

# Controladors per a sistemes autònoms de subministrament d'energia elèctrica basats en piles de combustible de tipus PEM

Jordi Riera<sup>1</sup>, Robert Griñó<sup>2</sup>, Maria Serra<sup>3</sup> i Shane Malo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, UPC/CSIC, Barcelona, [riera@iri.upc.edu](mailto:riera@iri.upc.edu)

<sup>2</sup>Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, UPC, Barcelona, [roberto.grino@upc.edu](mailto:roberto.grino@upc.edu)

<sup>3</sup>Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, UPC/CSIC, Barcelona, [maserra@iri.upc.edu](mailto:maserra@iri.upc.edu)

<sup>4</sup>Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, UPC, Barcelona, [shane.malo@upc.edu](mailto:shane.malo@upc.edu)

**Resum** — El projecte PEMELECT pretén contribuir al disseny i realització de nous sistemes de generació d'energia elèctrica basats en piles de combustible. En aquesta comunicació es descriu la motivació per engegar el projecte, els objectius científics i tècnics, els resultats esperats, i els principals aspectes lligats a la seva organització.

**Paraules clau** — controladors, piles de combustible, convertidors, generació d'energia elèctrica, condicionament d'energia elèctrica, acumulació d'energia elèctrica

## I. INTRODUCCIÓ

Els sistemes elèctrics estan patint importants canvis a causa de la desregulació en el sector energètic i a la constant pressió social per augmentar l'eficiència i disminuir la pol·lució en la generació d'electricitat. Tot això sense pèrdua de la qualitat que l'usuari espera d'aquest tipus d'energia.

La introducció de l'hidrogen com a vector energètic pot ajudar a resoldre alguns d'aquests reptes: si bé l'hidrogen no és una font d'energia primària, sí que permet emmagatzemar i produir energia elèctrica amb una alta eficiència sense contaminació.

Introduir l'hidrogen en els sistemes energètics implica, sense cap dubte, la utilització de les piles de combustible. Aquestes permeten la conversió directa de l'energia química de l'hidrogen en energia elèctrica a través d'un procés electroquímic. Les piles de combustible (PdC) són una aportació important a un sistema energètic sostenible a causa de la seva alta eficiència (40 a 60%) i a les seves baixes emissions, que estan limitades pel procés de generació del combustible. L'interès per l'hidrogen i les piles de combustible queda palès pel gran esforç en inversions fet per innumerable centres d'investigació públics i empreses. Les inversions a l'Europa comunitària són però solament una cinquena part de les inversions als Estats Units d'Amèrica, estimades en uns 1.700 milions de dòlars en l'interval 2003-2008, i també molt inferiors a les inversions del Japó (240 M\$ el 2002). Per altra banda, el nombre de

piles instal·lades al món està creixent de forma notable, com pot veure's a la Fig. 1.

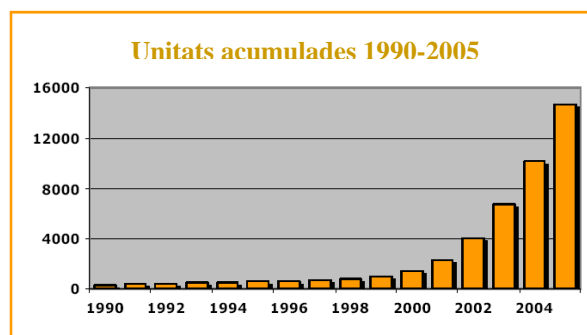


Fig.1 Piles de combustible instal·lades al món

### A. Interès científic i tècnic de les piles de combustible

La generació d'electricitat mitjançant piles de combustible és, tot i conèixer-se el principi bàsic des de 1839, una tecnologia que està encara lluny de ser madura. D'una banda, cal l'estudi de nous materials, components i configuracions per tal d'abaratir el sistema; d'altra banda, és necessari realitzar un notable treball per a convertir les PdC en sistemes fiables, eficients, amb llarga durada de vida i capacitat de subministrar energia elèctrica amb qualitat comparable a l'obtinguda per mitjans convencionals.

En un sistema de generació basat en PdC és molt habitual subministrar l'energia elèctrica en forma de tensió alterna, amb freqüència i amplitud constants, malgrat la presència de canvis en la càrrega. Això implica disposar de controladors eficients no només per al procés electroquímic intern a la pila sinó també per al sistema de condicionament de l'electricitat generada. El disseny d'aquests controladors no és un tema senzill a causa de la complexitat dels fenòmens involucrats, a la seva relativa alta dimensionalitat i, a més, a la forta no linealitat dels mateixos. Aquests fets són l'arrel de la motivació científica i tècnica d'aquest projecte. Les principals mancances que es van detectar varen ser:

- Models. Si bé existeixen en la bibliografia nombrosos models de funcionament estacionari de la pila de combustible, per exemple [1] i [2], són molt pocs els estudis en que es modela la dinàmica per a l'anàlisi del seu funcionament o el seu control ([3] i [4]), a més contemplan simplificacions importants tant en les dinàmiques ràpides i les lentes. Així, en general, els models dinàmics no contemplan la dinàmica lenta de la temperatura malgrat la temperatura té importants efectes sobre el funcionament de la pila i el transport d'aigua en el seu interior [5]. La disponibilitat de models adequats és cabdal per a la correcta anàlisi i disseny dels sistemes basats en les piles PEM.

- Controladors. No s'han publicat resultats comparant diferents estructures de control per al sistema pila tant mateix atès el nombre de variables manipulades possibles en una pila de combustible, es troba a faltar una anàlisi detallada de les diferents estructures possibles.

- Optimització de l'eficiència. Si bé s'han anat proposant diversos criteris d'optimització com la relació d'oxigen en excés [4] o bé la utilització de l'hidrogen [6], sembla necessari analitzar i proposar noves funcions objectiu que incloguin els aspectes més rellevants del procés.

### B. Experiència prèvia del grup ACES

Els investigadors del grup tenen amplia experiència en l'anàlisi i control de sistemes de generació en grans xarxes elèctriques (ENHER - ENDESA) y en la proposta d'equips especials de generació. També tenen una significativa experiència en control de processos químics complexos com són les columnes de destil·lació. Així mateix, posseeixen una important experiència en sistemes de control no lineals i en optimització i control de recursos industrials en aplicacions rellevants.

Si bé el projecte no es continuació de cap altre projecte CICYT, pel que fa les PdC, el treball que desenvolupa el grup de recerca del primer sub-projecte un any i mig abans de l'inici del projecte és notable. Entre las diverses activitats dutes a terme cal mencionar l'establiment de diverses relacions de recerca totes elles relacionades amb les PdC i el seu control així com la seva vinculació a diverses xarxes de recerca i associacions sobre PdC.

Concretament el grup de treball té experiència en:

- Desenvolupament de tècniques i algorismes de control digital avançat (control repetitiu, control basat en ressonadors), de control basat en energia (passivitat, control de sistemes Hamiltonians) i de control en modus de lliscament. Així mateix, es treballen tècniques de filtrat digital per al condicionament de senyals en sistemes de control.

- Aplicació de tècniques avançades de control, principalment les abans citades, a convertidors electrònics de potència. Concretament, s'han efectuat desenvolupaments per a estructures rectificadores de factor de potència unitària (AC-DC), filtres actius paral·lels (monofàsics i trifàsics), inversors per a etapes de sortida de sistemes d'alimentació ininterrompuda (SAI) i convertidors bàsics DC-DC (elevadors, reductors i reductors-elevadors).

- Disseny i muntatge de convertidors estàtics per a la prova experimental de les tècniques abans citades.

### C. Procés de gestió del projecte.

Atesa l'experiència dels grups investigadors en sistemes de generació i gestió d'energia elèctrica, juntament amb l'anàlisi de l'interès científic i tecnològic que presenten les PdC i l'estudi de les Directrius que proposà la Comissió Europea per al VI Programa Marc per a la recerca en piles, els investigadors decideixen orientar part de la seva recerca en aquesta temàtica i a proposar-hi projectes de recerca.

L'èmfasi de les Directrius de la Comissió per al VI PM i previstes per al VII, així com les aplicacions on s'espera el major impacte es reflexa a les Taules 1 i 2.

Taula 1. Principals accions en PdC de Comissió Europea al VI PM

|   | Accions  | Factor   |
|---|--|----------|
| 1 | Baixar-ne el cost  | 10 a 100 |
| 2 | Augmentar-ne el temps de vida útil                         | 1,5 o 8  |
| 3 | Incrementar-ne la fiabilitat, eficiència, i seguretat      |          |
| 4 | Passar a la seva producció en sèrie                        |          |
| 5 | Passar a la integració de materials, components i sistemes |          |

Taula 2. Principals aplicacions previstes de les PdC

|   | Aplicacions   | Període   |
|---|---|-----------|
| 1 | Electrònica portàtil  | Inicial   |
| 2 | Estacionàries domèstiques i grans instal·lacions de cogeneració en combinació amb turbines de gas | 2010-2015 |
| 3 | Automoció   | 2015-2020 |

A la vista d'aquestes iniciatives, els integrants del grup de recerca ACES decideixen sol·licitar el projecte de recerca incidint en les accions 3 i 5 i les aplicacions 2 i 3 ja que són aquelles en les que més pot aportar el grup mitjançant les metodologies i tècniques de control objecte de la seva activitat.

## II. DESCRIPCIÓ GLOBAL DEL PROJECTE

L'objectiu del projecte coordinat és el disseny, construcció i validació d'un sistema prototipus de generació d'energia elèctrica per a càrregues aïllades basat en piles de combustible de tipus PEM. Aquest objectiu general es compon dels següents objectius parcials per a cadascun dels sub-projectes: 1) disseny,

realització i avaluació d'un sistema de control per al procés electroquímic i 2) disseny, construcció, control i validació del sistema de condicionament de l'energia elèctrica per a alimentar càrregues en illa.

Els beneficis esperats del projecte són: 1) proposta de noves metodologies i estratègies de control en sistemes de generació d'energia elèctrica i la seva connexió a una càrrega; 2) optimitzar el rendiment del procés d'obtenció d'energia des de piles de combustible per a l'alimentació de càrregues locals i 3) millorar la qualitat de subministrament de l'energia elèctrica generada (ona sinusoidal, valor eficaç, freqüència).

#### A. Objectius específics

De manera més concreta, els objectius conjunts del projecte coordinat poden resumir-se en:

1. Obtenció de models detallats, i validats experimentalment, dels fenòmens associats al *sub-sistema* pila de combustible i al *sub-sistema* de condicionament.

2. Proposta de topologies i estructures de control per als dos *sub-sistemes* i la seva interconnexió, que permetin obtenir el millor comportament del sistema conjunt a partir dels models i de l'anàlisi del seu comportament.

3. Proposta de controladors validats també experimentalment sent programats, totes ells, de forma digital.

4. Avaluació crítica i comparativa dels sistemes de control realitzats, tenint en compte el seu comportament dinàmic en diferents escenaris de funcionament, la seva robustesa i la seva *factibilidad* de realització industrial.

#### B. Objectius específics del sub-projecte PdC

Els objectius concrets relacionats amb el subprojecte de piles es poden precisar en el següents punts:

- Caracterització i diagnosi del comportament del procés electroquímic d'una pila. Es proposaran models validats del nucli de la pila així com del seu estat de funcionament és imprescindible per a poder-ne fer el seu control i dur-ne una operació correcta.

- Operació. Obtenir d'una PdC la màxima eficiència és un dels objectius que es pot aconseguir operant la pila en els rangs de funcionament correctes. Cal determinar aquests rang sense malmetre la seva controlabilitat.

- Disseny de controladors. Es proposaran noves estructures de control lineals

Disseny i control de sistemes híbrids

#### C. Objectius específics del sub-projecte de condicionament de l'energia elèctrica

Pel que fa a l'etapa electrònica de condicionament d'energia, l'objectiu del projecte és el disseny, construcció i control d'una estructura multiconvertidor per al subministrament d'energia elèctrica a la càrrega a partir d'una pila de combustible que actua de font primària. Per a això s'han de tenir en compte els següents aspectes:

- L'energia s'absorbeix de la pila de combustible d'una forma que no limiti la seva vida útil. Això és, el corrent que s'absorbeix de la pila de combustible deu tenir un ample de banda petit (variacions lentes).

- El sistema deu mantenir els paràmetres operatius d'una xarxa AC (230 V, 50 Hz, senyal sinusoidal) malgrat les càrregues (lineals o no) que es connectin.

- El sistema ha de ser capaç de subministrar durant un període de temps fitat un nivell de potència de 2.5 vegades el nominal sense afectar a la font primària. Això implica la inclusió, dintre del sistema, d'un element d'emmagatzematge que subministri l'energia necessària per a cobrir les puntes de potència. Aquesta acumulació s'efectuarà amb una bateria de supercondensadors.

### III. RECURSOS NECESSARIS

Emprendre un projecte amb les característiques mencionades presenta importants requeriments i de naturalesa molt diferent que es poden agrupar en requeriments de coneixements i aptituds als integrants dels grups de recerca i requeriments en infraestructura.

#### A. Requeriments al grup de recerca

Tal i com ja s'ha comentat en el punt II.A, els objectius del projecte són ambiciosos i estan en un dels sub-projectes directament relacionats amb una aplicació que es basa en una tecnologia encara a nivell de prototipus. Per tant es requereix que els grups de recerca tinguin un alt grau d'interdisciplinarietat i complementarietat que es pot concretar en les següents característiques:

- Coneixement del fenomen físic. La correcta aproximació al sistema, PdC i al condicionament de l'energia generada, exigeix una proximitat molt gran als fenòmens que hi intervenen. Són necessaris, per tant, coneixements de diverses branques del coneixement: processos químics i electroquímics, processos termodinàmics i de mecànica de fluids, electrònica de potència i de sistemes elèctrics. A més, es clar, d'un coneixement profund en sistemes de control.

- Coneixement detallat de l'aplicació. Les mateixes circumstàncies es donen per donar solucions tecnològiques.

lògiques a les aplicacions: cal tenir un gran coneixement de l'aplicació, les seves limitacions i requeriments.

- Nivell d'abstracció.
- Capacitat d'interacció amb altres investigadors i centres.

En la Fig.2 es dóna una valoració de la importància relativa que es pot atribuir a cada factor.

D'altra banda a la Fig. 3 s'ha reflectit la composició de l'expertesa dels investigadors del grup.

### B. Recursos materials necessaris

Els requeriments en recursos materials que requereix la correcta realització del projecte es poden agrupar en els següents punts:

- Infraestructura de Laboratori. Una característica diferencial d'aquest projecte, respecte a anteriors projectes del grup, relacionada amb les PdC ha estat la necessitat de crear un laboratori adequat per al seu assaig, bàsicament pel fet de manipular gasos (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, aire sintètic, alguns dels quals requereixen una certa precaució en la seva manipulació. Cal destacar aspectes

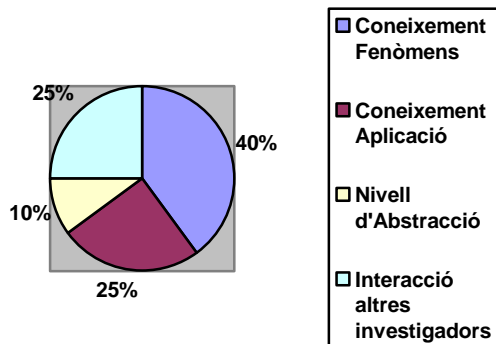


Fig.2 Requeriments d'interdisciplinarietat del grup.

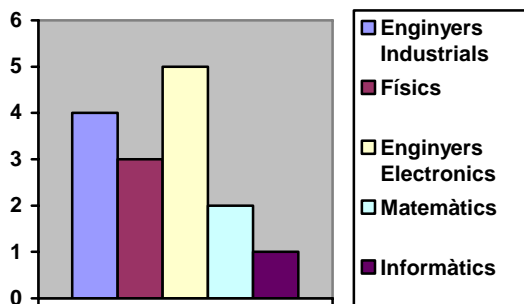


Fig.3 Composició dels grups de recerca.

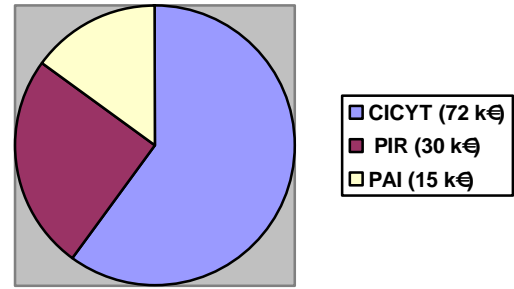


Fig.4 Fonts de finançament de la infraestructura del SP PdC.

com: estació de gasos, sensor de H<sub>2</sub>, adequació del laboratori i establiment de procediments d'emergència.

- Infraestructura de Projecte. De nou, en el subprojecte relacionat amb les PdC s'ha hagut de dotar de la infraestructura bàsica en equipaments: bancs d'assaig, sensors, sistema d'adquisició i control, etc. En el subprojecte de condicionament s'ha adquirit instrumentació de laboratori per a completar la ja disponible. Es pot fer menció a una font programable 120V, 50A, DC.

El finançament aconseguit per a les dues partides mencionades ha tingut, de moment, tres aportacions: CICYT (MEC), PIR (Generalitat de Catalunya) i PAI (CSIC), vegis la Fig. 4.

## IV. ASPECTES ORGANITZATIUS DE LA RECERCA I DE LA GESTIÓ

### Metodologia emprada

La metodologia utilitzada en el desenvolupament del projecte no és diferent de la seguida en un treball científic: Anàlisi dels sistemes; Desenvolupament de metodologies i tècniques; Validació experimental.

És més interessant destacar les principals tasques que comporta la realització del projecte.

### B. Tasques rellevants

En l'aspecte 'organització del projecte es pot destacar les diferents tasques que s'han de dur a terme en el projecte

- Científiques teòriques. Relacionades amb l'anàlisi dels sistemes i la proposta i desenvolupament de metodologies i tècniques de control.

- Posada en marxa de laboratoris i plantes experimentals. Si bé aquesta tasca es realitza puntualment consumeix una quantitat apreciable de recursos humans i econòmics.

- Posada a punt d'experiments de laboratori. Aquesta tasca consumeix un temps molt important de la dedicació dels investigadors en els dos sub-projectes de recerca. Aquest temps es podria descompondre en les següents activitats:

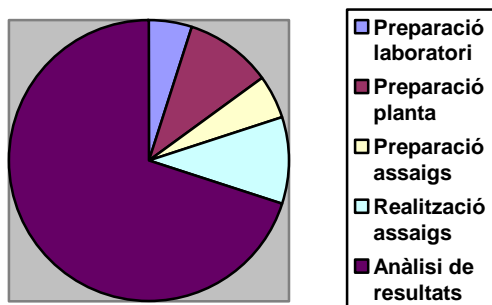


Fig.5 Repartiment del temps entre tasques experimentals..

- Preparació laboratori
- Preparació planta
- Preparació assaigs
- Realització assaigs
- Anàlisi resultats

A la Fig. 5 es dona una certa quantificació del temps dedicat a cada una d'aquestes activitats.

#### C. Relacions amb altres centres

Un aspecte molt rellevant del projecte són les relacions amb altres centres de recerca que treballen en els mateixos temes, o en temes afins o complementaris. Cal dir que en aquest projecte algunes de les relacions són fonamentals per al seu èxit. Entre els centres o laboratoris amb els que es manté relacions directes per al projecte cal destacar:

-CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) a Grenoble, França. S'ha assajat en els seus laboratoris una de les piles del projecte.

- IQS (Institut Químic de Sarrià - URLL) a Barcelona. Es co-dirigeix una tesi doctoral per a la sintetització i caracterització d'un nou polímer per a PdC.

- SAC (Sistemes Avançats de Control - UPC). Es porta a terme una col·laboració en el marc de les CICYT's lligada al control i comportament de sistemes basats en PdC.

- UNLP (Univ. Nacional. de la Plata, Argentina). Hi ha una col·laboració per al disseny i validació experimental de sistemes de control basats en tècniques de control lliscant.

- UTN (Univ. Tecnològica Nacional, Argentina). Es treballa en el disseny i validació de controladors lineals Predictius per al sistema pila.

- LAGEP (Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés, UCBLI) de Lyon França. Es mantenen relacions directament relacionades amb modelitzar el procés piles.

- REPICOPA (Red española de pilas de combustible y baterías). El grup de recerca és membre d'aquesta xarxa des de la seva fundació.

- APPICE (Asociación de pilas de combustible de España) El grup de recerca és membre d'aquesta associació des de la seva fundació.

#### D. Organització del projecte

La organització del projecte es basa en

### V. RESULTATS DEL PROJECTE

Use.

#### A. Resultats científics i tècnics assolits fins ara

#### B. Transferència de resultats

ORCA

### REFERÈNCIES

- [1] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel cell model", J. Electrochem. Soc., Vol. 138, Num. 8, 1991, pp. 2334-2342.
- [2] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P. R. Roberge, "Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell" I i II, J. Electrochem. Soc., Vol. 142, N. 1, 1995, pp. 1-15.
- [3] J. M. Correa, F. A. Farret, L. N. Canha, "An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using an electromechanical model", The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001.
- [4] J. T. Pukrushpan, H. Peng, A. G. Stefanopoulou, "Simulation and analysis of transient fuel cell system performances based on a dynamic reactant flow model", ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 2002, New Orleans, Louisiana, USA.
- [5] T. Abe, H. Shima, K. Watanabe, Y. Ito, "A study of polymer electrolyte fuel cells by the measurement of AC impedance, current interrupt, and dew points: 2. Effect of cell temperature", Fuel Cells, Vol. 2, N 1, 2002, pp. 15-19.
- [6] M.D. Lukas, K. Y. Lee, H. Ghezal-Ayagh, "Operation and control of direct reforming fuel cell power plant", IEEE 2000. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Jan 2000. Volume: 1, pp. 523 -527.