tèrmics només arriben a un eficiència del 42% en el seu punt òptim de règim de gir.

Sota aquesta realitat, tots els fabricants automòbils han desenvolupat vehicles elèctrics. Aquests desenvolupaments han obligat als fabricants de bateries, a millorar la capacitat de les bateries per obtenir una autonomia molt més alta i, així, permetre obtenir vehicles elèctrics competitius dins del mercat de cotxes privats.

4. NECESSITAT DE DISSENY GLOBAL DEL SISTEMA

4.1. Introducció

En el capítol anterior hem vist el gran ventall d'opcions i possibilitats de sistemes d'estalvi i de recuperació d'energia. Però les opcions es redueixen quan s'han d'instal·lar a vehicles de transports. I encara son menys els que tenen una eficiència o rendiment òptim.

Com hem vist, es poden combinar dues fonts d'alimentació per tal d'obtenir millors prestacions, eficiència o rendiment. Segons les necessitats en cada cas, el sistema pot ser d'una forma o d'una altra (sistema paral·lel, sèrie, combinació de les dues, una o dues fonts d'alimentació, etc...). És a dir, no hi ha una solució única per tots els vehicles de transport.

A part dels possibles sistemes o fonts, també hi ha l'opció aplicar el sistema de recuperació embarcat o fix. En el cas d'un sistema de recuperació d'energia fixe, cal veure el conjunt de vehicles o el sistema de vehicles de transport. És a dir, l'anàlisi s'amplia a una línia de servei comercial.

4.2. Sistemes de recuperació d'energia embarcats o fixes

Un cop vist les possibles opcions a diferents tipus de vehicles, en el cas dels tramvies, metros i trens, hi ha una aplicació específica degut al tipus d'alimentació comú dels vehicles per catenària o tercer carril.

Quan parlem d'alimentacions comunes per un conjunt de vehicles de transport, el ventall d'opcions s'amplia i surt un factor nou. Aquest nou factor és "embarcat" o "fixe". Un sistema de recuperació d'energia pot instal·lar-se dins del propi vehicle (anomenat Embarcat) o fora del vehicle junt als sistema d'alimentació de la catenària o tercer carril (anomenat Fixe).

Entenem per "embarcat", quan l'equip o sistema està dins del propi vehicle de transport. És a dir, l'equip o sistema es mou conjuntament amb el vehicle. En el cas d'un sistema de recuperació, aquest obté i retorna l'energia dins del mateix vehicle. Es pot arribar a pensar que l'equip és independent i exclusiu dels altres.

Entenem per "fixa", quan l'equip o sistema està instal·lat a prop, junt o dins d'un centre d'alimentació d'una sèrie de vehicles. En aquest cas, l'equip o sistema de recuperació no es mou mai del seu lloc. Així pot absorbir l'energia del sistema d'alimentació quan en sobri i entregar-la quan en manqui. Aquest sistema forma part del sistema d'alimentació que distribueix l'energia als vehicles que hi ha connectats a l'alimentació dins d'una mateixa zona. En altres paraules, l'equip és un sistema d'aplicació per a varis vehicles en funcionament sota un mateix sistema d'alimentació.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Encara que el concepte és el mateix (absorbir energia per després entregar-la), els càlculs per dimensionar l'equip son diferents. Anem a veure els avantatges i inconvenients de cada tipus d'instal·lació.

4.2.1. Sistema embarcat

El sistema de recuperació d'energia embarcat és un equip dimensionat per emmagatzemar l'energia del vehicle on està instal·lat. La capacitat d'emmagatzematge és l'energia màxima que pot produir el vehicle on està instal·lat.

Donat que és un sistema instal·lat damunt del vehicle, ha de tenir un pes baix, resistir vibracions, proteccions en cas de col·lapse, mínims elements auxiliars, etc...i ha d'estar connectat amb el sistema de tracció del mateix vehicle. Per tant, ha de ser 100% compatible amb el sistema de tracció del vehicle.

Com que ocupa un espai, aquest haurà d'estar dimensionat correctament (i no sobre-dimensionat). És evident que, a més quantitat d'energia a emmagatzemar, més gran és l'equip.

Els avantatges d'un sistema acumulador embarcat son els següents:

- L'equip és al mateix lloc on es genera l'energia. Per tant, les pèrdues de distribució son molt petites.
- La capacitat del sistema està ajustada al vehicle on està embarcat. És a dir, la capacitat no està sobre dimensionada.
- El control de l'equip de recuperació ha d'estar connectat directament al sistema de tracció del vehicle.
- La comunicació entre els equips permet obtenir dades del procés de frenat i informació exacte de l'estat del vehicle (acceleració, frenat, en deriva, etc...).
- El sistema d'acumulació pot alimentar-se del sistema de captació del vehicle.

Els inconvenients d'aquest sistema son els següents:

- L'equip ha de ser compacte amb un pes molt baix. L'espai disponible dins del vehicle està molt limitat.
- L'equip no pot fer mal als viatgers o usuaris del transport ni en cas de destrucció. Per tant, cal que tingui un mètode de protecció (els mètodes de protecció acostumen a incrementar el pes del conjunt).
- Al ser un equip embarcat, cal que sigui resistent a les vibracions. És a dir, que l'estructura, el control i el sistema de suspensió resisteixi les vibracions. El volant d'inèrcia ha d'estar preparat per acceleracions brusques en qualsevol direcció degut als canvis de direcció del propi vehicle.

Com veiem, l'opció d'embarcat afegeix complexitat a un sistema ja complicat de per se.

4.2.2. Exemples de sistemes de recuperació embarcats

Com ja hem vist en el capítol anterior, com cotxe de competició amb el sistema KERS o vehicles elèctrics amb sistema de frenat regeneratiu son exemples de sistemes embarcats. Ara explicarem sistemes de recuperació en el sector del ferrocarril.

4.2.2.1. Autotram

El Institut de Transport e Infraestructures Fraunhofer (IVI) d'Alemanya ha desenvolupat un vehicle híbrid anomenat Autotram (tramvia de dos mòduls). La font principal d'energia d'aquest vehicle és una pila de combustible de 80kW. Com sistema de recolzament, per poder proporcionar energia als pics de potència durant la tracció, s'ha instal·lat un volant d'inèrcia de 325kW (de CCM) amb una capacitat energètica de 4kWh. Aquest volant es recarrega durant el procés de frenat, per mitjà de la pila de combustible o a les estacions (per una connexió externa al vehicle).

4.2.2.2. Sitras MES

Siemens Transportation ha desenvolupat el sistema SITRAS MES (Mobil Energy Storage System). És un sistema que emmagatzema l'energia a ultra condensadors embarcat dins d'un tramvia. Aquest sistema recupera part de l'energia generada pels frenats i, a més, ajuda a l'estabilització de la tensió de la catenària augmentant la disponibilitat de circulació dels vehicles.

L'energia útil és de 0,85kWh amb una potència màxima de 144kW amb un pes de 820kg. Aquest sistema necessita d'un circuit de refrigeració addicional. Les mides son: 2.000 x 1.520 x 630mm (llargada x ample x alçada).

4.2.2.3. Sitras HES

És un sistema híbrid que combina dos sistemes d'emmagatzematge: Un Sitras SES (ultra condensadors) amb unes bateries de NiMH per la tracció. El conjunt es carrega en trams amb catenària be sigui a les parades o be durant el procés de frenat. Aquesta càrrega proporciona autonomia suficient al tramvia per recorre distàncies de fins 2.500 metres. Aquest sistema també ajuda a l'estabilització de la tensió de la catenària quan està sota aquest tipus d'alimentació. Això augmentant la disponibilitat de circulació dels vehicles.

L'ultra condensador és idèntic a l'anterior. I les bateries de NiMH son 44 cèl·lules de NPH10-340 connectats en sèrie aconseguint una energia útil de 18kWh amb pics de potència màxima de 105kW. La bateria de NiMH té un pes de 826kg amb unes mides de: 1.670 x 1.025 x 517mm (llargada x ample x alçada).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

4.2.2.4. MITRAC

Bombardier Transportation ha desenvolupat el mateix sistema d'emmagatzematge per ultra condensadors com el model de Siemens Sitras MES.

L'energia emmagatzemada s'empra per les acceleracions del tramvia i per les demandes de pics de potència. El sistema també estabilitza la tensió de la catenària i, fins i tot, permet recorre petites distàncies sense catenària.

El sistema té una energia instal·lada de 1kWh, amb una potència màxima de 300kW. El conjunt té un pes de 420kg amb unes mides de: 1.700 x 680 x 450mm (llargada x ample x alçada). Normalment el muntatge són dos conjunt de ultra condensadors, és a dir, 2kWh i 600kW.

Aquest conjunt també s'utilitza en un tren dièsel-elèctric i permet reduir les dimensions del motor dièsel. A més, hi ha una reducció del pes i del consum del motor dièsel.

4.2.2.5. Tramvia Nice

El tramvia de Nice (de Alstom) empra unes bateries de NiMH per superar una distància sense catenària. És a dir, les bateries es carreguen mentre el tramvia circula normalment sota la catenària i l'energia emmagatzemada permet superar un tram no superior a 1.000 metres a una velocitat màxima de 30km/h.

La bateria de NiMH (68 cèl·lules del model NHP10-340 de SAFT) té una capacitat de 34Ah i una potència màxima de 200kW. Aquest sistema té una alta densitat d'energia de 13,6kWh. Però la vida útil d'aquestes bateries és entre 5 i 7 anys.

4.2.2.6. Tramvia RATP Paris

Alstom també ha desenvolupat un sistema d'emmagatzematge per ultra condensadors per un tramvia RATP de Paris en servei comercial. Són 48 mòduls distribuïts en 6 branques en paral·lel i cada branca té 8 mòduls connectats en sèrie. Cada mòdul té 20 cèl·lules. L'energia útil és de 1,62kWh amb una potència màxima de 500kW. Els ultra condensadors es carreguen en 20 segons, que és el temps d'aturada en una parada. El conjunt té un pes de 1.340kg i té unes mides de: 2.300 x 1.600 x 590mm (llargada x ample x alçada).

L'ultra condensador també emmagatzema l'energia del procés de frenat, reduint el temps de càrrega. Desgraciadament, no té reserva d'energia pels possibles imprevistos que poden esdevenir durant el seva circulació. S'observa una gran diferència de consum energètic entre tramvia buit i tramvia ple.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

4.2.2.7. SWIMO-X

L'empresa Kawasaki ha instal·lat en un tren petit una bateria GigaCell que permet una autonomia de 10km a una velocitat màxima de 40km/h. La bateria és de tecnologia NiMH amb una capacitat de 200Ah. Es pot carregar en 5 minuts i té un pes de 4.500kg.

La bateria està dissenyada especialment per velocitats de càrrega elevades, un elevat nombre de cicles i per una gran emmagatzemament d'energia.

4.2.2.8. Sistema ACR

El fabricant Trainelec ha desenvolupat el ACR que és un acumulador mixte d'ultra condensador i de bateria. És un acumulador de càrrega ràpida que permet la circulació d'un tramvia amb l'energia emmagatzemada durant el temps d'aturada d'una parada. I també permet emmagatzemar l'energia del procés de frenat.

El sistema ACR té l'avantatge de ser modular, és a dir, segons les necessitats de cada explotació i tramvia, es poden acoblar més o menys mòduls en paral·lel. Aquest sistema ha estat implantat al tramvia de Sevilla i de Saragossa.

El sistema de ACR es carrega durant el procés de frenat i completa la capacitat total d'emmagatzematge amb captació d'energia durant l'aturada en una parada (aturada de 20 segons). Aquest sistema pot funcionar en trams amb i sense catenària.

L'ultra condensador té una energia emmagatzemable de 0,775kWh amb una potència màxima de 100kW amb un pes de 370kg i unes dimensions de 345 x 1.780 x 750 mm (llargada x ample x alçada). Mentre que la bateria de NiMH té energia per emmagatzemar 15kWh amb una potència màxima de 48kW. El sistema té un pes de 410kg i unes dimensions de 345 x 1.780 x 750mm (llargada x ample x alçada).

4.2.2.9. Altres exemples

També hi ha sistemes de recuperació d'energia embarcats en màquines com els apila-contenidors dels ports marítims (o grues pòrtics), màquines d'obres públiques i, fins i tot, satèl·lits.

En el cas de les grues apila-contenidors de ports, aprofiten l'energia potencial d'un contenidor quan baixa des d'una alçada per generar energia elèctrica. Amb aquest sistema s'aconsegueix un estalvi del 30% d'energia sobre tot quan la grua pòrtic té com a font principal d'energia un grup motor dièsel-elèctric. Els fabricants Konecranes, Kalmar, Terex, Liebherr comercialitzant aquest sistema per les seves grues pòrtics RTG. El fabricant TEREX empra un sistema de recuperació de volant d'inèrcia com a sistema d'emmagatzematge.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Les màquines d'obres públiques grans com camions de gran tonatge, empren sistemes de recuperació d'energia embarcats per la seva tasca repetitiva (pujar i baixar desnivells) durant el transport de pedres, terra o material brut. Gràcies a aquest sistema poden estalviar combustible del motor disèsel. El fabricant Hitachi té un camió propulsat per motors de corrent altern i ha instal·lat aquest sistema al camió.

Els satèl·lits utilitzen sistemes de recuperació d'energia amb volants d'inèrcia per dues raons: per emmagatzemar energia de les plaques solars i per l'efecte giroscòpic que li proporciona estabilitat. Al estar a l'espai, no hi han pèrdues aerodinàmiques.

A continuació, a la Taula 4.1 hi ha un resum dels diferents sistemes de recuperació d'energia embarcats en el sector del ferrocarril per diferents fabricants.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

4.2.2.7. Resum

Si recollim les dades dels diferents sistemes d'acumulació, obtenim:

Model	Tecnologia	Energia emmagatzemable	Potència	Pes	Dimensions	Estalvi (*)
Autotram	Volant d'inèrcia	4kWh	325kW	??	??	
Sitras MES	Ultra condensadors	0,85kWh	288kW	820kg	2000 x 1520 x 630mm	30% consum elèctric
Sitras HES	Ultra condensadors + bateria NiMH	UC: 0,85kWh B.: 18kWh	UC: 288kWh B.: 105kWh	UC: 820kg B.: 826kg	UC: 2000 x 1520 x 630mm B.: 1670 x 1025 x 517mm	30% consum elèctric
MITRAC	Ultra condensadors	1kWh	300kW	428kg	1700 x 680 x 450mm	30% consum elèctric
Tramvia NICE	Bateria NIMH	13,6kWh	280kW			
Tramvia Paris	Ultra condensadors	1,62kWh	500kW	1340kg	2300 x 1600 x 590mm	20%-24%
SWIMO-X	Bateria NiMH	200Ah	kW	4500kg		
Sistema ACR	Ultra condensadors + bateria NiMH	UC: 0,775kWh B.: 15kWh	UC: 100kWh B.: 105kWh	UC: 370kg B.: 410kg	UC: 345 x 1780 x 750mm B.: 345 x 1780 x 750mm	30% consum elèctric

(*) L'estalvi de cada sistema és el estalvi indicat pel propi fabricant.

Taula 4.1. Resum de les solucions de sistemes d'estalvi energètic de diferents fabricants de material ferroviari

4.2.3. Sistema fix

Com que un sistema fixe, aquest s'ha d'instal·lar en sistemes que tinguin una línia d'alimentació comuna pels vehicles en servei comercial. En aquests casos, la subestació distribueix l'energia i els vehicles la capten. És a dir, en xarxes de transport públic com troleibusos, tramvies, metros o trens.

Evidentment, els vehicles autònoms i autoportants (cotxes, autobusos, locomotores dièsel, etc...) no podem aprofitar-se d'aquest sistema de recuperació.

Un sistema fixe no té perquè està a tocar d'un subestació. A vegades, es pot instal·lar en punt de la línia on hi hagi un gran pendent. D'aquesta manera, pot acumular energia del vehicle que baixa (perquè està frenant) i entregar l'energia quan un vehicle puji el pendent (perquè està demanant més energia).

El sistema de recuperació d'energia fixe cal que sigui dimensionat per emmagatzemar l'energia de tots els vehicles sota la seva influència i que s'alimentin del mateixa línia.

Els avantatges del sistema acumulador fixe son els següents:

- L'equip no té limitacions de pes o espai. Pot estar en una nau o recinte a peu de la línia.
- L'equip no cal que tingui proteccions pels usuaris o viatgers del mitjà de transport.
- L'equip no està sotmès a vibracions. Com està fixat a terra, no hi ha vibracions. Per tant, l'equip no té un disseny orientat a resistir les vibracions i és més barat que un sistema adaptat per les vibracions.

Els inconvenients son següents:

- L'equip només es pot aplicar a vehicles de transport amb un sistema d'alimentació comú.
- L'equip acostuma a està sobre dimensionat per la simultaneïtat de tots els vehicles en moviment dins de la mateixa xarxa de distribució d'alimentació.
- Les pèrdues de distribució d'energia no son menyspreables degut a les distàncies de l'equip al vehicle.
- El sistema de recuperació no està informat de la situació dels vehicles alimentats i ha d'estar sempre pendent del flux de l'energia.
- El sistema d'alimentació comú pot reduir el rendiment del sistema de recuperació d'energia.

També s'han desenvolupat altres sistemes regeneratius a les sub-estacions transformadores per tramvies, metros i trens. Normalment les sub-estacions més simples emprant rectificadors amb díodes (rectificadors de 1 quadrant). Per poder retornar energia, s'afegeix un equip inversor que recull l'energia retornada a la catenària pels tramvies, metros i trens, la transforma energia i la retorna a la xarxa de distribució. Aquests sistemes aconseguen un estalvi al voltant del 8% quan la freqüència de pas dels metros i l'energia son elevades.

4.2.4. Exemples de sistemes de recuperació fixes

Degut a que els sistemes de recuperació d'energia fixes només poden ser aplicats a alimentació per catenària, aquest tipus d'instal·lació no serà estudiat aquest treball. Així encara, veurem uns exemples.

4.2.4.1. Sitras SES

El SES es un sistema d'emmagatzemament basat en ultra condensadors de Siemens Transportation per ús ferroviari. S'instal·la a un lloc fix i a prop del sistema d'alimentació per catenària.

Aquest sistema emmagatzema l'energia sobrant del procés de frenat i retorna aquesta energia a la catenària quan hi ha pics de potència demanats per qualsevol vehicle proper. A més, estabilitza la tensió de catenària.

És un banc de ultra condensadors format per 1.152 cèl·lules amb una capacitat total de 94F i obté una energia per emmagatzemar de 2,5kWh obtenint un estalvi energètic de 80kWh per cada hora. Pot entregar una potència màxima de 700kW a una tensió de 600V fins a 750V.

Aquest banc de condensadors ocupen un espai de 2,8 x 1,4 x 2,6m (llarg x ample x alt), mentre que el seus sistemes auxiliars ocupen : 1,3 x 1 x 2,6m (llarg x ample x alt). Tot plegat pesa uns 4.300kg.

4.2.4.2. Urenco

L'empresa Urenco Power Technology ha instal·lat al Metro de Lyon 3 unitats UPT KESS (Urenco Power Technology, Kinetic Energy Storage System) de 200kW a la línia C al 2002-2004. El sistema s'instal·la a un tram de 500 metres i un pendent del 18% on hi ha una via de pujada i una altre de baixada. El sistema de recuperació d'energia capta l'energia sobrant de la via de baixada per després injectar-la a la via de pujada. **[R3]**.

Cada unitat pot emmagatzemar 14MJ d'energia i pot retornar 11MJ. L'acumulador té un volant d'inèrcia de composite d'alta velocitat, amb uns rodaments lliures de manteniment amb una vida de 20 anys o 10 milions de descàrregues.

Aquest mateix sistema està instal·lat a altres explotacions del mon com RATP de Paris, NDK de Japó i NYCT de New York.

4.2.4.3. RWE Piller

L'explotador Üstra (Autoritat de Transport de Hannover, alemanya), va instal·lar l'equip PowerBridge (de l'empresa RWE Piller) a la seva xarxa de trens

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

lleugers. Aquest equip pot donar 16,4MJ d'energia per accelerar els trens durant l'arranca a les estacions. [R3].

La velocitat de rotació varia entre 1.500 rpm i 3.600 rpm i pot entregar uns 2,4MW en 8 segons en corrent continu.

4.2.4.4. Altres exemples

Fora del sector de transports, també hi ha instal·lacions fixes de sistemes de emmagatzematge d'energia com plantes solars fotovoltaïques. Aquestes plantes acostumen a fer servir bateries electroquímiques pel seu baix cost i manteniment comparat amb els altres sistemes acumuladors més complexes.

En el cas de plantes solars fotovoltaïques, comentar que el sistema d'emmagatzematge també subministra corrent elèctric durant la nit (quan no hi ha sol) sempre que la legislació del país no ho prohibeixi com a Espanya per la evitar la possibilitat de frau.

4.2.5. Conclusió

Si només ens centrem en els mitjans de transport de tramvies, metros i trens, no hi ha prou informació per inclinar-se per un o altre mètode. Degut a la manca d'informació, no podem dir quin dels dos mètodes (embarcat o fix) és el millor. La informació no s'acostumen a publicar i encara menys quan hi ha diners per mig.

Les raons principals son:

- la diferència de cada instal·lació (no hi ha dues aplicacions iguals),
- el tipus d'explotació de cada transport (freqüència de pas, quantitat de tramvies en servei, ...)
- el tipus d'alimentació de cada instal·lació (subestacions transformadores, tipus de configuració d'alimentació, ...).

A continuació, hi ha una taula resum dels avantatges i inconvenients dels dos tipus d'instal·lació. Cal recordar que aquests sistemes d'estalvi de recuperació energia només s'apliquen a tramvies, metros i ferrocarrils ja que disposen d'un sistema d'alimentació comú. Per tant, aquests sistemes de recuperació d'energia no son aplicable a vehicles autònoms.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Instal·lació	Avantatges	Inconvenients
Embarcat	<p>Es pot instal·lar a prop de la font d'energia</p> <p>Es un dimensionament ajustat al vehicle</p> <p>El control està informat pel propi vehicle</p> <p>Es independent de l'energia</p>	<p>Hi han problemes de vibracions</p> <p>Cal afegir una protecció pels viatgers</p> <p>L'espai i el pes del sistema es limitat</p> <p>El sistema afegeix un pes addicional important al vehicle.</p>
Fix	<p>No hi han problemes de vibracions</p> <p>No hi han limitacions d'espai ni de pes</p> <p>No cal afegir proteccions addicionals</p>	<p>Està lluny de la font d'energia</p> <p>Cal sobre dimensionar el sistema per la simultaneïtat de dos o més vehicles a l'hora.</p> <p>El control del sistema no té comunicació directe amb el vehicle</p> <p>Cal pensar amb un sistema d'alimentació complet</p>

Taula 4.2 Resum dels avantatges i inconvenients de cada tipus d'instal·lació

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com hem explicat, els inconvenients d'un sistema embarcat condicionen massa, és a dir, limiten la seva aplicació per qüestions de seguretat, de disseny i d'instal·lació.

Desgraciadament, quan hi ha un sistema de recuperació fix instal·lat a un sistema d'alimentació comú, l'energia recuperada es menor degut a la coincidència de arrancades i aturades sota una mateixa zona elèctrica. És a dir, quan molts vehicles estan connectats a una mateixa zona elèctrica, pot donar-se el cas que quan un vehicle freni a una parada, hi hagi un altre vehicle que estigui arrancant d'una altre parada i l'energia sobrant del que frena sigui aprofitada pel que arranca. Si passa això, llavors, el sistema de recuperació d'energia no emmagatzema tanta energia i, per tant, el rendiment del sistema és menor.

4.2.6. Variant del sistema fix

Donada la complexitat de retornar l'energia recuperada al mateix sistema de tracció, hi ha una variant que consisteix en tornar l'energia recuperada a la xarxa de subministrament elèctric externa o interna.

La xarxa de subministrament elèctric externa es refereix a la xarxa pública de distribució i per que altres consumidors de la mateixa xarxa elèctrica aprofitin l'excedent d'energia.

La xarxa de subministrament elèctric intern es refereix a una xarxa interna de la pròpia empresa de transport. Com que la empresa té diferents tipus de consums, l'energia recuperada o sobrant s'empra per a sistemes auxiliars com les escales mecàniques, el sistema de ventilació, el sistema de il·luminació no d'emergència, etc... i proper al sistema de recuperació fixa.

En aquest sentit, l'empresa INGETEAM ha desenvolupat uns inversors que s'instal·len als mateixos centres de transformació per retornar l'energia produïda pel sistema de frenat regeneratiu a la xarxa. És a dir, l'energia recuperada no torna al sistema de tracció dels vehicles si no que s'aprofita per sistemes auxiliars dins de la mateixa empresa de transports. I si el sistema de recuperació falla, els serveis auxiliars poden ser alimentats per la xarxa com abans.

Aquest sistema permet un estalvi econòmic del 5% ja que el consum global de l'empresa disminueix. L'amortització d'aquests equips inversors és de curt termini (segons el propi fabricant).

Hi han diversos Explotadors (o Autoritats del Transport) que han instal·lat aquests equips inversors al centres de transformació de tracció. Uns exemples d'explotadors son: moBiel, explotador d'una xarxa de metros a la població de Bielefeld (Alemanya), STIB explotador a la ciutat de Brussel·les, RET explotador del tramvia de Rotterdam, TfGM explotador de metros a

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Manchester, TMB (Metro de Barcelona), Metro Bilbao, etc.. Tots ells disposen d'un inversor de 1MW amb una eficiència del 98%.

Gràcies a aquests sistemes, les empreses consumeixen menys electricitat de la xarxa exterior i és un estalvi de diners considerable, sobre tot, si funciona durant molts anys.

5. TRANSPORT MARÍTIM

5.1. Introducció

Fins ara, aquest treball s'ha centrat en vehicles terrestres i sobre tot, en el sector del ferrocarril. Però el transport per mar també es pot aprofitar d'un sistema acumulador. I com que és una opció com les altres, en aquest capítol farem un estudi de les possibilitats d'instal·lar un sistema de recuperació d'energia a un vaixell.

Fins fa pocs anys, els vaixells de propulsió elèctrica eren pocs, restringits a vaixells d'escomesa de cables, trencaglaç i a tasques auxiliars de perforació marina. Però tan les millores tecnològiques a la cadena de tracció així com les millores en la servo-propulsió (amb un gran ventall de velocitats), fan que la propulsió elèctrica sigui una alternativa emergent i amb futur, tecnològicament parlant.

Aquesta propulsió produeix un canvi conceptual del vaixell, convertint-los en més versàtils i silenciosos, sobre tot amb la propulsió POD. Aquest sistema és més versàtil i proporciona més maniobrabilitat. A més permeten millores en creuers de luxe i guanys d'espai a bodega en ferris o portacontenidors.

L'avantatge més important dels vaixells de propulsió elèctrica davant als de propulsió tradicional és que el motor elèctric proporciona un alt parell des del moment d'arrencada o des de baixes revolucions. Per aconseguir aquest benefici en vaixells de propulsió tradicional, s'utilitzen hèlix de pas variable però la seva fiabilitat es veia disminuïda degut al complicat mecanisme que controla el pas de l'hèlix.

Cal comentar que el motor dièsel acoblat mecànicament a l'hèlix segueix sent la propulsió més interessant per tots aquells vaixells que naveguin a velocitat constant, sobre tot, per raons de rendiment energètic.

Les hèlix auxiliars també es poden aprofitar de la generació elèctrica per agilitzar les maniobres d'atracament i des atracament, molt importants als vaixells de gran tonatge.

A més, la propulsió elèctrica té un altre avantatge. Els generadors elèctrics emprats en aquests tipus de vaixells son capaços de subministrar un corrent de curtcircuit triple de la corrent nominal de la màquina.

Totes aquestes avantatges fan que l'ús de la propulsió elèctrica s'estengui a tot tipus de vaixell, sigui ferris, de càrrega, creuers de luxe, remolcadors, vaixells de guerra, etc... El seu consum reduït, la facilitat de maniobra, la millor ubicació dels propulsors i l'estalvi d'espai per la càrrega son els puntals més importants per la seva expansió.

Tots els vaixells de propulsió elèctrica, disposen d'una central de generació elèctrica amb motor de combustió interna, una xarxa de distribució i un consum

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

propi. És a dir, els vaixells elèctrics son com petites centrals elèctriques però amb el seu autoconsum, totalment aïllades i independents (com microxarxes aïllades).

Després, les necessitats d'aconseguir velocitats més grans als vaixells i la fiabilitat de la propulsió elèctrica híbrida va propiciar l'aparició de configuracions en tàndem, és a dir, dos alternadors de tensió i freqüències diferents acoblats a un motor dièsel. D'aquesta manera, un alternador es preocupa de la xarxa de baixa tensió mentre que l'altre subministra energia als motors de propulsió a alta tensió. A vegades, els dos generadors estan instal·lats dins de la mateixa carcassa.

Dins d'un vaixell, el sistema de generació ha de ser redundat i molt segur. És a dir, al mig del mar no hi ha cap altre central de generació en cas de fallida. Per això hi ha diferents xarxes de distribució, configuracions i connexions per evitar que els propulsors es quedin sense energia.

Els vehicles de transport com cotxes, autobusos, tramvies, metros i trens circulen per camins i/o vies. Normalment estem acostumats a circular per "camins" més o menys rectes, amb inclinacions (pendents) fixes en el temps. Però en el cas dels vaixells, els camins son variables o canvien de pendent i d'inclinació i, a més, de forma aleatòria. Els vaixells s'han de moure enmig d'ones, mareas, vents, etc...

És molt difícil que un vaixell trobi una mar plana. El mar sempre tindrà onades i aquestes es mouen en funció de la direcció del vent o marea. I el vaixell ha de superar les onades per avançar cap el seu destí.

La propulsió d'un vaixell es veu molt més influenciada per les condicions de l'estat de la mar i per les condicions climatològiques. Vist des d'un punt de vista energètic, el vaixell té un consum molt variable degut a les condicions del mar i les climatològiques. Aquestes característiques fan que els vaixells semblin diferents als altres vehicles de transport terrestre.

Tot això fa que abans de parlar dels sistemes de propulsió dels vaixells, ens endinsem a l'estudi de l'ona.

5.2. L'ona

El medi per on es mouen tots el vaixells és l'aigua, és a dir, per rius, llacs, mars o oceans. Encara que hi han ones a tots ells, les onades son més destacables als mars i oceans.

L'onatge depèn de la climatologia i, normalment, hi ha una relació directe entre el vent i l'estat de la mar. És a dir, a més vent, més onades hi han. Tots els vaixells es veuen afectats per l'estat de la mar. Si la mar és plana, el vaixell pot aconseguir velocitats més elevades que quan hi ha onades. Per tant, si hi ha mala mar, la velocitat és més baixa i la duració dels viatges son més llargs.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Les ones es repeteixen i segueixen una direcció, normalment, la direcció del vent que les ha generat.

Les ones es caracteritzen pel l'alçada (distància entre el punt més alt i el punt més baix) i per la separació entre dues ones consecutives (distància entre dues crestes d'onades consecutives).

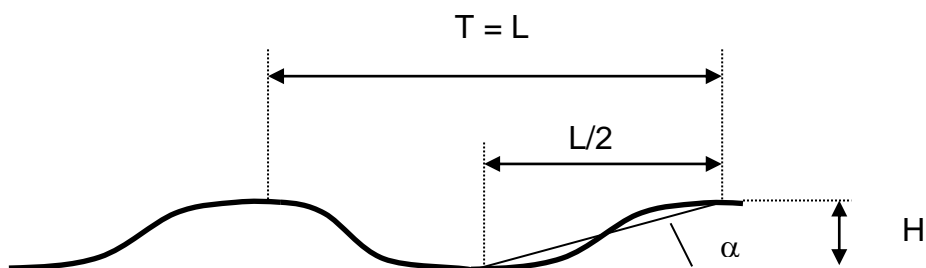


Figura 5.1. Esquema simplificat d'un onatge.

5.3. Període de l'ona

Si observem la Figura 5.1, podem parametritzar les ones amb unes variables similars a les funcions repetitives.

Geomètricament aconseguim el següent:

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{H}{L/2} \qquad \operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L/2}$$

L'angle α és un valor mig aproximat entre el punt més baix de l'ona i el punt més alt. Aquest angle depèn de l'alçada (H) i de la longitud (L) de l'ona.

Observem que quan més gran és la H, més gran és angle α . I quan més gran és el període o la distància entre les crestes de dues ones consecutives, més petit és l'angle α . És evident que una ona amb una longitud entre crestes consecutives petita i una alçada d'ona gran és impossible.

El període de les onades és característic de cada mar o de cada oceà i, es pot arribar a dir, que és quasi constant. En canvi, l'onatge o l'alçada de les ones depèn de la climatologia.

5.4. Dinàmica de l'ona trocoïdal

Segons la teoria de les ones trocoïdals aplicat al mar Mediterrani, la relació entre l'alçada de l'ona i la separació de dues crestes d'ona consecutives és:

$$H/L = 1/16 \div 1/20 \text{ (valor constant).}$$

5.5. Interacció entre el vaixell i l'ona

5.5.1. Assentament del vaixell

Degut a l'onatge, l'assentament del vaixell varia d'inclinació. Si les onades son grans, l'angle d'assentament serà més gran. Mentre que si l'onatge és petit, l'angle d'assentament és petit.

Al descompondre el pes del vaixell en dues forces, un paral·lela a la superfície de la mar i l'altre, perpendicular a la superfície de la mar, observem que la força paral·lela a la superfície és proporcional al grau d'inclinació de l'assentament del vaixell. Aquest força és el pes de vaixell multiplicat pel SINUS de l'angle d'assentament del vaixell.

Quan el vaixell es troba amb una ona gran, el vaixell ha de remuntar l'ona. Durant aquest temps, la força paral·lela s'oposa a l'avançament del vaixell, és a dir, a l'empenta del vaixell. En canvi, quan el vaixell baixa l'ona gran, la força paral·lela es suma a l'empenta del vaixell. Això ho podem veure a la Figura 5.2.

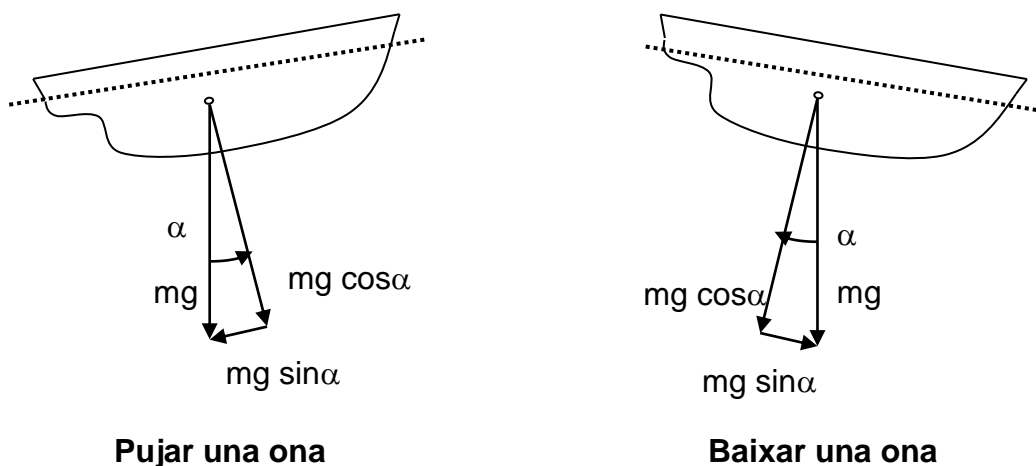


Figura 5.2. Variació de l'assentament.

Si el vaixell remunta una ona, la força paral·lela s'oposa a l'avançament del vaixell. I si la força de propulsió (empenta) no varia, el resultat de forces aplicades al vaixell és menor i la velocitat del vaixell redueix.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

En canvi, si el vaixell baixa l'ona, la força paral·lela es suma a l'avançament del vaixell. I si la força de propulsió no varia, el resultat de forces aplicades al vaixell és major i la velocitat del vaixell augmenta.

Com veiem, remuntar i baixar l'ona provoca un efecte de reducció i augment de la velocitat del vaixell quan hi ha una empenta constant. És a dir, el vaixell pateix un efecte oscil·latori de reducció i augment de la velocitat. Aquest fenomen és cíclic i repetitiu en cada ona que es troba en el seu rumb.

Cal comentar que la reducció o l'augment de velocitat del vaixell no és simple ja que cal tenir en compte la força de fregament i les inèrcies en joc, que són considerables. La força de fregament sempre es contraria al moviment i augmenta amb la velocitat del vaixell.

Realment aquest fenomen no és tan clar a simple vista. Depèn de diferents factors com: el període de l'onatge, la direcció, la velocitat del vaixell, la inèrcia del vaixell (degut a la posició del CDG respecte la posició de la resultant de la força de surament), etc... Però en grans trets, aquest efecte passa sempre.

5.5.2. Velocitat del vaixell

La velocitat del vaixell es veu afectada per l'efecte repetitiu de remuntar i baixar l'onatge.

Si la velocitat del vaixell té el mateix sentit i direcció que l'onatge, el temps entre dues crestes d'onada consecutives és menor que el temps entre les dues ones vistes des de terra. Si el temps entre dues onades consecutives amb referència vaixell és menor això vol dir que el període de les ones vist des del vaixell és inferior.

Si la velocitat del vaixell té la mateixa direcció però sentit contrari que l'onatge, el temps entre dues crestes d'onada consecutives és molt més gran que el temps entre les dues ones vistes des de terra. Si el temps entre dues onades consecutives amb referència vaixell (període aparent) és major això vol dir que el període de les ones vist des del vaixell és major.

Els casos extrems de la variable velocitat del vaixell serien: si aquesta augmenta considerablement (mateixa direcció i sentit), pot arribar el moment en que la velocitat del vaixell sigui molt propera a la velocitat de l'ona. En el cas, el vaixell tindrà un efecte cíclic i repetitiu molt lent.

Si la velocitat és igual a la velocitat de l'onatge, podríem dir que el vaixell viatjaria sense moviment relatiu entre el vaixell i l'onatge (estaria en "sincronisme").

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Si la velocitat del vaixell és superior a la velocitat de l'onatge, vol dir que el vaixell s'avançaria a les ones i el vaixell passarà a tenir un efecte cíclic i repetitiu.

5.5.3. Angle de derrota

El rumb del vaixell (direcció del vaixell) tindrà un angle envers el sentit d'avanç de les ones. Aquest angle s'anomena Angle de derrota. Aquest angle fa que l'efecte cíclic i repetitiu que pateix el vaixell per l'onatge, variï molt.

Si el rumb del vaixell té un angle 0, $\beta=0$ (rumb del vaixell contrari a les ones), el vaixell es trobarà les ones amb un temps igual a la diferència de la velocitat del vaixell i la velocitat de les ones.

Si el rumb del vaixell té un angle major de 0 però menor de 90° , és a dir, $0 < \beta < 90^\circ$ (rumb del vaixell contrari a les ones), el vaixell es trobarà les ones amb un temps major a la diferència de la velocitat del vaixell i la velocitat de les ones.

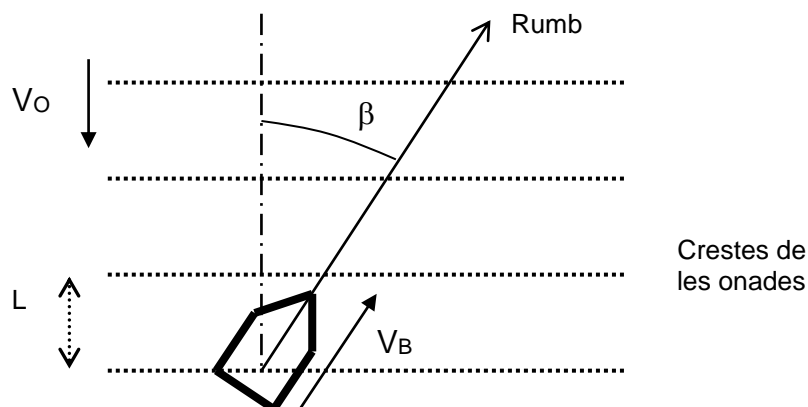


Figura 5.3. Representació del rumb del vaixell respecte l'onatge.

Si el rumb del vaixell té un angle igual a 90° , $\beta=90^\circ$, vol dir que la direcció del vaixell és perpendicular a la velocitat de les ones. Això vol dir que el vaixell rebrà les ones pel lateral. La incidència lateral de les ones no afecta l'efecte cíclic i repetitiu, sinó amb l'escora del vaixell.

Si el rumb del vaixell té un angle superior a 90° i inferior a 180° , és a dir, $90^\circ < \beta < 180^\circ$ (direcció del vaixell similar que les ones), el vaixell es trobarà les ones amb un període igual a la suma de la velocitat del vaixell i la velocitat de les ones.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Si el rumb del vaixell té un angle igual a 180° , $\beta=180^\circ$ (direcció del vaixell del mateix sentit que les ones), el vaixell es trobarà les ones amb un temps igual a la suma de la velocitat del vaixell i la velocitat de les ones.

5.5.4. Període des del vaixell (període aparent)

Inicialment, la distància entre dues crestes d'ona consecutives vist des del vaixell és:

$$d = \frac{L}{\cos \beta}$$

On β és l'angle d'incidència o de derrota del vaixell amb les onades i L (o T) la distància entre dues crestes consecutives.

Però com hem vist abans, el període des del vaixell també depèn de la velocitat del vaixell, la velocitat de les ones i de l'eslora del vaixell.

La llargada d'un vaixell o "eslora" pot tenir un efecte amortidor a l'onatge. Quan més petit sigui el vaixell, més li afectaran les ones ja que el vaixell haurà de remuntar i baixar les ones. En aquest cas, el centre de gravetat del vaixell farà un moviment sinusoidal. Però quan més gran sigui l'eslora del vaixell, les ones li afecten menys, és a dir, el casc del vaixell repartirà el pes en diverses ones i no haurà de remuntar i baixar ones. Per tant, l'eslora tindrà un efecte més important en vaixells amb una longitud d'eslora petita.

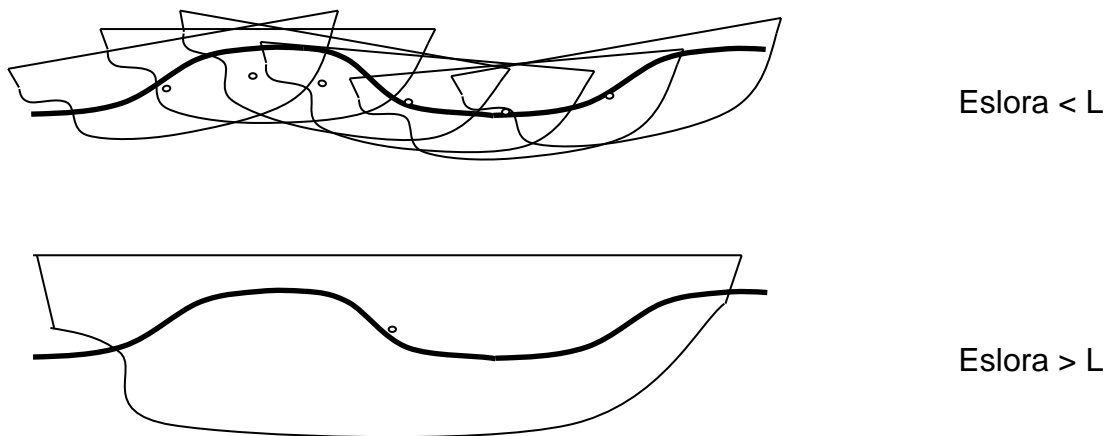


Figura 5.4. Representació de l'efecte de l'onatge en funció de l'eslora del vaixell.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Realment, aquest efecte es basa en la diferència entre l'eslora del vaixell i la longitud entre les crestes de dues ones consecutives. Per tant, no només s'ha de tenir en compte l'eslora del vaixell si no també la longitud de l'onatge.

El cas extrem es quan l'eslora del vaixell superi dues o més crestes d'ona. En aquest cas, aquest efecte es veurà reduït a zero.

Resumint, quan el longitud de l'onatge supera l'eslora del vaixell, aquest es veu obligat primer a pujar l'ona i després a baixar l'ona. Aquest últim efecte s'anomena Capbussar. Si la llargada de l'eslora es dues vegades superior a la distància entre dues crestes d'ona consecutives, el vaixell no capbusseja tant i es manté quasi en horitzontal.

Físicament, aquest efecte es produeix degut a la diferència entre el centre de gravetat del vaixell i la resultant de la força d'empenta del volum "desallotjat" pel casc del vaixell. La diferència provoca un parell resultant que genera la variació de l'assentament del vaixell.

Per un altre costat, quan el vaixell té una eslora gran, el moment d'inèrcia és més gran. Però al tenir un major pes, el temps de reacció augmenta. La reacció del vaixell degut al parell resultant és més lent i això fa que el vaixell arribi a la propera ona, amb un parell invers, oposant-se al moviment angular anterior.

5.6 L'ona a la costa catalana

Per aprofundir en l'estudi de l'onatge, escollirem com exemple del període i la longitud de les onades típiques del mar Mediterrani. En concret, a la Costa Catalana.

El sistema XIOM del Servei Meteorològic de Catalunya de la Generalitat de Catalunya disposa de 4 boies. Aquestes 4 boies estan distribuïdes pel litoral català i situades: una al Golf de Roses, l'altre al Delta del Tordera, l'altre al Delta de Llobregat i l'última al Cap de Tortosa.

Les boies son del tipus DATAWELL Waverider que proporcionen dades de l'alçada de les ones, el període i la direcció de les ones en temps real. Aquesta informació s'envia, via radio, al terra on es recullen i s'emmagatzemen.

Aquestes boies indiquen l'alçada màxima durant el temps de mesura, l'alçada significant (alçada mitja del terç de les ones més altes del registre), la direcció del pic i el període mig de les ones (període mig del total de onades del registre, mesurat entre dos passos consecutius pel nivell mig en sentit ascendent). D'interval de temps entre cada mostreig en condicions normals és d'una hora.

Es pot consultar el sistema XIOM i veure les dades en temps real o veure els valors màxims. Uns exemples de les dades que donen les boies son les següents:

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- A) Al dia 17 d'Abril del 2004, la boia del Delta del Tordera va registrar una onada de 3,9 metres d'alçada (amb una alçada significant de 2,2 metres). El període de les ones va ser de 7,5 segons.
- B) Durant el mes de Juny de 2004, es va donar un avís oficial que indicava la existència d'onades de 7 metres al Mar Mediterrani.
- C) Durant el mes de Novembre de 2004, va haver un altre avís oficial dient que hi havia ones de fins a 8 metres d'alçada.

Retornant a la teoria de l'ona trocoïdal, en el cas del mar Mediterrani, $H/L = 1/16 \div 1/20$ és un valor constant. Si prenem el valor mig per els nostres càlculs, que és $1/18$ (dada del PFC del Sr. Xavier Jiménez), llavors segons la teoria de l'ona trocoïdal, la distància entre dues crestes d'ona és:

$$L = 18 * 2,2m = 40m.$$

Amb aquesta dada de 40 metres podem dir que els vaixells amb una eslora inferior, es veuen afectats considerablement. En canvi els vaixells amb una eslora superior a 40 metres, no es veuen tan afectats.

Si prenem el període obtingut per la boia (del Delta del Tordera) del dia 17 d'Abril de 7,5 segons, el vaixell es trobarà una ona cada 7,5 segons considerant que el vaixell estigui quiet al mar i perpendicular a la direcció de les ones.

En el cas que el vaixell es desplaci en el mateix sentit que les ones, el vaixell es trobarà les crestes de les ones amb un temps superior a 7,5 segons i, per tant, el període d'assentament serà superior a 7,5 segons.

Segons sigui el cas, el període entre dues ones consecutives, vist des del vaixell, ve condicionat per la diferència entre la velocitat del vaixell i la velocitat de l'ona.

El cas pitjor és quan el vaixell incideix a l'ona de forma perpendicular a una certa velocitat. És evident que, si el vaixell entra amb un cert angle, la distància relativa per al vaixell entre dues crestes d'ona és superior i, per tant, un vaixell amb una eslora lleugerament superior als 40 metres, també es veu afectat per l'onatge. Cal dir que amb aquest rumb, l'angle α (alçada de l'ona respecte la longitud de la mateix) disminueix.

Inicialment, amb una ona de 2,2m, la longitud entre dues crestes és de 40 metres. Si el temps mig entre dues crestes és de 7,5 segons, llavors la velocitat de l'ona és de:

$$V_{ONA} = \frac{40m}{7,5s} = 5,3m/s (2,7nudos)$$

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Observem que la velocitat de l'ona depèn de l'alçada de l'ona donat que el període al Mar Mediterrani es manté quasi constant. Si donem diferents valors a l'alçada de la l'ona, obtenim longituds i velocitats d'ona. Veure Taula 5.1.

Mar Mediterrani (T = 7,5 segons)			
Alçada de l'ona (m)	Longitud de l'ona (m)	Velocitat de l'ona	
		(m/s)	(nusos)
0,5	9	1,2	0,6
0,7	12,6	1,68	0,8
0,9	16,2	2,16	1,1
1,1	19,8	2,64	1,4
1,5	27	3,6	1,8
2	36	4,8	2,5
2,5	45	6	3,1
3	54	7,2	3,7
4	72	9,6	4,9

Taula 5.1. Valors de longitud i velocitat d'ona al Mediterrani en funció de l'alçada de l'ona.

5.7. Anàlisis dels esforços

5.7.1. Introducció

Com senyalàvem abans, superar una ona representa un esforç addicional pel vaixell pel canvi de l'angle de assentament i, per tant, apareix una força que s'oposa a l'empenta del vaixell.

Per superar l'ona sense perdre velocitat es necessita una potència addicional. En canvi, quan el vaixell baixa l'ona, sobra potència normal. Com es veu, l'onatge representa una despesa d'energia extra per qualsevol vaixell amb una eslora que sigui inferior a la distància entre dues crestes d'ona.

Per superar l'onatge, el vaixell té dues opcions. Aquestes opcions representen dos sistemes de regulació del sistema de propulsió diferents. La primera opció és la de mantenir la velocitat constant i l'altre opció, consisteix en mantenir l'empenta constant.

Per la primera opció (velocitat constant) es necessita potència extra o addicional. Aquesta potència addicional pot venir del mateix sistema de propulsió sempre i quan el vaixell en disposi. Si el vaixell no disposa de potència extra, la velocitat del vaixell es veurà reduïda. Per saber quan s'ha d'aplicar la potència addicional, és important saber quan arriba la pujada de l'ona.

Amb l'opció d'empenta constant, el vaixell sempre reduirà la seva velocitat donat que mancarà l'esforç que apareix per l'angle d'assentament.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Ambdues opcions, el fenomen de l'enfrontament a l'onatge és repetitiu, és a dir, cíclic i constant.

En el cas de velocitat constant, la potència augmenta quan puja l'ona i disminueix quan baixa l'ona. És a dir, la potència oscil·la respecte a la consigna donada de potència.

En el cas d'empenta constant, el vaixell redueix la seva velocitat i, a la baixada de l'ona, augmenta la velocitat provocant un fenomen repetitiu d'acceleració i desacceleració. Això afecta al sistema de propulsió que oscil·la al voltant de la consigna de velocitat del vaixell.

Com es pot veure, sigui quin sigui el sistema de regulació, el fenomen cíclic de l'onatge es transforma en un procés cíclic en el sistema de propulsió.

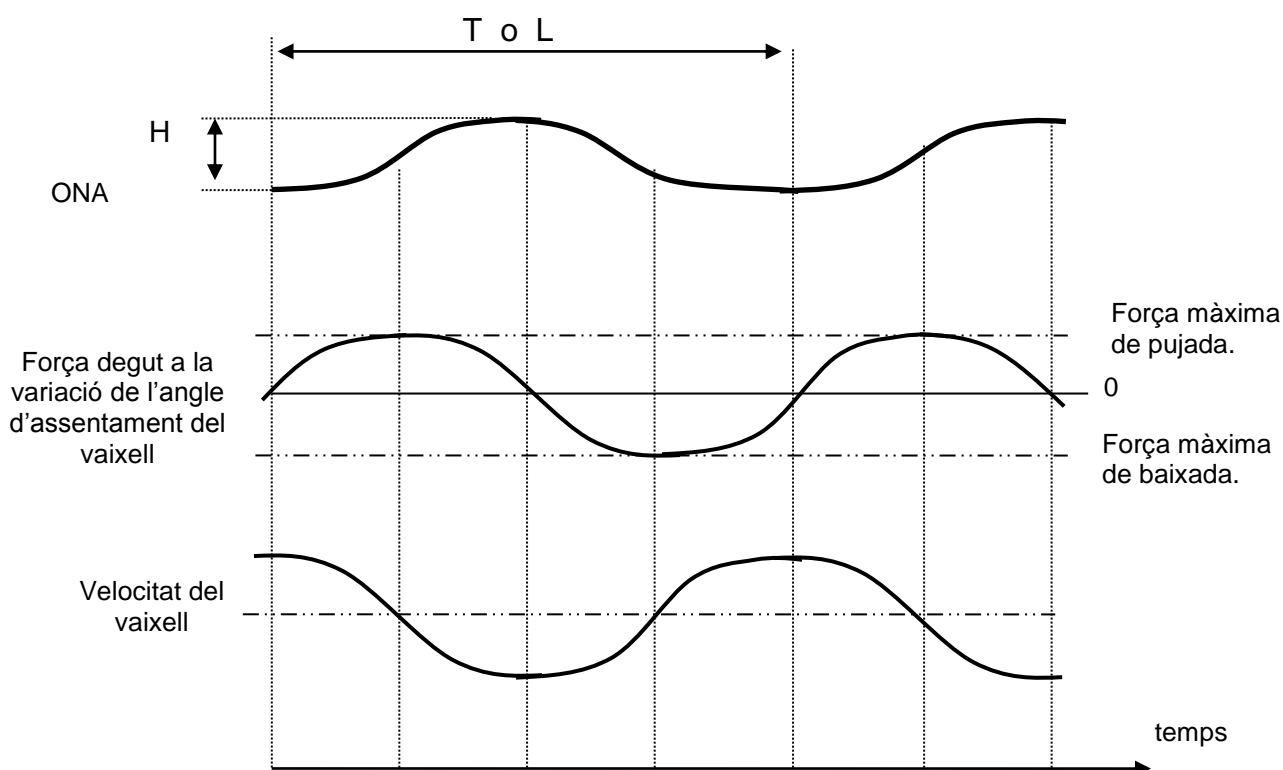


Figura 5.5. Representació del comportament del vaixell davant l'onatge.

La Figura 5.5. representa, d'una manera simple, les causes directes de l'onatge sobre qualsevol vaixell. La pujada de l'ona provoca un angle d'assentament que fa aparèixer una força proporcional a l'angle d'assentament i que s'oposa a l'empenta del vaixell (ho considerem com una força negativa perquè s'oposa a l'empenta).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquesta força, al ser proporcional a l'angle, té el seu valor màxim al màxim angle d'inclinació del vaixell i, a continuació, disminueix fins a zero, moment que el vaixell arriba a la cresta de l'ona. Durant tota la pujada, la força és contrària al tir del vaixell i fa reduir la velocitat del vaixell fins un mínim, que també coincideix amb la cresta de l'ona.

Durant la baixada de l'ona, l'angle de assentament fa que la força proporcional a l'angle es sumi al tir del vaixell (ho considerem com una força positiva perquè es suma al tir). Això fa que la velocitat augmenti. La força augmenta a mida que augmenta l'angle d'assentament. Després disminueix fins arriba al zero, just a la vall de l'ona o l'angle d'assentament és 0. En aquest punt, la velocitat del vaixell és màxima.

Si considerem que la ona té una forma sinusoïdal, la força proporcional a l'angle d'assentament també tindrà una forma sinusoïdal però avançada 90° respecte la forma d'ona. La velocitat del vaixell també té una forma sinusoïdal però desplaçada 180° respecte la funció sinusoïdal de les ones (però respecte a la força proporcional a l'angle d'assentament, la velocitat del vaixell té una forma sinusoïdal avançada 90°).

A la realitat, ni les ones tenen una alçada constant i tampoc es mouen a velocitat constant. Com dèiem al principi, hi ha moltes variables que afecten a la forma de l'ona.

5.7.2. Valors exemple

Per tenir una idea dels valors que envolten aquest efecte, mirem un primer exemple amb el vaixell o ferri "Antonio Machado". Aquest ferri amb propulsió elèctrica té una eslora de 96 metres i una tara de 6.665 tones (cal indicar que l'efecte de l'onatge no es massa important degut a la seva llargada). Suposem, a més, que les ones son simètriques, constants i cícliques. I que, el canvi d'angle assentament afecta el sistema de propulsió del vaixell. Les forces que apareixen degut al canvi de l'angle d'assentament es poden veure Taula 5.2.

<i>Angle d'assentament</i>	<i>Pujada</i>		<i>Baixada</i>	
	<i>Força</i>	<i>% del pes</i>	<i>Força</i>	<i>% del pes</i>
2°	-232,6 tn	3,4	232,6 tn	3,4
4°	-465,0 tn	6,9	465,0 tn	6,9
6°	-696,7 tn	10,4	696,7 tn	10,4
8°	-927,6 tn	13,9	927,6 tn	13,9

Taula 5.2. Valors de la força de pujada i de baixada respecte l'angle d'assentament del ferri Antonio Machado.

Si traslladem aquest valors al gràfic anterior, es pot entendre millor l'efecte que passa quan un vaixell s'enfronta a l'onatge del mar.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Amb un angle d'assentament de 8° , s'obté un valor de 927 tones que s'oposen a l'empenta del vaixell. Observem que aquesta força contraria a l'empenta representa un 14% del pes del vaixell.

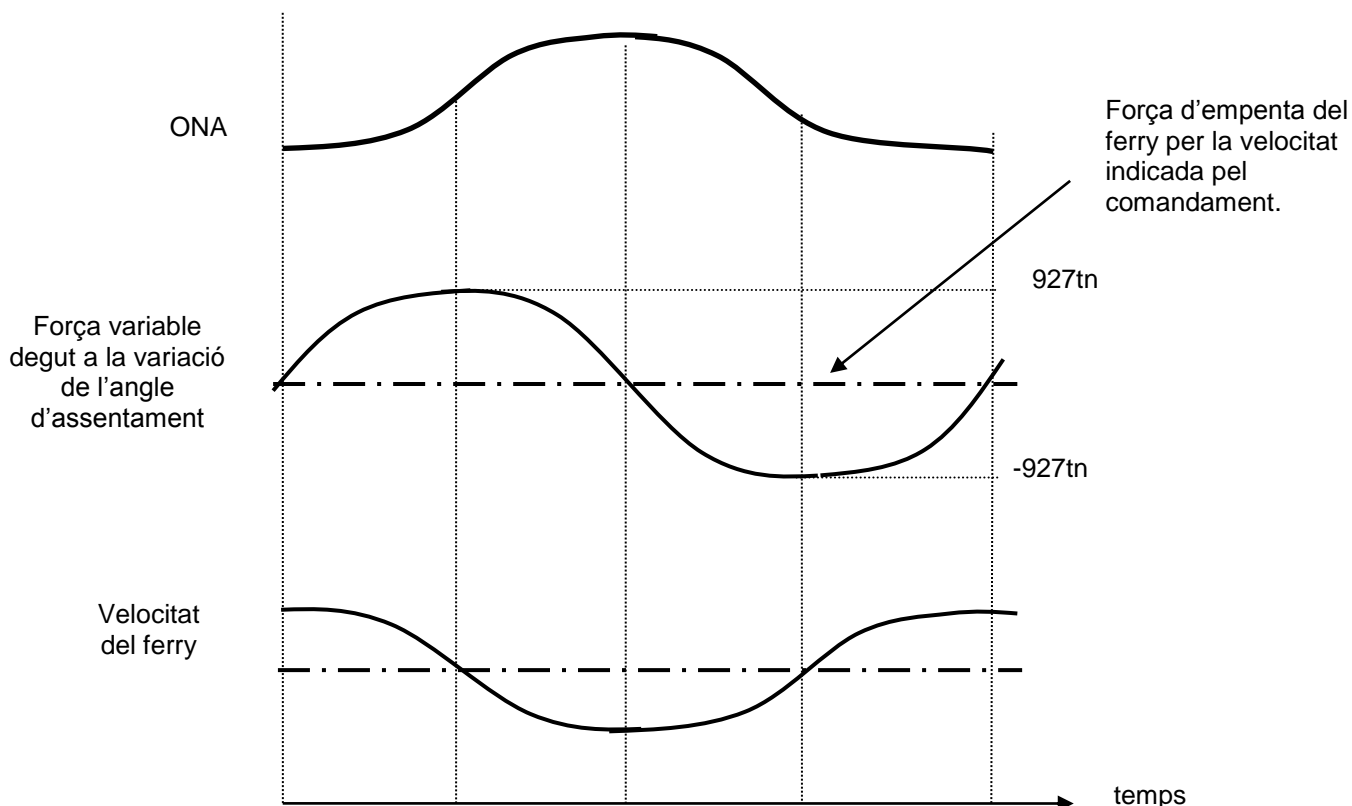


Figura 5.6. Representació del comportament del ferri Antonio Machado davant de l'onatge.

Un segon exemple és el remolcador DHOCE Stern Drive (clase I 3/3 Remolcador de Alta Mar + Aut MS + FIRE Fighting/Water Spray: 1 de la Sociedad classificatòria). Aquest remolcador té una eslora total de 30 metres i pesa unes 850 tones. Com veiem és més petit i més curt d'eslora que el ferri "Antonio Machado". Donat que aquest vaixell té una eslora inferior a 40 metres, es veurà més influenciat per l'onatge.

Angle d'assentament	Pujada		Baixada	
	Força	% del pes	Força	% del pes
2°	-29,6 tn	3,4	29,6 tn	3,4
4°	-59,2 tn	6,9	59,2 tn	6,9
6°	-88,7 tn	10,4	88,7 tn	10,4
8°	-118,2 tn	13,9	118,2 tn	13,9
10°	-147,4 tn	17,3	147,4 tn	17,3
12°	-176,5 tn	20,8	176,5 tn	20,8
14°	-205,4 tn	24,2	205,4 tn	24,2

Taula 5.3. Valors de la força de pujada i de baixada respecte l'angle d'assentament del remolcador model DHOCE Stern Drive.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com veiem, amb un angle d'assentament de 14° s'arriba a una força de 205 tones que representen un 24% del pes del remolcador.

Les dades tècniques indiquen que aquest remolcador té una empenta de 55tn. Si re-fem la taula anterior i ens centrem amb la força de pujada degut a l'angle d'assentament, obtindrem la Taula 5.4. S'ha afegit l'empenta del remolcador i la diferència entre les dues forces (empenta del remolcador i força per l'angle d'assentament).

<i>Angle d'assentament</i>	<i>Pujada</i>			
	<i>Força</i>	<i>Empenta</i>	<i>% de sobrecàrrega</i>	<i>Diferència empenta - força</i>
2°	29,6 tn	55 tns	--	25,4 tns
4°	59,2 tn	55 tns	7,6 %	-4,2 tns
6°	88,7 tn	55 tns	61 %	-33,7 tns
8°	118,2 tn	55 tns	115 %	-63,2 tns
10°	147,4 tn	55 tns	168 %	-92,4 tns
12°	176,5 tn	55 tns	221 %	-121,5 tns
14°	205,4 tn	55 tns	273 %	-150,4 tns

Taula 5.4. Valors de sobrecàrrega als motors de propulsió i diferència de forces al remolcador DHOCE.

Com s'intuïa, un angle d'assentament de 14°, apareixer una força que s'oposa a l'empenta del vaixell i que representa un 273% respecte la força d'empenta del remolcador. Però des del 4° d'angle d'assentament en pujada, la força degut a aquesta angle supera a l'empenta del remolcador.

Cal comentar que el temps entre dues crestes consecutives és de 7,5 segons. Això vol dir que la força que s'oposa a l'empenta del vaixell només està present uns 3,25 segons. Aquesta força que s'oposa creix fins un màxim (205tn) i després decreix fins a zero. I durant els 3,25 segons restants, la força es suma a l'esforç del vaixell. Aquesta força que s'afageix creix fins un màxim (205tn) i després decreix fins a zero.

Això passa cada vegada quan puja i baixa. I es repeteix de forma constant cada 7,5 segons, si no canvia de rumb i les condicions de l'onatge es mantenen.

5.7.3. Efecte sobre la velocitat

Per estudiar l'efecte de l'onatge sobre la velocitat dels vaixells, continuem a partir de l'apartat anterior.

Si representem l'empenta del remolcador dins del comportament de l'onatge en el remolcador amb la força resultant de l'angle d'assentament, obtenim la Figura 5.7. En aquesta representació podem veure que, en certs punts, la força

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

contrària és superior a l'empenta i , en altres moments, l'empenta és superior a la força. Resumint, durant la pujada, al vaixell li manca esforç i , durant la baixada, li sobra esforç. Aquesta diferència no és constant sinó variable i ve donada per la variació de l'angle d'assentament.

Allà on la força és superior a l'empenta del vaixell, la resultant és negativa i , per tant, el vaixell pateix una pèrdua de velocitat (acceleració negativa). En aquests moments, el sistema de control de la propulsió està demanant màxima potència del sistema de tracció per mantenir la velocitat constant.

El sistema de propulsió elèctrica consta, a grans trets, d'una planta de generació de energia, uns convertidors estàtics electrònics i uns motors elèctrics de propulsió. Normalment, la planta de generació la formen més d'un grup generador, on el motor primari (de combustió interna) fa girar un alternador. Normalment el motor dièsel gira a unes revolucions constants gràcies a un control electrònic de gir, amb una important energia cinètica acumulada a les seves masses rodants, que pot actuar a mode de KERS.

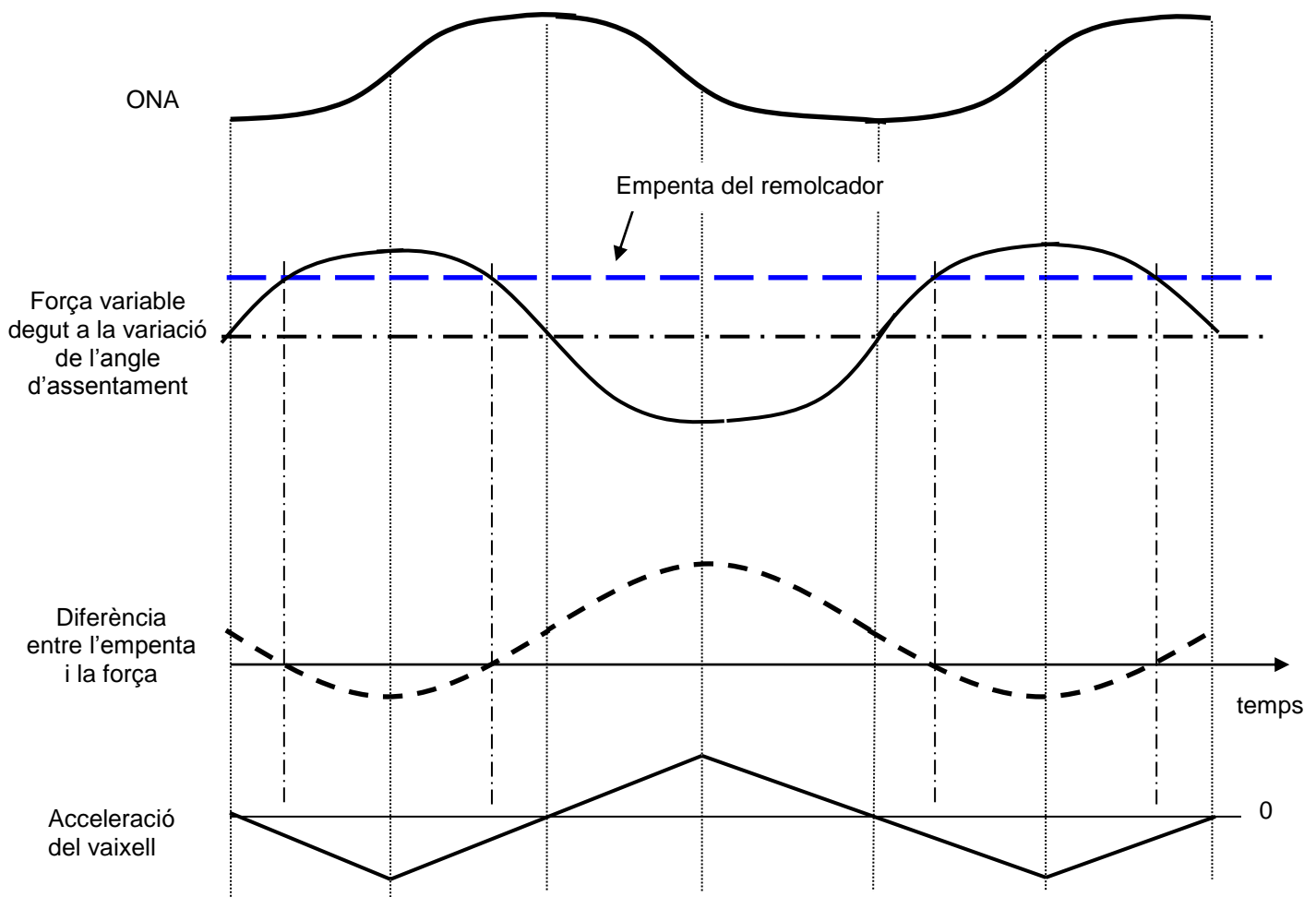


Figura 5.7. Representació de la diferència entre l'empenta i la força resistent en el sentit d'avanç i l'acceleració del vaixell.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per a cada tensió i/o freqüència, el motor elèctric de propulsió té una única corba de parell/velocitat. El convertidor electrònic de potència pot proporcionar diferents nivells de tensió i freqüència segons les necessitats demanades pel comandament i, per tant, el sistema de propulsió disposa de diferents corbes de funcionament. Per a cada corba existeix un punt d'equilibri entre la velocitat demanada pel comandament i les condicions marítimes.

Si analitzem aquest fenomen amb més detall, observem el següent. Inicialment a una velocitat d'equilibri (punt **A**), punt on s'igualen el parell resistent (degut a la resistència a l'avançament del vaixell) i el parell del sistema de propulsió en horitzontal, el vaixell entra a una ona (punt **B**).

En aquest punt, es produeix una disminució de la propulsió per un excés de càrrega (força contrària degut a l'angle d'assentament) i la regulació del sistema de propulsió actua augmentant la força per pujar l'ona fins arribar a un nou punt d'equilibri (punt **C**). En aquest moment, la major força resistent s'igualava amb l'augment de força del vaixell ordenat pel sistema de regulació.

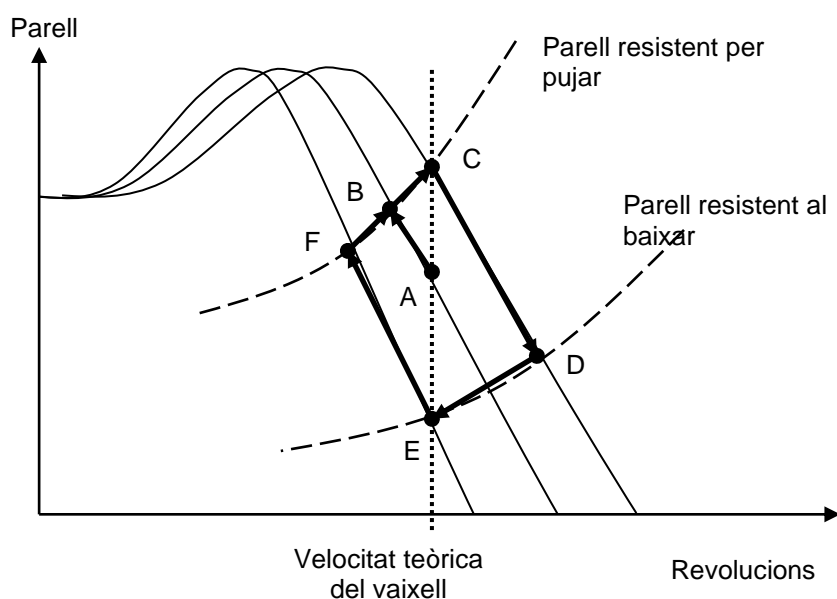


Figura 5.8. Representació del bucle de regulació de velocitats del sistema de propulsió elèctric del vaixell amb motors de gàbia d'esquirol controlats per un variador de freqüència electrònic amb consigna de velocitat.

A la poca estona, el vaixell baixa de l'ona i augmenta la seva velocitat (punt **D**), perquè la força resistent és inferior que la força del vaixell i el motor de propulsió s'embala.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A continuació, el regulador redueix el tiro del vaixell fins trobar un nou punt d'equilibri (punt **E**). Després, el vaixell torna a entrar amb una altre ona i augmenta la força resistent, i el vaixell redueix la seva velocitat (punt **F**). La regulació torna a actuar davant el increment de força resistent fins trobar un altre punt d'equilibri.

Podriem dir que el polígon CDEF representa les diferents situacions de variació del vaixell respecte al punt d'inici **A**.

5.7.3. Efecte sobre el corrent

Ara anem a explicar l'exemple del remolcador a la Figura 5.9. Supossem que el remolcador té un motor d'inducció ABB de carcassa d'alumini de 440V, 60Hz, 4 pols, d'intensitat nominal 825A (línia blava de la Figura 5.9), de parell nominal 2.937Nm que li proporcionen un tiro de 50Tm.

Suposem que el vaixell avança a una velocitat amb una demanda de motor del 50%. Quan el vaixell remunta l'ona, el remolcador necessita vèncer l'esforç de pujar l'ona que, amb un angle d'assentament de 6° , correspon a 30Tm. En el moment de pujar l'ona, el corrent del motor elèctric augmenta fins a 1.125A (un corrent 36% superior al nominal).

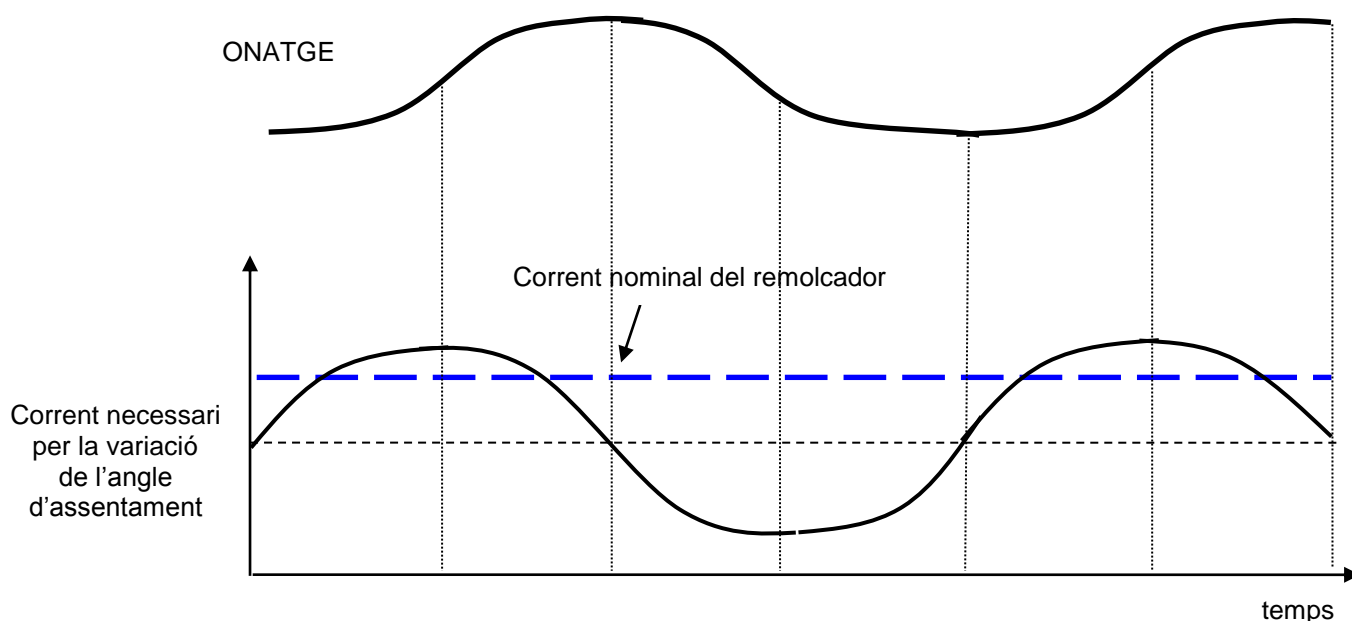


Figura 5.9. Representació del corrent necessari per la variació de l'angle d'assentament degut a l'onatge.

Si el remolcador està baixant l'ona, el pes del vaixell afegeix un tiro addicional que, amb un angle d'assentament de -6° , correspon a 30Tm. Quan el vaixell baixa de l'ona, el corrent disminueix fins a 225A (un corrent 72% inferior al corrent nominal).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com veiem, la variació del corrent consumit pel propulsor (entre la pujada i la baixada) és molt gran. A la pujada, augmenta a uns 1.125A i a la baixada baixa fins a uns 225A. Aquesta gran variació de corrent de propulsió provoca una gran variació de corrent al generador principal.

Aquesta variació del corrent de propulsió és repeteix amb la mateixa freqüència i fase que l'onatge. I provoca una variació en el corrent del generador principal.

Si l'onatge augmenta, l'angle d'assentament augmenta i el corrent de pujada serà més gran i, també, el corrent de baixada serà més petit. Per tant, la variació del corrent (del sistema de propulsió) creixarà però la freqüència i la fase del cicle romandrà constant.

Si el període de l'ona al Mediterrani és de 7,5 segons, llavors el temps de sobre-càrrega del motor no seria superior a 2 segons. Això afecta directament al motor primari.

Si el propulsor és únic, el motor tèrmic cal sobredimensionar-lo per a poder superar el pic de força resistent. En el cas dels híbrids, el problema es trasllada a una gestió d'energies mitges, amb possibilitats d'importants estalvis. En aquest cas, es poden posar en joc més energia instantània de forma cíclica.

En cas de sobrecàrrega el motor tèrmic no pot donar més potència, les masses rodants de generació perden velocitat de gir. Però, en el cas dels híbrids es pot jugar amb l'energia cinètica del conjunt motor tèrmic-alternador. Fent un càlcul senzill, veiem que el dèficit d'energia per ona no és superior a:

$$1,73 * (1125A - 825A) * 400V * 2 \text{ segons} = 277\text{kWseg}$$

Per alimentar aquest motor de 625kVA, necessitem un conjunt dièsel-alternador que subministri un mínim de 650KVA, que en el moment de la seva posta en servei acumuli a les seves masses rodants una energia de:

$$650\text{kVA} * 4\text{kWs/kVA} = 2.600\text{kWs}.$$

La pèrdua de freqüència en un alternador dissenyat exclusivament a la propulsió amb la energia cíclica esmorteïda, provoca una caiguda de freqüència cíclica de:

$$\Delta f = \sqrt{((2600 * 277) / (2600))} * 60\text{Hz} = 56\text{Hz}.$$

És un valor perfectament assumible per el motor dièsel que, d'aquesta forma, reparteix al llarg del cicle la variació, amb un potencial d'estalvi de combustible important i que cal explorar.

El conjunt dièsel-alternador passa a fer funció de KERS amb un sobre cost molt petit, limitat al sobre dimensionat l'alternador, que només dissenyadors amb molta experiència saben encertar.

5.8. Característiques d'un vaixell elèctric

Hi ha molts tipus de vaixells, tots es dissenyen en funció de la seva funcionalitat dins del mar. El seu pes o desplaçament és molt variat i es fa quasi impossible classificar-los.

El vaixell de propulsió elèctrica disposa, bàsicament, d'un centre de generació d'energia elèctrica, una distribució d'energia, uns convertidors estàtics, uns motors elèctrics de propulsió i els serveis propis auxiliars d'un vaixell necessaris per navegar.

Normalment els vaixells amb una potència superior als 6MW, s'inclinen per sistemes de producció d'energia elèctrica a tensió elevada, mentre quan es supera els 8MW o 9MW, és improbable trobar sistemes de generació a baixa tensió.

Com es pot veure, la propulsió elèctrica condiona la concepció del vaixell, la generació dins del mateix i les seves aplicacions a la maquinaria de coberta, a bombes (per els serveis de coberta), bombes i auxiliars de la maquinaria principal i instal·lacions especials com ventiladors, ascensors, portes estanques i sistemes contra incendis.

La planta elèctrica dins del vaixell ha de poder subministrar un corrent de curtcircuit suficientment important com perquè les proteccions detectin que s'ha produït un curtcircuit.

Al començament, es feia el muntatge amb els generadors elèctrics acoblats mitjançant un reductor al motor dièsel principal, coneguts com generadors de cua. Aquests generadors eren màquines asíncrones d'anells. Però, per aconseguir la capacitat de curtcircuit, s'instal·lava en paral·lel un compensador síncron.

Les avantatges d'aquest sistema deriven de la independència de les dues xarxes. Així es redueixen els efectes dels harmònics derivats de l'electrònica de potència associats a la regulació de la velocitat dels motors de propulsió i les oscil·lacions de tensió produïdes per les variacions de càrrega.

La tecnologia dièsel-elèctrica permet fer front a les sobre càrregues crítiques del propulsor, millor que el dièsel directe, doncs les masses rodants dels sistemes de generació, poden actuar d'ACEE, sobredimensionant adientment els alternadors.

5.9. Tipologies energètiques bàsiques

Tot vaixell elèctric té una part de generació, una altre de distribució i el consum. Com que també son unitats aïllades i independents, i com no poden rebre cap energia de l'exterior, la seva topologia ha de ser principalment redundat. D'aquest forma s'evita la situació no desitjada o deriva.

Totes les configuracions es basen en sistemes redundants i sempre tenen equips d'emergència per sortir de situacions compromeses. A partir aquesta primera premissa, les configuracions internes de generació i distribució s'assemblen molt a centrals elèctriques de terra en dins.

5.10. Balanç energètic d'un vaixell elèctric

Prenem l'exemple de vaixell de propulsió elèctrica en "Antonio Machado" de 96 metres d'eslora. Aquest ferri disposa de 4 motors elèctrics de propulsió (dos a proa i dos a popa) i d'una planta de generació formada per 10 grups electrògens o generadors.

Els grups generadors estan dividits en dos seccions independents i, cadascuna de la secció, alimenta a dos motors de propulsió mitjançant un "bus" o "barra". Hi ha un "bus" o "barra" d'acoblament que uneix les dues seccions en cas de necessitat. Els grups electrògens alimenten tant als motors de propulsió com a tots els sistemes elèctrics del vaixell (sistemes essencials més sistemes auxiliars no essencials).

Cada grup electrogen està format per un motor dièsel CUMMINS 275kW de potència, de 6 cilindres en línia, sobre alimentat (amb turbocompressor) i amb un sistema de injecció-bomba a unes revolucions fixes de 1.800rpm, estabilitzat per mitjançant un control electrònic. L'alternador trifàsic STAMFORD de 4 pols amb una tensió de sortida de 440Vac a 60Hz, és de 400kVA amb un corrent màxim 524A.

El grup electrogen no pot subministrar una potència activa en règim permanent superior a la del motor que l'arrossega (275kW). El sobre dimensionament de l'alternador en un 45% ($400kVA / 275kW = 1,45$), resulta insuficient com es veurà més endavant per fer front als transitoris d'arrencada o als canvis de velocitat dels motors de propulsió, on es posa en joc una gran quantitat de energia reactiva i potència instantània.

Cada motor elèctric de propulsió THRUSTER, és d'inducció de gàbia d'esquirol de 550kW acoblat a les hèlices directament per Cardan. Disposen d'un estator de 4 pols i 3 fases amb connexió estrella, alimentat a 440V de 60Hz amb un corrent màxim de 850A i unes revolucions màximes de 1.785rpm.

La potència de 550kW correspon a la potència útil a la hèlice. La potència aparent o absorbida per el motor de propulsió és:

$$S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U = \sqrt{3} \cdot 850A \cdot 440V = 647787,2VA \approx 650kVA$$

La potència de propulsió és igual a la força d'empenta per la velocitat d'avançament. És a dir, que la potència de propulsió és la que proporciona la hèlix en un determinat règim. La hèlix té un rendiment energètic al voltant del 60%. Podem valorar els esforços al voltant de 220kN, a una velocitat aproximada de 18km/h (5m/s o 10 nusos).

5.11. Alternadors dels grups generadors

Els alternadors utilitzats als grups electrògens son alternadors autoexcitats amb regulació electrònica de tensió. Aquest sistema aconsegueix mantenir la tensió de sortida constant i independent del nivell de càrrega o de consum, sigui en buit o sigui a plena càrrega. Podem veure un esquema general d'un alternador a la Figura 5.10.

El imant permanent (PMG) de l'excitatriu pilot, proporciona potència al camp d'excitació mitjançant la Unitat de Control de Tensió (AVR del tipus MX341). Aquesta unitat regula el nivell d'excitació que requereix el camp segons la càrrega aplicada. La Unitat de Control respon al senyal derivat del debanat principal. Al controlar la baixa potència del camp d'excitació, s'aconsegueix el control de l'alta potència exigida per el camp principal, mitjançant la sortida rectificada de l'estàtor d'excitació. A més, es pot afegir el muntatge anomenat COMPOUND al mateix alternador autoexcitat, i s'aconsegueix més exactitud a la tensió de sortida.

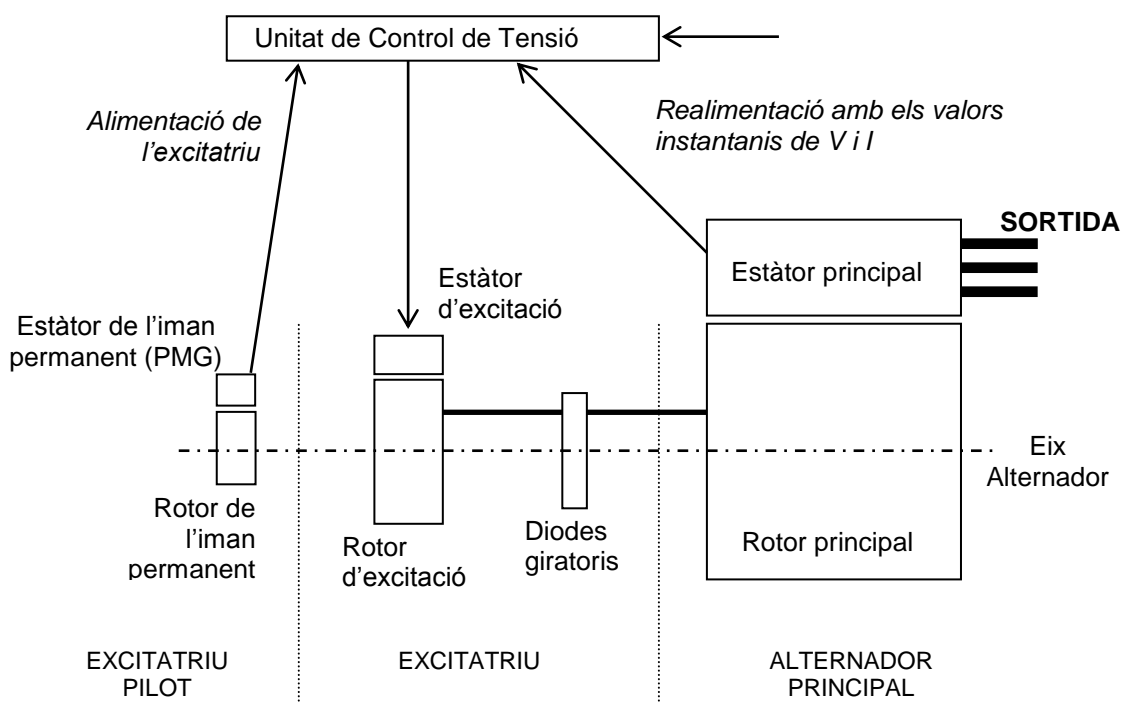


Figura 5.10. Esquema alternador STAMFORD

Els fabricants d'alternadors per a grups electrògens indiquen que els alternadors admeten una sobrecàrrega transitòria durant curts espais de temps (màxim 8 o 10 segons). A la Taula 5.5, s'indiquen les sobrecàrregues admissibles per a diferents fabricants d'alternadors.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Fabricant	Sobrecàrrega admissible
LEROY SOMMER	2
MECC ALTE	2,2 (40 kVA < Pot. < 130 kVA) 1,7 (Potència > 150 kVA)
OBEKI	> 2
STAMFORD	1,5 (Imant permanent) 2,5 (Autoexc., doble excit.)

Taula 5.5. Valors de sobrecàrrega admissible a 10 segons.

El nostre cas es tracta d'un alternador de la casa STAMFORD amb imants permanents i, per tant, la sobrecàrrega admissible és 1,5 vegades la potència nominal.

L'empresa Electra-Molins, dedicada a la fabricació de grups electrogens, considera que la sobrecàrrega transitòria que pot suportar l'alternador varia segons la duració de la sobrecàrrega i el valor del mateix. Segons l'experiència de l'empresa, es poden aconseguir el següents valors:

<i>Valor de la sobrecàrrega</i>	<i>Temps màxim</i>
105%	1 hora y 30 min.
110%	1 hora
125%	10 min.
150%	2 min.
300%	10 seg.

Taula 5.6. Valors experimentals de sobrecàrrega de l'empresa Electra-Molins.

En principi, es prenen els valors que garanteix el fabricant referent a la sobrecàrrega admissible encara que no s'obliden els valors experimentals obtinguts per l'empresa Electra-Molins.

5.12. Motors elèctrics

Una cop coneguts els valors màxims de la sobre càrrega dels grups generadors, anem a trobar la sobrecàrrega màxima dels motors de propulsió. Donat que no disposem de les característiques tècniques del motors THRUSTER, ens basarem en els motors del fabricant ABB especials per marina.

Motor ABB 440V, 60Hz, 4 pols	Mod. carc.	Factor pot.	Corrent		Parell			Inèrcia [kgm ²]	Pes [kg]
			I _{nom} [A]	I _s /I _n	T _{nom} [Nm]	T _s /T _n	T _{max} /T _n		
550kW	Al	0,90	825	6,7	2.937	1,1	2,6	13	2.400
560kW	Fe	0,89	855	7,2	2.991	1,2	2,7	10,5	2.150

Taula 5.7 Característiques tècniques de motors marins de ABB.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Escollint un motor trifàsic de potencia similar, 550kW, les seves característiques tècniques es mostren a la Taula 5.7. (Dades extretes del catàleg de ABB Marine ref. GB 08-2201).

S'observa que el sobre parell màxim que es pot extreure del motor amb carcassa d'alumini és 2,6 vegades el parell nominal. Mentre que amb carcassa d'acer, és 2,7 vegades el parell nominal. A la Taula 5.8, es pot veure el corrent i el parell dels motors nominal i màxim.

Motor ABB, 440V, 60Hz, 4 pols	Model carcassa	Corrent [A]		Parell [Nm]		
		I _{nom.}	I _s	T _{nom.}	T _s	T _{màx.}
550kW	Al	825	5.527,5	2.937	3.230,7	7.636,2
560kW	Fe	855	6.156	2.991	3.589,2	8.075,7

Taula 5.8. Corrent i parell màxim de motors marins de ABB.

Que en condicions d'arrancar del propulsor a rotor parat, amb 6,7 vegades el corrent nominal només podem extreure un parell de 3.230,7Nm, 5.500A, per el motor amb carcassa d'alumini. En el cas del motor amb carcassa d'acer, amb 7,2 vegades, el parell extret és 3.589,2Nm, 6100A.

En les condicions de la Figura 5.8, hom pot assolir a l'entorn del punt de treball en el de carcassa d'alumini, parells de 7.600Nm, amb consums de 2.145A. En motor de de carcassa d'acer, parells de 8.000Nm amb consums de 2.300A.

Aquests valors justifiquen la importància de disposar a bord d'una generació, amb corrent de curtcircuit superior a aquests corrents de sobre càrrega, per a mantenir una tensió disponible mínima. Aquesta qüestió és habitual a les xarxes de distribució terrestres, on almenys poden durar 1 segon sense disparar les proteccions.

El motor dièsel directament acoblat al propulsor no pot treballar d'aquesta forma, doncs la seva corba parell-velocitat es gaire bé horitzontal a l'entorn de la velocitat nominal. Per a disposar d'aquest marge de parell polsant de sobrecàrrega, cal sobredimensionar-lo, el que obliga treballar en un punt inadequat d'operació, la major part del temps d'explotació.

5.13. Balanç de potències

A partir de les dades del ferri, es pot realitzar un primer balanç de potències. Cal comentar que desconexem el consum energètic global exacte del vaixell, ja que al ser un vaixell dedicat al transport de passatgers, molts equips e instal·lacions auxiliars depenen de la planta generadora.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Abans de fer un balanç de potències, cal comparar les potències nominals, els esglaons de màxima potència i les sobre càrregues tant dels motors primaris com dels alternadors i dels motors de propulsió.

Es comprova que la potència activa de l'alternador està limitada per la potència útil del motor tèrmic (275kW), per tant, la potència activa, que pot donar l'alternador, no és 320kW com s'indica, si no 275kW (inferior a la capacitat del alternadors). Si admetim caigudes o pèrdues de freqüència, podem extreure les potències transitòries (durant un segon) superiors, gràcies a l'energia cinètica de les masses giratòries, que és de l'ordre de 4kWseg/kVA de l'alternador.

<i>Element</i>	<i>Potència nominal</i>	<i>Esglaó de potència</i>	<i>Potència màxima</i>	<i>Temps màx.</i>
Motor Tèrmic	275kW	135kW (50%)	302,5kW (110%)	1 hora
Generador	S = 400kVA P = 320kW Q = 240kVAr	S= 200kVA (50%) P = 160kW Q = 120kVAr	1.000kVA (250%) P = 480kW Q = 360kVAr	10 seg.
Propulsor	650kVA	650kVA (100%)	1.625kVA (250%)	10 seg.

Taula 5.9. Valors de potència generals.

Si es sumen les potències de tots els generadors i, després, es resta la potència que consumeixen tots els motors de propulsió, s'observa que existeix un sobrant de potència de 1.400kVA. Aquest balanç correspon exclusivament al règim estacionari, per fer front a l'energia reactiva i la distorsió harmònica.

Normalment els vaixells es dissenyen amb un 15% més de potència per diferents qüestions com fallida d'un generador, manteniment d'un grup generador, brutícia del buc, etc.... L'experiència assenyala que pot haver un grup electrogen en averia o en manteniment en cada xarxa. Per tant, el balanç de potència definitiu, en règim estacionari, tenint en compte la disponibilitat real, és d'un excés de 600kVA.

Per apropar el balanç d'energia a la realitat, es selecciona una xarxa de la planta generadora, formada per 5 grups generadors i dos motors de propulsió. A la Taula 5.10, es mostren els valors de generació i de consum d'energia d'una xarxa en règim estacionari, ajustat a la potència real que proporciona el motor tèrmic.

RÈGIMEN ESTACIONARI	<i>Generació</i>		<i>Consum nominal</i>	Balanç
	<i>1 grup</i>	<i>5 grups</i>	<i>2 motors</i>	
Corrent, i (A)	450	2.250	1.700	550
Potència aparent, S (kVA)	345	1.725	1.300	425
Potència activa, P (kW)	275	1.375	1.100	275
Potència reactiva, Q (kVAr)	206	1.030	692,8	337,2

Taula 5.10. Balanç en règim estacionari d'una xarxa al vaixell tractat.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com s'aprecia en una situació de règim estacionari, existeix corrent sobrant de la planta de generació encara que no sigui molt superior. Si sumem els consums d'un ferri d'aquestes característiques, s'aprecia que el sobrant pot arribar a ser massa just.

A més, les situacions reals de navegació del vaixell donen irregularitats tant en la distribució de la càrrega, com en la generació d'energia i altres raons no contemplades en aquest treball. Del dit fins ara, es conclou que la reserva de potència per fer front als transitoris, és minsa i es poden originar fàcilment escenaris de col·lapse energètic, per manca del balanç de potències de curtcircuit.

Però per analitzar millor les situacions que es donen, anem a realitzar la mateixa taula però amb els valors en règim transitori (Taula 5.11). Aquestes situacions es donen quan els motors de propulsió arrenquen, quan s'ha de remuntar una ona o vèncer ràfegues de vent i/o corrents marins.

Donant valors de potència i despreciant la potència consumida pels sistemes externs al sistema de propulsió, ja s'observa el dèficit energètic de reserva transitòria elèctrica.

En el cas del règim transitori cal tenir en compte que, els motors de propulsió son capaços de consumir, durant l'arrencada, entre 6 i 7 vegades el corrent nominal, tal i com s'ha vist a les dades del fabricant de motors ABB Marine.

Per altre costat tenim que l'alternador, capaç de proporcionar un corrent aparent de 524A, només proporciona el corrent útil de 450A ja que el generador està connectat al motor tèrmic amb potència inferior. Consumir més corrent en forma d'energia activa, portarà associada així mateix una disminució de la freqüència generada.

RÈGIM TRANSITORI	Generació		Consum	Balanç
	1 grup	5 grups	2 motors	
Corrent, i (A)	1.062,5	5.310	11.050	- 5740
Potència aparent, S (kVA)	862,5	4.312,5	3.250	1.062,5
Potència activa, P (kW)	687,5	3.437,5	2.750	687,5
Potència reactiva, Q (kVAr)	515	2.575	1.732	843

Taula 5.11. Balanç en règim transitori d'una xarxa al vaixell.

Com es suposava, el balanç de corrent en règim transitori és negatiu. És a dir, els grups generadors no poden proporcionar el corrent necessari per règims transitoris. El vaixell no té la potència necessària per poder arrencar o accelerar els seus propulsors, ja que la potència d'arrencada (transitori) dels propulsors està limitada per la potència que poden subministrar els grups generadors, puntualment.

Encara que el sistema de propulsió del vaixell inclogui un convertidor electrònic principal de tracció per cada motor, si les necessitats del motor son altes, el

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

convertidor demanarà la potència als grups generadors. Aquesta limitació no es produiria si estiguéssim parlant d'un font d'energia "infinita" com pràcticament succeeix a la xarxa de distribució terrestre, alimentada per transformadors des de generadors molt potents, on la càrrega disposa de corrents transitoris (1 segon) de l'ordre de $20I_n$.

Les dades d'aquesta taula fan referència a una situació ideal on tots els grups electrògens donen la mateixa potència per igual sense pèrdues ni corrents circuladors entre diferents generadors i amb la disponibilitat de tots els generadors al complet.

Si es realitza el càlcul invers, és a dir, a partir del corrent màxim total dels 5 generadors que donen el corrent màxim per motor en règim transitori, obtenim (veure Taula 5.12):

R. TRANSITORI	Generació màx. de 5 grups	Consum de 1 motor	Consum màxim 1 motor	Relació
Corrent, I (A)	5.310	2.812,5	5.525	52%

Taula 5.12. Balanç en règim transitori d'un motor.

En el cas ideal i en règim transitori, si el corrent màxim que generen els 5 grups és la meitat del necessari en un únic motor per arrencada, llavors la potència d'arrencada dels motors serà un 25% de la potència nominal, en el supòsit mític de que la tensió es manté en els valors nominals.

Aquest vaixell dissenyat per navegació lacustre, és a dir, sense onades i a països freds, va venir a operar a Gibraltar. A aquesta zona, els corrents marins i els vents son considerables i freqüents i, en alguns casos, forts. Per tant, la seva operació va esdevenir inviable pel dèficit de potència instantània existent. És un clar exemple on la utilització de tecnologia de ACEE hagués permès una operació correcta.

Alguns vaixells dièsel-elèctric actuals contempen la sobrecàrrega en el disseny però no els escenaris de curtcircuit.

5.14 Valors nominals en un generador síncron

5.14.1 Introducció

Els valors nominals de les màquines expressen els límits bàsics, com la velocitat i la potència. L'objectiu d'aquests valors nominals és la de protegir al generador dels perills d'un ús equivocat, generalment limitat per les temperatures d'operació.

Aquests valors nominals acostumen a estar indicats en un placa d'identificació solidaria a la màquina elèctrica i son els següents: Tensió, Freqüència,

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Velocitat, Potència aparent (VA), Factor de potència, Corrent de camp i Factor de servei.

Una vegada coneguda la freqüència de funcionament només hi ha una velocitat nominal de rotació possible per un determinat nombre de pols. La relació fixa entre freqüència i velocitat s'expressa per l'equació:

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

La tensió d'un generador depèn del flux magnètic, de la velocitat de rotació i de la seva construcció mecànica. Per un model de carcassa mecànica i velocitat donats, quan més alta sigui la tensió desitjada, més alt serà el flux que es necessita a la màquina. Però en canvi, el flux no pot augmentar indefinidament, donat que sempre hi ha un màxim corrent de camp permès, limitada pel conductor d'excitació i la saturació del circuit magnètic.

Una altre consideració per fixar la tensió màxima permesa és el valor de ruptura del aïllament del bobinat; les tensions de funcionament normal no han d'acostar-se molt al valor de ruptura ni al de fatiga dielèctrica.

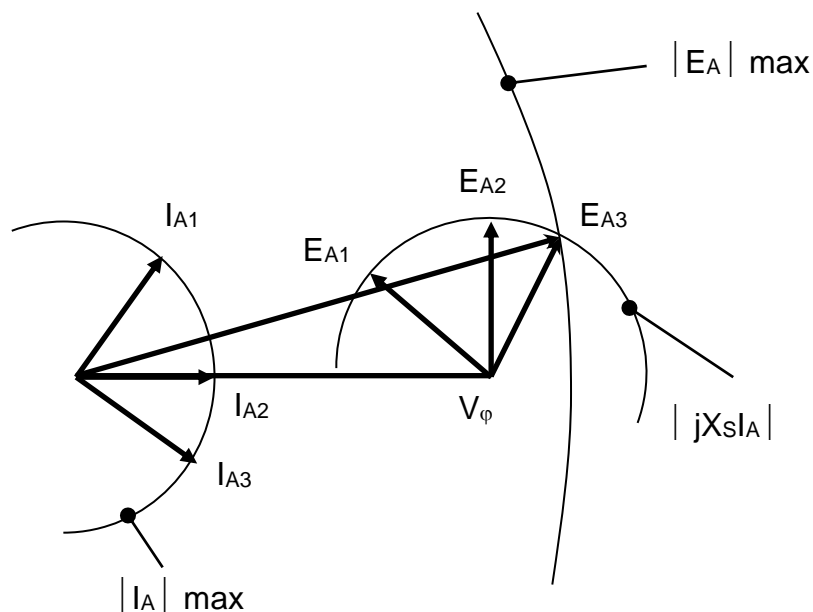


Figura 5.11. Diagrama fasorial d'un generador síncron.

Existeixen dos factors que determinen els límits de potència de les màquines elèctriques. Un és el moment de torsió mecànic sobre l'eix i l'altre és el escalfament de les bobines de la màquina. A tots els motors i generadors síncrons comercials, l'eix està mecànicament sobre dimensionat com per suportar una potència d'estat estable molt més gran del que indica la potència

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

nominal de la màquina. Els límits reals, en estat estable, es manifesten per l'escalfament de les bobines de la màquina elèctrica.

Hi ha dues bobines en un generador síncron i a cadascuna d'elles cal protegir-les contra el re-escalfament; aquestes dues bobines són la d'induït i la de camp. El màxim corrent d'induït acceptable defineix la potència nominal aparent del generador. Si es coneix la tensió nominal, llavors el màxim corrent d'induït acceptable determina els kVA nominals del generador.

És important observar, amb relació a l'escalfament del bobinat de l'induït, que el factor de potència del corrent d'induït és irrellevant. L'efecte de l'escalfament de les pèrdues del coure a l'estator, s'expressen per:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_A$$

I és independent de l'angle del corrent amb relació a V_ϕ . Donat que l'angle del corrent és irrellevant a l'escalfament de l'induït, els valors nominals d'aquestes màquines estan donades en kVA en lloc de kW. Queda doncs el kW, reservat per al que acaba generant parell resistent a l'eix del generador.

L'altre bobina d'interès és la bobina del camp. Les pèrdues al coure d'aquesta bobina, s'expressen per:

$$P_{RCL} = I_F^2 \cdot R_F$$

Així que el màxim escalfament permès defineix el màxim corrent de camp per la màquina. Com $E_A = K\Phi\omega$, això també defineix la major magnitud acceptable per E_A .

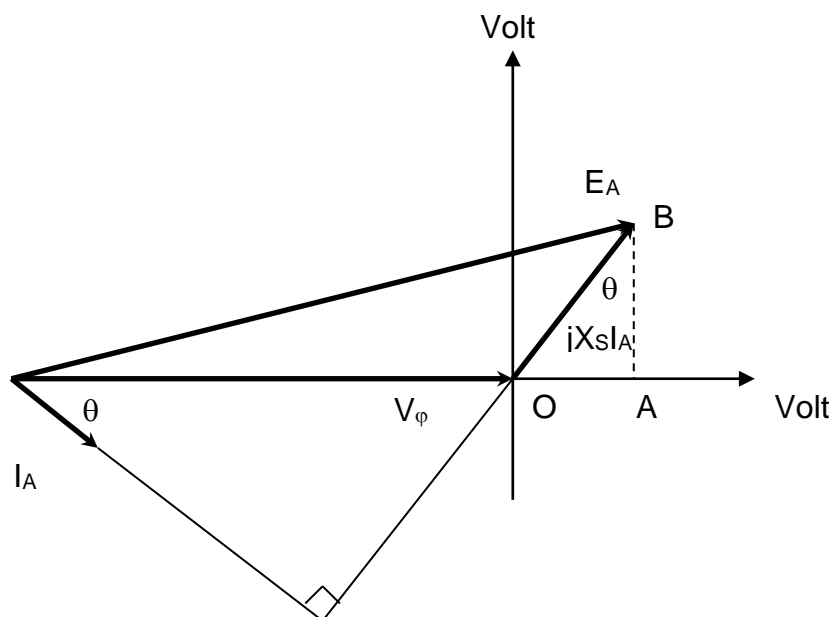


Figura 5.12. Diagrama fasorial del generador.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

L'efecte de tenir valors màxims de I_F y de E_A , converteix directament en una restricció el mínim factor de potència permès quan el generador està treballant a kVA nominals. La Figura 5.12 mostra el diagrama fasorial d'un generador síncron amb els valors nominals de tensió i de corrent d'induït; tal i com es veu, el corrent pot adoptar varis angles diferents. La tensió generada internament E_A és la suma de V_ϕ i de $jX_S I_A$. Observis que per alguns possibles angles de corrent, la E_A necessària supera E_{Amax} . Si es fes treballar el generador amb el corrent d'induït nominal i aquests factors de potència, el bobinat de camp es cremaria.

L'angle de I_A requereix la E_A màxima, mentre V_ϕ es manté al seu valor nominal, fixa el factor de potència menor (més endarrerit) que el valor nominal establert, però només disminuint els kVA subministrats pel generador.

5.14.2 Corbes de capacitat d'un generador

Els límits d'escalfament de l'estator i del rotor, plegats amb qualsevol altres limitant externs que se presentin en un generador síncron, pot representar-se gràficament per mitjà d'un diagrama de potències. Un diagrama de potències és un gràfic de potencia complexa $S = P + jQ$, que es dedueix del diagrama fasorial del generador, suposant que V_ϕ es manté constant a la tensió nominal de la màquina.

La Figura 5.13 mostra el diagrama fasorial d'un generador síncron que funciona amb un factor de potència en endarreriment i a la seva tensió nominal. Un conjunt d'eixos ortogonals es dibuixa sobre el diagrama, començant en el vèrtex de V_ϕ , magnitud donada en volts. A aquest diagrama, el segment AB té una longitud de $X_S I_A \cos\theta$ i el segment horitzontal OA té una longitud $X_S I_A \sin\theta$.

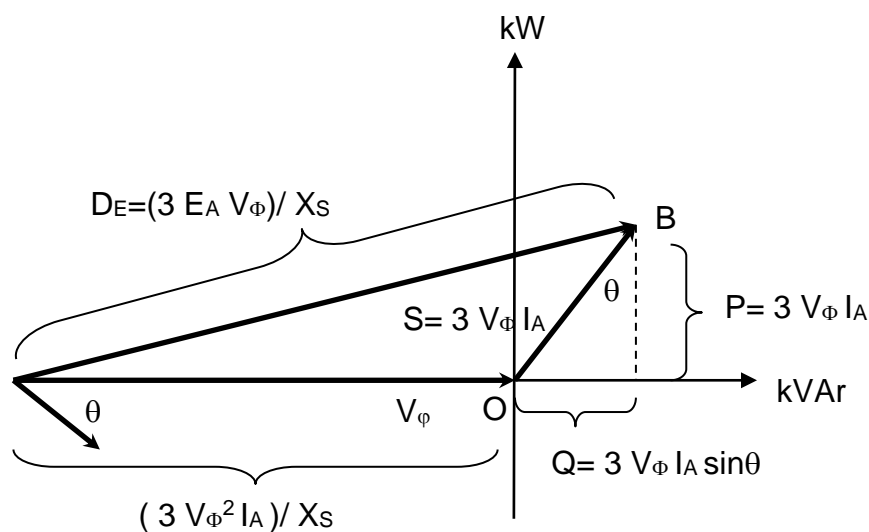


Figura 5.13. Diagrama de potències corresponent a un generador.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

La potència real de sortida se formula per:

$$P = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A \cos \theta$$

i la potència reactiva i aparent de sortida s'expressa per:

$$Q = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A \sin \theta \qquad S = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_A$$

de manera que el eixos verticals i horitzontals d'aquesta figura es poden re-dimensionar en termes de potència útil i reactiva. El factor de conversió indispensable per el canvi d'escala dels eixos, de volts a VA (unitats de potència) és $3 V_{\phi} / X_S$:

$$P = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_{\phi} \cos \theta = \frac{3V_{\phi}}{X_S} (X_S I_A \cos \theta)$$

$$Q = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_{\phi} \sin \theta = \frac{3V_{\phi}}{X_S} (X_S I_A \sin \theta)$$

Sobre els eixos de la tensió, el inici del diagrama fasorial està en V_{ϕ} , sobre l'eix horitzontal, on l'origen del diagrama de potència està a:

$$Q = \frac{3V_{\phi}}{X_S} (-V_{\phi}) = -\frac{3V_{\phi}^2}{X_S}$$

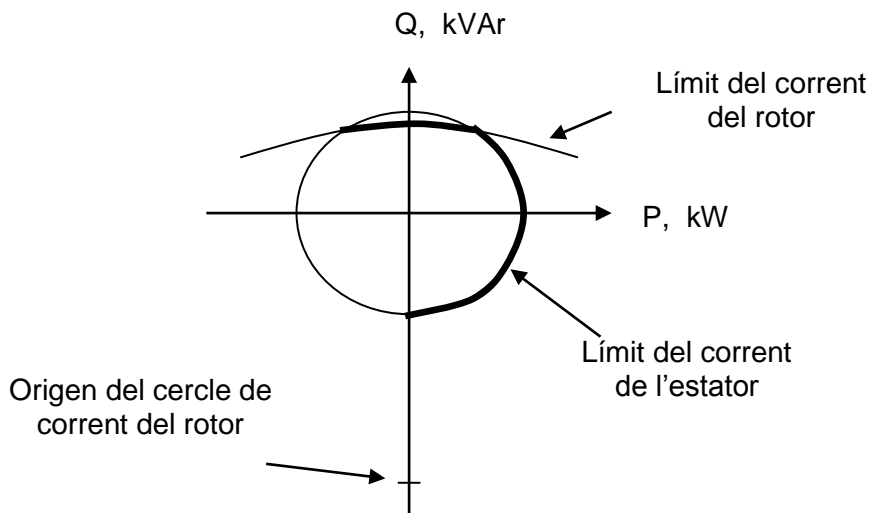


Figura 5.14. Corba de capacitat resultant del generador.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

El corrent de camp és proporcional al flux de la maquina i el flux és proporcional a $E_A = K\Phi\omega$. La longitud correspon a E_A al diagrama de potència és:

$$D_E = \frac{3E_A V_\phi}{X_S}$$

El corrent de la carcassa I_A és proporcional a $X_S I_A$ i la longitud correspon a $X_S I_A$ sobre el diagrama de potència és $3 V_\phi I_A$.

La corba final de capacitat del generador síncron s'il·lustra a la Figura 5.14. És un gràfic de P contra Q, amb potència útil P a l'eix horitzontal i potència reactiva Q a l'eix vertical. Les línies del corrent constant de l'induït I_A , apareixen com línies de $3 V_\phi I_A$ constant, les quals són cercles concèntrics on el seu centre està a l'origen.

Les línies de corrent de camp constant, corresponen a les línies de la E_A constant, que apareixen com cercles amb magnitud de $(3 E_A V_\phi) / X_S$ amb centre al punt:

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_S}$$

El límit del corrent apareix com el cercle que correspon a la I_A nominal o a els kVA nominals i el límit del corrent de camp es representa com un cercle que correspon a les I_F o E_A nominals. Qualsevol punt que caigui dins d'ambdós cercles, és un punt segur pel funcionament del generador.

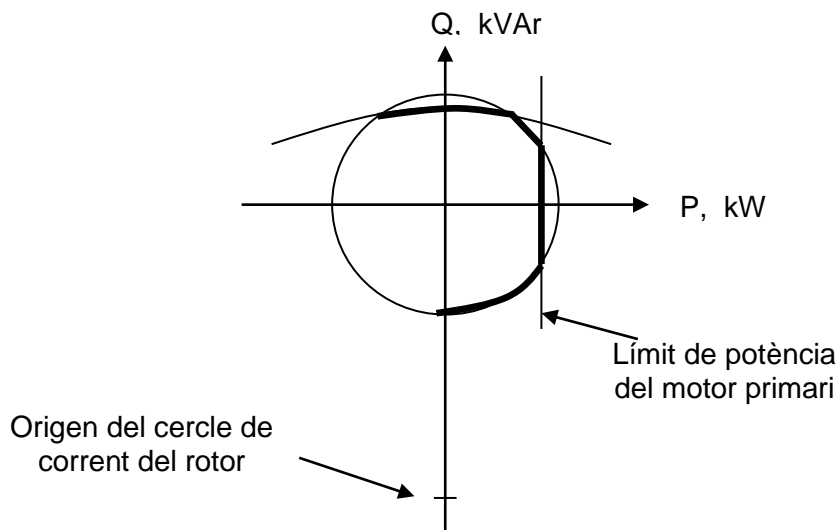


Figura 5.15. Corba de capacitat con el límit del motor primari.

També és possible mostrar altres limitacions sobre el diagrama, tals com la potència màxima del motor primari i el límit d'estabilitat estàtica. Una corba de capacitat, que també reflexa la potència màxima del motor primari, pot veure's a la Figura 5.14. És a dir, la potència a extreure està limitada per la potència del motor tèrmic encara que el generador pugui proporcionar una major potència.

5.15. Cicles de treball dels propulsors

Si per qualsevol vaixell, l'onatge representa un esforç addicional i, a més, aquest esforç oscil·la anvers un valor mig. Sigui quin sigui el tipus de propulsió, és evident que la força oscil·latòria afecta bàsicament al sistema de propulsió.

En el cas de vaixells amb propulsió elèctrica, el sistema afecta directament al generador ja que el convertidor electrònic de potència no és una font d'energia però ha de deixar-la passar. L'onatge afecta més concretament al sistema de regulació de velocitat de rotació del generador i, en conseqüència al consum de combustible del motor de combustió interna.

La variació de l'onatge afecta directament al consum d'energia elèctrica del motor propulsor. Aquest consum de corrent provoca un augment de la potència transmesa en el grup electrogen. Per mantenir la velocitat constant, això es tradueix amb augment del combustible. Per mantenir la potència constant, es tradueix amb una reducció de la velocitat.

El grup generador es veu afectat completament, augmentant el consum de combustible, empitjorant el comportament el control electrònic del motor dièsel així com les oscil·lacions de les sol·licitacions que fan augmentar la fatiga del grup electrogen.

Com conclusió i per simplificar, assenyalem que el vaixells amb eslora inferior o igual a 40 metres, és on la servo propulsió elèctrica pot resoldre un problema d'operació amb mal temps, que pot exigir la posada a punt de la tecnologia ACEE per fer front a les fortes demandes de potència instantània necessàries. Així el motor tèrmic passaria a tenir el consum corresponent a la potència mitja necessària, més les pèrdues de l'ACEE, alliberant-se de les puntes de consum.

En vaixells de menys de 20 metres, es poden trobar unes condicions meteorològiques i de velocitat, que justifiquin l'aprofitament de la pròpia energia cinètica del grup electrogen, actuant com a ACEE. Dels càlculs de caiguda de freqüència amb els graons de càrrega, es dedueix que l'energia cinètica del grup electrogen, és de l'ordre dels 4kWseg/kVA, el temps de resposta del regulador de velocitat del motor tèrmic (Hz), hi té una influència important. Sols caldria sobredimensionar els kVA de l'alternador, per a poder donar la potència màxima desitjada, tant sols verificant els temps de resposta dels reguladors de tensió (V) i de freqüència (Hz) implicats.

6. COMPENSADOR ELÈCTRIC

6.1. Estudi inicial a un vaixell remolcador elèctric

6.1.1. Vaixell d'inici

Per realitzar una aplicació teòrica inicial, ens fixem en un remolcador real, pràcticament de sèrie. Aquest remolcador és el DHOCE Stern Drive-30 metres. És un remolcador de port, alçada, escolta, contra-incendis i anti-contaminant que s'adapta bé a la proposta d'una servo propulsió elèctrica.

És un vaixell construït totalment en acer soldat obtenint la classe I3/3 Remolcador d'Alta Mar + Aut MS + FIRE Fighting/Water Spray: 1 de la Societat classificatòria. Les característiques principals s'adjunten a la Taula 6.1.

Eslora total	30,00 m
Eslora entre perpendiculars	26,80 m
Manega de traçat	9,85 m
Puntal	5,40 m
Calat de traçat	4,20 m
Tracció a punt fix	55 Tns
Capacitat de combustible	273 m ³
Tripulació de mar	6 homes
Tripulació de port	3 homes

Taula 6.1. Característiques principals del remolcador.

Aquest remolcador disposa de maquinaria propulsora i auxiliar, així com maquinaria de coberta, equips auxiliars per la mateixa maquinaria de coberta, equips contra-incendis exterior, equips varis i uns equipament d'aparells electrònics.

De la maquinaria propulsora i auxiliar en destaquem el següent:

- 2 motors CATERPILLAR model 3516B d'injecció electrònica amb una potència unitària de 2.200HP (1640,54kW) a 1.800rpm, dos reductors REINTJES model LAF-741 relació de reducció 2.033/1, amb PTO.
- 2 equips propulsors SCHOTTEL tipus SRP1212, amb 2.300 mm de hèlice a 250rpm.
- 2 grups generadors CATERPILLAR model 3304T de 127HP a 1.500rpm amb alternador CATERPILLAR de 106kVA (85kW).
- 1 grup hidràulic auxiliar compost CATERPILLAR model 3406TA de 365HP (272,2kW) a 2.100rpm acoblada a una bomba hidràulica marca LINDE tipus BPV 200 per accionar una hèlice transversal marca

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

SCHOTTEL tipus STT110LK de 200kW a 1.470rpm de 800mm de diàmetre i d'empenta nominal de 28kN.

Els equips auxiliars de la mateixa maquinaria estan formats per diverses bombes d'aigua (dolça, salada i aigua amb dispersant), bombes per trastejo de combustible, bombes per llots, bombes per oli, bombes per servei contra incendis, compressors, depuradores i ventiladors amb una potència total mitja de 320,33kW i coeficient de simultaneïtat mig de 25%.

També cal tenir en compte la maquinaria de coberta, equips varis i els equips de radio transmissió, balisa, radars i sonars. Sumant el consum de tots aquests elements obtenim una potència mitja de 11,5kW amb un factor de simultaneïtat mig de 15%.

Resumin en una Taula 6.2, la generació i els consums per obtenir una visió més general de la utilització de la potència del vaixell i les seves necessitats.

<i>Generació</i>	Potència unit.	Temps de funcionament	Pot. Total
Motor propulsor	1.640,54kW	100%	3.281,1kW
Grup hidràulic	272,2kW	30%	81,66kW
Generador	106kVA	100%	212kVA
TOTAL			3.532,36kW
<i>Consum</i>			
Propulsor	1.850kW	100%	1.850kW
Hèlix transversal	200kW	30%	60kW
Equips auxiliars	320,33kW	25%	80,1kW
Equips varis	11,5kW	15%	1,7kW
TOTAL			1.991,8 kW

Taula 6.2. Taula resum elèctric del remolcador.

De forma general, el major consum és dels propulsors i, tot seguit, dels equips auxiliars i la hèlice transversal.

6.1.2. Estimació dels esforços dinàmics

Al no disposar de totes les dades al detall per part del fabricant i, per altre costat, que la servo propulsió elèctrica pot tenir canvis importants durant el desenvolupament de les tasques, es fa una estimació propera dels pesos.

El pes del vaixell remolcador es igual al volum d'aigua que desallotja per la densitat del aigua del mar (densitat del aigua salada al 30% a 20°C és 1.021 kg/m³): (Es considera que el volum desallotjat és $\frac{3}{4}$ del paral·lelepípede).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

$$P = \rho \cdot V = \rho \cdot (\text{calat} \cdot \text{eslora} \cdot \text{manega}) \cdot 3/4 =$$

$$= 1021 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (4,2\text{m} \cdot 26,8\text{m} \cdot 9,85\text{m}) \cdot 3/4 = 848.999,27\text{kg} \approx 850\text{tm}$$

Amb aquestes dades, el centre de gravetat del vaixell remolcador s'estima situat, a prop d'un 13 metres de la proa i a 1 metre per sota del nivell de l'aigua (prop del punt d'empenta i de la quaderna mestre del vaixell).

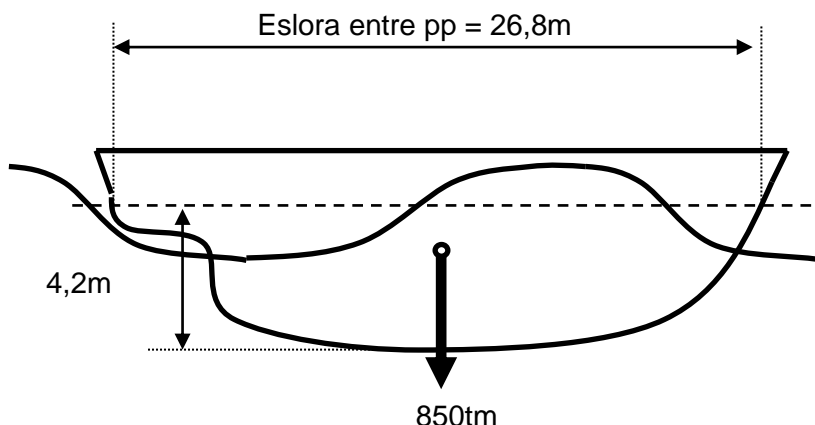


Figura 6.1. Representació del CDG del remolcador.

La potència de propulsió és igual a l'empenta per la velocitat d'avanç i, tot això, multiplicat pel rendiment de la hèlice (considerem el rendiment de la hèlice en un 60%).

$$55000\text{kg tiro} \cdot 60\% \cdot 1800\text{rpm} \left(\frac{2\pi}{\text{rev}} \right) \cdot \left(\frac{1\text{min}}{60\text{s}} \right) \cdot \left(\frac{1}{5,859} \right) = 1061675\text{W} = 1061\text{kW}$$

En la Taula 6.3. es veu la força per remuntar i baixar una ona que cal superar el vaixell remolcador de 850Tm y 55tns de tiro.

Angle de assentament	Pujada			Baixada		
	Força	% del pes	% del tiro	Força	% del pes	% del tiro
2°	-29,6 tn	3,4	54%	29,6 tn	3,4	54%
4°	-59,2 tn	6,9	107%	59,2 tn	6,9	107%
6°	-88,7 tn	10,4	161%	88,7 tn	10,4	161%
8°	-118,2 tn	13,9	215%	118,2 tn	13,9	215%
10°	-147,4 tn	17,3	267%	147,4 tn	17,3	267%
12°	-176,5 tn	20,8	320%	176,5 tn	20,8	320%
14°	-205,4 tn	24,2	372%	205,4 tn	24,2	372%

Taula 6.3. Valors de força de pujada i de baixada.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la Taula 5.4 vàrem veure que amb un angle de assentament del 4° (que correspon a una ona de 1,4 metres d'alçada), la força de remuntada supera el tiro màxim del vaixell. I que amb un angle d'assentament de 8° (ona de 2,8 metres d'alçada), la força que correspon a un 14% del pes del vaixell remolcador, representa el 200% del tiro del vaixell. I que amb un angle d'assentament de 14° (ona de 5 metres d'alçada), la força de remuntada representa un 370% del tiro del remolcador.

Ara, per analitzar exactament la sobrecàrrega que es produeix als motors de propulsió, a la Taula 6.4. es representa el percentatge de sobrecarrega per cada angle d'assentament.

<i>Angle de assentament</i>	<i>Remuntada</i>		
	<i>Esforç total</i>	<i>Tiro motor</i>	<i>% de sobrecarrega</i>
2°	29,6 tn	55 tns	--
4°	59,2 tn	55 tns	7,6 %
6°	88,7 tn	55 tns	61 %
8°	118,2 tn	55 tns	115 %
10°	147,4 tn	55 tns	168 %
12°	176,5 tn	55 tns	221 %
14°	205,4 tn	55 tns	273 %

Taula 6.4. Valors de sobrecàrrega als motors de propulsió.

Com veiem, la sobre-càrrega que es produeix als motors de propulsió, en règim transitori, és considerable. Si bé, les màquines elèctriques, generadors i motors poden subministrar amb una sobre-càrrega del 250% (de potència nominal) durant 10 segons, els motors tèrmics no poden. La raó és que els motors tèrmics estan dissenyats per una potència concreta i amb una sobre-potència màxima de 110%. És a dir, la força de remuntada transitòria supera la potència màxima d'un 110%. Per tant, el motor tèrmic no pot i disminueix la seva velocitat de rotació i les revolucions. Realment, el motor tèrmic busca energia cinètica per proporcionar la manca de potència pròpia, el que provoca una reducció dràstica de les revolucions fins que s'atura. Com que l'alternador està arrossegat pel motor dièsel, la energia cinètica dels dos és superior a la del motor sol. Això permet superar el transitori i el motor no s'arriba a aturar.

En resum, el motor tèrmic té un límit per subministrar potència addicional en cas necessari i aquest límit està al voltant d'un 110% de la potència nominal. El límit del motor tèrmic es basa en la capacitat d'injectar la barreja de combustible i aire als cilindres. Per tant, els vaixells amb motors tèrmics primaris tenen limitacions de potència.

És evident que el càlcul de la potència del motor tèrmic es realitza en funció de la velocitat que es desitja arribar. En aquest sentit, els "fast ferris" disposen d'una sobre potència als motors primaris que s'utilitza per aconseguir grans velocitats de navegació en mar plana però que davant d'una mar amb ones, la seva velocitat es veu reduïda considerablement. Aquesta sobre potència dels motors tèrmics s'aconsegueix gràcies un gran consum de combustible.

Llavors diem que: a major potència màxima del motor tèrmic, major el consum i menys autonomia del vaixell. I a menys potència, menys consum i major autonomia (amb dipòsits de combustibles iguals). Normalment es busca una solució d'equilibri entre potència i autonomia.

6.2. Millores al comportament del sistema de propulsió del vaixell elèctric

Com ja s'ha comentat, l'onatge provoca l'aparició d'una força addicional de remuntada i de baixada i el vaixell es veu sotmès a variacions al sistema de propulsió. Aquestes variacions al sistema de propulsió, provoquen una variació de l'acceleració del vaixell. Tot això es tradueix en un empitjorament del rendiment energètic del vaixell i de la comoditat dels viatgers.

Davant d'aquests conseqüències de l'onatge problemes, es presenten dues opcions de millora per un vaixell elèctric. La primera opció és l'augment de la inèrcia del grup generador. I la segona, consisteix en afegir un sistema d'emmagatzematge de l'energia elèctrica (que surt del sistema de propulsió del vaixell).

L'augment de la inèrcia (primera opció) consisteix en afegir un volant d'inèrcia al grup generador o sistema de generació. És a dir, un volant d'inèrcia a l'eix de rotació i entre mig del motor tèrmic i l'alternador.

Afegir un sistema d'emmagatzematge d'energia consisteix en afegir un sistema acumulador cinètic d'energia elèctrica (ACEE) al sistema de propulsió. Aquest sistema acumula l'energia sobrant de la propulsió quan baixa de l'ona i retorna l'energia al sistema de propulsió quan puja l'ona.

Tant pel càlcul del volant d'inèrcia com pel càlcul del sistema ACEE, es realitza la següent hipòtesis de l'esforç transitori: El sistema de propulsió ha d'estar al voltant d'un 300% per poder superar un angle d'assentament del propi vaixell de 11°. Veure Taula 6.4. Un angle d'assentament de 11° correspon a una alçada d'ona, en el cas del Mar Mediterrani, de:

$$H = L/2 \cdot \operatorname{tg} \alpha = 40m/2 \cdot \operatorname{tg} 11^\circ = 3,88m$$

Una alçada d'ona de 3,88 metres al mar Mediterrani, es considera que és "molt mala mar". En l'oceà Atlàntic, una ona de 3,8 metres d'alçada es considera una "mar moguda" però no "mala mar".

6.2.1. Augment potència alternador

Com s'ha vist en l'apartat anterior, la potència del motor primari està limitada a l'hora de fer front a les sobrecàrregues. Si la sobrecàrrega supera la potència

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

màxima del motor primari, llavors, la velocitat de gir del grup generador disminueix i la freqüència baixa. Aquesta situació es produeix quan l'angle d'assentament és superior a 5° (quan el vaixell remunta l'onatge).

A més de les dues opcions anteriors, una altre seria augmentar la potència de l'alternador. Amb una potència major, es pot fer front als corrents demandats pels motors de propulsió. És a dir, l'alternador proporcionaria la capacitat elèctrica per superar sobre-càrregues dels motors de propulsió.

En el cas del remolcador, si s'empra un alternador sobre-dimensionat, a més de proporcionar un major corrent als transitoris, també té més inèrcia (major massa rodant de l'eix de l'alternador respecte a l'alternador previst). Amb un alternador de 650kVA, les masses rodants del conjunt (grup electrogen) poden proporcionar una energia al voltant de:

$$650\text{kVA} * 4\text{kWs/kVA} = 2.600\text{kWseg}$$

Aquest valor és superior a 277kVseg vist a l'apartat 5.7.3. Això permet superar les sobre-càrregues cícliques sense necessitat de sobre-dimensionar el motor tèrmic (motor primari que arrosega l'alternador).

Si extrapolem els valors anteriors a oscil·lacions de 10°, veiem que el motor elèctric assoliria valors màxims de consum 2.000A, hipòtesis que caldria contrastar amb situacions reals.

6.2.2. Augment de la inèrcia

L'opció d'augmentar la inèrcia del grup generador, mitjançant la instal·lació d'un volant d'inèrcia a l'eix entre el motor de combustió primari i l'alternador, sembla la solució més senzilla (veure Figura 6.2).

L'energia acumulada pel volant addicional depèn del moment d'inèrcia del volant. Aquesta energia cinètica s'allibera mantenint, dins d'uns marges, la velocitat de gir del grup electrogen constant durant un espai de temps. És a dir, a mida que augmenta la massa del volant, l'energia emmagatzemada és major i es poden superar sobre-carregues més importants. Realment, al afegir més massa giratòria, el que fem es augmentar la constant de temps de reacció del grup generador front les possibles variacions d'acceleració degut als esforços variables per remuntar i baixar l'onatge.

El volant d'inèrcia proporciona l'avantatge d'esmorteir les oscil·lacions o variacions de gir del grup. Però un augment de la massa rotatòria fa que el temps de reacció augmenti i sigui més lent. O sigui, que l'avantatge de l'augment del temps gràcies al volant d'inèrcia també és una desavantatge ja que la resposta també és lenta. Però quan hi ha una variació superior a la prevista amb volant, la resposta pot ser inferior a la necessària. En altres paraules, el volant d'inèrcia no s'ajusta a les necessitats o variacions si no que és un valor constant i fixa.

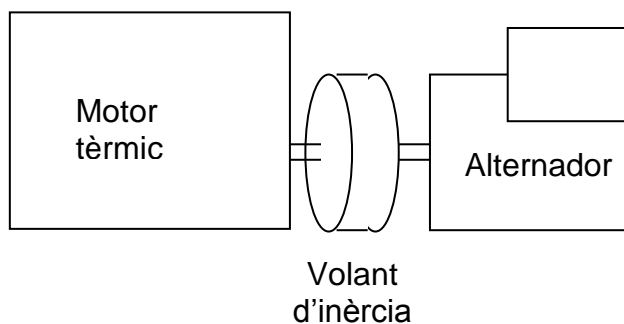


Figura 6.2. Representació simple del grup generador amb augment d'inèrcia.

Quan augmenta la inèrcia rodant, també s'ha d'augmentar la potència útil del motor primari. I encara que millorem el moment transitori, el rendiment energètic del vaixell empitjora ja que el consum de combustible augmenta. Si els motors de propulsió necessiten més potència extra i l'energia del volant de inèrcia s'ha esgotat, el motor dièsel no pot recuperar la velocitat de gir nominal (lent de resposta), llavors la freqüència elèctrica cau, la tensió elèctrica també cau i el grup generador es satura, aturant-se al final.

És a dir, un mal dimensionament del sistema amb volant d'inèrcia fa que, davant d'ones grans, el sistema de propulsió pateixi les mateixes conseqüències que els sistemes sense volant d'inèrcia amb ones no tan grans.

Per tot això, considerem aquesta opció com poc pràctica així com poc efectiva. En aquesta situació, resulta més eficient muntar un motor tèrmic de majors prestacions que el necessari i no afegir un volant d'inèrcia.

El volant d'inèrcia és un element mecànic, incapaç d'incrementar el corrent màxim a aportar als propulsors, que és el problema a resoldre. El volant només allarga el temps que dura el corrent màxim o de curtcircuit de l'alternador. Ara bé, incrementant la inèrcia del conjunt generador, muntant un alternador més gran o sobre-dimensionat, si permet augmentar la intensitat de curtcircuit disponible.

6.2.3. Introducció del sistema ACEE

Aprofitant el fenomen cíclic de l'onatge, es pot pensar en un sistema que emmagatzemi energia durant la baixada de l'ona i quan el vaixell puji la propera ona, el sistema entregui l'energia acumulada. D'aquesta manera, no caldria sobre dimensionar els motors primaris i no reduiria la velocitat del propi vaixell.

La carrega del sistema ACEE es realitzaria amb l'energia restant dels generadors quan els propulsors no la necessitin durant el descens d'una ona. L'energia acumulada a l'ACEE s'entregaria als motors de propulsió com una

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

potència addicional per remuntar les ones. Així els grups generadors no perden prestacions i la tensió no es desestabilitza. Com veiem, la introducció del sistema ACEE millora el comportament del vaixell front onatge.

Abans es comentava que la carrega del sistema ACEE es realitzaria en condicions d'excés d'energia per part dels generadors. La raó resideix en que no existeix recuperació de l'energia quan el vaixell baixa de l'ona perquè el rendiment de la hèlice en sentit contrari és molt baix ja que la hèlice funcionaria com turbina hidràulica.

Intentem representar a la Figura 6.3, el cas del vaixell "Antonio Machado".

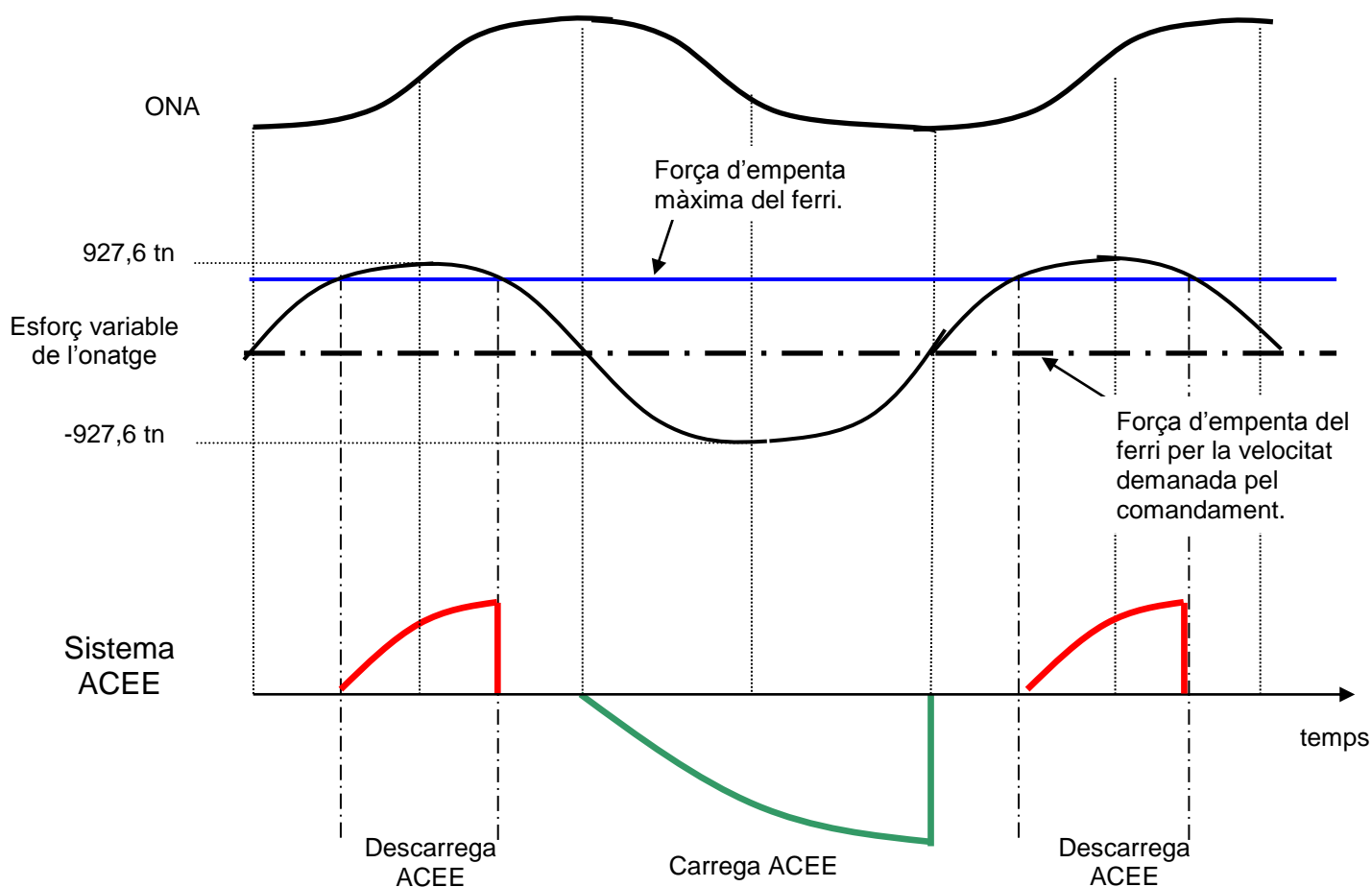


Figura 6.3 Representació del comportament amb un sistema ACEE.

És evident que si el vaixell està molt a prop a la seva velocitat màxima i hi ha onatge, es produiran oscil·lacions a la velocitat del vaixell i, per tant, major consum de combustible e incomoditat per part de la tripulació i passatgers.

Amb un sistema ACEE, es millora el comportament del vaixell ja que es redueix el consum de combustible en els grups generadors i, a més, s'augmenta la vida dels grups al no patir sobre-càrregues.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

El temps entre la càrrega i la descarrega d'energia del sistema ACEE ha de ser el mateix que el període entre dues crestes d'ona, prenent com a referència el propi vaixell. Inicialment, es disposa del període entre dues crestes de 7,5 segons corresponent a la boia del Delta de la Tordera del dia 17 d'Abril de 2004.

Com s'ha explicat a l'apartat 5.5, el període entre dues crestes d'ones consecutives depèn del rumb del vaixell. Supossem en un principi, que el vaixell disposa de 7,5 segons per carregar i descarregar el sistema ACEE. Per tant, si la descarrega es realitza en 2 segons llavors, la càrrega de l'ACEE només pot durar uns 5 segons.

Com s'observa a la Figura 6.3, la descarrega del sistema ACEE es fa quan els motors de propulsió necessiten més esforç per remuntar l'ona, és a dir, més potència del generador. Mentre que la carrega del sistema ACEE es fa quan l'esforç per mantenir la velocitat fos inferior a la nominal per aquesta velocitat. Cal indicar que hi hauria un temps mort entre les fases de carrega i descarrega.

6.2.3. Resum

Tal i com hem vist, cada opció té els seus avantatges i desavantatges. En la Taula 6.5 fem un resum.

Opció	Avantatges	Desavantatges
Augment alternador	Senzill Simple Barat	Limitat a determinats valors
Augment inèrcia	Senzill. Simple. Barat	Limitat i fix. Sense capacitat d'ajust a les necessitats. No eficient.
Instal·lació ACEE	Ajustable a cada necessitat de potència. Eficient.	Sistema més complexa. Cost mig.

Taula 6.5. Taula resum possibles millores en vaixells de propulsió elèctrica.

6.3. Instal·lació d'un ACEE dins d'un vaixell de propulsió elèctrica

Com que aquest treball està parla d'un sistema acumulador d'energia, ens centrarem amb la opció del sistema ACEE.

Hi ha varies opcions d'implantació o d'instal·lació d'un sistema ACEE dins d'un vaixell amb propulsió elèctrica. Cada instal·lació té avantatges i

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

desavantatges. A continuació presentem diverses opcions i, tot seguit, escollirem l'opció més adient o menys problemàtica.

6.3.1. Muntatge n^o1

El primer muntatge del sistema ACEE consisteix en una alimentació en paral·lel amb el convertidor principal de propulsió. És a dir, l'ACEE rep carrega a un nivell baix però constant, suficient per carregar l'acumulador abans de la següent ona. La descarrega de la potència es realitza directament sobre el motor de propulsió.

Aquesta opció obliga a instal·lar el sistema ACEE molt a prop del motor elèctric de propulsió. D'aquesta manera es redueixen les pèrdues en el cablejat donat que el corrent de descarrega de l'ACEE és elevat.

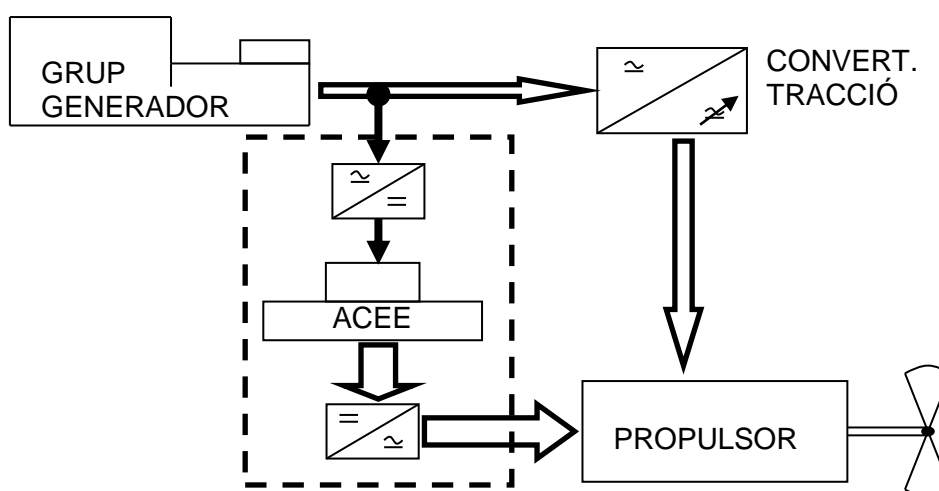


Figura 6.4. Esquema del muntatge n^o1.

Encara que aquesta opció té l'avantatge de subministrar directament la potència instantània sobre el motor elèctric de propulsió, el problema recau en la relació entre el sistema ACEE i el convertidor electrònic. La sortida del sistema ACEE ha de ser compatible en freqüència i tensió amb el convertidor del propulsor. En aquest muntatge, la sortida de l'ACEE ha de proporcionar la mateixa tensió i freqüència que el convertidor principal. Per tant, el sistema ACEE ha d'estar sincronitzat amb el sistema de propulsió del vaixell.

6.3.2. Muntatge n^o2

El segon muntatge del sistema ACEE consisteix en l'extracció de l'energia de la barra principal de generació durant els moments de baix consum i retornar aquesta energia a la mateixa barra (durant els moments de sobre-càrrega).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Encara que aquesta opció té l'avantatge de donar l'energia a una barra on la tensió i la freqüència son fixes i, en certa mesura, estables, el desavantatge cau en el costat de l'ACEE. Aquest s'ha de sincronitzar amb els grups electrògens per poder entregar l'energia sense problemes. El temps de sincronització perjudica per què endarrereix l'entrega de potència i no es fa en el moment desitjat i adient.

Aquesta opció permet que el sistema ACEE pugi ser inclòs dins de la mateixa sala de generació i distribució d'energia (a prop del grup electrogen).

L'esquema d'aquesta opció és la següent:

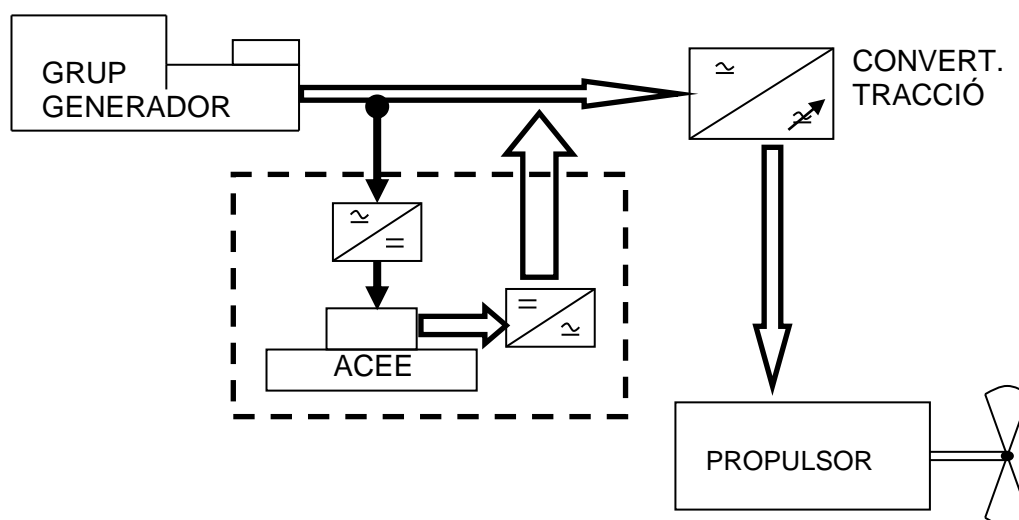


Figura 6.5. Esquema del muntatge n°2.

S'observa que ambdues opcions de muntatge (n°1 i n°2) tenen el mateix problema, la sincronització a la xarxa trifàsica. En el muntatge n°1, el problema s'agreuja degut a que el convertidor principal de propulsió proporciona tensió i freqüència variable i això obliga a que el convertidor de sortida de l'ACEE s'ajusti en tensió i freqüència en cada instant. En el muntatge n°2, la tensió i la freqüència que surten del grup electrogen son fixes, reduint els problemes ja importants de sincronització.

Segons la hipòtesis inicial, el temps de descarrega és de 2 segons. Aquest temps de descarrega és molt petit i dificulta les tasques de sincronització i entrega potència. Normalment les etapes de sincronització son: Ajust de la freqüència del grup per posar-se en paral·lel (es sincronitza la freqüència del grup amb la freqüència de la xarxa) i, després, el control intenta accelerar el motor primari o dièsel aconseguint que el grup agafi la càrrega del consum.

Sabem per experiència que el temps necessari per sincronitzar en paral·lel els grups electrògens a la xarxa, és de 3 a 5 segons (aproximadament). A mñes, el temps de sincronització depèn de la capacitat del control de fer variar la

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

velocitat del motor dièsel i, en conseqüència, fer variar la freqüència de l'alternador per aconseguir la sincronització de la xarxa. Amb un convertidor electrònic, el temps de sincronització es pot reduir a valors inferiors a 2 segons ja que el control actua sobre els interruptors electrònics de potència en micro segons.

6.3.3. Muntatge n°3

En els dos muntatges anteriors, els problemes d'instal·lació i acoblament elèctric són importants. El tercer muntatge és una opció més simple. Consisteix en injectar l'energia de l'ACEE directament sobre el convertidor principal de propulsió. L'esquema d'aquesta opció és la següent:

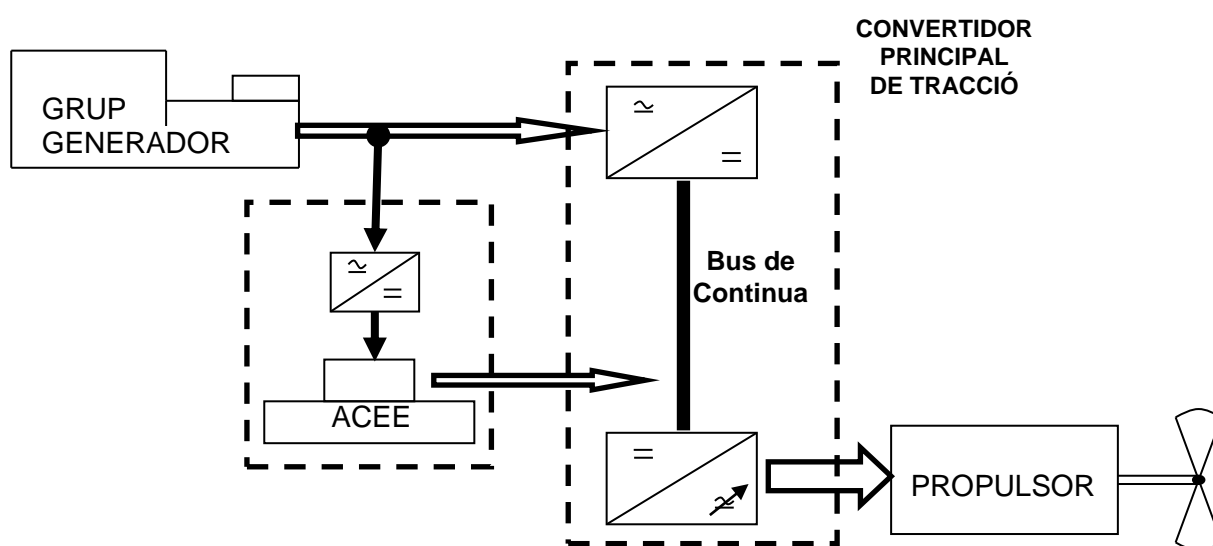


Figura 6.6. Esquema del muntatge n°3.

L'energia de l'ACEE s'entregaria al bus de corrent continu del convertidor principal de propulsió. Els convertidors de propulsió disposen d'un bus intermig de connexió entre el convertidor de continua i el convertidor d'alterna variable anomenat "Bus de continua". D'aquesta forma evitem la tasca de sincronització quan es retorna l'energia. A més, entregant l'energia al bus de continua, es redueix el temps d'intercanvi d'energia, proporcionant potència quasi instantàniament.

Gràcies a això, el sistema ACEE no necessita el convertidor de sortida ja que l'entrega d'energia es realitza directament en el bus de corrent continu.

Desgraciadament, no tots els convertidors de propulsió tenen el Bus de continua accessible. Només en el cas de convertidors amb potències superiors a 30kW es pot accedir al bus de continua. En els convertidors de propulsió amb

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

potències inferiors a 30kW, l'equip és tancat, complert i no permet fer connexions a les barres de corrent continu o bus de continua. Per tant, aquest muntatge depèn de la potència del vaixell.

6.3.4. Muntatge n°4

En els muntatges anteriors, els problemes d'acoblament elèctric i d'instal·lació són importants. El muntatge n°4 és una solució encara més simple. Com abans, s'aprofita l'energia sobrant per alimentar "càrregues auxiliars" dins del propi vaixell. Les "càrregues auxiliars" del propi vaixell poden ser: propulsió auxiliar (adicional al sistema de propulsió bàsic del vaixell), enllumenat, serveis auxiliars d'aigua dolça, serveis auxiliars de refrigeració dels motors dièlsels, etc... L'esquema d'aquesta opció és la següent:

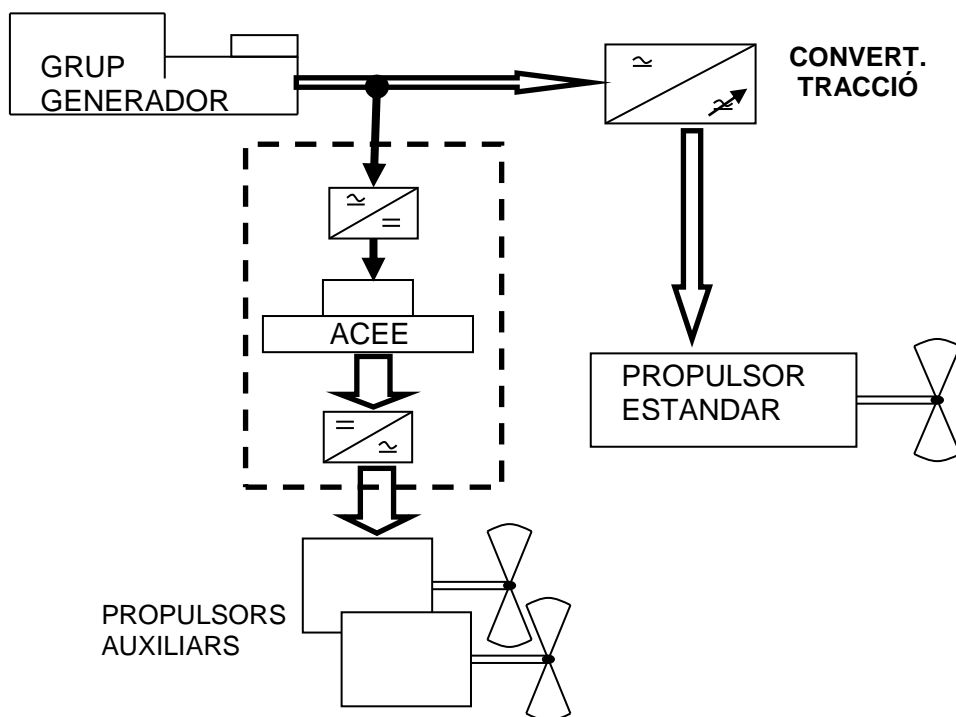


Figura 6.7. Esquema del muntatge n°4

En el cas d'emprar l'energia sobrant per una propulsió addicional, l'ACEE proporcionaria l'energia de forma intermitent o continua, si l'ACEE no es descarregues totalment.

Aquesta opció és la més simple perquè és un sistema que s'afegeix a l'existent. És a dir, no cal modificar la instal·lació original ja que és un sistema independent. La dificultat recau amb la incorporació de dos motors elèctrics de propulsió auxiliar al casc del vaixell. A més, aquest muntatge permet instal·lar

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

el sistema ACEE de forma independent de la propulsió del vaixell, sigui elèctrica o mecànica.

En vaixells amb propulsió tradicional, aquest muntatge implicaria incorporar un grup generador, un sistema ACEE i uns motors elèctrics propulsors auxiliars. En el cas dels vaixells de propulsió elèctrica, aquest muntatge només implicaria afegir un sistema ACEE i uns motors elèctrics propulsors auxiliars. Com aquest treball es centra en vaixells elèctrics, els vaixells tradicionals queden fora d'estudi però el muntatge és aplicable.

Amb aquest muntatge no es necessari sincronitzar la tensió ni la freqüència del sistema ACEE amb el sistema de propulsió del vaixell ni en cap altre xarxa. Per tant, el temps de resposta del sistema es pot apropar molt més al període de les ones. A més, quan el període de les ones sigui inferior a 7,5 segons, el sistema encara pot reaccionar i subministrar la potència necessària.

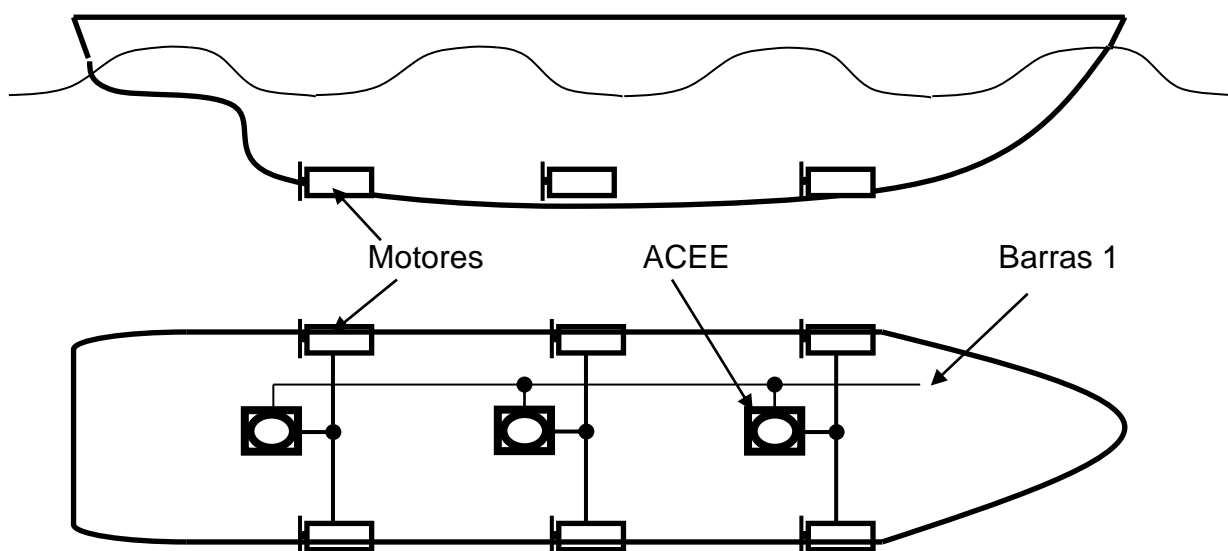


Figura 6.8. Exemple d'instal·lació dels propulsors auxiliars del sistema ACEE segons el muntatge n°4.

Instal·lant aquest tipus de muntatge en un vaixell de propulsió elèctrica, la potència de l'ACEE depèn del pes i de l'angle d'inclinació del vaixell. Els motors elèctrics auxiliars es poden col·locar a prop de quilla, per garantir que sempre estaran per sota del nivell de l'aigua i que mai superaran la manega del vaixell. La correcta ubicació s'ha d'estudiar cas a cas, per oferir el millor comportament dinàmic i així obtenir un alt rendiment del conjunt.

És evident que per la distribució d'esforços, el més correcte es fer servir un nombre parell de motors elèctrics auxiliars situats ambdós costat del casc,

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

simètrics respecte l'eix longitudinal del vaixell. Cada parell de motors elèctrics de propulsió poden estar alimentats per un sistema ACEE. Així, garantim un repartiment de la potència instantània entre els dos motors, sense provocar moments de gir sobre el vaixell.

Si el vaixell és força gran, la quantitat de sistemes ACEE pot ser major i distribuir-se per la llargada del vaixell, repartint-ne l'esforç i instal·lant els ACEE en llocs diferents de la bodega o altres llocs. Cada sistema ACEE amb els seus motors de propulsió, és independent del resta de sistemes ACEE. D'aquesta manera, si un sistema ACEE s'espantia o no funciona, els altres sistemes ACEE poden assumir la carrega extra sense grans inconvenients. Un exemple d'ubicació seria el representat a la Figura 6.8.

6.3.5. Resum

Un cop vist els 4 tipus de muntatges, anem a fer repàs per veure els avantatges i desavantatges de cada instal·lació.

Muntatge	Avantatges	Desavantatges
1	Captació d'energia al mateix nivell de tensió i freqüència.	Convertidor de continua a alterna. Difícil sincronització elèctrica amb el convertidor de tracció. Ajust complicat del flux d'energia
2	Captació d'energia al mateix nivell de tensió i freqüència.	Convertidor de continua a alterna. Difícil sincronització elèctrica amb el grup electrogen. Ajust complicat del flux d'energia
3	Captació d'energia al mateix nivell de tensió i freqüència. No es necessari el convertidor de continua a alterna.	Accés difícil al convertidor de propulsió per descarregar l'ACEE. Ajust a la tensió de continua. Ajust complicat del flux d'energia.
4	Captació d'energia al mateix nivell de tensió i freqüència. No cal sincronitzar. Flux d'energia cap els motors auxiliars o serveis auxiliars. Sistema independent del sistema principal de propulsió.	Convertidor de continua a alterna. Instal·lació de motors de propulsió auxiliars.

Taula 6.6. Taula resum dels muntatges de sistema ACEE en vaixells de propulsió elèctrica.

Com veiem, el muntatge n^o4 té més avantatges que desavantatges i, per tant, és el muntatge que té probabilitats d'implementar-ne a un vaixell elèctric.

6.3.6 Millores en el funcionament d'un sistema ACEE

Per que aquest muntatge tingui un funcionament correcte i ajustat a cada moment, cal conèixer l'arribada i l'alçada de les ones. Amb informació adient, es pot emmagatzemar l'energia necessària a l'ACEE segons el moment d'arribada de l'ona i de l'alçada de la mateixa. En realitat, aquesta informació ens permetria avançar-nos a la propera ona que es trobarà el vaixell.

Per conèixer l'alçada de les ones i la freqüència en que arriben al casc del vaixell, podem instal·lar uns detectors a la proa del vaixell. Aquests detectors estaran distribuïts a diferents alçades de la proa i separats uns dels altres uns centímetres.

D'aquesta menara serà possible avançar-se al comportament del vaixell front la primera ona i, conèixer davant mà, l'energia necessària per aconseguir una estabilitat de comportament i, en conseqüència, estabilitat en la velocitat del ferri.

Donat que el comportament del vaixell es basa per la situació del seu centre de gravetat, al col·locar els detectors a la proa del vaixell, ens avancem uns segons (variable en funció de la velocitat de les ones) i es pot avançar a la reacció que tindran els motors de propulsió. Així podrem actuar per obtenir un comportament del vaixell d'una forma segura i eficient.

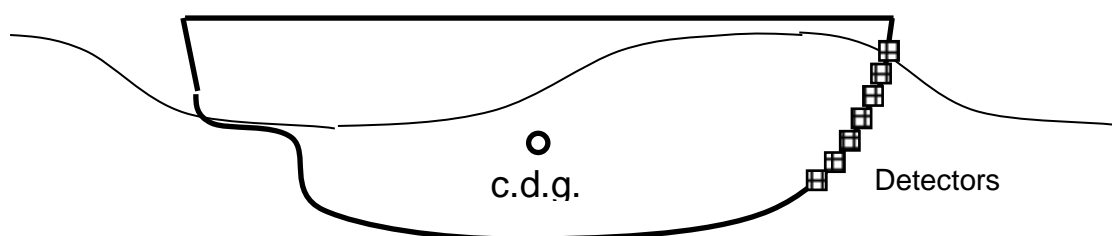


Figura 6.9. Esquema del muntatge dels detectors al vaixell.

Fins ara no s'ha considerat l'efecte del vent però quan està en contra, és una resistència important que es tradueix en un esforç addicional que el vaixell ha de superar. Aquest esforç depèn de la superfície plana que ofereix resistència per la velocitat del vent "obra morta". L'efecte del vent pot ser a favor i ajudar al vaixell a superar les ones.

La direcció del vent resta o suma tiro al vaixell segons la direcció. Aquest es representa com una variació dintre del tiro normal del vaixell.

6.4. Variacions de funcionament del sistema ACEE

S'entén que l'energia de descarrega de l'ACEE és igual a l'àrea entre la força de remuntar i el tiro màxim del vaixell. Mentre que l'energia de carrega és igual a l'àrea entre la força de baixada i l'esforç del ferri segons la velocitat sol·licitada pel comandament en una mar totalment pla, sense ones. Veure Figura 6.3.

És important que l'energia emmagatzemada al sistema ACEE sigui sempre major a l'energia entregada (perquè amb el volant d'inèrcia parat, l'ACEE no funciona ni serveix). Si s'arribés a aquesta situació, el temps de carrega del sistema ACEE seria molt més gran que el temps disponible entre dues crestes d'ones consecutives.

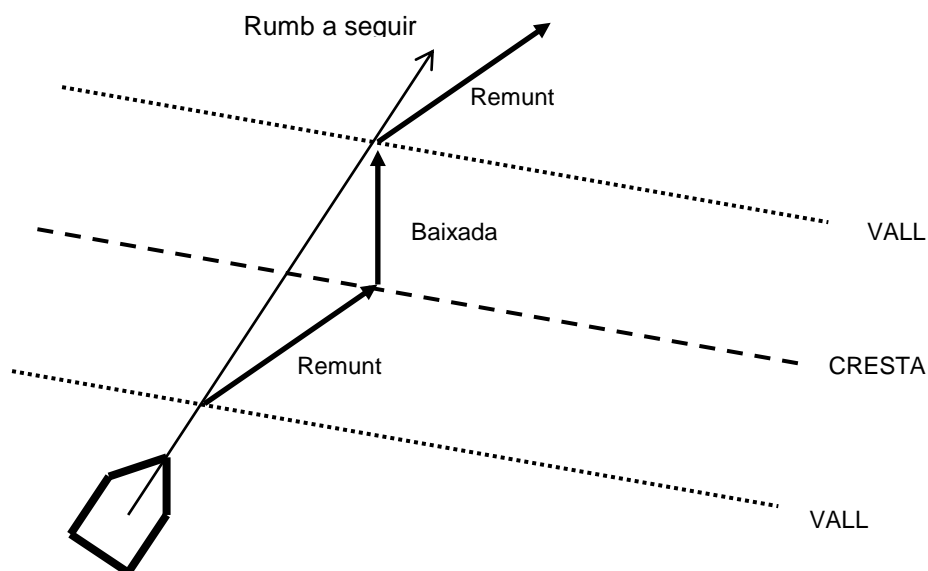


Figura 6.10. Representació de les desviacions sobre el rumb, per superar millor les ones en propulsió a vela.

Aquest últim comentari és relatiu. És a dir, el temps entre dues crestes d'ones amb referència al vaixell pot augmentar-se o reduir-se. Reduir el temps entre dues crestes d'ones vist des del vaixell, implica que el vaixell navega en sentit contrari a l'avanç de les ones i, sota aquestes circumstàncies, el temps de remunta i baixada d'ona seria tan petit que no necessitaria d'un sistema ACEE. És a dir, l'energia cinètica de les masses giratòries serien suficients per proporcionar l'esforç necessari per remuntar les ones i, durant la baixada, les masses giratòries tornarien a recuperar l'energia perduda.

Augmentar el temps relatiu entre dues crestes d'ones vist des de el vaixell, indica que aquest té un rumb similar a l'onatge. Sota aquestes circumstàncies, el temps vist des del vaixell entre dues crestes d'ona és major a 7,5 segons, el que implica un major temps tant de carrega com de descarrega. Continuant

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

amb el tema, s'indica que aquest fenomen és simètric, és a dir, existeix el mateix temps de remunta que de baixada.

El pilot del vaixell pot realitzar petites desviacions del rumb aconseguint una asimetria al temps de carrega i al de descarrega vist des del mateix vaixell. S'intenta representar aquests comentaris a la Figura 6.11.

Això es tradueix en un perfil asimètric respecte a les consideracions realitzades anteriorment. Amb aquestes petites desviacions, aconseguim augmentar el temps en el remunta de l'ona i posteriorment reduïm el temps en la baixada de l'ona, tot això vist des de la perspectiva del vaixell. D'aquesta forma s'obté un angle més favorable per la descarrega del sistema ACEE sobre els propulsors. Realment, el temps mig entre crestes vist des del vaixell és el mateix encara els temps a la pujada i a la baixada siguin diferents vist pel vaixell.

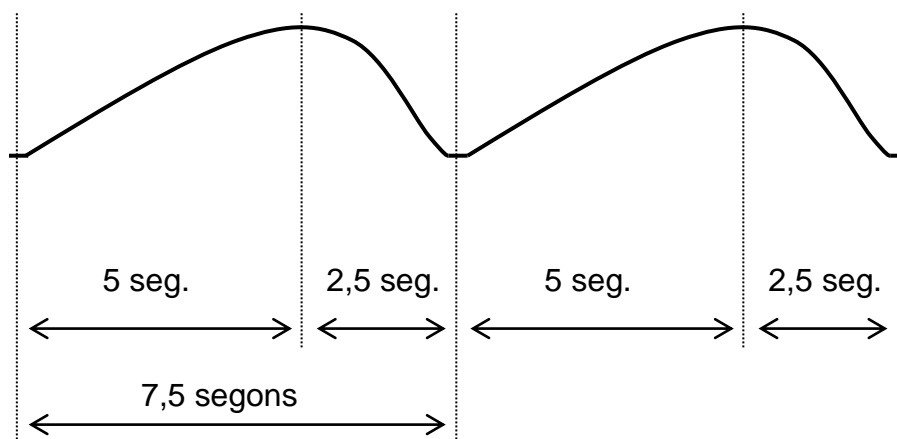


Figura 6.11. Representació de l'onatge del Mediterrani vist des del vaixell aplicant les desviacions sobre el rumb.

Si en un onatge "simètric" obtindríem el mateix temps per el remunta que per la baixada vist des del mateix vaixell, a l'onatge "asimètric", els temps per el remunta i per la baixada son diferents encara que el temps entre dues crestes d'ona consecutives és la mateixa, tot vist segons el vaixell. Aquest onatge "asimètric" es representa a la Figura 6.11.

A part d'aquest mètode per variar el temps de remunta i de baixada vist des del vaixell per obtenir diferents temps de carrega i descarrega segons les necessitats del sistema de propulsió amb l'ACEE, també es pot fer una hipòtesis de funcionament diferent.

Aquesta hipòtesis de treball consistiria en sobre dimensionar als motors elèctrics de propulsió i entrar a sobre-càrrega els generadors elèctrics però ajudat pel sistema ACEE. D'aquesta forma aconseguiríem un sistema de propulsió amb una potència major sense necessitat de sobre dimensionar el

grup generador i, amb conseqüència, tampoc augmentaria el consum de combustible.

6.5. Conclusió

Com veiem, el sistema ACEE és un sistema que augmenta el rendiment energètic d'un vaixell amb l'onatge. A mida que l'onatge és més important, l'estalvi que proporciona el sistema ACEE és més gran. És a dir, el sistema ACEE s'ajusta a les necessitats del vaixell front les exigències de l'onatge.

Amb un sistema ACEE, el disseny del sistema de propulsió de la cadena de tracció es pot ajustar molt més ja que el sistema ACEE absorirà les desviacions de esforços degut a l'onatge. És a dir, el sistema de propulsió del vaixell serà més eficient i l'estalvi energètic serà considerable.

També és més senzill descarregar l'energia de l'ACEE sobre elements auxiliars en lloc de fer-ho el sistema de propulsió. És a dir, la complexitat del sistema ACEE per alliberar l'energia al sistema de propulsió del vaixell és tan elevada que l'increment d'afegir un sistema auxiliar de propulsió amb tot el seu equipament resulta més barat.

Per altre costat, instal·lar un sistema detector d'onades millora l'efectivitat del sistema de control de l'ACEE i augmenta l'eficiència del propi ACEE. Així, el sistema ACEE sap el tot moment el moment d'alliberament de l'energia i la quantitat necessària per cada ona, sigui quin sigui el rumb del vaixell i la velocitat de les onas respecte el vaixell.

En el cas de instal·lar diversos sistemes ACEE segons el muntatge nº4 (segons la grandària del vaixell), la descarrega de cadascun d'ells dependrà de la seva situació en el casc del vaixell. Cada sistema de propulsió auxiliar ajudarà a millorar el comportament dinàmic del vaixell augmentant l'estabilitat i millorant el confort del passatgers o tripulació del vaixell.

La descàrrega dels excedents d'energia sobre elements auxiliars pot servir per augmentar el rendiment de l'ACEE i, en alguns casos, pot justificar la no instal·lació.

De les possibles instal·lacions comentades, hi poden haver diferents combinacions però no queda clar quina és la millor ni quina potència seria la més correcte per poder demostrar la seva validesa. Desgraciadament, l'estudi dels cicles i instal·lacions va quedar estroncada per la impossibilitat de fer més proves per qüestions de canvi de feina.

També es volia aprofitar per afegir un suport superconductor que al final no es va materialitzar.

Després de totes conclusions, poden dir que sembla més viable utilitzar el propi grup electrogen com a ACEE, sobredimensionant la part de l'alternador i deixant oscil·lar una mica la freqüència.

7. EL 1er ACEE

7.1. Introducció

Abans de començar a descriure el primer l'acumulador, anem a explicar uns desenvolupaments previs del Dpt. Enginyeria Elèctrica de l'ETSEIB de l'UPC.

7.1.1. Seat IBIZA

L'inici va esser el prototipus Seat IBIZA, un cotxe híbrid, creat amb la col·laboració del centre de formació: SEAT Formació. Aquest cotxe anava equipat amb un grup electrogen, unes bateries i un motor de tracció elèctric.

El cotxe va ser cedit per Seat al D.E.E. (ETSEIB-UPC) per poder fer proves. A aquest vehicle se li van aplicar, per part de Seat, unes limitacions tècniques per evitar la circulació en obert. Per part, només es va emprar per la docència dels estudiants i possibilitat de realitzar millores i/o modificacions tècniques.

El motor de tracció era un motor síncron Brushless de 5,5kW de potència nominal (model MA55 del fabricant Mavilor) refrigerat per aigua, amb electrònica de potència associada, també refrigerada per aigua a 40°C.

El motor tèrmic era d'una moto de trial de GAS-GAS, refredat per aigua a 90°C amb el carter modificat amb masses contra rotats, que arrossegava el generador d'imants permanents, amb paquets magnètics i caps de bobina externs d'ambdós semi estators refredats per aigua.

El generador amb un rectificador de díodes, alimentava 17 bateries de plom-àcid de 40Ah (de capacitat C₂₀) situades al maleter.

Es pretenia regular el corrent de càrrega de bateries per mitjà del carburador del motor tèrmic GAS-GAS.

El vehicle es va posar damunt d'un banc de rodets de Seat a Martorell. Allà va demostrar les seves prestacions, assolint fàcilment els 80km/h amb acceleracions destacables.

El sistema assajat com a elèctric, no va acabar de funcionar com a híbrid i l'esforç es va concentrar en el segon prototipus del Departament: El Despertaferro.

El Despertaferro demostraria que el refredament amb aigua del motor i del generador elèctric aplicats al Seat IBIZA, no eren necessaris. També va demostrar que calia incrementar la tensió de bateries, perquè el control electrònic pogués assolir règims de velocitats més elevats i corrent més febles però útils per a definir els possibles dispositius correctius de les oscil·lacions de tensió tipus ACEE.

7.1.2. Despertaferro

El vehicle electro-solar Despertaferro es va construir-se als assaigs finals del Seat IBIZA. El Despertaferro va esser dissenyat i construït específicament per participar a la cursa internacional SunRace 2000, per l'equip d'estudiants de l'ETSEIB i l'EUSS "Mediterrani".

Aquest vehicle disposava de 7,95m² d'àrea solar amb una potència de 1,1kW (de pic) que carregava les 16 bateries de GEL de 12Ah de 12V. El motor de tracció (Mavilor MA55 AC brushless) desenvolupava una potència de 5,5kW amb un pic durant 1 segon de 8kW i un pic de rendiment electromecànic del 92%.

La forta acceleració disponible del motor de tracció, que portaria a sortir en la 1a posició de la cursa SunRace 2000 d' Austràlia, va demostrar que era el vehicle amb més acceleració de la cursa.

El "Despertaferro" va tenir una segona etapa, l'any 2007, després de la cursa SunRace de l'any 2000. Un nou equip d'estudiants, anomenat Montseny, el tragueren del Museu de la Ciència i la Tècnica de Terrassa i el portarien i prepararen per competir a la cursa Ral·li PHEBUS 2007, entre Girona i el coll de Puimorén al Pirineus francès. Després de retirar-se a mitja cursa entre Olot i Ripoll, aquella tardor el "Despertaferro" torna al Museu.

En aquesta segona etapa, es va pujar la tensió de les bateries a 310V (25 bateries de 12V i 10Ah). Així es podia assumir les màximes prestacions del motor i amb un mínim corrent.

Es va variar la relació de transmissió a la roda motriu, per a poder arrancar en rampes del 20% per no superar els 4A.

Es va canviar el sostre fotovoltaic i la seva filosofia de captació, per a poder minimitzar l'efecte de les ombres dels arbres, abundants a la zona de la Garrotxa.

7.1.3. Seat 600

Les dificultats d'assaig en circulació oberta dels anteriors vehicles prototipus va fer buscar un altre vehicle, més fàcil d'assajar en trànsit obert i on es poguessin assajar els ACEE construïts, com el del present treball.

Tota l'experiència anterior es va concentrar en el Seat 600, cedit pel Sr. Domingo Bernuz Aguilar. El antic propietari va modificar el vehicle traient el motor de combustió i afegint dos motors de tracció de corrent continu idèntics de 3CV, 110V i 4000rpm i d'excitació sèrie.

Un dels motors elèctrics tenia dues sortides d'eix. Per un costat, l'eix estava acoblat directament a la caixa de canvis original del Seat 600 (per mitjà de

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

l'embragatge també original). I per l'altre costat, estava acoblat a l'altre motor elèctric amb una corretxa i que estava damunt de l'altre.

Els dos motors elèctrics de tracció estaven acoblats per una corretja dentada de relació de transmissió 1:1.

En Sr. Domingo va aconseguir regular les velocitats dels motors en tres graons de prestacions, per mitjà d'un commutador. Aquest commutador accionava uns contactors de bateries i obtenia, sense cap mena d'electrònica, les configuracions següents:

1. Els dos motors en sèrie.
2. El motor inferior (el directament acoblat a l'embragatge) sol.
3. Els dos motors en paral·lel.

Gràcies a això, el vehicle podia superar un pendent del 25%. Ara bé, ho feia amb molta força, és a dir, accelerava els dos motors elèctrics i deixava l'embragatge a poc a poc. Els motors elèctrics es comportaven com acumuladors d'energia cinètica i d'aquesta manera el vehicle podia superar pendents forts, que amb tracció elèctrica pura i sense preparació, tindria una gran dificultat pels forts corrents.

Desgraciadament, l'absència d'electrònica castigava a les bateries, amb uns pics importants d'intensitat d'arrencada. Però les prestacions resultaven espectaculars sobre tot amb un control tan simple i robust.

El vehicle va esser "donat de baixa" a l'Hospitalet de Llobregat, després de arribar de Sant Vicenç dels Horts, on s'havia modificat. Es va estudiar la seva legalització, però l'estat de degradació de la carrosseria, va aconsellar utilitzar-ne un altre vehicle. Per això es va comprar un altre i es va instal·lar tot el sistema al nou cotxe i, així, poder-lo legalitzar.

En el PFC d'en Sr. Pedro José Talavera, es va aprofitant l'acoblament entre el motor elèctric i la caixa de canvis i es va optimitzar el vehicle Seat 600 que era canviar el motor superior de tracció (el que no estava acoblat a la caixa de canvis) per un servomotor de corrent altern MA-55 (de flux axial, d'imants en el rotor i de baixa inèrcia) del fabricant Mavilor.

Així es va reproduir la cadena de tracció del Seat IBIZA i de "El Despertaferro" amb el motor de MA-55 que es va córrer a Austràlia.

Més endavant, es va afegir un grup electrogen per carregar les bateries i augmentar l'autonomia del cotxe. Les dificultats constructives i el fet de disposar de dos motors elèctrics de tecnologies diferents, va permetre estudiar varies topologies d'aprofitament energètic del grup electrogen, tant en règim permanent com en els transitoris.

Amb totes aquestes modificacions, es va millorar el rendiment del vehicle elèctric. L'altre motor de corrent continu que s'utilitzava al principi, es va decidir no connectar-lo elèctricament i deixar-lo com a volant d'inèrcia.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACEE APLICABLES EN TRANSPORTS

A partir d'aquí, pren el relleu en Sr. Jesús Hernández, també en el seu PFC, que millora altres punts importants del vehicle elèctric, deixat per en Sr. Pedro José. Aquests punts van ser:

- Millorar la refrigeració del grup electrogen afegit.
- Posada a punt del sistema de càrrega de les bateries principals.
- Posada a punt del sistema de càrrega de la bateria de serveis auxiliars.
- Control energètic del conjunt.
- S'afegeix un acumulador cinètic d'energia elèctrica v1.

La fi del vehicle era poder circular "en trànsit obert" i, per això, es van fer totes les gestions administratives i tècniques, per a superar la Inspecció Tècnica de Vehicles. Abans de passar la inspecció, es van muntar tots els equips, aparells i sistemes. Un cop preparat el cotxe, es va superar la inspecció ITV sense gaires problemes. A partir de llavors, ja es disposava d'un cotxe elèctric per fer proves en situacions de circulació real.

Es va considerar oportú afegir un ACEE embarcat per la demanda d'energia en circulació, sobre tot en la ciutat, amb aturades i acceleracions repetides de forma constant degut als semàfors i el trànsit com els de la ciutat de Barcelona.

Inicialment l'ACEE es carregava des de l'exterior del cotxe, per després descarregar l'energia amunt del motor de corrent continu d'excitació sèrie del cotxe. La càrrega exterior simulava l'aportació energètica del grup electrogen que era en fase d'instal·lació, per dificultats constructives del tub d'escapament. A més, es van afegir uns aparells de mesura per conèixer el nivell de càrrega de l'ACEE.

7.2. Acumulador V1

El primer ACEE tenia un motor MSS-8 del fabricant Mavilor i un volant d'inèrcia de forma de cilindre de ferro. El volant pesava 19kg i feina 240mm de diàmetre per 65mm d'alçada. Aquestes dimensions permetien embarcar-lo al lloc del seient del copilot, sense seient de l'acompanyant.

El motor MSS-8 tenia una potència de 805W amb un rendiment del 84%. És un motor de corrent continu de flux axial d'imants permanents de baixa inèrcia. Aquest motor desenvolupava un parell nominal de 2,56Nm i un parell màxim de 15,38Nm a una tensió de 90Vcc i amb un corrent de 10,7A.

Aquest ACEE tenia un circuit d'alimentació adaptat al motor de corrent continu emprat. És a dir, la càrrega es feia a partir de la xarxa, amb un transformador (230V entrada; 12V sortida de 250VA) per baixar la tensió alterna i un pont de díodes (de 4 díodes de 40A i 300V) per rectificar la tensió alterna a tensió continua. Es volia jugar amb la capacitat de sobrecàrrega del transformador durant el procés de càrrega.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Abans de res es munta un commutador per poder aïllar l'ACEE del circuit d'alimentació i connectar-lo al circuit de descàrrega.

El primer càlcul era saber l'energia teòrica d'aquest ACEE. El càlcul ens donava 750J d'energia a una velocitat de gir de 1000r.p.m.

La primera prova va consistir en mesurar la velocitat de gir del volant segons la tensió d'alimentació del motor MSS-8 i, un cop sabuda la velocitat, es podia calcular l'energia teòrica emmagatzemada en l'ACEE.

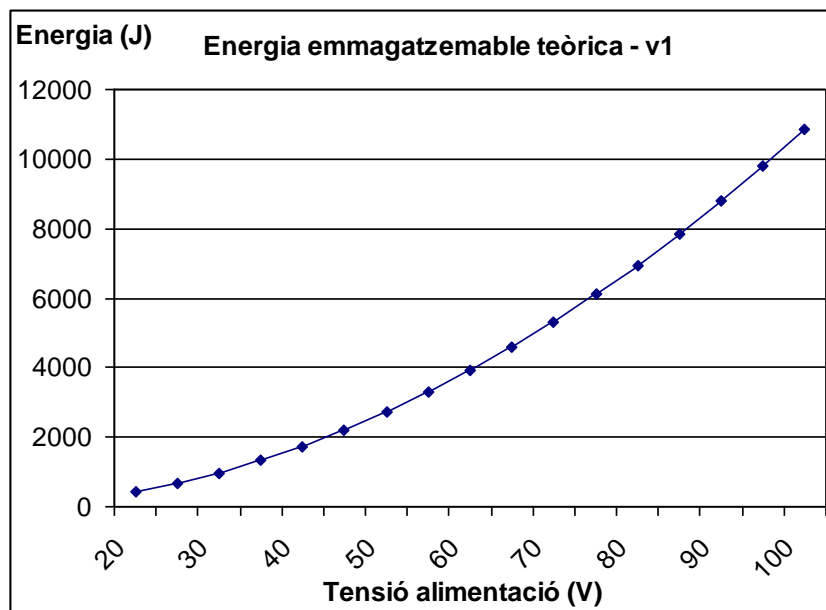


Figura 7.1. Energia emmagatzemada teòrica de l'ACEE V1 segons la tensió d'alimentació.

Després de obtenir el gràfic d'energia segons la tensió d'alimentació (Figura 7.1), calia caracteritzar l'ACEE, és a dir, conèixer les pèrdues de l'acumulador i saber l'energia per mantenir la velocitat del volant constant.

7.2.1. Pèrdues de l'acumulador

Per conèixer les pèrdues per fricció del conjunt (pels rodaments i el fregament amb l'aire) es realitza la següent prova: s'accelera el volant fins a arribar a una velocitat concreta i després es deixa girar lliurement fins que s'atura per si sòl. Es mesura el temps que triga en aturar-se i llavors, calcularem les pèrdues per unitat de temps.

Durant aquesta prova, veiem que la pèrdua d'energia té un comportament constant però, quan s'arriba a les 768r.p.m., el comportament canvia i la velocitat del volant disminueix més ràpidament.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

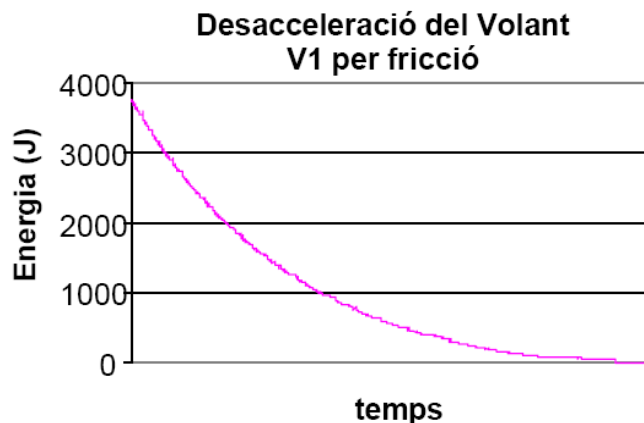


Figura 7.2. Pèrdua d'energia per fricció de l'ACEE V1

Entenen que aquest canvi de comportament es degut a les característiques pròpies de construcció de l'ACEE. Entre les possibles causes destaquen les següents: rodaments emprats, comportament aerodinàmic a baixes voltes diferent degut als forats del recipient, canvi de règim turbulent a laminar de la capa límit i a la pròpia execució mecànica.

Si depreciam el comportament inferior a les 768r.p.m. i ens centrem en els resultats previs a aquesta velocitat, observem una tendència constant.

El rendiment a temps constant del volant d'inèrcia és: 0,985

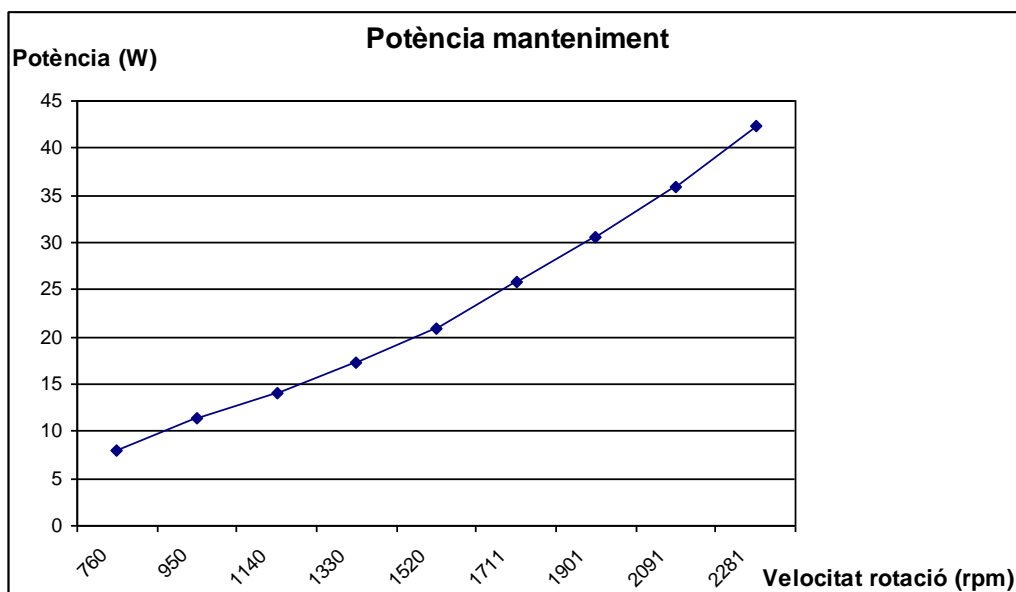


Figura 7.3. Potència de manteniment de l'ACEE V1

7.2.2. Potència de manteniment

Aquesta prova ens mostrarà l'energia necessària per mantenir el volant d'inèrcia a velocitat constant. Les dades per saber l'energia de manteniment son la tensió i el corrent.

Com es pot veure a la Figura 7.3, a mida que augmenta la velocitat de rotació, augmenta la potència necessària per mantenir la velocitat constant degut a que hi ha més fregaments i pèrdues per fricció.

Un cop parametritzat l'acumulador V1, anem a realitzar proves de descàrrega en diferents sistemes com resistències, motor de tracció, etc...

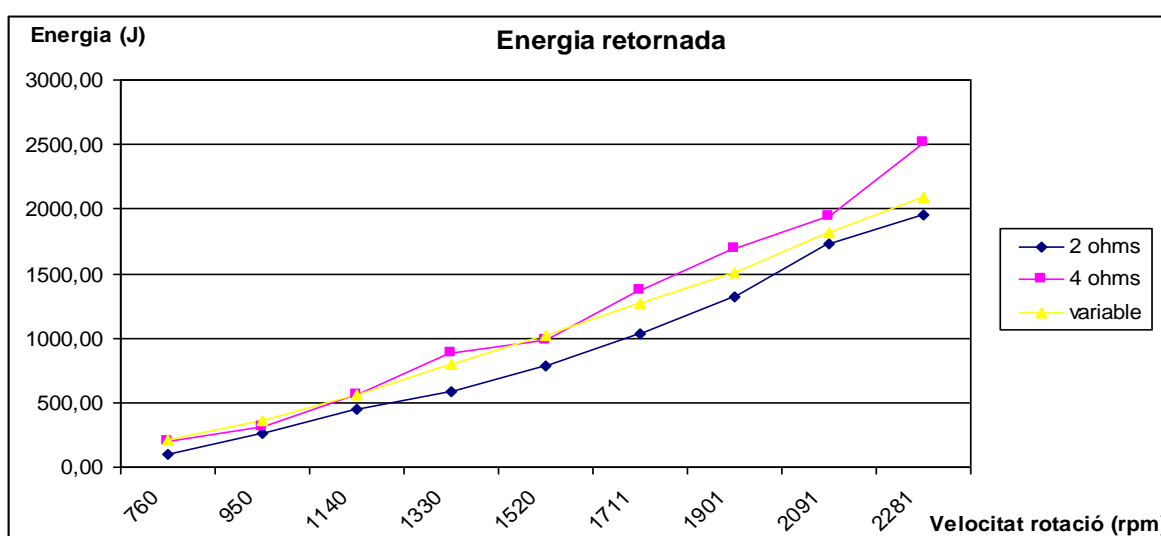


Figura 7.4. Energia retornada de l'ACEE v1 amb descàrrega en resistències

7.2.3. Descàrrega en resistències

Una prova important es saber el rendiment de l'ACEE quan aquest es descarrega en una resistència.

Les primeres proves seran amb resistència fixa de 2Ω i 4Ω i, la última prova serà amb una resistència variable. D'aquesta manera podrem avaluar el rendiment de l'ACEE amb més detall. Amb les dades de les 3 proves, obtenim les corbes d'energia retornada a la Figura 7.4.

Com es pot apreciar en la Figura 7.4., el comportament de l'energia retornada és quasi igual en els tres casos de resistències (2Ω , 4Ω i variable). Aquest comportament és lògic, donat que a major velocitat de rotació, major energia emmagatzemada. Si tenim més quantitat d'energia emmagatzemada, major

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

quantitat d'energia retorna i menor és l'efecte percentual de les pèrdues per fricció.

En la Figura 7.5. es pot veure el rendiment de l'ACEE segons el valor de la resistència de descàrrega. Veiem, en termes generals, que el rendiment es manté per damunt del 40% (excepte en la velocitat de rotació més baixa) i per sota del 70%. Aquest rendiment és proporcional a les pèrdues per fricció.

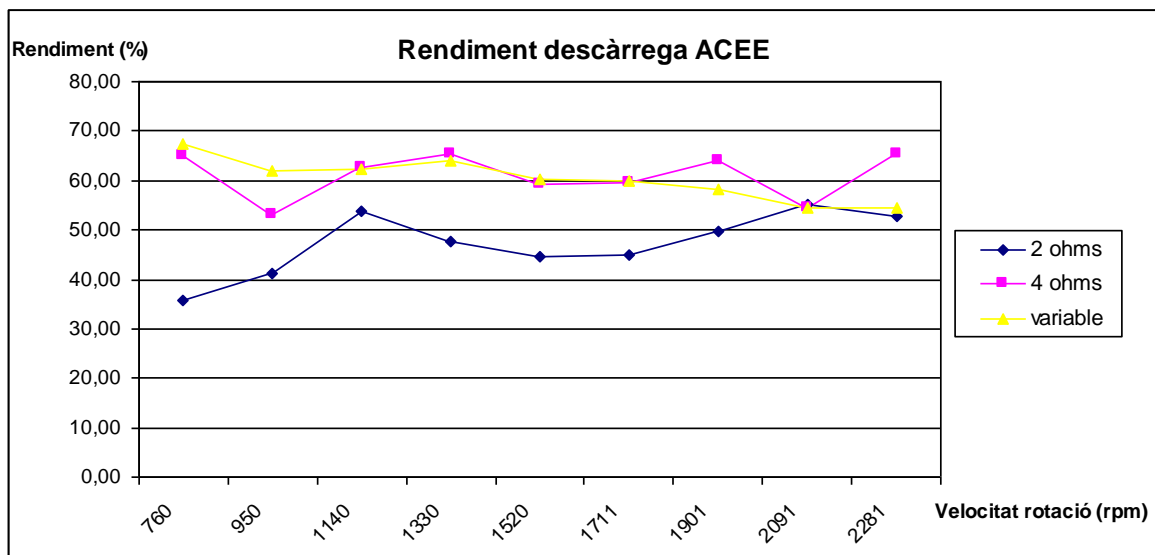


Figura 7.5. Rendiment de l'ACEE v1 amb descàrrega en resistències

Amb la resistència de 2Ω , observem que el rendiment és inferior a les altres dues resistències excepte quan la velocitat de rotació és superior a 2.000rpm. El major rendiment de la corba de 2Ω a velocitat elevada, pot esser degut a que s'allibera més aviat l'energia i la potència de pèrdues per fricció actua menys temps.

Amb les altres dues resistències (4Ω i la variable), el rendiment oscil·la al voltant del 60%, un valor satisfactori tenint en compte que es tracta del primer acumulador construït i que té certes limitacions tècniques i mecàniques.

7.2.4. Descàrrega en el motor de tracció

Ara anem a realitzar proves de descàrrega sobre el motor D1. El motor D1 és un motor de corrent continu d'excitació sèrie. Aquest motor s'emprava com a motor de tracció per moure el Seat 600 elèctric. El motor D1 és el motor bessó del motor de corrent continu que du el Seat 600, anomenat D2.

Nota: Diferenciem els motor de tracció D1 i D2 per la quantitat de sortides d'eix. El D2 té dues sortides d'eix i el D1 només una. El D2 encara està muntat en el cotxe elèctric com a ACEE.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Les característiques d'aquest motor son:

- Potència nominal: 2.200W
- Tensió nominal: 110V
- Intensitat nominal: 24A
- Velocitat nominal: 4.000rpm
- Pes: 55kg
- Resistència debanat d'excitació: 0,58Ω
- Resistència debanat d'induït: 0,7Ω

Abans de fer proves de descàrregues sobre el Seat 600, acoblem el D1 a un fre dinamomètric elèctric d'estator basculant (disponible al Laboratori del Departament). D'aquesta manera podrem estudiar els parells d'arrencada disponibles.

Aquest tipus de prova la farem en dues condicions concretes. En una, el motor de tracció D1 tindrà el rotor bloquejat i l'altre, el motor D1 tindrà el rotor lliure.

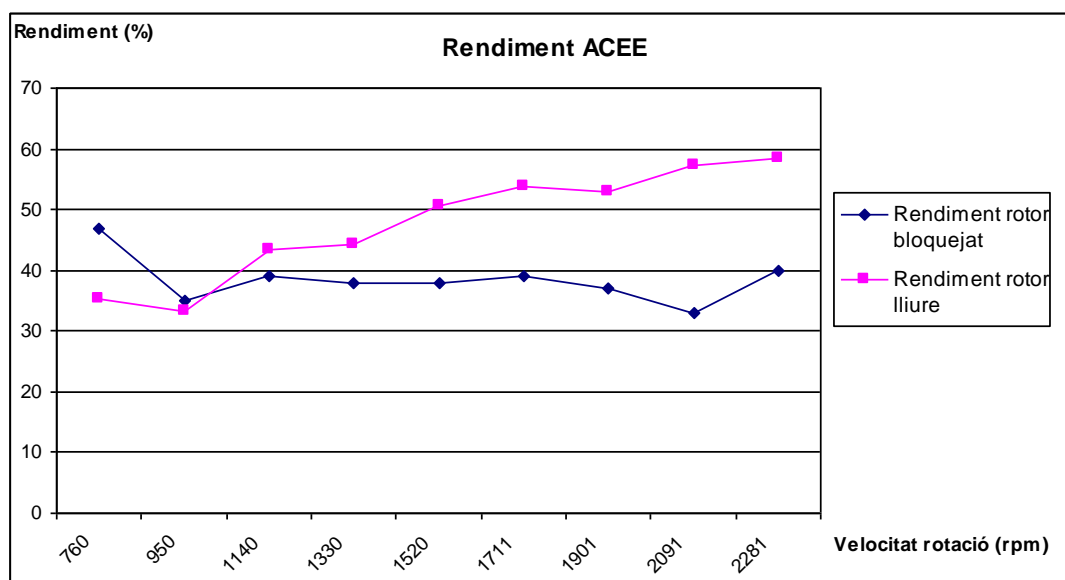


Figura 7.6. Rendiment de l'ACEE v1 descarregant al motor D1.

La prova amb el rotor bloquejat és una prova difícil de mesurar degut a la curta durada de descàrrega i el pic de força. El parell es veurà influenciat per l'efecte de la inèrcia del motor i per l'efecte d'esmoreïment del dinamòmetre. La prova amb el rotor lliure és més simple que l'anterior donat que pic de força és inferior i, a més, el temps de descàrrega és més llarg. A la Figura 7.6 es poden veure els resultats dels rendiments de l'ACEE segons l'estat del rotor.

Un cop fetes aquestes proves, es decideix instal·lar l'ACEE V1 al vehicle elèctric Seat 600 per fer les proves en recorregut urbà. S'instal·la a l'espai lliure que deixa el seient del costat del conductor quan es retira.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Desgraciadament, el pes del volant d'inèrcia (damunt del motor) va fer malbé els rodaments del motor quan es va muntar al cotxe. Una petita caiguda i el poc marge de càrrega admissible dels rodaments, van marcar una pista dels rodaments. Això va fer que el volant vibres de forma inadmissible, obligant a fer girar el volant a l'inrevés per "carregar" l'altre pista del mateix rodaments. A més, hi havia una limitació en el corrent de càrrega del circuit d'alimentació degut a que el transformador era d'una potència més baixa que la que podia admetre el motor MSS-8.

Degut a tot això, es va decidir canviar el volant d'inèrcia (per un amb més moment d'inèrcia), els rodaments i el transformador del circuit d'alimentació.

7.3. Acumulador V2

La segona versió (V2) d'aquest primer ACEE, va consistir en substituir el volant d'inèrcia per un de més gran (400mm de diàmetre per 17mm d'alçada) amb un pes de 17kg (una mica inferior que la versió 1). El moment d'inèrcia del volant és de $0,34\text{kgm}^2$ (el moment d'inèrcia de l'ACEE V1 era de $0,1368\text{kgm}^2$, ara és quasi 2,5 vegades més gran que abans).

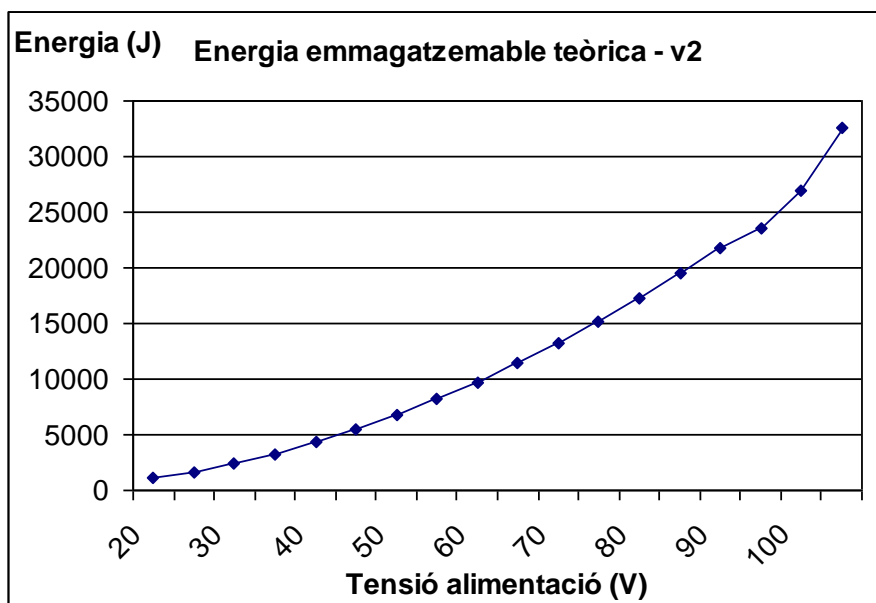


Figura 7.7. Energia emmagatzemada de l'ACEE V2 segons la tensió d'alimentació.

Aquesta segona versió desenvolupa 1.864J d'energia a una velocitat de gir de 1.000r.p.m. mentre que la versió 1 només tenia 750J d'energia a la mateixa velocitat de gir. Tal i com vàrem dir en el primer capítol, un augment del radi del volant d'inèrcia (de 120mm a 200mm), obté un increment considerable d'energia emmagatzemada, uns 245% més d'energia, aproximadament.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Igual que la versió anterior, es van fer les proves per calcular la velocitat del volant a partir de la tensió d'alimentació del motor MSS-8 i, un cop mesurada la velocitat, es calcula l'energia emmagatzemada.

Com veiem en la Figura 7.7, l'energia comença a ser important. Es decideix caracteritzar la versió V2 d'aquest primer ACEE com la versió anterior.

7.3.1. Pèrdues de l'ACEE

Per conèixer les pèrdues per fricció del conjunt, s'accelera el volant fins a una velocitat determinada i, després, es deixar girar lliurement. Un cop sabut el temps que triga en aturar-se, llavors podem calcular les pèrdues per unitat de temps.

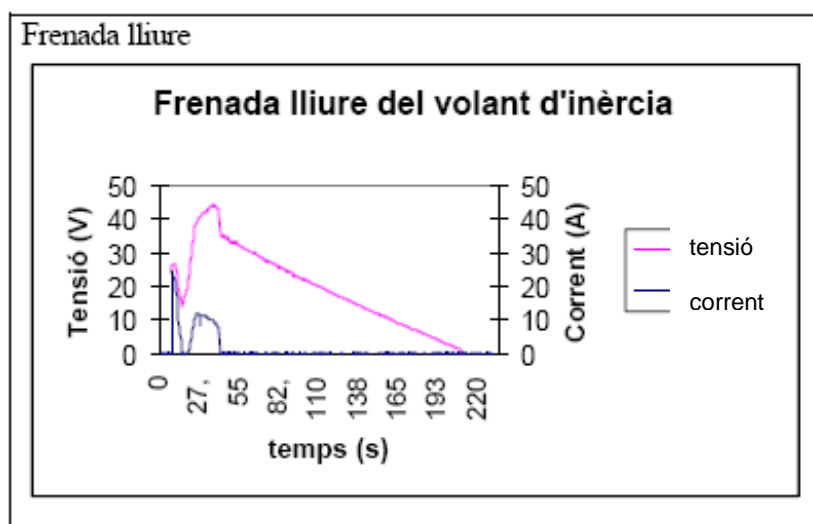


Figura 7.8. Pèrdua d'energia emmagatzemada de l'ACEE V2

A la Figura 7.8. es pot veure com l'energia emmagatzemada es perd completament després de 210 segons.

Donat que les proves per caracteritzar l'ACEE V2 seran similars a les proves ja fetes de la versió 1, saltarem aquest pas i farem les proves directament sobre el cotxe elèctric Seat 600.

7.3.2. Proves damunt el cotxe Seat 600

Ara el Seat 600 disposa de dos motors de tracció: un de corrent continu d'excitació sèrie (anomenat motor D2) i l'altre, de flux axial de corrent alterna d'imants en el rotor i de baixa inèrcia anomenat MA-55.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per un costat, el motor D2 està acoblat mecànicament al canvi de marxes per mitjà de l'embragatge i, per l'altre costat, està acoblat al motor MA-55 per mitjà d'una corretja dentada. La prova consisteix en descarregar l'ACEE V2 sobre el motor D2.

Primer carreguem l'acumulador per després descarregar-lo sobre el motor D2. Donat que aquest motor està acoblat a l'embragatge i per fer la prova més real, es decideix posar la primera marxa del canvi de marxes. Així el cotxe Seat 600 es mourà amb l'energia de descàrrega de l'ACEE.

El lloc per fer la prova és en el mateix Laboratori amb una superfície plana i llisa. A partir de les dades, obtenim la Figura 7.9.

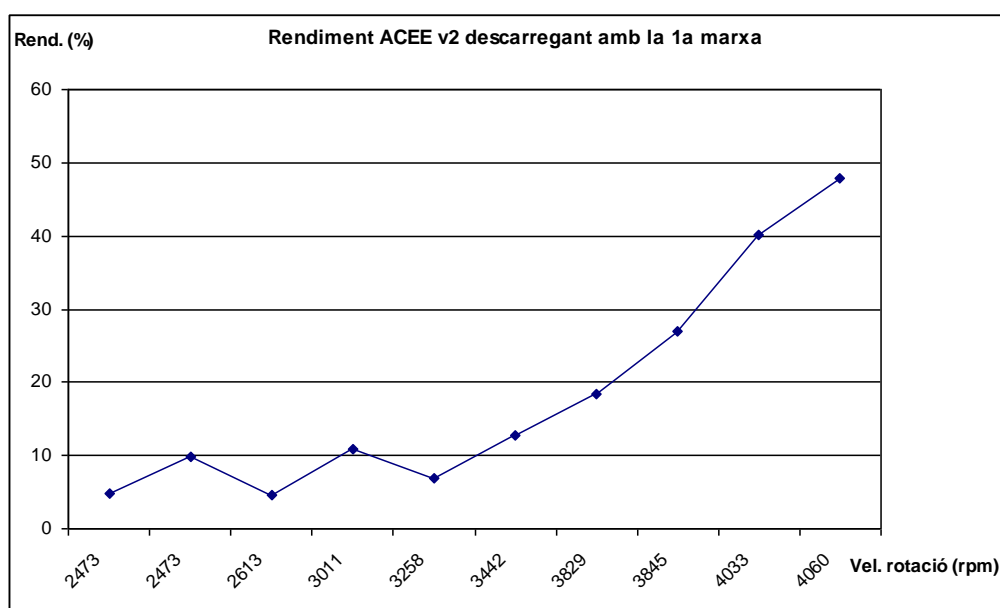


Figura 7.9. Rendiment ACEE V2 descarregant amb la 1a. marxa

Podem apreciar com el rendiment de l'ACEE V2 augmenta a mida que augmenta la velocitat de rotació del volant d'inèrcia. Es pot arribar a dir que l'ACEE V2 té un rendiment destacable quan supera les 4.000rpm i un major rang de funcionament. Desgraciadament, 4.000 rpm és el límit mecànic del conjunt.

Encara que aquestes dades ens donen informació valuosa, volem destacar el fet que el vehicle Seat 600 recorria una certa distància en cada descàrrega. Una d'aquestes distàncies va ser considerable on l'energia entregada per l'ACEE va ser de 14.700J, al límit màxim del conjunt. A la Figura 7.10. podem veure les distàncies obtingudes amb les descàrregues.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

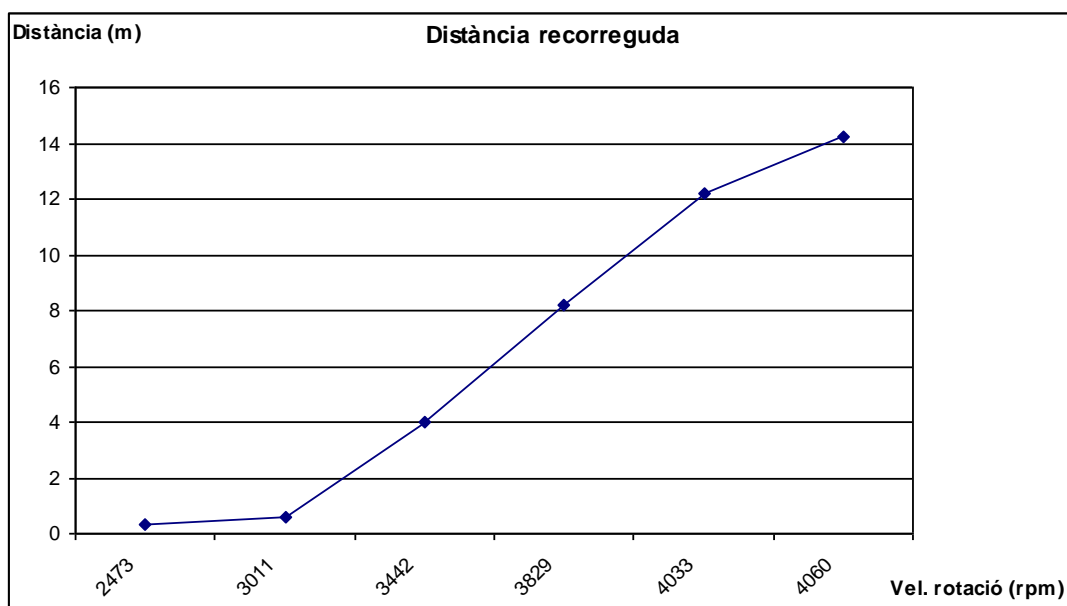


Figura 7.10. Distància recorreguda amb descàrrega de l'ACEE V2 amb la 1a. marxa

7.4. Resum del 1er prototipus d'ACEE

A la Taula 7.1. podem veure les característiques principals de les dues versions del primer prototipus d'ACEE.

	1er ACEE V1	1er ACEE V2
Massa volant	19kg	17kg
Velocitat màxima	2.500rpm	3.500rpm
Moment d'inèrcia	0,1368kgm ²	0,34kgm ²
Energia màxima emmagatzem.	4.688J	22.968J
Rendiment	50%	50%

Taula 7.1. Taula resum de les dues versions del 1er ACEE

El prototipus versió 2 millora en tots els aspectes a la versió 1. Gràcies a això s'obtenen unes millors prestacions en la versió 2 encara que el rendiment de les dues versions d'ACEE és d'un 50%. La dada més significativa és que la versió 2 triga uns 210 segons en aturar-se.

7.5. Conclusions del 1er prototipus d'ACEE

Encara que el volant d'inèrcia de la versió 2 del primer ACEE tenia un pes una mica inferior a la de la versió 1 (17kg front els 19kg), el moment d'inèrcia de la segona versió és 2,5 vegades superior al de la versió 1. Això li dona una major capacitat d'emmagatzemar energia. A la Taula 7.1, podem comparar l'energia emmagatzemada de la versió 1 (4.688J) respecte la versió 2 (22.968J).

El canvi del volant d'inèrcia va ser un pas important per poder experimentar amb una major quantitat d'energia. L'evidència més clara va ser que amb aquesta energia, el cotxe Seat 600 va recórrer uns 14 metres dins del laboratori amb les rodes originals del cotxe i amb pressió de rodes incorrecte. Si haguéssim utilitzat unes rodes d'alta eficiència i la pressió correcta, el cotxe hagués pogut recórrer una major distància amb la mateixa energia emmagatzemada.

Desgraciadament, la versió 2 del primer prototipus té uns certs problemes:

- problemes amb l'equilibrat en el volant d'inèrcia,
- el recipient no és prou rígid i actua com a membrana (amb problemes de freqüències pròpies de funcionament properes a la velocitat del volant d'inèrcia),
- problemes amb la potència del transformador del circuit d'alimentació per carregar l'ACEE (potència màxima 250VA).
- el corrent màxim admissible del motor/generador de l'ACEE MSS-8 és de 60A. És a dir, per damunt d'aquest valor, els imants d'ALNICO podem desmagnetitzar-se.

A més d'aquests problemes, el concepte d'aprofitar els rodaments del motor per al volant d'inèrcia, no va ser una bona desició. Els rodaments del motor MSS-8 no estaven preparades per aquesta sobrecàrrega (pes del volant d'inèrcia). Això va provocar que les pistes dels rodaments del motor MSS-8 es fessin malbé i tinguéssim un major fregament i, en conseqüència, unes majors pèrdues.

A part de tot això, la informació obtinguda de les proves ha estat molt valuosa com conceptes bàsics de construcció i disseny de l'acumulador, selecció del motor/generador elèctric, etc...

Però com el Seat 600 tenia el permís de circulació per rodar en obert, es va decidir fer una prova i veure el comportament de l'ACEE en situacions reals de carretera. Es va fer un recorregut des de la ciutat de Barcelona fins el polígon URVASSA de Sta. Perpètua de Mogoda, per a visitar Mavilor, esponsor dels motors i del control electrònic.

En aquest viatge es va comprovar la falta d'energia de l'acumulador per superar pendent llargues de la carretera. Això va provocar que les bateries s'esgotessin aviat i que tingués problemes per arribar el seu destí.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Degut a tots aquests problemes i limitacions esmentades, es decideix fabricar un altre ACEE amb una major energia emmagatzemable i aprofitar la capacitat de circular en obert del Seat 600. És una prova real i única i no es perdre l'ocasió de fer-la.

8. L'ACEE RG2

En el capítol anterior, s'ha detallat el primer prototip d'ACEE i la seva aplicació en el cotxe Seat 600 així com els problemes i les limitacions del primer acumulador. Per tot això, es decideix fer un segon acumulador de major potència des de zero.

En aquest capítol es detallarà el disseny, la construcció, el muntatge i les proves del segon ACEE. El primer requeriment que ens fixem és que l'energia d'emmagatzemament arribi a una energia de 32,5kJ.

Si comparem aquest valor d'energia emmagatzemada amb l'energia de frenada d'una moto de 200kg circulant a 110km/h, veiem que pot ser 93,4kJ mentre que l'energia de frenada d'un cotxe de 1.200kg circulant a 50km/h arriba a 115kJ (veure Taula 3.2. "Taula d'energies cinètiques de diferents mitjans de transport a diferents velocitats"). Com veiem, l'estudi teòric previ també ens ha conduït a fer un ACEE de més capacitat d'emmagatzemat d'energia.

Donat que aquest treball consisteix en veure i conèixer la problemàtica de la càrrega i descàrrega sobre un sistema de transport, aquest nou i segon acumulador també es provarà sobre cotxe elèctric. Es possible que el nou acumulador no es pugi muntar dins del cotxe Seat 600 per qüestions de pes i dimensions. Això no seria un entrebanc ja que al Laboratori de Motors Tèrmics (ETSEIB) hi ha un banc de rodets. Per tant, la instal·lació de l'acumulador dins del cotxe elèctric no és important i passa a un segon terme.

Si al final no podem instal·lar l'ACEE dins del cotxe, estudiarem la problemàtica de càrrega-descàrrega de l'ACEE "en estàtic" mentre que el cotxe elèctric estarà damunt dels rodets. Així obtindrem els resultats en un temps relativament curt.

8.1. Consideracions inicials

Un error del primer prototipus va ser pensar que el rodament del motor podria aguantar el pes del volant d'inèrcia però no va ser així. Aquest vegada hem decidit que el volant (la part que més pesa de l'ACEE) estigui en la part inferior. D'aquesta manera aconseguirem un centre de gravetat més baix i una major estabilitat del conjunt.

En aquest segon ACEE, el volant d'inèrcia descansarà sobre un rodament i el motor estarà a la part superior. El rodament inferior ens ajudarà en el muntatge i desmuntatge. A més, posarem el volant d'inèrcia dins del contenidor (recipient de seguretat) i la màquina elèctrica estarà fora, per una millor refrigeració.

Vàrem veure que les vibracions i acceleracions dins del vehicle eren importants. I, per reduir els efectes, hem pensat tancar el recipient per la part superior amb una planxa. Aquesta xapa prima es comportarà com una molla en sentit vertical i esmorteirà les possibles vibracions.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A més, hem pensat posar un rodament cònic de corrons on es recolzi el volant. Aquest tipus de rodament és molt resistent en dues direccions (X i Y) ja que son corrons en lloc de bales. Però aquest tipus de rodament necessita una pre-càrrega mínima per assegurar el seu correcte funcionament.

Per ajustar la pre-càrrega del rodament, hem pensat en afegir una base amb ajust vertical variable. És a dir, serà una base del rodament i es podrà regular per obtenir la pre-càrrega correcte. Per l'altre costat, la planxa de tancament superior tindrà un comportament semi-elàstic que proporciona una subjecció flotant però mantenint els 3 graus de llibertat.

Un altre requeriment inicial és que la velocitat de rotació del volant sigui una velocitat segura i tecnològicament còmoda per nosaltres. Hem pensat que una velocitat de rotació de 3.000rpm és una velocitat adient.

8.2. Disseny del volant d'inèrcia

Escollim una acer del tipus A37b per obtenir un volant d'inèrcia simple donat que té una resistència a la tracció, una mecanització i una disponibilitat en el mercat adients.

La forma més simple de volant d'inèrcia és un cilindre i d'una peça sencera. Així no caldrà equilibrar el volant.

Les dimensions inicials son (amb un gruix de 50mm):

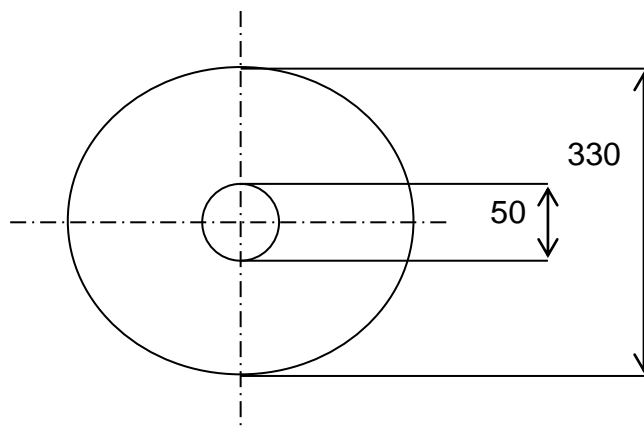


Figura 8.1. Dimensions generals del volant d'inèrcia

Amb aquest valors inicials (dimensions i velocitat màxima), anem a fer els càlculs d'esforços. Si després de fer els càlculs, veiem que el material no resisteix la velocitat de rotació, canviarem les dimensions del volant o de tipus de material del volant.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com que volem una major energia d'emmagatzemament, l'opció de reduir la velocitat de gir no és acceptable.

8.2.1. Càlculs de resistència del material del volant

Per verificar la resistència del material emprat per fer el volant d'inèrcia, treballem sobre la hipòtesis que la ruptura del volant degut al moment. És a dir, conèixer a quina velocitat es trenca en dos meitats el volant (pel diàmetre del cercle).

Suposem que el volant es trenca en dos trossos similars o idèntics. Si fos així, cal conèixer l'esforç de tracció produït pel seu propi pes al girar degut a la força centrífuga.

Si la resistència del material és superior a l'esforç, llavors estarem dins d'una velocitat de gir segura. Si l'esforç és superior a la resistència del material, llavors haurem de canviar de material.

Els càlculs es realitzen sota el Principi de Saint-Venant. La distribució de tensions en una secció recta és independent del sistema exterior de forces i, només depèn de la resultant del mateix, sempre que es tracti d'una secció suficientment allunyada dels d'aplicació de les forces.

En el cas d'esforç normal, això passa a una distància aproximada igual al costat de la barra prismàtica. En aquestes situacions, es suposa que es tracta de compressió o tracció uniformes, de magnitud N , o sigui, la tensió n_1 és uniforme en tota la secció Σ i la seva resultant aplicada en el centre de gravetat (c.d.g.) G de la secció és N :

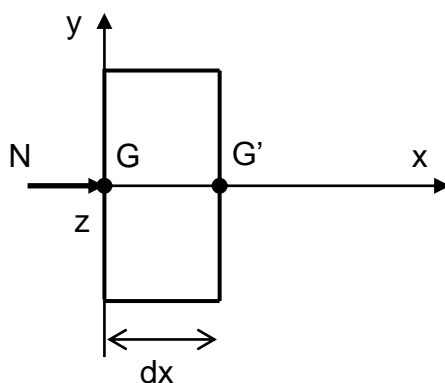


Figura 8.2. Esquema de l'esforç normal en una secció.

Llavors,

$$N = \iint_{\Sigma} n_1 d\sigma = n_1 S \quad (\text{eq. 8.1})$$

on S és l'àrea de la secció Σ .

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

i, per tant:

$$n_1 = \frac{N}{S} \quad (\text{eq. 8.2})$$

Per un altre costat, tenim les deformacions que es produeixen degut a l'esforç normal que es calcula gràcies a la Llei de Hooke. Començant de que:

$$n_2 = n_3 = t_1 = t_2 = t_3 = 0 \quad (\text{eq. 8.3})$$

llavors:

$$e_1 = -\frac{1}{E} n_1 \quad (\text{eq. 8.4})$$

o sigui:

$$\frac{\Delta dx}{dx} = -\frac{1}{E} \frac{N}{S} \quad (\text{eq. 8.5})$$

D'aquesta forma s'obté l'expressió de la Llei de Hooke. Variant l'expressió, s'aconsegueix:

$$\Delta dx = -\frac{N}{ES} dx \quad (\text{eq. 8.6})$$

Si es tracta d'una longitud L, llavors:

$$\Delta L = -\frac{NL}{ES} \quad (\text{eq. 8.7})$$

Si s'escriu d'una altre forma, s'obté:

$$-Ee_1 = n_1 = \frac{N}{S} \quad (\text{eq. 8.8})$$

En les direccions perpendiculars és:

$$e_2 = e_3 = \frac{n_1}{E_1} \sigma \quad (\text{eq. 8.9})$$

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Anem a estudiar la cinemàtica del volant d'inèrcia. Iniciem l'estudi amb les components intrínseques de l'acceleració:

- Acceleració tangencial:

$$a_t = \frac{dv}{dt} \quad (\text{eq. 8.10})$$

- Acceleració normal:

$$a_n = \frac{v^2}{\zeta} \quad (\text{eq. 8.11})$$

Amb aquestes dues equacions (eq. 8.10 i 8.11), l'acceleració és:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} \quad (\text{eq. 8.12})$$

En un moviment circular, si un punt descriu una trajectòria circular amb velocitat constant, llavors serà un moviment circular uniforme. Per ser uniforme, l'acceleració tangencial serà nul·la i, al tenir el radi de curvatura constant, igual que la velocitat, llavors l'acceleració normal serà constant.

Aquesta acceleració es deu a que la velocitat varia de direcció encara que no variï de mòdul. Ens centrarem amb la trajectòria circular amb moviment circular qualsevol.

Es sabut que la longitud de l'arc $AM \equiv S$, llavors:

$$S = R \cdot \varphi \quad (\text{eq. 8.13})$$

$$\frac{ds}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{eq. 8.14})$$

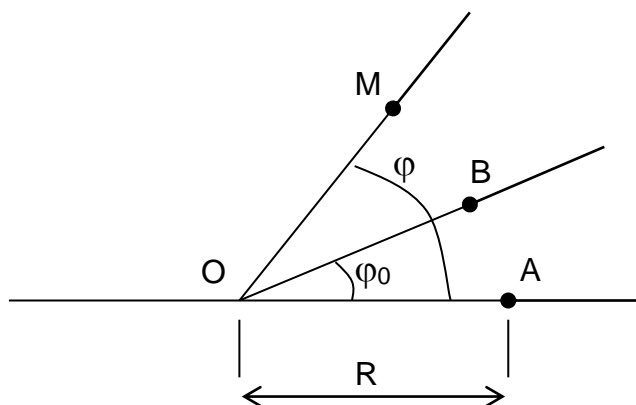


Figura 8.3. Representació moviment circular uniforme

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

I com:

$$v = R \cdot \omega \quad (\text{eq. 8.15})$$

$$a_t = R \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{eq. 8.16})$$

Com a conclusió, s'obté:

$$a_t = R \cdot \alpha \quad (\text{eq. 8.17})$$

on ω és la velocitat angular i α és l'acceleració angular.

Un cop fet l'estudi de la cinemàtica, ampliem el càlcul als sòlids rígids que s'apropa més a la realitat i, a més, inclou l'estudi dinàmic.

La hipòtesis consisteix en que el volant d'inèrcia pot trencar-se, en el pitjor dels cassos, en dos trossos iguals. Si el volant té forma cilíndrica, llavors el lloc per on es pot trencar el cilindre és pel seu propi diàmetre.

La secció diametral és la secció que ha de suportar la tracció d'ambdues meitats que volen separar-se per l'efecte de l'acceleració normal. Els majors esforços sobre el volant d'inèrcia es produeixen quan gira a la velocitat màxima. L'esforç d'un troc del cilindre es concentra en el centre de gravetat del semicilindre.

Per conèixer el centre de gravetat, es calcula el c.d.g. d'un semicercle.

$$\begin{aligned} x_1 &= R \\ y_1 &= \frac{2}{3} \frac{D}{\pi} = \frac{4}{3} \frac{R}{\pi} \end{aligned} \quad (\text{eq. 8.18})$$

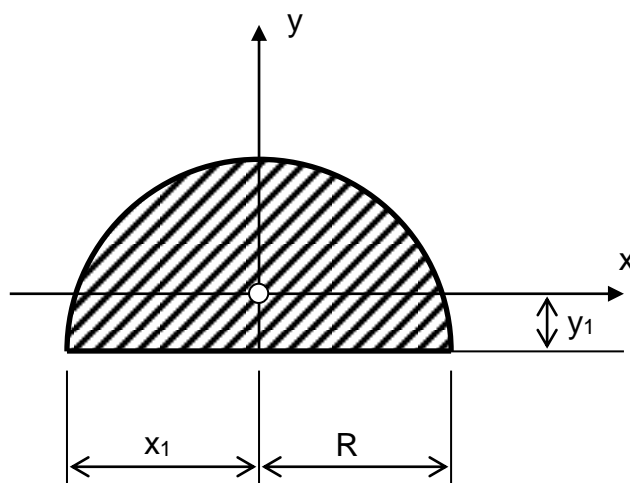


Figura 8.4. Esquema sòlid rígid d'un semicercle.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Un cop conegut el centre de gravetat d'un semicercle, lloc on es produeix la força centrífuga, es calcula la magnitud de la força que es produeix quan un cilindre gira a velocitat angular constant.

Se sap que la força centrífuga és:

$$F = m \cdot a_t \quad (\text{eq. 8.19})$$

Amb el comentat fins ara i, en el cas de $\omega = \text{constant}$, s'obté:

$$F = \frac{m}{2} \frac{v^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} \quad (\text{eq. 8.20})$$

on:

$$v = \left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right) \omega \quad (\text{eq. 8.21})$$

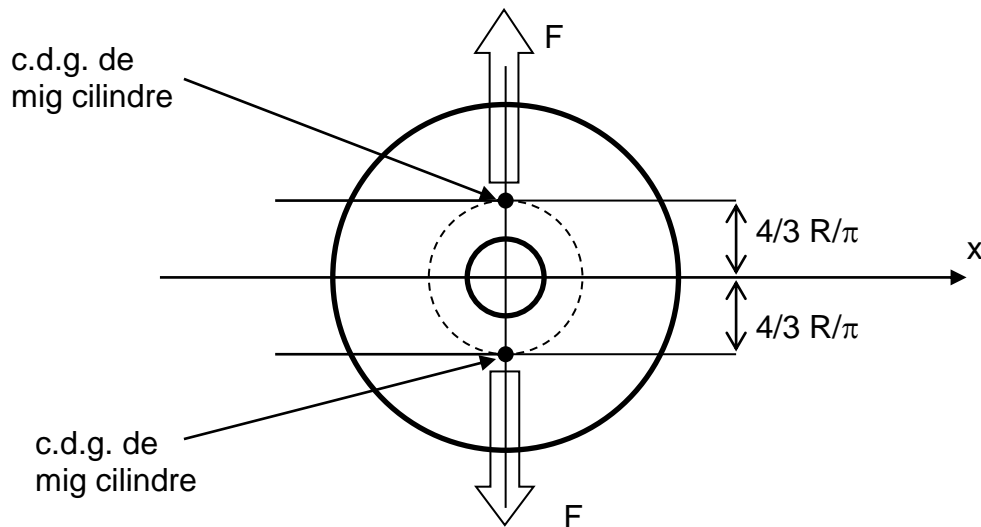


Figura 8.5. Esquema de forces

Aquest és l'esforç de tracció que fa un semicercle a la secció diametral. Per tant, l'esforç total de tracció a la secció diametral del volant d'inèrcia és dos vegades l'esforç d'un semicercle (segons la hipòtesis realitzada):

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

$$F = \frac{m}{2} \frac{v^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} + \frac{m}{2} \frac{v^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} \quad (\text{eq. 8.22})$$

Sumant les dues parts, s'obté:

$$F = m \frac{v^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} \quad (\text{eq. 8.23})$$

Cal tenir en compte que s'ha fet un forat en el centre del volant per acoblar-lo a la màquina elèctrica. Aquest forat, vist per resistència de materials, ha provocat una reducció de la secció i , per tant, l'esforç es reparteix en la secció que manca. Aquesta secció és idèntica en qualsevol posició del volant i , llavors no hi ha cap angle on es produeixi una tensió major. La secció diametral del volant és:

$$S = (D - d)b \quad (\text{eq. 8.24})$$

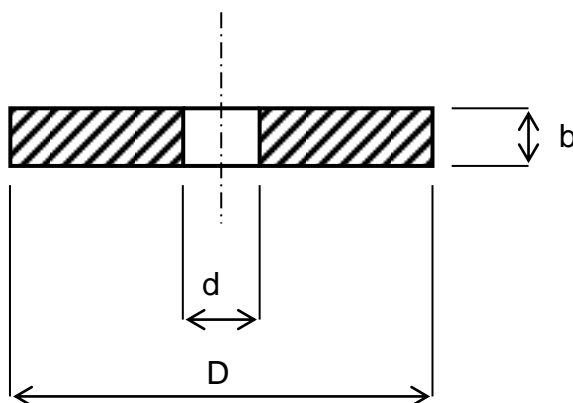


Figura 8.6. Secció general del volant d'inèrcia

Si es vol expressar la velocitat del volant d'inèrcia en revolucions per segons, empram la fórmula:

$$n(\text{r.p.m.}) = n \frac{2\pi}{60} (\text{rad} / \text{s}) \quad (\text{eq. 8.25})$$

Recollint l'equació 8.21 sobre la velocitat angular:

$$v = \left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right) \omega \quad (\text{eq. 8.21})$$

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

Aplicant la velocitat angular a la eq. 8.23, correspon a l'esforç que es produeix, s'obté:

$$F = m \frac{v^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} = m \frac{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)^2}{\left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right)} \omega^2 \quad (\text{eq. 8.26})$$

Reduint l'equació, s'observa que l'esforç és:

$$F = m \left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right) \omega^2 \quad (\text{eq. 8.27})$$

L'esforç F és la tracció que es produeix i, per tant:

$$F = N \quad (\text{eq. 8.28})$$

L'equació 8.8 indica:

$$n_1 = \frac{N}{S} \quad (\text{eq. 8.8})$$

Unint l'equació 8.8 amb les equacions 8.24, 8.27 i 8.28, s'aconsegueix que la tensió màxima admissible sigui funció de la velocitat angular (expressada en r.p.m.) del volant d'inèrcia:

$$n_1 = \frac{m \left(\frac{4}{3} \frac{R}{\pi}\right) \omega^2}{(D-d)b} \quad (\text{eq. 8.29})$$

Donat que l'acer emprat és el A37b i la seva densitat és 7850 kg/m³, llavors amb les mides del volant, es calcula el pes del volant. Substituint per els valors numèrics:

$$n_1 = \frac{32,80 \left(\frac{4}{3} \frac{0,165}{\pi}\right) \omega^2}{(0,33-0,05)0,05}$$

reduint l'equació, s'obté:

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

$$n_1 = 164,06601 \cdot \omega^2 \quad (\text{eq. 8.30})$$

Aquest tipus d'acer té un límit elàstic a la tracció de:

$$\sigma_e = 235.200.000 \frac{N}{m^2}$$

Aplicant l'equació 8.30 i coneixent la resistència a la tracció, es sap les revolucions màximes que pot suportar el volant d'inèrcia amb forma de cilindre amb acer com material.

$$\sigma_e = n_1 = 164,06601 \cdot \omega^2$$

Substituint:

$$235.200.000 \frac{N}{m^2} = 164,06601 \cdot \omega^2$$

Conclusió de tots els càlculs, la velocitat màxima és:

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{235200000 \frac{N}{m^2}}{164,06601} \right)} = 1.197 \text{ rad / s}$$

Amb aquesta hipòtesis es comprova que a una velocitat angular inferior a 1.197,32rad/s, la secció diametral del volant d'inèrcia suporta l'esforç de tracció que produeix el seu propi pes girant sobre el seu eix.

Amb l'equació 8.25, quan passes a revolucions per minut:

$$n = 11.433 \text{ r.p.m.}$$

Veiem que aquest és el límit de trencament de la peça d'acer amb la forma escollida i que no passarem de 3.000rpm, podem dir que el material es l'adient.

8.2.2. Dimensions del volant d'inèrcia

Un cop verificat que el límit de ruptura de volant està per damunt de la velocitat màxima de disseny, ja podem verificar les dimensions del volant. Ara anem a calcular els altres factors com el pes del volant:

$$M_{VOLANT} = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot H \cdot R^2 \quad (\text{eq. 8.31})$$

on ρ és la densitat de l'acer A37b, R és el radi del cilindre i H l'alçada del cilindre.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Com que coneixem la densitat de l'acer (7.850kg/m^3), el radi (165mm) i l'alçada (50mm), llavors:

$$\begin{aligned}M_{VOLANT} &= \rho \cdot \pi \cdot H \cdot R^2 = 7850\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \pi \cdot 0,05\text{m} \cdot (0,165\text{m})^2 \\ &= 33,5\text{kg}\end{aligned}$$

Ara calculem el moment d'inèrcia segons la formula del sòlid rígid:

$$J = \frac{1}{2} \cdot M_{VOLANT} \cdot R^2 \quad (\text{eq. 8.32})$$

Substituint els valors obtenim:

$$\begin{aligned}J &= \frac{1}{2} \cdot M_{VOLANT} \cdot R^2 = \frac{1}{2} \cdot 33,57047\text{kg} \cdot (0,165\text{m})^2 \\ &= 0,457\text{kgm}^2\end{aligned}$$

Per tant, l'energia emmagatzemable serà, segons la següent equació:

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot J_{VOLANTE} \cdot \omega^2 \quad (\text{eq. 8.33})$$

Si la velocitat nominal màxima de gir és $314,16\text{rad/s}$ (3.000rpm), llavors l'energia màxima emmagatzemable és:

$$\begin{aligned}E_{MAX} &= \frac{1}{2} \cdot J_{VOLANT} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,457\text{kgm}^2 \cdot (314,15\text{rad} / \text{s})^2 \\ &= 22.550\text{J}\end{aligned}$$

Observem que si augmenta la velocitat de gir a $523,6\text{rad/s}$ (5.000rpm), l'energia màxima augmenta fins a:

$$\begin{aligned}E_{MAX} &= \frac{1}{2} \cdot J_{VOLANT} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,457\text{kgm}^2 \cdot (523,6\text{rad} / \text{s})^2 \\ &= 62.641\text{J}\end{aligned}$$

8.3. Màquina elèctrica

El primer prototip d'acumulador es va construir amb màquines de corrent continu perquè el sistema de control de velocitat era més simple. Encara que això va facilitar l'estudi, limitava les prestacions, la duració i, a més, no permetia baixar la pressió al voltant del rotor per reduir la fricció aerodinàmica.

8.3.1. Motor/Generador

Per poder accelerar i desaccelerar el volant d'inèrcia, pensem amb una màquina elèctrica amb un parell alt degut al gran moment d'inèrcia del volant. Sabem que el parell és:

$$\Gamma = J \cdot \alpha \quad (\text{eq. 8.34})$$

on Γ és el parell, J és el moment d'inèrcia i α és l'acceleració angular.

Segons la cinemàtica:

$$\omega_f = \omega_0 + t \cdot \alpha \quad (\text{eq. 8.35})$$

on ω_f és la velocitat angular final, ω_0 és la velocitat angular inicial, t és el temps que triga en canviar de velocitat i α és l'acceleració angular.

A partir de la cinemàtica, l'acceleració angular és:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \quad (\text{eq. 8.36})$$

D'aquesta manera s'obté l'acceleració necessària per girar el volant d'inèrcia de zero revolucions a la velocitat nominal màxima de 314rad/s (3.000r.p.m.). Fem la hipòtesis que el temps d'acceleració és de 5 segons. Substituint, s'obté:

$$\alpha = \frac{(314\text{rad} / \text{s} - 0)}{5\text{s}} = 62,8\text{rad} / \text{s}^2$$

Un cop sabut l'acceleració angular i que el moment total és la suma dels moments de la màquina elèctrica i el volant d'inèrcia, ara podem aplicar-ho a l'eq. 8.34. Si fem això, s'aconsegueix el següent:

$$\Gamma = J \cdot \alpha = (J_{\text{volante}} + J_{\text{maq.}}) \cdot \alpha \quad (\text{eq. 8.37})$$

De moment, l'únic valor conegut és el moment d'inèrcia del volant; per tant, el parell necessari per accelerar el volant d'inèrcia, de 0 a 3.000 rpm en 5 segons, és:

$$\Gamma = (0,457\text{kg} / \text{m}^2) \cdot 62,8\text{rad} / \text{s}^2 = 28,7\text{Nm}$$

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Donat que el rendiment de l'ACEE depèn de la màquina elèctrica, les exigències demanades a la màquina elèctrica son:

- Velocitat angular: 3.000rpm (límit màxim = 5.000rpm)
- Parell arrencada superior al parell mig 28,71Nm

Només amb una màquina elèctrica amb parell alt, aconseguirà una major acceleració angular. I si el parell és gran, més alta serà l'acceleració del volant d'inèrcia i més petit serà el temps de transició per arribar a la velocitat nominal.

Les màquines elèctriques que tenen major parell específic son les de flux axial amb rotor de disc. Aquestes màquines tenen un major parell que els motors elèctrics d'inducció de gàbia d'esquirol amb el mateix corrent.

Dins de les diferents màquines elèctriques de flux axial, el fabricant MAVILOR té un producte, una màquina servo motor de corrent continu que proporciona les característiques exigides. El servomotor de la sèrie MSS pot arribar a les 6.000r.p.m. i, a més, té un parell d'arrencada molt superior al seu parell nominal.

Per exemple, si escollim inicialment el servo-motor MSS-35 (com a punt d'inici), les característiques tècniques d'aquesta màquina elèctrica son les següents:

MAVILOR MSS-35	
Velocitat nominal (rpm)	3.000
Tensió nominal (V) $\pm 5\%$	200
Corrent nominal (A)	19,5
Potència sortida nominal (W)	3.525
Eficiència	90
Parell nominal (Nm)	11,23
Parell màxim (Nm)	67,38
Velocitat màxima (r.p.m.)	4.000
Constant de força electromotriu (V/1000 r.p.m.)	62,53
Constant de parell (Nm/A)	0,597
Parell resistent (Nm)	0,11
Inèrcia ($\text{kg m}^2 \cdot 10^{-3}$)	8,5
Constant d'esmoreïment (Nm/1000 r.p.m.)	0,1
Resistència terminal (ohm)	0,51
Inductància de l'armadura (L)	<300
Potència transitòria (kW/s)	534
Constant de temps mecànic (ms)	11,6
Pes (kg)	22
Dimensions generals (mm)	500x500x10

Taula 8.1. Característiques tècniques motor Mavilor MSS-35

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

De la Taula 8.1, s'observa que el parell màxim de la màquina és superior al parell necessari per accelerar el volant (de 0 a 3.000 rpm en 5 segons).

$$\Gamma = 28,71277Nm < \Gamma_{motor} = 67,38Nm$$

També comprovem que el parell màxim és aproximadament 6 vegades el parell nominal, és un parell molt important i que pot ser molt adient per a transitoris, és a dir, acceleració i desacceleració del volant en el processos de càrrega i descàrrega:

$$\frac{\Gamma_{max}}{\Gamma_{nom}} = \frac{67,38Nm}{11,23Nm} \cong 6$$

Per un altre costat, si comparem el moment d'inèrcia de la màquina elèctrica MSS-35 amb la del volant d'inèrcia, veiem que hi ha una diferència considerable. El moment d'inèrcia de la màquina elèctrica és més petit que el moment d'inèrcia del volant:

$$J_{VOLANT} = 0,457kgm^2$$

$$J_{MOTOR} = 0,0085kgm^2$$

La relació d'ambdues inèrcies és aproximadament 54 vegades més gran el volant d'inèrcia del volant que el de la màquina.

$$\frac{J_{VOLANT}}{J_{MOTOR}} = \frac{0,457kgm^2}{0,0085kgm^2} = 53,7$$

El moment d'inèrcia del conjunt és la suma dels moments d'inèrcia de la màquina elèctrica i del volant perquè l'acoblament entre ambdós és solidari en el mateix eix de rotació. A efectes pràctics, no tenim en compte el moment d'inèrcia de l'eix d'acoblament entre les dues peces.

$$\begin{aligned} J_{ACEE} &= J_{VOLANT} + J_{MOTOR} + J_{EIX} \approx 0,457kgm^2 + 0,0085kgm^2 \\ &= 0,465kgm^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Influencia(\%) &= \frac{J_{MOTOR}}{J_{CONJUNT}} 100\% = \frac{0,0085kgm^2}{0,457kgm^2 + 0,0085kgm^2} 100\% \\ &= 1,82\% \end{aligned}$$

També observem que la influència del moment d'inèrcia de la màquina elèctrica sobre el conjunt és molt petita, aproximadament un 1,82%.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquest tipus de motor de flux axial és de corrent continu i necessita d'un convertidor estàtic electrònic per funcionar. El propi convertidor té un control electrònic amb realimentació de velocitat per ajustar i regular els pendents de corrent i en temps.

8.3.2. Càlculs corrent màxim

Aquest motor/generador té una limitació degut als imants que utilitza. Si el corrent de càrrega o descàrrega supera el corrent màxim admissible, es poden desmagnetitzar els imants i el motor MSS-35 s'haurà espatllat. Aquesta averia no és recuperable, és com una autodestrucció del motor.

Per esbrinar aquest corrent màxim de desmagnetització del motor MSS-35, anem a fer els següents càlculs.

Si el parell màxim del motor MSS-35 és 67,38Nm i la seva constant de parell és 0,597Nm/A ($\pm 5\%$), llavors el corrent màxim o de perill desmagnetitzant és:

$$67,38\text{Nm} / 0,597\text{A/Nm} = 112,86\text{A}.$$

Anem a fer els càlculs de la tensió màxima del motor MSS35. Si la velocitat màxima del motor és 4.000rpm i la seva constant de Força Electro Motriu (fem) és 62,53V per 1.000rpm ($\pm 5\%$), llavors la tensió màxima és:

$$62,53\text{V/rpm} \times 4000\text{rpm} = 250,12\text{V}.$$

Per tant, nosaltres hem de vigilar de no superar mai el corrent màxim de 112,86A i la tensió màxima de 250V en les proves de càrregues i descàrregues.

8.4. Rodaments

Donat que els rodaments de la màquina elèctrica no estan preparats per suportar les sol·licitacions de l'acumulador (més grans degut a l'acoblament directe amb el volant d'inèrcia) es decideix afegir un rodament suplementari.

Aquest nou rodament només aguantarà el pes del volant i no limitarà els altres graus de llibertat del conjunt.

Es decideix per un rodament d'una única filera de corrons cònics per la seva capacitat de resistir càrregues combinades, és a dir, és un rodament que pot suportar tant càrregues radials (degut a desalineaments) com càrregues axials (càrregues en sentit vertical) a la mateixa vegada. Aquest rodament té una gran rigidesa i pot suportar desalineaments.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A més, aquest tipus de rodament es desmuntable. Això ens permet muntar i desmuntar el volant d'inèrcia del contenidor a partir del rodament.

Encara que el fregament d'aquest tipus de rodament és superior al model de rodament de bales (per la superfície de contacte, la bala només ho fa en un punt mentre que el corró ho fa en una línia). A part d'això, les altres característiques d'aquest rodament cònic son tot avantatges.

El fabricant de rodaments indica varis mètodes de càlcul per escollir el model adequat. Un dels mètodes fa referència al tipus d'ús del rodament (continu-discontinu, càrregues oscil·lants, etc...) per determinar la capacitat estàtica i el factor de seguretat "s₀".

Una de les característiques de l'ACEE és el seu funcionament discontinu (és un acumulador prototip i inicialment girarà baixes voltes). Així aplicarem el mètode de càlcul segons l'ús del rodament.

Aquest càlcul es basa en la deformació permanent degut als punts de contacte entre els elements rotats i els camins de gir. El factor de seguretat representa la relació entre la capacitat estàtica nominal C₀ i la càrrega estàtica equivalent P₀.

Les dades d'inici per el càlcul son: el pes de l'acumulador i les revolucions màximes del volant d'inèrcia.

Les càrregues que tenen component radial i axial han de ser convertides en una càrrega estàtica equivalent. Aquesta es defineix com la càrrega que si s'aplica, produiria la mateixa deformació permanent en el rodament que les càrregues reals. Aquesta càrrega s'obté per mitjà de l'equació general:

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad (\text{eq. 8.38})$$

on P₀ és la càrrega estàtica equivalent; F_r la càrrega radial real, F_a la càrrega axial real, X₀ el factor de càrrega radial i Y₀ el factor de càrrega axial del rodament.

En el cas concret d'un rodament d'una filera de corrons cònics, la fórmula es:

$$P_0 = 0,5 F_r + Y_0 F_a \quad (\text{eq. 8.39})$$

Per calcular P₀, s'empra la màxima càrrega que està sotmès el rodament i introduir les seves components radial i axial a l'equació 8.39.

Cada rodament té una capacitat de càrrega estàtica. La capacitat de càrrega estàtica necessària C₀ es determina per mitjà de l'equació:

$$C_0 = s_0 P_0 \quad (\text{eq. 8.40})$$

on C₀ és la capacitat de càrrega estàtica i s₀ és el factor de seguretat estàtic.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquest tipus de rodament necessita una pre-càrrega pel seu correcte funcionament. Amb la velocitat de gir de disseny, les forces d'inèrcia dels corrons i la gàbia, i també el fregament amb el greix, poden tenir un efecte negatiu amb les condicions de rodadora del rodament i donar peu a que es produeixi un lliscament entre els corrons i els camins de rodadora. El lliscament entre els corrons i la pista és un efecte no desitjat. Per tot això s'aplica una pre-càrrega.

La pre-càrrega axial s'aconsegueix per mitjà d'una càrrega o una pressió constant sobre el rodament. Aquesta pre-càrrega l'obtindrem gràcies a una planxa que tancarà el recipient per la part superior i farà la pressió necessària sobre el rodament de corrons cònics.

8.4.1. Velocitat del rodament

La velocitat d'un rodament està limitada per la temperatura màxima de treball. Els rodaments de baix fregament generen molt poca escalfor en el propi rodament. Per tant, els rodaments amb un fregament menor com el de boles son millors que els rodaments de corrons. Al nostre cas, encara que tenim un fregament superior, les característiques de ser desmuntable i robust guanya front a la fricció. El prototip tampoc assolirà una velocitat alta i, per tant, el fregament no serà elevat com per obligar-nos a buscar un altre tipus de rodament.

La velocitat nominal d'un rodament és la velocitat a la que, sota una càrrega corresponent a una vida L_{10h} (vida nominal, en hores de servei) de 150.000 hores, s'arriba a un equilibri entre l'escalfor dissipat per l'eix i l'allotjament. Això s'anomena temperatura de funcionament que normalment està per damunt de la temperatura ambient. En aquest cas, l'escalfor no serà alta perquè el volant d'inèrcia provocarà un efecte "ventilador" sobre el rodament. Per tant, l'escalfor no és un problema.

S'entén que el límit de velocitat és la velocitat nominal del rodament. Els valors del factor de reducció f per les velocitats nominals poden ser trobats en el diagrama del manual de fabricant, indicats en funció del diàmetre mitja del rodament d_m . La càrrega està expressada indirectament en termes de duració nominal en hores de funcionament que és el paràmetre que s'empra en el diagrama. En aquells cassos en que la temperatura pot mantenir-se sense canvis, la velocitat màxima permesa pot calcular-ne per la formula:

$$n_{perm} = f n_r \quad (\text{eq. 8.41})$$

on n_{perm} és la velocitat màxima de gir permesa del rodament,
 f és el factor de reducció i n_r és la velocitat nominal.

Qualsevol augment de velocitat per damunt de la velocitat nominal generalment suposa una diferència de temperatura entre la pista interior i l'exterior superior

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

al normal però com dèiem abans, no és un problema per l'efecte ventilador del volant d'inèrcia.

8.4.2. Pèrdues del rodament

Inclús del comentat, anem a calcular les pèrdues del rodament. El fregament és el factor determinant respecte a la generació de calor i, per tant, de la temperatura de funcionament. El fregament depèn de la càrrega i d'altres factors com son el tipus i el grandària del rodament i també la velocitat de rotació. Sota certes condicions, es possible calcular la resistència de fregament emprant un cert coeficient de fregament a l'equació:

$$M = 0,5 \mu F d \quad (\text{eq. 8.42})$$

on M és el parell de fregament, μ és el coeficient de fregament del rodament, F és la càrrega aplicada sobre el rodament i d és el diàmetre del forat del rodament.

Aquest fregament provoca una pèrdua de potència que es pot calcular per l'equació següent:

$$N_R = 1,05 * 10^{-4} M n \quad (\text{eq. 8.44})$$

on N_R és la pèrdua de potència, M és el parell de fregament total del rodament i n és la velocitat de funcionament.

8.4.3. Resultat

Els càlculs i les hipòtesis fetes ens donen com a resultat el següent model de rodament:

SKF32006 XQ

Aquest model de rodament és comercial i es pot trobar a qualsevol establiment especialitzat.

Un cop calculats i coneguts les dimensions i models de tots els components de l'ACEE, anem a fer l'ensamblatge de tots ells, és a dir, anem a muntar el 2on ACEE.

8.5. Construcció del ACEE RG2

8.5.1. Introducció

Primer comencem pel volant d'inèrcia. Aquest es mecanitza en un torn a partir d'una peça més gran fins aconseguir les dimensions calculades.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Respecte el recipient, s'aprofita la carcassa del disc dur del primer ordinador de l'escola ETSEIB anomenat VAX. Aquest recipient és d'alumini i té unes parets gruixudes. Aquestes dues característiques fan que sigui una protecció adequada pel nostre prototip perquè l'alumini és un material lleuger, resistent i deformable.

8.5.2. Pre prova

Abans de fer el muntatge complet i acoblar definitivament el motor amb el volant d'inèrcia, realitzarem una petita prova per determinar si el motor escollit és correcte. Farem una primera descàrrega sobre el motor D1 amb l'energia emmagatzemada dins del motor MSS-35.

Aprofitem aquesta pre-prova per saber el corrent que entrega el motor MSS35. A més, verificarem la connexió entre el control i el taco-generador. En una connexió prèvia, es va fer una connexió errònia i es va bloquejar el control del motor. Això va provocar encesa de l'indicador de "taco/i²t". Un cop corregida la connexió, el control i el motor van funcionar correctament.

Abans de començar, hem d'ajustar el OFFSET del convertidor-control per obtenir amb una tensió de consigna de 0V amb la velocitat de 0rpm.

En la primera descàrrega a 800rpm, observem un corrent de 40A i el motor D1 va girar una volta. En la segona descàrrega a 1.500rpm, observem un corrent de 60A i el motor D1 va girar quatre voltes. En la tercera descàrrega a 3.000rpm, vàrem observar un pic de corrent de 118A i el motor D1 va girar més de 10 voltes.

Com veiem, a 3.000rpm, el corrent va pujar fins a 118A, una corrent superior al corrent màxim de desmagnetització dels imants del motor (112A). Amb aquesta velocitat de rotació (3.000rpm), l'energia cinètica de rotació del motor MSS-35 és de 419,5J.

8.5.3. Muntatge del volant i el motor

El disseny de muntar l'acumulador amb l'eix de rotació vertical, redueix la complexitat del conjunt. El volant d'inèrcia queda a la part inferior del contenidor mentre que el motor queda a la part superior del conjunt.

I, com dèiem abans, s'afegeix una planxa entre la màquina elèctrica i el volant d'inèrcia. D'aquesta manera s'aconsegueixen 3 objectius:

- Aïllar el volant d'inèrcia de la màquina elèctrica, augmentant la seguretat de les persones i la integritat de l'equip,
- Realitzar la pre-càrrega sobre el rodament del volant i
- Esmortir el sistema reduint les vibracions degut a les acceleracions fortes.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per posar el rodament i regular l'alçada del volant d'inèrcia, és mecanitza un peça "eix-columna". La columna exterior té una rosca que ens permet ajustar l'alçada. D'aquesta manera podem alinear la part superior amb el recipient i ajustar la pre-càrrega del rodament.

El motor queda a fora de tot el muntatge del volant d'inèrcia. La unió del motor i del volant és fa per un ajust mecànic. Però tot i així, es mecanitza un forat a l'eix del motor per posar la xaveta. D'aquesta evitarem el possible lliscament entre els dos eixos.

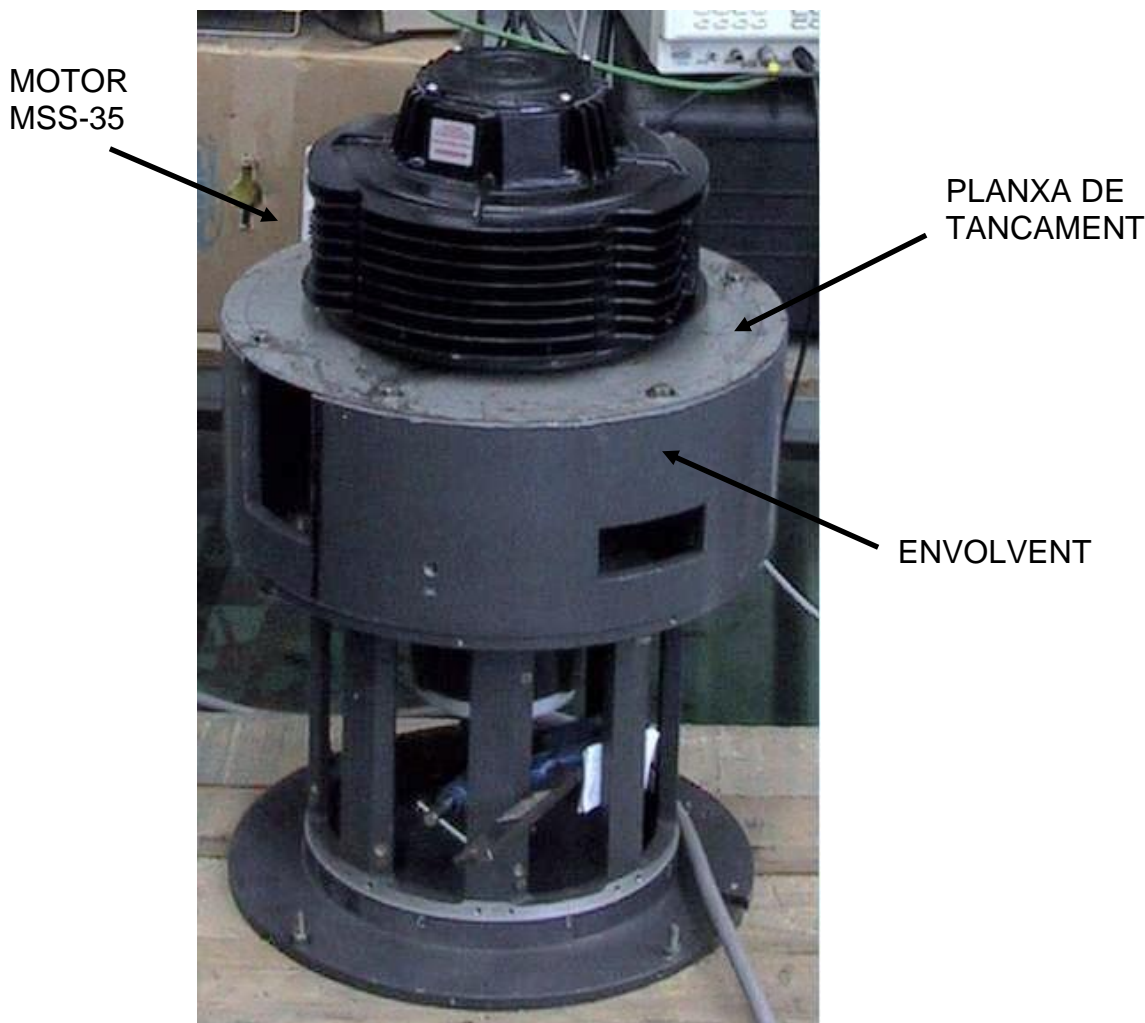


Figura 8.7. Vista general del ACEE RG2

Altre detall que s'ha tingut en compte és la rosca de la columna-eix i base de rodament cònic de corrons. Si la pre-càrrega o l'escalfament provoca un possible bloqueig del rodament, el sentit de gir del volant provoca que s'afluixi la columna-eix que fa de suport i, d'aquesta manera el rodament baixarà alleugerent la pressió sobre el rodament. Aquesta és una mesura addicional de seguretat en el disseny inicial per evitar situacions de saturació del volant d'inèrcia de l'ACEE.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la Figura 8.8. es pot veure un esquema elèctric simplificat del muntatge.

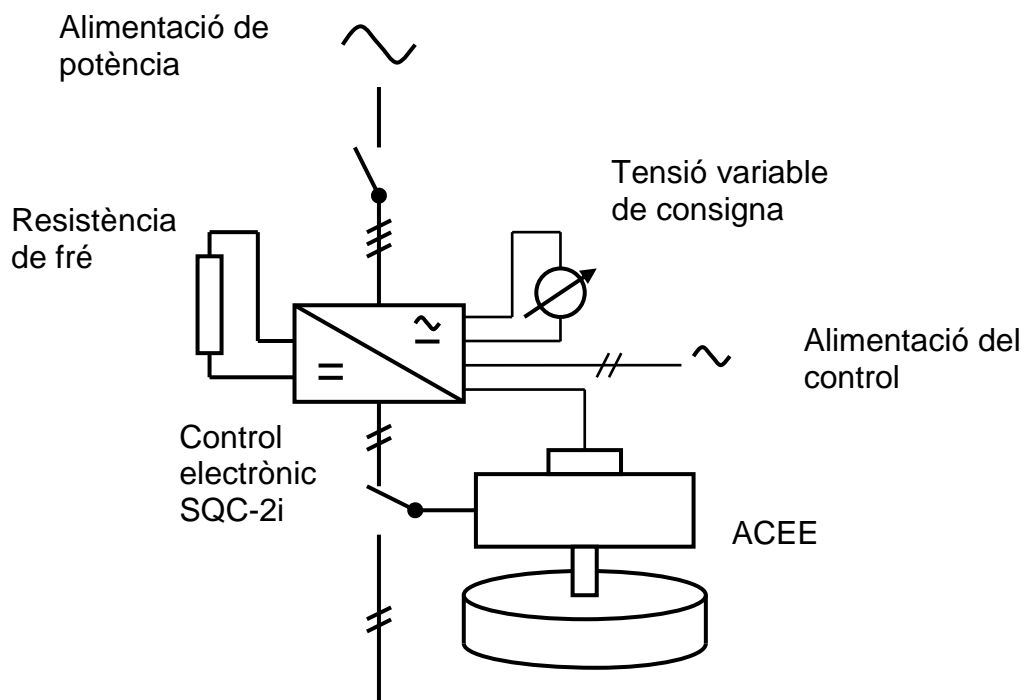


Figura 8.8. Esquema simplificat del muntatge

A la Figura 8.9 es pot veure el muntatge complet i definitiu. Es pot veure el prototip d'ACEE RG2, el panell de control, el control electrònic de MSS-35, les resistències de frè, l'ACEE i la instrumentació necessària pel mesurar les variables elèctriques a les proves de càrrega i descàrrega.

8.5.4. Quadre de control

En un suport vertical es munten els diferents elements necessaris pel control, protecció i instrumentació de l'acumulador. Els elements més destacables són:

- una electrònica de control del motor Infranor SQC-2i,
- una resistència de frè 15Ω 300W,
- un seccionador per separar l'ACEE de l'electrònica,
- un contactor per fer descàrrega,
- un magneto tèrmic de la part de potència,
- un magneto tèrmic de la part de maniobra,
- un polsador de descàrrega,
- una regleta de connexions i
- dues sondes d'instrumentació.

El panell de control encara té espai per més elements (en cas d'ampliació o de canvis).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

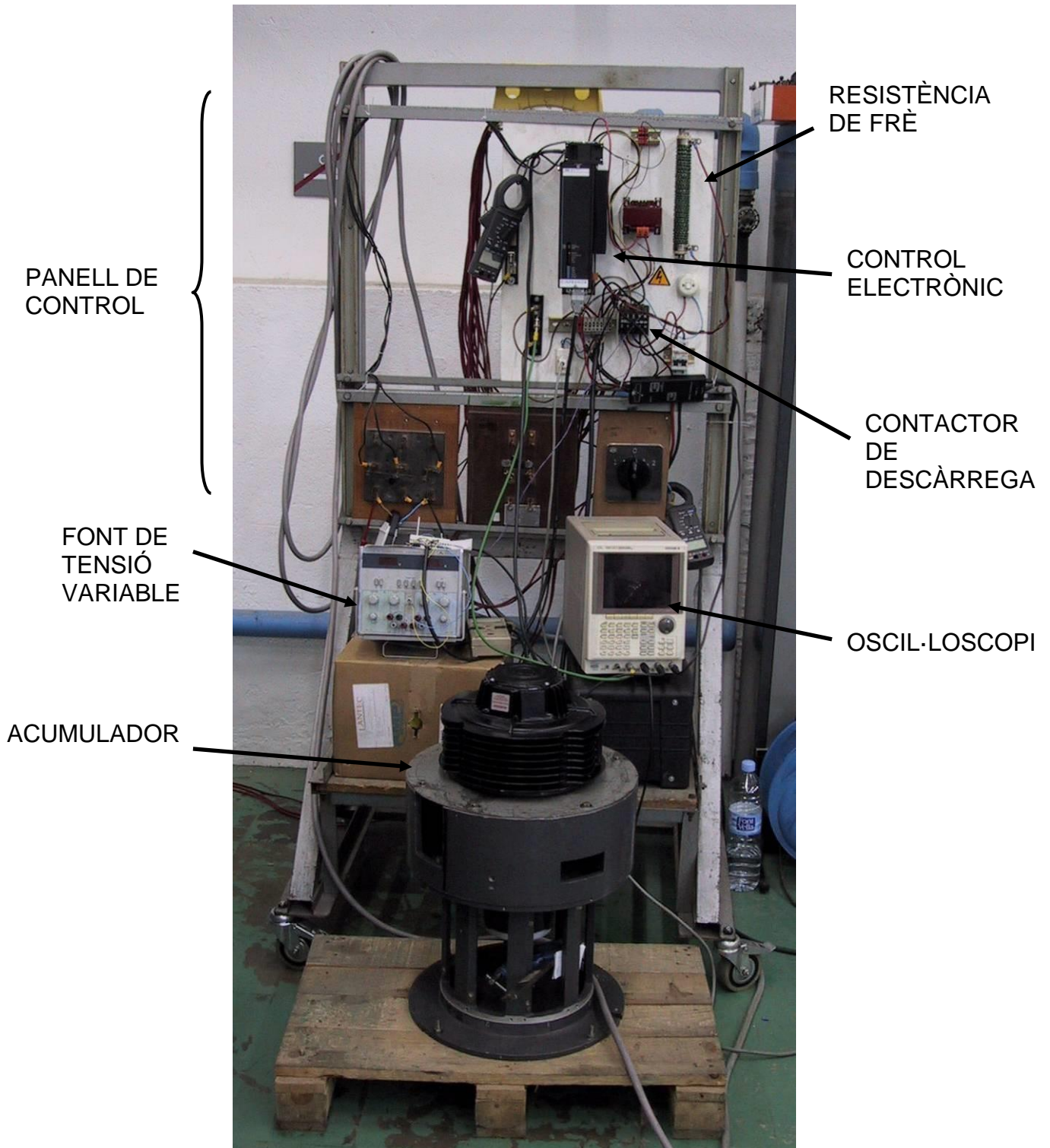


Figura 8.9. Vista general del conjunt.

8.5.5. Característiques tècniques

De les dades i càlculs inicials del conjunt, deduïm la següent placa de característiques:

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- **Tensió d'alimentació ACEE RG2:**
 - Alimentació potència: **170Vca** (trifàsic 50Hz sense neutre)
 - Alimentació auxiliar: **230Vca** (monofàsic 50Hz)

- **Dimensions:**
 - Motor: Diàmetre 350mm, Alçada 193mm, Eix 28mm
 - Xaveta: A8x7x32
 - Subjecció: 4 cargols M12x20
 - Volant: Cilindre massís d'acer Diàmetre 330mm, Alçada 60mm
 - Suport: Alumini Diàmetre 420mm, Alçada 150mm
 - Bancada: Alumini Diàmetre 400mm, Alçada 300mm

- **Pes:**
 - Volant: 40kg.
 - Motor: 22kg.
 - Suport + Bancada: 15kg. (aprox.)
 - Pes total ACEE: **77kg.** (aprox.)

- **Moment d'inèrcia:**
 - Motor (eix de rotació): $8,5 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2$
 - Volant (eix de rotació): $0,4583 \text{kgm}^2$

- **Rodament d'una filera de rodets cònics: SKF 32006 XQ**

- **Motor MSS-35:**
 - Parell màxim: 67,38Nm.
 - Constant de parell ($\pm 5\%$): 0,597Nm/A.
 - Velocitat màxima: 4.000rpm.
 - Constant força electromotriu ($\pm 5\%$): 62,53 per 1000rpm.

A la mateixa placa de característiques afegim una dada important de funcionament: Limitació del corrent de descàrrega:

- **Corrent màxim (o desmagnetitzant) motor MSS-35: 112,86Acc.**

Aquesta "placa de característiques" conté la informació necessària per futures consultes, aplicacions o modificacions.

8.6. Proves

Un cop acoblat el motor i el volant d'inèrcia, la primera prova consisteix en bellugar l'ACEE. Realment la prova no té altre misteri que comprovar que el conjunt funciona bé, que gira sense problemes i que no fa sorolls "estrany". I de passada, comprovem si el rodament afegit compleix la seva tasca.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquesta primera prova també ens serveix per familiaritzar-nos amb els controls tant del convertidor electrònic com de l'aparellatge afegit per nosaltres.

8.6.1. Primera posada en marxa

Abans de fer les proves damunt del cotxe elèctric, decidim fer proves al banc d'assaig de motors elèctrics del Laboratori d'Electrotècnia. La primera prova consisteix en descarregar l'energia de l'ACEE damunt del motor D1 que està acoblat al banc d'assaig. Recordem que el motor D1 és el motor idèntic al motor D2 que hi ha al cotxe elèctric. A més, aquesta prova servirà per verificar si l'ACEE funciona segons el nostre disseny i sense problemes o desviacions.

El banc de d'assaig té una màquina elèctrica amb l'estator fixat a un dinamòmetre. Gràcies al dinamòmetre podrem saber el parell de descàrrega de l'acumulador cap el motor D1.

Aquest banc d'assaig té dues posicions: rotor lliure o rotor fix. Quan el banc està a la posició "rotor lliure", podrem fer diverses descarregues a diferents velocitats de l'ACEE, a diferents nivells d'energia. Però quan el banc està en posició "rotor fix", el rotor de la màquina està fixat a l'estator, és a dir, no hi ha rotació de l'eix. Per tant, el rotor del motor D1 no es podrà moure i podrem conèixer el parell d'arrencada que farà el motor D1 alimentat per l'energia de l'acumulador.

8.6.1.1. Proves amb el "rotor lliure" (velocitat en buit):

Amb el banc d'assaig en "rotor lliure", s'han realitzat diferents descarregues esglaonades des de 356rpm fins a 1.244rpm. Amb aquestes primeres proves, em obtingut el parell resistent del conjunt. El parell resistent del motor D1 més el parell resistent del motor de fre és de 0,882Nm.

8.6.1.2. Proves amb el "rotor fix" (parell d'arrencada):

Amb el banc d'assaig en "rotor fix", farem proves en 'curtcircuit' a diferents nivells d'energia. Amb el rotor del motor D1 bloquejat, no hi ha velocitat de rotació i, per tant, no hi ha força contraelectromotriu. Al no haver força contraelectromotriu, el corrent de descàrrega augmenta molt donat que la força contraelectromotriu actua com a reductor del corrent en el motor D1.

A una velocitat de rotació de 943rpm (tensió de consigna de 3V) tenim una l'energia acumulada que es transforma en un parell de descàrrega de 9,2kg en la bascula del banc d'assaig. Transformant aquesta força a parell, obtenim: $9,2\text{kg} \times 0,3\text{m} \times 9,8\text{N/kg} = 27,1\text{Nm}$. El corrent de descàrrega ha estat de 65A.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A una velocitat de rotació de 1.255rpm, el parell de descàrrega és de 36,75Nm i el corrent de descàrrega és de 85A. I, a una velocitat de rotació de 1.532rpm, el parell de descàrrega és de 44,1Nm i el corrent de descàrrega és de 103A.

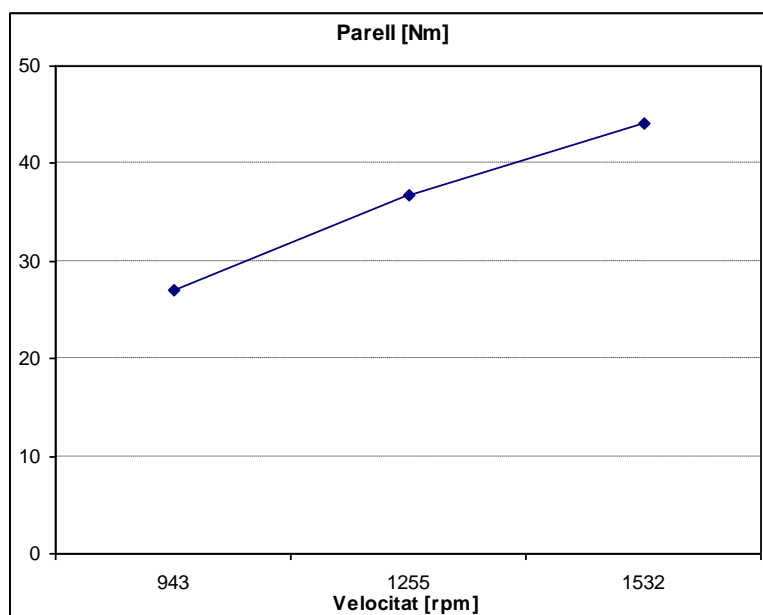


Figura 8.10. Parell de descàrrega sobre D1 amb rotor bloquejat.

Com que el corrent de descàrrega amb el rotor del motor D1 bloquejat va pujar perillosament amb la última prova (a 1.532rpm), es va decidir limitar la velocitat de l'ACEE a 1.500rpm.

La protecció de velocitat màxima consisteix en variar la tensió de consigna del control electrònic del motor MSS-35. A l'inici de la prova teníem una velocitat màxima de 3.000rpm (del MSS-35), ara i després d'aquesta primera prova, fixem la velocitat màxima a 1.500rpm. Per aconseguir-ho, ajustem la tensió de consigna a 10V per obtenir la velocitat a 1.500rpm. Així limitem el corrent màxim de descàrrega sobre el motor D1 que és molt proper al corrent de desmagnetització del MSS-35.

Amb aquesta velocitat màxima fixada, la prova de descàrrega sobre el motor D1 amb el rotor bloquejat serà més segura que abans, ja que el corrent màxim de l'ACEE estarà limitat per la velocitat màxima de 1.500rpm.

Amb aquest ajust-protecció a la tensió de consigna, la regulació de l'electrònica de control de l'ACEE serà més fàcil de fer. Un cop modificat el límit de la velocitat màxima, repetim les proves de descàrrega sobre el motor D1 i el motor de fre amb el rotor bloquejat. Els resultats d'aquesta prova es poden veure en la Figura 8.10.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

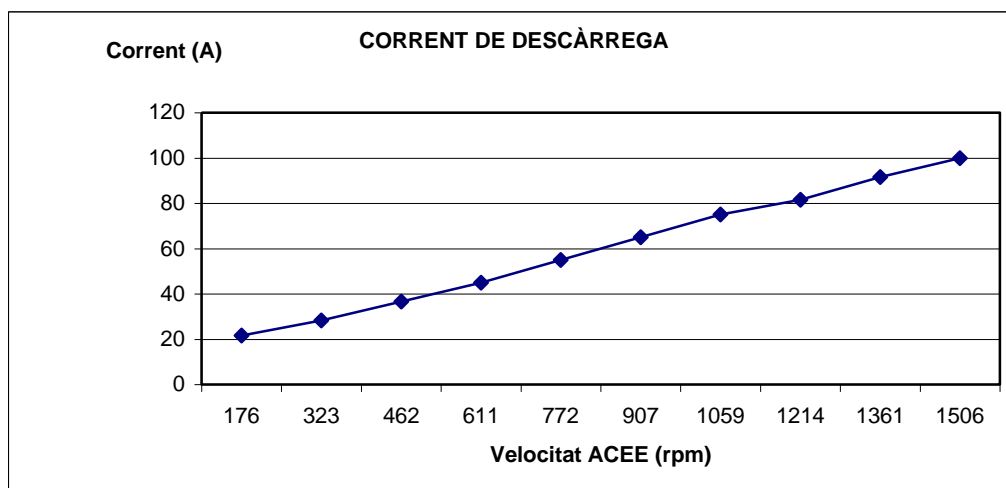


Figura 8.11. Corrent de descàrrega sobre D1 amb rotor bloquejat.

8.6.2. Pèrdues

El disseny de l'acumulador sempre ha estat obtenir el màxim rendiment dins de les possibilitats i mitjans de que es disposen. És a dir, s'empren rodament comercials (per sustentar el volant d'inèrcia) i sabem que tenen unes pèrdues d'energia per fregament superiors a altres tipus de rodaments. Donat que aquest treball es centra en l'estudi dels transitoris en els moments de càrrega i descàrrega, acceptem les pèrdues dels rodaments.

Si les càrregues i descàrregues són de curta durada, les pèrdues dels rodaments es podem depreciar ja que les pèrdues dels rodaments comencen a ser no depreciables en proves de llarga durada (processos de descàrrega de més de 20 minuts, per exemple).

Com que treball consisteix en l'anàlisi de la problemàtica de la càrrega/descàrrega, no busquem millores o modificacions per reduir les friccions. Sabem que aquestes pèrdues per fricció es poden reduir amb superconductors o fent el buit en el volant d'inèrcia. Aquestes millores es deixen per a treballs posteriors.

Aquesta tipus de prova serveix per conèixer el rendiment de la màquina motor/generador de l'ACEE. Per continuar endavant acceptem uns rendiments raonables (tant com a motor que com a generador). Si no fos així, s'hauria de pensar en canviar la màquina elèctrica.

La prova consisteix en mesurar el temps que triga l'acumulador en aturar-se del tot partir d'una velocitat coneguda. Des d'una velocitat de 1.522rpm i sense cap càrrega connectada, l'ACEE triga en aturar-se uns 284 segons (quasi 5 minuts). Això són uns 20,87W en pèrdues.

Donada la coincidència en el temps amb altres tesis (d'altres doctorands) sobre motors superconductors dirigides per Sr. Dr. Ricard Bosch, aquest muntatge té

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

espai per a construir un coixinet axial superconductor, que els resultats experimentats de l'ACEE, han aconsellat deixar fora de l'abast d'aquest treball.

8.6.3. Càrrega de l'ACEE des de la xarxa

Aquesta prova consisteix en carregar l'ACEE des d'una font d'alimentació exterior o xarxa. És una prova senzilla però que també ens servirà per comprovar el sistema de mesura (sondes de corrent, sondes de tensió, oscil·loscopi, etc..) així com les connexions.

Es decideix carregar l'ACEE a dos nivells de tensions de consigna a 10V i a 5V. Cada tensió de consigna indica una velocitat de rotació teòrica del volant d'inèrcia, és a dir, per una tensió de consigna de 10V, la velocitat és de 1.500rpm, mentre que per una tensió de 5V, la velocitat és de 750rpm.

Amb aquestes dues velocitats de rotació, mesurarem el corrent consumit pel motor MSS-35 per carregar el volant d'inèrcia.

La primera prova, amb velocitat final de 1.500rpm, el corrent consumit per carregar el volant d'inèrcia és de 11,6A. L'ACEE triga uns 11,4 segons en aconseguir la velocitat marcada.

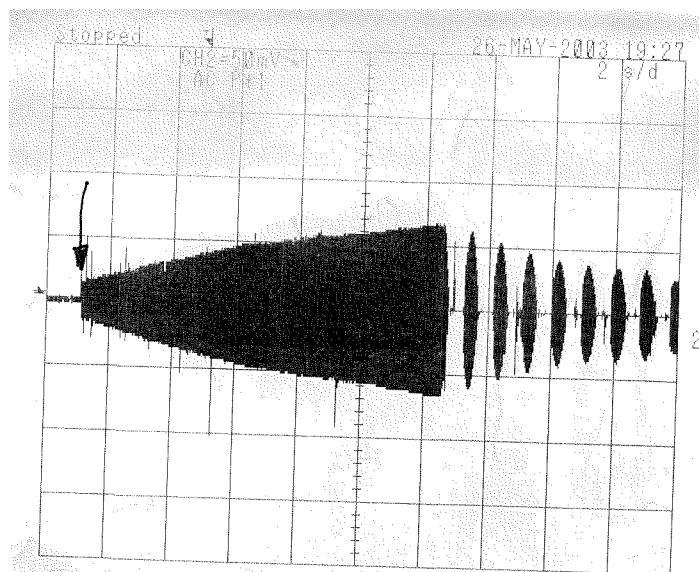


Figura 8.12. Corrent de càrrega de l'ACEE amb tensió de consigna de 10V.

Com es pot veure en la Figura 8.12., el corrent consumit per l'ACEE té dues parts ben diferenciades. La primera part pertany a l'acceleració del volant d'inèrcia i la segona part és la zona de manteniment de la velocitat.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

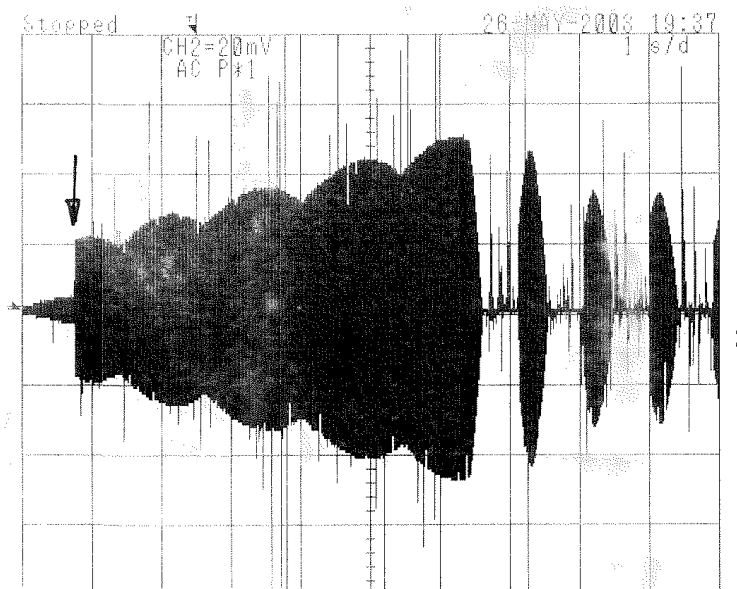
A la primer part, el corrent és continu i augmenta amb un límit asimptòtic fins que s'arriba a la velocitat de consigna. Cal indicar que el control electrònic limita el corrent del motor per evitar la desmagnetització dels imants.

A la segona part i un cop aconseguida la velocitat de consigna (1.500rpm), apareixen uns consums de corrent puntuals (no continus). Això es deu a les pèrdues de l'ACEE. És a dir, el control del motor veu que el volant d'inèrcia ha arribat a la velocitat de consigna (1.500rpm). Deixa de empènyer el volant i aquest comença a reduir la seva velocitat degut a les pèrdues. Quan la velocitat és inferior a la de la consigna, el control torna a subministrar corrent al motor per accelerar el volant i arribar a la velocitat de consigna.

Com veiem, aquest procés es repeteix de forma periòdica. També observem que els pics de corrent van disminuint en valor màxim. Això es així perquè a mida que l'amplada del consum de corrent augmenta en temps. Els pics de corrent tenen un límit asimptòtic decreixent (com un moviment oscil·latori asimptòtic decreixent).

La segona prova de càrrega de l'ACEE és a velocitat final de 750rpm. Aquí veiem que el corrent consumit per carregar el volant d'inèrcia és de 8,3A. I l'ACEE triga uns 5,8 segons en aconseguir la velocitat. Veure Figura 8.13.

A grans trets, la Figura 8.13 té dues parts diferenciades com la Figura 8.12. Primera zona, d'acceleració del volant i, segona zona, de manteniment de la velocitat de consigna.



Gràfic 8.13 Corrent de càrrega de l'ACEE amb tensió de consigna de 5V.

Però a la Figura 8.13, el corrent de la primera zona no creix de forma continua com a la Figura 8.12, sinó que ho fa "a salts". Ara bé, quan arribar a la velocitat de consigna (segona zona o zona de manteniment), apareixen els mateixos

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

pics de corrent puntuals que intenten establir de la velocitat del volant d'inèrcia com en la prova primera.

Els salts del corrent de la primera zona mostra la dificultat que té el control electrònic del motor MSS-35 per regular la velocitat del volant d'inèrcia durant el procés d'acceleració.

Això es degut al gran moment d'inèrcia que té el volant d'inèrcia. És a dir, la constant de temps del volant d'inèrcia és molt gran degut al gran moment d'inèrcia però la constant de temps del control electrònic és molt petita (el moment d'inèrcia del volant és 53,78 vegades el moment d'inèrcia del motor). Aquesta diferència fa que les dues constants de temps siguin tan diferents i que el conjunt volant-motor oscil·li d'aquesta manera tan significativa durant la càrrega.

A la primera prova, aquest efecte estava dissimulat perquè l'acceleració del volant d'inèrcia era més gran i el control electrònic no havia de regular a la fase de càrrega del volant d'inèrcia com en aquesta segona prova.

Si comparem els dos gràfics, queda demostrat que quan més alta és la velocitat de consigna, més gran és el corrent consumit per l'ACCE.

8.6.4. Descàrrega de l'ACCE sobre el Seat 600

Com ja explicàvem al principi, el Seat 600 elèctric té un motor anomenat D2 acoblat a un motor MA-55 mitjançant una corretja de transmissió. El motor D2 és de similars característiques que el motor D1, on es van fer les primeres proves de l'ACCE al banc d'assaig de motors elèctrics.

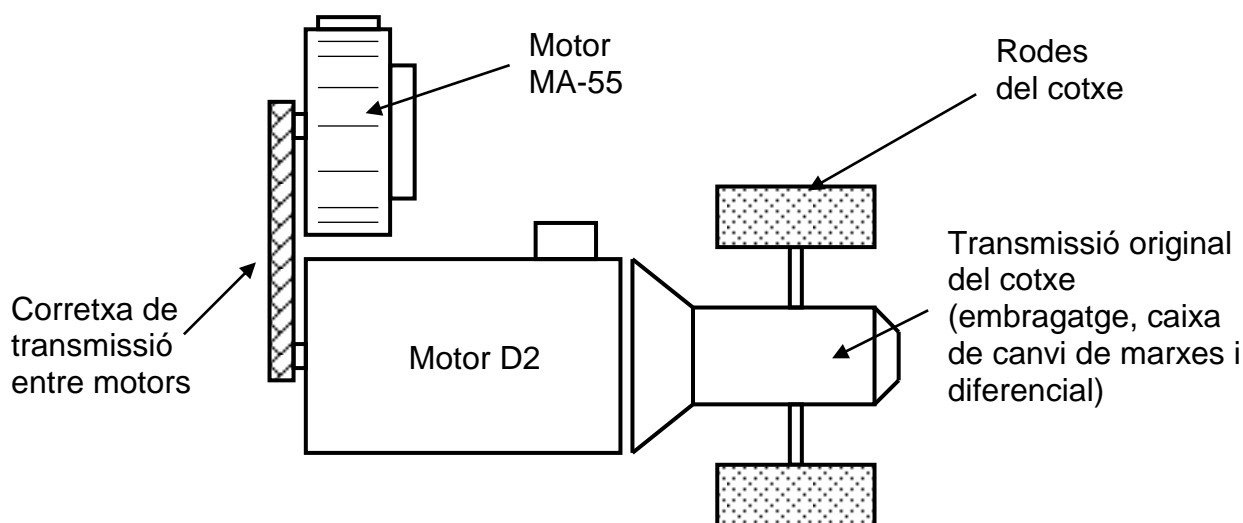


Figura 8.14. Esquema de tracció simplificat del Seat 600.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La primera d'aquestes proves consisteix en veure el intercanvi d'energia entre l'ACEE i el cotxe Seat 600.

Abans de començar, es comprova el sentit de gir del motor D2 del cotxe. Es veu que gira al revés del desitjat i, és a dir, a l'invers del sentit de marxa del cotxe.

Donat que motor de tracció del Seat 600 és un d'excitació sèrie, encara que permutem els dos cables d'alimentació, el motor continuarà girant al revés. Cal modificar la connexió en les bornes de la caixa de connexió. Però amb les "presses" de fer la prova de descàrrega, es decideix posar la marxa enrere a la caixa de canvi i, així, obtenir el sentit de marxa del cotxe correcte.

També observem que la pressió pneumàtic no és l'adequada per la prova de descàrrega (estan desinflatats), per tant, hi ha un major fregament de rodadora i haurà unes pèrdues més elevades.

Donat que el cotxe recorrerà uns metres (tal com va passar amb el 1er ACEE), hem connectat l'actual ACEE al cotxe per mitjà d'un cable de 12m de llargada de 4mm² de secció. La connexió s'ha fet amb un endoll de pala plana especial pel corrent continu.

Iniciem la prova posant l'ACEE a unes 1.500rpm (tensió de consigna 10V) i descarreguem l'energia cap el cotxe. El corrent de descàrrega puja i supera els 75A. El cotxe es belluga uns 3 metres.

Donat que el corrent augmenta de forma considerable, es decideix col·locar una resistència de 5 ohms a la sortida de l'ACEE. D'aquesta forma limitem el corrent entregat per l'ACEE.

Cal tenir en compte que la marxa enrere de la caixa de canvis del '600' té una relació de transmissió inferior a la primera marxa de la mateixa caixa de canvis (és a dir, té més parell però menys velocitat màxima).

Abans de la adaptació a vehicle elèctric, el Seat 600 tenia un motor de combustió interna de benzina i la velocitat de gir d'aquest variava entre 900 i 5.000rpm. Per tant, si volem bellugar el cotxe més de 3 metres i amb la marxa enrere, el motor D2 hauria d'assolir una velocitat de rotació propera a 1.500rpm.

Per saber el comportament del motor D2 amb les diferents marxes del canvi de marxa, farem més descàrregues d'energia entre l'ACEE i el '600'. Cal tenir en compte que les relacions de les marxes del canvi d'un cotxe qualsevol augmenten a que pugen de marxa fins la 4a marxa que la relació és directe o 1:1. A mida que augmenta la relació, el parell disminueix i, per tant, té menys força però s'aconsegueix més velocitat.

Donat que el parell el dona el motor D2, farem descàrregues a diferents marxes per veure el comportament del cotxe i de l'ACEE.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Abans de fer les proves de descàrrega a diferents marxes, es decideix variar el potenciòmetre que regula el corrent màxim del convertidor SQC-2i.

El problema és la diferència d'inèrcies entre el motor i el volant. El control dona ordre d'augmentar la velocitat però el motor MSS-35 té una resposta molt lenta perquè arrossega el volant d'inèrcia. El control electrònic del motor MSS-35 no està preparat per una inèrcia tan gran. Això fa que la velocitat real i la velocitat indicada per la consigna sigui molt diferent i que el control electrònic es bloquegi sovint.

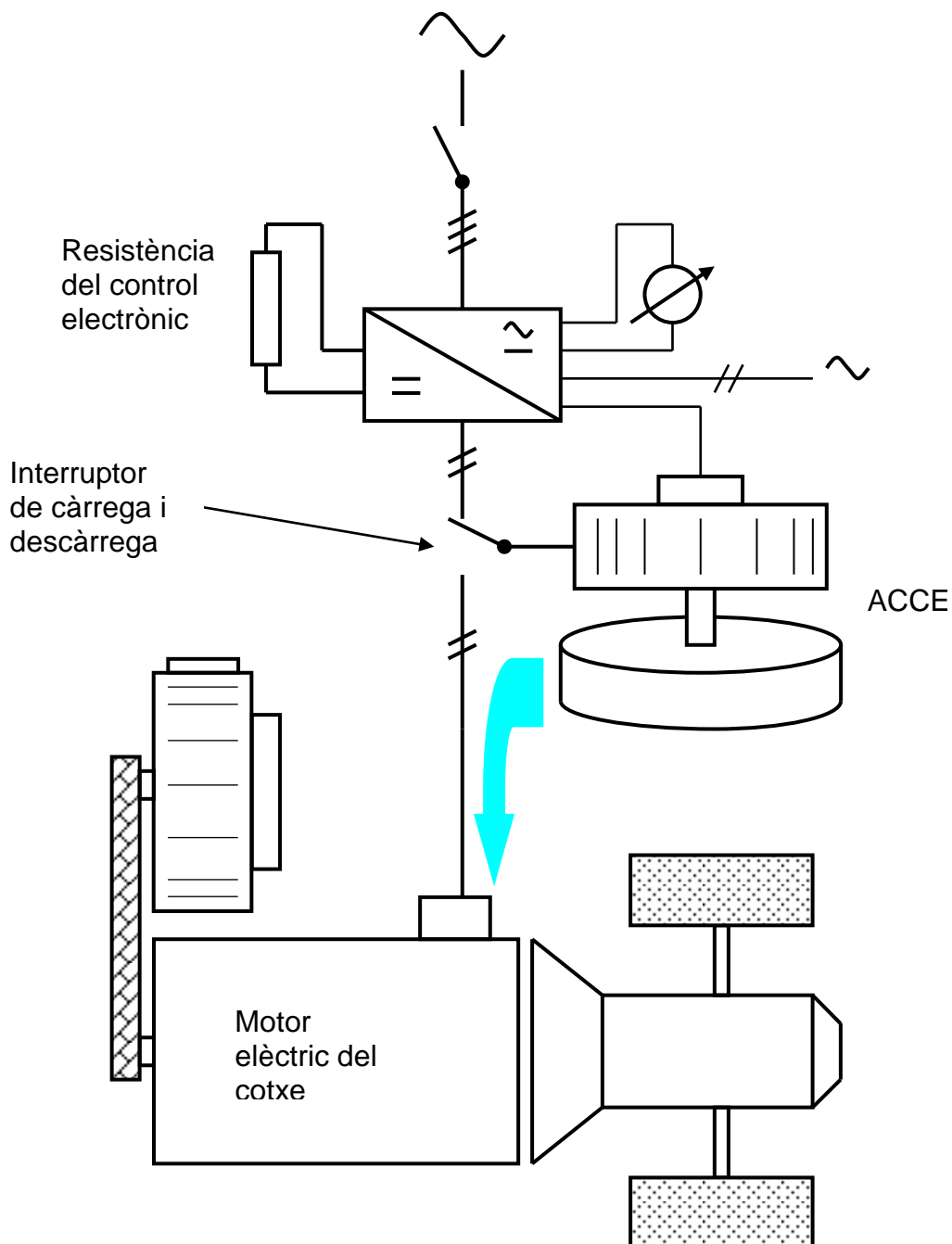


Figura 8.15. Esquema de la connexió en les primeres proves de descàrrega al Seat 600.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Inicialment, la tensió de consigna es variava manualment a mida que augmentava la velocitat de gir de l'ACEE per evitar el bloqueig del control. Els increments manuals eren de 1V en 1V.

Per obtenir una millor resposta es decideix variar l'esglaió en el control electrònic de velocitat a un únic esglaió de 0 a 10V en la tensió de consigna. D'aquesta manera farem que el corrent no augmenti tan i obtinguem una acceleració més uniforme i continua de l'ACEE. A més, no arribarem a bloquejar el control electrònic del motor MSS-35.

Repetim la prova de descàrrega de l'ACEE però ara girant a unes 1.800rpm. Observem que el cotxe es belluga uns 6 metres. El corrent de descàrrega s'apropa als 100A.

Tornem a repetir la prova de descàrrega de l'ACEE però girant a unes 2.000rpm. El cotxe es belluga uns 8,5 metres i el corrent puja fins els 111A. Totes aquestes proves les fem amb la primera marxa.

Velocitat rotació ACEE [rpm]	Energia emmagatz.(J)	Pic corrent descàrrega [A]	Distància recorreguda [m]
1.500	5.758,9	75	3
1.800	8.292,8	100	6
2.000	10.238	111	8

Taula 8.2. Distància recorreguda cotxe amb 1a marxa per varies descàrregues de l'ACEE.

Ara repetim les proves de descàrrega però amb la segona marxa, per veure si la diferència de relació de transmissió dels engranatges afecta en la distància recorreguda. Amb l'ACEE girant a unes 1.500rpm, el cotxe es belluga uns 4 metres amb un corrent de 75A. Augmentem la velocitat de l'ACEE a unes 1.800rpm, el cotxe es belluga uns 6 metres amb un corrent de 98A. Tornem augmentar l'ACEE a unes 2.000rpm i el cotxe es belluga uns 8 metres i el corrent puja a 110A.

Velocitat rotació ACEE [rpm]	Energia emmagatz.(J)	Pic corrent descàrrega [A]	Distància recorreguda [m]
1.500	5.758,9	75	4
1.800	8.292,8	98	6
2.000	10.238	110	8

Taula 8.3. Distància recorreguda cotxe amb 2a marxa per varies descàrregues de l'ACEE.

Constatem que la descàrrega de l'ACEE amb la primera marxa és millor que amb la segona marxa. Amb la primera marxa, el cotxe té més empenta que amb la segona marxa (més parell d'arranc). Amb la segona marxa, no millora el

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

comportament de la descàrrega. Per tant, no s'obté la millora esperada quan es canvia de la 1a a 2a marxa. Inclús s'aprecia un recorregut lleugerament inferior amb la 2a marxa respecte el de la primera marxa.

Això ens fa pensar que hi ha pèrdues importants en el sistema de tracció del cotxe elèctric que no havien estat o tingudes en compte. I, a més, el canvi de relació de transmissió cap unes marxas més altes i properes a la relació 1:1 de la quarta marxa no millorarà la descàrrega ni augmentarà la distància recorreguda sinó tot el contrari ja que el moment resistent serà molt més alt degut a la relació de transmissió.

Per saber l'energia que es perd a la caixa de canvis, al sistema de transmissió del cotxe (diferencial) i a les rodes, farem la prova de descàrrega de l'ACEE cap el cotxe (amb la primera marxa) però amb les rodes posteriors aixecades. El resultat d'ela prova ens indicarà les pèrdues del sistema mecànic (caixa de canvis + transmissió + rodes) del 'Seat 600'.

També veiem que per fer un millor estudi de descàrrega, seria convenient instal·lar un indicador de la velocitat més fiable i determinar amb més exactitud la velocitat màxima del cotxe. Amb aquest aparell es podria saber l'energia final utilitzada per bellugar el cotxe.

8.6.5. Descàrrega de l'ACEE sobre el Seat 600 en un banc de rodets

Per apropar-nos el més possible a la realitat, és a dir, per analitzar la descàrrega de l'ACEE sobre el cotxe Seat 600 en diferents nivells, es decideix traslladar tot el conjunt (ACCE + Panell de control + Seat 600) al Laboratori del Departament de Motors Tèrmics.

La raó del trasllat es perquè aquest Departament disposa d'un banc de rodets on el vehicle Seat 600 pot assolir diferents velocitats i situacions molt semblants a la circulació oberta. A més, podem connectar l'ACEE al cotxe sense necessitat d'emprar un cable de connexió llarg.

Per altra costat, el banc de rodets ens pot permetre conèixer l'energia de càrrega de l'ACEE a partir del frenat regeneratiu del cotxe. Per aconseguir-ho, es decideix alimentar el motor D2 a partir d'una font d'alimentació exterior. Així les rodes del cotxe es mouran gràcies a la font d'alimentació exterior i, a l'hora del frenat, l'energia del cotxe passarà a l'ACEE.

Sota aquestes condicions, es decideix connectar el motor D2 a un Transformador-Rectificador (a partir d'ara l'anomenarem Tg). Desgraciadament el seu pes, volum i tensió d'entrada fa impossible traslladar-lo al banc de rodets. Per poder realitzar les noves proves, decidim connectar d'aquest rectificador al cotxe per mitjà d'un cable llarg de 110Vcc.

Per protegir aquesta nova línia, s'ha instal·lat un interruptor automàtic de 120A al mig del recorregut entre els dos Laboratoris. Així podem alimentar el motor D2 amb tensió controlada des del Tg i amb seguretat.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per poder controlar els flux d'energia entre el cotxe i l'ACEE (alimentació del cotxe per mitjà de l'ACEE o alimentació del cotxe per mitjà del TG), es munta un interruptor rotatiu de tres posicions a 45° (1-0-2) amb un poder de tall de 100A al panell de control.

D'aquesta manera, a la posició 1, l'ACEE està connectat al motor D2 (per fer la descàrrega de l'ACEE cap el motor D2) i, a la posició 2, el transformador T_G alimenta el motor D2, és a dir, el T_G fa girar les rodes del cotxe com si circules en marxa normal.

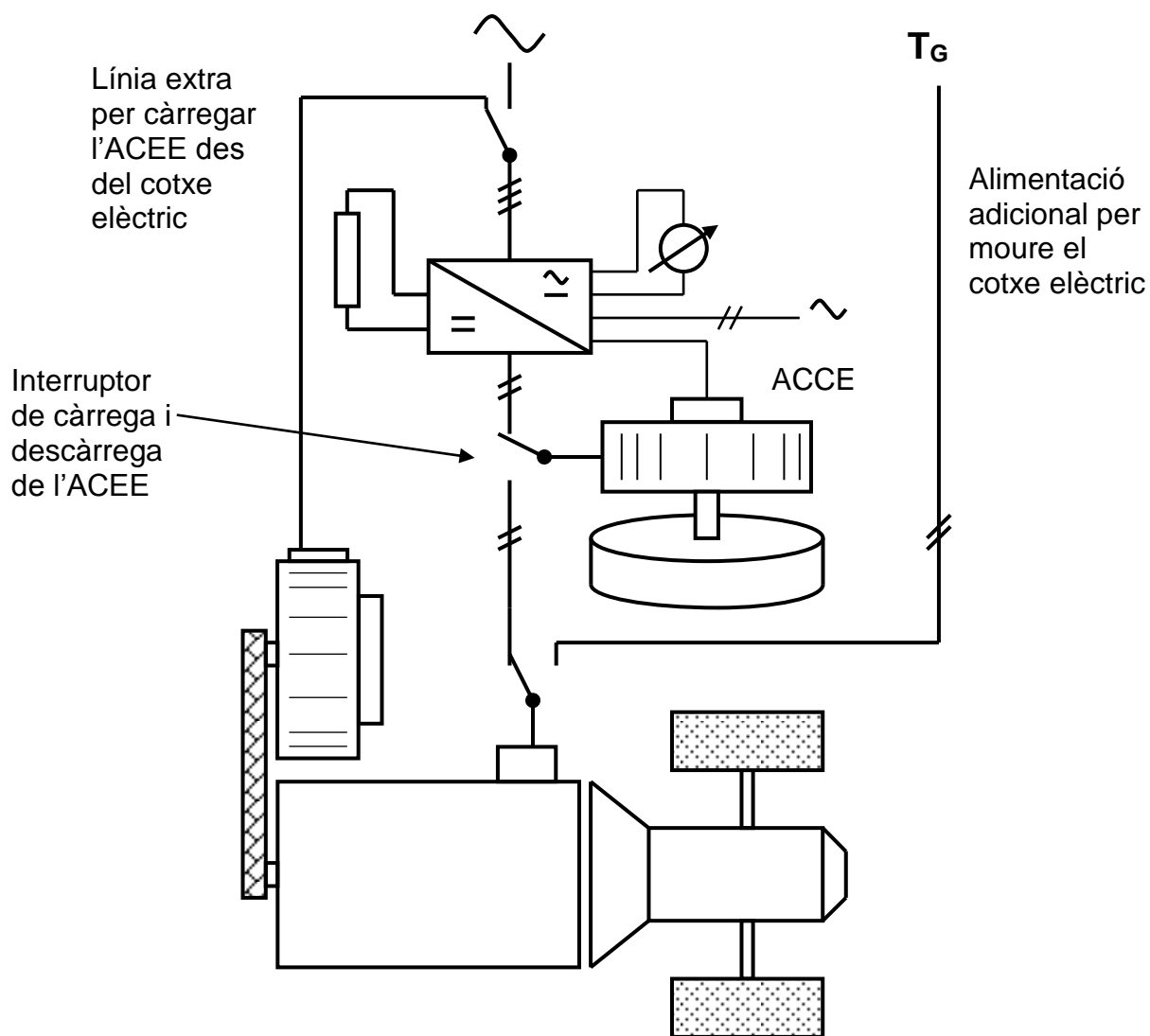


Figura 8.16. Esquema de la connexió en les primeres proves del Seat 600 amb connexió al T_G i connexió al MA-55.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

El procés de càrrega de l'ACEE és el següent: Donat que el motor MA-55 està acoblat al motor D2 mitjançant la corretja dentada (és a dir, el motor D2 arrossega el motor MA-55), llavors el motor MA-55 funcionarà com a generador de corrent altern. I així, el MA-55 donarà energia a l'ACEE perquè es carregi.

En principi, la càrrega de l'ACEE s'aconsegueix a partir de l'energia cinètica de tots els elements en moviment. Aquests elements en moviment són: els corrons del banc de proves, les rodes posteriors del cotxe, la transmissió original del cotxe i el rotor del motor de tracció D2 i del motor MA-55.

Ara ja tenim tot els elements necessaris per observar els fluxos de l'energia des del cotxe fins a l'ACEE (càrrega de l'ACEE) i a l'inrevés (descàrrega de l'ACEE).

Els assaigs els dividim en dues fases. A la primera fase, el Tg alimenta el motor D2 gràcies a l'interruptor en posició 2 i les rodes es mouen a una certa velocitat. A la segona fase, l'ACEE es carrega amb l'energia del frenat del cotxe (que anomenarem frenat regeneratiu) i després es descarregarà cap el motor D2 gràcies a l'interruptor en posició 1 (en principi, les rodes també s'han de moure).

Comencen els assaigs i observem que l'energia cinètica de tots els elements en moviment (elements rotants) no tenen prou energia per accelerar i carregar l'ACEE. És a dir, el "frenat regeneratiu" no té prou energia. En altres paraules, les masses en moviment rotatiu del sistema de tracció del cotxe elèctric no tenen prou energia i, a més, els fregaments són molt elevats.

Aquesta manca d'energia és lògica. Al no bellugar-se el cotxe i només els elements rotants del sistema de tracció (d'inèrcia baixa), no hi ha prou energia cinètica per carregar l'ACEE. Els càlculs teòrics es basaven en l'energia cinètica del cotxe en moviment i no amb l'energia cinètica de la cadena de tracció (transmissió, diferencial i rodes). Aquest problema no passarà en circulació oberta.

Per solucionar aquest problema es decideix que el Tg continuï alimentant el motor D2 durant el "frenat regeneratiu". D'aquesta manera, aconseguirem prou energia per carregar l'ACEE.

8.6.5.1. Assaig previ:

La primera fase es alimentar el motor D2 amb el Tg a una tensió de 70V. D'aquesta manera el motor D2 mou tot el sistema mecànic i arrossega també el motor MA-55.

El sistema arriba a les màximes revolucions en 19 segons. Un cop el sistema mecànic s'estabilitza i gira a unes revolucions constants, passem a la segona fase. Tanquem l'interruptor trifàsic a l'entrada del control electrònic del motor MSS-35. Ara el flux d'energia va des del cotxe elèctric cap l'ACEE (procés de càrrega de l'ACEE) o frenat regeneratiu.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la Figura 8.16. podem observar la càrrega de l'ACEE a partir del MA-55 (que funciona com a generador) i amb l'ajut de la font d'alimentació T_G a 70V. Els canals estan indicats a la dreta del gràfic de la Figura .17 i son els següents:

- Canal 1: Corrent de càrrega de l'ACEE.
- Canal 2: Corrent del motor MA55 (corrent generat).
- Canal 3: Tensió del motor MA55 (tensió generada).

Si ens fixem amb el corrent de l'ACEE (línia superior o Canal 1), hi observem tres etapes ben diferenciades que anomenarem: Etapa 1, Etapa 2 i Etapa 3. Realment son tres “estats” pels que passa el procés de càrrega de l'ACEE.

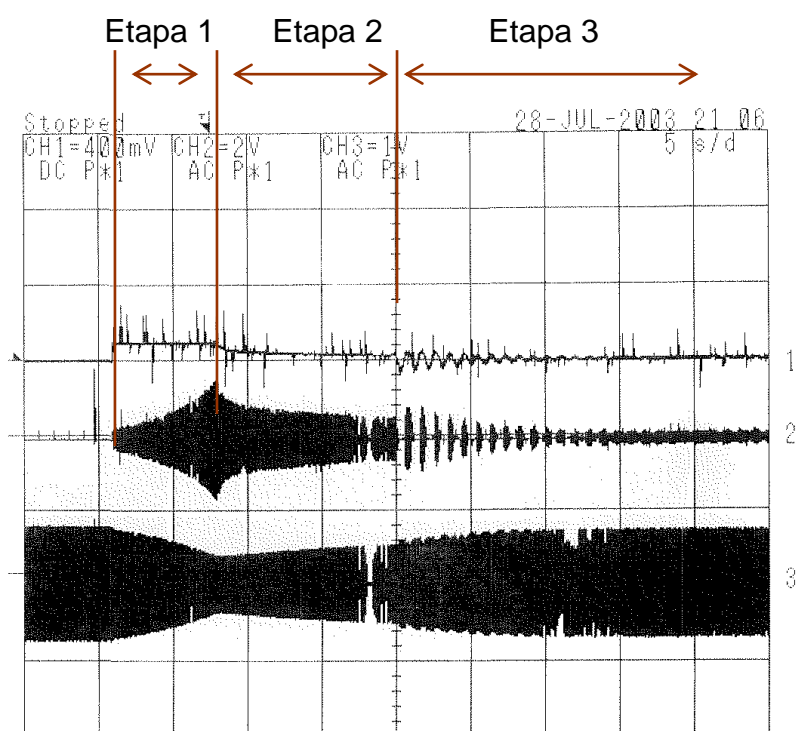


Figura 8.17. Procés de càrrega de l'ACEE a partir del MA-55 i amb l'alimentació addicional del T_G a 70V.

Quan tanquem l'interruptor (inici del procés de càrrega de l'ACEE), el corrent puja fins a 16,6A (màxim fixat i pre definit al control electrònic del MSS-35 per nosaltres). Llavors, el corrent es manté constant fins que el volant té una velocitat. A aquest tram de “Càrrega de l'ACEE amb corrent limitat”, l'anomenem: Etapa 1.

Quan el corrent de càrrega de l'ACEE comença a disminuir des del màxim pre definit (16,6A) fins arribar a zero. Al final d'aquest, el volant d'inèrcia arriba a les 1.500rpm (velocitat màxima fixada per nosaltres). A aquest tram de “Càrrega de l'ACEE sense limitació”, l'anomenem: Etapa 2.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A partir d'aquest punt, el corrent de càrrega de l'ACEE oscil·la al voltant del zero (de negatiu a positiu i de negatiu passant). Com en les proves previes, s'aprecia que l'oscil·lació del corrent té un límit asimptòtic superior i inferior (es com un moviment oscil·latori esmorteït). Aquest límit asimptòtic disminueix a mida que s'estabilitza la velocitat del volant d'inèrcia. A aquest tram de "Càrrega de l'ACEE completada", l'anomenem Etapa 3.

Un cop definides les etapes del procés de càrrega de l'ACEE, anem a descriure el que passa en cada etapa en els altres dos canals (corrent del motor MA-55 i tensió del motor MA-55):

- **Etapa 1 o "Càrrega de l'ACEE amb corrent limitat"**: A aquesta tram hi ha una pèrdua de revolucions del motor D2 (i un augment del corrent en el TG). Donat que el motor D2 i el motor MA-55 estan acoblats mecànicament, el motor MA-55 que funciona com a generador, perd velocitat. Aquesta pèrdua revolucions fa que la tensió del MA-55 disminueixi i, per tant, que augmenti el corrent del MA-55. El corrent del MA-55 augmenta exponencialment fins a un màxim. Aquest màxim coincideix just en el moment en que el corrent del MSS-35 disminueix. Durant aquest primer període, el volant d'inèrcia s'accelera consumint tota l'energia que entrega el generador MA-55. Fixant-nos bé en la Figura 8.17, observem que al inici del cicle de càrrega de l'ACEE, teníem una tensió del MA-55 amb un valor de 84V), a una freqüència de 20,76Hz.
- **Etapa 2 o "Carrega de l'ACEE sense limitació"**: A aquest segon tram, hi ha una reducció del corrent per part del MSS-35. Aquesta disminució del corrent fa disminuir l'augment de corrent en el MA-55 i, per tant, també s'atura la caiguda de la tensió del MA-55. Durant aquest període, el corrent del MA-55 disminueix suaument. A partir d'aquí, la velocitat del MA-55 es recupera lentament fins que el volant d'inèrcia ja disposa de les revolucions prefixades de 1.500rpm (10V de tensió de consigna). En el punt més baix de la tensió del generador MA-55, que és just al inici de la segona etapa, hi ha una tensió de 46V, a una freqüència de 40,32Hz.
- **Etapa 3 o "Càrrega de l'ACEE completada"**: A aquest tram comença just quan el volant d'inèrcia gira a la seva velocitat (1.500rpm). Llavors, el corrent de l'ACEE oscil·la, és a dir, passa de positiu a negatiu. I a mida que passa el temps, els pics màxims es redueixen. Quan el corrent és positiu vol dir que el control electrònic del MSS-35 consumeix corrent del MA-55. Quan el corrent és negatiu, el control electrònic del MSS-35 frena el volant d'inèrcia. El corrent oscil·latori del MSS-35, provoca que el corrent del MA-55 també sigui oscil·latori esmorteït. Durant aquesta oscil·lació esmorteïda del corrent del MA-55, la tensió al MA-55 és recupera d'una forma més ràpida. Al final de l'assaig, la tensió i els corrents s'estabilitzen.

Si comparem les tensions al inici del cicle de càrrega (inici Etapa 1) i al inici de la Etapa 2, observem que hi ha una caiguda de la tensió del generador MA-55 del 45% (de 84V a 46V), en canvi, hi un augment en la freqüència en un 26% (de 29,76Hz a 40,32Hz).

8.6.5.2. Conclusions de l'assaig previ:

A partir de l'assaig previ, decidim provar diferents nivells de revolucions del volant d'inèrcia, és a dir, diferents nivells de càrrega de l'ACEE. Per això, analitzarem la tensió del motor/generador de l'ACEE, és a dir, el MSS-35. Afegim un altre canal d'estudi a l'oscil·loscopi que enregistrarà la tensió del motor/generador de l'ACEE.

També es decideix alimentar el motor D2 a diferents nivells de tensió. És a dir, diferents tensions d'alimentació del Transformador-Rectificador o T_G.

Per reduir el temps de càrrega de l'ACEE, sorolls i molèsties en els propers assaigs, s'ha decidit treure la primera marxa, és a dir, només hi ha rotació del motor D2 i del MA-55. Ara tenim menys elements del sistema de transmissió del cotxe elèctric en rotació, per tant, menys inèrcia i menys energia cinètica.

8.6.5.3. Primer assaig:

En aquest segon assaig, alimentem el motor D2 a 70V mitjançant el T_G i a una tensió de consigna de 5V que corresponent a unes 750rpm aproximadament del volant d'inèrcia.

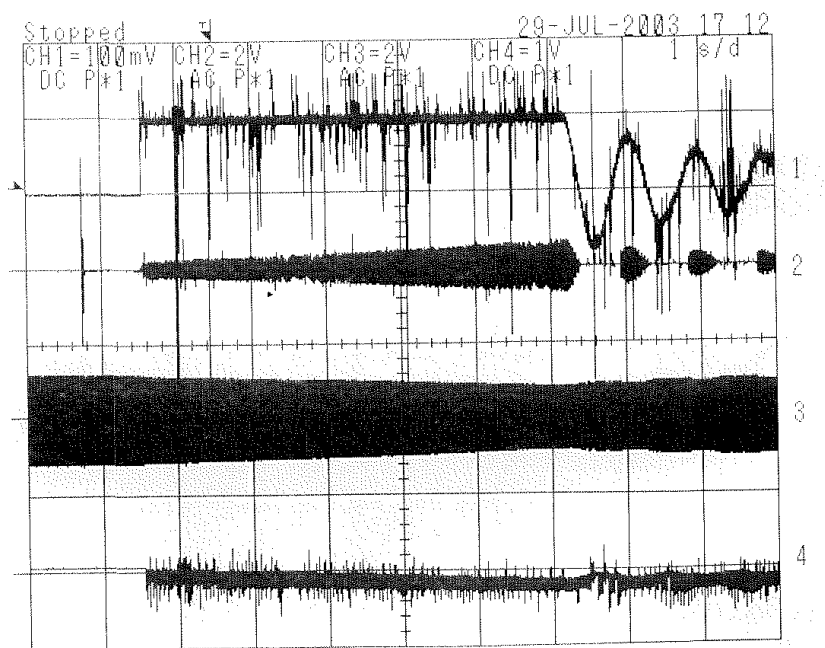


Figura 8.18. Procés de càrrega de l'ACEE a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del T_G a 70V i tensió de consigna 5V.

Amb aquest canvi observem que el sistema mecànic (format ara pel motor D2 i el motor MA-55) triga menys a arribar a les revolucions, en concret, triga uns 6

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

segons. Ara bé, les revolucions son superiors a l'assaig anterior perquè ara hi han menys pèrdues i menys fregaments (sobre tot les rodes damunt dels rodets del banc de proves).

Si prenem com a referència les etapes definides a partir de la Figura 8.17, ara observem que la Figura 8.18 només té dues etapes en el procés de càrrega de l'ACEE. En concret, només hi ha l'Etapa 1 i l'Etapa 3.

El corrent del MSS-35 puja fins a un màxim (màxim prefixat) i es manté constant (Etapa 1). I tot plegat, la senyal passa a l'etapa d'oscil·lació alterna (Etapa 3). No hi ha la zona de baixada del corrent (Etapa 2) perquè el volant d'inèrcia ja ha arribat a la velocitat preestablerta de 750 revolucions.

Al quart canal, hi ha monitoritzada la tensió del motor MSS-35 (motor/generador de l'ACEE) que augmenta de mica en mica. Durant el temps de càrrega de l'ACEE, uns 6 segons, la tensió a bornes arriba fins a 80V. La lectura d'aquest senyal a l'oscil·loscopi és inversa perquè la tensió ha de ser positiva i, per tant, invertim el canal 4 de l'oscil·loscopi ja que hem invertit la sonda de tensió.

També comprovem la existència de perturbacions en la lectura d'aquest canal. La perturbació també afecta al canal del corrent del MSS-35.

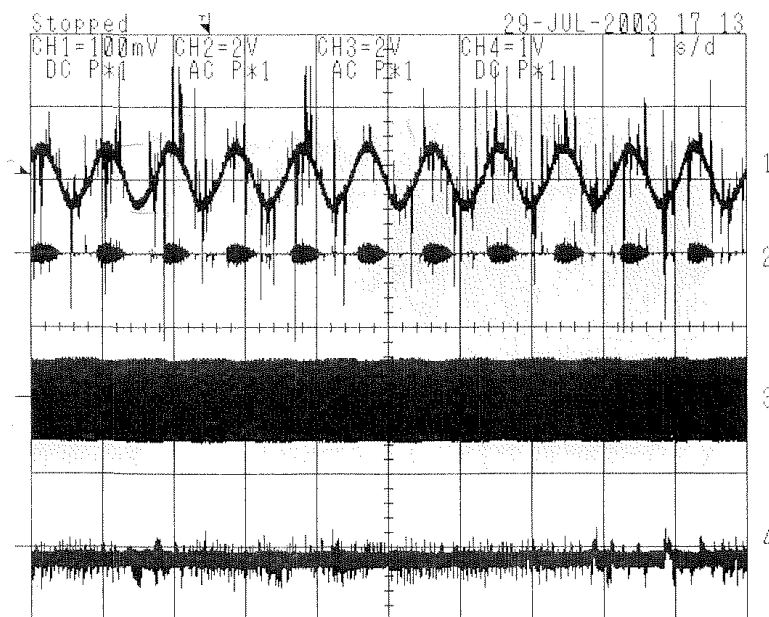


Figura 8.19. Regim permanent de càrrega de l'ACEE RG2.

En aquest segon assaig hem observat que hi ha una oscil·lació en la font d'alimentació. Aquesta oscil·lació provoca que la tensió de consigna també oscil·li. La variació és de 1,5V aproximadament. Aquesta variació fa que el control electrònic ajusti les revolucions del volant tota l'estona. Això provoca oscil·lacions en la velocitat del volant d'inèrcia.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A la Figura 8.19. es pot veure la situació en règim permanent (Etapa 3) on es manté una oscil·lació del corrent del MSS-35 inferior a 1,1Hz i amb un valor de pic a pic de 18,3A.

8.6.5.4. Segon assaig:

Tornem a repetir l'assaig però a una tensió de consigna de 10V que correspon a unes 1.500 revolucions i a una tensió d'alimentació del T_G de 70 V. Igual que l'assaig anterior, no hi ha cap marxa i, per tant, no hi han pèrdues ni fregaments de la transmissió del cotxe, de les rodes del cotxe i del banc de rodets. Aquest assaig es semblant al primer.

En aquesta prova, observem que hi han les tres etapes. A l'Etapa 1 hi ha el creixement del corrent del MA-55 fins arribar a un màxim de 15A aproximadament, a l'Etapa 2 hi ha la disminució del consum de corrent i a l'Etapa 3 hi ha la oscil·lació del corrent.

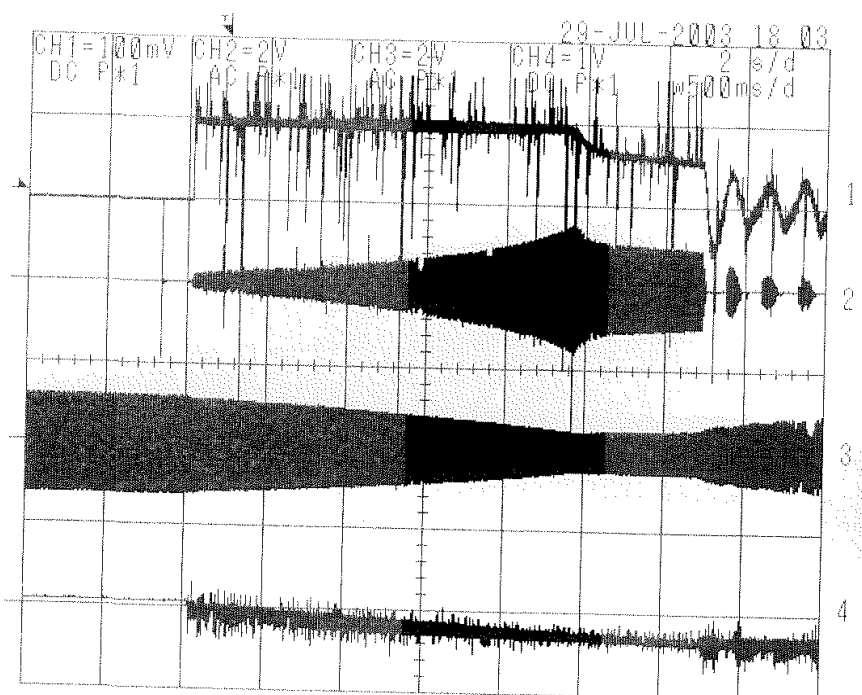


Figura 8.20. Càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del T_G a 70V i tensió de consigna 10V.

Verifiquem també la gran quantitat de "soroll" al corrent de sortida del convertidor cap el MSS-35.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A l'instant de màxim corrent del MA-55, la tensió del MA-55 és de 100V (RMS) a una freqüència de 25,00Hz. Al mateix instant, la tensió del motor MSS-35 és de 60V (RMS) a una freqüència de 12,5Hz.

Verifiquem que al inici de l'Etapa 3, quan el corrent de l'ACEE passa pel zero, el corrent del MA-55 també va a zero. Quan el corrent de l'ACEE és negatiu, no hi ha consum del corrent del MA-55, però a les següents oscil·lacions, quan el corrent de l'ACEE passa a ser positiu hi ha corrent al MA-55 amb un retard de quasi 100ms i aquest corrent desapareix quan el corrent de l'ACEE és negatiu.

8.6.5.5. Tercer assaig:

Repetim l'assaig però a una tensió d'alimentació del T_G de 80V i a una tensió de consigna de 10V (unes 1.500 revolucions). Igual que abans, no hi ha cap marxa i, per tant, no hi ha pèrdues ni fregaments de la transmissió del cotxe, de les rodes del cotxe i del banc de rodets.

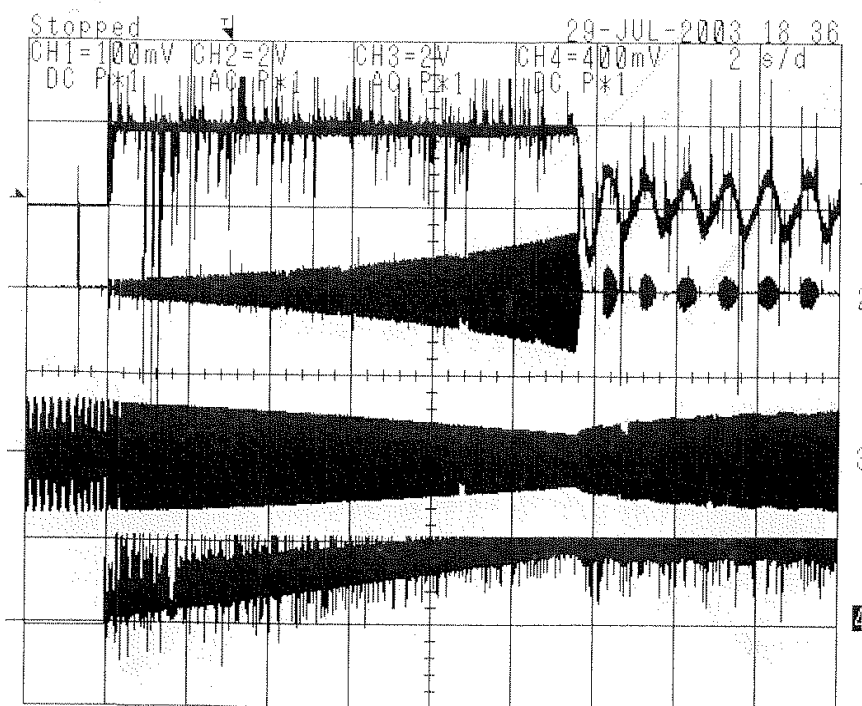


Figura 8.21. Càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del T_G a 80V i tensió de consigna 10V.

Comprovem que al gràfic només apareixen dues etapes, l'Etapa 1 i la 3. L'Etapa 1 és el creixement del corrent del MA-55 de forma exponencial fins a un màxim de 14A aproximadament (1,4V al oscil·loscopi] i una baixada de la tensió del MA-55 fins a un mínim. I a l'etapa 3 hi ha la oscil·lació del corrent del MSS-35 i la recuperació de la tensió del MA-55.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A l'instant de màxim corrent del MA-55, la tensió del MA-55 és de 124V (RMS) a una freqüència de 25,00Hz.

En aquest mateix instant, la tensió del MSS-35 és de 76V (RMS) a una freqüència de 25,00Hz. És curiós que la tensió del MSS-35 amb el pics de "soroll" no superi els 80V. Es com si el convertidor retalles els pics superiors de "soroll".

8.6.5.6. Quart assaig:

Repetim l'assaig però a una tensió de consigna de 13,5V que correspon a unes 1.750 revolucions (aproximadament) del volant i a una tensió d'alimentació del T_G de 80V. Igual que abans, no hi ha cap marxa i, per tant, no hi pèrdues ni fregaments de la transmissió del cotxe, de les rodes del cotxe i del banc de rodets.

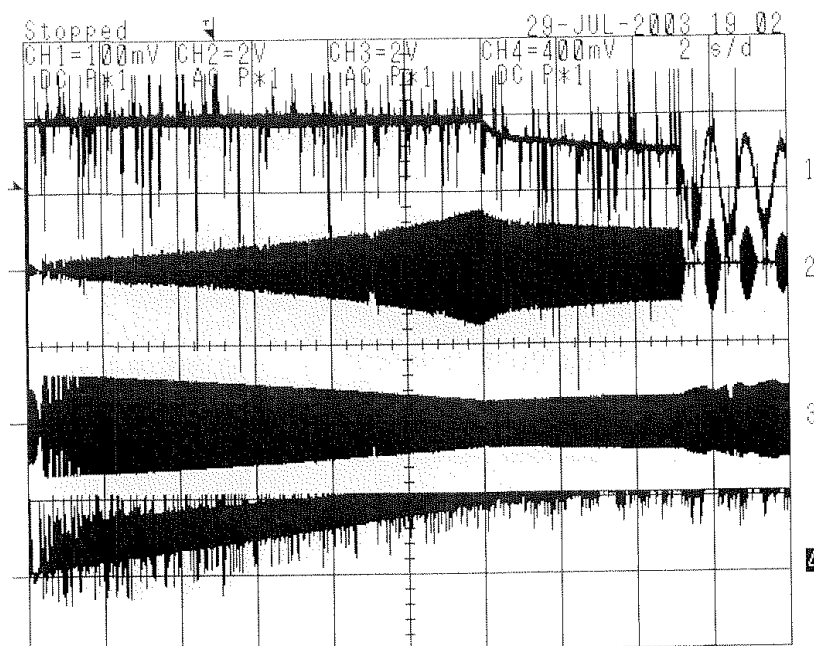


Figura 8.22. Càrrega de l'ACEE RG2 a partir del MA-55, amb l'alimentació addicional del T_G a 80V i tensió de consigna 13,5V.

A aquesta prova, observem que apareixen les tres etapes. L'etapa 1 de creixement del corrent i disminució de la tensió del MA-55. L'etapa 2 de recuperació de la tensió i disminució del corrent del MA-55. I l'etapa 3 d'oscil·lació del corrent del MSS-35.

El màxim de corrent del MA-55 arriba fins a 15A aproximadament. En aquest instant, la tensió del MA-55 arriba fins a un mínim de 120V (RMS) a una

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

freqüència de 25,00Hz. En aquest mateix instant, la tensió del MSS-35 és de 78,4V (RMS).

A una ampliació de la Figura 8.22. a l'etapa 3, observem que la tensió del MSS-35 té un comportament diferent si el corrent del MSS-35 és positiu o negatiu. Si el corrent és positiu, la tensió és constant sense petites oscil·lacions mentre que quan el corrent és negatiu, la tensió té una petita oscil·lació.

8.7. Resum de les proves

Dels resultats dels 4 assaigs, confeccionem aquesta una taula resum. D'aquesta manera es veurà si ha cap tipus de relació o l'evolució de les assaigs. I, a més, ens ajudarà a canalitzar o centrar possibles següents assaigs.

	ASSAIG			
	1r	2n	3r	4t
Tensió Tg	70 V	70 V	80 V	80 V
Tensió de consigna ACEE	5 V	10 V	10 V	13,5V
Revolucions ACEE	750 rpm	1.514 rpm	1.500 rpm	1.990 rpm
Quantitat d'etapes	2	3	2	3
Corrent Tg (pic)	-	78 A	61,7 A	60,2 A
Corrent Tg (permanent)	-	27 A	15,4 A	15,3 A
Corrent MA-55 (Màx.)	7 A	15 A	14 A	15 A
Tensió MA-55 (Mín.)	-	100 V	124 V	120 V
Temps per aconseguir les revolucions	5,8s	13s	11,4s	19,2s

Taula 8.4. Resum de les proves de càrrega de l'ACEE RG2.

8.8. Conclusions de les proves

Amb els resultats de totes les proves fetes, fem les següents conclusions:

1. La diferència de 53,78 vegades entre el moment d'inèrcia del motor i del volant d'inèrcia fa que la resposta del control electrònic del motor/generador de l'ACEE sigui molt més ràpida que la reacció del conjunt volant-motor. Aquesta circumstància fa que l'acumulador oscil·li de manera significativa sobre tot quan l'acceleració angular no és elevada.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

2. El sistema de transmissió del vehicle elèctric (canvi de marxes i diferencial original del Seat 600) no és adient per una tracció elèctrica. El canvi de marxes és per un motor tèrmic amb un regim de velocitats concrets (de 1.000rpm fins a 5.000rpm).
3. Les proves al banc de rodets ens han ajudat a fer l'anàlisi de càrregues de l'ACEE però l'energia és molt inferior al desitjat. La raó és que el cotxe no està en moviment i, per tant, l'energia cinètica deguda a la translació del vehicle és zero. Només hi ha l'energia cinètica de rotació dels elements del sistema de transmissió del cotxe elèctric. Per tant, l'energia a emmagatzemar a l'ACEE no és alta. Per obtenir energia, caldria fer assaigs en "circulació oberta", és a dir, a la carretera, als carrers, etc.. i no al banc de rodets del laboratori. Davant d'aquesta situació, mantenim l'alimentació de l'ACEE per mitjà del Transformador-Rectificador del Laboratori.
4. Quan més nivell de tensió del Tg (sistema d'alimentació extern del cotxe elèctric), el corrent de càrrega de l'ACEE no disminueix tan i, en conseqüència, no baixa tan la tensió de càrrega.
5. Quan no es limita la capacitat de càrrega de l'ACEE, hi ha corrents elevats durant la càrrega de l'ACEE. Això provoca que hi hagin 3 Etapes en el procés de càrrega.
6. Quan es limita la capacitat de càrrega de l'ACEE, no hi ha corrents elevades durant la càrrega de l'ACEE. Per tant, només hi ha dues Etapes en el procés de càrrega de l'ACEE.
7. Quan més alta és la velocitat màxima fixada al control del motor/generador del volant d'inèrcia, és produïx un corrent elevat. Això fa que apareguin 3 etapes en el procés de càrrega de l'ACEE. Quan es fixa una velocitat màxima alta, realment estem indicant que l'ACEE té una major capacitat d'emmagatzemar energia.

8.9. Acceleració angular del volant d'inèrcia

Com coneixem el temps que triga el volant d'inèrcia en arribar a la velocitat màxima, podem calcular l'acceleració angular mitja. A la Taula 8.5. es mostren els valors d'acceleració angular mitja durant el procés de càrrega de cadascú dels 4 assaigs.

Com veiem, s'han obtinguts unes acceleracions angulars mitges importants. Observem que l'acceleració és més gran en el cas de dues etapes en el procés de càrrega que quan hi han 3 etapes en el procés de càrrega. Això es deu a que la limitació de corrent del control electrònic del motor/generador afecta negativament en l'acceleració angular. Quan el control no limita el corrent en el

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

procés de càrrega, l'acceleració és més alta que quan el control limita el corrent en el procés de càrrega.

	ASSAIG			
	1r	2n	3r	4t
Tensió T _G	70 V	70 V	80 V	80 V
Revolucions finals ACEE	750 rpm	1.514 rpm	1.500 rpm	1.990 rpm
Temps per aconseguir les revolucions	5,8s	13s	11,4s	19,2s
Acceleració angular del volant en la càrrega	258 π rad/s ²	233 π rad/s ²	263 π rad/s ²	207 π rad/s ²

Taula 8.5. Acceleració angular mitja durant les proves de càrrega de l'ACEE RG2.

Separant els assaigs 1r i 2n dels assaigs 3r i 4t pel nivell de tensió del T_G, observem que el pendent del temps d'acceleració (dels assaigs 1r i 2n) és de 9,424 segons per cada 1.000 revolucions. En canvi, el pendent del temps d'acceleració (dels assaigs 3r i 4t) és de 15,918 segons per cada 1.000 revolucions. Com veiem l'acceleració del 3r i 4t assaig és un 65% més de temps d'acceleració.

Aquestes dades ens indiquen que quan més alt és el nivell de tensió del T_G, més gran és el pendent del temps d'acceleració, en altres paraules, menys temps per accelerar el volant d'inèrcia de l'ACEE. També es pot dir que l'ACEE té major capacitat d'admetre energia en el mateix temps.

Aquest fet té l'explicació que quan més nivell de tensió d'alimentació, menys caiguda de tensió té en el procés de càrrega i, per tant, menys fort és el corrent. Com veiem, és millor pel procés de càrrega de l'ACEE és tenir un nivell de tensió alt per la mateixa energia de càrrega. D'aquesta manera, el corrent és baix i el control del motor/generador de l'ACEE no té que limitar el corrent i el volant d'inèrcia pot accelerar més i emmagatzemar més energia per unitat de temps.

8.10. Potències instantànies

Als apartats anteriors, deduïm que la potència instantània és un factor molt important en el procés de càrrega i descàrrega de l'ACEE. Per tant, cal tenir en compte en el disseny i dimensionament de l'acumulador d'energia. A més, aquest factor és essencial a l'hora d'escollir la màquina elèctrica adient per l'ACEE.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

En els assaigs hem treballat amb nivells de potència més aviat baixos, entre 1.500W i 1.800W. En el cas d'un vehicle de 1.200kg a 50km/h desenvolupa durant el procés de frenat (de 10 segons de durada) una potència mitja de 11,6kW. Com veiem, això vindria a ser entre 6 i 7,3 vegades la potència obtinguda en els nostres assaigs.

Ara bé, durant el primer segon, la potència mitja entregada és, aproximadament 115kW durant el primer segon. Això vindria a ser entre 60 i 73 vegades la potència obtinguda en els nostres assaigs.

Com veiem manegar les energies i les potències en els processos de càrrega i descàrrega no és fàcil.

La potència útil emmagatzemable és aquella que l'acumulador pot suportar durant la càrrega d'una forma eficient. La seva integrada durant el temps de càrrega ens donarà l'energia emmagatzemada.

Com veiem, el procés de càrrega té la complexitat de manegar una important potència instantània. La potència instantània de l'acumulador depèn del corrent màxim que entrega la màquina elèctrica funcionant com a generador.

L'acumulador ha de poder suportar energia que s'entrega de forma brusca. Per tant, cal conèixer amb precisió la potència transitòria que resisteix la màquina elèctrica per que el control de l'acumulador asseguri la seva integritat. Aquestes prestacions bàsiques tèrmiques només poden ser conegudes en els servomotors.

Com comprovem, la potència instantània afecta directament a la màquina elèctrica i el comportament de la màquina és vital en el rendiment de l'ACEE. A l'augmentar la velocitat de gir, augmenta l'energia entregada i, per tant, l'energia específica de l'ACEE augmenta considerablement.

Les altes velocitats a les màquines d'imants permanents fan créixer la tensió disponible i, per tant, la seva corrent i potència de curtcircuit, per això el control ha de limitar la potència entregada al marge del model de càrrega que s'alimenta, o que la càrrega sigui coneguda i el seu control es coordini amb la de l'ACEE.

Als nostres assaigs i amb l'ACEE dissenyat, el factor nivell de tensió en el procés de càrrega o descàrrega és molt important.

Si durant el procés de càrrega hi ha problemes, durant el procés de descàrrega els problemes augmenten, ja que les prestacions i la capacitat de l'ACEE disminueixen ràpidament a mida que s'entrega l'energia. El volant es frena i les variables elèctriques tensió i corrent es veuen agreujades per aquest fet, és a dir, si en el procés de càrrega les dues variables estaven més o menys lligades entre sí, durant el procés de descàrrega, aquestes variables estan afectades per temes mecànics de l'ACEE.

9. CONCLUSIONS I LÍNIES DE FUTUR

9.1. Repàs dels conceptes i idees

Aquest treball ha volgut endinsar-se en els acumuladors elèctrics com sistemes d'estalvi d'energia per sistemes elèctrics. Els acumuladors tenen una gran capacitat emmagatzemar energia i, després, entregar-la a un sistema de propulsió o a un sistema de distribució tant en local com en xarxa moltes vegades sempre que tinguin energia emmagatzemada.

Inicialment els acumuladors eren coneguts com UPS o Sistemes d'Alimentació Ininterromputs (SAI). Més endavant, les aplicacions van augmentar ampliar gràcies a les millores de les seves capacitats i prestacions. I, també, al seu baix manteniment i la gran quantitat de cicles que pot fer. Tot això plegat, va fer que els acumuladors prenguessin una forta popularitat.

Però avanços tecnològics en altres tipus d'acumuladors, sobre tot electroquímics, i l'aparició de noves tecnologies com els supercondensadors i bateries de Li-ió, van fer una forta competència tecnològica als acumuladors cinètics i aquests s'han quedat reservats a aplicacions concretes i específiques.

Per un altre costat, tots els mitjans de transports generen una energia important quan frenen. Actualment hi ha pocs mitjans que aprofitin aquesta energia (cotxes híbrids i alguns tramvies). I els mitjans de transport amb pes elevat i que assolixen velocitats considerables, poden tenir un gran estalvi energètic.

Desgraciadament els mitjans de transport han de moure persones i/o materials, és a dir, l'espai del mitjà és maximitza per poder transportar el major nombre de persones. Això fa que hi hagi poc espai per instal·lar un acumulador d'energia i encara menys afegir per una fonts d'alimentació "ecològica" amb les actuals prestacions i requeriments dels usuaris.

Per altre part, les característiques de funcionament dels transports terrestres i les necessitats elèctriques han reduït la possibilitats d'instal·lació en alguns dels mitjans, sobre tots, aquells que no tenen tracció elèctrica (sistema molt emprat en diferents mitjans de transport).

Més tard, hem vist el mitjà de transport més adequat per implantar un Acumulador Cinètic d'Energia Elèctrica (ACEE). En l'anàlisi inicial s'ha vist que la massa és un factor important així com la velocitat. Per tant, quan més pesat sigui el mitjà de transport, més energia es pot acumular.

Dins de les instal·lacions d'acumuladors, dins del sector ferroviari, hi ha diverses aplicacions d'estalvi energètic. Aquestes aplicacions es divideixen en dos grups: Sistemes embarcats i Sistemes fixes.

Les solucions d'acumuladors d'un grup i de l'altre grup son idèntics. La diferència entre els dos grups d'aplicació, recau en la seva funcionalitat i característiques.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La solució embarcada proporciona estalvi energètic només al vehicle on està instal·lat i l'acumulador està dimensionat per un únic vehicle. Al estar instal·lat al vehicle, l'acumulador ha de tenir una seguretat extra i preparat per treballar sota un nivell de vibracions elevades.

La solució fixa proporciona estalvi energètic al conjunt de l'explotació i l'acumulador ha d'estar sobredimensionat per la possible simultaneïtat de dos vehicles al mateix lloc. Però en una instal·lació fixa, l'acumulador no està sotmès a vibracions i el mateix recinte realitza la tasca de protecció.

El sistema embarcat és un estalvi petit (perquè només afecta al propi vehicle) i nombrós per la quantitat de frenat regeneratiu. El sistema embarcat és un equip específic i únic per cada aplicació.

El sistema fix és un estalvi més gran que el del sistema embarcat. El sistema fix s'instal·la a llocs amb pendent o de grans consums d'energia. Aquest sistema empra equips més estàndards i les solucions poden aplicar-se en diferents explotacions.

Ara bé, no tots els mitjans pesats son adients. Només aquells que tenen un moviment repetitiu, cíclic i freqüent, permeten instal·lar un acumulador per obtenir un sistema eficaç i de rendiment elevat.

Però dins dels mitjans de transports, el vaixell té unes particularitats que el fan el més adient per un acumulador d'energia. Les raons son:

- Sistema de propulsió està sotmès a una oscil·lació repetitiva, cíclica i de freqüència elevada degut a l'onatge. Aquesta oscil·lació provoca un consum energètic addicional, sobre tot, si el motor primari és de combustió interna.
- Reducció de la potència del motor de propulsió principal. Amb un acumulador, el sistema de propulsió pot tenir menys potència i, per tant, és més petit. Si fos així, l'espai cedit podria ser ocupat per l'acumulador.
- Però si el sistema de propulsió és més petit, tots els sistemes auxiliars també serien més petits i deixarien més espai lliure al vaixell.
- En el cas de no poder acoblar l'acumulador al sistema de propulsió principal del vaixell, hi ha l'opció d'afegir motors addicionals i alimentats per l'acumulador. D'aquesta manera, s'obtidria una propulsió extra que ajudaria el principal i reduiria el consum d'aquest.
- Perquè el muntatge fos realment eficaç, es podrien instal·lar uns detectors d'ona al front del vaixell per conèixer, d'avant mà, l'arribada de l'ona i l'alçada de l'ona.
- Al disposar de propulsors extres distribuïts pel casc del vaixell, es podria desenvolupar un control per estabilitzar i nivellar el vaixell front l'onatge. Així milloraria el l'estabilitat i milloraria la comoditat dels passatgers.

I després d'un estudi a fons dels vaixells elèctrics, observem que la majoria dels vaixells amb propulsió elèctrica poden estar dimensionats de forma no correcta. Quan és així, es produeix un efecte d'oscil·lació del sistema de propulsió amb onatge una mica important.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Aquest problema té una fàcil solució que és dimensionar el sistema de propulsió elèctrica tenim en compte l'energia reactiva necessària pels motors que alimenta i els harmònics que introdueixen.

Però si afegim un acumulador d'energia, podem ajustar el sistema de generació elèctrica i obtenir un estalvi de combustible. L'acumulador emmagatzemaria l'energia sobrant del sistema de generació quan el vaixell baixa l'ona i quan el vaixell ha de remuntar l'ona, l'acumulador donaria l'energia emmagatzemada.

Però afegir un acumulador d'energia extern a un sistema de propulsió elèctrica pot no ser fàcil. Si l'acumulador no pugues entregar l'energia al sistema de propulsió, sempre és possible aprofitar l'energia de l'acumulador per assistir uns motors estabilitzadors addicionals o extrems o, en el pitjor dels casos, donar l'energia a sistemes auxiliars però necessaris del propi vaixell.

Un cop vist que existeix una instal·lació capaç d'emprar un acumulador elèctric, s'ha desenvolupat un acumulador cinètic d'energia elèctrica per veure les característiques reals de càrrega i de descarrega.

Al final de les proves, veiem que la problemàtica en el procés de càrrega i descarrega de l'ACEE resideix a la potència instantània i al nivell de tensió. Si la tensió es prou alta, el corrent es manté baix. Però si la tensió no és correcta, llavors el corrent augmenta de forma considerable augmentant els problemes com les màquines elèctriques. Aquests problemes afecten tant a les màquines pròpies de l'acumulador com les màquines elèctriques del sistema de tracció del vehicle.

9.2. Anàlisi dels resultats obtinguts

De les conclusions de les proves, fem els següents anàlisis:

- Dissenyar de zero l'acumulador cinètic d'energia elèctrica permet tenir uns coneixements constructius bàsics per poder realitzar les proves sense malmetre l'ACEE.
- Poder regular el pendent del corrent de càrrega i descarrega gràcies al control electrònic evita l'autodestrucció de la màquina elèctrica de l'ACEE.
- Disposar d'aparamenta, material i equips elèctrics del Laboratori de Electrotècnica ajuda a la realització de les proves.
- Disposar d'un equip o sistema (cotxe elèctric) per fer proves d'un acumulador d'energia és bàsic per conèixer el funcionament del processos de càrrega i descarrega.
- Poder conèixer les característiques elèctriques de l'ACEE amb el banc de proves és molt important.

Després de finalitzar aquest treball, trobem que hagués estat bo millorar els següents detalls:

- Dissenyar un ACEE amb els seus auxiliars que fos instal·lable al cotxe.
- Poder fer més proves a nivells de tensió més elevats.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- Poder tenir més temps per analitzar els resultats de les primeres proves per decidir altres proves.
- Poder fer més proves de càrrega i descàrrega de l'ACEE.
- Poder fer proves en trànsit obert per obtenir uns resultats més reals.
- Poder fer proves amb altres motors/generadors de l'acumulador.

9.3. Conclusions d'aquest treball

Com hem vist, el nivell de tensió d'intercanvi d'energia és bàsic per no tenir corrents de càrrega i descàrrega elevats.

Per tant, és molt important controlar i conèixer la tensió i la corrent en tot procés d'intercanvi d'energia (càrrega i descàrrega) tan a l'acumulador d'energia com en el sistema de tracció elèctrica.

La instal·lació d'un ACEE a un vaixell pot tenir una rentabilitat per l'estalvi energètic que pot fer. Desgraciadament, no s'ha pogut disposar d'un vaixell on poder fer les proves. Però això no vol dir que no sigui possible.

9.4. Línies de futur

En aquest sentit, les línies principals de futur serien les següents:

1. Realitzar proves de l'ACEE amb el cotxe elèctric en "trànsit obert".
2. Emprar un cotxe elèctric amb transmissió directe del motor elèctric a les rodes sense transmissions ni canvis de marxes ni diferencials.
3. Augmentar la capacitat de d'emmagatzemar energia per part de l'ACEE.
4. Seleccionar un motor elèctric de tensió més elevada per poder tenir el corrent més baix.
5. Desenvolupar un ACEE més gran com per fer proves en un vaixell elèctric.

Pel punt 1, donada la poca energia cinètica per carregar l'ACEE com si fos un frenat regeneratiu en el banc de rodets, realitzar proves en trànsit obert representa fer proves reals de frenat regeneratiu. És a dir, conèixer el nivell d'energia recuperable realment. Això significaria un gran avenç per saber útil l'energia emmagatzemada i saber el rendiment energètic del procés de frenat del cotxe elèctric.

Pel punt 2, tenir un cotxe elèctric amb tracció elèctrica directe a les rodes significaria una eliminació o reducció important de les pèrdues per fricció dels engranatges mecànics. Això permetria augmentar el rendiment energètic del conjunt, tant en el procés de càrrega de l'ACEE com en el procés de descàrrega de l'ACEE.

El punt 3 significa un "salt" important cap endavant. Un ACEE més gran, representaria:

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- Un augment de la capacitat del motor/generador de l'ACEE,
- unes proves amb cotxes més grans, furgonetes o camions petits i
- tenir capacitat de control de grans corrents.

El punt 4 vol dir que amb una màquina elèctrica de tensió més alta permetria reduir el corrent, no limitàriem el corrent de càrrega o descàrrega i milloraria el rendiment del conjunt.

El punt 5 és el futur desitjat per aquest treball. Realitzar proves en un vaixell per poder demostrar l'efectivitat d'aquest sistema acumulador (estalvi energètic important). Aquestes proves serien la culminació del treball i una possible sortida "comercial" com a producte industrial d'una empresa tecnològica. Creiem que aquesta línia hauria de continuar, sigui amb un estudiant o amb un doctorand.

A part de l'objectiu del treball, vull comentar que aquest treball ha estat molt interessant i molt important per mi (he hagut d'aprendre i treballar diferents especialitats i aspectes). Durant el temps d'aquest treball, he treballat amb un ull a la feina i l'altre, a la investigació i he "creat" una família. Tenir un ull a cada cantó m'ha permès evolucionar professionalment sense perdre de vista la gran tasca que realitza la formació superior. Personalment em sento satisfet i content amb aquest treball (encara que no ha anat tant lluny com volia) i desitjaria que continués. No cal seguir pels mateixos camins, si no un punt de partida per altres treballs d'investigació o desenvolupament. Aquesta tasca li deixo al meu tutor, que en sap un munt i crec que és el millor en aquest terreny. Moltes gràcies per tot, de tot cor.

10. BIBLIOGRAFIA

10.1. Bibliografia bàsica:

[1] "Desenvolupament del motor elèctric sense coixinets". Dr. Ricard Bosch i Tous. Tesis Doctoral. ETSEIB. UPC. Junio 1987. Barcelona.

[2] "Vehicle elèctric híbrid. Assaig i optimització del conjunt muntat sobre un SEAT 600". Jesús Hernández. Proyecto Fín de Carrera. ETSEIB. UPC. Mayo 2002. Barcelona.

[3] "Estudio de un vehículo híbrido. Aplicación a un SEAT 600". Pedro José Talavera. Proyecto Fín de Carrera. ETSEIB. UPC. Mayo 2002. Barcelona.

[4] "Gestió de l'energia generada per un grup electrogen amb alternador d'inducció de 2 kW per a vehicle híbrid". Jorge Alfonso. Proyecto Fín de Carrera. ETSEIB. UPC. Setembre 2003. Barcelona.

[5] "Os materiais supercondutores em sistemas de armazenamento de energia magnética e cinética". Ponencia de las VI Jornadas Luso-Españolas de Ingeniería Electrotécnica. 7,8 y 9 de Julio de 1999. Lisboa (Portugal). Págs 197-204. Volumen 1, Ed. EDINOVA, Lisboa 1999.

[7] "Static and Dynamic Properties of High Temperature Superconducting Bearings". Dipl. Ing. Eduard Portabella. Dissertation. Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Mai 2000. Erlangung.

[8] "Power quality and air emission tests in a micro turbine cogeneration plant" Lluís Massagués. Artículo del ICREPQ'03. Dpto. Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica. ETSE. URV.

[9] "Máquinas eléctricas", Stephen J. Chapman. Ed.: McGraw-Hill, Segunda edición. Colombia. 1998.

[10] "Máquinas de inducción especiales", E. R. Laithwaite, Ed.: Labor, Primera edición. Barcelona. 1976.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

[11] “Tecnología de los sistemas eléctricos de potencia”. Theodore Wildi. Editorial Hispona Europea, s.a. Barcelona B.32774-1983. ISBN 84-255-0664-6.

[12] “Cálculo industrial de máquinas eléctricas”. Juan Corrales Martín. Tomo I, Ed. Marcombo, Barcelona ISBN 84-267-0439-5.

[14] “Cálculo diferencial e integral”. N. Piskunov, Ed. Montaner y Simon, s.a., Barcelona 1978. ISBN 84-274-0296-1, Depósito legal: S.S. 88-1978.

[15] “Cálculo modular de máquinas eléctricas. Manual práctico”. Juan Corrales Martín, Marcombo-Boixareu Editores, Barcelona, 1994. ISBN 84-267-0985-0, Depósito legal B.32.742-1994.

[16] “Máquinas y accionamientos eléctricos”. Roberto Faure Benito, Ed. Fondo editorial de Ingeniería Naval, Madrid. 2000. ISBN 84-921750-7-9. Depósito legal M-33514.

10.2. Revistes especialitzades

[R1] “International Railway Journal” IRJ, ISSN 0744-5326. Marzo 2003. Páginas 24-25. Kent. Reino Unido.

[R2] “International Railway Journal” IRJ, ISSN 0744-5326. Octubre 2003. Páginas 8-9. Kent. Reino Unido.

[R3] “International Railway Journal” IRJ, ISSN 0744-5326. Febrer 2004, pàgina 34-35-36. Kent. Reino Unido.

[R4] “SACHS DynaStart”. AUTOMOTIVE ENGINEERING INTERNATIONAL. ISSN 00098-2571. Febrery 2002, Volum 110, Number 2. SAE International U.S. Foster City, CA 94404 (California).

[R5] “Proyecto Microbus en la RATP”. VIA LIBRE. Marzo 2002.

[R6] “Locomotora diesel de alta velocidad”. El Foro de la Tecnología ferroviaria.

[R7] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Febrero 2002, Volumen 110, número 2. Páginas 70-72, 77-80. Briemfield, (OH). USA.

[R8] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Agosto 2002, Volumen 110, número 8. Páginas 22, 35-43. Briemfield, (OH). USA.

[R9] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Septiembre 2002, Volumen 110, número 9. Páginas 26-33, 89-96. Briemfield, (OH). USA.

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

[R10] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Octubre 2002, Volumen 110, número 10 Páginas DANA 14. Briemfield, (OH). USA.

[R11] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Diciembre 2002, pàgines 12 i 13.

[R12] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Abril 2003, Volumen 111, número 4. Páginas 8, 10-12, 103, 105-108. Briemfield, (OH). USA.

[R13] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Junio 2003, Volumen 111, número 6. Páginas 8-10. Briemfield, (OH). USA.

[R14] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Julio 2003, Volumen 111, número 7. Páginas 14-16. Briemfield, (OH). USA.

[R15] “Automotive Engineering International”. SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 0098-2571, Septiembre 2003, Volumen 111, número 9. Páginas 70-78. Briemfield, (OH). USA.

[R16] “Autotechnology” EAEC (European Automobile Engineers Cooperation), ISSN 1616-8216. Volumen 2, Agosto 2002. Páginas 13, 46-49, 64-67. Wiesbaden, Alemania.

[R17] “Autotechnology” EAEC (European Automobile Engineers Cooperation), ISSN 1616-8216. Volumen 2, Diciembre 2002. Páginas 16, 26-27, 68-71, 76-78. Wiesbaden, Alemania.

[R18] “Autotechnology” EAEC (European Automobile Engineers Cooperation), ISSN 1616-8216. Volumen 3, Febrero 2003. Páginas 38-39, 60-63. Wiesbaden, Alemania.

[R19] “Autotechnology” EAEC (European Automobile Engineers Cooperation), ISSN 1616-8216. Volumen 4, Agosto 2003. Páginas 24. Wiesbaden, Alemania.

[R20] “Autotechnology” EAEC (European Automobile Engineers Cooperation), ISSN 1616-8216. Volumen 3, Octubre 2003. Páginas 15, 18. Wiesbaden, Alemania.

[R21] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Febrero 2003, Volumen 11, número 1. Página 10. Briemfield, (OH). USA.

[R22] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Abril 2003, Volumen 11, número 2. Páginas 26-28. Briemfield, (OH). USA.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

[R23] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Agosto 2003, Volumen 11, número 4. Pàgina 18. Briemfield, (OH). USA.

[R24] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Abril 2008, pàgines 64 i 65.

[R25] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Setembre 2008, pàgines 41, 42 i 43.

[R26] “Off-Highway Engineering” SAE (Society Automotive Engineers). ISSN 1074-6919, Gener/Febrer 2009, pàgines 13-14-15.

[R27] “European Rail Outlook”, setembre 2005.

[R28] “Railway Gazette”, Juliol 2009.

[R29] “Railway Gazette”, Gener 2013.

[R30] “IEEE industry applications magazine”. IEEE. May June 2003. Pàgines 44-50. USA.

[R31] “ATZ Autotechnology”, Març 2008, volum 8.

[R32] Formula One Regulations 2011.

[R33] Formula One Regulations 2012.

[R34] Formula One Regulations 2014.

[R35] Revista Autopista, Abril 2014.

10.3. Pàgines d'internet

[I1] Urenco Power Technologies. www.upt.com
Data consulta: Juny i Juliol 2004 i Setembre 2005

[I2] www.theflywheel.com
Data consulta: Juny i Juliol 2004

[I3] DANA www.dana.com
Data consulta: Juny i Juliol 2004

[I4] LABORATORY FOR ENERGY AND ENVIRONMENT (LFEE).
www.lfee.mti.edu.com
Data consulta: Setembre 2005

[I5] SACHS. www.zfsachs.ge
Data consulta: Setembre 2005

**ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS**

[I6] RICARDO. www.ricardo.com

Data consulta: Setembre 2005

[I7] TECHNOLOGIES M4. www.tm4.com

Data consulta: Setembre 2005

[I8] ACTIVE POWER. www.activepower.com

Data consulta: Juny i Juliol 2004

[I9] Associació d'Emmagatzemantge d'Energia, Energy Storage Association.

www.energystorage.org

Data consulta: Juliol i Setembre 2015

[I10] PILLER www.piller.com

Data consulta: Juny i Juliol 2004

[I11] EURODIESEL www.euro-diesel.com.

Data consulta: Juny i Juliol 2004

11. ANEXE 1: BALANÇ ENERGÈTIC D'UN TRAMVIA. MÈTODE EXTERN.

11.1. Introducció

El servei de transport públic per tramvies de la ciutat de Murcia està operat per l'empresa UTE Operación Tranvía de Murcia. Actualment l'explotació del servei públic es realitza amb una flota d'onze tramvies.

Durant l'any 2015 es veu la necessitat de conèixer el consum d'un tramvia en funcionament normal, per varies raons com el consum propi del tramvia i les possibles variacions de consum per tipus de conducció, per sistemes auxiliars (aire condicionat, calefacció, ...), per nivell d'ocupació, etc...



Figura A1.1. Traçat del sistema tramviari a la ciutat de Murcia

Com es pot veure, el traçat de la Línia 1 està dividit en dues parts: Un traçat principal (línia verda) amb un servei de dos vies amb freqüència de pas de tramvies de 10 minuts (aproximadament) i un traçat addicional (línia vermella) amb un servei llançadora de via única amb una freqüència de 20 minuts.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Per reduir l'efecte de caiguda de tensió de la catenària (degut a la circulació de 3 tramvies entre dues subestacions), hi ha un cable d'alimentació soterrat i en paral·lel a la catenària anomenat Feeder d'alimentació. Aquest cable es connecta a la catenària cada 500 metres.

11.2. Material mòbil

El material mòbil és un tramvia model Citadis 302 del fabricant Alstom Transport. Aquest tramvia té dues cabines als seus extrems i es bidireccional, és a dir, pot anar en ambdós sentits. Cada unitat està formada per 5 mòduls: M1-C1-Np-C2-M2. Els mòduls M1, Np i M2 tenen bogie, mentre que els mòduls C1 i C2 estan suspesos pels mòduls veïns.

El tramvia és de pis baix (31cm del terra) per facilitar l'accés dels viatgers i reduir l'alçada de les estacions o andanes. Perquè això sigui possible, tots els equips s'instal·len al sostre del tramvia (equips de tracció, equips de climatització, disjuntor, bateries, quadres de distribució, etc....).



Figura A1.3. Unitat mòbil de Tramvia de Murcia

El tramvia té 3 bogies: 2 bogies motors (un al mòdul M1 i l'altre al mòdul M2, als mòduls extrems de la unitat) i 1 bogi remolc al mòdul Np (al centre del tramvia). Cada bogi motor té dos motors de tracció elèctrics de 120kW refrigerats per aigua. Així doncs, el tramvia té 4 motors de tracció amb una potència total de 480kW.

Cada motor està acoblat a un eix del bogi mitjançant uns engranatges (reductor) i eix Cardan. Per tant, cada motor de tracció transmet el parell a un eix del bogi independentment de l'altre eix del mateix bogi.

La captació de corrent des de la catenària es realitza per mitjà d'un pantògraf i després el corrent passa per un disjuntor principal. Després es distribueix cap als dos equips de tracció.

El tramvia té dos equips de tracció localitzats en els mòduls M1 i M2. Cada equip de tracció alimenta els 2 motors d'un mateix bogi motriu. A cada equip de tracció li arriba la consigna de tracció o frenat des del manipulador del pupitre

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

de conducció. El sistema de tracció es completa amb unes resistències de frenat ubicades al mòdul C1 i C2 (associat a l'equip de tracció de M1 i M2 respectivament).

L'esquema elèctric de potència (simplificat) del tramvia es pot veure a la Figura A1.4.

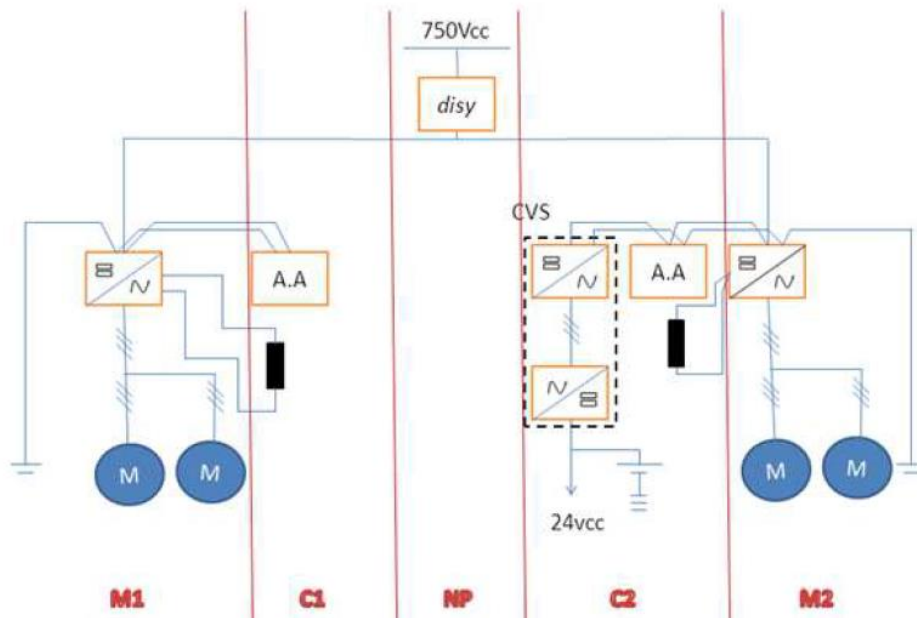


Figura A1.4. Esquema elèctric simplificat del tramvia

Cada mòdul C1 i C2 té un equip de climatització de passatgers de 34kW. A més, hi ha un convertidor auxiliar que produeix corrent altern pels serveis auxiliars del tramvia (14kVA) i un altre convertidor de corrent continu de 13kW a serveis bàsics (seguretat i d'emergència) i per carregar la bateria principal a 24Vcc.

11.3. Objectiu

Per l'empresa explotadora, conèixer el consum energètic d'un tramvia és el primer pas per aplicar mètodes o sistemes d'estalvi energètic. I tot estalvi energètic es tradueix, al final, en un estalvi econòmic per l'empresa.

Els sistemes d'estalvi energètic poden anar des de la conducció eficient, els ajustaments en el sistema de climatització, canvis a d'il·luminació interior fins a sistemes d'acumulació d'energia del procés de frenat o en pendents importants de la via, etc...

11.4. Mètodes de mesura

Per conèixer el consum d'un tramvia es plantegen dos mètodes:

- Mètode de mesura extern.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

b) Mètode de mesura embarcat.

Ara explicarem cada mètode de mesura per veure els avantatges i els inconvenients cada mètode.

Cal comentar abans que l'energia mesurada pel mètode extern proporcionarà el consum energètic total del tramvia, és a dir, el consum del sistema de tracció del tramvia, el consum dels serveis propis i auxiliars del tramvia, el consum de la climatització, etc....tot això mentre realitza el seu recorregut normal (amb viatgers i sota el compliment horari) amb les seves aturades a les estacions. Per tant, el mètode de mesura extern no proporciona l'energia consumida durant la fase d'acceleració del tramvia ni l'energia generada en el procés de frenat.

En canvi, el mètode de mesura embarcat, llegirà els valors de consum de tracció, el consum de la climatització i dels serveis auxiliars d'un tramvia a mida que circula per la línia.

11.5. Mètode extern

El mètode extern consisteix en llegir l'energia consumida de la subestació transformadora que alimenta la línia aèria o catenària mentre els tramvies realitzen el servei comercial amb tot els sistemes funcionant normalment.

L'empresa explotadora disposa d'un sistema de Telecomandament d'Energia (SCADA). Aquest sistema engloba el següent:

- telecomandament de les subestacions transformadores (que alimenten la catenària),
- telecomandament dels seccionadors de la catenària
- sistema de lectura de varis paràmetres elèctrics (corrent, tensió, energia activa, energia reactiva, etc...) en diferents interruptors de la subestació.

Gràcies a aquest sistema Scada, podem conèixer l'energia consumida pels tramvies quan circulen en servei comercial. Però cal tenir en compte que la configuració d'alimentació de catenària és en PI. És a dir, les 6 subestacions alimenten la mateixa catenària a l'hora.

La catenària o la línia aèria de contacte de la traça que alimenta els tramvies està dividida en seccions elèctriques (veure Figura A1.5). Totes les seccions elèctriques de la catenària estan unides (per un seccionador de línia o per un interruptor d'alimentació) excepte els extrems.

Si volem conèixer el consum elèctric d'un tram de catenària a mida que circulen els tramvies, cal trobar un tram que no sigui "afectat" per les seccions veïnes de catenària ja que, com que estan unides, puguin aportar o treure energia del tram. Per tant, si volem obtenir dades reals (evitant aportacions o consums dels trams veïns) cal analitzar les dades dels trams de catenària extrems o aïllats.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

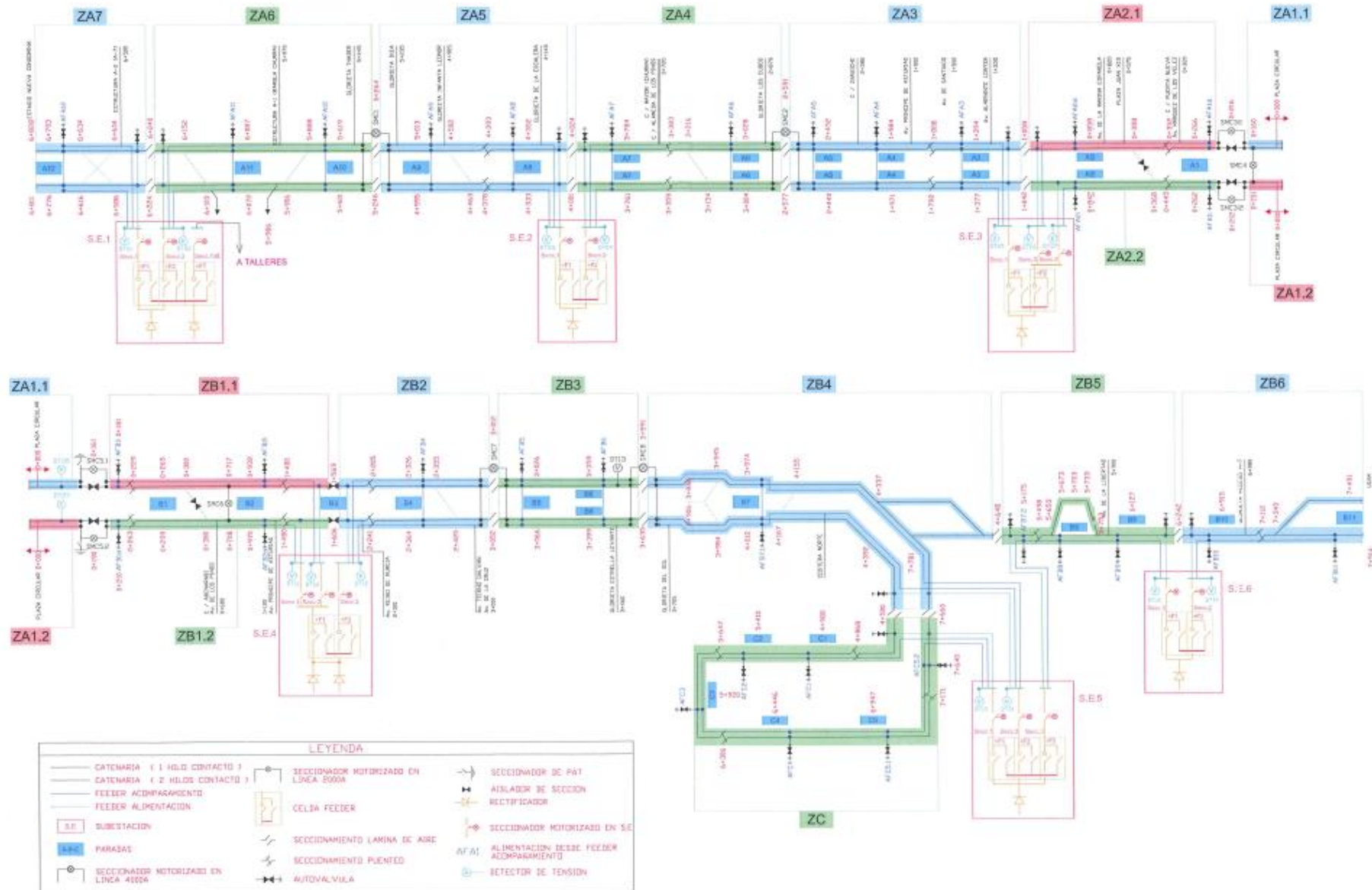


Figura A1.5. Esquema elèctric de la catenària

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

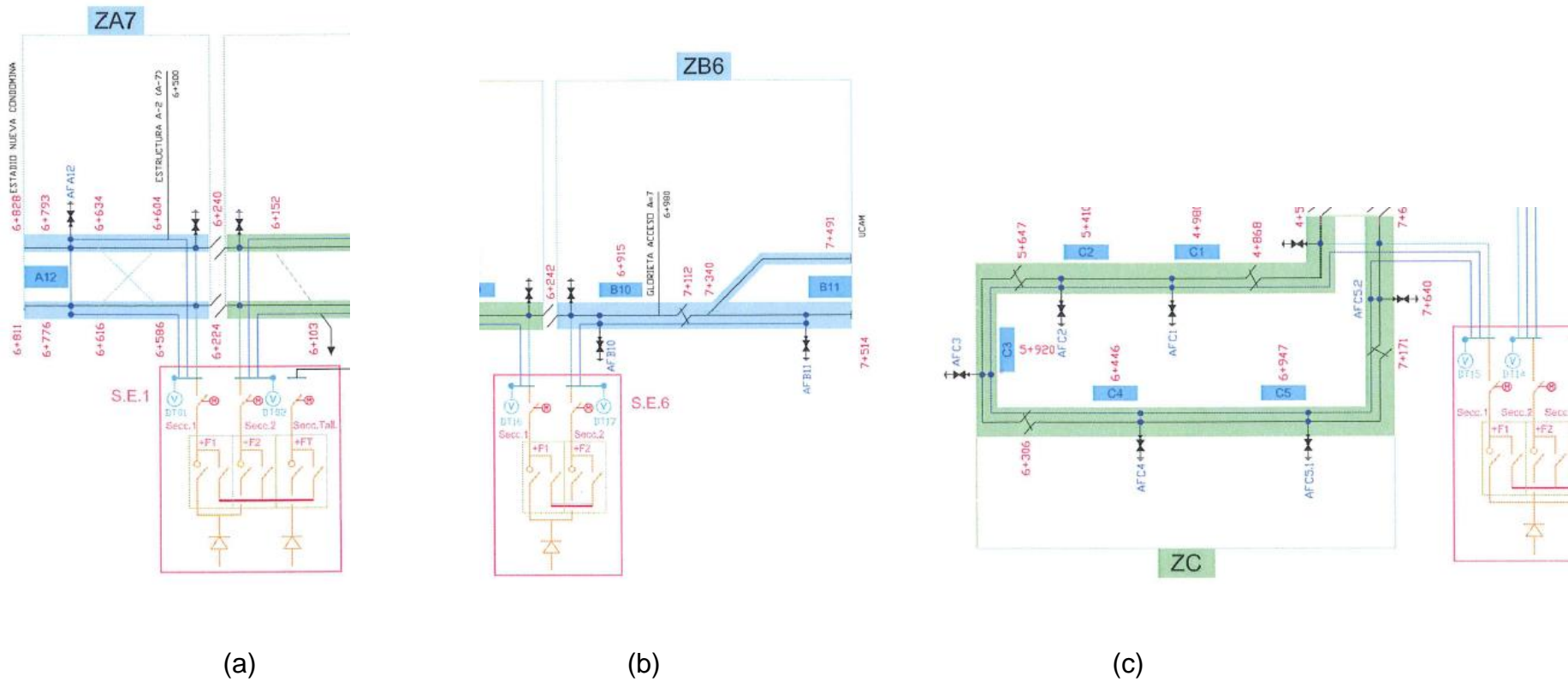


Figura A1.6. Seccions extrems:
 (a) Secció elèctrica extrem ZA7 de catenària
 (b) Secció elèctrica extrem ZB6 de catenària
 (c) Secció elèctrica extrem ZC de catenària

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Si observem la Figura A1.5 (la catenària de tota la línia), veiem que la catenària sempre està connectada gràcies als seccionadors de línia i als seccionadors de subestacions. Però els extrems de la catenària no tenen connexió amb les seccions veïnes, és a dir, son seccions o trams "aïllats". Aquestes seccions "aïllades" s'identifiquen com: ZA7, ZB6 i ZC. A la Figura A1.6. es poden veure les seccions elèctriques amb més detall.

D'aquesta manera, podrem conèixer el consum d'un tramvia sense influència d'altres tramvies i sense re-alimentacions d'altres seccions elèctriques de catenària. En les seccions extrems només hi ha un únic interruptor (Feeder) com a alimentació i no hi ha cap seccionador de connexió o pont d'unió.

Per necessitats de l'explotació del propi transport públic, les seccions elèctriques extremes ZA7 i ZB6 tenen estacions "inici" i "final". Aquestes estacions "inici" i "final" funcionen com estacions "reguladores" de servei. És a dir, els tramvies realitzen ajustos o regulacions de freqüència de pas per la resta de la línia o xarxa. Aquests ajustos o regulacions son aturades controlades de tramvies. Per tant, els tramvies queden aturats entre 5 i 13 minuts a les aquestes estacions i, mentre estan aturades, els sistemes de climatització i sistemes auxiliars queden encesos.

Aquest consum elèctric extra dels tramvies passa de forma repetitiva durant tot el dia. Per tant, el consum de les seccions ZA7 i ZB6 amb estacions "inici" i "final" es superior a l'energia consumida pels tramvies quan circulem per la línia. A més, les estacions "inici" poden arribar a tenir dos tramvies (un tramvia regulant i un altre entrant a la mateixa secció elèctrica) o tres tramvies si a la estació "inici" hi ha un tramvia en reserva. Conclusió, el consum energètic en les estacions reguladores "inici" o "final" és molt superior al consum d'un tramvia quan circula normalment per la línia.

Ara bé, la secció elèctrica ZC és un tram aïllat sense estacions inicials ni finals de servei (només té estacions normals). Per tant, en principi, l'energia consumida en aquesta secció del traçat és l'energia que consumeix un tramvia en servei comercial en condicions normals.

Elèctricament, aquesta secció ZC només està alimentada per un únic interruptor des de la subestació transformadora SE5. I aquest interruptor està equipat amb elements de mesura per poder obtenir dades.

Aquesta secció o tram ZC té 3.160 metres de distància té 5 estacions i 6 cruïlles amb cotxes (és a dir, com a mínim hi hauran 5 frenades i 5 arrancades). Encara que no hi ha diferència de nivell entre l'entrada i la sortida, dins del tram hi han pendents (ascendent i descendent).

Si accedim a les dades del consum energètic de l'interruptor que alimenta aquesta secció mitjançant el sistema Scada, veiem que hi han valors de consum d'energia cada 2 segons en MWh. Si filtrem aquests valors i prenem els valors cada hora durant una setmana i dividim per la quantitat de tramvies que han circulat en aquell dia, obtenim el següent gràfic: (veure Figura A1.7).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

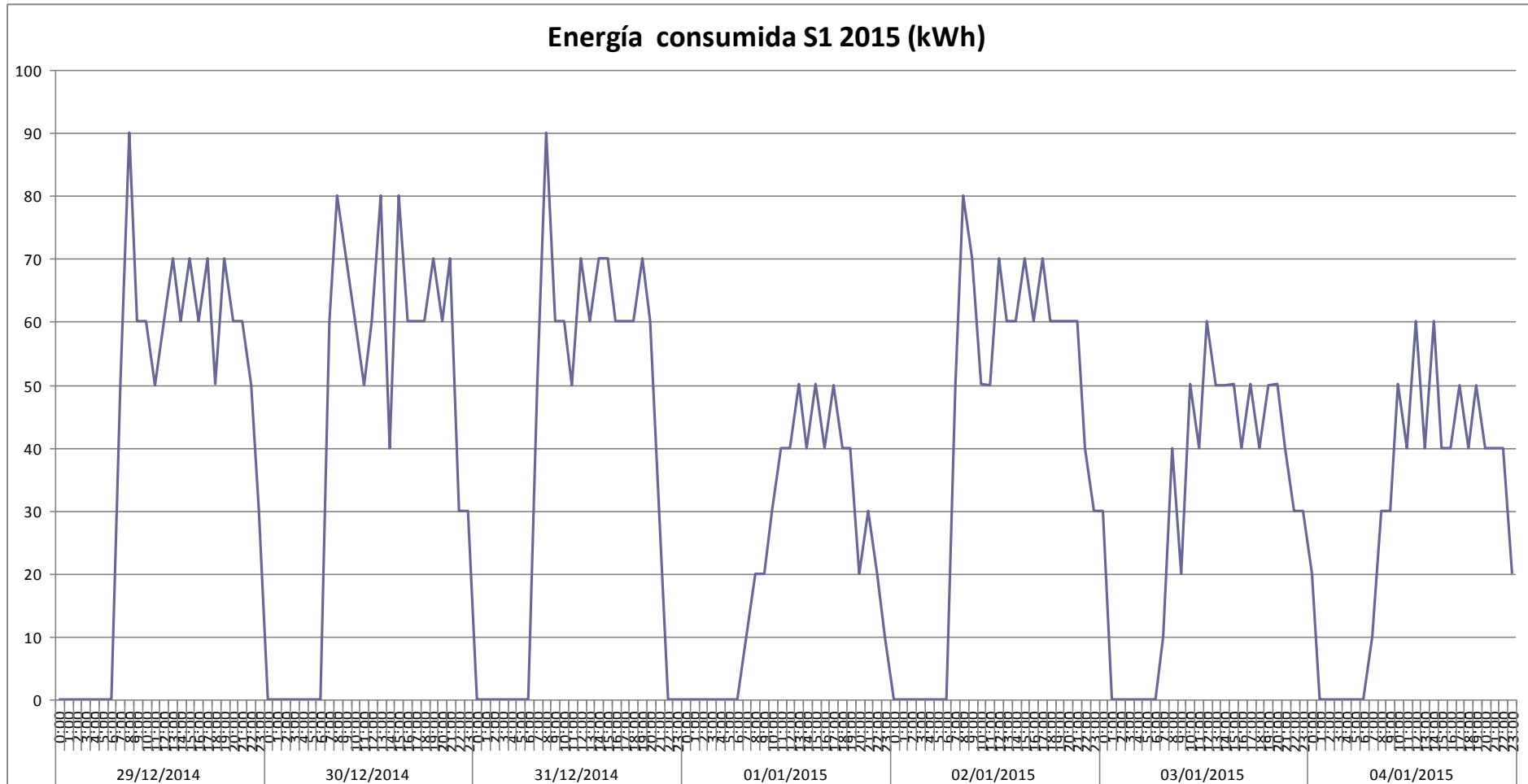


Figura 1A.7. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 1
(del 29 de desembre de 2014 al 4 de gener de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

La Figura 1A.7 pertany al consum energètic mig de la secció elèctrica ZC de la setmana 1 de l'any 2015 (des del 29 de desembre de 2014 fins al 4 de gener de 2015) per tramvia. Com podem veure, amb el consum energètic per hora podem distingir els dies de la setmana. També s'aprecia com el servei comercial és de 18 hores amb una "aturada" de 6 hores entremig dels dies sense consum d'energia i es pot apreciar la diferència entre matí, migdia i nit.

Un dia qualsevol, els tramvies surten de Cotxeres d'un en un amb un separació de temps elevat (ja que a primeres hores del matí no hi ha gran demanda). A mida que avança el matí, augmenta la quantitat de tramvies a la línia i s'assoleix una freqüència de pas de 9 o 10 minuts (suficients per cobrir la màxima demanda). Aquest pic de consum d'energia es reflecteix al perfil del gràfic.

Un cop superada la màxima demanda matutina, la demanda baixa i s'estabilitza i també baixa el consum energètic. Al final del dia passa el mateix, a mida que s'acaba el dia, els tramvies van deixant la línia i entrant a les Cotxeres. Per això, el consum energètic baixa.

El consum d'energia mig per dia i tramvia al dia 29 de desembre de 2014 (feiner) és de 60kWh. El consum d'energia mig per dia i tramvia al dia 1 de gener de 2015 (festiu) és de 32kWh. El consum d'energia mig per dia i tramvia al dia 3 de gener de 2015 (dissabte) és de 42kWh. El consum d'energia mig per dia i tramvia al dia 3 de gener de 2015 (diumenge) és de 42kWh.

El consum energètic mig d'un tramvia a un festiu només té un 53% (aproximadament) del consum energètic mig d'un tramvia a un dia feiner. El consum energètic mig d'un tramvia a un dissabte només té un 70% (aproximadament) del consum energètic mig d'un tramvia a un dia feiner.

Aquesta diferència de consum energètic entre un feiner i un festiu es deu a que als dies festius, el servei comercial es realitza amb una freqüència de pas de 20 o 15 minuts (respecte els dies feiners amb una freqüència de 10 o 9 minuts). Per tant, només circulen entre 6 i 7 tramvies. En un dissabte, la freqüència de pas és la mateixa de un dia festiu però el servei comercial es manté més temps i, per tant, hi ha més consum d'energia.

L'empresa explotadora ha classificat uns dies tipus segons les necessitats del servei. Sempre cal cobrir la demanda de passatgers, és a dir, quan més demanda, més tramvies a la xarxa. Els dies tipus son: "Feiner escolar", "Feiner", "Dissabte", "Diumenge o Festiu" (de més a menys tramvies en circulació).

Aquest mateix anàlisi el repetim per les següents setmanes de l'any 2015:

- Setmana 8 (del 14 al 20 de febrer) → Figura A1.8,
- Setmana 21 (del 18 al 24 de maig) → Figura A1.9,
- Setmana 34 (del 17 al 23 d'agost) → Figura A1.10,
- Setmana 40 (del 28 de setembre al 4 d'octubre) → Figura A1.11,
- Setmana 51 (del 14 al 20 de desembre) → Figura A1.12.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

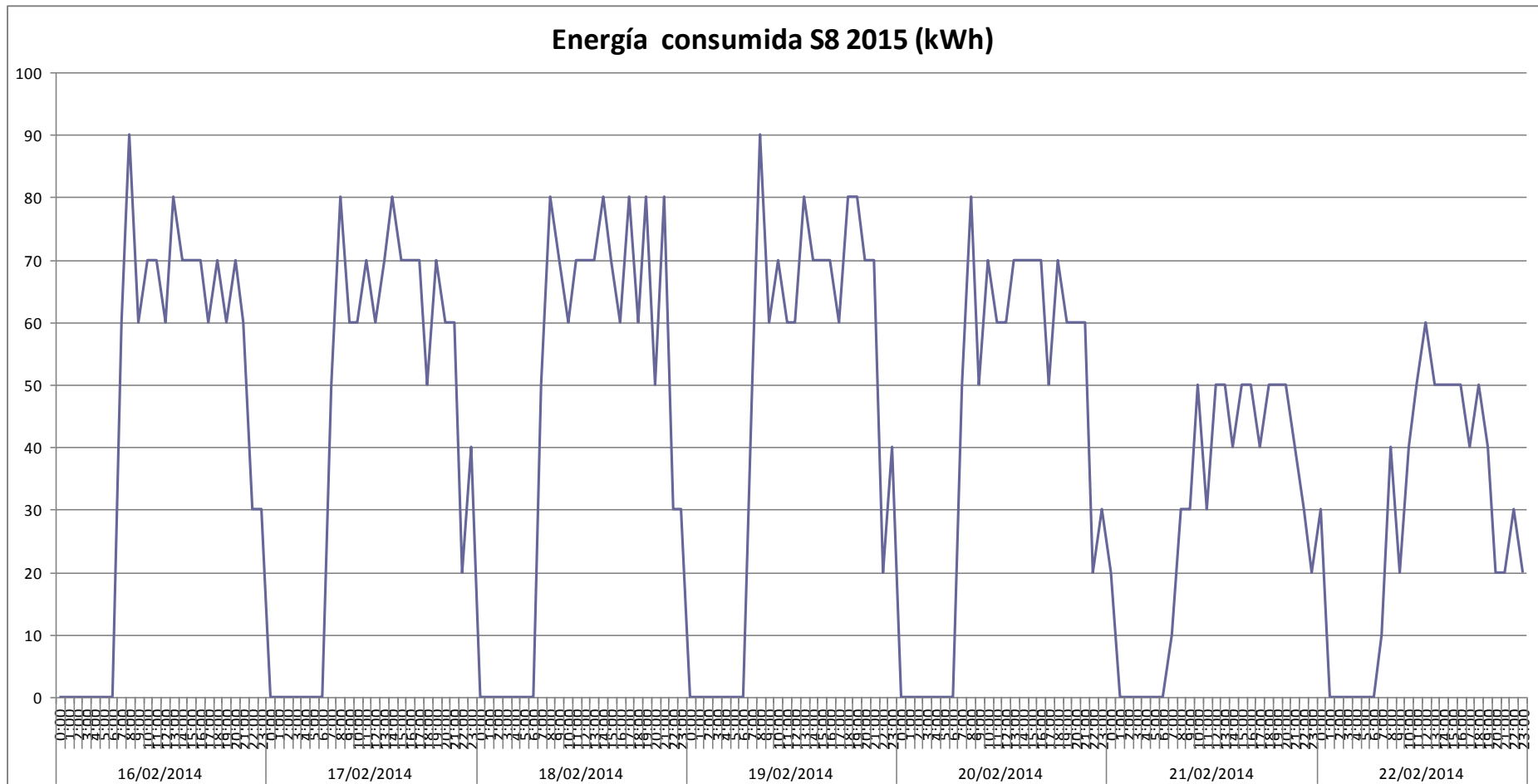


Figura 1A.8. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 8
(del 14 al 22 de febrer de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

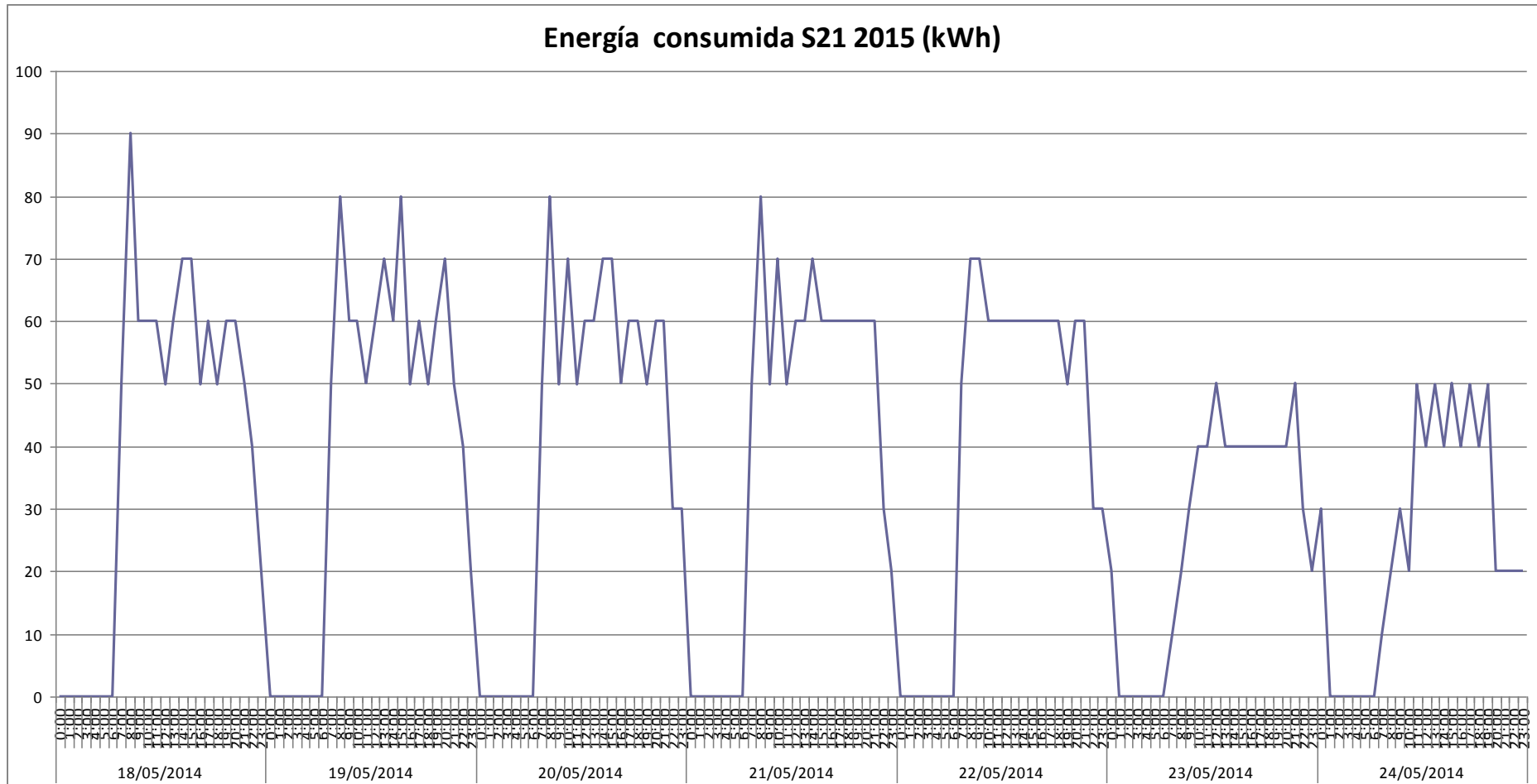


Figura 1A.9. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 21
(del 18 al 24 de maig de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

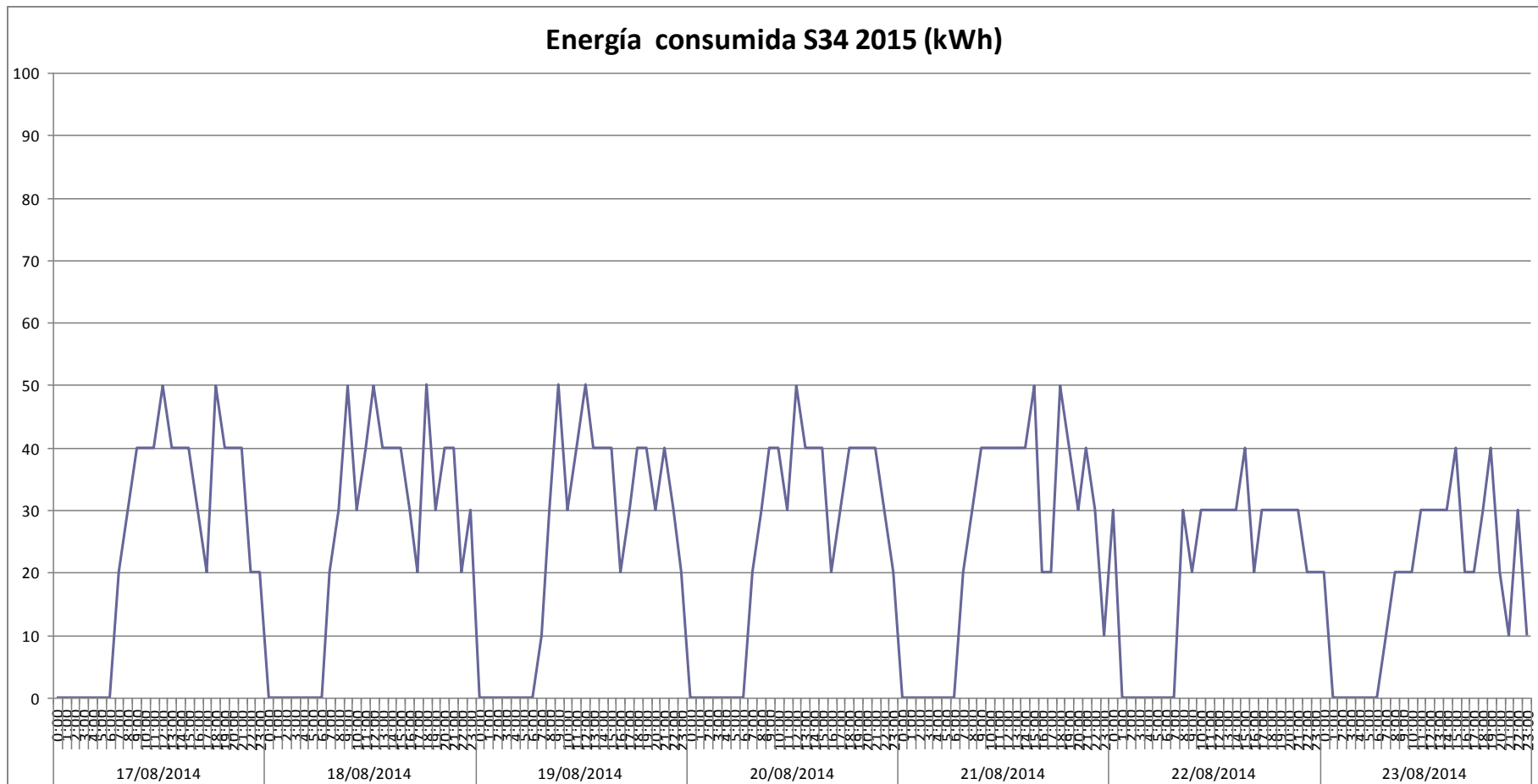


Figura 1A.10. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 34
(del 17 al 23 d'agost de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

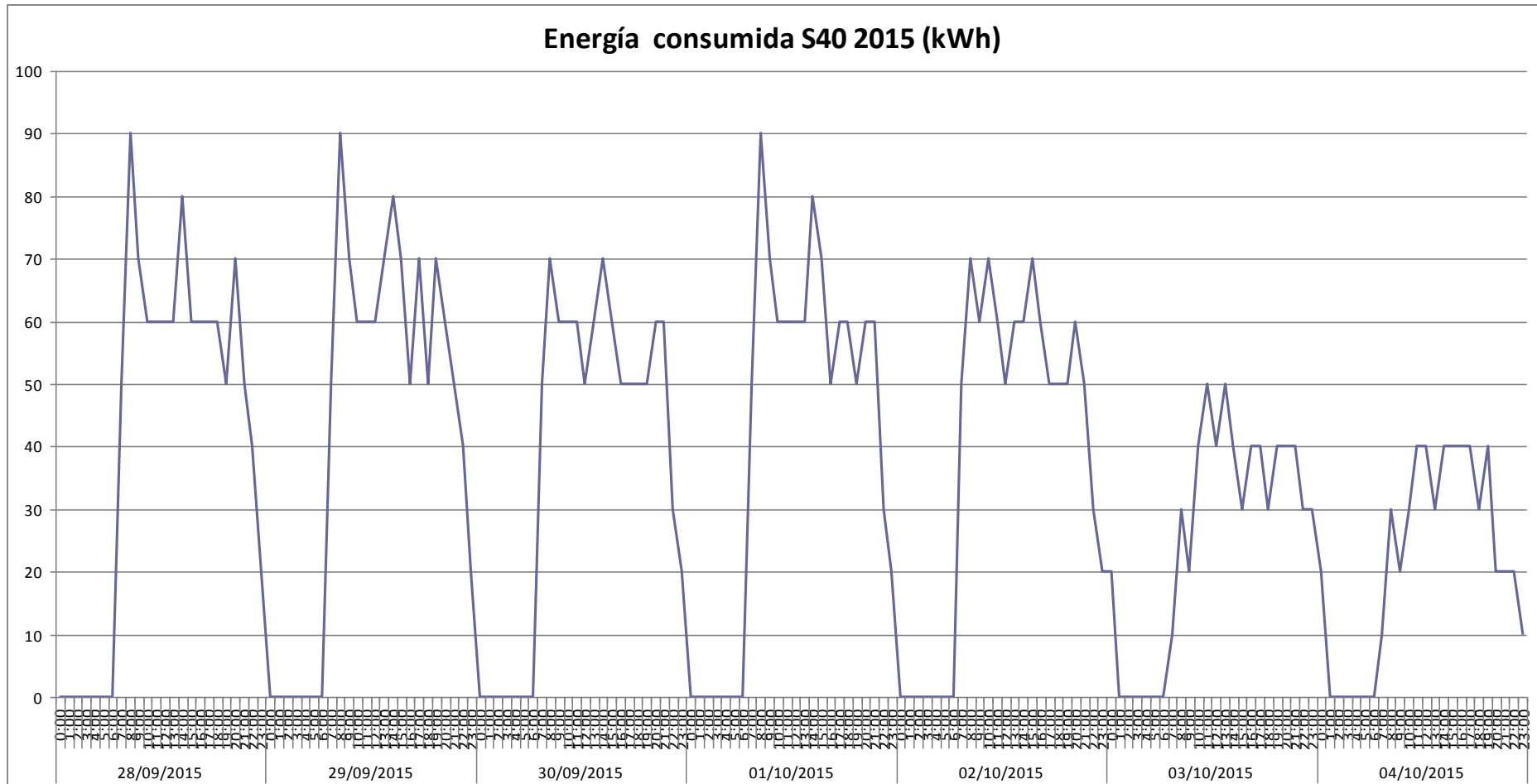


Figura 1A.11. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 40
(del 28 de setembre al 4 d'octubre de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACE APLICABLES EN TRANSPORTS

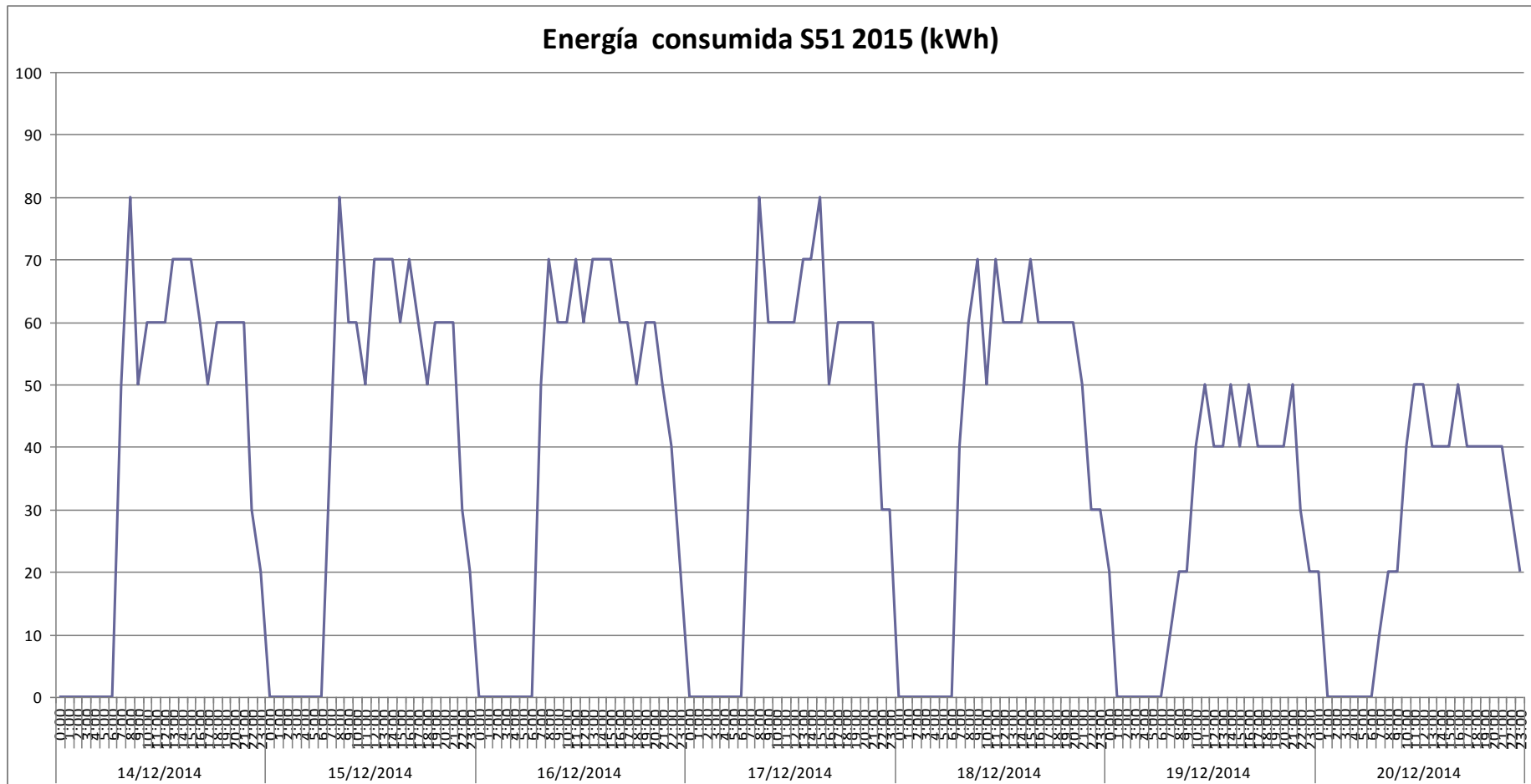


Figura 1A.12. Consum energètic de la secció ZC durant la setmana 51
(del 14 al 20 de desembre de 2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A les Figures A1.8 (setmana 8), A1.9 (setmana 21), A1.10 (setmana 34), A1.11 (setmana 40) i A1.12 (setmana 51), s'observa com el perfil de consum energètic per tramvia i per cada dia son similars.

El perfil diari de consum d'energia per tramvia es repeteix dia a dia durant tot l'any. Però no tots els dies tenen el mateix consum energètic mig, és a dir, tot depèn de la demanda de viatgers.

A la Figura A1.13 es pot veure l'energia consumida total per dia a les 6 setmanes en estudi. Observem com els dies festius es consumeix menys que els dies feiners tant a l'agost com a la resta de l'any.

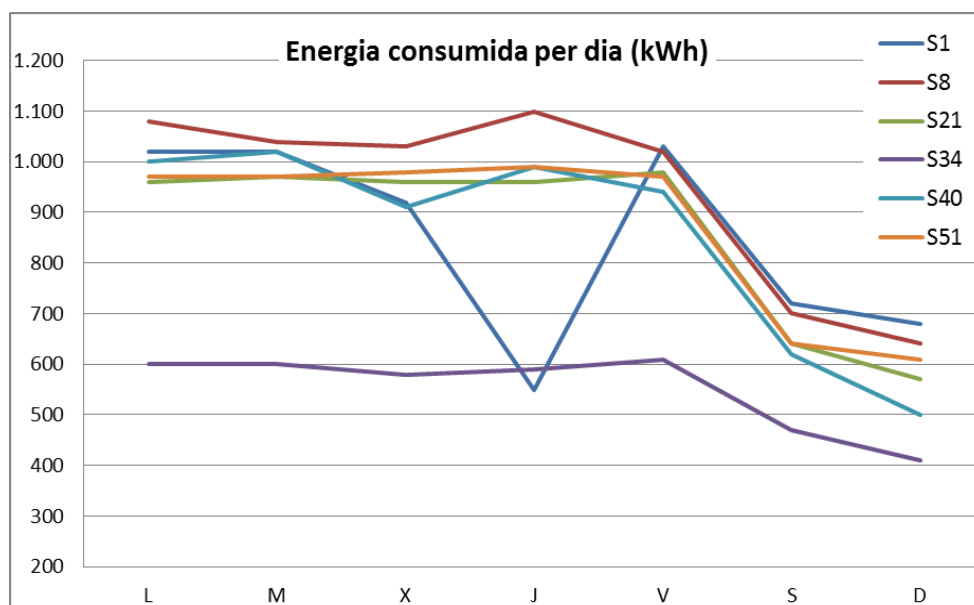


Figura 1A.13. Comparació del consum energètic total per dia a la secció ZC a les 6 setmanes: S1-S8-S21-S34-S40-S51.

Com es pot veure, el consum energètic d'un dia feiner (no d'agost) està als voltants de 1.000kWh a la secció ZC. El consum energètic d'un dia festiu (no d'agost) està als voltants de 600kWh a la secció ZC. Durant el mes d'agost, el consum energètic d'un dia feiner està als voltants de 600kWh, mentre que en un dia festiu d'agost, està als voltants de 450kWh.

Aquesta diferència es deu a que el mes d'agost hi ha una menor demanda de viatgers, un menor servei comercial amb una freqüència de pas de 15 a 20 minuts on només circulen 7 tramvies. Això es tradueix en un menor consum d'energia.

El consum d'energia mig per tramvia del mes d'agost és del 57% respecte un mes normal (aproximadament).

A la Figura A1.14 es pot veure l'energia consumida mitja per hora segons el dia a les 6 setmanes en estudi. En aquest gràfic, es veu com l'energia consumida

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

mitja per hora està als voltants de 60kWh en un dia feiner que no sigui a l'agost. El consum mig per hora a un dia feiner de l'agost baixa fins als 37kWh. En un dia festiu no d'agost, el consum mig per hora és de 37kWh mentre que un festiu d'agost, el consum mig per hora baixa fins els 26kWh.

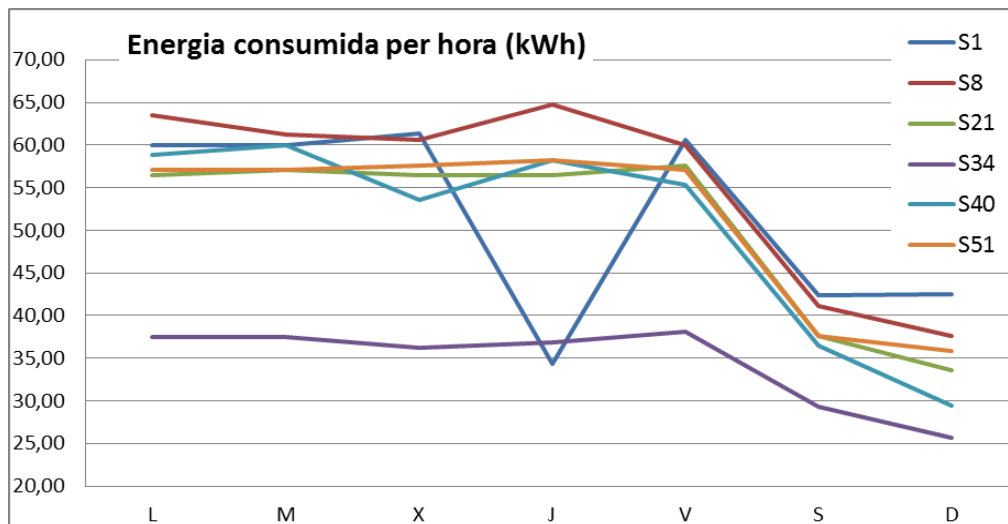


Figura 1A.14. Comparació del consum energètic mig per dia i tramvia a la secció ZC a les 6 setmanes: S1-S8-S21-S34-S40-S51.

Però les mesures mitjançant el sistema Scada no són gaire precisos ja que el programa llegeix l'energia consumida en unitats de MWh. Aquestes unitats no varien en un dia. Les variacions es troben als decimals i estan limitats en quantitat. Per tant, la precisió obtinguda és de 10kWh. Això es pot veure en les Figures A1.8, A1.9, A1.10, A1.11 i A1.12.

Si en comptes de analitzar el consum horari, recollim tots els valors de consum elèctric del tram ZC d'un 1 any, obtenim valors de consum elèctric diaris. Si els dividim pels tramvies que han circulat cada dia, obtindrem el consum mig d'un tramvia d'un any sencer.

La Figura 1A.15 mostra aquesta evolució del consum elèctric de la secció elèctrica ZC en estudi. Al gràfic es poden apreciar pics màxims i pics mínims. El mínim anual és de 9.318kWh assolit el dia 24 de desembre. Aquest dia es realitza un horari reduït on el servei comercial es tanca a les 10 de la nit. El màxim anual és de 14.400kWh assolit el dia 4 d'abril de 2015. Aquest dia hi ha un coneixem a la ciutat molt important fins les dues del matí i la demanda és màxima. La resta del consum diari es mou entre 14kWh i 10kWh.

Els consums mínims coincideixen en dies festius de l'any però hi ha excepcions com: el diumenge d'obertura comercial just abans de Reis (4/01/2015), el primer festiu de rebaixes després de Nadal (11/01/2015) i la Fi de Festes de Primavera (11/04/2015).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA
DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

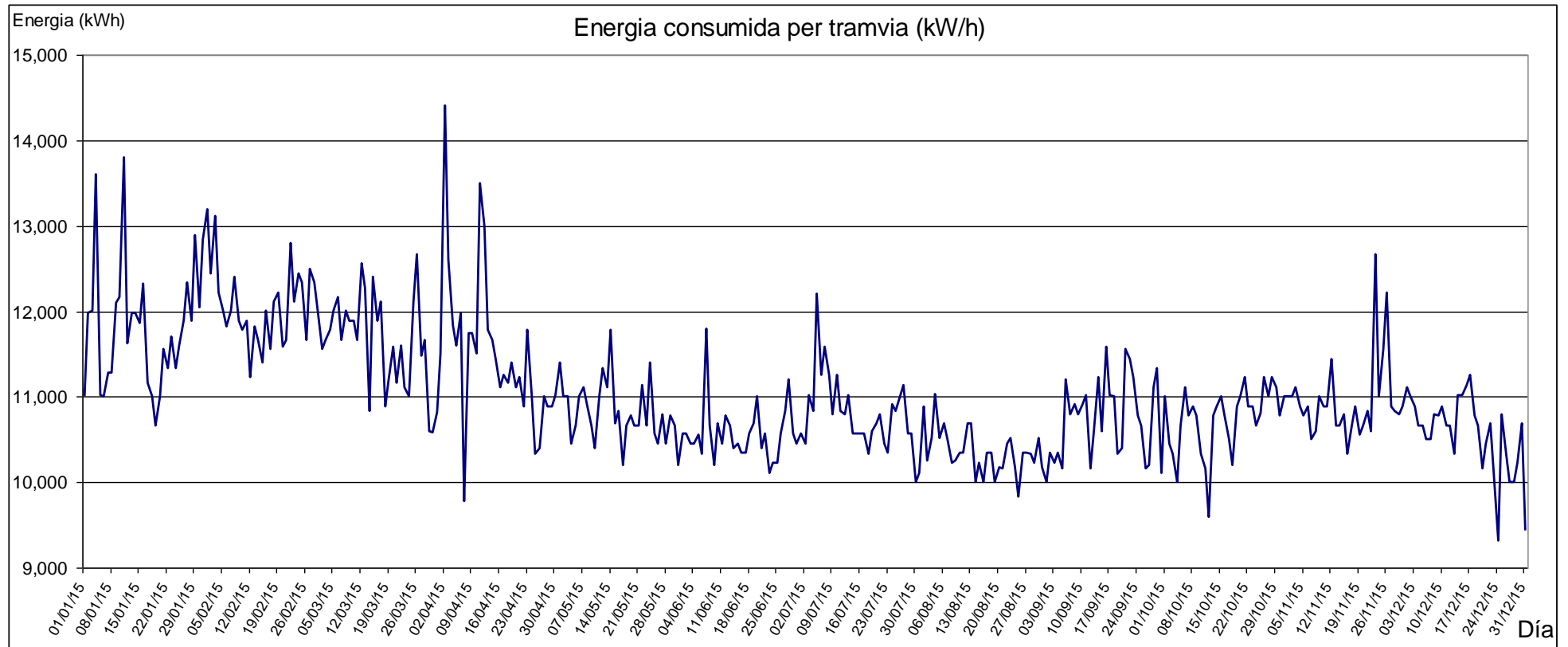


Figura A1.15. Consum mig d'un tramvia en la secció elèctrica ZC del 1 de gener al 31 de desembre de 2015

11.6. Conclusions del mètode extern

El consum energètic està afectat per molts factors. És clar que si hi ha més demanda, hi ha més tramvies en circulació i, per tant, més consum. A l'estiu, la demanda és baixa, circulen menys tramvies i, per tant, hi ha menys consum.

Els factors poden estar relacionats amb la quantitat de passatgers, amb la forma de conducció i amb l'estat de la via. Intentar identificar els paràmetres o factors que afecten directament o indirectament al consum energètic d'un tramvia a partir d'un gràfic és complicat.

Dels principals factors (viatgers, conducció i vies), podem dir que les qüestions energètiques relacionades amb els passatgers son:

- Pes. La quantitat de passatgers es tradueix en pes. Més pes implica major energia per moure tant accelerar com per mantenir la velocitat.
- Climatització. Quan hi ha més passatgers, la climatització ha de treballar més intensament. Per un costat, quan hi ha més passatgers, les portes d'accés s'obren més freqüentment i la climatització ha de restablir la temperatura interior, sigui a l'estiu com a l'hivern. I en el cas de l'estiu, el consum energètic és major ja que a més de la radiació solar, el propi calor humà obliga a la climatització a emprar la potència màxima.
- Fregament. L'increment de pes augmenta el fregament entre les rodes i les vies.

Les qüestions energètiques relacionades amb la conducció son

- Acceleració demandada pel conductor. L'acceleració inicial és important per adquirir la velocitat adequada del tramvia el més aviat possible.
- Variació de la acceleració (o JERK). Si hi han acceleracions brusques, és a dir, no acceleracions suaus i continues, hi ha un major consum.
- La velocitat màxima.

Les qüestions relacionades amb les vies son:

- Perfil del traçat. Si el perfil del traçat té força desnivells, el tramvia necessita més energia per pujar.
- Trànsit. Si hi ha cruïlles amb els cotxes, el tramvia disminuirà la velocitat per evitar col·lisions. Al reduït la velocitat, després haurà d'accelerar i, per tant, hi ha un major consum energètic.
- Brutícia/Greix. Les vies han d'estar netes de brutícia. La brutícia augmenta el fregament i, per tant, més energia consumida. Per altre costat, si no hi ha prou greix per evitar el fregament de la pestanya de les rodes al fer les corbes, també hi haurà un major consum.

Com veiem tots aquests factors dificulten l'obtenció d'un valor concret de d'energia consumida del tramvia. A més, el sistema de mesura no és prou exacte. De les dades obtingudes fins ara, poden dir que el consum tramvia en funcionament normal en pla per kilòmetre son uns 4kWh/km.

Però a grans trets, l'evolució anual s'apropa a un "curs acadèmic". Una davallada als mesos de juny, juliol, agost i setembre i a les setmanes de

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

vacances escolars. Aquesta influència es veu esmorteïda principalment per l'efecte de calefacció dels mesos gener i febrer i per l'aire condicionat dels mesos juny, juliol i agost.

La falta de precisió del sistema de mesura també es pot veure a les Figures 1A.17, 1A.18, 1A.19, 1A.20, 1A.21 i 1A.22. Totes les figures mostren el corrent, la tensió i la potència en diferents franges horàries a diferents dies quan circula un únic tramvia per la secció elèctrica ZC.

Com podem veure, el corrent té pics que es poden associar als moviments del tramvia. Quan el corrent és positiu, el tramvia està traccionant i quan el corrent és negatiu, el tramvia està frenant. Hi han 5 paquets de pics de corrent que corresponen als arrancs de les sortides de les 5 estacions del tram en estudi.

El corrent negatiu correspon als processos de frenat, és a dir, l'energia generada pel tramvia va a altres seccions elèctriques de la línia. El corrent negatiu no retorna a la xarxa elèctrica ja que el pont rectificador de la subestació és d'un quadrant. La energia sobrant va a altres zones o seccions elèctriques de la catenària degut a la connexió dels interruptors d'alimentació a la mateixa sortida del rectificador. Veure Figura 1A.16.

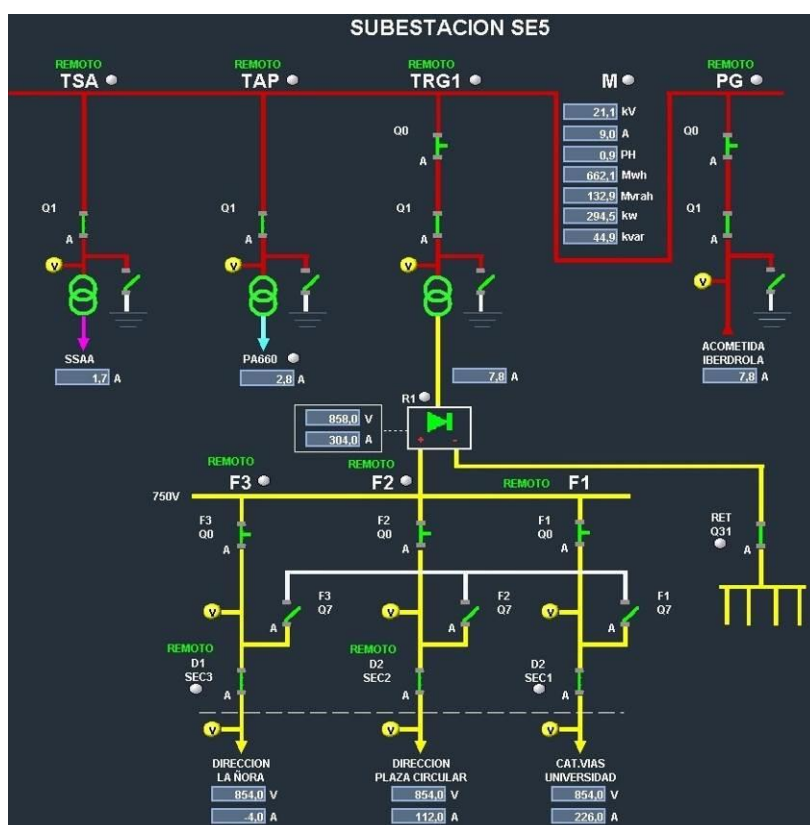


Figura A1.16. Esquema simplificat de la Subestació SE5.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

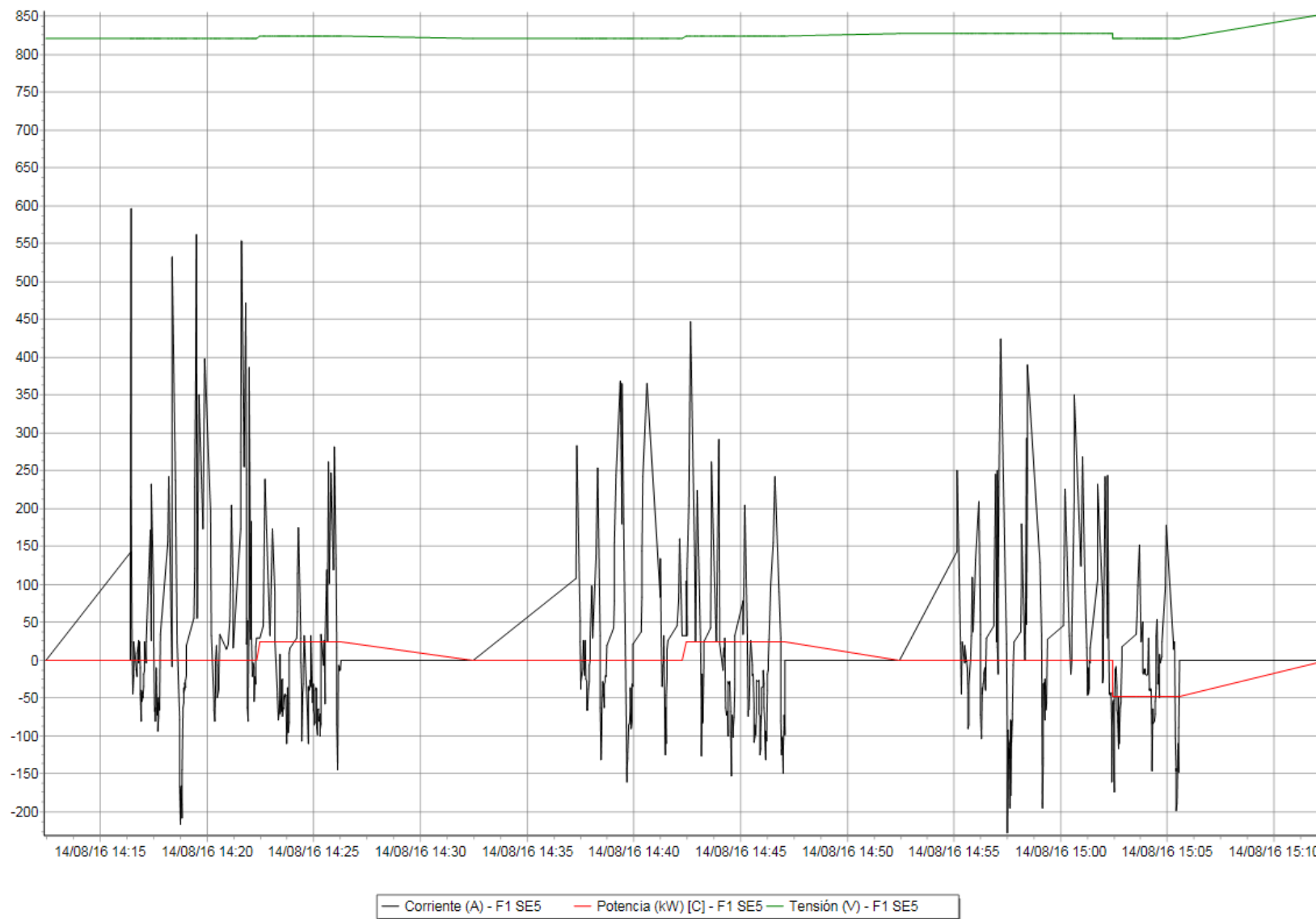


Figura A1.17. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:10 a 15:15 hores del dia 14 d'agost de 2016 (diumenge).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

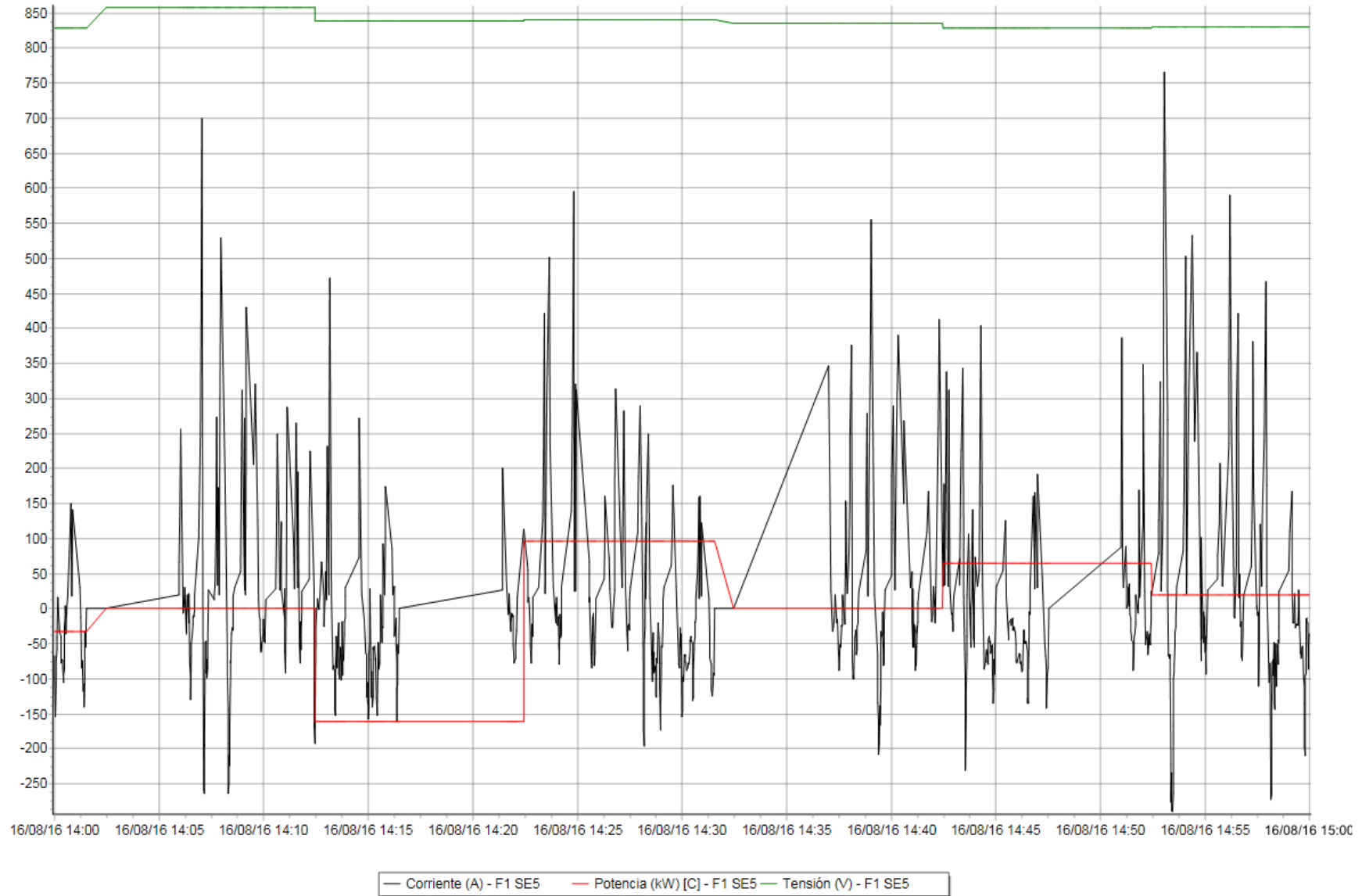


Figura A1.18. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:00 a 15:00 hores del dia 16 d'agost de 2016 (dimarts).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

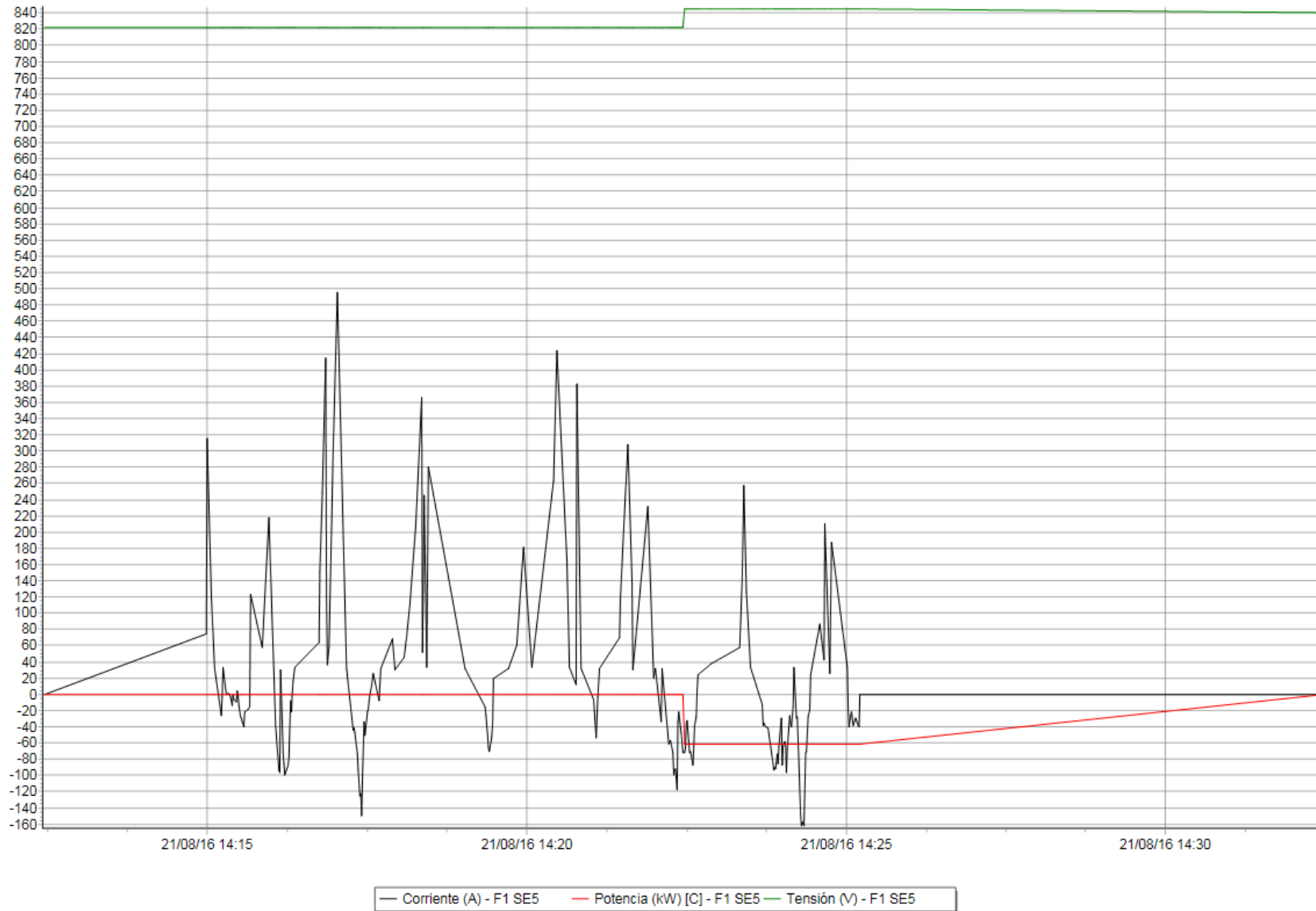


Figura A1.19. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:15 a 14:30 hores del dia 21 d'agost de 2016 (diumenge).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

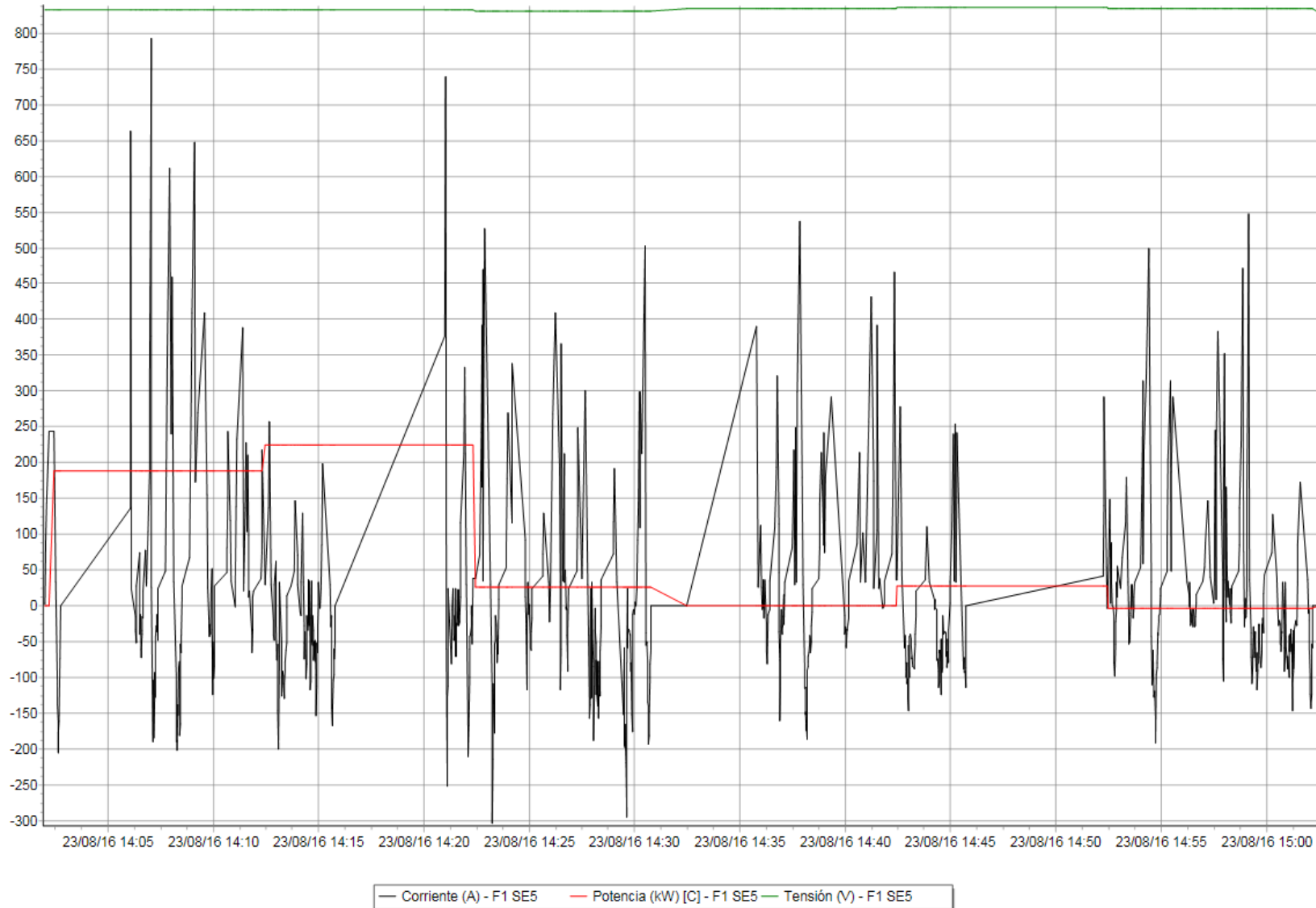


Figura A1.20. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:05 a 15:00 hores del dia 23 d'agost de 2016 (dimarts).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

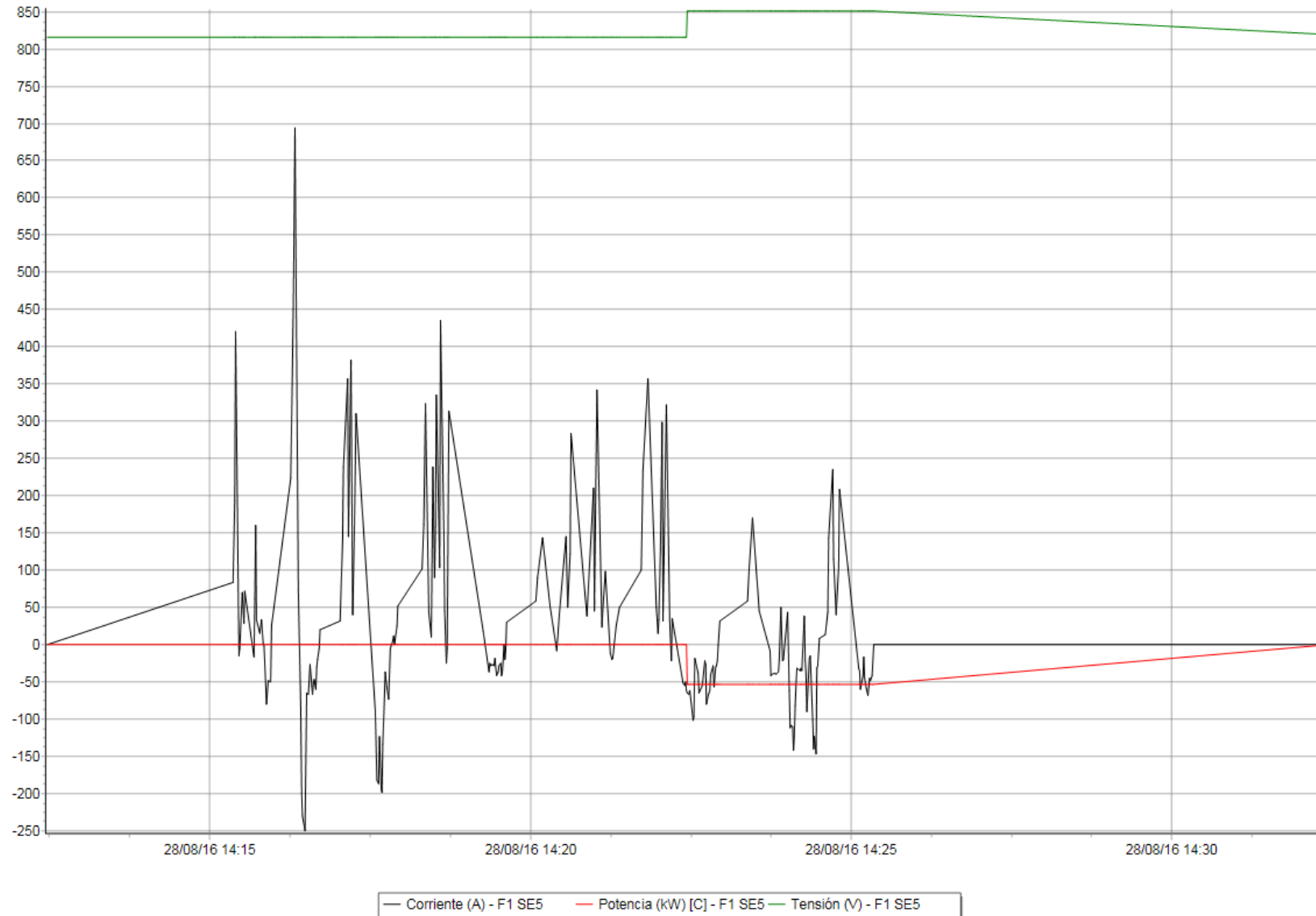


Figura A1.21. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:15 a 14:30 hores del dia 28 d'agost de 2016 (diumenge).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

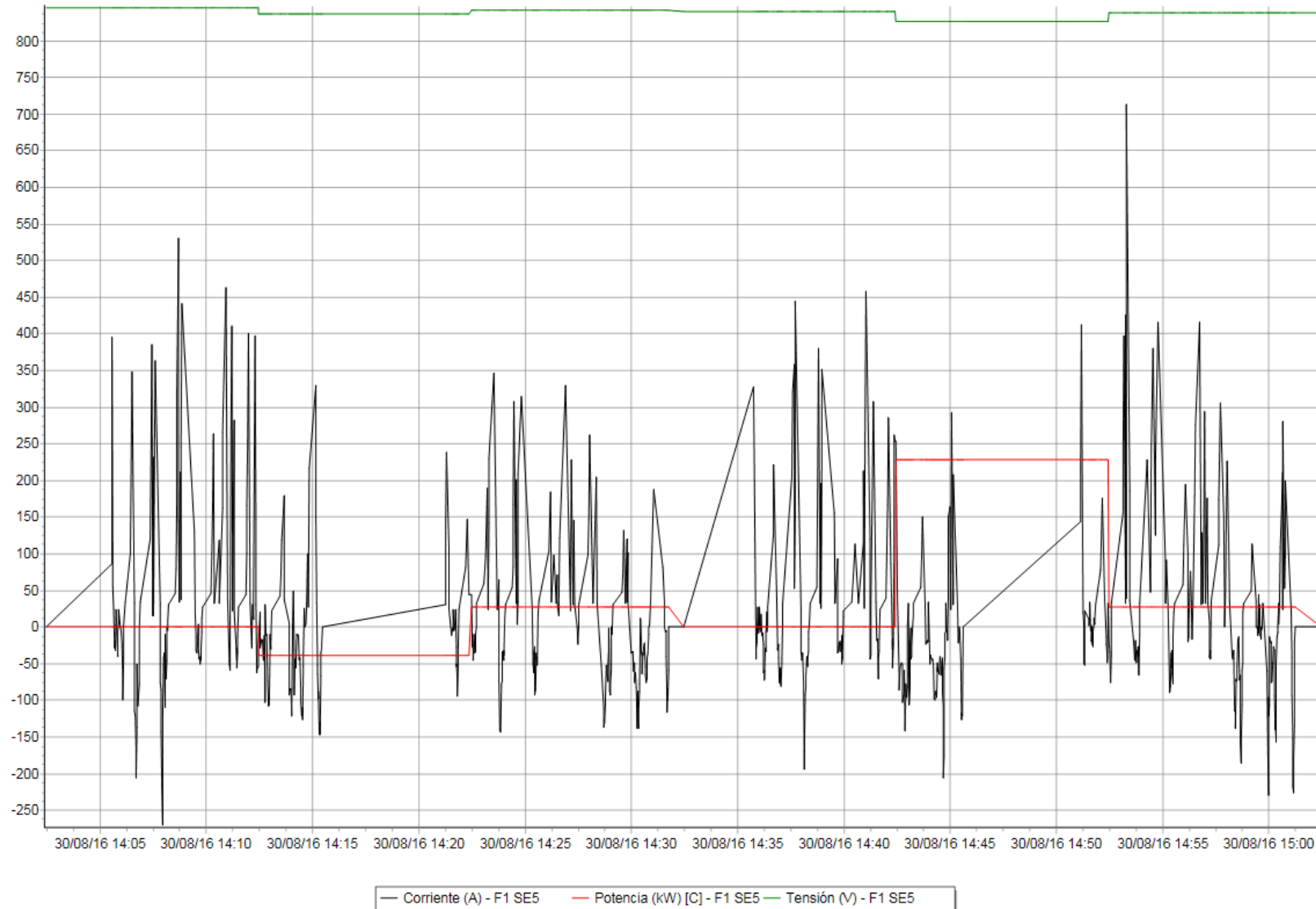


Figura A1.22. Corrent, Tensió i Potència en la secció elèctrica ZC de 14:02 a 15:05 hores del dia 30 d'agost de 2016 (dimarts).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

En les Figures 1A.17, 1A.18, 1A.19, 1A.20, 1A.21 i 1A.22 veiem que la tensió és manté quasi constant i que el corrent oscil·la segons el consum del tramvia en circulació. Això fa que la potència consumida tingui forma d'esglaó (la potència consumida és el resultat del producte del corrent i la tensió).

En algunes figures, el consum només és negatiu (Figura 1A.19 i Figura 1A.21) quan hi ha consum (potència positiva) i en altres figures, hi ha potència en moments on el corrent és zero o baix. Creiem que la potència té un desfasi amb el corrent instantani. Tot plegat ens indica que el sistema de mesura no té una exactitud suficient.

Aquest mètode és suficient per tenir una magnitud del consum del tramvia de forma general (res concret ni exacte) però no ens permet conèixer l'energia generada durant el procés de frenat del tramvia.

12. ANEXE 2: BALANÇ ENERGÈTIC D'UN TRAMVIA. MÈTODE EMBARCAT.

12.1. Introducció

Donades les limitacions del mètode anterior (precisió, discriminació i desconeixement de l'energia de frenat), es planteja un mètode de mesura embarcat que permeti conèixer el consum d'energia d'un tramvia i l'energia del procés de frenat.

El mètode per conèixer el consum d'un tramvia consisteix a instal·lar sensors (de corrent i tensió) als equips principals del tramvia així com a les resistències de frenat. Les dades de tots els sensors s'emmagatzemaran en un registrador del mateix equip de mesura. Un cop instal·lat tot (sensors i registrador), el tramvia sortirà a la línia per fer un trajecte complet. El trajecte o volta completa corresponen a uns 75 minuts.

Si observem la Figura A1.4, veiem que el corrent es distribueix pels diferents equips del tramvia des del disjuntor principal.

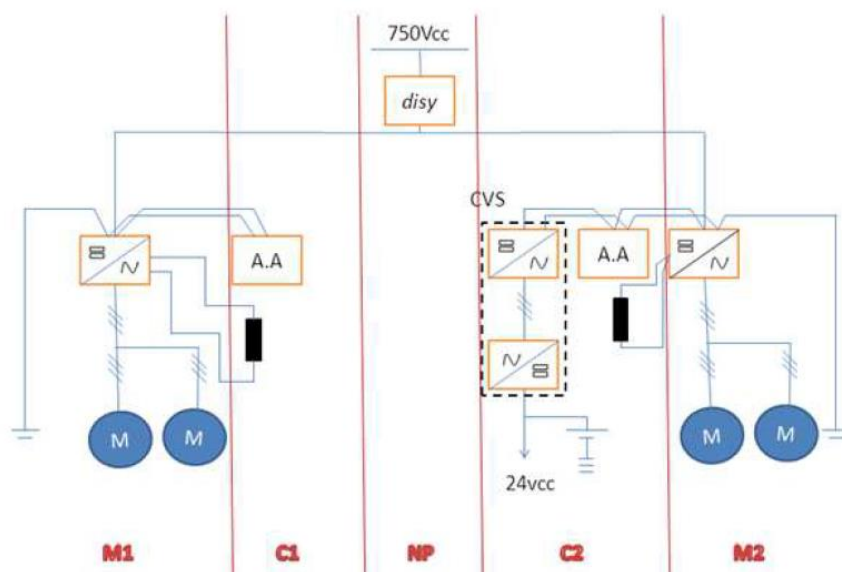


Figura A1.4. Esquema elèctric simplificat del tramvia

L'alimentació dels equips de climatització ve des dels equips tracció i el convertidor estàtic (localitzat a C2) es connecta a l'equip de climatització. Com veiem en la Figura A1.4, les resistències de frenat son equips independents i cadascun esta connectat al seu equip de tracció (una resistència de frenat per cada equip de tracció).

Per tant, la tensió d'alimentació de catenària és la mateixa per tots els equips del tramvia (excepte les resistències de frenat). Això simplifica la instal·lació del

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

sistema de mesura i ens permet instal·lar un únic sensor de tensió pels equips del tramvia excepte les resistències de frenat.

Si ens centrem en la cinemàtica del tramvia, veiem que tots els mòduls estan acoblats entre sí, és a dir, no tenen moviment relatiu entre ells (el tramvia és una unitat). Degut a aquesta característica, el tramvia, els bugies i totes les rodes motrius tenen la mateixa velocitat sempre i quan no hi hagi lliscament o pèrdua d'adherència entre roda i carril.

Altres característiques del tramvia és que l'eix motriu està acoblat directament a les rodes. No hi ha cap grup d'engranatges diferencial entre les dues rodes del mateix eix. Les rodes del tramvia són còniques i amb la conicitat inversa. Quan el tramvia es desplaça lateralment a les corbes degut a la acceleració centrífuga, la conicitat de la roda fa que hi hagi una diferència de radis entre la roda exterior de la corba i la roda interior. Aquesta diferència de diàmetre provoca el gir del tramvia.

Quan hi ha pèrdua de adherència a les rodes (lliscament durant el frenatge o patinatge durant l'acceleració), el tramvia injecta sorra entre la roda i el carril de forma automàtica per restaurar l'adherència.

Respecte al sistema de frenat del tramvia comentar que el tramvia té 3 sistemes de frenat. El fre elèctric, el fre hidràulic i el fre magnètic. El frenat elèctric és el més emprat (un 75%). El frenat hidràulic actua quan el frenat elèctric no pot proporcionar la comanda sol·licitada pel conductor. El frenat magnètic només s'utilitza en cas d'emergència o d'urgència.

Normalment, el tramvia frena amb el sistema elèctric. Quan la velocitat és baixa (7km/h) el frenat elèctric no funciona degut que els generadors (motors de tracció) no tenen prou velocitat de rotació per generar electricitat. Llavors, per sota de 7km/h, entra en funcionament el frenat hidràulic. Aquest també funciona en cas de frenat d'emergència o d'urgència com recolzament a l'elèctric.

Cal indicar que les hipòtesis anteriors tenen una petita desviació. Es tracta quan hi ha curvatura en l'eix horitzontal, és a dir, quan mig tramvia està en un pla inclinat mentre que l'altre part del tramvia està en pla horitzontal. Les forces derivades de les masses dels mòduls en pla inclinat provoquen un major consum energètic a l'equip de tracció d'aquells mòduls. El pendent màxim que pot pujar el tramvia és de 6,5% (uns 6,5 metres alçada per cada 100 metres recorreguts). I la transició de pla horitzontal a pla inclinat es realitza de forma gradual, mai de cop. Com la llargada del tramvia és de 33 metres i la distància entre els dos bugies motors és de 20 metres, la diferència de consum elèctric d'un equip de tracció respecte l'altre és despreciable.

12.2. Instal·lació

Per reduir la instal·lació al tramvia i per no perdre capacitat d'anàlisi o estudi energètic, els sensors es posaran als següents llocs:

- Disjuntor principal (a Np).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

- Equip de tracció de M1 i equip de tracció de M2.
- Equip de climatització de C1 i equip de climatització de C2.
- Resistència de frenat de M1 (a C1) i resistència de frenat de M2 (a C2).

A la Figura A2.1 es pot veure la ubicació de sensors. Els sensors de corrent es representen com un punt verd i els de tensió com un punt vermell.

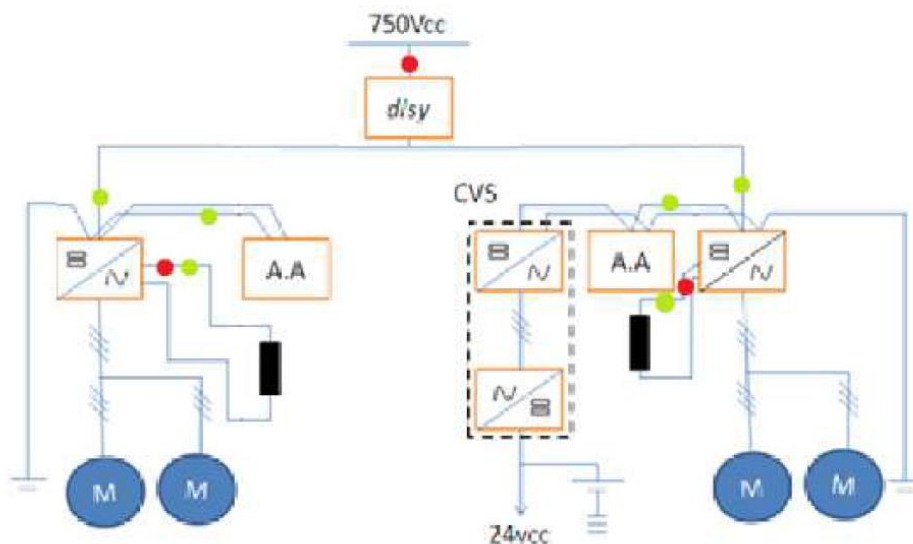


Figura A2.1. Esquema elèctric simplificat del tramvia amb la ubicació dels sensors de tensió i corrent

Amb aquesta ubicació, podrem mesurar el consum dels dos equips de tracció, dels dos equips de climatització i el consum de les dues resistències de frenat. Realment, el consum de l'equip de tracció és el corrent del primer sensor menys el corrent de l'equip de climatització. La diferència entre els dos equips de climatització serà el consum dels serveis auxiliars del tramvia. La suma del consum dels dos sensors dels equips de tracció donarà el consum total del tramvia.

Per reduir el temps d'instal·lació, s'han escollit uns sensors de corrent i tensió d'efecte Hall (del fabricant CHENG YANG Technologies GmbH & Co) per la seva bona resolució, exactitud i poca dispersió.

El sensor de corrent s'han escollit per un corrent màxim de $\pm 1.000A$. I el sensor de tensió s'ha escollit per una tensió de $\pm 1.000V$. Aquest sensor de tensió s'emprarà tant pel disjuntor principal com per les resistències de frenat.

A la Figura A2.2 podem veure la posició física dels diferents sensors al tramvia. Tots els senyals aniran al mòdul C2 on s'instal·larà el registrador.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

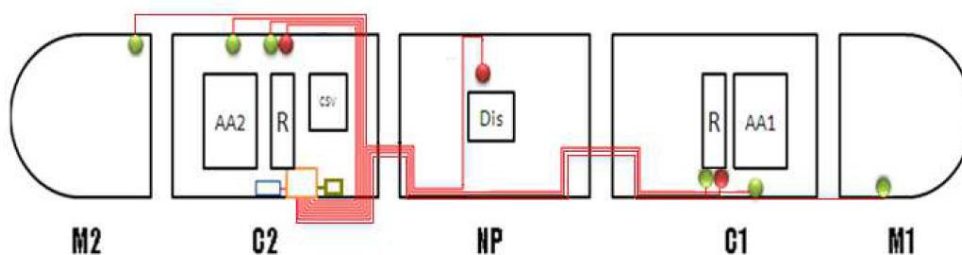


Figura A2.2. Esquema simplificat del sistema de mesura embarcat

Donat que al tramvia té diferents armaris de connexió per als diferents equips distribuïts al sostres dels 5 mòduls, s'ha aprofitat aquesta avantatge per instal·lar els sensors dins dels armaris. D'aquesta manera mantenim la seguretat i fàcil connexió ja que els cables arriben a bornes de connexió.

En el cas del sensor de tensió, no s'ha instal·lat dins de l'armari del disjuntor principal si no al cable de distribució principal que passa pel mateix armari de connexió. Veure Figura A2.3.



Figura A2.3. Punts d'instal·lació dels sensors de corrent a l'equip de Climatització M1 i de Tensió del disjuntor principal.

En el cas de les resistències de frenat, els sensors de corrent i tensió s'han instal·lat dins de la mateixa residència. Veure Figura A1.26 (a). El sensor de corrent d'entrada de l'equip de tracció també s'ha instal·lat dins del propi equip de tracció. Veure Figura A2.4 (b).

Tots els sensors enviaran el senyal a un registrador de dades o Datalogger i emmagatzemarà les dades dels sensors en funció de temps. El Datalogger escollit és el model LGR-5327 del fabricant Measurement Computing. Aquest té la capacitat d'emmagatzemar moltes dades gràcies a una targeta de memòria SD. Això ens permetrà registrar totes les dades durant una volta completa del tramvia en estudi.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

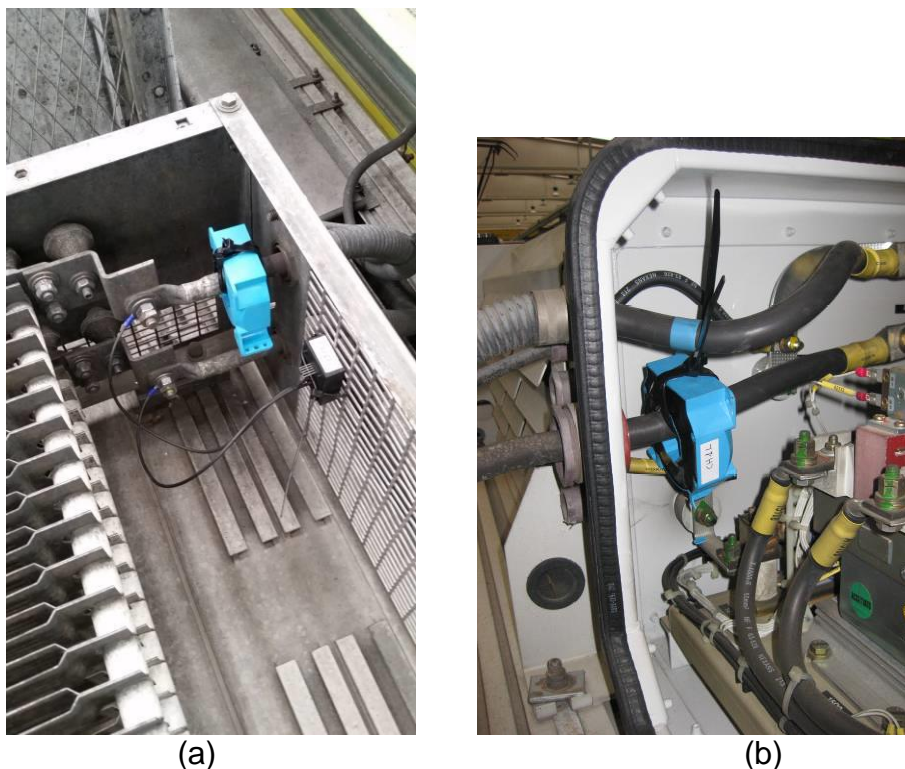


Figura A2.4. Punts d'instal·lació dels sensors de corrent a l'equip de
(a) de corrent i tensió de la resistència de frenat.
(b) de corrent de l'equip de tracció de M1.

Però l'equip de tracció realitza el frenat elèctric generant un corrent i tensió trossejat a altes freqüències (als voltants de 10kHz). Això ens obliga a escanejar el senyal de corrent i de tensió de les resistències a freqüències superiors (als voltants els 19kHz). Per tant, hi haurà una gran quantitat de dades a emmagatzemar al registrador, al voltant, de 19.000 dades per segon.

A la Figura A2.5 es pot veure el registrador i els cables dels senyals del tots els sensors.

12.3. Probes

Un cop instal·lats els sensors i l'equip registrador, es comencen a fer els primers assajos. Inicialment es prova que els sistema funcioni i llegeixi correctament. S'observa un soroll elèctric a totes les senyals que dificulta la lectura clara. Aquest soroll elèctric es deu a la no connexió a terra o massa de les pantalles o malles dels cables dels senyals. Farem servir un programa informàtic per treure el soroll (netejar tots els registres i el seus valors).

Després de les proves inicials, es realitza una volta complerta. El registrador ha emmagatzemat les dades en 1.309 arxius.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS



Figura A2.5. Punt d'instal·lació del registrador

Donada la gran quantitat d'arxius, es decideix analitzar un petit tram. El tram escollit és un tram entre dues parades C2 (punt quilomètric 5.410m) i C3 (punt quilomètric 5.920m) separades uns 510 metres (veure Figura A2.6). En aquest recorregut, el tramvia es troba una cruïlla amb cotxes i 5 passos de vianants. Encara que el tramvia té prioritat de pas, el tramvia redueix la seva velocitat en aquestes cruïlles per qüestions de seguretat.

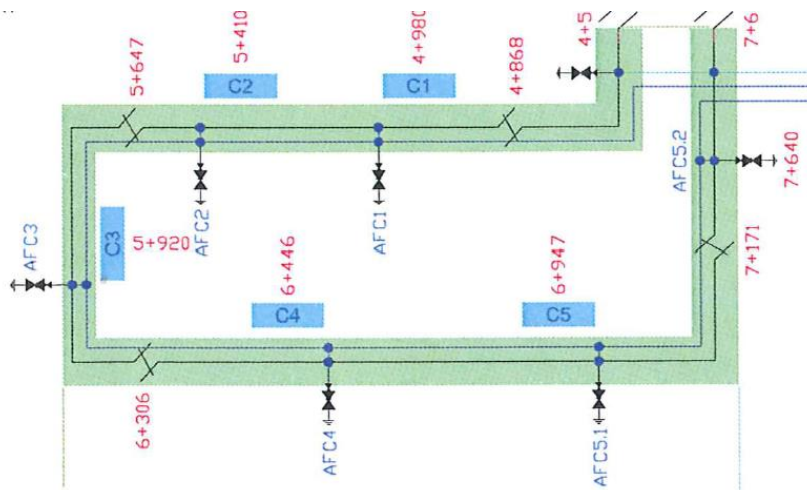


Figura A2.6. Esquema simplificat del sistema de mesura embarcat

12.4. Resultats

Dels 10 arxius d'aquest recorregut (des de l'arxiu nº 170 fins el nº 180), obtenim gràfics de 8 segons de durada. Els gràfics són de 8 segons de llargada perquè la capacitat màxima del software de "eliminació de soroll" és limitada i només admet 8 segons de dades.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Anem a fer un anàlisi individual de cada arxiu de dades. Comencem amb l'arxiu nº170 que correspon a la sortida de la parada C2.

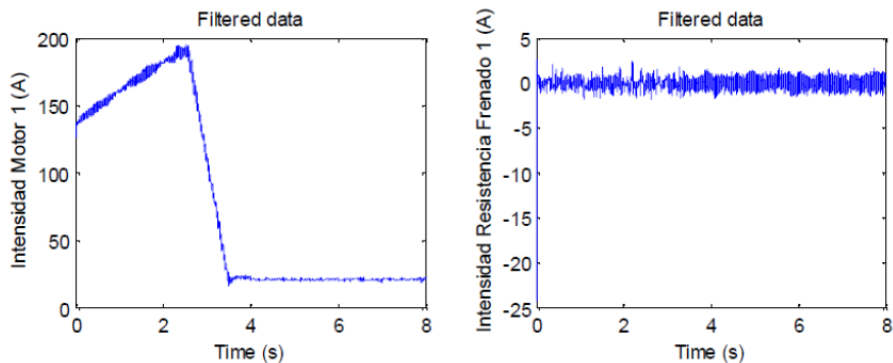


Figura A2.7. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

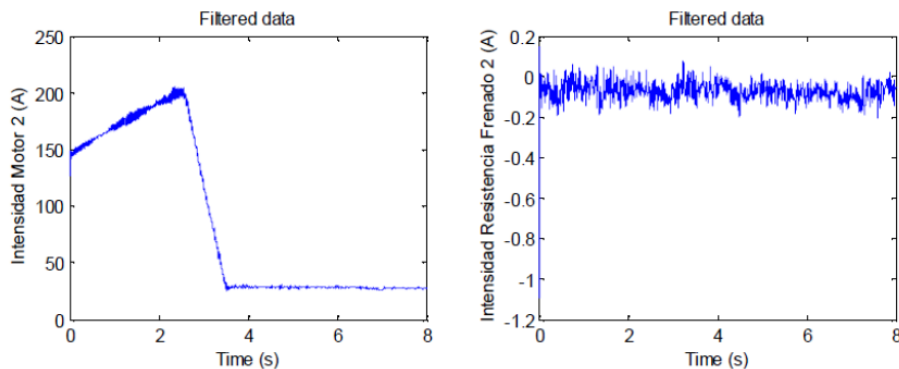


Figura A2.8. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

A les Figures A2.7 i A2.8 es mostra el consum dels dos equips de tracció del tramvia que representa l'inici del moviment del tramvia de la parada C2. El tramvia accelera segons la consigna del conductor mitjançant el manipulador. Quan el conductor considera que la velocitat del tramvia és suficient, llavors, el conductor regula la consigna (al manipulador) fins a una posició adequada.

També veiem que el corrent d'ambdós equips de tracció és el mateix.

Durant els primers 2,5 segons, el corrent augmenta fins als 200A. Això es tradueix en acceleració del tramvia i en un augment de la velocitat. Quan el tramvia assoleix la velocitat adequada, llavors el conductor redueix la consigna d'acceleració i corrent disminueix fins a 20A (aproximadament).

Aquest corrent de 20A correspon al corrent consumit pels equips de climatització. Això és així, perquè els equips de climatització s'alimenten dels

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

equips de tracció on s'han instal·lat els sensors de corrent del sistema de mesura.

Durant els primers 8 segons, les resistències de frenat no cremen cap energia.

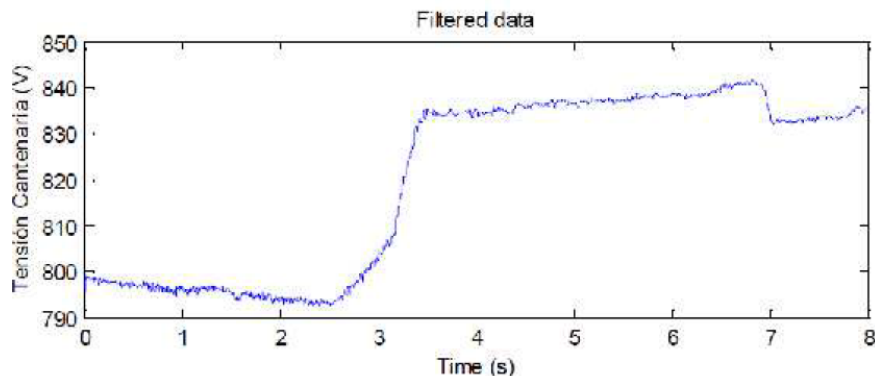


Figura A2.9. Gràfic de la tensió de catenària

La Figura A2.9 mostra la tensió de la catenària. Veiem que la tensió de catenària està als voltants dels 800V fins els 3 segons. A partir del segon 3, la tensió de catenària creix fins els 840V. Aquest augment es deu a la reducció de corrent per part del tramvia (de 200A fins a 20A).

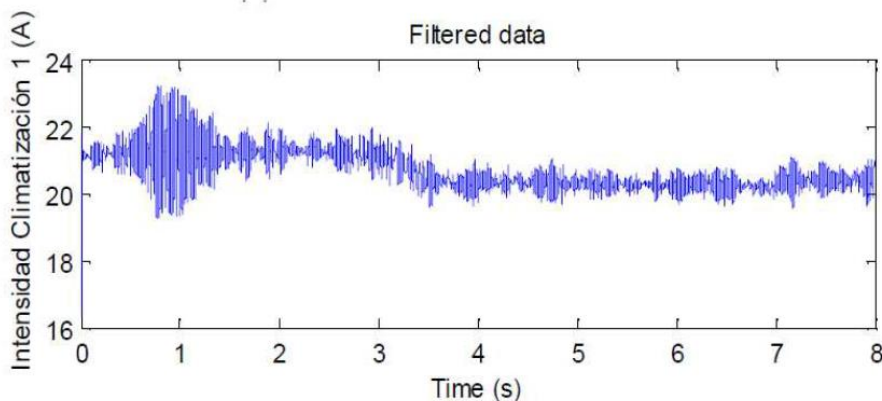


Figura A2.10. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

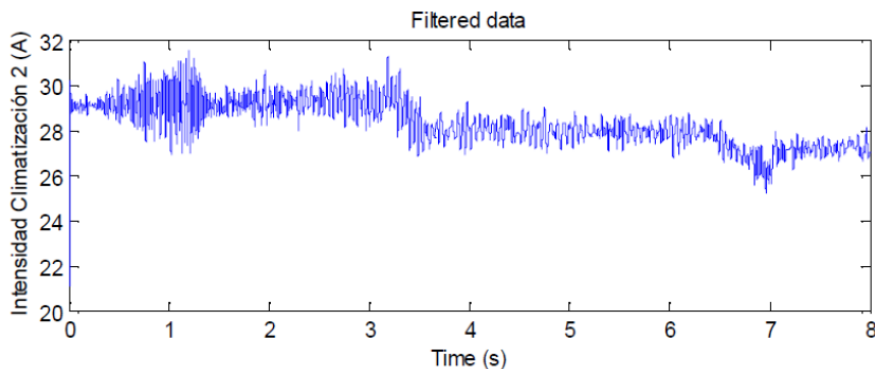


Figura A2.11. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

A les Figures A2.10 i A2.11 s'observa el consum energètic dels dos equips de climatització. La evolució del corrent d'ambdós equips és la mateixa però el consum de l'equip de C2 és lleugerament superior al del C1 (uns 8A de diferència). Això es degut perquè l'equip de C2 alimenta també el convertidor estàtic.

El consum de cadascun és aproximadament d'uns 20A que coincideix amb el corrent observat en el corrent dels equips de tracció.

En aquestes últimes dues figures, el programa informàtic per reduir el soroll no ha pogut realitzar la seva tasca perfectament degut a que tant els equips de climatització com el convertidor auxiliar empen onduladors i aquest generant interferències de freqüències elevades.

Ara analitzarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº171).

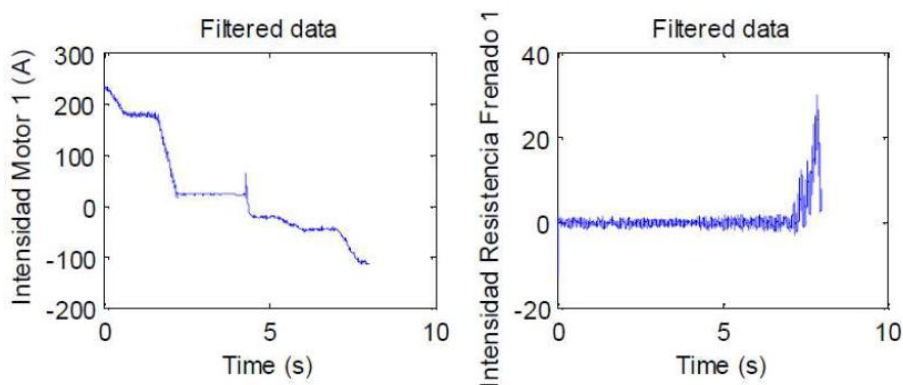


Figura A2.12. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

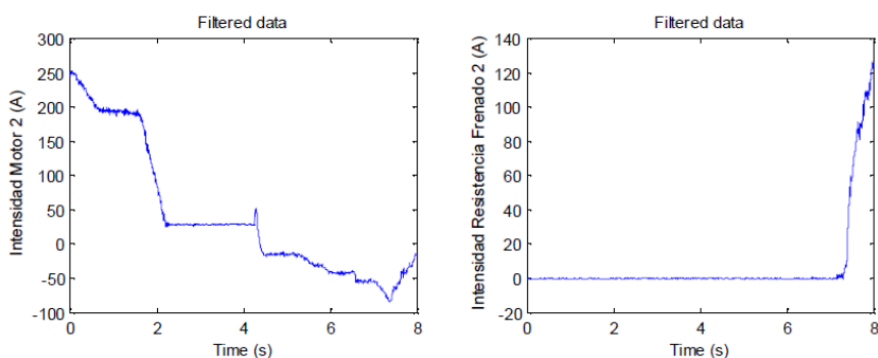


Figura A2.13. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

A les Figures A2.12 i A2.13 veiem el corrent consumit en altre part del recorregut entre C2 i C3 del tramvia. En aquest tros, el corrent disminueix fins a ser negatiu. Això vol dir que l'energia generada pel frenat elèctric surt del

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

tramvia per anar a la catenària. Però part de l'energia generada pel frenat elèctric es crema a les resistències de frenat. És a dir, l'energia generada pel sistema de frenat es reparteix en dos camins, un cap a la catenària i l'altre, cap a les resistències. La distribució de l'energia regenerada s'inicia cap als 7,5 segons i no abans. És a dir, quan la catenària no pot absorbir l'energia entregada, l'equip de distribució envia l'energia regenerada cap a les resistències.

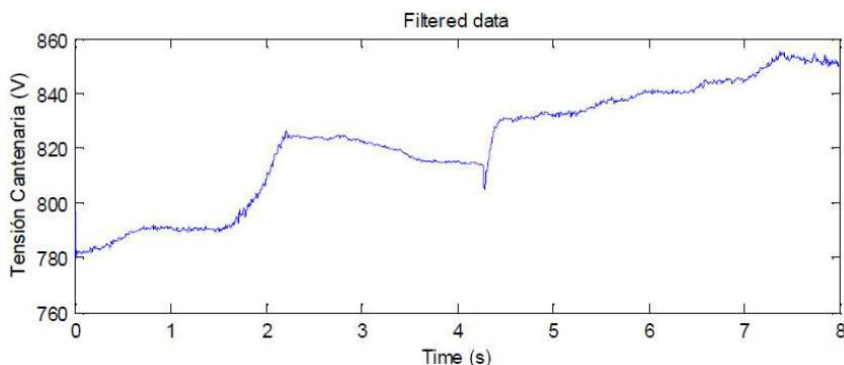


Figura A2.14. Gràfic de la tensió de catenària

Al començament del gràfic s'observa una tensió baixa, uns 785V. Això es deu al corrent consumit pel tramvia (uns 250A). Quan el corrent disminueix, la tensió augmenta. I quan el corrent és negatiu, la tensió augmenta fins als 850V. L'augment de la tensió és per l'augment del corrent negatiu dels equips de tracció.

A la Figura A2.16 s'observa una davallada del consum als 6,5 segons fins el 7,5 segons. Aquesta davallada no s'observa a la Figura A2.15 de l'altre equip de climatització. Creiem que es deu a una baixada del consum del convertidor estàtic.

Per altre costat, s'observa un pic cap als 4,5 segons que coincideix amb el pic del corrent de l'altre equip de climatització (veure Figura A2.15) i el pic de baixada de la tensió de catenària (veure Figura A2.14). Aquest pic també coincideix amb el canvi de sentit del corrent dels dos equips de tracció.

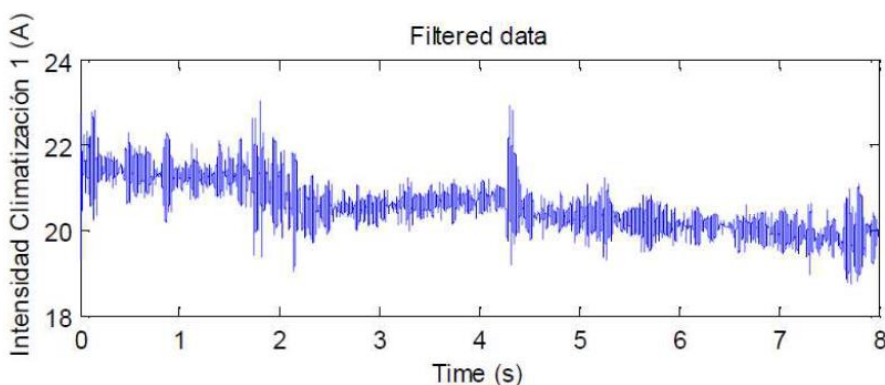


Figura A2.15. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

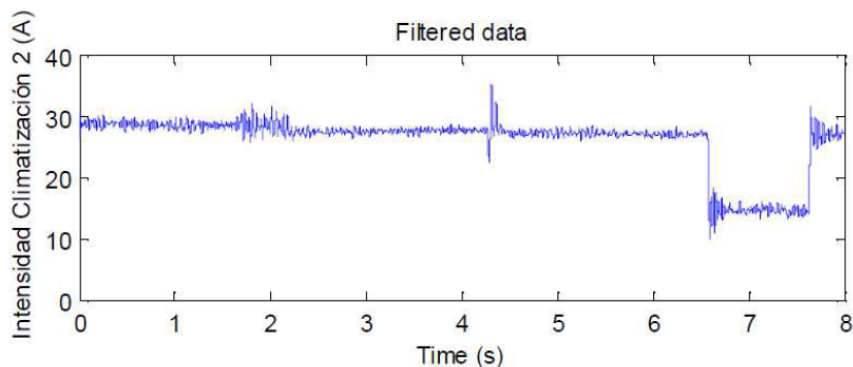


Figura A2.16. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

A continuació revisarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº172).

A les Figures A2.17 i A2.18 s'observa valors de corrent diferents al mateix període d'estudi. El corrent de l'equip de tracció de M1 està entre -120A i -70A en els primers 5 segons mentre que el corrent de l'equip de tracció de M2 està en valors positius als dos primers segons i valors de -30A des del 2 segons fins als 5 segons.

També observem que el corrent de les resistències de frenat son diferents dins del mateix període d'estudi. El corrent de la resistència associat a l'equip de tracció M1 en els 5 primers segons és zero mentre que el corrent de la resistència associat a l'equip de tracció M2 està per damunt de 100A en els primers 2 segons i entre els segons 3 i 6 és zero.

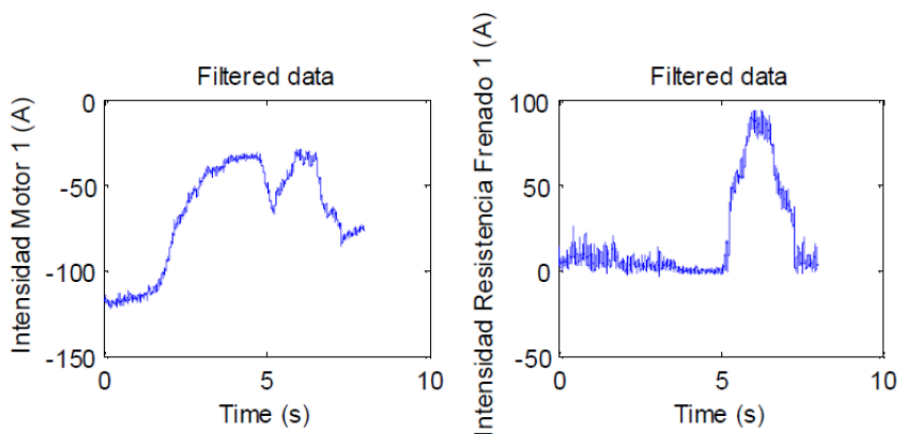


Figura A2.17. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

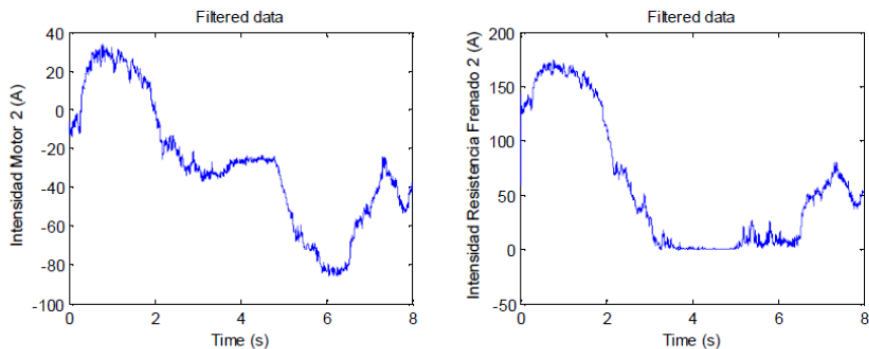


Figura A2.18. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

Aquesta diferència de corba en el mateix període de temps d'estudi ens fa pensar que algunes variables d'aquest arxiu nº 172 no està correctament sincronitzat amb les altres variables del mateix arxiu.

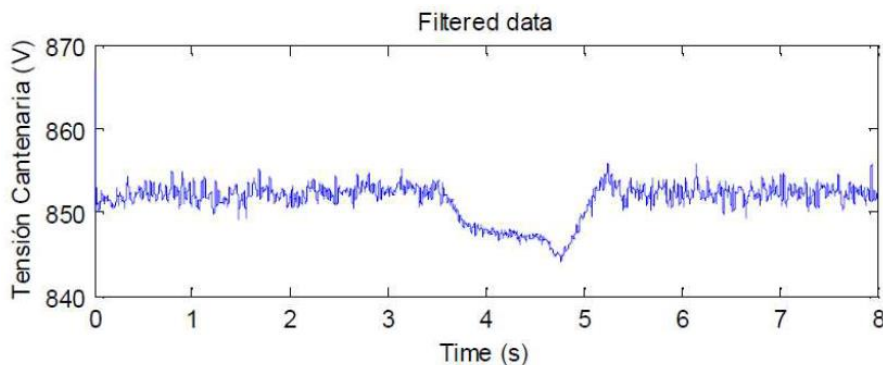


Figura A2.19. Gràfic de la tensió de catenària

Si comparem el corrent de l'equip de tracció M1 amb la tensió de la catenària, sembla versemblant ja que la tensió és superior al valor nominal en tot el període d'estudi. Si comparem el corrent de l'equip de tracció M2 amb la tensió de la catenària, sembla que no és versemblant ja que quan el corrent augmenta, la tensió de catenària baixa i això no s'aprecia en aquest període de temps. Per tant, podem deduir que la variable del corrent de l'equip de tracció M2 no està sincronitzada amb la resta de dades del mateix arxiu nº 172.

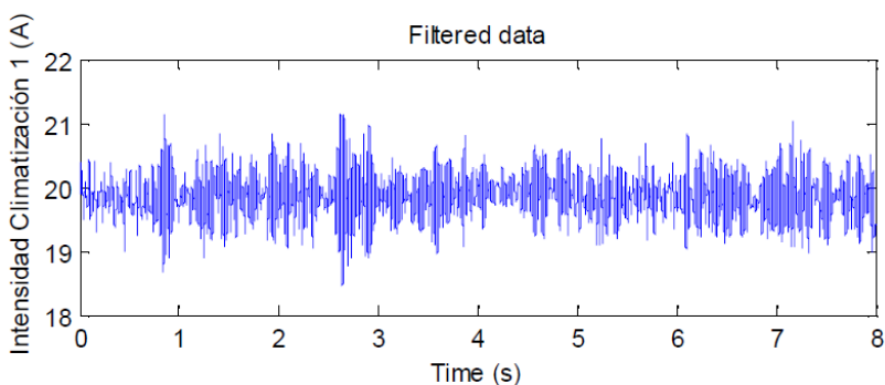


Figura A2.20. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

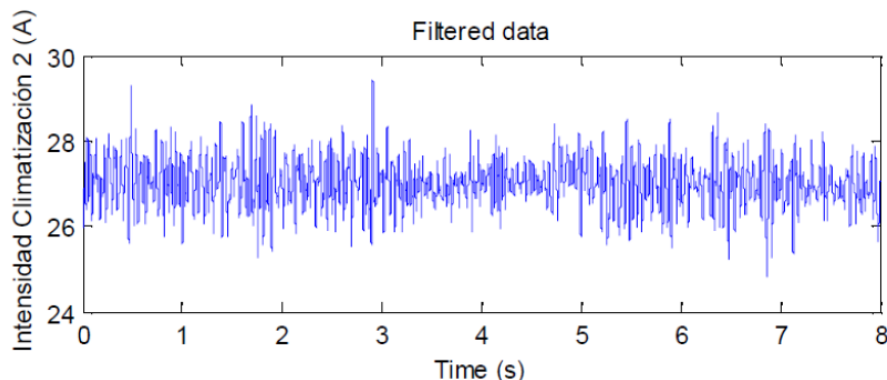


Figura A2.21. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

Pel que fa al corrent dels dos equips de climatització, seguim observant una diferència de corrent de 7A degut a que el convertidor estàtic està connectat a l'equip de climatització C2.

Tot seguit revisarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº173).

A les Figures A2.22 i A2.23 s'observa el mateix comportament entre el corrent de l'equip de tracció de M1 i el corrent de l'equip de tracció de M2 excepte un pic. Si depreciam aquest pic, veiem que el comportament és quasi idèntic entre els dos corrents. Per tant, creiem que aquest pic és un fals senyal possiblement per la manca de protecció mitjançant la posada a massa de la pantalla del cablejat d'aquesta variable.

També observem que els corrents de les dues resistències de frenat son molt semblants. El corrent de la resistència associat a l'equip de tracció M1 té un soroll elèctric associat que dificulta la neteja de la variable per part del software.

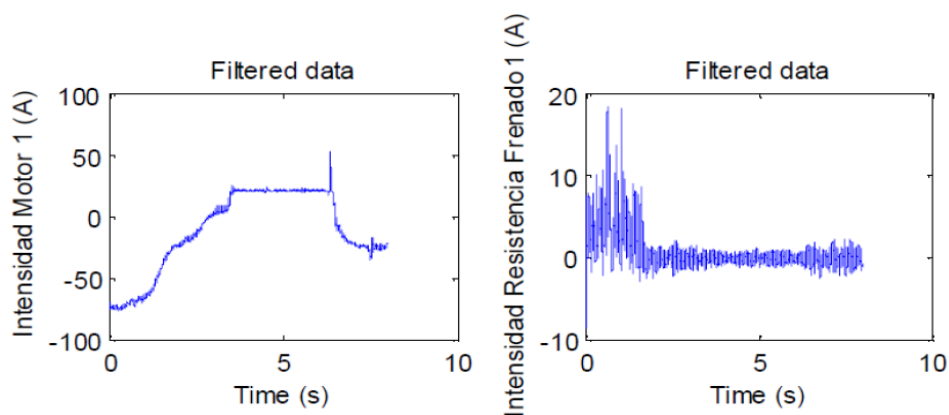


Figura A2.22. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

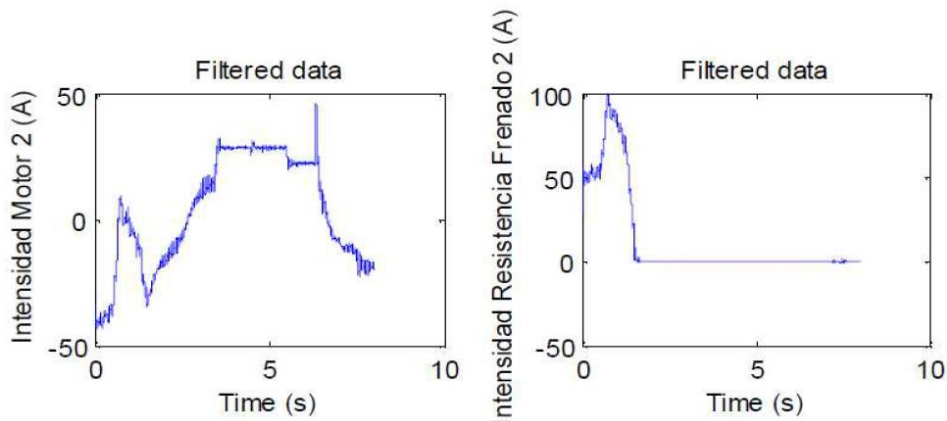


Figura A2.23. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

Si ens fixem amb les corbes entre el corrent de l'equip de tracció i la resistència de frenat associat, observem que quasi tot el corrent generat pel fre elèctric es consumeix a les resistències de frenat. Desgraciadament no podem confirmar-ho ja que els nivells de tensió entre els motors i les resistències son diferents.

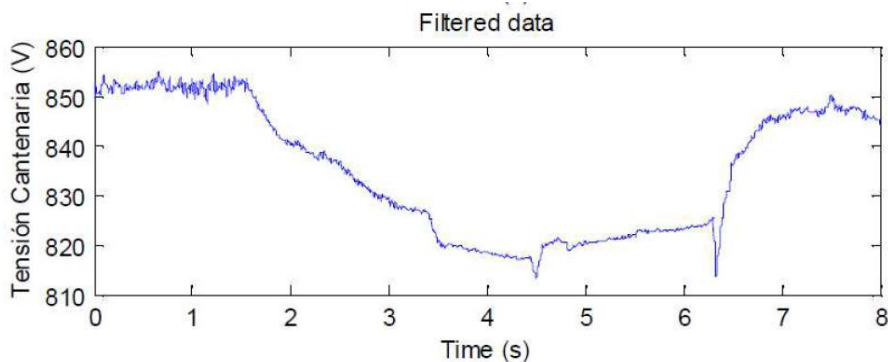


Figura A2.24. Gràfic de la tensió de catenària

Això és confirma veient el nivell de tensió de la catenària perquè la tensió està als voltants dels 850V al principi del període d'estudi i després baixa fins els 830V.

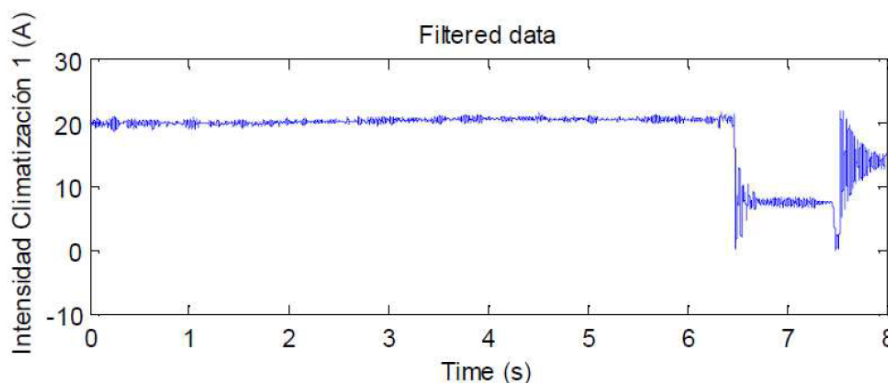


Figura A2.25. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

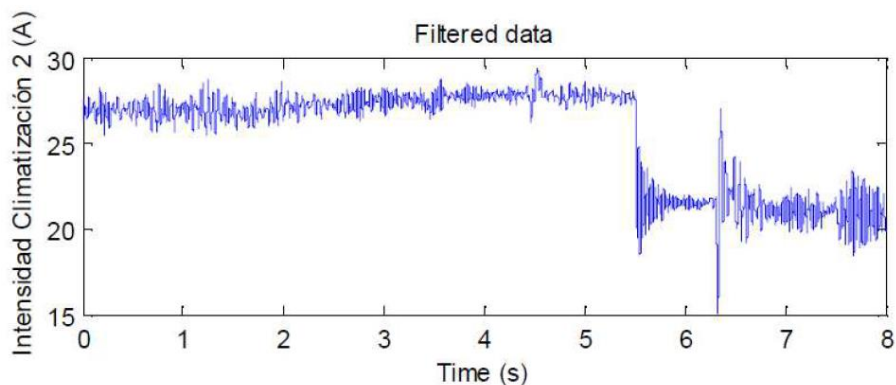


Figura A2.26. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.25 i A2.26) és molt semblant mantenint la diferència dels 7A o 8A. Ara bé, la disminució del consum es degut a l'aturada de la climatització perquè a l'interior del tramvia s'ha obtingut la temperatura de consigna. L'equip de climatització de C2 s'atura un segon abans que l'equip de C1.

Ara analitzarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº174).

A les Figures A2.27 i A2.28 s'observa el mateix comportament entre el corrent de l'equip de tracció de M1 i el corrent de l'equip de tracció de M2. I el corrent de les resistències de frenat son zero durant tot el període d'estudi. El corrent de retorn generat pels equip de tracció és consumeix completament a la catenària.

A més, la corba de la tensió de la catenària (Figura A1.29) és versemblant amb el comportament dels equips de tracció. És a dir, la tensió de catenària és elevada (845V), durant els primers 3 o 4 segons, quan el corrent dels equips de tracció és negatiu i, després, la tensió de catenària baixa quan els equips de tracció comencen a consumir corrent per accelerar el tramvia.

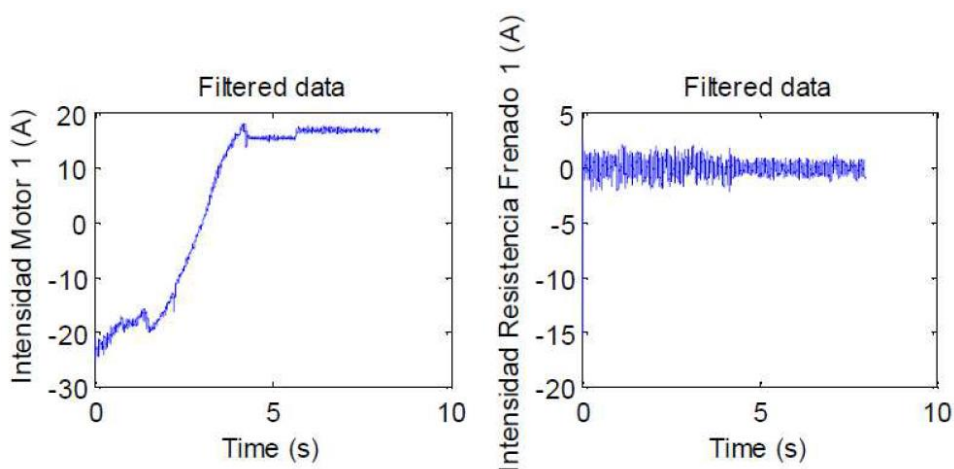


Figura A2.27. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

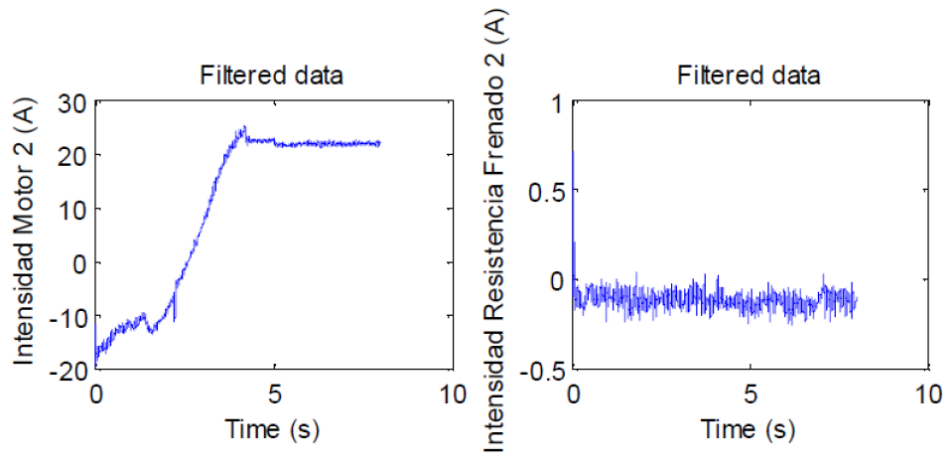


Figura A2.28. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

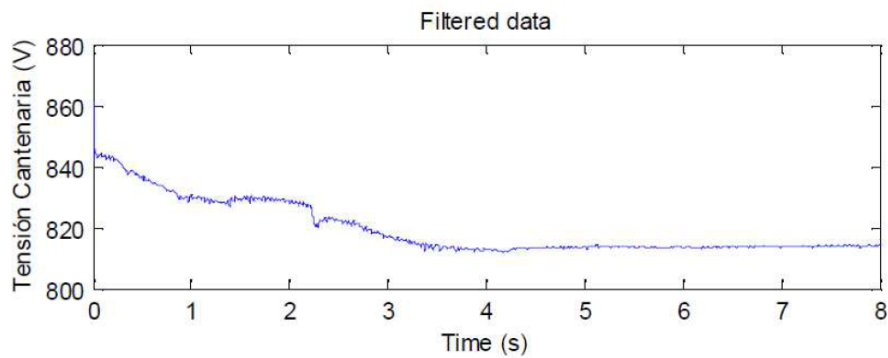


Figura A2.29. Gràfic de la tensió de catenària

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.30 i A2.31) és molt semblant mantenint la diferència dels 7A o 8A.

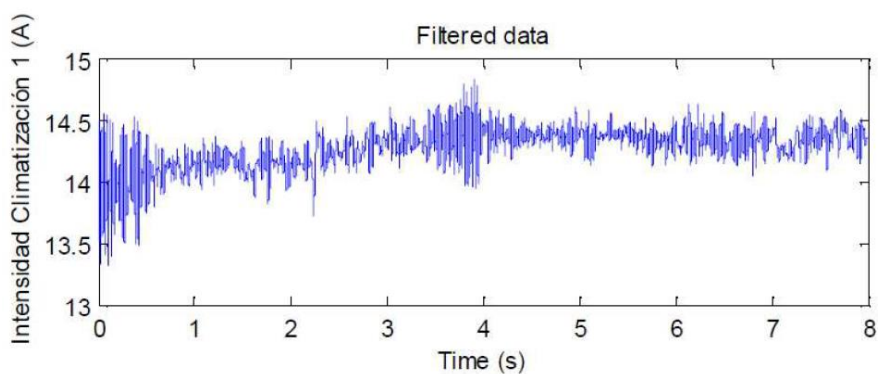


Figura A2.30. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

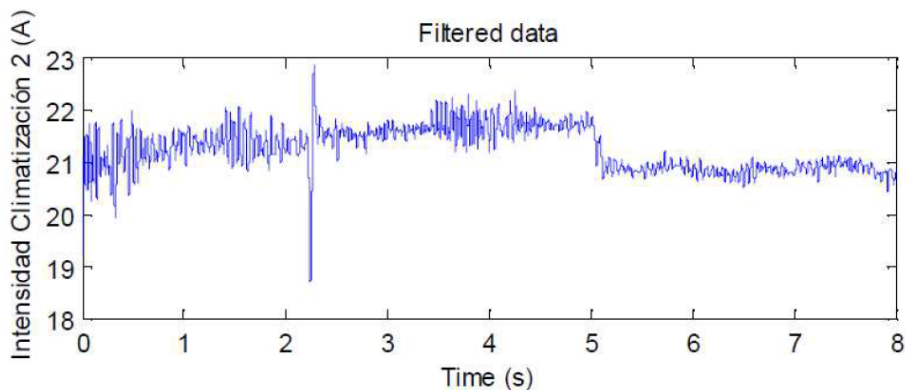


Figura A2.31. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

A continuació analitzarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº175).

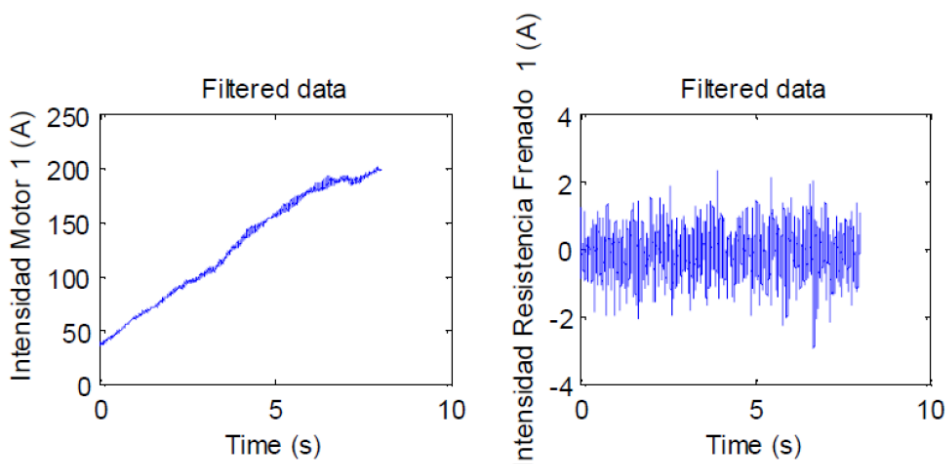


Figura A2.32. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

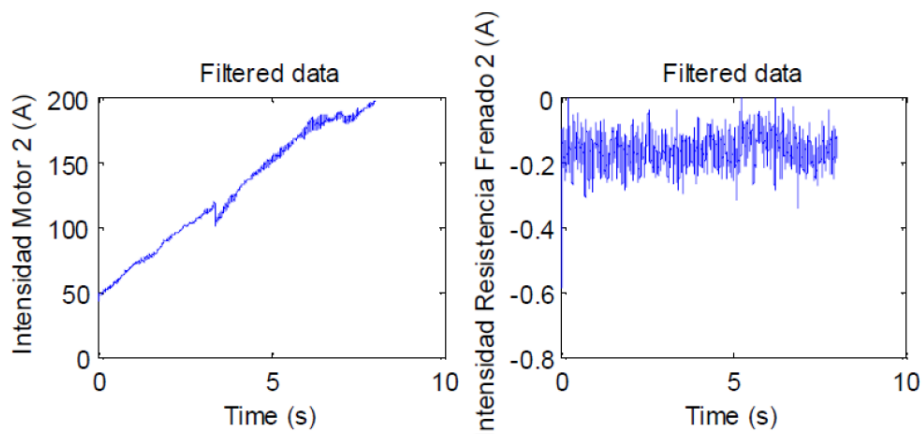


Figura A2.33. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

A les Figures A2.32 i A2.33 s'observa el mateix comportament entre el corrent de l'equip de tracció de M1 i el corrent de l'equip de tracció de M2. I el corrent de les resistències de frenat son zero durant tot el període d'estudi.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Observem clarament que quan el corrent consumit pels equips de tracció és elevat, la tensió de la catenària disminueix considerablement. En aquest cas, amb un corrent de 100A o més, la tensió de catenària baixa de 810V fins a nivells de 780V.

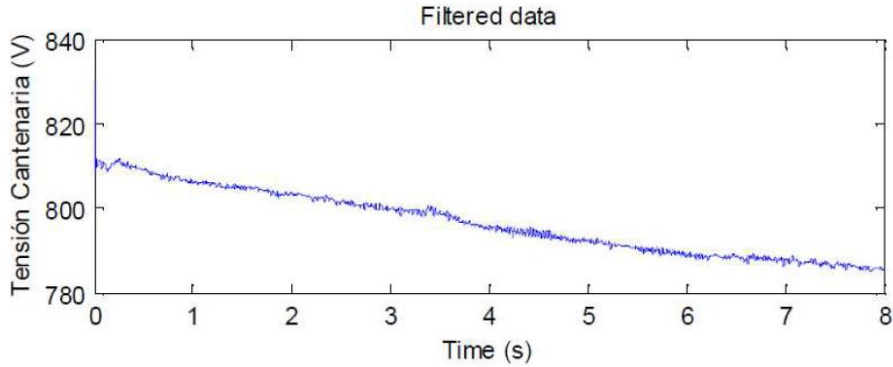


Figura A2.34. Gràfic de la tensió de catenària

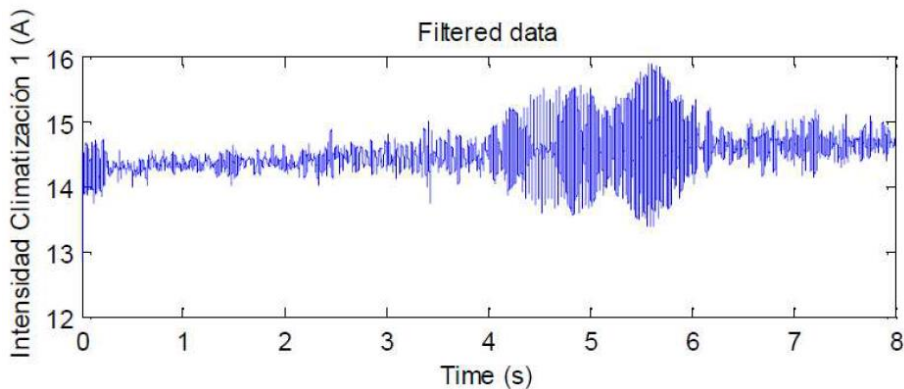


Figura A2.35. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

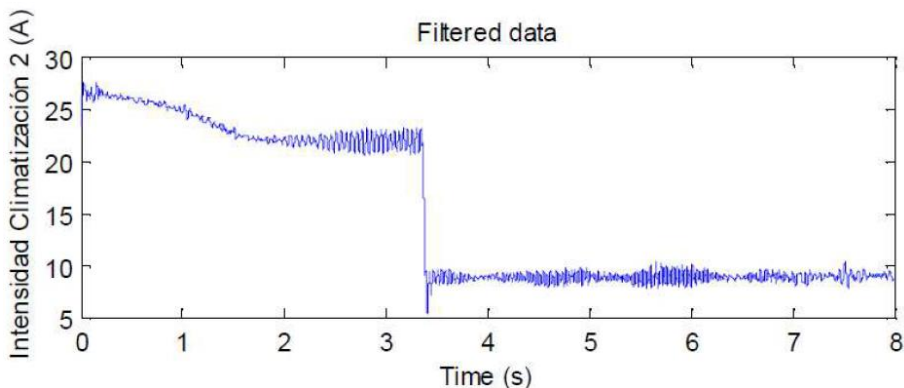


Figura A2.36. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.35 i A2.36) és diferent. Durant els primers 3 segons, el comportament sembla coherent però a partir dels 3,5 segons, el comportament és molt diferent. Potser l'equip de climatització de C2 s'ha aturat perquè la sala de passatgers ha arribat a la temperatura de consigna i que la temperatura de sala de C1 encara

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

no hagi arribat a la temperatura de consigna i, per tant, l'equip encara estigui funcionant normalment.

Tot seguir revisarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº176).

A les Figures A2.37 i A2.38 s'observa el mateix comportament entre el corrent de l'equip de tracció de M1 i el corrent de l'equip de tracció de M2. I el corrent de les resistències de frenat son zero durant tot el període d'estudi.

Observem clarament que quan el corrent consumit pels equips de tracció és elevat, la tensió de la catenària disminueix. En aquest cas, amb un corrent de 200A, la tensió de catenària és de 780V i quan desapareix el consum dels equips de tracció, la tensió de la catenària augmenta fins a valors de 820V. Veure Figura A2.39.

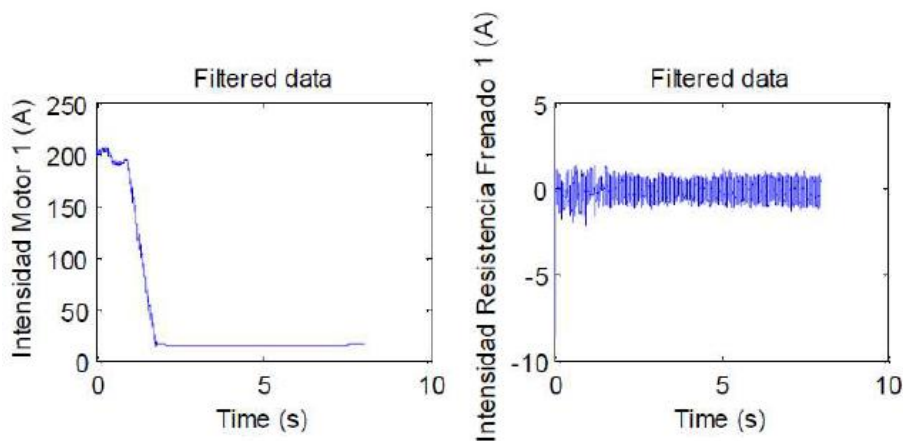


Figura A2.37. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

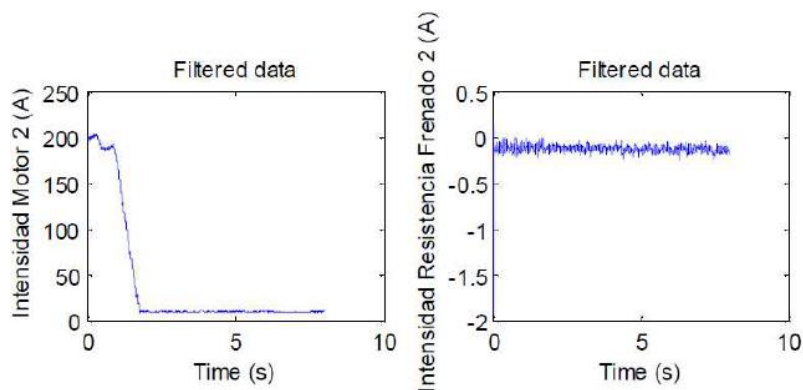


Figura A2.38. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

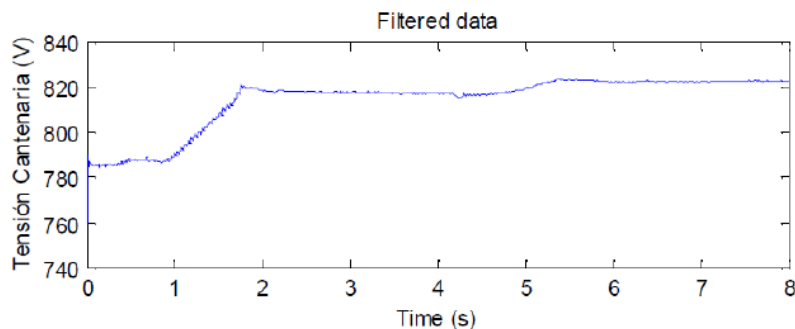


Figura A2.39. Gràfic de la tensió de catenària

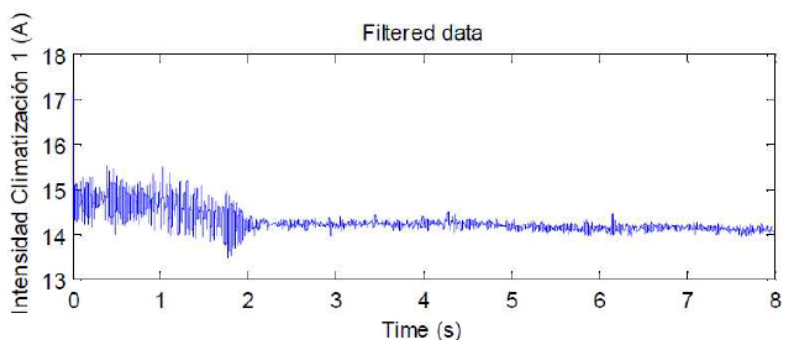


Figura A2.40. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

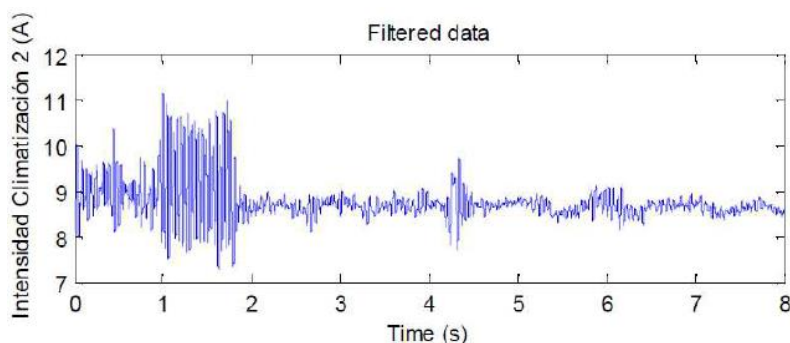


Figura A2.41. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.40 i A2.41) és similar però ara el corrent de l'equip de climatització de C1 és superior al corrent de l'equip de climatització de C2. Potser l'equip de climatització de C2 s'ha aturat perquè la sala de passatgers ha arribat a la temperatura de consigna i que la temperatura de sala de C1 encara no hagi arribat a la temperatura de consigna i, per tant, l'equip encara estigui funcionant i consumint corrent.

Ara revisarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº177).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

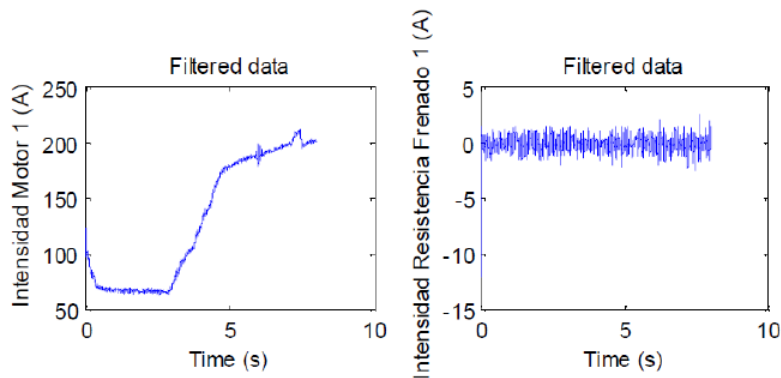


Figura A2.42. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

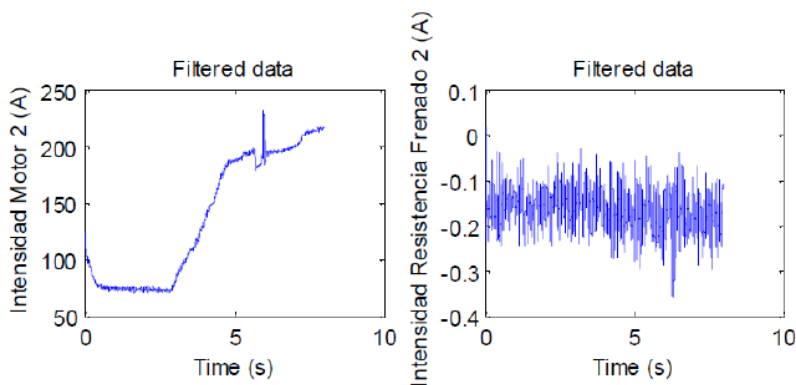


Figura A2.43. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

A les Figures A2.42 i A2.43 s'observa el mateix comportament entre el corrent de l'equip de tracció de M1 i el corrent de l'equip de tracció de M2. I el corrent de les resistències de frenat son zero durant tot el període d'estudi.

Observem clarament que quan el corrent consumit pels equips de tracció és elevat, la tensió de la catenària disminueix. En aquest cas, amb un corrent de 200A, la tensió de catenària és de 780V. Veure Figura A2.44.

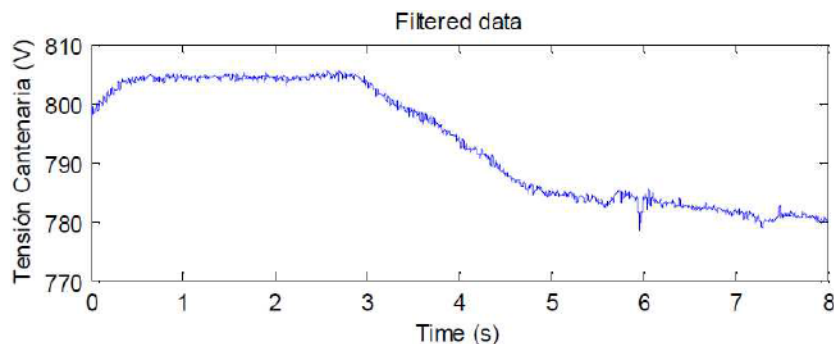


Figura A2.44. Gràfic de la tensió de catenària

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

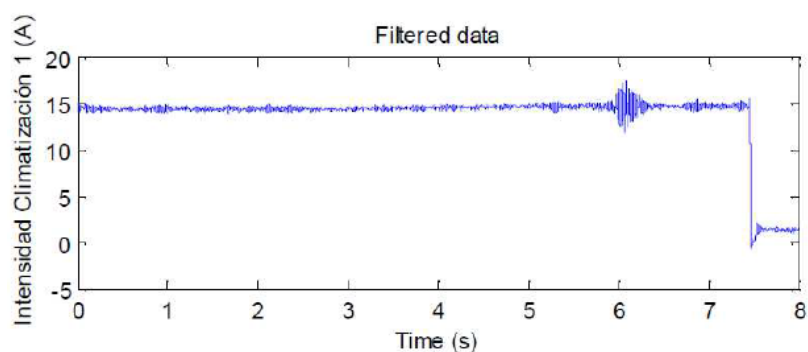


Figura A2.45. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

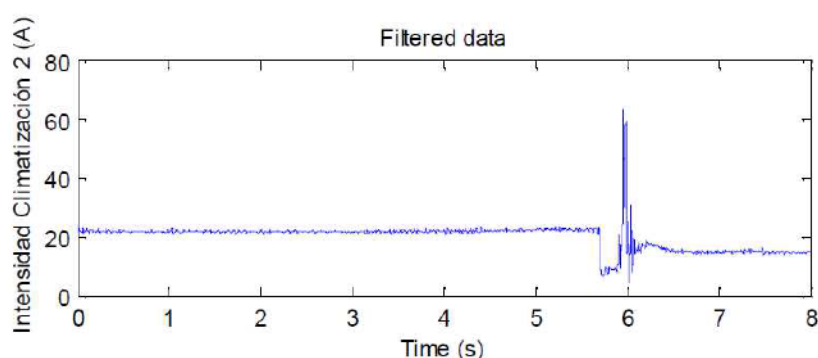


Figura A2.46. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.45 i A2.46) és similar però l'equip de climatització de C2 consumeix uns 6 A més que l'equip de C1. També s'observa com, al final del gràfic, l'equip de climatització de C1 s'atura perquè la temperatura interior ha assolit la temperatura de consigna.

Hi ha un pic de corrent al 6 segons d'aquest període d'estudi d'uns 60A. Potser sigui el convertidor estàtic ja que abans del pic hi ha una baixada de 10A de sobte. Aquest pic de corrent provoca una pertorbació que aprecia a l'altre equip de climatització.

Tot seguit analitzarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº178).

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

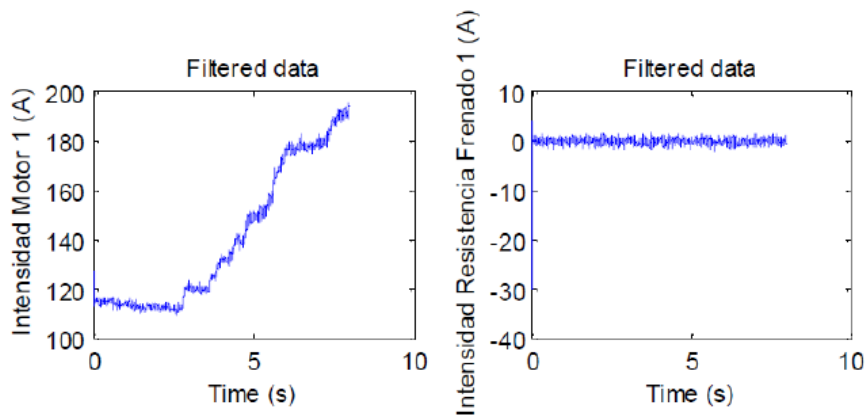


Figura A2.47. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

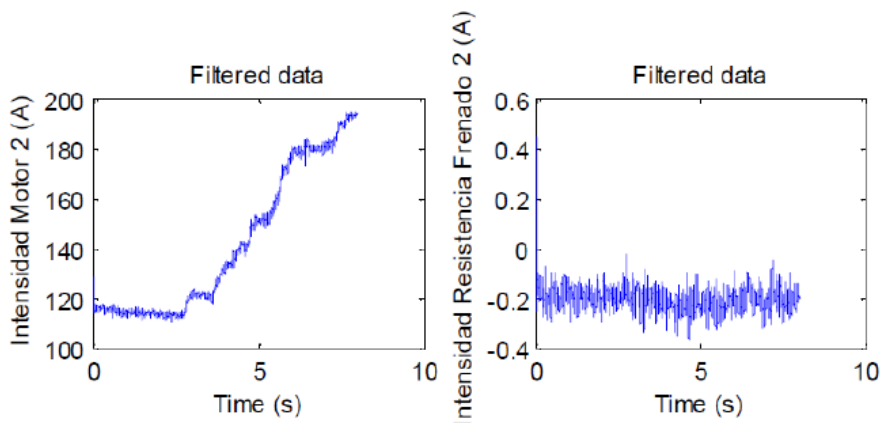


Figura A2.48. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

En aquest tram s'observa un comportament quasi idèntic entre el corrent d'ambdós equips de tracció. L'augment del corrent per la tracció tramvia provoca una disminució de la tensió de la catenària. Veure Figura A2.49.

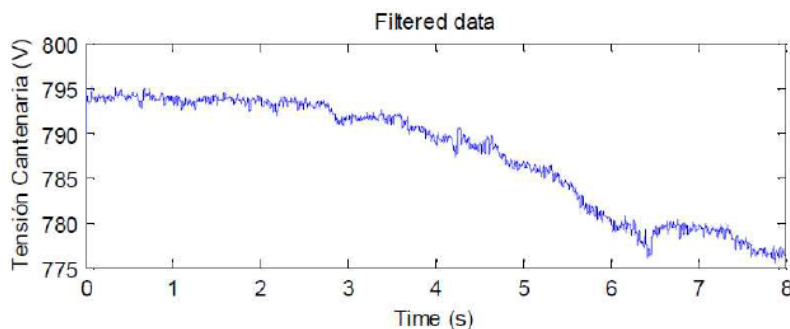


Figura A2.49. Gràfic de la tensió de catenària

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

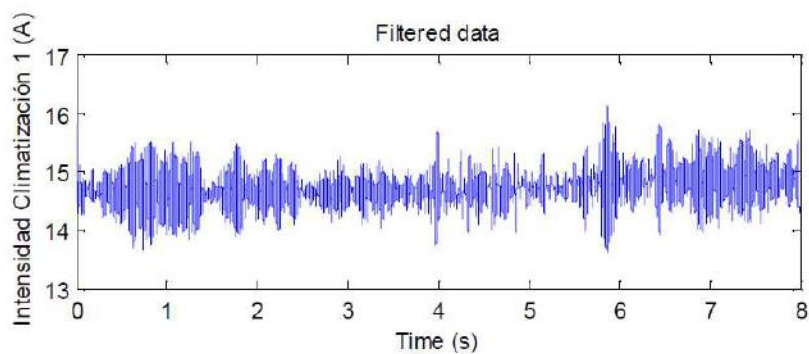


Figura A2.50. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

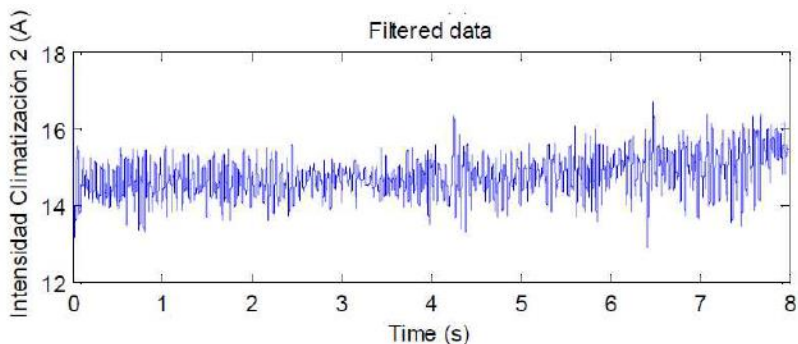


Figura A2.51. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

El comportament del corrent dels dos equips de climatització (Figures A2.50 i A2.51) és quasi idèntic, no hi ha un consum superior de l'equip de climatització de C2. Però s'observa com el soroll dificulta la representació de la corba d'una forma acceptable.

Ara revisarem els gràfics de l'arxiu posterior (nº179).

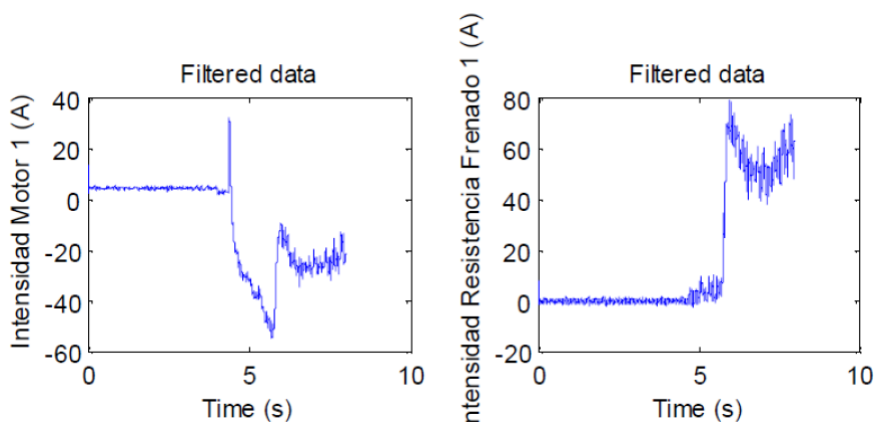


Figura A2.52. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M1 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

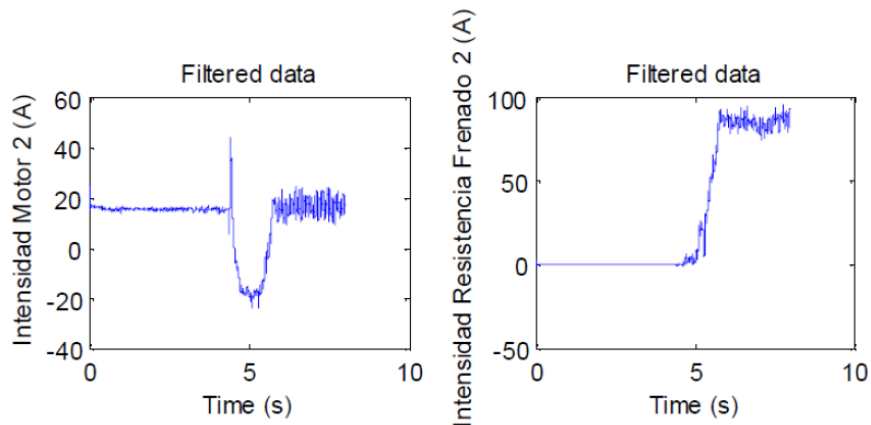


Figura A2.53. Gràfic del corrent de l'equip de tracció M2 i la resistència de frenat associat a aquest equip de tracció.

A la Figura A2.52, s'observa com el corrent de l'equip de tracció de M1 és baix i cap als 4,5 segons de la gràfica, el corrent passa a ser negatiu. Això vol dir, que el tramvia està frenant, és a dir, el motor de tracció passa a funcionar com a generador. L'energia regenerada per l'equip de tracció es divideix en dos parts: una part va cap la línia aèria d'alimentació i l'altre part va cap la resistència de frenat de M1. Si observem la Figura A2.53, el corrent de l'equip de tracció de M2 és molt similar al de l'equip de M1. I el mateix passa amb el corrent de les resistència de frenat de M2.

A la Figura A2.54, es pot veure com la tensió de catenària augmenta des dels 830V als 855V degut a que el tramvia no consumeix corrent sinó que torna corrent a la línia.

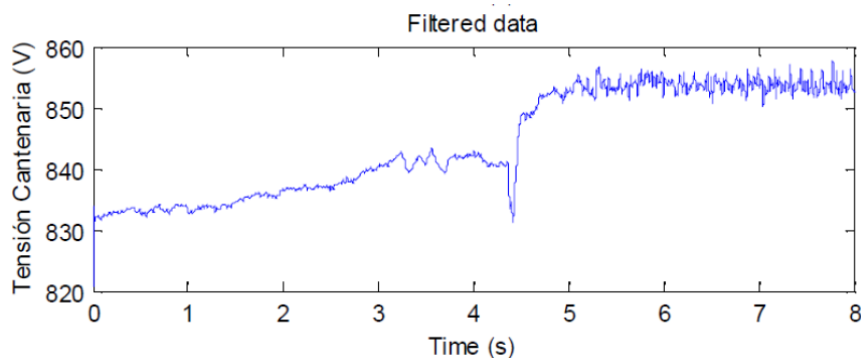


Figura A2.54. Gràfic de la tensió de catenària

A les Figures A2.55 i A2.56, es veu com el consum de l'equip de climatització de C1 és molt baix 1A (no hi ha consum per part de la climatització degut a que la temperatura interior està estable o és igual que la temperatura de consigna) mentre que l'equip de climatització de C2 consumeix 15A. Aquest diferència es

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

deu al consum del convertidor estàtic per les necessitats dels serveis auxiliars del tramvia.

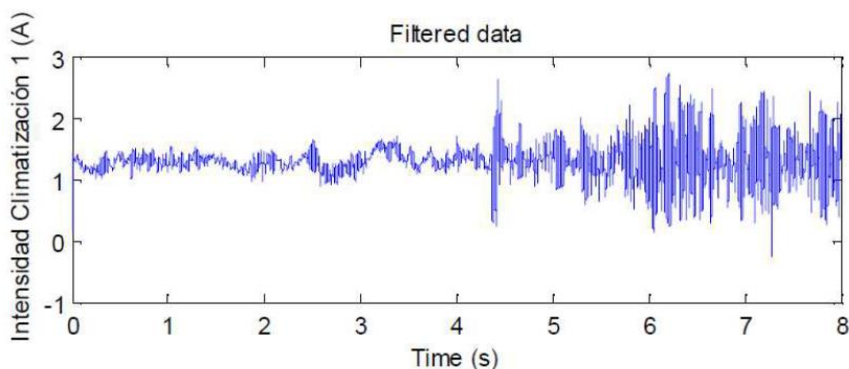


Figura A2.55. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C1.

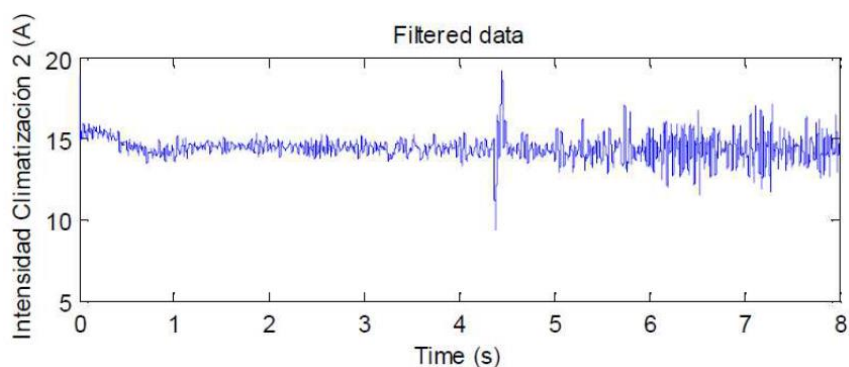


Figura A2.56. Gràfic del corrent de l'equip de climatització C2.

12.5. Anàlisi general

Un cop fet l'anàlisi individual i per separat de cadascun dels arxius, tot seguit "unirem" els diferents gràfics segons l'ordre de registre.

Observem que el LOG171 inicia amb un corrent de tracció M1 y M2 elevat (proper a 250A) mentre que el LOG170 finalitza amb un corrent de tracció als voltants de 25A. Aquesta diferència de corrent ens indica que el LOG171 no és just el posterior immediat del LOG170.

Si fem la mateixa revisió de valors finals de l'arxiu previ i els comparem amb els valors inicials dels arxius següents, observem que la majoria d'arxius "llogant". És a dir, el LOG172 és el següent del LOG171, el LOG173 és el següent del LOG172 i així fins arribar a l'arxiu LOG176. S'aprecia una continuïtat quasi perfecta des de l'arxiu LOG171 fins a l'arxiu LOG176.

Els arxius LOG177, LOG178, LOG179 i LOG180 més el primer arxiu (LOG170) sembla que no estan en l'ordre correcte.

ANÀLISI EXPERIMENTAL DE LA PROBLEMÀTICA DE CÀRREGA-DESCÀRREGA DE ACCE APLICABLES EN TRANSPORTS

Creiem que aquest desordre dels arxius s'ha produït entre la presa de dades i la posterior neteja mitjançant el software de eliminació de soroll.

Si prenem com a correcte l'arxiu LOG170, el següent podria ser el LOG179. I després podria ser el LOG180. Però a partir d'aquest moment, no hi ha una continuïtat lògica i els arxius LOG177 i LOG178 resten sense connexió entre si ni amb els altres arxius.

12.6. Conclusions

Com a primera conclusió, indicar que la implantació del sistema de mesura embarcat ha estat prou bo.

De l'estudi individual dels registres hem vist com l'energia de frenat no sempre va cap a les resistències de frenat. L'energia regenerada pels equips de tracció del tramvia envien l'energia cap la catenària i, si no es receptiva, llavors es consumeix en forma de calor a les resistències de frenat.

Dels diferents gràfics, fem els següents comentaris o conclusions:

- El comportament dels equips de tracció de M1 i M2 han estat molt similars. Només en l'arxiu LOG172, els gràfics no han tingut el mateix comportament.
- El consum màxim dels equips de tracció ha estat d'uns 250A (corrent equip M2 del LOG171).
- El consum màxim del sistema de climatització està als voltants de 21A.
- El consum màxim del convertidor auxiliar està als voltants del 8A.
- Quan hi ha un consum superior a 100A per part dels equips de tracció, la tensió de la catenària disminueix fins els 780V.
- Quan hi ha un frenat regeneratiu, la tensió de la catenària augmenta fins els 850V.

Donat que és impossible aconseguir una continuïtat de tots els arxius i que no podem recuperar l'ordre correcte dels arxius, l'estudi individual (arxiu per arxiu) és acceptable però l'estudi en conjunt no. Per tant, degut a aquesta discrepància és impossible ubicar la posició del tramvia dins del tram o recorregut analitzat i no podem conèixer amb exactitud el comportament del tramvia i tampoc la reacció com a conseqüència de l'estat del tramvia (tracció, deriva o frenat).

Aquesta discrepància de continuïtat, la impossibilitat d'un estudi del tram recorregut i el soroll elèctric dels valors registrats, ens indica que s'hauria de repetir la prova del sistema de mesura embarcat així com recollir més dades importants per l'estudi i anàlisis com geo localització (posició exacte), velocitat instantània i comportament del tramvia (tracció, deriva, frenat, aire condicionat encès, etc...) per cada arxiu o registre.

Però desgraciadament, les pertorbacions i l'emmagatzematge dels arxius ens ha portat a uns resultats poc brillants.