

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

ARXIU DE LA SECCIÓ DE CIÈNCIES, LXVI

ENRIC RAS i OLIVA

Membre de l'Institut d'Estudis Catalans

DIRECTRIUS PER A UN ENLLAÇ
MALLORCA - EIVISSA
DE TRANSMISSIÓ D'ENERGIA
MITJANÇANT CORRENT CONTINU

BARCELONA

1982

DIRECTRIUS PER A UN ENLLAÇ
MALLORCA - EIVISSA
DE TRANSMISSIÓ D'ENERGIA
MITJANÇANT CORRENT CONTINU

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

ARXIU DE LA SECCIÓ DE CIÈNCIES, LXVI

ENRIC RAS i OLIVA

Membre de l'Institut d'Estudis Catalans

DIRECTRIUS PER A UN ENLLAÇ
MALLORCA - EIVISSA
DE TRANSMISSIÓ D'ENERGIA
MITJANÇANT CORRENT CONTINU

BARCELONA

1982

L'EXCMA. DIPUTACIÓ PROVINCIAL DE BARCELONA
HA CONTRIBUÏT GENEROSAMENT
A L'EDICIÓ D'AQUEST VOLUM

© Enric Ras i Oliva, Barcelona

ISBN 84-7283-040-3

Dipòsit legal B. 3.918-83

La present edició és propietat de l'INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

La redacció d'aquest treball fou acabada a mitjan 1981. L'INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS n'acordà la publicació en la sessió plenària del dia 10 de febrer de 1982.

This One



RYGY-6NW-6NEX

§ 1 – ENLLAÇ MALLORCA-EIVISSA: UNITAT DEL SISTEMA ELÈCTRIC BALEAR

§ 1.1 – Unitat del sistema balear

Actualment existeixen els enllaços Mallorca-Menorca i Eivissa-Formentera (ambdós amb c.a.). El que proposem, breument designat enllaç Mallorca-Eivissa, necessàriament haurà d'emprar el corrent continu, modalitat encara no utilitzada a Espanya. És així com hom pot assolir la unitat del servei elèctric balear. Mitjançant un sistema centralitzat de telecomandament, com és ara l'existent per al conjunt Mallorca-Menorca, hom podrà operar amb rapidesa i racionalment. Especialment, hom haurà fet possible una política de generacions amb abaratiment del kWh (polítiques de combustibles i de millors utilitzacions).

La inversió d'establiment pesa, motiu pel qual hom estudia amb molt d'interès la reducció de la inicial per tal que el rendiment econòmic no s'endarrerixi massa. Això serà funció de factors diversos, en primer lloc dels increments de consums en el sistema Eivissa-Formentera.

§ 1.2 – Creixements dels consums

Segons hom pot veure a la *Memoria Ejercicio 1980 de Gas y Electricidad, S.A. (GESA)*,¹ els augments de consums s'han afeblit fortament els darrers anys. Nogensmenys, hom pot observar que, precisament en el sistema més antieconòmic, encara són interessants per a un projecte d'aquesta natura.

El sistema Mallorca-Menorca ha deixat de produir els considerables augments que havien arribat a ésser normals. Per primer cop, l'any 1977 es produí un estancament, però l'any 1978 encara ho compensà amb un incre-

¹ Darrera memòria existent en redactar-se aquest treball.

ment del 8,84%. El 1980 el creixement es reduí a 3,3%. El sistema Eivissa-Formentera sol produir increments superiors:

1977	1978	1980	valor mitjà 1975-80
2,33%	13,7%	8,8%	8,28%

A l'etapa crítica que hom travessa, i per la quantitat de factors aleatoris que hi concorren, GESA no s'acaba de definir quant a previsions d'augment de consums. A la *Memoria Ejercicio 1980* hom comenta, respecte al conjunt balear:

“Si bien es cierto que se observa un crecimiento en la generación eléctrica, impuesto por la demanda, y que una rápida lectura de los datos comentados sugiere que el mercado de GESA es expansivo, no es menos cierto que el valor de los incrementos alcanzados, como su tendencia decreciente, ponen en entredicho u obligan a matizar aquella primera impresión” (...).

“Con esta situación resulta difícil poder deducir, de las tasas de crecimiento observadas, una situación claramente expansiva del consumo eléctrico”.

Malgrat la consideració precedent, és diferent la previsió corresponent a Eivissa-Formentera.

“... este sistema insular presenta unos rasgos propios que mantiene a lo largo de los años a pesar de la crisis económica, si bien matizados por ésta. Estos rasgos son una marcada estacionalidad y unas tasas de crecimiento elevadas”.

Com a resum podem retenir que, segons les dades reals disponibles fins avui, precisament el sistema Eivissa-Formentera encara té creixements de consums apreciables que, si persisteixen, representen un factor important per a la viabilitat del projecte, sense menysprear-ne d'altres.

Realment el problema de la incertesa és molt generalitzat i procedeix de diverses causes: preus futurs dels combustibles,² noves possibilitats en les generacions; evolució de l'estacionalitat (punts de consum); creixements de costos per contaminacions ambientals... L'actitud del planificador davant la incertesa és la diversificació, cal comptar amb períodes de manques o fretures de determinats combustibles... El problema de la incertesa és tractat a la referència [14]. Reproduïm literalment (p. 8):

“Studies indicate that generally if a 2 to 1 benefit-cost ratio can be achieved over a 20 year amortization period a payback period of slightly over 5 years is enough to achieve a 1 to 1 benefit-cost ratio. That is a sufficiently short period of time so that the decision maker can feel confi-

² Si aquest projecte derivés vers una possible interconnexió amb la península, hi serien factors principals les projeccions dels costos dels carbons i de l'urani.

dent that none of the sources of uncertainty can sufficiently develop to adversely affect the investment.”

Convé constatar que els augments dels preus de l'energia elèctrica no han tingut paral·lels increments en els costos de les línies de transports ni tampoc en els de les màquines de generació, i això indueix a planificar amb millors rendiments. Els que sí que augmenten considerablement són els costos per contaminacions ambientals (incloent-hi els d'impacte ambiental) però, en aquest aspecte, el projecte no presenta problemes greus, ans al contrari, mirat amb globalitat tendeix a pal·liar-ne de futurs.

Cal assenyalar que, en la tecnologia del transport per corrent continu, són notables les millores assolides especialment a les estacions convertidores (ee. cc.), tant pel que fa a fiabilitat com a disminucions relatives de costos. Tot plegat, amb una important repercussió econòmica, fa que els transports per corrent continu ofereixin perspectives que encara no fa cinc anys eren desaconsellables o dubtoses.

Les raons esmentades expliquen les reserves a l'hora d'establir hipòtesis sobre l'esdevenidor; però, superada l'actual etapa de transició deguda principalment a canvis forçats,³ caldrà establir hipòtesis de creixements de consums d'energia i de puntes de potència.⁴ Amb aquestes hom podrà establir la planificació en terminis concrets i les avaluacions econòmiques comparatives corresponents als sistemes elèctrics balears amb i sense la unió.⁵ Però, fins i tot sense aquestes dades, raons que hom examinarà poden aconsellar l'adopció d'aquest projecte ja per a l'etapa de transició forçada present.

§ 2 – CARACTERÍSTIQUES DELS SISTEMES ELÈCTRICS EXISTENTS; PARTICULARITATS DERIVADES DEL CARÀCTER MULTIINSULAR DEL TERRITORI

§ 2.1 – Primeres consideracions

Convé considerar els factors que indueixen a pensar en la conveniència d'establir properament aquest projecte, o un de semblant, malgrat la incer-

³ Mutació dels preus de les energies primàries iniciada el 1973.

⁴ Problema especialment greu a Eivissa. Sobre futures possibilitats d'emmagatzematges energètics és interessant la documentació reunida a la referència [3].

⁵ Un mètode consisteix en un doble càlcul de costos totals de producció i forniment dels anys successius. Un altre mètode pot consistir en l'avaluació de la planta de generació suplerta amb l'establiment de l'enllaç, amb fiabilitats equivalents, i a comptabilitzar les diferències de costos de producció.

Amb increments de consums nuls desapareix el primer concepte però resta el segon (hipòtesi més desfavorable).

tesa existent. Creiem oportuna la transcripció d'apreciacions de l'entitat afectada. La *Memoria Ejercicio 1979 (GESA)* exposa:

“Para una misma cantidad de energía suministrada, la punta (potencia máxima) que debe cubrirse es mayor que en la Península, debido a la forma de la curva de carga y a la estacionalidad”.

“Para cubrir una misma punta, la potencia de generación que se necesita es mayor por la ausencia de interconexiones con otras empresas, que obliga a GESA a mantener la totalidad de la potencia de reserva para hacer frente a cualquier eventualidad o avería”.

“La potencia de generación debe estar, además, fragmentada en máquinas de pequeña potencia unitaria, también por razones de seguridad, y su coste por kW es muy superior al de las máquinas comparables de tamaño mayor, así como sus necesidades de personal”.

Cal afegir-hi la consideració dels baixos rendiments de les màquines petites i els majors costos dels combustibles que empren.

GESA està esmerçant esforços per tal de “reducir los sobrecostes estructurales de sus sistemas aislados”; a la *Memoria Ejercicio 1980* es pot llegir:

“La incorporación de dos grupos de 125 MW a carbón y/o fuel significa alcanzar uno de los logros principales que se fijaban en los objetivos del Proyecto (central Alcudia II): una importante aportación en el ahorro energético regional, por la mejora substancial que supondrá en el consumo específico y por la mayor utilización que en adelante podrá hacerse del lignito mallorquín. Lo que equivale a afirmar también que Alcudia II será una fuente tangible de ahorro de divisas, a su escala”.

És obvi que l'esforç d'apropament que hom fa vers unitats modernes més rendibles¹ no beneficia el sistema Eivissa-Formentera. Per tal d'apreciar aquests i altres factors que intervenen en les orientacions de les planificacions dels sistemes balears, en resumirem les característiques principals. Les dades fan referència al 31 de desembre de 1980.

§ 2.2 – Potències i energies

Sistema Mallorca-Menorca

Potència de generació	397,6 MW
Utilització	38,3% ²
Punta de demanda	262 MW (65,9%)
Producció	$1.336 \cdot 10^6$ kWh

¹ A Europa recomanen, si la mida no és inconvenient per motius concrets (dispersió de centrals, etc.), unitats nuclears de $1000 \div 1300$ MW i unitats tèrmiques clàssiques de $300 \div 600$ MW.

² Valor disminuït per l'entrada en servei, el desembre de 1980, de dos grups de turbines de gas de 25 MW c/u (Son Molines II).

Venda	1.087 · 10 ⁶ kWh
Increment de demanda	3,3%

El 1981 entra en servei la Central Alcúdia II (2 × 125 MW), i així la utilització disminuirà fins a valors de l'ordre del 25%.

Sistema Eivissa-Formentera

Potència de generació	53,51 MW
Utilització	33,7%
Punta de demanda	39,7 MW (74,2%)
Producció	158 · 10 ⁶ kWh
Venda	133 · 10 ⁶ kWh
Increment de demanda	8,8%

Per al 1981 hom compta amb una potència de generació de 53,51 + 30 = 83,51 MW, per això la utilització baixarà fins a valors de l'ordre del 22%.

Cal considerar (31/12/1980)

1r. La baixa participació del sistema Eivissa-Formentera a la generació d'energia en el sistema balear, malgrat el parc de generació disponible i l'alta participació en la punta de potència:

generació d'energia	11,8%
potència de generació	13,5%
punta de demanda	15%

2n. L'extraordinària i persistent estacionalitat de la demanda Eivissa-Formentera. Les relacions entre les màximes i les mínimes produccions mensuals són

Mallorca-Menorca	1,3
Eivissa-Formentera	2,3

3r. L'esforç que hom realitza a Mallorca (Alcúdia II) per tal d'assolir estalvis energètics i de divises mitjançant consums específics menors i, especialment, amb l'ús del lignit mallorquí.

4t. La baixa utilització del parc de generació d'Eivissa. També ho és la del parc de Mallorca, encara més de dordre per la seva importància relativa. Malgrat aquesta realitat, encara seran més baixos els corresponents valors en el proper futur. Cal comptar amb l'entrada en servei (1981) de 250 MW a Alcúdia II, potència de generació que hom afegirà als 50 MW que a la darrera

del 1980 foren instal·lats a Son Molines II,³ “para seguir en óptima adaptación con el aumento unitario de los nuevos grupos de Alcudia II”. A Eivissa l'augment de potència previst per al 1981 és del 56%, degut a l'entrada en servei de la nova central Eivissa III. És obvi que hom no podia pensar a ampliar-la amb màquines de potències unitàries majors.

§ 2.3 – Característiques dels parcs de generació (31/12/80)

§ 2.31 – Generacions Mallorca-Menorca – 397,6 MW

El parc de l'illa de Mallorca disposa de les centrals:

Sant Joan de Déu – 195 MW. Any 1966

Central que ha estat cremant fuel-oil amb cinc unitats de 40 MW.

Alcúdia I – 67,5 MW. Any 1957

Central preparada per a cremar indistintament lignit o fuel-oil. Disposa de dos grups de 15 MW i un de 40 MW.

Son Molines I i II – 96,6 MW

Central constituïda per grups de turbines de gas (pistons lliures) amb potències compreses entre 6 MW i 14 MW (1962-65). El 1980 s'instal·laren dos grups nous de turbines de gas de 25 MW c/u. La finalitat d'aquest centre generador és de proporcionar agilitat al sistema global en el canvi de demanda. Agilitat que serà afeblida amb la instal·lació dels relativament grans grups nous.

Alcúdia II – 250 MW. Any 1981

Passarà a constituir la base de la generació del sistema. Sant Joan de Déu, fins ara central de base, esdevindrà central d'ajut i de reserva. Alcúdia I deixarà de funcionar. Alcúdia II entra en servei, el 1981, amb dos grups de 125 MW c/u, i n'estan previstos dos més per a etapes posteriors. Podrà cremar, indistintament, combustibles sòlids i líquids. Emprarà lignits mallorquins, cosa que ha estat un dels objectius principals de GESA.

Maó – 38,5 MW

Opera per potència, el 1980 n'ha arribat a proporcionar el 30%, i això que només ha fornit el 8% de l'energia de la illa. Això és indicatiu de l'encert en l'establiment de l'enllaç Mallorca-Menorca.

³ Augments que parcialment seran compensats per la retirada de servei de la central Alcúdia I (67,5 MW).

Resum

La generació del sistema Mallorca-Menorca, basada en l'ús de combustibles líquids (Sant Joan de Déu, Son Molines I i II i Maó), mitjançant unitats amb potències petites (màximes de 40 MW), perdrà participació en benefici dels combustibles sòlids i amb unitats de generació de major potència (Alcúdia II, 125 MW c/u).

§ 2.32 – Generacions Eivissa-Formentera – 53, 51 MW

Són les centrals Eivissa I i Eivissa II que han donat el forniment mitjançant unitats amb potències compreses entre 1 MW i 8 MV.⁴

L'esdevenidor és previst a base d'Eivissa III, inicialment (1981) amb dos grups Diesel de 15 MW c/u i un tercer grup posterior d'igual potència.

La superioritat del sistema de generació és evident, i malgrat això a la *Memoria Ejercicio 1979 GESA* hom diu:

“El progresivo endurecimiento del tema energía, a partir de 1973, ha creado a GESA una situación particularmente difícil debido al hecho de que las islas no disponen de potencial hidroeléctrico utilizable y a que no cabe el recurso de la energía nuclear, por la reducida demanda global”.

Respecte a la generació de Mallorca, a la d'Eivissa hi concorren tres factors principals d'encariment del kWh: a) generació amb unitats considerablement més petites; b) ús exclusiu de combustibles líquids; c) baixa utilització del parc. L'enllaç, amb la producció de base a Mallorca, reduirà els dos primers inconvenients i el parc actual d'Eivissa passarà a constituir la necessària reserva.

§ 2.4 – Sistemes actuals de transports

Mallorca

Fins al 1980, els transports d'energia elèctrica han estat fets mitjançant les tensions 132 kV i 66 kV. El 1981, a Mallorca entrarà en servei el transport a 220 kV amb tres estacions noves: Es Bessons, Son Orlandís i Llubí. Per això el punt actual de partença de l'enllaç Mallorca-Menorca (Marratxí, 132 kV) passarà a ésser a Es Bessons (Manacor).

Menorca

És basat en el triangle Ciutadella-Mercadal-Sa Dragonera, a 132 kV.

⁴ Formentera disposa de 600 kW però únicament genera amb finalitat de manteniment.

Enllaç Mallorca-Menorca (1975)

La línia dona servei amb tensió alterna trifàsica de 132 kV. La potència nominal és de 100 MVA (80 MW). L'any 1980 transportà el 92% de l'energia consumida a Menorca. Els extrems del tram submarí són Cala Mesquida a Capdepera (Mallorca) i Cala Bosc a Ciutadella. Disposa de 4 cables monofàsics de tipus d'oli fluid (OF, 500 mm² d'alumini), un dels quals és de reserva. La longitud de la línia submarina és de 42 km, prop del límit de la possibilitat pràctica de solució amb corrent altern.⁵ Constitueix l'enllaç submarí més llarg existent basat en c.a.

És previst el possible funcionament futur tot emprant el corrent continu. Amb aquesta finalitat, el fabricant garantí els valors nominals de 200 kV, 500 A per cada cable. Amb servei de cada dos cables en paral·lel, ± 200 kV, hom disposarà d'una potència de transferència de 400 MW.⁶

Als extrems de la part submarina de l'enllaç n'hi ha de subterrànies⁷ fins a arribar a les línies aèries (fins a Marratxí, 74 km). Els cables submarins hi són dipositats amb separacions de 500 m⁸ i fins a profunditats de 82 m.

Existeix un sistema centralitzat (Marratxí) de telecomandament que governa les estacions de Mallorca i Menorca. És així com és aconseguida una major racionalitat d'operació amb economia, rapidesa i seguretat.

Aquest enllaç ha estat descrit amb algun detall ja que en el proposat, Mallorca-Eivissa, en el seu variant bàsic, hom adopta els mateixos valors nominals de tensió i de corrent per cable. L'adopció de la mateixa tensió té per objectiu la previsió d'un enllaç futur Península-Balears (multiterminal).

Enllaç Eivissa-Formentera (1972)

Línia de c.a., 6 MVA, 30 kV, cable trifàsic de 3×50 mm², amb una longitud de 14 km.

⁵ La compensació del corrent capacitiu dels cables prové de dues reactàncies a cada extrem (4×30 MW). Aquest aspecte és tractat en el § 3.

⁶ Vegeu el considerable augment de capacitat de transmissió ($\times 5$) amb el canvi del servei en c.a. pel de c.c., certament tot donant utilitat al quart cable. Exàmens comparatius de les capacitats de transports per a línies emprades en c.c. o en c.a. poden veure's a la referència [10].

⁷ Amb seccions augmentades (800 mm², Al).

⁸ Separació de precaució per tal d'evitar una doble avaria. Precisament en aquesta línia un dels cables fou avariat per una embarcació.

§ 3 – LÍNIES SUBMARINES AMB CORRENT CONTINU

Des de l'establiment del primer enllaç submarí mitjançant corrent continu (Gotland, 1954), han entrat en servei (1981) fins a nou instal·lacions d'aquest gènere. És en període d'execució la segona interconnexió entre França i Gran Bretanya. Sembla oportú d'aplegar en un quadre les característiques principals d'aquestes unions, ja que hi farem referència.

També hi ha línies submarines de c.a., especialment a Noruega, on ara en donen servei més d'un miler amb longituds curtes, a més de la interconnexió de c.c. de Skagerrak. Empren tensions de fins a 420 kV (c.a.) i són dipositades fins a 670 m de profunditat.

Sembla útil la transcripció de la conclusió de l'informe 21-12 de la CI-GRÉ 1980, *Développement des câbles sous-marins d'énergie en Norvège*:

“Il est évident qu'une planification minutieuse est d'une importance capitale quand on désire réaliser une installation de câbles sous-marins fiable. (. . .). Mais les moyens dont on dispose aujourd'hui pour étudier de près tous les aspects du problème sont parvenus à un tel degré de perfection que l'on peut obtenir une installation fiable même lorsque les conditions sont difficiles. Beaucoup de problèmes relatifs au transport de l'énergie électrique que l'on considèrerait comme insurmontables il y a quelques dizaines d'années, peuvent maintenant être résolus au moyen de câbles sous-marins. (. . .)”.

En el § 7 hom examina el cas que aquí interessa i, bé que pendent de la planificació minuciosa que en tot cas cal efectuar, no sembla que la diposició de la línia pugui constituir un obstacle.

La decisió de l'adopció del c.c. o del c.a. és, en determinats casos, una qüestió dubtosa;¹ en el de l'enllaç Mallorca-Eivissa no ho és.

L'elevada capacitat que ofereixen les línies submarines llargues² amb operació en c.a. requereix el forniment reactiu que aquesta càrrega implica. Fins avui hom no ha resolt l'instal·lar compensacions intercalades, pel greu inconvenient que suposa d'establir-les en els fons marins tot comptant amb la possible necessitat de substitució en cas d'avaria.

En el § 2.4 ja ha estat esmentat el cas de la unió Mallorca-Menorca, l'alimentació d'energia reactiva de la qual és efectuada mitjançant dues reactàncies trifàsiques de 30 MVA a cada extrem (263 A); per aquesta raó la línia, de 100 MVA, es redueix a la capacitat de 80 MW de forniment.

¹ Cas dels enllaços França-Gran Bretanya, el primer dels quals fou, al principi, projectat a base de c.a.

² És prou sabut que les curtes han d'emprar necessàriament el c.a., altrament el cost de les conversions gravaria excessivament el total de la línia. És el cas esmentat de Noruega, on per a travessar els nombrosos fiords hom ha utilitzat aquesta tècnica (vegeu [25]).

Les raons exposades han motivat la regla orientativa per la qual no caldria pensar, en termes econòmics, en la utilització del c.a. en tractar-se de longituds superiors als $50 \div 70$ km car les "ocupacions" dels cables pel corrent reactiu foren excessives.³

Ja ha estat dit que els costos relatius de les ee. cc. es van reduint i, consegüentment, els globals dels enllaços mitjançant c.c. en vist els anàlegs amb c.a. Això comporta que les longituds màximes d'utilització del c.a. s'escurcin.

§ 4 – CONDICIONS DE FACTIBILITAT PER A UN ENLLAÇ MALLORCA-EIVISSA

La viabilitat tècnica i econòmica d'un projecte d'enllaç Mallorca-Eivissa implica:

- previsió a llarg termini;
- elevada fiabilitat;
- escalonament de les inversions;
- bons rendiments, supeditats als objectius precedents.

Aquestes condicions, amb pocs factors més que hom indicarà, gairebé determinen el projecte. La previsió a llarg termini, fins a ben entrat el proper segle, ha d'ésser compatible amb una inversió inicial reduïda.¹ Sortosament, una de les característiques de les transmissions per corrent continu és la possibilitat d'establir ee. cc. escalonadament.² La possibilitat de retorn del corrent per mar també permetrà ajornaments de les inversions. Caldrà mantenir, però, la fiabilitat en totes les etapes de l'establiment del projecte, amb una especial atenció en l'eliminació de possibilitats d'indisponibilitats totals de durada.

La petitesa de la demanda actual d'energia elèctrica a Eivissa, i també la de la punta de potència, i els respectius creixements futurs, previsiblement moderats, podrien induir a adoptar valors de tensions i corrents nominals finals antieconòmics per baixos. Cal adoptar valors que estiguin dins l'escala dels avui considerats econòmicament acceptables. Ja en el § 2.4 hem proposat la tensió ± 200 kV. També sembla convenient el corrent nominal per

³ Rasquin ha fet veure (1981) com, amb bobines de reactàncies adients als extrems, és possible assolir transports importants a 200 km i fins i tot a 400 km. En el seu treball declara, però, que no estudia l'aspecte econòmic. Referència [32].

¹ Altrament dit, caldrà evitar baixes utilitzacions. La referència [28] proporciona coeficients d'utilització de les unions en servei.

² Possibilitat interessant que, en equivalent mesura, no ofereixen els transports amb c.a.

cable de 500 A.³ Això proporciona una potència nominal (final) de transport de 200 MW, relativament modesta (vegeu el quadre del § 3).

La possibilitat d'escalonament de les inversions, amb etapes amb capacitats de transports intermèdies, permet l'establiment progressiu de la instal·lació sense que d'antuvi calgui fixar dates. El punt de referència fóra no augmentar més l'actual parc de generació d'Eivissa (53,51 + 2 x 15 MW). Les etapes d'establiment, sempre referides a les previsions de les puntes amb antelacions moderades de temps, són proposades en el § 6.4.

Es pot veure que, àdhuc amb una improbable progressió exponencial de la demanda amb la tradicional i simplista regla de duplicació cada deu anys, el projecte dona solució fins al començament del proper segle.

Una inversió inicial substancial és inevitable, de forma que els majors creixements de demanda a Eivissa augmenten la rendibilitat de l'enllaç. Això és independent dels creixements a Mallorca, bé que majors demandes a Eivissa traslladades a generacions a Mallorca fan que aquestes siguin més rendibles.

§ 5 – FIABILITATS EN LES UNIONS DE C.C. EXISTENTS.¹ PREVISIONS PER AL PROJECTE MALLORCA-EIVISSA

§ 5.1 – Dades globals d'indisponibilitats a les unions existents

És d'interès la tasca realitzada pel Grup de Treball 04 del Comitè d'Estudis núm. 14 de la CIGRÉ en reunir els resultats de funcionament de les instal·lacions en servei. Malauradament, el darrer informe,² corresponent a 1980, només aplega dades fins a l'any 1978. És més lamentable el fet que, si són prou significatives les corresponents a les instal·lacions amb vàlvules de vapor de mercuri, per contra les de les equipades amb tiristors es limiten als anys 1977 i 1978.³

No sembla justificable la reproducció de la informació de l'informe 14-08 (*Vue d'ensemble du comportement en service des réseaux de transport à courant continu dans le monde au cours de la période 1975-1978*), malgrat que proporciona la possibilitat de fer projectes amb determinats graus de

³ La unificació de característiques en els cables d'ambdues unions de Mallorca (Menorca i Eivissa) proporciona l'avantatge de poder disposar d'una determinada longitud de cable de reserva útil indiferentment.

¹ Les denominacions emprades en aquest § es troben definides a la publicació CEI 633 (6), referència [13]. També es troben resumides a l'annex de l'informe 14-08 de la CIGRÉ 1980 [28].

² Informe 14-08 CIGRÉ 1980, referència [28].

³ Llevat de la instal·lació d'Eel River, que s'avançà a emprar tiristors (1972), la següent fou Skagerrak (1976-77) i l'any 1977 entraren en servei cinc enllaços d'aquest tipus.

fiabilitat.⁴ Aquí ens limitarem a aportar-ne les dades principals i a extreure'n les conseqüències que ens han de servir per a justificar les directrius adoptades en la concepció d'aquest projecte.

Finalitzat l'any 1981 amb prop de 14.000 MW de potència de transferiment de tota mena de transports per corrent continu en servei, 8.000 MW són amb conversions mitjançant tiristors.

Les indisponibilitats d'energia són representades al gràfic de l'informe CIGRÉ esmentat que és reproduït a la figura 1. En el període de 1977-78, la indisponibilitat mitjana equivalent dels enllaços amb tiristors fou del 5,6%, mentre que la corresponent a les instal·lacions amb vàlvules de vapor de mercuri, en el període de 1975-78, fou del 18,7%.

És significativa la progressiva disminució de les indisponibilitats forçoses degudes a les ee. cc. en general però especialment en el cas de les que funcionen amb tiristors. Preferentment examinarem aquests darrers tipus de conversions pel fet que la tecnologia basada en les vàlvules de vapor de mercuri ha estat relegada.⁵

Per a una bona interpretació dels gràfics són convenients els següents aclariments:

- Hom indica percentatges d'indisponibilitats forçades equivalents, sense que això signifiqui necessàriament indisponibilitats totals de la instal·lació. Dit altrament, pot tractar-se d'un conjunt d'indisponibilitats parcials.

- Les indisponibilitats programades tenen un valor relatiu. En donen una indicació les significatives diferències d'indisponibilitats entre unes i altres instal·lacions. Un equip suficientment nombrós i preparat pot reduir notablement les durades de les parades programades. D'altra banda, les baixes utilitzacions horàries o estacionals, tan freqüents, permeten fer aturades sovintejades sense que calgui emprar equips per a treballs simultanis. També són usitades parades parcials que no priven els transports energètics normals bé que són comptabilitzades dins les indisponibilitats globals.

§ 5.2 — Indisponibilitats forçades degudes a les ee. cc.

La mitjana de les indisponibilitats equivalents forçades corresponent als enllaços amb tiristors (1977-1988) fou de l'1,1%, valor que pot ésser comparat amb el dels enllaços més experimentats basats en les vàlvules de vapor

⁴ Reserva ja feta dels pocs anys d'informació en el cas de les ee. cc. amb tiristors. La lectura d'aquest informe és igualment recomanable a tot enginyer d'explotació.

Per l'encàrrec permanent del Comitè d'Estudis núm. 14, a la sessió de 1982 de la CIGRÉ hom disposarà d'un informe nou que aplegarà major experiència, no solament pels majors temps de serveis, ans també per les entrades de noves instal·lacions. El 1986 hom podrà comptar amb més de 20.000 MW de potència de transport total mitjançant tiristors.

⁵ La primera decisió en aquest sentit fou presa, amb molta polèmica, amb motiu de l'enllaç d'Eel River. El proper § 5.3 aporta dades que deixen justificada la relegació de les vàlvules de vapor de mercuri.

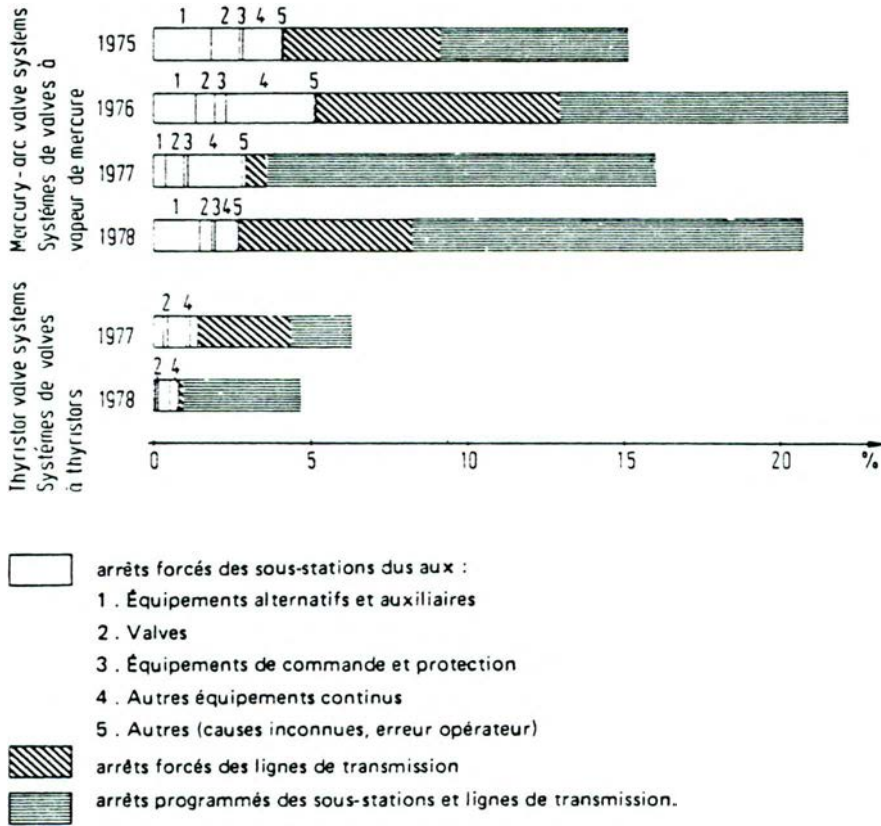


Fig. 1. Indisponibilitats mitjanes dels sistemes de transports mitjançant corrent continu. Sistemes amb vàlvules de vapor de mercuri (del 1975 al 1978) i amb tiristors (del 1977 al 1978).

$$\text{indisponibilitat (\%)} = \frac{\text{ind. forçada} + \text{ind. programada}}{\text{duració horària (8.760 h)}} 100$$

duració equivalent de parada – Sempre que la indisponibilitat és parcial, la durada real de la parada és multiplicada per un factor que representa la proporció de capacitat de transport perduda.

de mercuri, d'un 3,7%.⁶ La indisponibilitat programada, corresponent a les ee. cc. amb tiristors, fou del 3%.

La taxa d'avaries de tiristors ha estat d'un 0,6% anual.

La fiabilitat aconseguida amb els ponts de rectificació, incloent-hi les fallades de tiristors, és deguda als següents factors. Cada una de les branques d'un pont de rectificació és constituïda amb tiristors en sèrie en quantitat suficient per a garantir la seguretat en qualsevol règim de funcionament possible (pertorbat, sobretensions), però hom encara n'hi afegeix més ("redundants"). L'objectiu és establir un bon marge que permeti de continuar operant fins i tot amb tiristors avariats. No es tracta solament de constituir un coeficient de seguretat habitual en l'enginyeria en general, hom vol poder continuar operant, amb el sempre degut marge de seguretat, per tal d'evitar una interrupció forçada. Així hom en pot posposar indefinidament la substitució. Hom disposa de sistemes permanents d'advertència que precisen les localitzacions dels tiristors avariats. La quantitat de tiristors "redundants" és determinada, estadísticament, en funció de la utilització prevista i dels intervals de temps volguts entre dues revisions (anuals o més espaiades encara en el temps). Òbviament, l'augment del nombre de tiristors encareix el conjunt i produeix caigudes de tensió i pèrdues addicionals.

Els persistents progressos en les fabricacions de tiristors emmenen a una baixa relativa dels costos dels punts de conversió, les característiques dels quals hom pot progressivament aconseguir amb un nombre menor de tiristors.⁷ És així com són simplificats el control i les proteccions, i alhora augmentada la seguretat.⁸ Però, sempre amb l'objectiu d'augmentar la fiabilitat del projecte (esquema de la figura 2), i també per tal de donar-li independència de funcionament, és convenient que cada pont simple tingui serveis auxiliars propis. També proposem que cada pont doble (conjunt de dotze pulsacions) pugui operar independentment, per la qual cosa caldrà disposar una connexió a terra a cada estació convertidora. Amb operació normal de la instal·lació completa, la circulació del corrent en mar serà de

⁶ Cal dir que hom ha de judicar favorablement els resultats de les vàlvules de vapor de mercuri. Ho corrobora el fet que no han estat substituïdes a les instal·lacions que les han tingudes, bé que algunes han estat ampliades amb tiristors. Tanmateix, segons informacions recents, el principal proveïdor de vàlvules de vapor de mercuri ha comunicat als seus usuaris (Nova Zelanda) que ja no garantirà el forniment d'elements de recanvi.

⁷ En el decurs de set anys la capacitat rectificadora dels millors tiristors comercialment disponibles ha quedat multiplicada per 7,5 i en el de deu anys ho haurà estat per 15. Amb valors relatius: 1 a Cabora Bassa I (1973), 7,5 a Acaray/Paraguai (1980) mitjançant tiristors de 75 mm, i 15 a Dürnröhr/Austria (1983) amb tiristors de 100 mm.

⁸ Això justifica l'optimista conclusió de l'informe 14-08 de la CIGRÉ 1980 [28]:

"Le système à thyristors montre un fonctionnement excellent et une fiabilité qui est sous-estimée par les figures jointes pour la période 1977-78."

Cal no oblidar que els valors enregistrats a l'informe corresponen, en gairebé tots els casos, als primers anys d'entrada en servei de les ee. cc., amb tipus de tiristors avui ja superats.

pocs ampers, resultants del desequilibri normalment existent entre els dos ponts dobles.

Pel que fa a l'isolament i al refredament dels convertidors hom pot triar entre els sistemes mitjançant l'oli, l'aire o l'aigua desmineralitzada. Els sistemes mitjançant l'oli i l'aigua proporcionen la possibilitat d'evitar obra civil, car hom en pot fer les instal·lacions a la intempèrie. Cal observar que una revisió forçada o imprevista és més fàcil i més ràpida amb el sistema de l'aire.⁹

§ 5.3 — Indisponibilitats degudes a les línies

Les indisponibilitats de les línies solen ésser les predominants (figura 1),¹⁰ cal fer esment d'aquest fet. En les instal·lacions amb tiristors, més modernes i per aquesta raó amb línies fetes amb més experiència, la indisponibilitat equivalent mitjana deguda a les línies fou de l'1,5% en vist l'1,1% corresponent a les ee. cc. Convé d'insistir que es tracta d'indisponibilitats equivalents que no repercuteixen necessàriament, o en la mateixa proporció, en els forniments programats d'energia. Però àdhuc en aquests casos, les indisponibilitats constitueixen disminucions de capacitats de transport pasatgeres, és a dir, de seguretat (reserves).

Causes especialment greus d'indisponibilitats a les línies submarines són les avaries motivades pels vaixells (pesca, fondeig), raó per la qual avui hom insisteix a fer soterrar els cables del fons marí fins a les profunditats on sigui econòmicament possible. En alguna instal·lació on hom no ho féu, ha estat fet posteriorment. En l'aspecte mecànic els cables són projectats per a poder resistir traccions laterals considerables.

Òbviament, esdevinguda l'avaria cal eliminar-la amb promptitud, tot disposant de recursos o reserves que examinarem.

Tractant-se d'un cable submarí l'operació pot ésser delicada,¹¹ fins i tot depenent de l'estat de la mar, raó que ens farà ésser especialment previsors (§ 6.4).

⁹ La majoria de les conversions existents són d'isolació amb aire, però són d'oli les de Cabora-Bassa i Shin-Shinano. Actualment hom recomana la refrigeració mitjançant aigua, emprada per primera vegada a Nelson River II i darrerament a Acaray.

¹⁰ No fou així l'any 1977, entre les unions basades en ee. cc. amb vàlvules de vapor de mercuri, ni tampoc l'any 1978 en les unions que empen tiristors.

¹¹ Són importants les garanties ofertes pel fabricant i l'experiència.

A l'enllaç Skagerrak es produïren dues avaries al cable I (1976 i 1977), ambdues pel mateix motiu. El cable era previst per a un impacte de 1.000 kg, però un tipus nou d'embarcació de pesca el superà. El vaixell cabler especial, que havia estat emprat per a la dipositació, féu la reparació amb una durada de vint dies. Aparegueren vents que ultrapassaren els 23 m/s. Aquestes experiències aconsellaren el soterrament dels cables mitjançant raig d'aigua, mètode que fou millorat per un ejector [24].

Com hem dit GESA disposa d'una experiència semblant, però amb la seva línia de c.a. L'únic cable afectat no impedí el servei trifàsic.

La disposició allunyada dels cables és una bona precaució que ha evitat que les avaries motivades per vaixells afectessin més d'un cable.¹²

El recurs, com a reserva, del retorn marí és generalment admès.¹³

Per a les línies aèries cal comptar amb el sollament ("pol·lució") salí¹⁴ i amb les boires. En tractar-se de transports en c.c. hi ha el fàcil recurs d'operar transitòriament amb tensió reduïda.¹⁵

§ 5.4 – Consideracions finals sobre la indisponibilitat equivalent mitjana i sobre la utilització

En el § 5.1, gairebé d'entrada, hom comença aportant la dada de la indisponibilitat del 5,6%, corresponent als enllaços a base de tiristors en el bienni 1977-78,¹⁶ fet que pot alarmar malgrat la definició donada de tal concepte. Després de l'anàlisi duta a terme ha estat aclarit que àdhuc les indisponibilitats no programades no han de representar necessàriament disminucions en les transmissions programades d'energia, i encara menys manques de serveis, donades les reserves de generació disponibles en els sistemes units.

Encara podem afegir que, segons el gràfic de la figura 1, en les instal·lacions amb tiristors la indisponibilitat forçada equivalent de 1978 fou just la quarta part de la corresponent a 1977, mentre que la programada gairebé fou duplicada. També podem veure que la indisponibilitat forçada corresponent al 1978, en els sistemes basats en tiristors, fou una tercera part de la corresponent als sistemes amb vàlvules de vapor de mercuri el mateix any. També la indisponibilitat programada quedà reduïda a un terç en el primer cas. Un examen de conjunt de l'esmentat gràfic mostra el progrés absolut fins avui, que hom espera que continuï els propers anys, cosa que caldrà que palesi l'informe de la CIGRÉ del 1982.

Convé fer una breu referència a la utilització, definida per

$$\text{utilització (\%)} = \frac{\text{energia total transmesa}}{\text{capac. màx. règim. perm.} \times \text{durac. horària}} 100$$

¹² Únicament al Canal de la Mànega II hi hagué l'oposició de l'Almirallat a aquesta solució, per tal d'evitar perturbacions magnètiques sobre instruments de navegació; hom en tractarà al § 6.4.

¹³ Igualment fou refusat per l'Almirallat i també serà tractat al § 6.4.

¹⁴ Aspecte sobre el qual GESA té una bona experiència, referida a línies de c.a.

¹⁵ Així ha calgut fer-ho al transport aeri en c.c. Pacific Intertie I (any 1970).

¹⁶ En els sistemes amb entrades en servei dins el bienni, el càlcul es redueix a la duració horària d'establiment:

$$\text{ind. energ. mitj. equiv. (\%)} = \frac{\text{ind. forç.} + \text{ind. progr.}}{\text{duració horària real}} 100$$

La utilització mitjana de totes les instal·lacions, en el període 1975-78, ha estat només del 45%. Hi ha diferències grans entre unes i altres instal·lacions.¹⁷ Resulta que una mateixa instal·lació provoca considerables diferències d'utilització d'un any a l'altre, fet que pot ésser degut a hidraulicitats i altres factors. Hom pot preveure que, amb l'encariment de l'energia, el factor d'utilització encara perdi quelcom del seu interès. Malgrat això, en el cas de l'enllaç Mallorca-Eivissa no hi ha motius perquè la utilització variï, si no és en creixement, dins una etapa de funcionament, ja que no hi haurà dependència de la hidraulicitat i els estalvis deguts als aprofitaments d'energies renovables en els dos primers decennis hauran d'ésser introduïts pausadament.

Quan les produccions d'energies renovables adquireixin importància, llur variabilitat perjudicarà el problema de les puntes si simultàniament hom no resol el dels emmagatzematges energètics. En aquest cas caldria pensar novament en les generacions locals de puntes de potència per a, eventualment, ajornar entrades en servei de noves etapes de l'enllaç. Aquesta darrera conveniència caldrà que sigui considerada amb atenció en les necessàries reserves de seguretat.

Els plantejaments del § 4 i les consideracions precedents ens permeten de configurar el projecte.

§ 6 – CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS DE L'ENLLAÇ

§ 6.1 – Premisses per a l'establiment del projecte

1^a. Hom evitarà creixements del parc de generació d'Eivissa. Com a alternativa hom hi podrà instal·lar un tercer grup de 15 MW.¹

2^a. D'antuvi hom exclou el supòsit d'haver de reforçar directament el sistema Mallorca-Menorca des d'Eivissa. Un parc tan exigü i les característiques antieconòmiques de generació ho desaconsellen.

3^a. Alta fiabilitat global per tal d'aconseguir disponibilitats energètiques equivalents superiors al 96%.

4^a. Escalonaments d'inversions amb successives etapes d'establiments per tal d'assolir les millors utilitzacions possibles.²

¹⁷ Vegeu la referència [28], quadre II.

¹ Hom fa referència a la potència total de 83,51 MW, que ja inclou els 2 X 15 MW de la central Eivissa III. Aquesta és la hipòtesi bàsica del projecte. Segons quin sigui el retard en la decisió d'establiment del projecte, i a la vista de la data de disposició de l'enllaç, caldrà considerar la instal·lació del tercer grup de 15 MW.

Sobre aquest aspecte té interès el § 8.4.

² Sempre dependent del problema de les puntes, tan accentuat a Eivissa, que, però, tal vegada podria ésser alleugerit mitjançant una tarificació adient. Factors futurs, que aquí no és el moment de tractar, també poden pal·liar-lo.

SISTEMES DE TRANSMISSIÓ SUBMARINS MITJANCANT CORRENT CONTINU

24

ENLLAÇ DE TRANSMISSIÓ D'ENERGIA

Válv. vap. merc. = M Tiristors = T			Potència nominal MW	Tensió pol-terra kV X nº circuits	Longitud (km)			Retorn per mar	Dates reals o previstes d'entrades en servei	Filtres per a poder operar amb índex de pulsació sis ref. [5]	Observacions
					Línia aèria	Cable	Total				
1	Gotland (Suècia)	M T	30	150	-	96	96	mar	1954-70	sí	El 1970 un pont de tiristors
2	Canal de la Mànega (França-Regne Unit)	M T	160	± 100	7-8	50	65	no	1961-74	sí	El 1974 un pont de tiristors
3	Konti-Skan (Suècia-Dinamarca)	M	250	250	55-40	25-60	180	mar	1965	sí	
4	Nova Zelanda	M	600	± 250	535-35	39	609	possible	1965	sí	Bipolar + un cable de reserva
5	SACOI (Sardenya-Itàlia)	M	200	200	80-156-50	16-105	407	mar	1967	sí	Prevista una estació a Còrsega (sistema multiterminal)
6	Vancouver I (Canadà)	M	312	260	41	33	74	mar	1968-69	sí	-
7	Skagerrak (Noruega-Dinamarca)	T	500	± 250	85 - 28	127	240	possible	1976-77	no	-
8	Vancouver II (Canadà)	T	370	- 280	41	33	74	mar	1977-79	sí	-
9	Hokkaido - Honshu (Japó)	T	150 300	125 250	27 - 97	43	168	primeres etapes: retorn metàl·lic a mar i terra	1879-80-?	primera etapa, sí	Futur: ± 250 kV 600 MW
10	Canal de la Mànega II (França-Regne Unit)	T	1000 X 2	± 270 X 2	9-18	45	72	no	1984	sí	Dos quadripols

La segona de les premisses permet de projectar un enllaç per a un funcionament unidireccional de forniment d'energia. Això és alhora una simplificació, major seguretat i economia pel fet de renunciar a la inversió.

Un dels milloraments buscats és el progressiu augment del baix coeficient balear d'utilització de la generació (actualment 37,8%). Bé que la segona premissa sembla que perjudiqui el propòsit, una indisponibilitat a Mallorca, o una convenient disminució de punta, òbviament poden ésser pal·liades amb una generació transitòria a Eivissa, dit altrament, hom pot disminuir els transports cap a aquesta illa.

§ 6.2 – Característiques principals de l'enllaç

Pels motius adduïts al § 2.4 hom adopta la tensió de ± 200 kV. Es tracta d'una tensió prou normal. En el quadre del § 3 hom pot veure la màxima en servei de línia submarina, $- 280$ kV, corresponent a la unió Vancouver II (1977-79), i també la tensió prevista per a la nova interconnexió Canal de la Mànega II, ± 270 kV.³ Com ja hem dit, l'elecció contribueix a possibilitar un futur enllaç multiterminal amb la península.⁴ També hem justificat el corrent nominal de 500 A, per tal de no davallar a cables antieconòmics.⁵ En relació amb les ee. cc. l'assumpte és tractat al § 6.5.

§ 6.3 – Estacions convertidores: etapes d'establiments

L'esquema bàsic del projecte complet (final) és el representat a la figura 2. Cada estació convertidora estarà integrada per quatre ponts de Graetz (índex de pulsació sis), de 50 MW c/u, en sèrie. Dos grups adjacents⁶ constitueixen un pont doble de rectificació (conjunt amb índex de pulsació dotze).

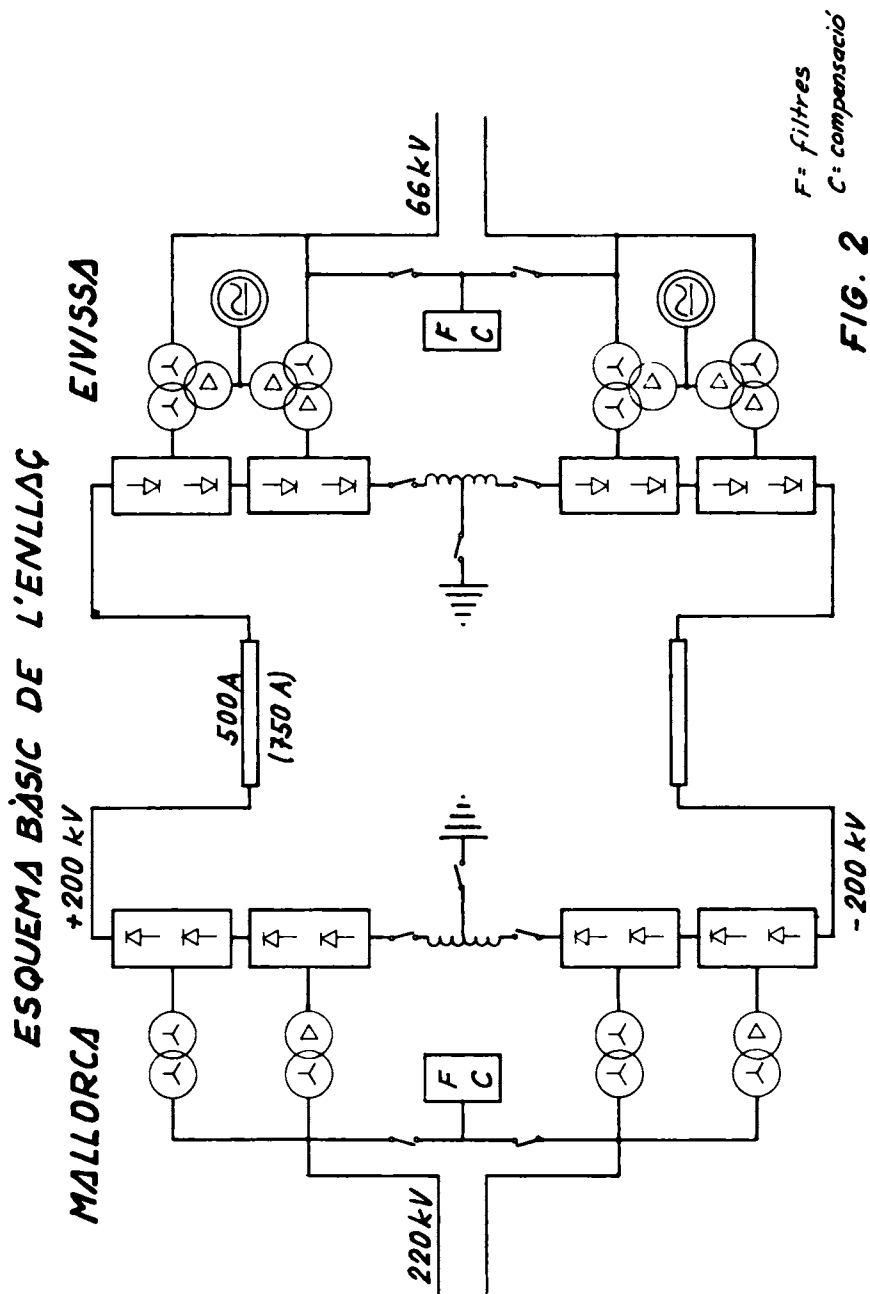
L'escalonament de la instal·lació (ee. cc.) és previst en quatre etapes, amb potències de transmissió 50, 100, 150 i 200 MW respectivament, segons és detallat en el pla que segueix.

³ En el cas de línies aèries de c.c. trobem tensions majors: en servei Cabora-Bassa, ± 533 (1977-79); en projecte hi ha Itaipu (Brasil), ± 600 kV i Ekibastuz (URSS), ± 750 kV.

⁴ Existeixen diverses possibilitats, com és ara el treball mixt sèrie-paral·lel, fins avui encara no emprat.

⁵ Com a variant hom farà una proposta basada en cables per a corrent nominal de 750 A. Certament, la previsió d'una unió amb la península pot suggerir altres corrents nominals segons com estigui concebut l'enllaç. La unió Alacant-Illes Balears faria que la línia Eivissa-Mallorca fos de pas per al forniment Mallorca-Maó. Fóra diferent si es tractés de la unió Mallorca- costa catalana, força avantatjosa però amb l'inconvenient d'obligar a dipositacions de cables més profundes. Les diverses variants possibles seran objecte d'un altre treball de l'autor.

⁶ Desfasats 30° , mitjançant els transformadors d'alimentació, amb connexions estel-estel i estel-delta.



**PLA D'ESCALONAMENT DE LES INSTAL·LACIONS
DE LES ESTACIONS CONVERTIDORES
(1ª variant)**

		EE. CC., cables				
Etapla (1)		Puntes de demanda MW	Potències totals necessàries (2)		Entrades en servei (3)	Potències de transmissió
			MW	indisp.	MW	Cables MW
0	(any 1980)	39,7	53,5			
0	(1981, +2 × 15 MW)		83,5	(- 30)		
I	(4)	53,5 → 68,5	133,5	(- 65)	50	1 50
II	(4)	68,5 → 83,5	183,5	(-100)	50	2 (4) 100
III		83,5 → 133,5	233,5	(-100)	50	2 150
IV		133,5 → 183,5	283,5	(-100)	50	2 (o 3) 200

- (1) Previsions amb el supòsit de 2 × 15 MW a Eivissa. Amb 3 × 15 MW, els valors de les dues primeres columnes han d'ésser incrementats 15 MW.
- (2) De generació a Eivissa més de transmissió d'enllaç.
- (3) De capacitats en ee. cc.
- (4) En lloc de dos cables hom en pot instal·lar un, amb retorn per mar (vegeu el § 6.4, "Etapas I, II i III").

Fins a l'entrada en servei de l'enllaç, hom preveu la possible indisponibilitat simultània de dos grups (30 MW). Amb l'establiment de l'etapa I de la unió hom preveu la concurrència de la seva indisponibilitat (50 MW) amb la d'un grup (15 MW). En les etapes següents la indisponibilitat considerada és d'un pont de conversió (o del transformador) i un grup (50 + 15 MW) o de dos grups de conversió (2×50 MW).

Veritablement són les puntes de potències que imposen les etapes. Com que no disposem de projeccions de demandes prou probables, per la incertesa de l'època de transició present, no podem establir dates. Hom proposa un tempteig amb la regla simplista de la duplicació cada deu anys.⁷

El tempteig assigna per a l'any 1990 una punta d'aproximadament 80 MW, que significaria les darreries de l'etapa II. El servei en etapa III no arribaria a l'any 2000, que demanaria uns 160 MW, bé que l'etapa final permetria una entrada folgada al proper segle.

Hom pot veure que el pla exposat implica una entrada en servei precipitada de la primera etapa. Així, doncs, sembla realista comptar amb la instal·lació del tercer grup de 15 MW a la central Eivissa III, posterior a l'any 1981, tal com és previst al pla normal de GESA. En aquest cas cal rectificar el quadre d'etapes en la forma indicada. És una qüestió de rendibilitat l'ús del tercer grup per a donar potència per tal de disminuir puntes de servei de l'enllaç.

En el § 8.4 hom considera l'avinentesa d'emprar els compensadors síncrons com a generadors de reserva, fet que permetria ajornaments d'etapes.

§ 6.4 — Línia de transport: etapes

Constituïda per una part submarina, amb una longitud aproximada de 87 km, més d'aèries extremes. La longitud submarina pot ésser un xic més gran si la línia recta de trajecte no és la millor i prové de creure adients per las extrems punts de la costa situats entre Andratx i Santa Ponça pel que fa a l'illa de Mallorca, i als voltants de Punta Grossa (entre Punta d'en Serra i Cap Roig) a Eivissa.⁸

Cal observar que la línia completa Mallorca-Eivissa requereix pràcticament la mateixa longitud d'instal·lació de cable (2×87 km) que la línia

⁷ Sembla que els creixements de demanda d'energia elèctrica a Eivissa-Formentera els darrers cinc anys (§ 1.2) justifiquen la hipòtesi. Malgrat això no hi ha base ferma per a poder admetre un creixement exponencial com aquest a llarg termini, ni tampoc la proporcionalitat de les corresponents puntes de potència.

⁸ Cal triar arribades a la costa relativament planeres amb facilitats per als soterraments submarins (§ 7).

existent Mallorca-Menorca (4×42 km) amb capacitats de transports de 200 MW i de 80 MW respectivament.⁹

Un cop determinats exactament els extrems submarins, els sectors aeris de l'enllaç establiran les unions amb els sistemes de c.a. de les illes, tot buscant indrets adients per a les estacions convertidores amb espais suficients per als filtres i les generacions d'energies capacitives necessàries.¹⁰ Això requerirà uns 8 km de línia aèria bipolar (amb neutre isolat de terra) per a la connexió, a Mallorca, al sistema de 220 kV i, semblantment, a Eivissa una línia aèria d'uns 24 km, fins a Santa Eulàlia, per a connexió amb el sistema a 66 kV.

Ajustades les longituds, en qualsevol cas la caiguda de tensió, amb plena càrrega de característiques finals nominals, serà inferior al 2%, tot comptant amb anada i tornada mitjançant cable (± 200 kV).¹¹

A l'etapa I, amb 100 kV de tensió de servei, és oportú el retorn per mar per tal de no duplicar el percentatge de caiguda (ni les pèrdues). Anàlogament, però minoradament, a l'etapa II també convé el retorn per mar.¹² D'aquests aspectes, i de la variant de cables amb secció de 750 mm^2 (Al), hom en tractarà més endavant.

Previsiblement, la profunditat de dipositació dels cables no arribarà als 500 m. Ho permet suposar l'examen de la reproducció parcial que, a major escala, ha estat feta de la carta batimètrica del Prf. Plannenstiel¹³ (figura 3), on hom pot veure una carena submarina les profunditats de mar de la qual són de l'ordre dels 450 m (les vessants que separa porten fins als 1000 m). Les particularitats tècniques i els condicionaments de l'establiment de la línia seran examinats al § 7; aquí interessen els plantejaments funcionals.

Etapa IV

D'antuvi cal examinar la instal·lació completa (200 MW). En el supòsit de disposar de dos cables (de 500 A), amb la disponibilitat d'un encara és possible de mantenir el forniment mínim previst de 100 MW, mitjançant el retorn marí.¹⁴

⁹ També cal veure que l'etapa I d'establiment de la primera línia esmentada requereix poc més de la meitat de la longitud de cable que la segona línia, amb capacitats de transports no pas gaire diferents (68,5 i 80 MW). Certament sense reserva de cable en el primer cas, fet, però, que ja és previst.

¹⁰ És en aquest aspecte que hauria estat convenient la instal·lació de la central Eivissa III a la meitat nord de l'illa, en lloc de l'extrem sud.

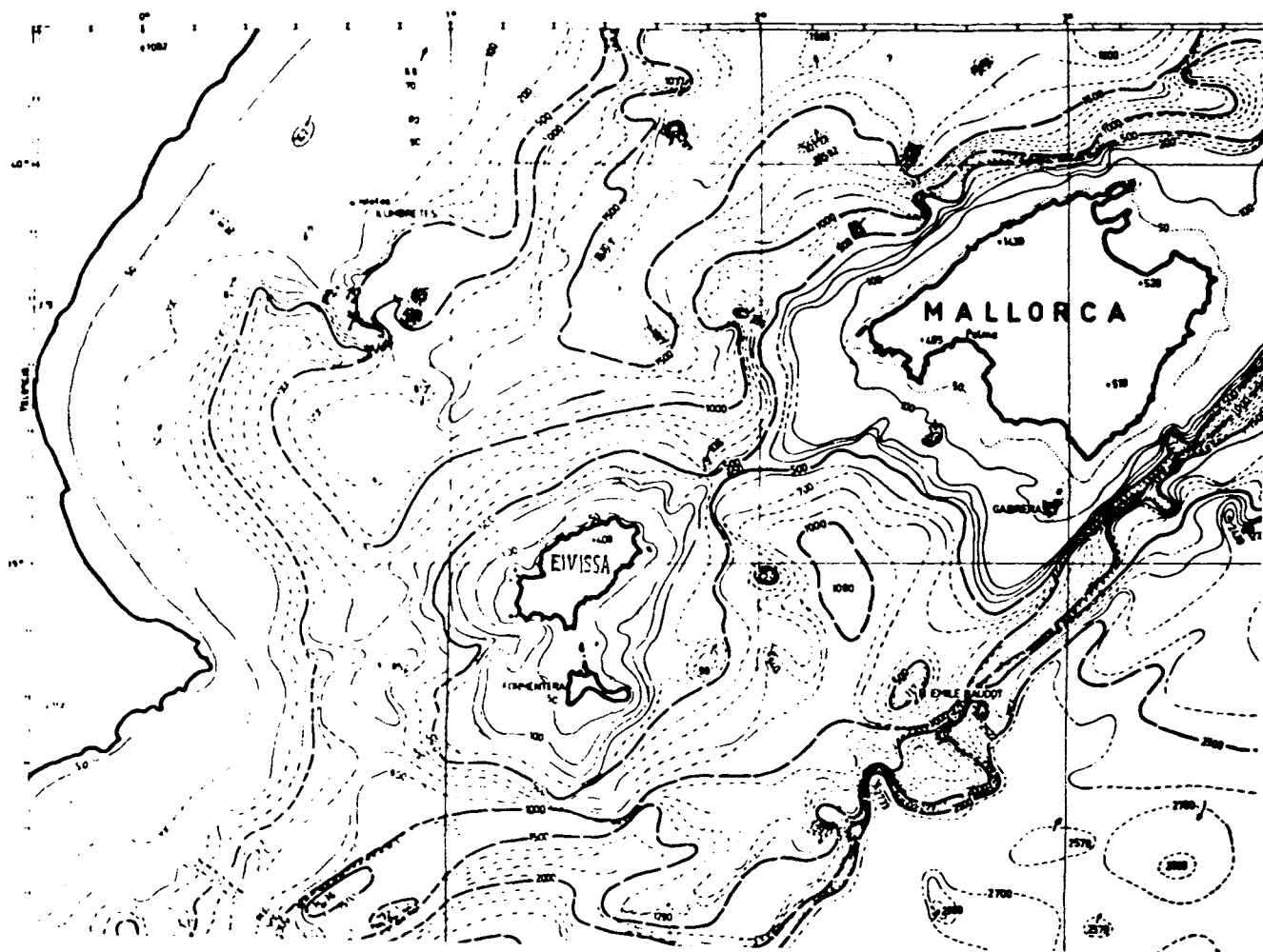
¹¹ Exclusivament de caiguda de tensió de línia, que solament apareixeria als finals de les etapes amb hores puntes (càrregues pròximes a les nominals). Així és que les pèrdues mitjanes serien lluny d'assolir aquell percentatge, en dependència de les corbes de càrregues.

¹² Forma de treball que hom pot emprar a totes les etapes (figura 4a).

¹³ Ho corrobora la carta d'A. Maufret (1976) que hom pot examinar a la referència [4].

¹⁴ Al final de l'etapa IV, la indisponibilitat addicional d'un grup d'Eivissa III no permetria cobrir les puntes màximes. Per a aquesta eventualitat, convé comptar amb el tercer grup d'Eivissa III o bé

Figura 3. Carta batimètrica del Dr. Plannenstiel.



El recurs precedent fa necessari l'establiment d'elèctrodes marins, per a servei de 500 A (750 A),¹⁵ amb línies aèries els retorns metàl·lics de les quals siguin isolats.¹⁶

En aquest projecte no fan al cas les objeccions oposades en els del Canal de la Mànega I i II.¹⁷ Les considerables profunditats del present fan que les densitats de corrents siguin baixes. Precisament al Mediterrani occidental el sistema SACOI opera permanentment amb retorn marí. En el cas que hom estudia hom pot procedir semblantment. Per això cal operar amb els ponts dobles en paral·lel (figura 4) i amb els dos cables igualment. Amb aquesta disposició la caiguda de tensió a plena càrrega fóra inferior a l'1%.

En el quadre "Sistemes de transmissió submarins mitjançant corrent continu" del § 3 hom pot veure que, entre deu sistemes, quatre tenen retorn marí, dos el poden emprar, i un utilitza retorn metàl·lic isolat per terra i mar. Els corresponents al Canal de la Mànega ja han estat examinats.

Eliminada l'objecció, cal retenir la millora de rendiment de la transmissió, per la poca resistència del retorn marí, sempre que hom operi així.

Etales I, II i III

El que ha estat exposat té validesa en les etapes II i III, en les quals és prevista la indisponibilitat de 100 MW però on la manca d'un cable no afecta més que 50 MW. Si a l'etapa II hom ha instal·lat un sol cable, la indisponibilitat serà de 2×50 MW, que ja és prevista. Pot ésser, però, de llarga durada, amb un risc que cal evitar. Altrament fóra si hom hagués instal·lat el tercer grup de 15 MW a Eivissa III.

emprar cables de 750 A de corrent nominal; això és examinat en tractar de les etapes II i III. Un altre recurs és tractat en el § 8.32, basat en l'ús dels compensadors síncrons com a generadors de reserva.

¹⁵ A la referència [23] hom descriu un model de posada a terra marina per 1000 A, constituït en dues parts cada una amb 15 barres de grafit situades dins caixes amb coc, enterrades al fons marí.

¹⁶ Per tal d'evitar efectes perjudicials: a) sobre canalitzacions subterrànies i estructures metàl·liques; b) quant a pertorbacions sobre línies telefòniques (harmònics).

¹⁷ En el primer enllaç, l'objecció fou contra tota possibilitat de retorn marí per tal d'evitar pertorbacions en els instruments de navegació; vegeu la referència [10].

Al segon projecte la prescripció de retorn per mar ha estat endurida amb una nova exigència. La unió serà establerta amb vuit cables amb potències nominals unitàries de 250 MW. Hom els instal·larà, aparellats, en quatre grups, de manera que els cables aparionats es compensin magnèticament pel fet d'estar instal·lats junts amb correts oposats. La separació entre parells de cables serà d'1 km. Veritablement el conjunt constitueix dos quadripols (± 270 kV), cadascun amb quatre cables (línia doble). Hi ha previstes quatre rases per al soterrament dels cables aparionats [30].

A la unió Hokkaido-Honshu, les dues primeres etapes són previstes amb un sol cable de tensió (250 kV, 1200 A), el retorn és metàl·lic isolat mar i terra [29].

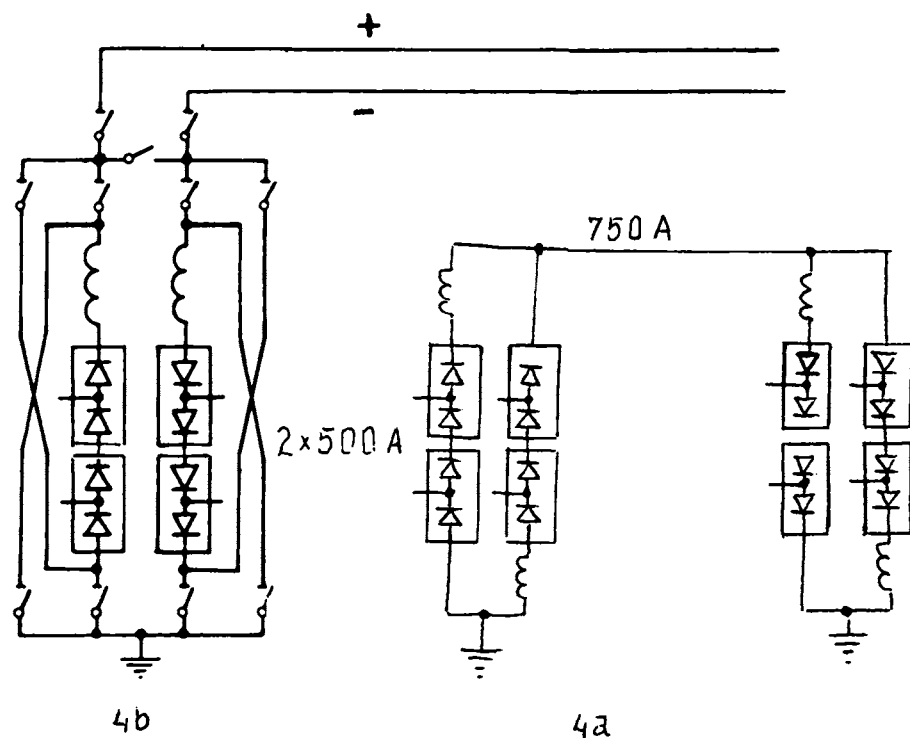


Figura 4. Commutació sèrie-paralel de les estacions convertidores.

Per a reduir temps d'indisponibilitats de cables, és útil disposar-ne d'uns 4 km, com a reserva, conservats amb oli fluid. Aquesta previsió, unida a la disposició del tercer grup, proporciona bona fiabilitat, fins i tot a l'etapa IV.

Cal veure les propostes precedents com les que permeten les menors inversions (ajornaments). Un cop en l'etapa IV, pot ésser justificat l'establiment d'un tercer cable.¹⁸ Existeix, però, una solució intermèdia.

Línia amb dos cables de 750 A c/u.

Enfront de la solució amb tres cables, aquesta variant ofereix:

- més baix cost de cables;
- menors costos de dipositació;
- menors pèrdues a la línia;
- major resistència mecànica;
- possibilitat d'aprofitament parcial de les dues meitats de les ee. cc.

¹⁸ Aquesta precaució i la que segueix poden ésser evitades si hom pren en consideració la proposta del § 8.4.

Operació en paral·lel de les ee. cc., commutació automàtica (figura 4)

En el darrer cas, la indisponibilitat d'un cable redueix la potència de l'enllaç a 100 MW. Hi ha, però, la possibilitat d'augmentar-la fins a 150 MW. Cal tenir prevista la commutació en paral·lel, simultània i automàtica en ambdues ee. cc., de les meitats desaprovechades dels ponts de conversió. Amb aquest recurs, les ee. cc. passen a treballar tal com es veu a l'esquema 4a, amb retorn per mar (750 A).

§ 6.5 – Discussió sobre la potència de transmissió i la concepció estructural elegides

Els ponts de rectificació han entrat en una fase de construcció compacta, amb mòduls de rectificació dodecafàsics, que abarateix la instal·lació del parc de filtratge (§ 8.2). Cal advertir que, amb aquesta execució, i segons dades aproximades que posseïm, l'adopció de la potència global de 300 MW proporcionaria una economia de gairebé el 20% pel que fa al preu específic (cost per kW instal·lat). És obvi, però, que l'execució amb dos ponts únics de majors potències (100 o 150 MW) no permetria els escalonaments i les fiabilitats desitjades. Les utilitzacions en resultarien perjudicades, més greument amb la variant de la potència global de 300 MV, i consegüentment augmentarien els interessos intercalars.

A base de la concepció indicada al principi, les potències inferiors als 200 MW tenen preus específics notablement superiors. La reducció de la potència global a 150 MW afegiria un encariment específic, aproximat, del 12% i amb la reducció a 100 MW aquest fóra superior al 25%.

És amb el supòsit d'un creixement de demanda concret a Eivissa que hom pot optimitzar fàcilment. Nogensmenys, els importants encariments específics si hom davalla de la potència de 200 MW, per una banda, i l'escalonament d'inversions requerit, per la fiabilitat exigida, no permetran que la potència resultant difereixi notablement de l'elegida. Hi pesa el fet de no tractar-se d'una interconnexió de sistemes autosuficients.

Cal afegir encara que les execucions compactes estan concebudes amb transformacions trifàsiques-dodecafàsiques (dues en cada estació convertidora). Aquestes transformacions constitueixen punts crítics en l'aspecte de la fiabilitat. La concepció estructural elegida (figura 2) és basada en una subdivisió que afavoreix la fiabilitat i, malgrat l'encariment que comporta, abarateix l'establiment d'elements de reserva.

§ 7 – PART SUBMARINA DE L'ENLLAÇ: TIPUS DE CABLE; TRAJECTE; DIPOSITACIÓ

La part submarina de l'enllaç constitueix el problema més delicat del projecte. Per bé que el propòsit d'aquest treball no inclou l'estudi de la

geologia marina, és convenient un examen general del cas concret d'aquest projecte.

Ja hem vist (figura 3) que entre les illes de Mallorca i Eivissa hi ha una "esquena d'ase" que dóna profunditats que no ultrapassen els 500 m i amb amplàries d'uns 30 – 40 km, cosa que permet una certa elecció de trajecte.

Com a referències més modernes respecte a aquesta tècnica són recomanables les següents unions:

	corrent nominal A	longitud de línia submarina km	profunditats màximes m
Skagerrak	1000 ¹	127	550
Hokkaido-Honshu	1200 ²	43	290

Unions precedents són: Gotland (profunditat màxima aproximada 100 m); Canal de la Mànega I (70 m); Konti-Skan; Nova Zelanda (260 m); SACOI (450 m).

El projecte Mallorca-Eivissa requereix disposicions que s'apropen a les majors experimentades.³

Tipus de cable

Amb la tecnologia actual i especialment per l'experiència que hom en té, l'elecció en aquest projecte del cable del tipus d'oli fluid⁴ (OF) no sembla dubtosa. Ofereix bones característiques d'estabilitat tèrmica i en el temps, tot i que la instal·lació és una operació delicada.

Hom emprà cables de tipus sòlid a Gotland, al Canal de la Mànega I, a SACOI i al tros suec de Konti-Skan. En el tros danès hom utilitzà un tipus de cable d'oli fluid.⁵ Hom pot veure que, en la majoria dels casos, els tipus sòlids han estat emprats en els trajectes submarins més curts. Els cables de la interconnexió de Nova Zelanda són de gas a pressió.

La moderna unió Hokkaido-Honshu ha retornat a la tècnica OF.⁶ Els cables foren dipositats en peces senceres, per bé que construïdes a trossos

¹ El funcionament en primera etapa és amb dos cables, la instal·lació final amb quatre (1000 MW).

² Etapes: any 1979, 150 MW, 125 kV; any 1980, 300 MW, 250 kV; no decidida, 600 MW, ± 250 kV.

³ Fabricants experts ens informen que són avui capacitats per a garantir cables i diposicions fins a 1.000 m de profunditat.

⁴ Designació genèrica. Segons les longituds i les estructures s'empren fluideses adients.

⁵ En aquest tipus l'impregnament veritablement no té trasllats longitudinals. És un cable autocompensat (pla). Dit altrament, les dilatacions són absorbides elàsticament, cosa que evita els dipòsits "dides".

⁶ El cable de retorn (règim permanent de 4,5 kV de caiguda de tensió), amb isolament determinat per les sobretensions previstes, és del tipus de polietilè reticulat.

amb 23 juncions flexibles i amb resistència mecànica prevista per a les tensions de dipositació. A Skagerrak les diposicions foren igualment efectuades amb peces enteres.

Sempre amb supeditació a oferiments i garanties concrets, actualment sembla adequat un tipus de cable com l'emprat en la unió Mallorca-Maó (OF, 500 mm², Al) o bé la variant per a 750 A nominals.

Estudi del fons marí⁷

L'elecció del trajecte requereix un examen acurat del fons i dels corrents. Actualment l'observació directa dels fons marins és possible mitjançant la fotografia d'immersió i la televisió submarina. També ho és amb submarins⁸ o batiscafs que permeten la presa de mostres. Existeixen equips que accepten encàrrecs d'aquesta classe.

Aspectes del fons marí inflüen en l'elecció del trajecte d'unió Hokkaido-Honshu, que té un 20% de longitud més que la corresponent al camí més curt. Hom preferí perfils planers i menys rocallosos [27]. El cas del projecte del Canal de la Mànega II és semblant [30] (45 km en lloc de 38). Cal pensar, doncs, que la longitud que fins ara hem suposat pot augmentar.

Instal·lació

Ja ha estat justificada la conveniència de dipositar els cables allunyats uns 500 m per tal d'evitar avaries simultànies. Malgrat que les concessions de diposicions protegeixen la zona dels fondeigs i de la pesca d'arrossegament, és palesa l'existència d'accidents d'aquest tipus.⁹

En el cas de Mallorca-Eivissa, amb soterraments efectuats fins a fons marins de 50 m, quedarien coberts trajectes d'uns 4 km a cada plataforma. Si fos possible realitzar-los fins a fons de 100 m, hom aconseguiria trajectes coberts de l'ordre dels 16 km a Mallorca i d'uns 10 km a Eivissa, depenent, en cada cas, dels punts de costa elegits com a extrems del trajecte submarí.

Les cartes de morfologia submarina assoleixen bona fiabilitat des que, acabada la segona guerra mundial, hom practica mètodes precisos que permeten sondatges continus.

⁷ Una primera informació la dona la referència [11].

⁸ Referència [27].

⁹ El projecte Canal de la Mànega II té previst que els cables siguin soterrats en tota la longitud del trajecte (profunditats màximes 60 m). Hom ja ha construït i assajat dues màquines d'operació submarina que faran la guia de dipositació i el soterrament; llur descripció és a la referència [30]. Les profunditats de soterrament són 1,5 m en els fons sorrencs i 1 m en els rocallosos. Hom compta amb una velocitat d'operació de 100 m/hora. Això constituirà una bona experiència. A les unions Skagerrak i Hokkaido-Honshu empraren tècniques més senzilles (referències [24] i [27]). En el cas japonès feren soterraments fins a 65 m de profunditat.

També han evolucionat les tècniques de posicionament sense les quals no fóra possible l'obtenció de bones cartes batimètriques. Són aquestes tècniques que avui permeten de dirigir els vaixells de dipositació amb precisió, àdhuc en trajectes llargs.¹⁰

§ 8 – ÍNDEXS DE PULSACIÓ SIS O DOTZE I FILTRATGES D'HARMÒNICS; APORTACIONS D'ENERGIES REACTIVES; PRESCRIPCIONS SOBRE LES CONNEXIONS DE SISTEMES GENERADORS D'HARMÒNICS

§ 8.1 – Instal·lacions complementàries

La importància de l'equipament complementari justifica una anàlisi, ja que del sistema d'operar previst per a les ee. cc. depèn el projecte del parc de filtratge. Projecte també dependent de les exigències que siguin imposades respecte a les pertorbacions admissibles ("contaminacions").

Els problemes de filtratge d'harmònics i d'aportacions d'energies reactives estan ben diferenciats, això no obstant es relacionen.

Hom suposa coneguts els processos de conversions de les ee. cc. que:

a) originen harmònics de corrents i de tensions a la xarxa trifàsica i a la línia de c.c.;

b) requereixen aportacions considerables d'energies reactives.

Ambdues qüestions són tractades, en diverses modalitats, a les referències [1], [4], [5], [10] i [12]. Aquí en resumirem aspectes principals que interessin per tal de discutir les solucions convenients a l'enllaç Mallorca-Eivissa. Els equips requerits exigeixen inversions que solen estar entre el 7% i el 25% del cost de les ee. cc. Per raons que exposarem, en aquest aspecte no creiem convenient d'estalviar, ateses les circumstàncies del cas que ens interessa.

§ 8.2 – Generacions d'harmònics: operacions amb índexs de pulsació sis o dotze; filtratges

És prou sabut que, per a un sistema trifàsic, un pont de Graetz és una càrrega no lineal. Aquest consum demana l'aportació d'harmònics amb els corrents d'alimentació. Per l'altra vessant, la tensió del costat del c.c. verita-

¹⁰ En el cas de Hokkaido-Honshu, amb velocitats de dipositació de l'ordre dels 100 m/min, les separacions màximes en relació amb el trajecte elegit foren d'unes desenes de metres.

La referència [24] informa de dades de precisions, velocitats de dipositacions i d'incidències en relació amb la unió Skagerrak. Les profunditats del trajecte són semblants a les del projecte que ens ocupa.

blement té pulsacions. Serà útil de presentar-ho segons un altre model d'interpretació.

A les instal·lacions reals, les reactàncies de commutació¹ són de valors baixos en relació amb els de les reactàncies d'allisament dels circuits (línies) de c.c. Això fa que hom pugui considerar els models següents.

— “vista” del costat del sistema altern, una estació convertidora (rectificadora o onduladora) pot ésser assimilada a una font d'harmònics de corrent (impedància interna relativament gran);

— “vista” del costat de la línia de c.c. (deixant de banda la reactància d'allisament, que li és pròpia), l'estació convertidora és assimilable a una font de ff. ee. mm. harmòniques.

Un pont de Graetz constitueix un sistema de *rectificació amb índex de pulsació sis*.² Alhora, per al sistema de c. a. és una font de corrent productora d'harmònics d'ordre $6n \pm 1$ ($n = \text{enter}$).

La disposició en sèrie de dos ponts de Graetz, alimentats per sistemes trifàsics desfasats 30° , com els de la figura 2 (§ 6.3), proporciona per suma de tensions una *rectificació amb índex de pulsació dotze*. En el costat trifàsic, les dues fonts de corrent (connectades en paral·lel a les mateixes barres, figura 2) compensen (anul·len) els corrents d'ordres $6n \pm 1$ ($n = \text{imparell}$). És així com únicament subsisteixen els harmònics de corrents d'ordres $12n \pm 1$ ($n = \text{enter}$).

Resumint, si l'índex de pulsació és i_p , existeixen³:

- harmònics de corrent, del costat altern, $i_p n + 1$ ($n = \text{enter}$);
- harmòniques de tensió, del costat continu, $i_p n$ ($n = \text{enter}$).

Harmònics al sistema altern

Les amplituds relatives dels harmònics de corrent, referides al terme fonamental, depenen de l'angle de retard (α , al rectificador) o del d'extinció (γ , a l'ondulador) i de l'angle de recobriment δ .⁴ Les amplituds dels harmònics de corrents d'ordre inferior a 13 disminueixen quan augmenta δ . Cal no oblidar, però, que amb angles δ majors les ee. cc. també consumeixen majors quantitats d'energies reactives (§ 8.31).

Operacions amb índexs de pulsació sis o dotze

Calia recordar els fets precedents car l'escalonament en quatre parts de

¹ Els termes tècnics emprats en aquest text són definits a les esmentades referències [1], [2] o [10].

² Expressat amb termes de Fourier: és una tensió contínua amb superposició d'harmòniques d'ordres $6n$ ($n = \text{enter}$).

³ En un pont de Graetz, $i_p = 6$; al pont doble, $i_p = 12$.

⁴ Hom en pot veure les quanties a [4].

la instal·lació final (§ 6.3) fa que a les etapes I i III no hi hagi compensació per ponts dobles complets. Per contra, sí que n'hi ha a les etapes II i IV, fora de casos d'indisponibilitats parcials. Això fa que calgui considerar les operacions de la unió tant amb índex de pulsació sis com amb dotze. Com veurem, això obliga a preveure un parc de filtratge més oneros, per l'existència, en el costat del c.a., dels harmònics d'ordres 5 i 7, inexistents amb l'operació exclusiva amb índex dotze. També afecta les inductàncies d'allisament del costat del c.c.⁵

Per als grans transports del futur hom sol recomanar l'operació exclusiva amb índex dotze. En cas d'incidència, caldrà eliminar ponts dobles. Malgrat això, en el quadre del § 3, "Sistemes de transmissió submarins mitjançant corrent continu", hom pot veure que, de nou sistemes en servei, vuit tenen prevista la possibilitat de funcionament amb índex de pulsació sis i que el projecte Canal de la Mànega II també ho preveu.

A l'enllaç Mallorca-Eivissa, amb una potència prevista moderada, l'escalonament volgut i la fiabilitat exigible fan necessari comptar amb el funcionament d'un pont de Graetz sense compensació. És possible evitar-ho amb un nou escalonament de la instal·lació en dues etapes. En aquest cas, però, l'avaria d'un pont de Graetz obliga a prescindir de dos ponts. Si hom manté el criteri, emprat en el § 6.3, consistent a admetre la indisponibilitat simultània de dos mitjans de subministrament diferents de màxima capacitat, caldrà no comptar amb $(2 \times 50) + 15$ MW. Els escalonaments en dues etapes serien:

Eivissa III amb 2×15 MW. Generació disponible 83,5 MW

Etapas	Puntes de demanda		Potències totals necessàries		Conversió MW	Cables
	MW		MW	indisp.		
I + II	53,5	68,5	183,5	(-115)	2×50	1
III + IV	68,5	168,5	283,5	(-115)	4×50	2

Eivissa III amb 3×15 MW. Generació disponible 98,5 MW

Etapas	Puntes de demanda		Potències totals necessàries		Conversió MW	Cables
	MW		MW	indisp.		
I + II	68,5	83,5	198,5	(-115)	2×50	1
III + IV	83,5	173,5	298,5	(-115)	4×50	2

⁵ Vegeu la referència [5].

Aquests escalonaments són força desavantatjosos comparats amb els del § 6.3; per aquest motiu és justificada la previsió del parc de filtratge dels harmònics 5 i 7 motivats per un pont de Graetz.

Harmònics no característics

L'examen precedent ha estat idealitzat ja que, tàcitament, hom ha suposat que les tensions rebudes per les ee. cc. són trifàsiques perfectament simètriques, que les reactàncies de commutació són idèntiques i que els instants de desblocatge són exactes.⁶ Discrepàncies respecte a aquests supòsits originen harmònics no característics que, bé que amb amplituds poc importants comparades amb les dels característics, també poden motivar pertorbacions, especialment els de baixes freqüències. Els d'ordres elevats són corregits fàcilment amb filtres passa-alt.

Inconvenients dels harmònics en els sistemes de c.a.

Els harmònics de corrents que circulen per la xarxa trifàsica (impedàncies de circulació "vistes" des del convertidor) creen harmòniques de tensió, que fins i tot poden aparèixer allunyades de les ee. cc.; això fa una xarxa "contaminada". Els principals inconvenients dels corrents "contaminants" són:

- pèrdues addicionals;
- ressonàncies;
- interferències telefòniques;
- escalfaments o sobrecàrregues en alguns consums, etc.;
- pertorbacions en equips sensibles (com ara de telecontrol o telemesura, de protecció, electrònics, etc.).

Les interferències telefòniques poden ésser greus, especialment si els desequilibris de les fases motiven components homopolars, que puguin circular, d'harmònics de corrents.

Harmòniques de tensió a la línia de c.c.: inconvenients

Les amplituds de les tensions harmòniques, del costat de c.c. de l'estació convertidora, també són funcions dels angles α , γ i δ i, lògicament, també de les característiques del circuit de c.c. (impedàncies, especialment de les bobines d'allisament i de la mateixa línia).

Les pertorbacions possibles són menys greus que en el cas anterior. Les pertorbacions telefòniques provocades pels corrents solament solen presen-

⁶ A la pràctica, hom ha de comptar amb toleràncies del 0,2%.

tar-se en els casos de línies terrestres (aèries). En el cas de l'enllaç Mallorca-Eivissa, les curtes longituds i localitzacions dels trajectes aeris permeten d'esperar que no creïn interferències. En darrer terme, els costos dels filtres necessaris per a reduir els harmònics del costat del c.c. són de poca importància comparats amb els dels filtres del costat del c.a.

Les bobines d'allisament tenen una considerable acció reductora d'harmònics de corrents. És per això que cal comptar-hi per al filtratge del costat continu. Però, malgrat llur nom, les bobines d'allisament solen ésser calculades basant-se en llur funció principal, afeblidora de la velocitat de creixement del corrent en cas de curt circuit, per tal de proporcionar temps per a l'actuació del sistema de protecció.

En tractar-se de sistemes en altern amb potències relativament petites, cal tenir-ho present en el projecte dels filtres del costat continu (vegeu la referència [23], p. 13).

§ 8.3 – Energies reactives requerides per les estacions convertidores en servei: aportacions

§ 8.31 – Energies reactives necessàries

En l'alimentació trifàsica del rectificador,⁷ els corrents es retarden respecte a les tensions, degut a les regulacions del corrents. També per no ésser instantànies les commutacions pel fet d'oposar-s'hi les reactàncies. Així és que les transferències de corrents d'un braç de pont al següent, que per tensió correspon, es fan amb retard. Tot això motiva que les estacions convertidores requereixin potències reactives que, a la pràctica de funcionament d'aquest tipus d'instal·lacions, arriben a ésser de l'ordre del 50% fins al 65% del valor de les potències actives convertides.⁸

§ 8.32 – Mètodes d'aportació de les energies reactives

Els mitjans clàssics d'aportació d'energies reactives, que fins ara han

⁷ El plantejament és semblant en el cas de l'ondulador (vegeu la referència [10], vol. II, p. 258). Amdues ee. cc. requereixen energies reactives inductives.

⁸ Pel que breument ha estat explicat, és evident que la potència reactiva requerida per una estació convertidora bàsicament depèn dels angles α o γ i del δ . A la pràctica varien poc els valors d'aquests angles, no gaire inferiors als ordres de magnitud: $\alpha \approx 15^\circ$; $\gamma \approx 17^\circ$; $\delta \approx 25^\circ$. Les justificacions són:

α , al rectificador, per tal de mantenir la capacitat de regulació del corrent tot comptant amb variacions de la tensió d'alimentació;

γ , a l'ondulador, per a conservar la possibilitat de bloqueig de la tensió, tot comptant amb variacions de la tensió d'alimentació;

δ (angle de recobriment), valor suficientment elevat per a limitar el corrent màxim de curt circuit en cas d'avaria interna

estat emprats en els casos de conversions destinades a grans transports per corrent continu, han estat realitzats mitjançant màquines síncrones o amb compensadors estàtics.

Cal no oblidar l'energia reactiva inductiva que proporciona el parc de filtratge. Els circuits en sèrie ressonants RLC, connectats en derivació a la xarxa, i corresponents als harmònics 5, 7, 11 i 13, a 50 Hz, són càrregues capacitives, i és així doncs que compleixen dues funcions alhora.

Els compensadors síncrons permeten una còmoda variació de la potència reactiva subministrada, de què resulta una fàcil regulació de la tensió a l'entrada de l'estació convertidora. Els compensadors síncrons solen ésser connectats als debanats terciaris que, amb aquesta finalitat, són disposats en els transformadors de conversió.⁹ Els inconvenients, en vist els condensadors estàtics, són de consideració: majors pèrdues, inversions i manteniments.

Els condensadors estàtics consumeixen potències reactives capacitives (les forneixen inductives) que varien amb el quadrat de la tensió d'alimentació, mentre que la potència reactiva requerida pel convertidor és aproximadament proporcional al corrent continu. Tenim doncs que, amb càrregues petites, es produeixen elevacions de tensió que són agreujades pels fets exposats, és a dir, es produeixen ultracompensacions. Cal recórrer a subdivisions de la bateria de condensadors i a mètodes de regulació que augmenten els costos.

El compensador síncron augmenta les potències de curt circuit. Aquest augment afavoreix la correcta operació del conjunt. La darrera consideració és important i afecta especialment l'estació convertidora d'Eivissa pel fet que constitueix un sistema extrem receptor amb potència feble.¹⁰

§ 8.4 – El parc de reserva a Eivissa i la compensació síncrona

L'aportació d'energia reactiva mitjançant compensadors síncrons ofereix un altre aspecte interessant que cal examinar. El seu establiment també hauria d'ésser escalonat per tal d'evitar una inversió inicial excessiva i subdividit per tal d'evitar una eventual indisponibilitat total.

Els compensadors síncrons són susceptibles d'adquirir el caràcter de grups generadors de potència. Amb aquesta inversió addicional, queda augmentat a Eivissa el parc de reserva. Sempre hem partit del supòsit d'haver de comptar amb la indisponibilitat d'una part de l'enllaç (etapa I, 50 MW;

⁹ Així pot ésser vist a l'esquema de la figura 2 (§ 6.3), a l'extrem corresponent a Eivissa.

¹⁰ Aquest important aspecte és tractat a la referència [18].

Com avui és pràctica usual, cal que el conjunt de xarxes trifàsiques i línia d'unió de c.c. sigui simulat mitjançant un model per tal d'estudiar les interaccions i analitzar el comportament dels sistemes units i l'operació del conjunt.

etapes II – III – IV, 100 MW). En aquestes circumstàncies, no és necessària la compensació de l'energia reactiva corresponent a la part fora de servei. Com a exemple: si són 100 MW que deixa de transportar l'enllaç, queden alliberats uns 50 MVA en potència de compensació, que poden servir per a generació. Això permet interessants ajornaments respecte als quadres dels § 6.3 i § 8.2. Cal no oblidar que, mentre les capacitats ho permetin, els grups suposats poden furnir simultàniament potències actives i reactives.

Com a resum, queda establert que els grups compensadors-generadors equivalen a potència de reserva en una quantia aproximada a la meitat de la potència que l'enllaç deixa de transmetre.

Això tractat té relació amb una altra possibilitat que exposem seguidament.

Els grups de 15 MW i la compensació síncrona

Caldria considerar l'avinentesa d'aplegar els grups de 15 MW d'Eivissa III (especialment el tercer encara no instal·lat) amb l'estació convertidora. Amb l'enllaç en servei queden sense utilització normal, o sigui que podrien ésser emprats com a compensadors síncrons.¹¹

Amb aquests 3×15 MW hi hauria capacitat per a fer aportacions d'energies reactives fins a potències de transports de 90 MW, diguem doncs fins a gairebé el final de l'etapa II.

Amb això no hi ha l'augment de reserva que abans hem tractat.

Tot plegat reforça la idea d'emprar, per a l'extrem d'Eivissa, la compensació d'energia reactiva mitjançant compensadors rotatius.

Un darrer aspecte favorable, encara que d'interès secundari, és el fet que les màquines síncrones donen la possibilitat de posar en operació, com a ondulator, l'extrem receptor, fins i tot amb manca de tensió alterna a Eivissa.

Mètodes moderns estàtics de regulació d'energies reactives

Malgrat el fet de no haver estat emprats en les instal·lacions de potència (c.c.), és interessant d'estudiar els mètodes moderns de regulació estàtica que actualment es proposen.¹²

¹¹ Per a aquest servei hauria calgut que els grups fossin previstos amb capacitat d'excitació suficient, cosa que hom encara pot fer en el cas del tercer.

¹² Vegeu la referència [20]. En resum, el tema fou tractat a la conferència *Control estático de energía reactiva y sus aplicaciones en las redes de transporte* (ASINEL 14.6.76), publicada a *Energia*, febrer de 1977.

§ 8.5 – Filtratges d'harmònics. Prescripcions respecte a connexions de càrregues o sistemes generadors d'harmònics

Els costos relatius dels parcs de filtratge han estat força variables en les distintes instal·lacions existents (entre el 5% i el 20%, respecte als de les estacions convertidores). Un factor determinant és l'exigència correctiva que hom estableixi. L'altra vessant del problema és que els efectes correctius dels filtres, o sigui les quanties dels harmònics de corrents que en deriven, depenen de les impedàncies vistes des del punt elèctric de correcció. Lògicament són impedàncies que varien amb l'evolució del sistema altern (ampliacions) i del seu estat de funcionament. Especialment la primera imprecisió explica que en algun enllaç hagi calgut completar el parc del projecte original, mentre en altres hom ultrapassà les necessitats estrictes (Skagerrak).

Fins avui, a Espanya hom no ha establert prescripcions antiharmòniques generals. Tampoc n'existeixen d'internacionals, i les que hom estableix a diversos països són notablement discrepants.¹³ És un tema que pensem tractar.

Sembla oportú de fer referència a un ampli informe, sobre els transports per corrent continu, que fou publicat a la revista *Electra* (núm. 63, març de 1979, p. 65).¹⁴ De les conclusions, en reproduïm:

“1r. (...) Pot sorprendre la gran disparitat que hom constata entre els límits de continguts en harmònics (toleràncies) recomanats, que varien entre 1 i 5 per cent (...).

2n. (...)

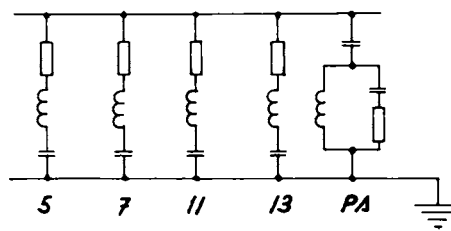


Fig. 5

¹³ Un treball general comparatiu, possiblement el més complet (14/12/79) dins el seu enfocament, és *Comparaison entre les recommandations utilisées dans divers pays pour le raccordement des équipements industriels générateurs d'harmoniques*, que amablement ens ha proporcionat el Dr. A. Robert de LABORELEC (Bèlgica). El treball conclou:

“Les neuf recommandations antiharmoniques analysées (Allemagne, Angleterre, Finlande, France, Hollande, Suisse, Australie, Suède et U.S.A.) présentent de grandes différences, tant au point de vue de leur philosophie que de leur application à des situations concrètes”.

¹⁴ Publica els resultats de l'Enquesta General encarregada al Grup de Treball 03 del Comitè d'Estudis 14, de la CIGRÉ, referència [5].

3r. (...) No existeix una solució tipus al problema ja que essencialment es tracta d'optimitzar el cost del material necessari per a satisfer les exigències i les especificaciones concernents a cada sistema particular''.

En el nostre cas, amb la solució més freqüent, hom disposaria un sistema en estel, l'esquema per fase del qual és el de la figura 5. Consisteix en quatre branques de filtres ressonants sintonitzats, respectivament, amb les freqüències 5, 7, 11 i 13, més una banca passa-alt per a les d'ordres superiors. D'altres solucions possibles són a la referència [5].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamson – Hingorani: *High Voltage Current Power Transmission*. Londres.
- [2] Crory: *Convertidores y sistemas de corriente continua de alta tensión*. Bilbao, 1969.
- [3] Gumà: *Perspectivas de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica* (Jornades “La Ciència i la Tècnica al Servei de Catalunya”. Contribució d'ENHER). Barcelona, 1981.
- [4] Kimbark: *Direct current transmission*. Nova York, 1971.
- [5] Lacoste – Brewer – Ekström – Le Du – Povh – Young: *Filtrage des harmoniques et compensation de puissance reactive dans les liaisons à haute tension continue*. Enquête générale CIGRÉ. Electra n° 63. París, 1979.
- [6] Neimann – Glinternik – Emel'yanov – Novitskii: *D-C transmission in Power Systems*. Jerusalem, 1967.
- [7] Oliver S. Yu: *Economic and technical determinants of power system development*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Vol. PAS-99, N° 5 Sept/Oct. 1980).
- [8] Ras: *Últimos progresos y perspectivas en el uso de la corriente continua a muy altas tensiones para transferencias de energía*. Barcelona, 1968.
- [9] Ras: *Posibilidades y límites actuales de las transferencias de energía por corriente continua*. Barcelona, 1971.
- [10] Ras: *Teoría de líneas eléctricas*. Barcelona, 1973-1975.
- [11] Riba i Arderiu: *Aspectes de la geologia marina de la conca mediterrània balear durant el neogen*. Reial Acadèmia de Ciències i Arts. Barcelona, 1981.
- [12] Uhlmann: *Power transmissions by direct current*. Nova York.
- [13] IEC: *Terminology for high-voltage direct current transmission*. Publication 633. Ginebra, 1978.
- [14] 11th World Energy Conference: *General Reports*. Munic, 1980..
- [15] Dougherty – Hingorani: *General trends in HVDC transmission development in the USA*. R 2–31. Moscou, 1977.
World Electrotechnical Congress. Moscou, 1977.
- [16] Durocher – Foleen – Gens: *Economic and engineering consideration in long distance high voltage DC and AC interconnection*. R 2–01. Moscou, 1977.
- [17] Fischer – Glassanos – Hingorani: *Gas insulated HVDC converter stations*. R 2-39. Moscou, 1977.
- [18] Olavahvang – Stupel – Tafasman: *Some new aspects of controlling a D.C. transmissions line connected with a weak receiving system*. R 2-37. Moscou, 1977.
- [19] Posse – Khoudiakov: *Perspective HVDC systems and principles of providing the reliability of their equipments*. R 2-33. Moscou, 1977.
Conférence internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension. París.

- [20] Reichert – Kauferle – Glavitsch: *Compensateur réglable à réactance pour l'utilisation plus extensive des réseaux de transport d'énergie à haute tension*. R 31-04, CIGRÉ 1974.
- [21] Kuussari – Pesonen: *Courants harmoniques mesurés dans les lignes de transport d'énergie et perturbations téléphoniques induites étudiées spécialement du point de vue statistique*. R 36-05, CIGRÉ 1976.
- [22] Harrison – Krismayya: *Influence du réseaux sur l'application des filtres de courant continu aux réseaux de transport à haute tension continue*. R 14-09, CIGRÉ 1978.
- [23] Hauge – Vikanes – Andersen – Styr: *L'installation de transport à haute tension continue du Skagerrak*. R 14-04, CIGRÉ 1978.
- [24] Hauge – Johnsen – Wettre – Bjorlow: *Les câbles à haute tension continue du Skagerrak*. R 21-05, CIGRÉ 1978.
- [25] Johnsen – Borlow – Larsen – Holte: *Développement des câbles sous-marins d'énergie en Norvège*. R 21-12, CIGRÉ 1980.
- [26] Knudsen – Lungquist – Sherif: *Effets sur l'environnement des lignes aériennes à haute tension continue*. R 36-02, CIGRÉ 1980.
- [27] Minemura – Imai – Kihara: *La liaison sous-marine à courant continu ± 250 kV entre Hokkaido et Honshu*. R 21-03, CIGRÉ 1980.
- [28] Rumpf – Jarrett: *Vue d'ensemble du comportement en service des réseaux de transport à courant continu dans le monde au cours de la période 1975-78*. R 14-08, CIGRÉ 1980.
- [29] Takenouchi – Mizushima – Kato – Murotani: *Liaison en courant continu à haute tension Hokkaido – Honshu*. R 14-03, CIGRÉ 1980.
- [30] Yates – Goddard – Urwin – Marechal – Michel: *La nouvelle interconnexion de 2000 MW entre la France et le Royaume-Uni*. R 14-09, CIGRÉ 1980.
- [31] Ainsworth – Gavrilovic – Thamawala: *Compensateurs statiques et synchrones pour systèmes de transport d'énergie à haute tension continue raccordés à des réseaux alternatifs faibles*. R 31-01, CIGRÉ 1980.
- [32] Rasquin: *Drehstrom – Kabel mit angepassten Querdrosseln*. ETZ Archiv, Bd. 3 (1981), H.11. Berlin.

TAULA

§ 1.— ENLLAÇ MALLORCA-EIVISSA: UNITAT DEL SISTEMA ELÈCTRIC BALEAR	
§ 1.1.— Unitat del sistema balear	7
§ 1.2.— Creixements dels consums	7
§ 2.— CARACTERÍSTIQUES DELS SISTEMES EXISTENTS; PARTICULARITATS DERIVADES DEL CARÀCTER MULTIINSULAR DEL TERRITORI	
§ 2.1.— Primeres consideracions	9
§ 2.2.— Potències i energies	10
§ 2.3.— Caraterístiques dels parcs de generació	12
§ 2.31.— Generacions Mallorca-Menorca	12
§ 2.32.— Generacions Eivissa-Formentera	13
§ 2.4.— Sistemes actuals de transports	13
§ 3.— LÍNIES SUBMARINES AMB CORRENT CONTINU	
§ 4.— CONDICIONS DE FACTIBILITAT PER A UN ENLLAÇ MALLORCA-EIVISSA	
§ 5.— FIABILITATS EN LES UNIONS DE C.C. EXISTENTS. PREVISIONS PER AL PROJECTE MALLORCA-EIVISSA	
§ 5.1.— Dades globale d'indisponibilitats a les unions existents	17
§ 5.2.— Indisponibilitats forçades degudes a les ee. cc.	18
§ 5.3.— Indisponibilitats degudes a les línies	21
§ 5.4.— Consideracions finals sobre la indisponibilitat mitjana i sobre la utilització	22
§ 6.— CARACTERÍSTIQUES PRINCIPALS DE L'ENLLAÇ	
§ 6.1.— Premisses per a l'establiment del projecte	23
§ 6.2.— Característiques principals de l'enllaç	25
§ 6.3.— Estacions convertidores: etapes d'establiments	25
§ 6.4.— Línia de transport: etapes	28
§ 6.5.— Discussió sobre la potència de transmissió i la concepció estructural elegides	33

§ 7.—	PART SUBMARINA DE L'ENLLAÇ: TIPUS DE CABLE; TRAJECTE; DIPOSITACIÓ	
§ 8.—	ÍNDEXS DE PULSACIÓ SIS O DOTZE I FILTRATGES D'HARMÒNICS; APORTACIONS D'ENERGIES REACTIVES; PRESCRIPCIONS SOBRE LES CONNEXIONS DE SISTEMES GENERADORS D'HARMÒNICS	
§ 8.1.—	Instal·lacions complementàries	36
§ 8.2.—	Generacions d'harmònics: operacions amb índexs de pulsacions sis o dotze; filtratges	36
§ 8.3.—	Energies reactives requerides per les estacions convertidores en servei: aportacions	40
	§ 8.31.— Energies reactives necessàries	40
	§ 8.32.— Mètodes d'aportació de les energies reactives	40
§ 8.4.—	El parc de reserva a Eivissa i la compensació síncrona	41
§ 8.5.—	Filtratges d'harmònics. Prescripcions respecte a connexions de càrregues o sistemes generadors d'harmònics	43
	BIBLIOGRAFIA	45

**ACABAT D'IMPRIMIR
A ROMARGRAF, S.A.,
DE L'HOSPITALET DE LLOBREGAT,
EL DIA 28 DE FEBRER DE 1983**

