

## COGENERACIÓ AMB PILES DE COMBUSTIBLE: APLICACIÓ A EDIFICIS DE LA UPC

**Cristina Martínez, Carlos Sánchez, Javier Sancho, Javier Simon, Carme Pretel,  
Jordi Llorca\***

Institut de Tècniques Energètiques  
Diagonal 647, ed. ETSEIB  
08028 - Barcelona, Spain  
Phone: +34 93 401 17 08  
<http://www.upc.edu/inte>

[jordi.llerca@upc.edu](mailto:jordi.llerca@upc.edu) \*

**Paraules clau:** Hidrogen, piles de combustible, cogeneració, aplicacions estacionàries

### RESUM

Les piles de combustible són dispositius electroquímics que transformen directament l'energia d'un combustible químic en energia elèctrica i calor. Entre els seus avantatges destaquen una eficiència energètica molt elevada, una menor emissió de gasos contaminants i la possibilitat de treballar en un rang de potències de mW a MW, cosa que les fa molt versàtils i amb un ampli espectre d'aplicació, des d'aplicacions estacionàries en edificis, fins a aplicacions en automoció i dispositius electrònics. A l'assignatura "Tecnologia Energètica" de l'ensenyament d'Enginyeria Industrial a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona (ETSEIB) els alumnes fan un treball aplicat (en grups de 3-4 persones) sobre algun dels aspectes tractats a l'assignatura, on s'inclouen les piles de combustible. Aquesta contribució al "II Congrés UPC Sostenible 2015" és el resultat d'un d'aquests treballs, on s'estudia l'aplicació d'una pila de combustible comercial d'àcid fosfòric (PAFC) alimentada amb gas natural i d'un acumulador de calor per a satisfer totalment el servei elèctric i sanitari al gimnàs de l'ETSEIB, en concepte de calefacció i aigua calenta sanitària. El treball inclou l'estudi de la instal·lació i consums de gas natural i electricitat del gimnàs, l'estudi i disseny del sistema de cogeneració amb la pila de combustible, la identificació de l'emplaçament adient i una aproximació a l'estudi de la viabilitat econòmica del projecte. El resultat de l'estudi és que amb una única pila de combustible PAFC de 200 kW es poden satisfer les demandes d'energia tèrmica per a la calefacció i l'obtenció d'aigua calenta sanitària del gimnàs i, a banda, també es pot cobrir part de l'energia elèctrica consumida per tot l'edifici de l'ETSEIB. L'estalvi energètic que suposa l'ús de la pila de combustible és considerable i la diversificació de vectors energètics a l'edifici és interessant per a garantir-ne el funcionament. Existeix un lloc idoni per a l'emplaçament de la pila de combustible i l'acumulador a on, a més de reunir-se les condicions tècniques que requereix la nova instal·lació, hi ha l'espai necessari per a la seva ubicació. En l'aspecte econòmic, tot i l'elevat cost d'inversió necessari per a dur a terme la instal·lació global, el període de retorn és d'uns catorze anys. Finalment, una instal·lació d'aquest tipus a la UPC representaria un exemple amb un gran impacte social cap a la sostenibilitat i eficiència energètica en edificis fent ús de les piles de combustible.

## INTRODUCCIÓ

Les piles de combustible són dispositius electroquímics que produeixen electricitat, calor i aigua mitjançant el procés invers a l'electròlisi. Són dispositius que teòricament tenen la capacitat de produir energia elèctrica de forma indefinida mentre se'ls subministri combustible als elèctrodes. Una unitat bàsica de la pila es diu cel·la i aquesta està formada per dos elèctrodes separats per un electròlit. Una cel·la de combustible produeix una diferència de potencial al voltant de 1 V, per la qual cosa, per a la producció de tensions més elevades es disposen en sèrie diverses cel·les formant un apilament o "stack".

Existeixen diferents tipologies de piles de combustible que generalment es cataloguen d'acord amb l'electròlit utilitzat. Atenent a aquest criteri, es poden diferenciar les piles d'àcid fosfòric (PAFC), de membrana de bescanvi de protons o també conegudes com piles d'electròlit polimèric sòlid (PEMFC i DMFC quan s'alimenten directament amb metanol), alcalines (AFC), de carbonat fos (MCFC) i d'òxid sòlid (SOFC).

La pila de combustible d'àcid fosfòric és una de les tecnologies més madures pel que fa a desenvolupament i comercialització. Les piles de combustible PAFC s'alimenten sobretot amb hidrocarburs, normalment gas natural. Inicialment el gas natural es reforma amb vapor d'aigua en presència d'un catalitzador a una mescla rica en hidrogen, el qual es dissocia a l'ànode en protons i electrons. L'àcid fosfòric de l'electròlit condueix els protons al càtode, mentre que els electrons circulen per l'exterior del circuit i fan el treball elèctric. Al càtode, els protons es combinen amb l'oxigen de l'aire i els electrons en presència d'un catalitzador i s'origina aigua com a subproducte. La temperatura d'operació de les piles de combustible PAFC és d'uns 200°C. L'excés de calor que es produeix a la reacció es recull amb bescanviadors d'aigua situats a les plaques de cada cel·la i es pot utilitzar per a cogeneració d'energia tèrmica. En aquests casos el rendiment global del sistema augmenta considerablement, arribant a valors del 85%, respecte del 36-42% que s'aconsegueix sense la cogeneració. Aquests rendiments són superiors als que s'obtenen mitjançant mètodes convencionals, cosa que fa que les piles de combustible siguin unes eines per augmentar l'eficiència energètica amb molt de futur. A més, l'únic subproducte del funcionament d'una pila de combustible és aigua, pel que la sostenibilitat del procés està assegurada. Val a dir que en la reformació catalítica del gas natural s'obté, a més d'hidrogen,  $\text{CO}_2$  ( $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ); ara bé, la quantitat global de  $\text{CO}_2$  que es desprèn és molt inferior a la que es genera en l'obtenció del mateix treball útil a partir de la combustió del gas natural.

La quantitat d'electricitat subministrada depèn de la quantitat de cel·les que formen el "stack", essent la densitat de potència d'uns  $0,18 \text{ W/cm}^2$ . A dia d'avui, les unitats comercials més potents ofereixen potències de fins a 400 kW. Una pila de combustible PAFC costa normalment entre 3.500 i 4.000 €/kW. El catalitzador de platí que es requereix als elèctrodes és en part responsable d'aquest cost tan elevat, comparant-ho amb el mètodes convencionals de generació d'electricitat.

Les aplicacions principals de les PAFC són estacionàries, atès que l'electròlit és especialment corrosiu. D'aquesta manera estan indicades per a edificis (per a garantir el subministrament d'energia en hospitals, estacions de bombers i policia, plantes útils d'energia, aeroports, etc.), encara que també poden trobar-se en el transport (s'utilitzen en vehicles pesats que realitzen desplaçaments llargs, com els autobusos i màquines de tren).



*Esquema de funcionament d'una pila de combustible d'àcid fosfòric (PAFC) i identificació de les diferents parts d'una unitat comercial (UTC Power).*

### **ESTUDI D'UNA PILA DE COMBUSTIBLE PAFC ALIMENTADA AMB GAS NATURAL PER A SUBMINISTRAR CALEFACCIÓ I AIGUA CALENTA SANITÀRIA AL GIMNÀS DE L'ETSEIB I ENERGIA ELÈCTRICA A L'EDIFICI**

Es pretén implementar un sistema capaç de subministrar, per una banda, tota l'energia elèctrica i tèrmica que utilitza el gimnàs de l'ETSEIB i, per l'altre, part de l'energia elèctrica consumida pel propi edifici.

D'aquesta manera, el que es planteja es substituir part del sistema actual del que disposa l'ETSEIB per a generar electricitat i calor per un sistema format per un mòdul de cogeneració basat en una pila de combustible PAFC alimentada amb gas natural i un acumulador de calor. La pila de combustible s'encarregarà de generar energia elèctrica i calor residual, mentre que l'acumulador aprofitarà aquesta calor residual per a donar serveis al gimnàs en concepte de calefacció i aigua calenta sanitària. L'avantatge del nou sistema restarà en que augmentarà l'eficiència del consum d'energia elèctrica i tèrmica a l'edifici.

#### ***Situació actual i elecció del dispositiu***

Actualment l'ETSEIB consumeix diàriament una energia elèctrica que se situa entorn els 11.000-12.000 kWh/dia, i que pot arribar a suposar un consum mensual de fins a 375.000 kWh amb pics de potència de 1.200 kW en els mesos amb més demanda. Atenent a que no es vol substituir tota la instal·lació actual, sinó només una part, la pila de combustible que es vol implementar haurà de donar una potència elèctrica al voltant de 200 kW i una potència tèrmica aproximada, per aplicacions de cogeneració, d'unes 300.000 BTU/h.

Entre els diferents fabricants que actualment tenen a la venda piles de combustible PAFC, s'ha escollit l'empresa UTC Power, per ser la que presenta un producte que s'adapta perfectament a les nostres necessitats. Aquest producte es el PureCell 200. El conjunt és capaç d'oferir una potència elèctrica de 200 kW i fins 900.000 BTU/h de calor per aplicacions de cogeneració, segons sigui la temperatura de treball. Es tracta d'un sistema consolidat i fiable, ja que des de que es va posar a la venda l'any 2005 ja s'han instal·lat més de 275 unitats i porten en conjunt més de 7 milions d'hores de funcionament operacional sense problemes importants.

### ***Disseny del sistema de cogeneració amb pila de combustible***

La idea del dispositiu a implementar no es només escollir un sistema per a generar energia elèctrica sinó que també es pugui aprofitar el calor residual generat en la pila de combustible per a utilitzar-lo en aplicacions de cogeneració. D'aquesta manera el rendiment energètic global augmentarà de manera considerable. En el nostre cas en particular, s'ha cregut oportú fer servir aquest calor residual per a cobrir tota la demanda tèrmica en concepte de calefacció i aigua calenta del gimnàs de l'ETSEIB i que actualment la proporcionen dues calderes i un dipòsit d'aigua.

Segons les especificacions tècniques del fabricant de la pila de combustible triada, el calor cedit pot arribar a ser de 900.000 BTU/h, del qual es pot aprofitar 88 kW en potència nominal treballant fins a uns 120°C i 118,5 kW fins a 60°C. Per tal de dissenyar el circuit de calefacció i aigua calenta sanitària s'han calculat les necessitats tèrmiques de calefacció del gimnàs i la radiació solar que arriba de l'exterior. A continuació s'ha procedit al dimensionament del circuit de calefacció i aigua sanitària calenta. La part principal del circuit és l'acumulador, ja que en funció d'aquest es dissenyen els circuits. Per a oferir una solució òptima d'aigua sanitària calenta i calefacció central amb equips d'alta eficiència s'ha optat per escollir la tecnologia "tank in tank".

L'acumulador "tank in tank" és un aparell productor d'aigua calenta sanitària d'alt rendiment i amb un sistema de calefacció indirecta, gràcies al seu disseny d'un dipòsit dins d'un altre. A l'interior de la carcassa existeix un acumulador d'acer inoxidable travessat pels tubs de l'aigua sanitària que s'escalfarà. L'acumulador està envoltat per una coberta d'acer tou que conté l'aigua primària (fluid que servirà per a la calefacció). La coberta exterior descendeix fins a on es cedirà la calor provinent de la pila i envolta tot el sistema. La superfície de bescanvi de calor és, per tant, molt superior a la dels aparells productors d'aigua calenta tradicionals. Una bomba de circulació instal·lada en el circuit primari fa circular l'aigua al voltant del dipòsit, ajuda a que s'escalfi de forma més ràpida i la manté a una temperatura constant al llarg de tot el circuit primari. Aquest sistema presenta un avantatge considerable respecte a altres aparells productors d'aigua calenta, i és que escalfa l'aigua sanitària per mitjà d'un circuit primari, permetent que aquest es faci servir també per a la calefacció. El model comercial escollit és el HeatMaster 85TC. Com que la potència calorífica (input) demanada per l'acumulador és de 85 kW com a màxim i disposem de la que ens dona la pila de combustible d'uns 88 kW (treballant fins a 120°C), en tenim prou per satisfer la demanda del tanc. La potència de treball, un cop el sistema estigui instal·lat, vindrà determinada per la demanda de calefacció al gimnàs. El model d'acumulador triat pot escalfar l'aigua des de 10°C fins a un màxim de 85°C. L'aigua calenta que s'utilitza al gimnàs és per a les dutxes, i la temperatura mitja per aquest servei és d'uns 40°C. Per a aquesta temperatura el sistema ofereix un cabal d'aigua de 3.177 l/h (>50 l/min), suficient per a cobrir tota la demanda del gimnàs.

### ***Canvis a la instal·lació actual***

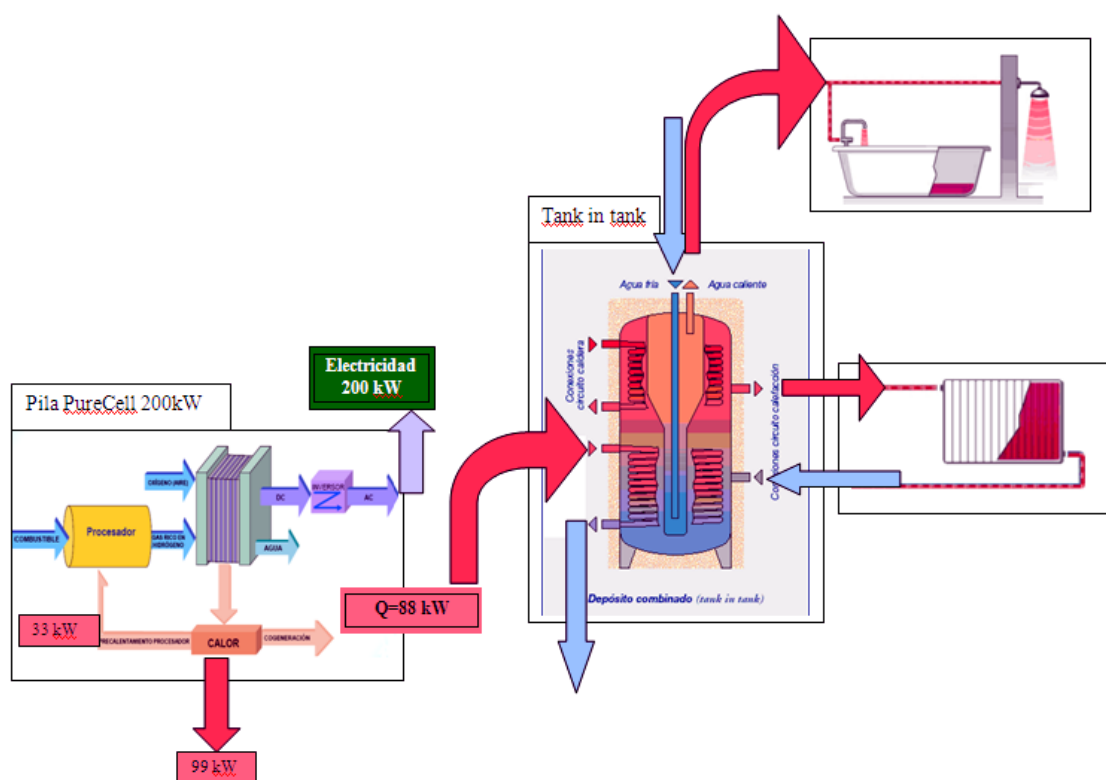
A la instal·lació elèctrica actual, dels 3 trafos que actualment funcionen al 50%, només es deixaria en funcionament 1 que treballaria entre el 30-50% de la seva capacitat, segons la demanda d'energia. Aquest trafo cobriria aproximadament el 60% de la demanda d'energia elèctrica mensual. La resta d'energia necessària (~140.000 kWh) la donaria la pila de combustible. Els altres 2 trafos es deixarien sense funcionar però es mantindrien a la mateixa ubicació per a poder utilitzar-los en cas que la pila presentés alguna incidència. Pel que fa a la instal·lació tèrmica, les dues calderes i el dipòsit d'aigua actuals serien substituïts per l'acumulador "tank in tank".

### Possibles ubicacions i emplaçament final

Donada la grandària i el pes de la pila de combustible i atenent a l'espai disponible actualment a l'ETSEIB, les diferents possibilitats d'ubicació final són limitades. Les possibles ubicacions que s'han plantejat han estat les següents:

- Opció 1: Antic parking de motos
- Opció 2: Carreró del dispensari mèdic
- Opció 3: Planta -2, a on actualment es disposen els trafos
- Opció 4: Sala de màquines del gimnàs

D'aquestes ubicacions, i tenint en compte que el nostre objectiu es donar servei al gimnàs, l'opció 4 és la més favorable, tant tècnicament com física, ja que, a més de ser la més propera a la ubicació a la que es vol donar servei, hi ha una de les entrades de gas natural a l'edifici.



Esquema global de la instal·lació.

### Anàlisi econòmica

L'empresa no ha facilitat el pressupost de la pila de combustible, però contrastant informació d'altres projectes realitzats arreu s'ha fet la següent estimació de costos:

Pila de combustible	740.000 €
Acumulador "tank in tank"	10.000 €
Instal·lació	500.000 €
<b>Cost total del projecte</b>	<b>1.250.000 €</b>

Considerant els consums d'energia elèctrica i gas natural de l'ETSEIB realitzats durant l'any 2007, es pot establir una comparativa de consums i costos respecte els equivalents amb la instal·lació de la pila de combustible:

	Comparació de consums d'energia	
	Sense pila	Amb pila
Energia elèctrica total (kWh)	4.355.489	2.603.489
Energia gas natural total (kWh)	1.609.935	4.194.515
Cost energia elèctrica (€/any)	479.104	286.384
Cost gas natural (€/any)	64.157	165.886
Cost total (€/any)	543.261	452.270
Estalvi energètic (€/any)		90.990

Per a l'anàlisi econòmica també s'ha calculat el "payback" o període de retorn, la taxa interna de retorn (TIR) i el valor actual net (VAN). El "payback" (inversió total/benefici promig anual) resulta ser aproximadament de  $1.250.000/90.990=13,74$ , és a dir, d'uns 14 anys. Assumint valors raonables d'inflació, de les condicions de retorn del finançament, del període d'amortització i de la vida útil de l'equip es posa de manifest que una inversió d'aquesta magnitud difícilment resulta rendible (TIR <0). Només quan s'aconsegueixi disminuir el cost d'aquests equips o incrementar significativament la seva vida útil, assolirem escenaris on la rendibilitat econòmica serà possible.

## CONCLUSIONS

Un cop fet l'estudi de la implementació d'una pila de combustible PAFC i un acumulador de calor a l'edifici de l'ETSEIB es pot afirmar que, amb un únic mòdul comercial de 200 kW de potencia, es poden satisfer les demandes d'energia tèrmica per a la calefacció i l'obtenció d'aigua calenta sanitària del gimnàs, així com també es pot cobrir part de l'energia elèctrica consumida a tot l'edifici. Existeix un lloc idoni per a l'emplaçament del mòdul i l'acumulador a on, a més de reunir-se les condicions tècniques que es requereixen en la instal·lació, hi ha l'espai necessari per a la ubicació.

La independència del subministrament d'energia mitjançant la pila de combustible respecte el sistema actual permet garantir el subministrament elèctric, de calefacció i d'aigua calenta a l'edifici en situacions de fallida. Així, si falla el subministrament de gas natural, la pila deixa de funcionar i s'obté l'energia de la xarxa elèctrica, i a l'inrevés. Surt més a compte produir electricitat mitjançant el sistema de cogeneració amb la pila de combustible que comprar-la a la xarxa. Per aquest motiu i gràcies a l'eficiència de la pila de combustible, existeix un estalvi anual de diners important pel fet de substituir part del consum d'electricitat per gas natural. Tot i el cost elevat d'inversió inicial necessari per a dur a terme la instal·lació, el període de retorn de la inversió és d'uns 14 anys.

Després de comprovar la viabilitat de la pila de combustible a l'edifici de l'ETSEIB com a generadora d'electricitat i calor es creu que seria força interessant dur a terme el projecte, amb la finalitat de servir com a exemple de sostenibilitat a altres edificis dins i fora de la UPC.