



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE  
FABRICACIÓN DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS  
DE COMBUSTIBLE PEM**

Autor:

**Redondo Adán, Iván**

Tutor Académico:

**Horrillo Güemes, Alfonso Jesús**

Tutor de Empresa:

**Salgado Alejo, Manuel**

*Departamento de Ingeniería  
Energética y Fluidomecánica.  
Fundación Cidaut. Dpto. Energía*

Valladolid, Noviembre de 2023





## Resumen

Las pilas de combustible desempeñan un papel fundamental en la lucha contra el cambio climático. El mundo se encuentra en búsqueda de una economía descarbonizada y la completa transición hacia fuentes de energía más limpias y eficientes. El perfeccionamiento del uso de un vector energético tan importante y versátil como lo es el hidrogeno es clave.

El presente estudio abarca aspectos esenciales de las placas bipolares, uno de los componentes más críticos de las Pilas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico. La elección del material y el proceso productivo puede determinar grandes ventajas económicas entre muchos otros beneficios de este tipo de tecnología.

Para cumplir los objetivos de dicho estudio, el documento se ve completado con un análisis económico que refleja la optimización de un tipo de proceso productivo, además de la introducción al funcionamiento y componentes que conforman las Pilas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico.

Palabras clave: **hidrógeno, pilas de combustible, materiales, procesos, análisis económico.**

## Abstract

Fuel cells play a key role in the fight against climate change. The world is in pursuit of a decarbonized economy and the complete transition to cleaner and more efficient energy sources. Improving the use of such an important and versatile energy carrier as hydrogen is key.

The present study covers essential aspects of bipolar plates, one of the most critical components of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. The choice of material and production process can determine great economic advantages among many other benefits of this type of technology.

In order to meet the objectives of this study, the document is completed with an economic analysis that reflects the optimization of a type of production process, as well as an introduction to the operation and components of Proton Exchange Membrane Fuel Cells.

Keywords: **hydrogen, fuel cells, materials, processes, economic analysis.**



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Índice General

INTRODUCCIÓN .....	19
OBJETIVOS .....	21
ESTADO DEL ARTE.....	23
<b>CAPÍTULO 1: PILA DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>25</b>
1.1. DESCRIPCIÓN .....	25
1.2. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE .....	27
1.3. PEMFC .....	36
1.3.1. <i>Definición y principios de funcionamiento</i> .....	36
1.3.2. <i>Curva de polarización y pérdidas asociadas</i> .....	39
1.3.3. <i>Componentes</i> .....	41
1.3.4. <i>Ventajas, Aplicaciones y Tendencias</i> .....	48
<b>CAPÍTULO 2: PLACA BIPOLAR.....</b>	<b>51</b>
2.1. GEOMETRÍAS DE CANALES DE FLUJO .....	53
2.1.1. <i>Flujo de reactivos en paralelo</i> .....	57
2.1.2. <i>Flujo de reactivos en serpentín</i> .....	58
2.1.3. <i>Flujo de reactivos en serpentín múltiple</i> .....	59
2.1.4. <i>Flujo de reactivos en Pin-type</i> .....	60
2.1.5. <i>Otros tipos de flujo de reactivos</i> .....	61
2.1.6. <i>Comparativa</i> .....	63
2.2. MATERIALES .....	65
2.2.1. <i>Metálicas</i> .....	66
2.2.2. <i>Grafito</i> .....	75
2.2.3. <i>Polímeros dopados</i> .....	77
2.2.4. <i>Comparativa</i> .....	90
2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN .....	92
2.3.1. <i>Placas Bipolares Metálicas</i> .....	92
2.3.2. <i>Placas Bipolares de Grafito</i> .....	102
2.3.3. <i>Placas Bipolares de Polímeros Dopados</i> .....	103
2.3.4. <i>Comparativa</i> .....	107
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>109</b>
3.1. INVERSIÓN INICIAL.....	111
3.2. MATERIA PRIMA.....	113
3.3. COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	116
3.3.1. <i>Mano de Obra</i> .....	116
3.3.2. <i>Servicios Generales o Auxiliares</i> .....	117



3.3.3. <i>Procesos</i> .....	118
3.4. INGRESOS.....	122
3.5. LÍNEAS DE MEJORA .....	127
3.5.1. <i>Duplicación de la máquina de corte láser y calidad por lotes..</i>	127
3.5.2. <i>Duplicación de la máquina de soldadura láser</i> .....	132
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>137</b>
4.1. ESTUDIO TÉCNICO .....	137
4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO .....	138
<b>CAPÍTULO 5: LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>145</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>147</b>



## Índice de Figuras

FIGURA 1. NÚMERO DE MILES <i>PAPERS</i> PUBLICADOS SOBRE PILAS DE COMBUSTIBLE ANUALMENTE [1] .....	24
FIGURA 2. COMPONENTES DEL <i>STACK</i> Y <i>STACK</i> COMPLETO DE TIPO PEMFC [8] .....	25
FIGURA 3. DETALLE DE <i>STACK</i> , CELDA Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE TIPO PEMFC [9] .....	26
FIGURA 4. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO AFC [10].....	27
FIGURA 5. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO PEMFC [10] .....	28
FIGURA 6. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO DMFC [10].....	29
FIGURA 7. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO PAFC [10] .....	30
FIGURA 8. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO MCFC [10] .....	31
FIGURA 9. PRINCIPIO DE OPERACIÓN MONOCELDA TIPO SOFC [10].....	32
FIGURA 10. COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS EFICIENCIA-POTENCIA [7] .....	33
FIGURA 11. COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS DETERMINANTES DE PILAS DE COMBUSTIBLE [10] .....	34
FIGURA 12. DIAGRAMA DE SANKEY SOBRE LA ENERGÍA DEL HIDROGENO [13].....	36
FIGURA 13. CURVA DE POLARIZACIÓN PEMFC [14].....	39
FIGURA 14. PUNTO DE FUNCIONAMIENTO PEMFC, CURVA DE POLARIZACIÓN Y DE POTENCIA [15] .....	40
FIGURA 15. TIPOS DE MECANISMO DE TRANSPORTE EN LA MEMBRANA [16] .....	42
FIGURA 16. TIPOS DE PREPARACIÓN DE MEA [17] .....	44
FIGURA 17. PERMEABILIDAD DE LOS GASES ENTRE LOS COMPONENTES [17].....	45
FIGURA 18. COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL INTERIOR DE LA PEMFC [14] .....	45
FIGURA 19. VISTA EXPLOSIONADA DE COLOCACIÓN DE OTROS COMPONENTES [18] .....	47
FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE COSTES DE VEHÍCULOS CON FC Y DE COMPONENTES [19].....	48
FIGURA 21. ASPECTOS DETERMINANTES DEL DISEÑO DE UNA PLACA BIPOLAR [21] .....	51
FIGURA 22. ASPECTOS DE DISEÑO DE RELEVANCIA (ELABORACIÓN PROPIA APOYADO EN [23]) .....	52
FIGURA 23. ESQUEMA DE CANALES DE FLUJO [24].....	53
FIGURA 24. CAÍDA DE PRESIÓN SEGÚN CAUDAL Y TIPO DE SECCIÓN [7].....	54
FIGURA 25. ACUMULACIONES DE AGUA SEGÚN TIPO DE SECCIÓN DE CANALES [25] .....	54
FIGURA 26. EFECTO BYPASS EN CANALES DE FLUJO [25] .....	56
FIGURA 27. CONFIGURACIÓN DE CANALES EN PARALELO [26] .....	57
FIGURA 28. CONFIGURACIÓN DE CANALES EN SERPENTÍN [7].....	58
FIGURA 29. CONFIGURACIÓN DE CANALES EN SERPENTÍN MÚLTIPLE [7].....	59
FIGURA 30. CONFIGURACIÓN DE CANALES EN PIN-TYPE [25].....	60
FIGURA 31. CONFIGURACIÓN DE CANALES EN PORO ABIERTO (ELABORACIÓN PROPIA APOYADO EN [27]).....	62
FIGURA 32. TIPOS DE MATERIALES EN PLACAS BIPOLARES [29].....	65
FIGURA 33. PLACA BIPOLAR METÁLICA [30].....	68
FIGURA 34. ESQUEMA DE RECUBRIMIENTOS SOBRE ACERO INOXIDABLE [31] .....	69
FIGURA 35. PLACA BIPOLAR DE GRAFITO [37].....	75



FIGURA 36. UMBRAL DE PERCOLACIÓN, CONDUCTIVIDAD-RELLENO [16].....	77
FIGURA 37. PLACA BIPOLAR DE POLÍMERO DOPADO [38].....	78
FIGURA 38. BAJA Y ALTA RELACIÓN DE ASPECTO [46] .....	86
FIGURA 39. PROCESO DE <i>HOT PRESSING</i> [51] .....	93
FIGURA 40. PROCESO REAL DE ESTAMPACIÓN EN FRÍO [52] .....	94
FIGURA 41. PROCESO DE <i>ROLL TO ROLL</i> [51].....	95
FIGURA 42. PROCESO REAL DE <i>ROLL TO ROLL</i> [53].....	95
FIGURA 43. PROCESO DE <i>RUBBER PAD FORMING</i> [54].....	95
FIGURA 44. PROCESO DE HIDROCONFORMADO [51] .....	96
FIGURA 45. PROCESO DE GRABADO QUÍMICO [55].....	97
FIGURA 46. PROCESO DE COMPRESIÓN [57] .....	103
FIGURA 47. PROCESO DE COMPRESIÓN EN CALIENTE [58] .....	104
FIGURA 48. PROCESO DE INYECCIÓN [51] .....	105
FIGURA 49. PROCESO DE SINTERIZADO LÁSER [59].....	106
FIGURA 50. COMPARATIVA ASPECTOS IMPORTANTES DE PROCESOS (ELABORACIÓN PROPIA APOYADO EN [51]) .....	107
FIGURA 51. ESQUEMA DE CÉLULAS DE TRABAJO DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA) .....	109
FIGURA 52. PARÁMETROS DEL RENDIMIENTO OPERACIONAL DE LAS MÁQUINAS [61] .....	111
FIGURA 53. REPARTO DE AMORTIZACIÓN DE MAQUINARIA (ELABORACIÓN PROPIA).....	112
FIGURA 54. COMPARATIVA DE ESCENARIOS DE COMPRA DE MATERIA PRIMA (ELABORACIÓN PROPIA) .....	114
FIGURA 55. DIAGRAMA DE PROCESO (ELABORACIÓN PROPIA).....	121
FIGURA 56. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO (ELABORACIÓN PROPIA).....	122
FIGURA 57. ESQUEMA DE COLOCACIÓN DE COMPONENTES EN UNA CELDA [68].....	122
FIGURA 58. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA) .....	126
FIGURA 59. DIAGRAMA DE PROCESO 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	128
FIGURA 60. REPARTO DE AMORTIZACIÓN DE MAQUINARIA 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA)	129
FIGURA 61. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	130
FIGURA 62. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO 3.5.1 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	131
FIGURA 63. DIAGRAMA DE PROCESO 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	133
FIGURA 64. REPARTO DE AMORTIZACIÓN DE MAQUINARIA 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA)	134
FIGURA 65. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA) .....	135
FIGURA 66. REPARTO DE COSTES DEL PROCESO PRODUCTIVO 3.5.2 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	136
FIGURA 67. COMPARATIVA DE CAPACIDADES DE PRODUCCIÓN Y COSTES POR PLACA Y KILOVATIO (ELABORACIÓN PROPIA).....	140



## Índice de Tablas

TABLA 1. RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE (ELABORACIÓN PROPIA BASADO EN [12]).....	35
TABLA 2. OBJETIVOS DE DISEÑO DE PLACAS BIPOLARES [23] .....	51
TABLA 3. RESUMEN DE PROPIEDADES RELEVANTES SEGÚN MATERIAL (ELABORACIÓN PROPIA) .....	66
TABLA 4. PRINCIPALES MATERIALES ESTUDIADOS (ELABORACIÓN PROPIA APOYADO EN [50]) .....	91
TABLA 5. DÍAS LABORABLES (ELABORACIÓN PROPIA) .....	110
TABLA 6. DÍAS Y HORAS REQUERIDAS (ELABORACIÓN PROPIA) .....	110
TABLA 7. COSTES DE INVERSIÓN INICIAL Y ANUALIDAD (ELABORACIÓN PROPIA) .....	112
TABLA 8. COSTES MATERIA PRIMA (ELABORACIÓN PROPIA).....	114
TABLA 9. COSTES DE MANO DE OBRA (ELABORACIÓN PROPIA) .....	116
TABLA 10. COSTES DE SERVICIOS GENERALES (ELABORACIÓN PROPIA) .....	117
TABLA 11. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS MONOPOLARES (ELABORACIÓN PROPIA) .....	120
TABLA 12. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS BIPOLARES (ELABORACIÓN PROPIA) .....	120
TABLA 13. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA) .....	122
TABLA 14. PUNTO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA .....	123
TABLA 15. CARACTERÍSTICAS BRUTAS DEL STACK .....	123
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS NETAS DEL STACK .....	123
TABLA 17. RESUMEN DE RESULTADOS (ELABORACIÓN PROPIA) .....	124
TABLA 18. FLUJOS DE CAJA ANUALES (ELABORACIÓN PROPIA).....	125
TABLA 19. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA)...	126
TABLA 20. RESUMEN DE RESULTADOS A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	126
TABLA 21. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS MONOPOLARES 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	127
TABLA 22. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS BIPOLARES 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	128
TABLA 23. COSTES DE INVERSIÓN INICIAL Y ANUALIDAD 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA) ...	128
TABLA 24. COSTES MATERIA PRIMA 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	129
TABLA 25. COSTES DE MANO DE OBRA 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	129
TABLA 26. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	130
TABLA 27. RESUMEN DE RESULTADOS 3.5.1 (ELABORACIÓN PROPIA).....	130
TABLA 28. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN 3.5.1 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA) .....	131
TABLA 29. RESUMEN DE RESULTADOS 3.5.1 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	131
TABLA 30. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS MONOPOLARES 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	132
TABLA 31. TIEMPOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PLACAS BIPOLARES 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	132



TABLA 32. COSTES DE INVERSIÓN INICIAL Y ANUALIDAD 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA) ...	133
TABLA 33. COSTES MATERIA PRIMA 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	134
TABLA 34. COSTES DE MANO DE OBRA 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	134
TABLA 35. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	134
TABLA 36. RESUMEN DE RESULTADOS 3.5.2 (ELABORACIÓN PROPIA).....	135
TABLA 37. COSTES IMPUTADOS A LA PRODUCCIÓN 3.5.2 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA) .....	135
TABLA 38. RESUMEN DE RESULTADOS 3.5.2 A 3 TURNOS (ELABORACIÓN PROPIA).....	136
TABLA 39. COMPARATIVA DE TC Y COSTES DE PRODUCCIÓN (ELABORACIÓN PROPIA) .....	138
TABLA 40. COMPARATIVA DE CAPACIDADES DE PRODUCCIÓN Y COSTES POR PLACA Y KILOVATIO (ELABORACIÓN PROPIA).....	139
TABLA 41. COMPARATIVA PVP, BENEFICIO OBTENIDO Y PERIODO DE RETORNO SIMPLE (ELABORACIÓN PROPIA).....	140
TABLA 42. PVP MÍNIMO (ELABORACIÓN PROPIA) .....	141
TABLA 43. COMPARATIVA DE VAN Y TIR (ELABORACIÓN PROPIA) .....	141
TABLA 44. RESUMEN DE RESULTADOS BAJO PRECIO FIJO (ELABORACIÓN PROPIA) .....	141



## Índice de Ecuaciones

ECUACIÓN 1. POTENCIAL DEL CÁTODO .....	37
ECUACIÓN 2. RENDIMIENTO OPERACIONAL DE LAS MÁQUINAS.....	110
ECUACIÓN 3. CUOTA ANUAL DE AMORTIZACIÓN .....	112
ECUACIÓN 4. BENEFICIO BRUTO .....	124
ECUACIÓN 5. BENEFICIO NETO.....	124
ECUACIÓN 6. FLUJO DE CAJA.....	124
ECUACIÓN 7. PERIODO DE RETORNO.....	124
ECUACIÓN 8. INTERÉS REAL .....	124
ECUACIÓN 9. VALOR ACTUAL NETO .....	125
ECUACIÓN 10. TASA INTERNA DE RETORNO .....	125



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Índice de Abreviaturas, Siglas y Símbolos

\$, dólar

€, euro

$\mu$ A, microamperios

$\Omega$ , ohmio

°C, grado centígrado

$\phi$ , umbral de percolación

A, amperio

a-C, carbono amorfo

AFC, pila de combustible alcalina

Ag, plata

AIP, recubrimiento iónico por arco

Al, aluminio

Au, oro

BCC, cubica centrada en el cuerpo

C, carbono

CB, carbono negro

CCM, membrana recubierta de catalizador

CCS, sustrato recubierto de catalizador

CF, fibras de carbono

CL, capa catalizadora

cm, centímetros

$cm^2$ , centímetro cuadrado

$cm^3$ , centímetros cúbicos

CNT, nanotubos de carbono

CO, monóxido de carbono



$CO_2^{-3}$ , anión carbonato

Cr, cromo

CrCx, carburos de cromo

CrN, nitruro de cromo

Cu, cobre

CVD, deposición química de vapor

DMFC, pila de combustible de metanol directo

DOE, Departamento de Energía de Estados Unidos

$e^-$ , electrón

EG, grafito expandido

g, gramo

GDL, capa de difusión de gases

$H^+$ , protón hidrogeno

$H_2O$ , agua

HOR, reacción de oxidación del hidrogeno

I, intensidad

ICR, resistencia de contacto interfacial

kg, kilogramo

kJ, kilojulio

KOH, hidróxido de potasio

kW, kilovatio

L, litro

$LaMnO_3$ , manganita de lantano

lb, libra

m, metro

MCFC, pila de combustible de carbonato fundido



MEA, conjunto de electrodos de membrana

min, minuto

mm, milímetro

$mm^3$ , milímetro cubico

MMPP, materia prima

ml, mililitro

MO, mano de obra

MOD, mano de obra directa

MOI, mano de obra indirecta

MPa, mega Pascal

MPL, capa micro porosa

MS, pulverización catódica por magnetrón

mW, mili vatio

MW, megavatio

NbC, carburo de niobio

NbN, nitruro de niobio

Ni, níquel

NiO, oxido de níquel

O&M, operación y mantenimiento

$O^{-2}$ -, anión oxido

OEE, rendimiento operacional de las máquinas

$OH^{-}$ , anión hidróxido

ORR, reacción de reducción del oxígeno

Pa, pascal

PAFC, pila de combustible de ácido fosfórico

PANI, polianilina



PE, polietileno

PEMFC, pila de combustible de membrana de intercambio protónico

PET, tereftalato de polietileno

PFSA, ácido perfluorosulfónico o Nafión

PP, polipropileno

PPS, sulfuro de polifenileno

PPy, polipirrol

Pt, platino

PTFE, politetrafluoroetileno o teflón

PVD, deposición física de vapor

PVDF, fluoruro de polivinilideno

PVP, precio de venta al público

R, resistencia

Ru, rutenio

s, segundo

S, siemens

SCRAP, residuos derivados directamente del proceso industrial

-SO<sub>3</sub>, grupo anhídrido sulfúrico

-SO<sub>3</sub>H, grupo de ácido sulfónico

SOFC, pila de combustible de óxido sólido

Sr, estroncio

SS300, aceros inoxidable austeníticos

SS400, aceros inoxidable ferríticos

SSXXXL, acero inoxidable con menor contenido en carbono

std, estándar

TaN, nitruro de tántalo



TC, tiempo de ciclo

Ti, titanio

$TiCl_4$ , cloruro de titanio

TiCx, carburos de titanio

TiN, nitruro de titanio

TiNbN, nitruro de titanio y niobio

TIR, tasa interna de retorno

uds, unidades

V, voltio

VAN, valor actual neto

W, vatio

ZrN, nitruro de circonio



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Introducción

La dependencia constante y prácticamente plena del consumo de combustibles fósiles debido a la demanda energética actual supone el aumento de emisiones de gases potenciadores del calentamiento global. La concienciación de la población sobre nuevas posibilidades basadas en un vector energético como el hidrógeno supone un aspecto clave para el avance hacia un futuro mejor.

En la actualidad existe un amplio abanico de posibilidades para la sustitución de las fuentes de energía no renovables a partir de las pilas de combustible, dispositivo electroquímico capaz de transformar de forma directa la energía química en energía eléctrica. Una de las posibilidades mejor posicionada es la pila de combustible de membrana de intercambio protónico.

Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico son una potente fuente de energía que da soporte a la transición hacia una obtención de energía limpia y eficiente. Su funcionamiento se ve condicionado por los distintos elementos que las componen, además de por los fenómenos electroquímicos y termodinámicos que se producen en su interior.

La búsqueda de la optimización de su funcionamiento y de la reducción de costes asociados tanto a los materiales como a los procesos de producción de los componentes conduce el estudio hacia las placas bipolares, elemento el cual supone en torno al 80% del peso total de la pila y cerca del 50 y 30% del total del volumen y los costes, respectivamente.

Las placas bipolares deben cumplir con unas especificaciones eléctricas, térmicas, químicas y mecánicas muy concretas. Asimismo, los costes asociados a su proceso de producción deben ser los menores posibles. Dichos requisitos conllevan un análisis de la amplia variedad de opciones de producción existentes.



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Objetivos

### Objetivo Principal

Realizar un estudio que recoja la amplia gama de posibilidades de diseño de placas bipolares a partir del estudio tecno-económico de materiales y procesos de producción.

### Objetivos Específicos

- Comprender que es una pila de combustible de membrana de intercambio protónico y su funcionamiento.
- Analizar las geometrías de flujo y comprender que implica el uso de cada una.
- Analizar los principales materiales de fabricación de placas bipolares y comprender que implicaciones tienen sobre el comportamiento de la pila de combustible de membrana de intercambio protónico.
- Analizar los procesos de fabricación de placas bipolares según los materiales utilizados y determinar las mejores alternativas.
- Análisis económico de la optimización de un tipo de proceso productivo de placas bipolares metálicas.



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Estado del Arte

Desde el siglo XIX se han desarrollado numerosas investigaciones en relación a la pila de combustible, estas se ven recogidas en el artículo publicado en 2002 por Perry y Fuller [1]. En el año 1839 el científico británico William Grove ideó una de las primeras pilas de combustible, Grove consiguió generar energía eléctrica por medio de reacciones químicas. No sería hasta la mitad del siglo XX cuando realmente se comenzó a desarrollar de forma más exhaustiva esta tecnología que ha ido mejorando década a década hasta nuestros tiempos.

En 1933, Baur and Tobler, tras una exhaustiva revisión de los avances conseguidos, concluyeron que las pilas de combustible más prometedoras serían las de temperaturas ordinarias con electrolito alcalino e hidrogeno como combustible.

Durante la primera década de la Guerra Fría (1950), las investigaciones se intensificaron en Estados Unidos y la Unión Soviética, enfocadas a aplicaciones militares y la carrera espacial, como los programas Gemini y Apollo. El apoyo de las pilas de combustible servía para la generación de energía eléctrica y agua potable.

En las siguientes décadas, 60, 70 y 80, se consiguieron avances realmente significativos, con descubrimientos en distintos nuevos tipos de pilas de combustible, la utilización de la pila de combustible alcalina en operaciones marítimas (submarinos) o avances en la pila de combustible de ácido fosfórico. Se realizaron estudios intensificados en la búsqueda de materiales para las membranas y catalizadores de la tecnología de pilas de combustible de membrana de intercambio protónico y la explotación de materiales cerámicos aplicados a pilas de combustible de alta temperatura, como la de óxido sólido, consiguiendo tecnología de alta eficiencia.

Durante la década de 1990, se continuó con las investigaciones sobre nuevos materiales para los distintos componentes de las pilas, de cara a mejorar la eficiencia, la vida útil y reducir los altos costes que suponían este tipo de tecnologías.

Uno de los primeros artículos de los cuales hoy en día se siguen planteando cuestiones similares es "*Let's Not Over-Sell the Fuel Cell*" por V.Gardner en 1966. Donde se cuestionaba si sería posible alcanzar grandes potencias a partir del poco voltaje que proporciona una sola celda. De forma temprana, Pollegri and Spaziante (1980) [2] publicaron un diseño de flujo rectilíneo que posteriormente sería ejemplificado por General Electric.

Puede verse el aumento de popularidad en la siguiente figura 1.

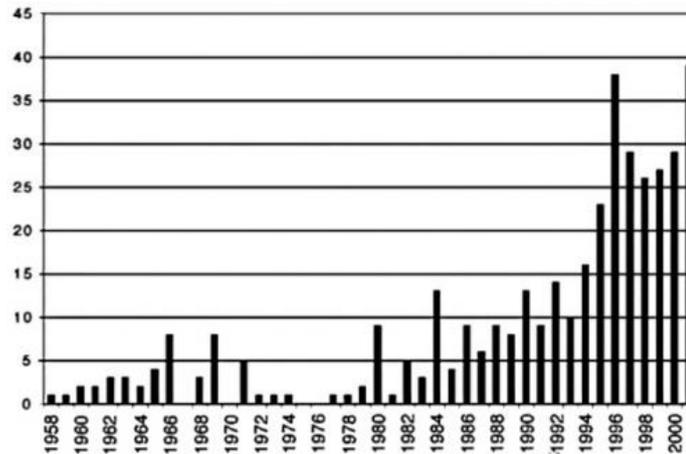


Figura 1. Número de miles *Papers* publicados sobre Pilas de combustible anualmente [1]

Durante estos últimos años, en el siglo XXI, el interés por este tipo generación de energía ha aumentado aún más. Científicos de todo el mundo han realizado numerosas investigaciones en torno a las pilas de combustible. A través de programas capaces de simular el comportamiento de los fluidos mediante dinámica de fluidos computacional, se han conseguido grandes avances sobre el comportamiento de los reactivos en el interior del sistema.

Artículos con nuevas variantes, como el de Wu y Shaw (2004) [3] sobre la propuesta de realizar placas bipolares mediante carbono o nanotubos de carbono en matrices de polietileno tereftalato (PET) o fluoruro de polivinilideno (PVDF) con el uso de moldeo por inyección.

En otra línea de investigación, esta vez relacionada con el estudio de uno de los principales problemas como es la corrosión, existen numerosos investigadores que han realizado artículos testeando diversos materiales bajo diversas condiciones, algunos ejemplos son, Inversen (2006) [4], que investigó el comportamiento frente a la corrosión de materiales austeníticos y aceros inoxidable con alto contenido en molibdeno o el estudio realizado por Joseph et al (2005) [5] que comparó el comportamiento electroquímico de los polímeros conductores polipirrol (PPy) y polianilina (PANI) actuando como recubrimiento de acero inoxidable 304 con el objetivo de desplazar el potencial de corrosión.

En relación con la simulación, como ejemplo reciente del estudio de flujos podría nombrarse el de Küpeli et al. (2021) con “Response of a proton Exchange membrane fuel cell to step changes in mass flow rates” [6].

En la actualidad, se siguen realizando investigaciones con el objetivo de mejorar la eficiencia de los componentes y la reducción de costes. Intentando amoldar de la mejor forma y lo más rápido posible esta tecnología a nuestra vida cotidiana.

## Capítulo 1: Pila de combustible

### 1.1. Descripción

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos cuyo principal cometido es obtener energía eléctrica. Consiguen transformar la energía química que contiene un combustible en dicha energía mediante una serie de reacciones de oxidación y reducción. Todo este proceso se realiza sin apenas contaminación, lo que implica la obtención de energía limpia y eficiente. La eficiencia del proceso radica en su capacidad para aprovechar al máximo la energía química del combustible.

El funcionamiento de las pilas de combustible se basa en el proceso contrario al de electrólisis, proceso por el cual los elementos que forman un compuesto se consiguen separa al aplicarse una corriente eléctrica.

En una pila de combustible se produce un proceso de electrolisis inversa, en ella los reactivos viajan a través de la pila (dependiendo de la pila, de ánodo a cátodo o viceversa) reaccionando y generando electricidad mediante un circuito externo. Puede suministrarse cualquier mezcla en estado gaseoso que contenga hidrógeno, aunque las exigencias de las pilas de combustible suelen solicitar una alta pureza de este suministro [7].

El tipo de pila atiende al tipo de electrolito usado pero sus componentes principales son los mismos, estas se componen de ánodo, cátodo, electrolito, colector de corriente, placas bipolares o de flujo y una carcasa. Esta composición se trata de una celda individual, pero su uso habitual es en *stack*, es decir, celdas individuales colocadas en serie para conseguir una mayor tensión eléctrica de salida.

Se puede observar el apilamiento o *stack* de la pila en la siguiente figura 2 y en más detalle en la figura 3.

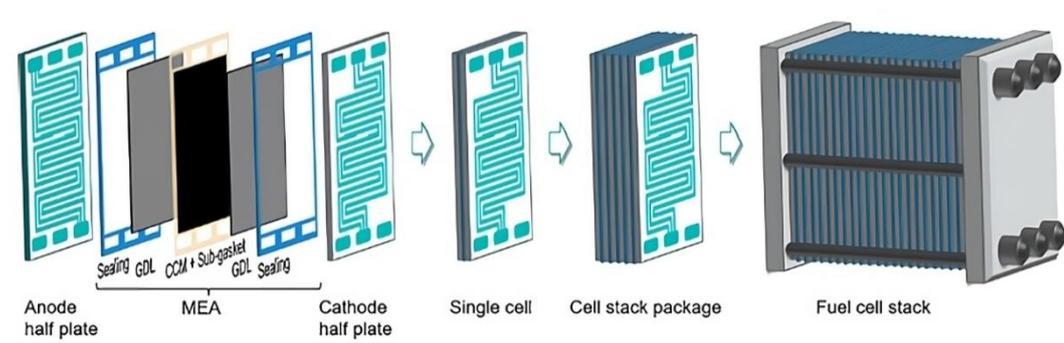


Figura 2. Componentes del *stack* y *stack* completo de tipo PEMFC [8]

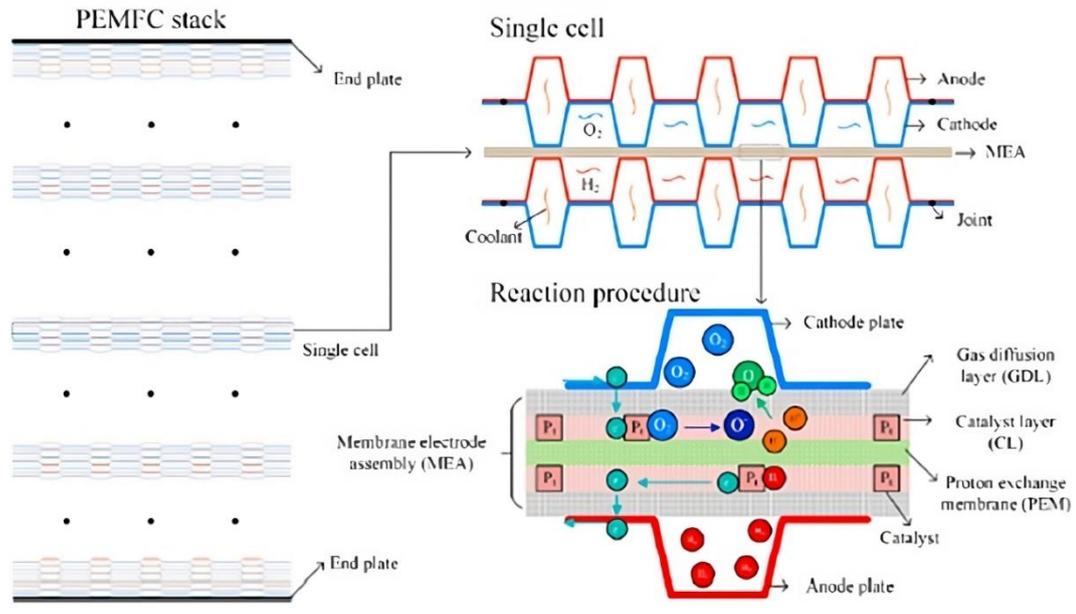


Figura 3. Detalle de *stack*, celda y principio de funcionamiento de tipo PEMFC [9]

Se puede observar la vista en planta de un *stack* a la izquierda de la figura. Una sola celda donde se aprecian las distintas zonas y conductos de la misma, arriba a la derecha de la figura. Y por último, abajo a la derecha de la figura, se muestra un resumen del movimiento de los compuestos químicos producidos durante el funcionamiento.

## 1.2. Tipos de pilas de combustible

A continuación se va a realizar una descripción de los distintos tipos de pilas de combustible según sus principales características de funcionamiento.

### ▪ Pila de combustible alcalina (AFC)

Este tipo de pila consume hidrógeno y oxígeno, siendo sus productos agua, calor y electricidad. Utiliza un electrolito alcalino en solución acuosa, el hidróxido de potasio (KOH) y su rendimiento es de los más elevados, entre el 60 y 70% llegando hasta los 200 kW de potencia.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 4.

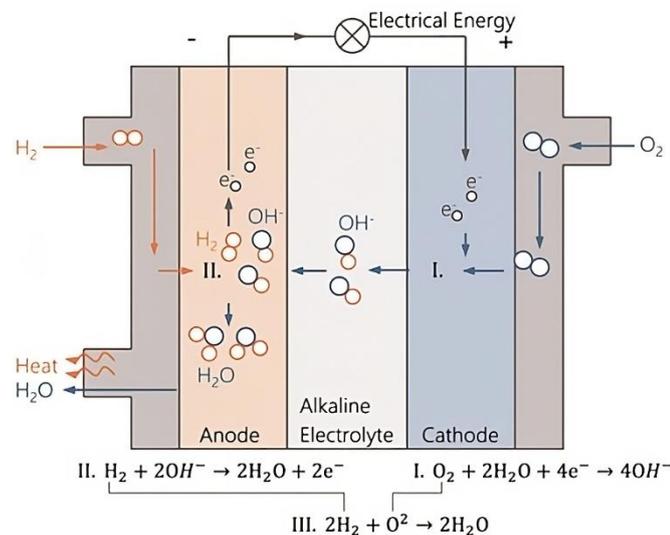
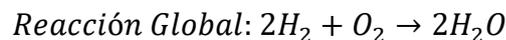
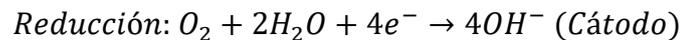
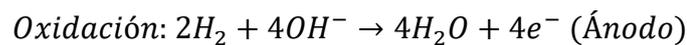


Figura 4. Principio de operación monocelda tipo AFC [10]



Los portadores de carga son iones hidróxido que viajan del cátodo al ánodo, su temperatura de operación se encuentra entre 23-70 °C y su pH supone un medio básico (pH>7).

Algunas de las ventajas de este tipo de pila son la rapidez cinética de sus reacciones, haciendo que se genere una mayor cantidad de producto por unidad de tiempo y su alta eficiencia. Además, frente a otras tecnologías, no sufre de problemas de corrosión y tienen un bajo peso y volumen.

En contraposición, es altamente intolerante al dióxido de carbono por lo que requiere una alta pureza de oxígeno, lo que implica también un alto coste. Su vida útil no es muy larga [11].

Sus principales aplicaciones se encuentran en el ámbito aeroespacial, marítimo y aéreo.

▪ **Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)**

Este tipo de pila usa como membrana un compuesto polimérico, el más conocido y usado es el fluoropolimero, también conocido como PFSA o Nafión. Esta membrana para poder transportar los protones a través de ella, debe estar humidificada.

También consume hidrógeno y oxígeno y la eficiencia eléctrica de la pila está entre 50-70% con un rango de potencia de 1 W a 500 kW.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 5.

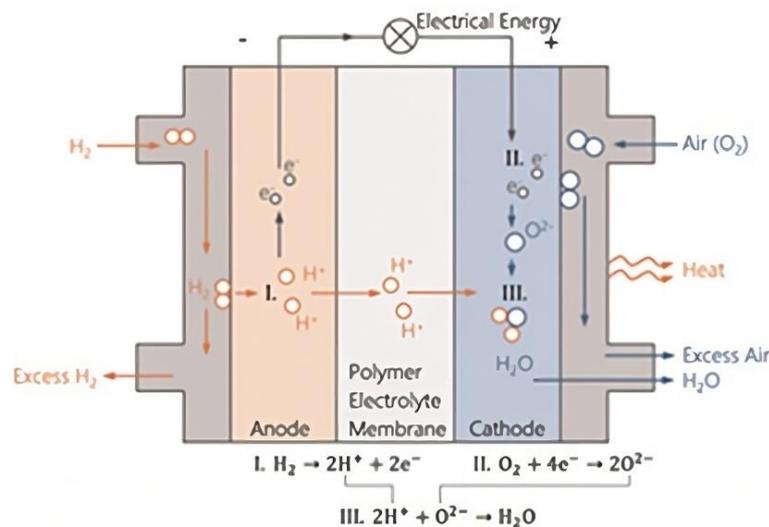
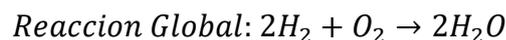
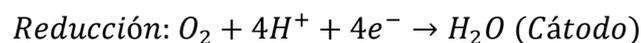
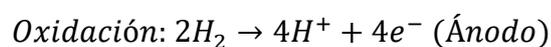


Figura 5. Principio de operación monocelda tipo PEMFC [10]



Los portadores de carga son protones de hidrógeno, su temperatura de operación debe ser menor de 100 °C, suele ser en torno a 80 °C y un pH entre 2 y 3 (ácido, pH<7).

De la misma forma que son capaces de trabajar a altas densidades de corriente y tener una rápida respuesta a distintas demandas de potencia,

sufren grandes problemas de corrosión y necesitan altos niveles de pureza en el suministro de hidrógeno [11].

▪ **Pila de combustible de metanol directo (DMFC)**

En este caso el metanol es el combustible principal, su principal atractivo es su larga vida útil y la nula necesidad de un reformador de combustible. De la misma forma que las tipo PEMFC, su membrana es polimérica pero su funcionamiento se basa en la extracción de hidrógeno del metanol líquido.

Se alcanzan eficiencias únicamente alrededor del 25%, alcanzando bajas potencias en un rango de 100 mW y 1 kW.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 6.

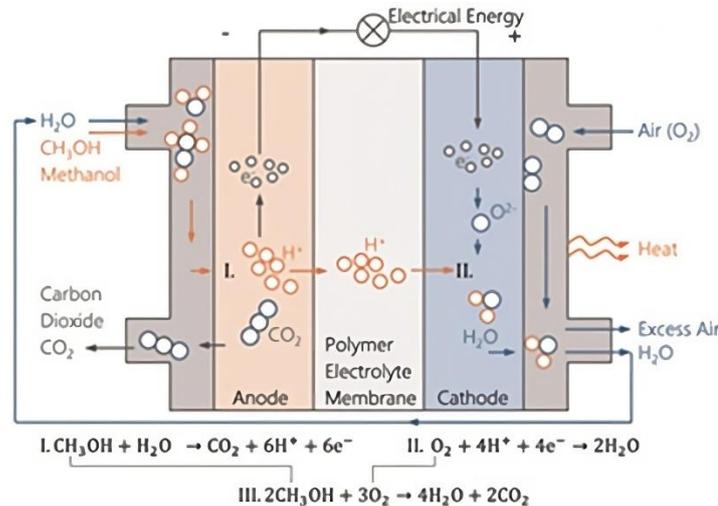
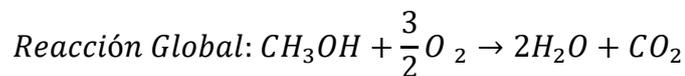
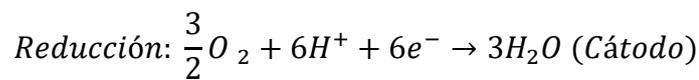
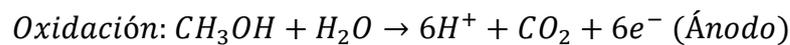


Figura 6. Principio de operación monocelda tipo DMFC [10]



Los portadores de carga son protones de hidrógeno y tienen una baja temperatura de operación, a partir de 60 °C.

Sus principales ventajas además de su larga vida útil, son la alta densidad de potencia y la tolerancia frente a envenenamientos de monóxido de carbono.

Por otro lado, pueden ser tóxicas debido al metanol, son caras y tienen una baja eficiencia [11].

Algunas de las aplicaciones donde se ven involucradas son en el sector del automóvil y los pequeños dispositivos portátiles.

▪ **Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)**

El electrolito usado en este tipo de pila está compuesto de ácido fosfórico, mientras que los electrodos son de papel de carbono. Este tipo de pila fue el primer tipo de pila comercializado. Su funcionamiento es similar al de una pila PEMFC, ya que los protones de hidrógeno pasan al lado del cátodo formando agua y a su vez electricidad mediante el circuito externo por el que circulan los electrones.

La eficiencia se establece entre un 40-55%, siendo su rango de potencia entre 50 kW y 1 MW.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 7.

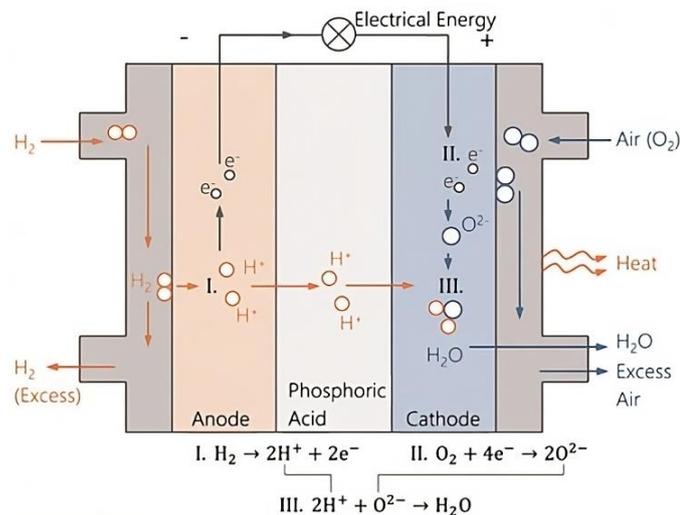
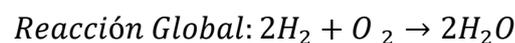
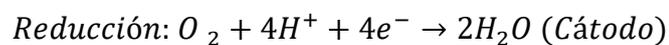
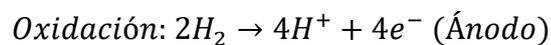


Figura 7. Principio de operación monocelda tipo PAFC [10]



Una vez más, los portadores de carga son protones de hidrógeno. Su temperatura de operación es considerablemente mayor a las mencionadas anteriormente, 180 °C.

Esto se debe al aumento necesario de temperatura en el ánodo para evitar que se produzcan envenenamientos por monóxido de carbono, cuyo límite de tolerancia es del 2%.

Cuenta con ventajas en la pureza del suministro, no necesitando que el oxígeno sea totalmente puro, ya que tiene una tolerancia de más de un 30% de dióxido de carbono por lo que no afecta al funcionamiento del electrolito y por ende tampoco al de la celda.

Sin embargo, a temperaturas intermedias, el electrolito es propenso a corroerse y provocar problemas de funcionamiento. Por tanto deben alcanzar una temperatura de operación concreta antes de comenzar a utilizarse. Otra desventaja es su mayor peso y volumen de la pila, viéndose limitada su aplicación a vehículos de gran tamaño o generación distribuida estacionaria [11].

▪ **Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)**

Este tipo de pila forma parte de las denominadas pilas de combustible de alta temperatura. Utiliza como electrolito una mezcla de sales de carbonatos alcalinos fundidas en una matriz cerámica porosa y químicamente inerte de alumina.

En el ánodo se produce la reacción del ion carbonato que ha atravesado el electrolito con el hidrógeno, produciendo agua, calor y dióxido de carbono, que se ve recirculado hacia el cátodo para la reacción de reducción.

Su rango de potencia es amplio, pudiendo alcanzar hasta 1 MW partiendo de potencias menores al kilovatio. Su eficiencia es cercana al 55%.

Sus aplicaciones son la generación distribuida y el almacenamiento de energía eléctrica.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 8.

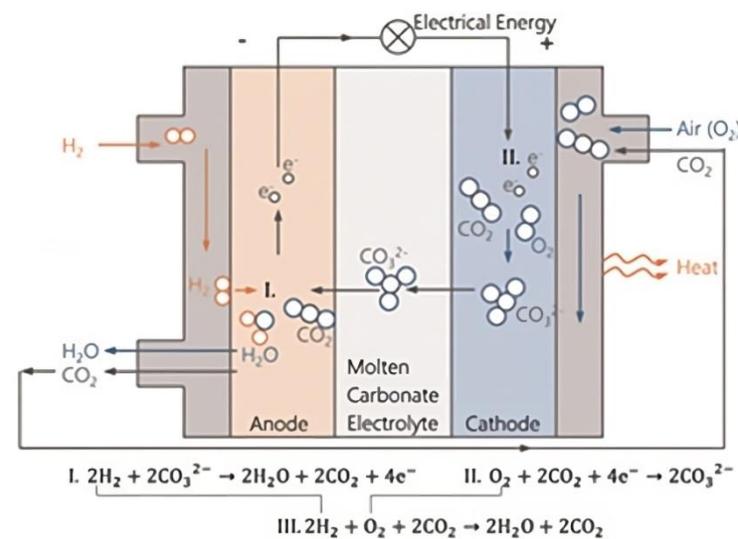
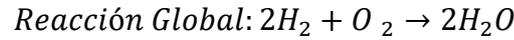
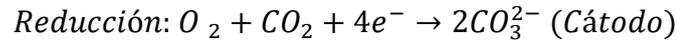
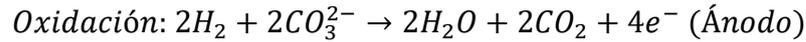


Figura 8. Principio de operación monocelda tipo MCFC [10]



El portador de carga es el ion carbonato, su temperatura de operación está entre 550-700 °C.

Una ventaja característica de este tipo de pila es que es capaz como hemos indicado, de recuperar combustible mediante reformado interno. A su vez, las reacciones son rápidas y no generan mucho calor. Además, los costes se pueden ver reducidos ya que no es necesaria la utilización de metales nobles en catalizadores para la oxidación y reducción electroquímica.

Una de sus principales desventajas es su propio funcionamiento a altas temperaturas, necesitando un precalentamiento, su baja densidad de potencia y los problemas de corrosión asociados a su funcionamiento [11].

▪ **Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)**

Al igual que las pilas MCFC, es una pila de alta temperatura, pero en este caso el electrolito se trata de un cerámico sólido de óxido metálico que conduce los iones óxidos del cátodo al ánodo. Los metales usados en los electrodos suelen ser de níquel y cobalto.

Tiene una elevada eficiencia, comprendida entre el 60 y el 65%, alcanzando rangos de 5 kW a 3 MW de potencia.

Las reacciones producidas en su interior y el principio de operación se puede observar en la figura 9.

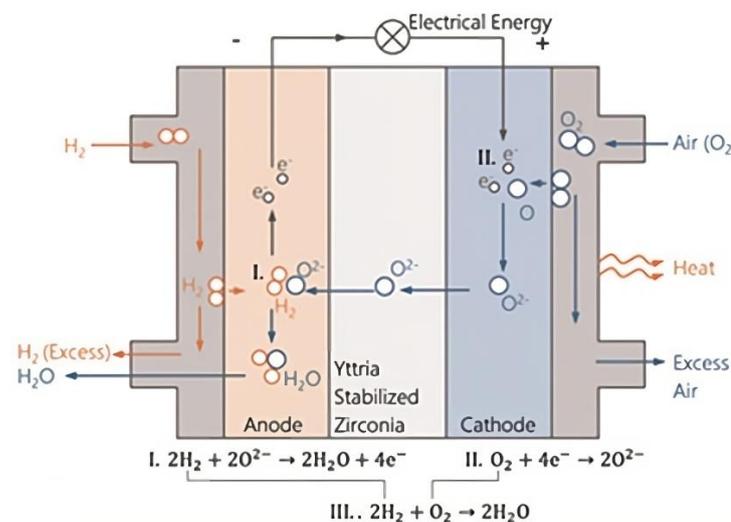
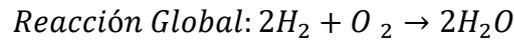
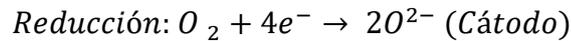
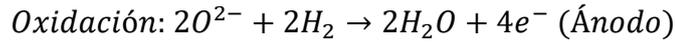


Figura 9. Principio de operación monocelda tipo SOFC [10]



El portador de carga en este último caso es el ion óxido, su temperatura alcanza los 1000 °C, siendo la temperatura mínima para operar de 700 °C.

Este tipo de pila tiene numerosas ventajas, las reacciones químicas producidas en su interior tienen una cinética rápida, el coste no es elevado y además permite el reformado interno de combustible ya que el portador de carga es capaz de oxidar cualquier otro combustible gas. Tampoco necesita catalizadores de metales nobles.

La alta temperatura de operación necesita tenerse en cuenta, la densidad de potencia no es muy alta y sufre problemas de corrosión y disolución del cátodo [11].

Su uso se extiende a los sectores del automóvil y la aviación junto al almacenamiento de energía eléctrica.

▪ **Resumen de características**

Las tecnologías de hidrógeno tipo PEMFC, AFC y SOFC son las mejor posicionadas en cuanto a eficiencia, superando prácticamente en un 20% a otros tipos de pila y también al mundialmente implantado motor de combustión interna alternativo [7], como puede observarse en la figura 10.

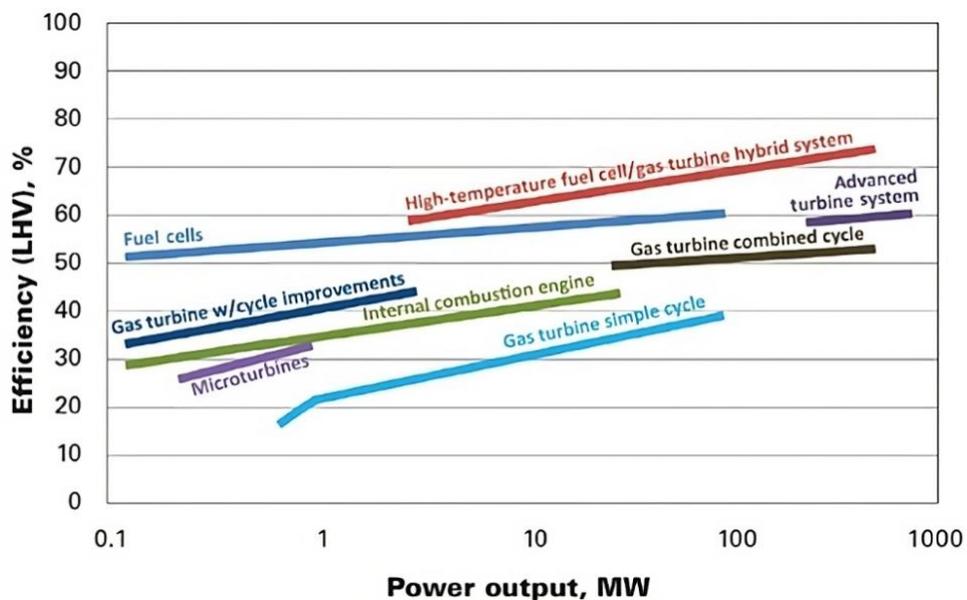


Figura 10. Comparativa de tecnologías Eficiencia-Potencia [7]

La eficiencia es un factor determinante pero no es el único, problemas como la corrosión o el uso de determinados materiales, la pureza necesaria del suministro o el reformado para su obtención pueden suponer un gran incremento del coste de la tecnología.

Los aspectos favorecedores que comparten los distintos tipos son la mínima contaminación que supone su actividad (debida a procesos asociados al funcionamiento de la pila, ya que la propia pila no genera contaminación), la modularidad y facilidad de instalación.

Además, requieren menos mantenimiento (por razones de corrosión o envenenamiento) y son dispositivos muy silenciosos.

En la figura 11, se puede observar una comparativa general con respecto a alguno de los aspectos mas relevantes como pueden ser:

- Facil integración (I)
- Eficiencia y Rendimiento (P)
- Peso (W)
- Seguridad (S)
- Fiabilidad y Coste del Ciclo de Vida(R)
- Coste de Desarrollo y Fabricación (D)

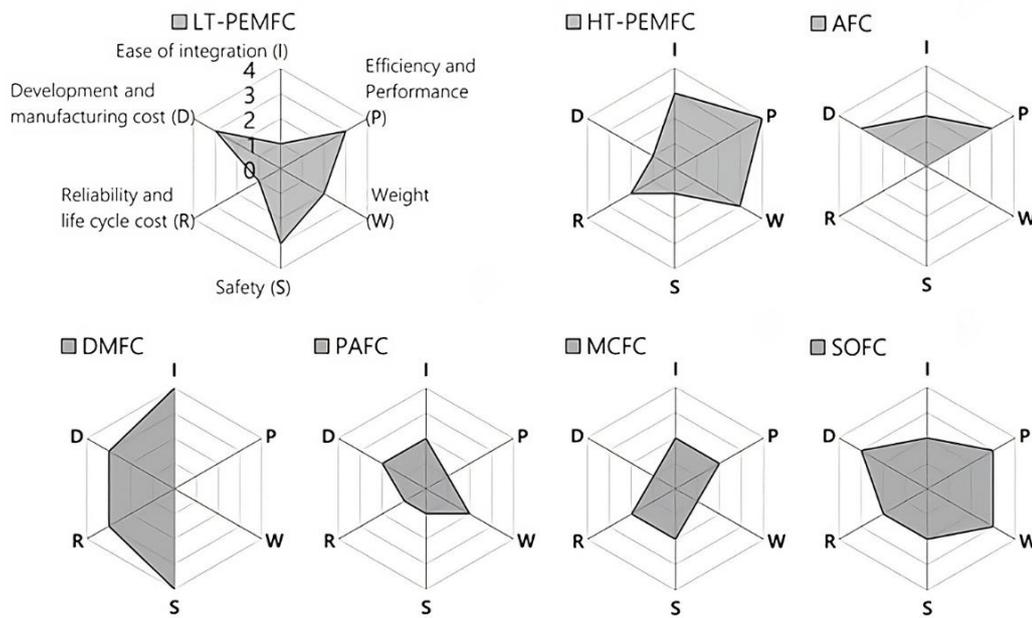


Figura 11. Comparativa de características determinantes de pilas de combustible [10]



Se pueden observar todas las características resumidas en la tabla 1.

Tipo de pila	AFC	PEMFC	DMFC
Electrolito	KOH	Nafión	Membrana de intercambio protónico
Temperatura (°C)	23-70	80	60
Portador de carga	$OH^-$	$H^+$	$H^+$
Ánodo (Catalizador)	Ni Raney	Pt/C	Pt-Ru/C
Cátodo (Catalizador)	Ag	Pt/C	Pt/C Mo <sub>2</sub> Ru <sub>5</sub> S <sub>5</sub>
Monóxido de carbono	Veneno		
Metano	Diluyente		
Densidad de potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	620	420	-
Potencia (kW)	200	500	0,0001-1
Eficiencia (%)	60-70	50-70	25
Aplicaciones	Aeroespacial, automoción y almacenamiento de energía		

Tipo de pila	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> / Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Temperatura (°C)	180	550-700	700-1000
Portador de carga	$H^+$	$CO_3^{2-}$	$O^{2-}$
Ánodo (Catalizador)	Pt/C	Ni	Ni-ZrO <sub>2</sub>
Cátodo (Catalizador)	Pt/C	NiO	LaMnO <sub>3</sub> /Sr
Monóxido de carbono	Veneno	Combustible	
Metano	Diluyente	Combustible	
Densidad de potencia (mW/cm <sup>2</sup> )	250	> 150	120
Potencia (kW)	50-1000	1000	5-3000
Eficiencia (%)	40-55	55	60-65
Aplicaciones	Generación estacionaria distribuida de potencia eléctrica y calor		

Tabla 1. Resumen de características de pilas de combustible (Elaboración propia basado en [12])

### 1.3. PEMFC

En el presente apartado se va a desarrollar en detalle el funcionamiento de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico y los principales componentes que constituyen el sistema de la pila.

#### 1.3.1. Definición y principios de funcionamiento

Las pilas de combustible tipo PEMFC han conseguido atraer a un gran número de investigadores, en mayor medida debido a sus múltiples aplicaciones, como los dispositivos portátiles, la generación de energía o el transporte.

Anteriormente se ha explicado el funcionamiento de las pilas de combustible tipo PEMFC de forma genérica, en este caso, se va a realizar una explicación más extensa que contiene conceptos importantes, que no han sido abarcados con anterioridad, del funcionamiento de la pila y los principios electroquímicos y termodinámicos.

La eficiencia termodinámica de la pila de combustible está relacionada con la cantidad de energía eléctrica que se consigue obtener a partir de la energía química que contiene el hidrógeno, esta se establece alrededor del 50% como se puede observar en la figura 12.

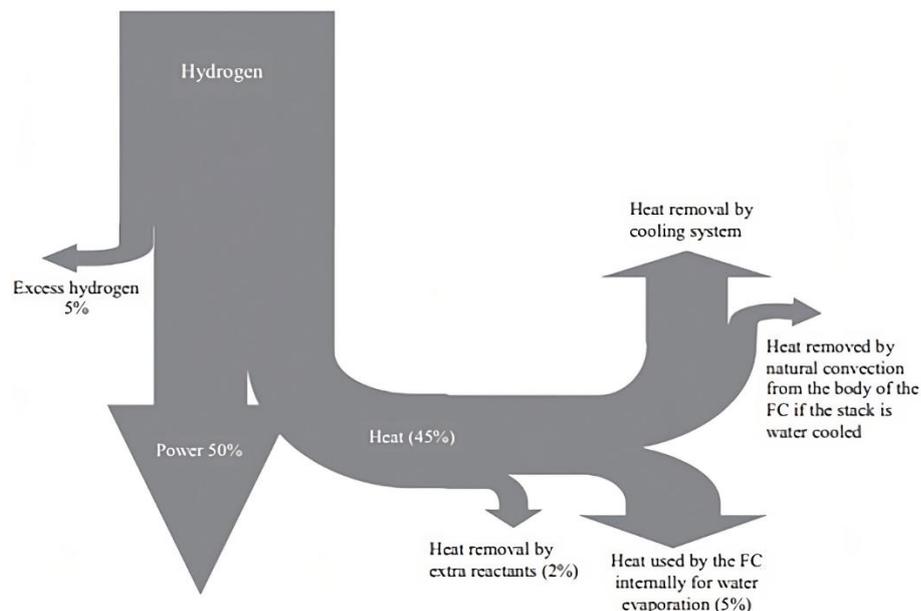


Figura 12. Diagrama de Sankey sobre la energía del hidrogeno [13]

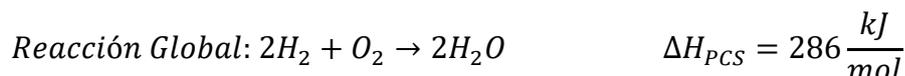
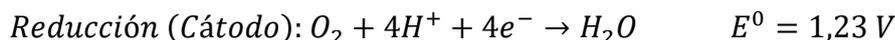
Las reacciones descritas en el apartado 1.2 se corresponden con la Reacción de Oxidación del Hidrógeno (HOR) y la Reacción de Reducción del Oxígeno (ORR).

En HOR, el hidrógeno molecular se descompone en protones de hidrógeno en el lado del ánodo que se desplazan y difunden a través del electrolito hacia el



cátodo y hacen posible el flujo de electrones (corriente eléctrica) en las celdas que componen la pila de combustible mediante un circuito externo.

Por otra parte, en la reacción de oxidación que ocurre en el cátodo, se consigue combinar los protones y electrones que han llegado del ánodo junto con el oxígeno. De forma que se produce agua, que se extrae del sistema a través de la GDL.



El calor de formación del agua es de  $-286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  a  $25^\circ\text{C}$  mientras que el de oxígeno o hidrógeno es nulo. En el caso de la pila de combustible, como indica el valor negativo de su calor de formación, se trata de una reacción exotérmica.

De los  $286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  liberados en la reacción, son aprovechados en forma eléctrica  $237 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  y se vierten al entorno el resto en forma de calor, de forma que obtenemos una eficiencia inicial del 83%.

El potencial del cátodo se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$E = \frac{\Delta G^0}{n \cdot F} = \frac{237000 \frac{\text{J}}{\text{mol } H_2}}{2 \frac{\text{mol } e^-}{\text{mol } H_2} \cdot 96500 \frac{\text{C}}{\text{mol } e^-}} \approx 1,23 \text{ V}$$

Ecuación 1. Potencial del Cátodo

La eficiencia final de la pila se ve también afectada por el rendimiento del combustible, el de dispositivos auxiliares y la del voltaje.

Ambas reacciones juegan un papel fundamental en el correcto desarrollo de la pila y están asociadas a otros factores influyentes que son:

- **Pérdidas de voltaje:** asociadas a la resistencia iónica y a la resistencia de activación de los electrodos. La primera de ellas relaciona la difusión de protones de hidrógeno a través de la membrana. La segunda, se ve implicada directamente en el inicio de las reacciones. Ambas desencadenan pérdidas de voltaje.
- **Vida útil y degradación:** mientras se producen estas reacciones, pueden ocurrir adsorciones de contaminantes o formaciones de



productos que no son los deseados. El deterioro por corrosión siempre está presente y las condiciones de operación de estas reacciones lo incrementan.

- **Polarización de la celda:** ambas reacciones afectan a la curva de polarización, la cual representa el comportamiento tensión-densidad de corriente.

La termodinámica de la pila de combustible se ve gobernada tanto por el potencial de oxidación como por el de reducción. La reacción de oxidación tiene un potencial más negativo y esto provoca que su tendencia sea a generarse espontáneamente. Sin embargo, la reacción de reducción tiene un potencial más positivo, esto implica una energía adicional para que la reacción se produzca.

Las pilas de combustible requieren unas condiciones de operación específicas para mejorar su eficiencia y alargar su vida útil, estas condiciones son:

- **Temperatura:** se encuentra alrededor de 70-80 °C, esta temperatura va a afectar a la cinética y a la termodinámica de las reacciones. Una mayor temperatura de operación provocará un aumento de la cinética de las reacciones y por tanto una mayor transferencia de materia pero en un rango establecido de temperaturas.
- **Presión:** los reactivos son introducidos al sistema con una presión concreta que afecta a las reacciones, a mayor presión, más rápida será la distribución uniforme del reactivo y mayor será la difusión, pero es necesario establecer unos márgenes de nuevo para no desembocar en problemas de seguridad relacionadas con la resistencia de los dispositivos de regulación y las propiedades de los gases.
- **Humedad:** la hidratación de la membrana y el catalizador es un factor también importante ya que para mantener un nivel de conductividad y un nivel de flujo de transferencia de protones es necesario un nivel de humedad determinado. Un desfase por encima o por debajo, supone un empeoramiento del rendimiento.

### 1.3.2. Curva de polarización y pérdidas asociadas

La curva de polarización muestra en que punto de funcionamiento se encuentra con respecto a que carga se le haya aplicado.

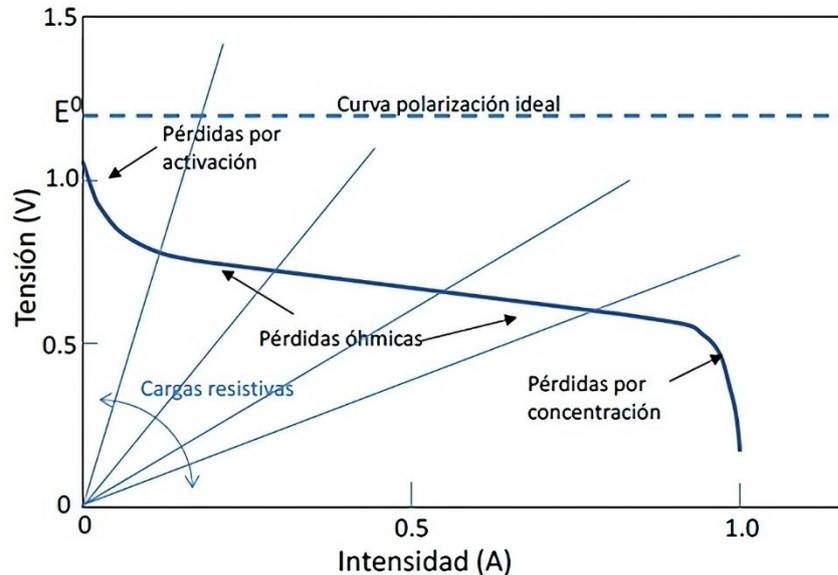


Figura 13. Curva de polarización PEMFC [14]

Aunque la figura muestre en su eje horizontal la intensidad, a veces se representa en función de la densidad de corriente ( $A/cm^2$ ) y de esta forma suprimir el efecto que tendrían las características de la superficie de la celda.

Como se puede observar en la figura 13, existen distintas pérdidas de potencial según se aumenta la intensidad, estas son:

- **Pérdidas por activación:** se corresponden al primer tramo de la curva y se producen debido a la velocidad de la reacción en la superficie de los electrodos (cinética química) siendo esta lenta.
- **Pérdidas óhmicas:** engloban al segundo tramo de curva, provocando una pérdida menos brusca de potencial y siendo proporcionales a la intensidad de corriente. Se ocasionan por la resistencia que ejercen los distintos elementos que componen la pila, por lo que le afectan los materiales, las conexiones y el flujo de iones. Se rige por la Ley de Ohm,  $V = I \cdot R$ .

De cara a reducir este tipo de pérdidas pueden tomarse medidas como el uso de electrodos con la mayor conductividad posible, el uso de materiales concretos para cada componente, en especial el material de las placas bipolares y el catalizador, ya que las propiedades del material a usar determinarán un mayor o menor rendimiento de la pila.

Y el uso de un electrolito lo más fino posible sin que afecte a su rendimiento o pueda romperse.

- **Pérdidas por concentración:** también denominadas pérdidas por difusión o de masa, se ven generadas por los cambios de concentración de los reactivos (gradientes de concentraciones) a medida que se van produciendo las reacciones en la superficie de los electrodos.

Además, pueden contabilizarse también las pérdidas producidas por el fenómeno del *crossover*. Estas pérdidas en ven reflejadas en la repentina bajada de potencial que tiene la curva a intensidad nula, haciendo que se inicie el trabajo en un potencial menor al ideal, que sería en torno al 1,23 V.

El *crossover* consiste en moléculas de hidrógeno que difunden del ánodo al cátodo, allí, gracias al catalizador consigue reaccionar directamente con el oxígeno sin producir corriente eléctrica. Además, al encontrarse en un estado energético distinto al que debería estar, es capaz de producir peróxido de hidrógeno, algo que empeora considerablemente el rendimiento de la pila. Estas pérdidas son mayores en circuito abierto.

Habitualmente la curva de polarización se presenta junto a la curva de potencia, de forma que se puede distinguir de forma clara donde está el punto óptimo de trabajo de la pila para que proporcione la mayor potencia y también ver en qué grado de eficiencia está trabajando, dicho comportamiento de puede ver en la figura 14.

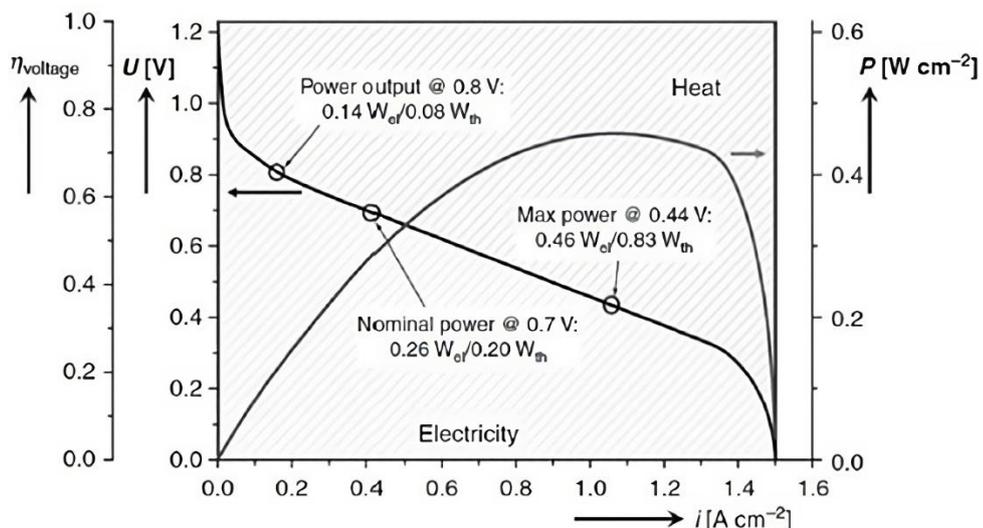


Figura 14. Punto de funcionamiento PEMFC, curva de polarización y de potencia [15]



### 1.3.3. Componentes

En el funcionamiento de la pila de combustible son muchos los componentes necesarios para asegurar su correcto desempeño. Podemos dividirlos en dos grupos, los elementos de balance de planta (compresores, humidificadores, eyectores, bombas, etc) y los propios del *stack* de la pila de combustible. Se va a detallar los componentes de este último grupo [16].

#### 1.3.3.1. Membrana

La membrana (electrolito) es el elemento encargado de actuar de separador entre la zona de ánodo y la zona de cátodo, transportar o permear únicamente los protones del ánodo hacia el cátodo y ser aislante eléctrico para no dejar fluir los electrones a través de él, haciendo que su única vía sea viajar por el circuito externo.

Desde su creación, el Nafión, ha sido el polímero con las mejores prestaciones en cuanto a estabilidad química y térmica, pertenece a la familia de los termoplásticos (resina). Este Ácido Perfluorosulfónico (PFSA) es un copolímero compuesto por Politetrafluoroetileno (PTFE) como cadena principal, el cual es hidrofóbico; y un grupo de ácido sulfónico ( $-SO_3H$ ) como cadena final y perfluorado como cadena lateral.

Al disminuir el espesor de la membrana, se facilita la humectación de la misma y esto provoca una mayor conductividad protónica, favoreciendo su funcionamiento. La membrana se ubica entre los catalizadores del ánodo y del cátodo.

La movilidad de los protones que difunden a través de la membrana depende de tres mecanismos, en los dos primeros mecanismos es de gran importancia la cantidad de agua (alta humedad) para su movimiento. De esta forma, los dominios hidrofóbicos aumentan de tamaño, siendo más sencillo para los protones moverse a través de la membrana.

- **Difusión de masa:** consiste en el desplazamiento de los iones a través de las moléculas de agua que están presentes en el trayecto ánodo-cátodo.
- **Grotthuss:** los protones se desplazan 'saltando' entre los grupos hidroxilos,  $OH^-$ , gracias a los enlaces de hidrógeno que están presentes en la membrana, para ello, debe producirse una rápida reordenación de los enlaces químicos. Ese tipo de mecanismo es mucho más rápido ya que no se producen pérdidas por rozamiento durante el recorrido.

- **Superficie:** se produce cuando el nivel de humedad decrece en el interior de los canales del polímero. Bajo esta condición, los protones se desplazan en los grupos  $-SO_3$ .

La figura 15 representa los mecanismos de transporte de protones de difusión de masa, Grotthuss y superficie.

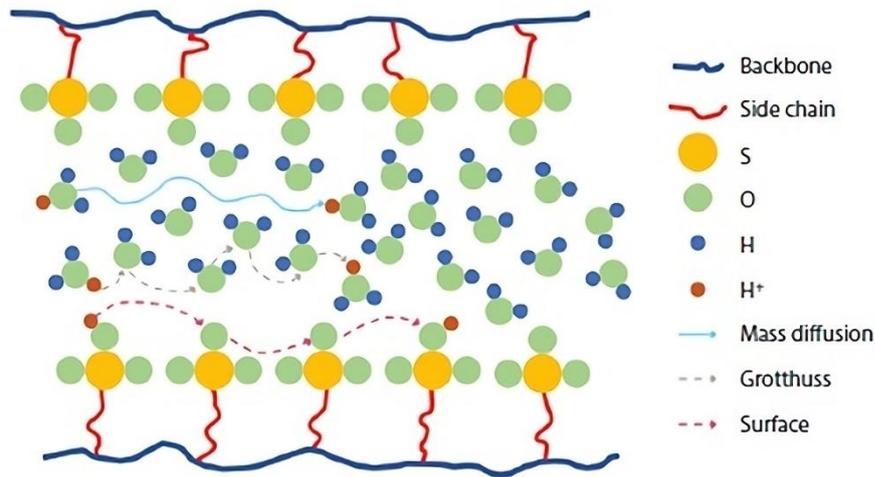


Figura 15. Tipos de mecanismo de transporte en la membrana [16]

La difusión de los protones a través de la membrana es vital para poder mantener una conductividad iónica suficientemente adecuada que permita un óptimo desempeño de la pila PEMFC. El Nafión cumple con los requisitos de dicha conducción y formación de enlaces mediante su estructura polimérica, aunque numerosos estudios en la actualidad se centran en la búsqueda de materiales con características similares que puedan sustituir o incluso mejorar el comportamiento de este.

### 1.3.3.2. Capa de Difusión de Gases

La capa de difusión de gases o GDL (*Gas Diffusion Layer*) [17] tiene como principal cometido la distribución uniforme de los gases reactivos para poder utilizar de la forma más eficaz toda la superficie activa de la capa catalizadora.

Los parámetros que deben tenerse en cuenta para que la GDL sea óptima para el funcionamiento de la pila son la difusividad, permeabilidad y la conducción térmica y eléctrica. Por otra parte, debe de tenerse en cuenta la porosidad (menor del 80%) y el espesor (entre 100 y 300 micrómetros). También debe proporcionar resistencia mecánica para la membrana y proteger el catalizador de la corrosión y la erosión.

Una GDL más gruesa, proporcionará una mayor estabilidad mecánica para la membrana o mayor resistencia a la corrosión, pero debe de tenerse en cuenta



la mayor resistencia de contacto interfacial que implicaría. Es importante también que tengan un carácter hidrofóbico ya que facilitará la evacuación del agua líquida generada.

### **1.3.3.3. Catalizador**

El catalizador o CL (*Catalyst Layer*) es la capa que está en contacto directo con el electrolito, es decir, la membrana, disminuyendo así las posibles pérdidas en el traspaso de iones. El mejor catalizador está formado por nanopartículas de platino y aleaciones de base de platino. Ofrecen muy buenas propiedades, pero es un metal caro y propenso al envenenamiento por monóxido de carbono. Estas partículas de platino se sustentan en un material denominado, de soporte, que normalmente es carbono.

Como el catalizador es la capa activa, en ella tienen lugar las reacciones químicas de la pila en cada uno de los lados de la membrana. La capa catalizadora debe ser porosa para ofrecer facilidad de flujo de reactivos y tener alta conductividad de protones y electrones.

Un mayor espesor de la capa catalítica incrementa la superficie e incrementa el rendimiento pero hay que tener en cuenta que la resistencia de contacto interfacial debe ser lo más baja posible por lo que se debe mantener un equilibrio y obtener el espesor que proporcione el mayor rendimiento.

### **1.3.3.4. Electrodo: Ánodo y Cátodo**

La unión de la capa de difusión de gases y la capa del catalizador forman los electrodos. En cada lado de la pila se producirá una reacción, en el caso del ánodo se produce la oxidación (HOR) y en el lado del cátodo se produce la reducción (ORR).

Además de los principales componentes (GDL y CL) existe una capa micro porosa (MPL) que se ubica entre medias de ambas capas. Es una fina lámina de carbono y teflón que proporciona un balance de agua en la unión del catalizador con la membrana. Mediante esta capacidad de controlar el agua, consigue evacuar el agua generada en la capa catalítica hacia el exterior.

Tiene otras funciones principales adicionales al balance hídrico, por ejemplo, la adherencia entre la GDL y CL o la protección ante fibras que proporciona a esos mismos componentes. Un mal diseño de la MPL puede suponer la inundación del catalizador.

El conjunto de los electrodos de la membrana o del inglés, *Membrane Electrode Assemblies* (MEA) es el elemento central ensamblado de la pila de combustible y que se encarga de impulsar la cinética de las reacciones electroquímicas que se necesitan para separar los electrones.

Existen distintas técnicas de preparación, una en la cual los catalizadores se aplican sobre las GDL de cada lado (ánodo y cátodo) y posteriormente esta bicapa sobre la membrana, a este método se le denomina Sustrato Recubierto de Catalizador (CCS) o por el contrario, los catalizadores se aplican directamente sobre la membrana y es la GDL la que termina realizando el conjunto de la MEA, este segundo método se llama Membrana Recubierta de Catalizador (CCM).

Ambas técnicas se finalizan mediante una compresión en caliente para asegurar el correcto funcionamiento del elemento.

En la siguiente figura 16, se puede ver ambas técnicas descritas.

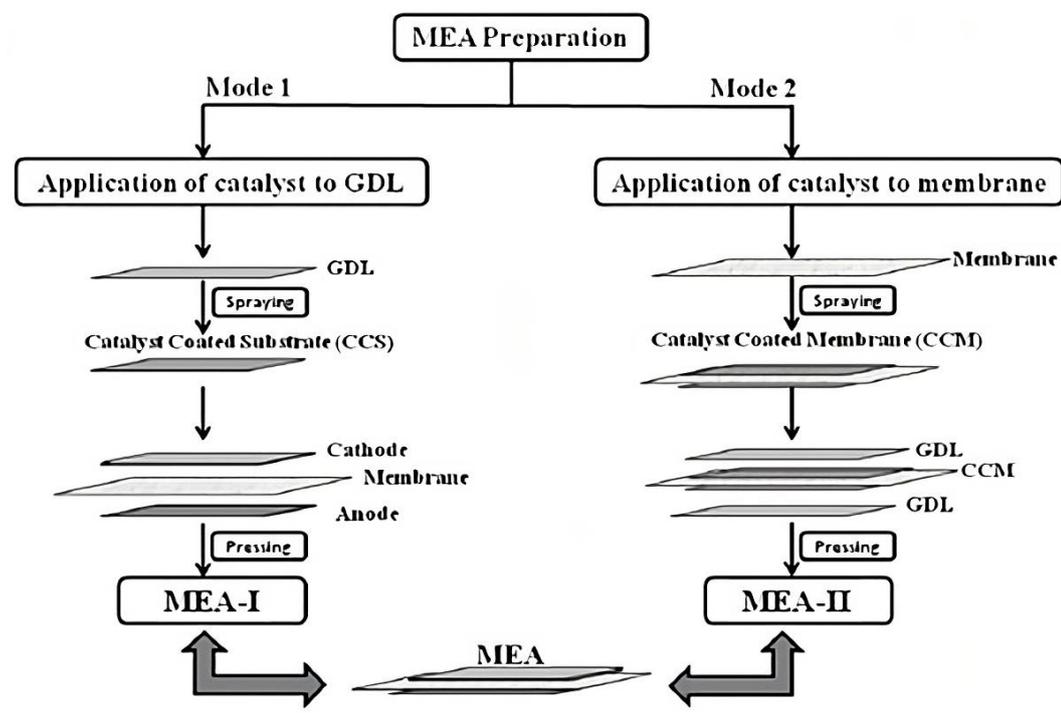


Figura 16. Tipos de preparación de MEA [17]

Esta variación en la preparación no implica cambios en el rendimiento a priori pero da una idea clara del conjunto del elemento MEA.

Aunque es cierto que en el segundo método, se evitan posibles problemas de hinchamiento y arrugamiento por el contacto directo que se produce en el primer método.

Un aspecto que si es importante y afecta al rendimiento es la aplicación de la capa catalizadora y estos métodos si dependen de donde se vayan a aplicar. Los métodos más comunes pero que únicamente se pueden hacer mediante la primera metodología son, la pulverización o la impresión por chorro de tinta.

En cambio, otros métodos pueden usarse en ambos modos, como la deposición de polvo catalizador o la electrodeposición.

El elemento MEA, se ubica entre las dos placas bipolares, formando así lo que se conocería como una celda.

En la figura 17 está representado el lado de la MEA que corresponde al cátodo, se observa como el oxígeno penetra la GDL encontrándose a los protones que han logrado fluir a través de la membrana y junto con la ayuda del catalizador finalmente se genera agua.

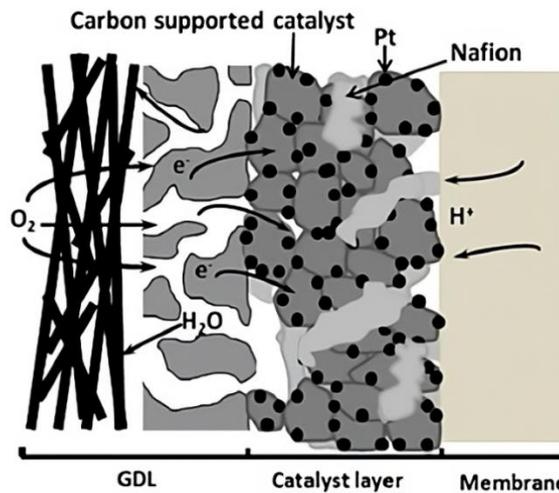


Figura 17. Permeabilidad de los gases entre los componentes [17]

De forma mas detallada mediante la celda completa, se pueden ver los movimientos de los reactivos en la figura 18.

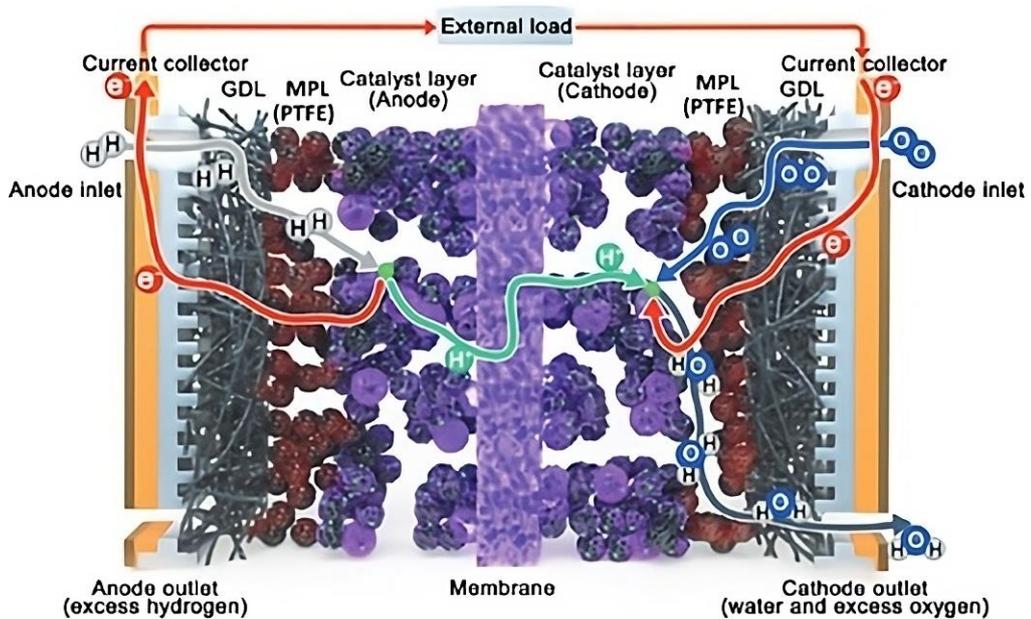


Figura 18. Comportamiento electroquímico del interior de la PEMFC [14]



### 1.3.3.5. *Placa Bipolar*

Las placas bipolares son un elemento crítico y vital en el diseño y funcionamiento de las pilas de combustible, ya que no solo la eficiencia y el peso de la pila depende de ellas, sino que como se ha comentado anteriormente, supone un gran coste económico.

Las funciones y características principales de las placas bipolares son:

- Actuar como separadores de las distintas celdas que conformen el *stack*.
- Actuar como refuerzo mecánico para todo el *stack*.
- Alimentar y repartir los reactivos por toda la superficie activa de los electrodos de la forma más uniforme posible y evitar pérdidas de carga.
- Evacuar todos los productos generados como agua y compuestos no consumidos de los electrodos.
- Transportar electrones entre celdas, es decir, mantener alta conductividad eléctrica.
- Disipar el calor generado, es decir, tener una alta conductividad térmica mediante un fluido caloportador, agua.
- Ser resistentes ante la corrosión.
- Mínima resistencia de contacto interfacial.
- Mínimo espesor y consecuentemente menor peso y volumen.
- Impermeables al hidrógeno y al oxígeno.

Su importancia reside mayormente en parámetros relacionados con su diseño, la configuración de los canales de flujo, además del acabado de los mismos y el tipo de material del que se fabrican. Este último parámetro a su vez condiciona la tecnología de proceso necesaria para su fabricación.

Debido a que este componente es el principal motivo del estudio, estas características serán detalladas en el siguiente capítulo.

### 1.3.3.6. *Otros componentes*

Existen componentes que no son específicos de las pilas de combustible pero sí que son necesarios para su correcto funcionamiento y el máximo aprovechamiento del potencial de esta tecnología.

- **Placas colectoras de corriente:** recogen la corriente generada en la pila. Los electrones producidos en el ánodo deben fluir hacia el cátodo por un circuito externo con la ayuda del colector y los electrodos.

Los materiales más usados en este componente son el titanio (Ti), aluminio (Al), cobre (Cu) y acero inoxidable.

- **Sellado:** se realiza mediante materiales como el teflón (PTFE) o polímeros de silicona. Se deben colocar entre la membrana y las placas bipolares para evitar posibles fugas. Debe de ser impermeable a gases, barato, sencillo de mecanizar y tener una alta estabilidad térmica y química.
- **Placas aislantes:** encargadas de no dejar pasar la corriente eléctrica hacia las placas terminales y de esta forma aislar la pila eléctricamente ante cualquier posible contacto.
- **Placas de cierre o terminales:** son las encargadas de ‘abrazar’ a todo el conjunto, de forma que aportan rigidez trabajando como sujeción mediante elementos roscados para dar la compresión necesaria al *stack*.

La figura 19 recoge los distintos componentes y su ubicación en el conjunto.

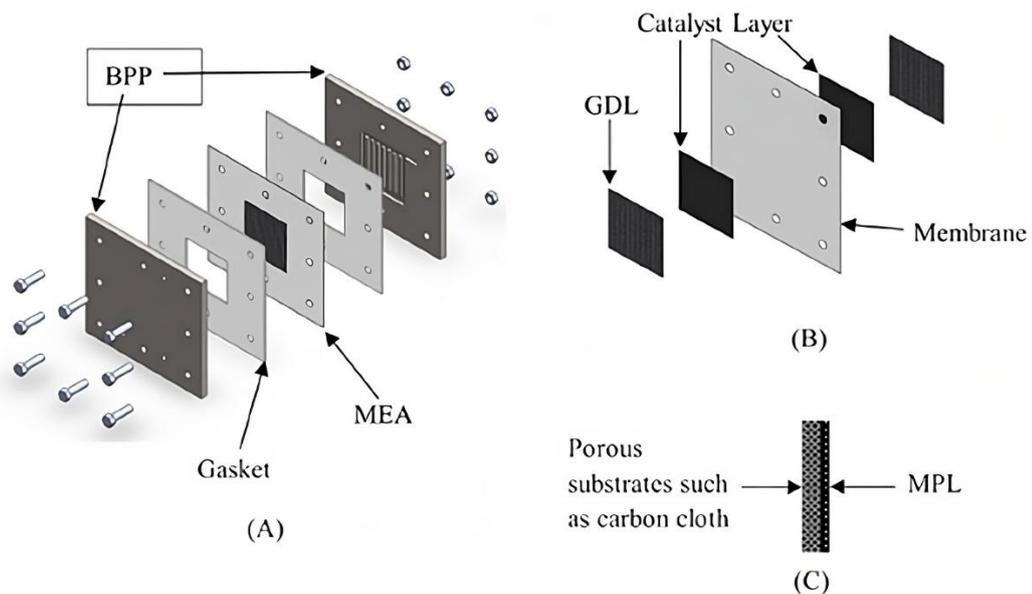


Figura 19. Vista explosionada de colocación de otros componentes [18]

### 1.3.4. Ventajas, Aplicaciones y Tendencias

Las pilas PEMFC tienen ciertas ventajas frente al resto de pilas para una misma potencia. Su temperatura de operación alrededor de 80 °C supone una temperatura asequible de cara a reducir el tiempo de arranque e inicio de las reacciones.

Ocupan menos espacio y su peso es menor, esto se traduce en principio, en un menor coste de los materiales. Suele tener una larga vida útil y un bajo mantenimiento, esto se debe en gran parte al electrolito sólido que portan, un polímero. Un último aspecto en el que destacan, es en la alta densidad de corriente que albergan [12].

Las principales aplicaciones de las pilas de combustible tipo PEMFC están centradas en el sector del transporte, sobre todo con el objetivo de conseguir unas emisiones nulas sustituyendo al motor de combustión, aunque como ya se ha comentado, son utilizadas también para la generación de energía estacionaria y dispositivos portátiles.

Las aplicaciones en el transporte se extienden a distintos vehículos, coches (~130 kW), buses (~114 kW), camiones (~190 kW), maquinaria industrial como carretillas o grúas, trenes (~200 kW), submarinos, aviones pequeños (~80 kW).

El coste de los componentes afecta al coste del *stack* y este afecta al coste de los vehículos, el objetivo año tras año ha sido ir disminuyéndolo, siendo cambiante el porcentaje del coste de cada componente, la evolución se observa en la figura 20.

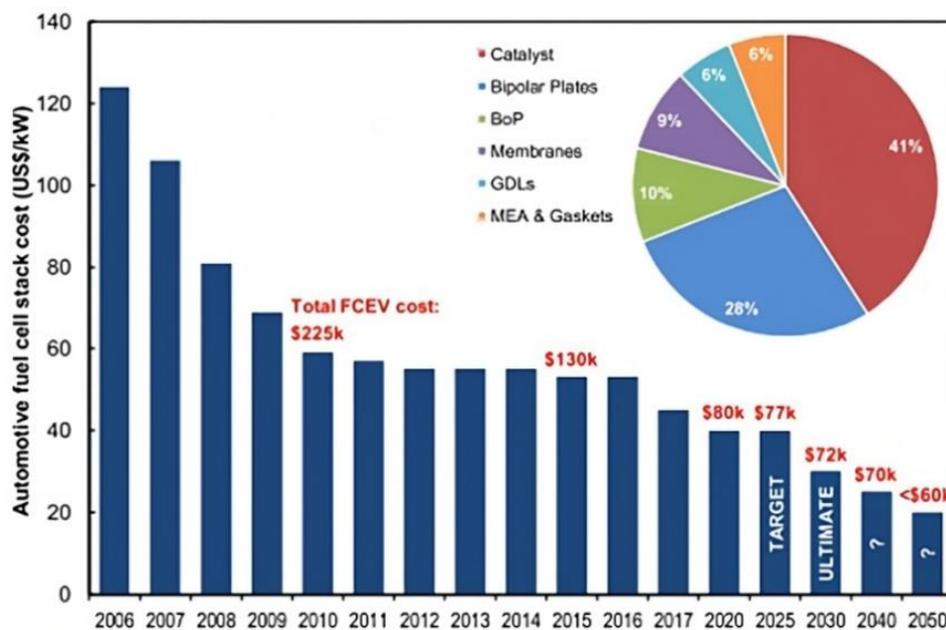


Figura 20. Evolución de costes de vehículos con FC y de componentes [19]



Asimismo, las continuas investigaciones hacen creer en el progresivo aumento de las densidades de potencia desde el valor actual de 4 kW/L a un valor de 6 kW/L en 2030 y un valor de 9 kW/L en 2040.

Se prevé que los polímeros perfluorados con una mejor estabilidad química prevalezcan pero que los polibenzimidazoles también se establezcan en la tecnología PEMFC de bajas y altas temperaturas [20].



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM



## Capítulo 2: Placa Bipolar

Como se ha visto en el anterior capítulo, las placas bipolares son uno de los elementos más cruciales a la hora de construir y hacer funcionar una pila de combustible tipo PEMFC.

En este segundo capítulo se van a desarrollar los tres aspectos que van a determinar el funcionamiento del propio elemento y por ende de la pila, esquematizados en la figura 21.

- Geometría de canales de flujo de la placa bipolar.
- Material de la placa bipolar.
- Proceso de producción de la placa bipolar.

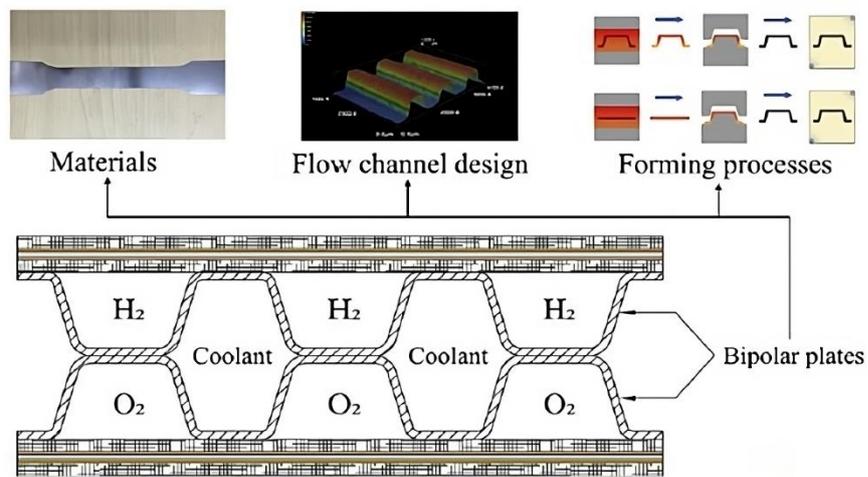


Figura 21. Aspectos determinantes del diseño de una placa bipolar [21]

Los objetivos a alcanzar en relación al diseño de las placas bipolares en Europa no están totalmente detallados por lo que a continuación se indican las características según el Departamento Técnico de Energía de los Estados Unidos (DOE) [22] para 2025 en la tabla 2.

Característica	Objetivo
Coste ( $\$/kW_{neto}$ )	2
Peso ( $kg/kW_{neto}$ )	0,18
Coeficiente de permeabilidad de $H_2$ ( $\frac{stdcm^3}{s \cdot cm^2 \cdot Pa}$ )	$2 \cdot 10^{-16}$
Corrosión del ánodo ( $\mu A/cm^2$ )	< 1
Corrosión del cátodo ( $\mu A/cm^2$ )	< 1
Conductividad eléctrica en el plano ( $S/cm$ )	> 100
Conductividad eléctrica a través del plano ( $S/cm$ )	> 20
Resistencia de área específica ( $\Omega \cdot cm^2$ )	< 0,01
Resistencia a flexión (MPa)	> 40

Tabla 2. Objetivos de diseño de placas bipolares [23]

Para considerar válidos estos objetivos hay que tener en cuenta que estos fueron establecidos en 2017 y el coste está proyectado para una producción de 500.000 pilas de combustible de 80 kW, al año. Producción que como se ha indicado, no es referida a una empresa, sino a la producción de Estados Unidos y referidos a unidad neta de potencia, es decir, la potencia útil.

En el caso del peso, se debe de tener en cuenta la utilización del 50% de la superficie activa y un coste de 2 \$/lb de la lámina de acero inoxidable. Además, estas placas bipolares tienen una densidad de potencia de 1 W/cm<sup>2</sup>.

Se parte de objetivos fijados para materiales metálicos, ya que estos son los más establecidos en la actualidad y mejores resultados dan. En la actualidad, no se han conseguido alcanzar la totalidad de los objetivos y para el año 2025 hay ciertos aspectos aun por mejorar.

Sirviendo como resumen de los aspectos, propiedades y funciones que se van a tratar mediante el estudio de materiales se muestra la figura 22.

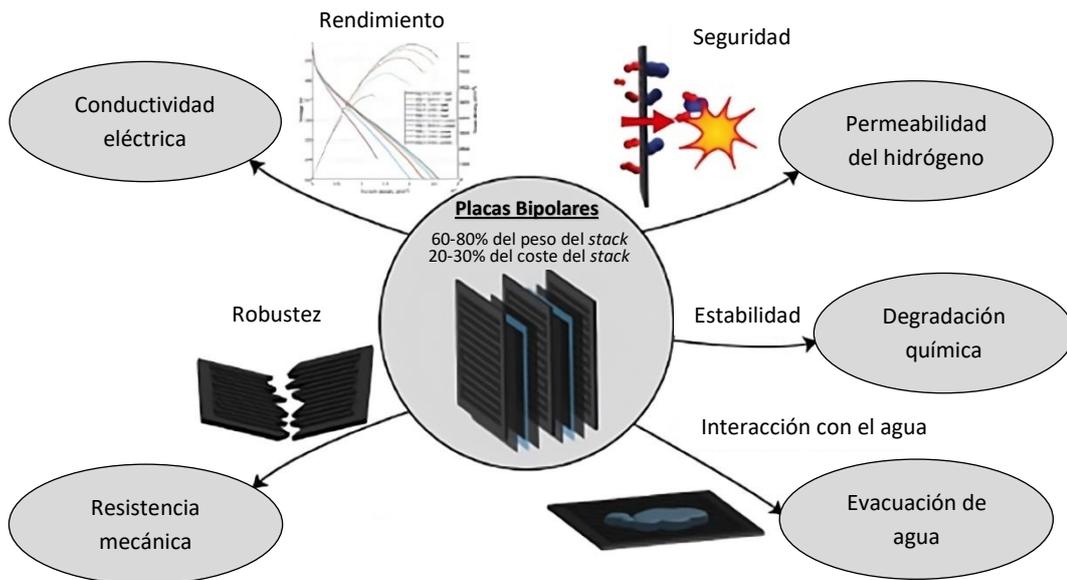


Figura 22. Aspectos de diseño de relevancia (Elaboración Propia apoyado en [23])

## 2.1. Geometrías de canales de flujo

La geometría de los canales de flujo determina como de rápido y uniforme va a ser la distribución de los reactivos sobre la superficie electrocatalítica. No existe consenso claro entre los investigadores en cuanto a la mejor forma de diseñar los canales de flujo por lo que existen innumerables diseños a la hora de hacer llegar los reactivos a todas las zonas activas y provocar de la forma más eficiente las reacciones internas de las pila.

Antes de exponer las principales configuraciones de los canales de flujo se debe de tener en cuenta que su elección se ve condicionada a ciertos parámetros.

- **Dimensión y forma de costillas**, es la superficie de contacto con la GDL y por la que no fluyen reactantes (a excepción de fugas). Suponen un importante condicionante para la conductividad eléctrica, siendo este su punto de contacto eléctrico.

Se puede denominar como las medidas de la costilla o las del canal, por lo que las características a tener en cuenta son la anchura y el radio de la costilla o la altura y anchura de canal, mostrados en la figura 23.

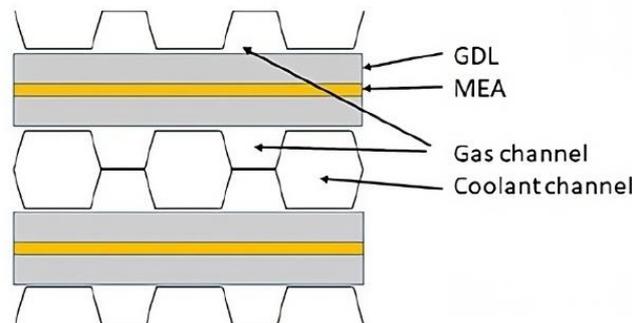


Figura 23. Esquema de canales de flujo [24]

La reducción por tanto de la sección transversal de los canales de reactivos implica una mayor velocidad de los mismos y por ende una evacuación de las gotas de agua producidas en el interior.

- **Orientación del flujo**, determina la disposición de las entradas y salidas de los reactivos. Esta configuración afectará también al comportamiento del agua. Eléctricamente, las corrientes de reactivos paralelas implican una mejor eficiencia, ya que se obtienen voltajes ligeramente mayores, pero es menos uniforme que la configuración en contracorriente.

- Caídas de presión**, se deben minimizar al máximo las caídas de presión dentro de los canales ya que no solo se deben de evacuar las gotas de agua producidas sino que al introducirse reactivos (hidrógeno y oxígeno) en exceso, estos gases también se deben extraer del interior.

Se pueden observar los cambios en la caída de presión según el tipo de canal por el que se desplacen los reactivos en la figura 24.

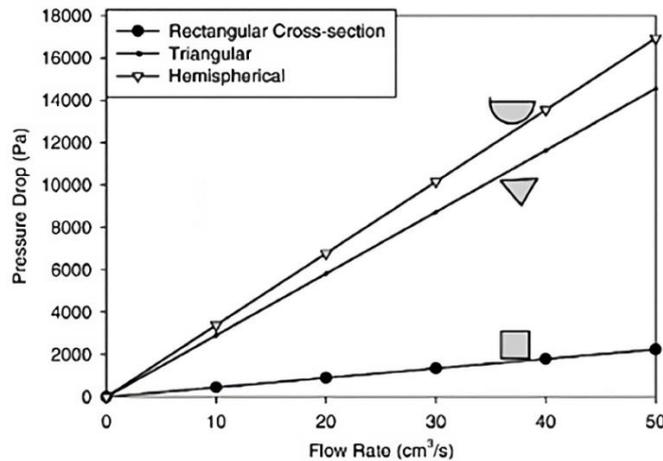


Figura 24. Caída de presión según caudal y tipo de sección [7]

Una sección cuadrada del canal supone una menor caída de presión a medida que el caudal aumenta. Una gran caída de presión implicaría menor flujo de gases en zonas reactivas y por tanto un menor número de electrones (menor corriente generada).

Asimismo, se debe de tener en cuenta el proceso productivo del canal, el comportamiento que van a tener los reactivos y el agua en cada tipo de sección. Por ejemplo, las secciones semicirculares son propensas a generar acumulaciones de gotas en forma de película de agua y las secciones triangulares debido a efectos de la gravedad retienen menos agua, como se muestra en la figura 25.



Figura 25. Acumulaciones de agua según tipo de sección de canales [25]

Se puede determinar que a menor altura y anchura de canal, mayor caída de presión habrá en los canales.



- **Evacuación de agua**, se debe contar con una extracción del agua correcta para evitar inundaciones que empeoren el rendimiento de la pila. Esta característica se ve afectada por la caída de presión, la sección del canal, la velocidad de flujo y la geometría del canal entre otros parámetros.

Ligado tanto a la evacuación del agua como a la orientación de los flujos, se debe de tener en cuenta que las condiciones tanto de cantidad de agua como de temperatura no son iguales en el ánodo y en el cátodo.

La colocación de la salida del cátodo junto a la entrada del ánodo provoca un intercambio de agua por medio de la membrana debido al gradiente de concentración del agua y de esta forma se evitan posibles inundaciones. Por lo que se recomienda el uso de flujos cruzados.

- **Transferencia de calor**, de cara a eliminar el calor generado en el interior de la pila se suelen utilizar los canales de refrigeración por los que circula agua, condicionados por la geometría de los canales de gases. El diseño de este circuito es también muy importante.

El aumento de la anchura de los canales de refrigeración mejora la uniformidad de la temperatura y reduce la caída de presión. En caso de no ser suficiente, se debe contar con aletas que disipen la energía calorífica.

Por otro lado, los propios conductos de los gases pueden ayudar a la transferencia de calor. Se debe de asegurar la correcta disipación de calor para evitar la desecación, contracción o rotura de la membrana, o un aumento de la resistencia óhmica de la pila.

Además, la falta de uniformidad de la temperatura provoca una bajada de la eficiencia ya que la velocidad de las reacciones tampoco es uniforme.

- **Transferencia de masa**, los reactivos se deben de suministrar en una cantidad concreta y se deben de distribuir de forma correcta por los canales del área para que se establezca una densidad de corriente estable.
- **Conductividad eléctrica**, se busca la máxima transferencia de electrones a través de las superficies de contacto entre las placas

bipolares y las GDL. Se ve afectado por la dimensión y forma de las costillas y también por el material de las placas bipolares.

- **Efecto bypass**, la colindancia de los canales puede suponer una mala difusión de gases debido a la estructura porosa que tiene la GDL y los cambios de presión. Por tanto, se debe de tener en cuenta la proximidad de los canales y en consecuencia la anchura de la costilla. Pueden generarse problemas también relacionados con la acumulación de agua en zonas muertas.

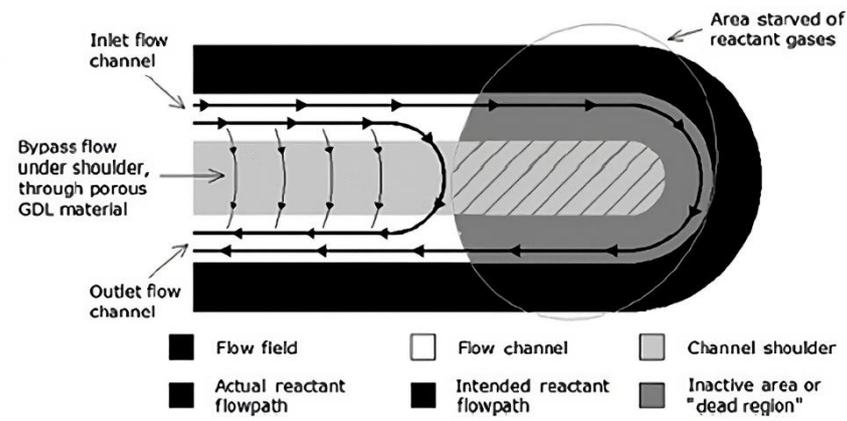


Figura 26. Efecto bypass en canales de flujo [25]

En la figura 26 se aprecia dicho efecto, el flujo no recorre el canal entero sino que consigue difundir a través de la GDL dejando una zona inactiva, carente total de reactivos.

### 2.1.1. Flujo de reactivos en paralelo

El flujo se realiza mediante canales paralelos como se puede observar en la figura 27.

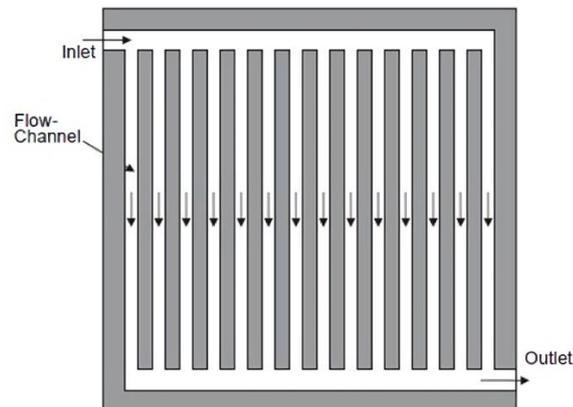


Figura 27. Configuración de canales en paralelo [26]

- Ventajas: menor caída de presión por celda, posibilidad de aumentar el caudal másico en canales colindantes y buena distribución de los gases. Su mecanizado es sencillo y barato.
- Desventajas: posibilidad de fallo en la reacción por bloqueo de los canales debido a acumulaciones de agua (mala evacuación de moléculas de agua), baja velocidad de flujo, voltaje inestable en largos tiempos de uso y mala distribución de gases a la salida provocada por caídas de presión. Altas caídas de presión en el *stack*.

Para evitar posibles obstrucciones por las acumulaciones de agua se debe aumentar mucho la velocidad de flujo.

El hecho de que en el *stack* existan caídas de presión considerables, mientras que por celda no, implica que el flujo de reactivos varíe mucho desde la entrada a la salida, siendo en esta última significativamente más bajo.

### 2.1.2. Flujo de reactivos en serpentín

Los reactivos se mueven a través de un solo canal de flujo que va recorriendo la superficie desde la entrada hasta la salida haciendo un recorrido serpenteante, como se muestra en la figura 28.

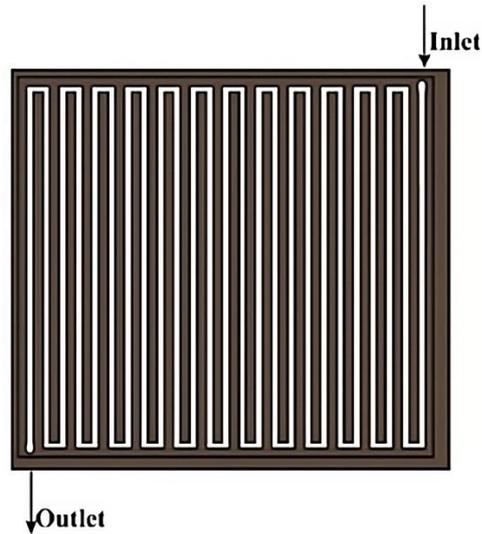


Figura 28. Configuración de canales en serpentín [7]

- Ventajas: bajo riesgo de fallo en la reacción por bloqueo de los canales (buena evacuación de moléculas de agua), gran aprovechamiento de área activa y buena distribución de reactivos.
- Desventajas: altas caídas de presión, posibilidad de inundaciones a altas densidades de corriente, disminución de densidad de corriente debido a acumulaciones de agua en las curvas del trayecto y agotamiento de los reactivos en el trascurso del flujo entrada-salida.

La correcta evacuación del agua se produce gracias al aumento de velocidad de flujo que provocan los continuos cambios de sentido. Para conseguir solventar las altas caídas de presión es necesario el uso de potentes compresores en el suministro de reactivos.

### 2.1.3. Flujo de reactivos en serpentín múltiple

Existen varios canales paralelos que trazan su camino desde la entrada hasta la salida de forma serpenteante, visible en la figura 29. Se puede realizar este trazado con los mismos canales de entrada que de salida o modificando los mismos durante el trayecto.

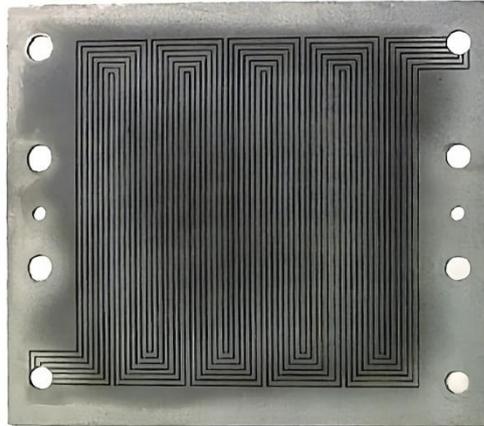


Figura 29. Configuración de canales en serpentín múltiple [7]

En este caso al tratarse de una configuración que tiene aspectos de las dos configuraciones anteriores, sus ventajas son una mezcla de ambas y en el caso de las desventajas, se ha reducido su influencia.

- Ventajas: menor caída de presión en cada uno de los canales en los que se divide, gran aprovechamiento del área activa unido a una buena evacuación del agua.

Este tipo de configuración suele conllevar altos rendimientos y una superficie activa de contacto óptima.

- Desventajas: se siguen provocando agotamientos de los reactivos y caídas de presión debido a la longitud de los canales que se ve aumentada con respecto a la configuración en paralelo.

#### 2.1.4. Flujo de reactivos en Pin-type

El recorrido de los reactivos se ve creado a partir de las hendiduras formadas por los relieves de los pines de la placa como en la figura 30.

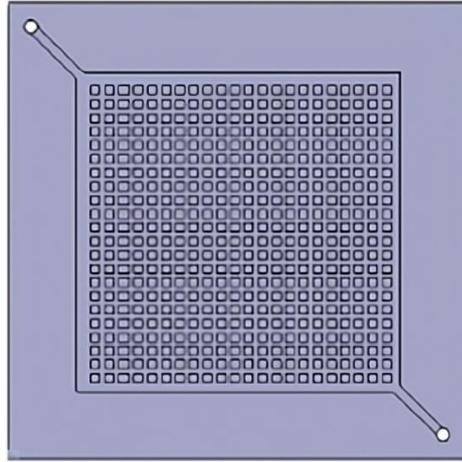


Figura 30. Configuración de canales en pin-type [25]

- Ventajas: menor caída de presión. Recomendable para cortas duraciones de operación ligadas a un alto caudal de reactivos.
- Desventajas: mala evacuación de agua y distribución no uniforme de reactivantes y densidades de corriente.



### 2.1.5. Otros tipos de flujo de reactivos

Existen otras numerosas configuraciones a la hora de realizar el diseño de los canales de flujo, tanto modificaciones de las formas que se acaban de nombrar realizando cambios con respecto a la altura y anchura de canales, como variaciones en el número de canales, número de cambios de sentido, etc.

Pero también existen diseños completamente distintos (y menos utilizados), por ejemplo las interdigitadas, donde los canales son ciegos.

En ellas el control del agua es bueno ya que se utiliza convección forzada a través de la GDL. También aportan una buena transferencia de masa, la distribución de gases es buena, lo que implica un alto rendimiento y bajo condiciones de altas densidades de corriente, no existe la posibilidad de inundaciones.

Por el contrario, dependiendo de la GDL usada se pueden producir altas caídas de presión y la vida útil de la GDL se reduce considerablemente.

Las biomiméticas y fractales donde los canales siguen formas relacionadas con la naturaleza y canales ramificados. Son diseños aun en desarrollo.

Estos diseños implican una menor caída de presión que la configuración interdigitada y pueden tener mayores rendimientos a mayor temperatura.

Como desventajas principales, tienen un mal control del agua y por tanto grandes posibilidades de inundarse.

Existen también los diseños en espiral o de poro abierto. Esta última variación es completamente distinta a todas, ya que no se corresponde con unos canales mecanizados sobre el material sino que se trata de un material poroso por el que se transportan los reactivos, disminuyendo directamente el peso del componente.

En este estudio de Carton & Olabi (2017), [27], se comparó este modelo con uno de doble canal en serpentin.

Obteniendo en el modelo de poro abierto una mejor distribución de los reactivos, menores caídas de presión, un mejor control de la temperatura (conductividad térmica) y del agua, además de una mayor conductividad eléctrica.

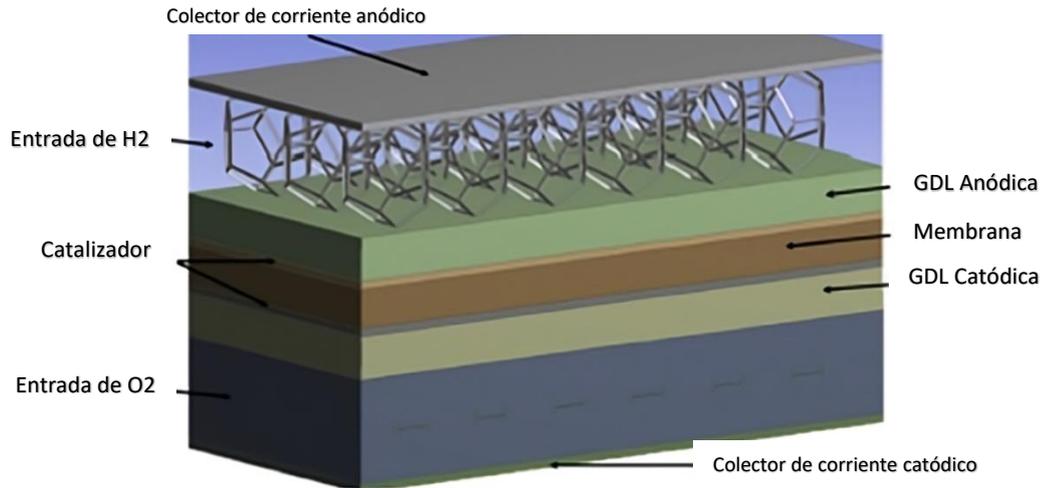


Figura 31. Configuración de canales en poro abierto (Elaboración Propia apoyado en [27])

Se suele aplicar sobre placas bipolares metálicas y se realizan en moldes con una preforma cerámica. En esta se vierte el metal fundido y una vez enfriado se golpea para retirar el molde cerámico, quedando esta estructura metálica porosa.

Este tipo de geometría podría llegar a solventar problemas como las inundaciones y las pérdidas de transportes de masa.



### 2.1.6. Comparativa

De cara a tomar una decisión según los requisitos, se puede aceptar que el diseño de serpentín múltiple es el que mejor resultados da a la hora de distribuir los reactivos de la forma más uniforme, evacuar el agua generada y tener menores caídas de presión, permitiendo el uso de áreas más grandes.

Según la relación establecida entre la anchura del canal de flujo y de la costilla tendremos diversas ventajas o desventajas asociadas al funcionamiento de la pila.

Si la anchura de canal es mayor que la de la costilla se mejoran aspectos como la caída de presión en los canales de flujo, existe mayor contacto de los reactivos con la GDL, mejor evacuación de agua de la GDL y menores pérdidas de voltaje.

Por el contrario, la membrana está menos humidificada, lo que implica una menor conductividad eléctrica y térmica. La densidad de corriente y la temperatura no siguen distribuciones uniformes y la resistencia mecánica de la MEA se ve comprometida al haber menos superficie de contacto en el ensamblaje.

En caso de que la anchura de la costilla sea mayor que la de los canales de flujo, existen mejoras con respecto a la humidificación de la membrana, la resistencia mecánica de la membrana y la GDL, la transferencia de calor y mayor uniformidad tanto en la densidad de corriente como en la temperatura. En contraposición se obtienen una mala gestión del agua en la GDL, mayores caídas de presión y una menor área de contacto de los reactivos con las GDL unido a mayores pérdidas de voltaje.

Los mejores resultados se obtienen cuando la relación tiende a la unidad, ya que, la variación de uno de los dos parámetros implica una desventaja en el funcionamiento.

Según el tipo de sección de canal, en el ánodo se demostró que la geometría más adecuada es una semiesférica [28]. En el cátodo, al tener que evacuar mayor cantidad de gotas de agua, es beneficiosa la utilización de una sección trapezoidal para que en las esquinas se rompa la tensión superficial y no se formen películas de agua [25].

El sentido de flujo de los reactivos desde el ánodo y el cátodo más favorable es a contracorriente, suponiendo una mejor humectación de la membrana y por tanto mejorando la eficiencia de la pila de combustible. De la misma forma, esta configuración evita posibles inundaciones más habituales en el sentido de flujos paralelos [24].



En resumen, mediante estas elecciones, se consigue que los canales de flujo tengan la menor caída de presión posible, la máxima transferencia tanto de electrones como de calor y un buen control sobre la evacuación del agua.

## 2.2. Materiales

El material del que van a ser fabricadas va a suponer un gran impacto en las propiedades de las placas bipolares. La conductividad eléctrica a través del plano, la permeabilidad de los gases, la resistencia mecánica, la absorción del agua y la conductividad térmica son algunos de los parámetros que se van a poder establecer mediante esta elección.

La selección del tipo de material va a implicar tener distintas características técnicas, un determinado proceso de producción y un coste. Es por todo ello, que la elección del material de las placas bipolares es de las elecciones más cruciales dentro del diseño y funcionamiento de la pila.

A lo largo de este apartado, se detallarán las características de algunos de los materiales más interesantes a la hora de fabricar placas bipolares dentro de los tres grupos principales, metálicas, grafito y polímeros dopados distinguibles en la figura 32.



Figura 32. Tipos de materiales en placas bipolares [29]

Tradicionalmente el material más usado ha sido el grafito de alta densidad, pero su fragilidad y porosidad ligado a la necesidad de abaratar costes asociados al tiempo y tipos de procesos de producción o a la implementación de pilas PEMFC en sectores como la automoción donde es necesario que soporte vibraciones y golpes para que no se produzcan roturas o fugas de gases reactivos, han hecho que se conduzca la investigación hacia otro tipo de materiales como los polímeros dopados o las placas metálicas.

A continuación se puede observar un primer resumen general en la tabla 3, posteriormente se van a ir detallando las distintas ventajas y desventajas de cada tipo de material.



La tabla sigue el siguiente código de colores: **Bueno** | **Regular** | **Malo**

PROPIEDAD	METÁLICA	GRAFITO	POLÍMERO
Conductividad eléctrica			
Resistencia mecánica			
Resistencia ante corrosión			
Impermeabilidad de gases			
Densidad ( $g/cm^3$ )	> 6	$\approx 2$	< 2
Espesor ( $mm$ )	< 2	> 4	2-3
Coste			

Tabla 3. Resumen de propiedades relevantes según material (Elaboración propia)

Adicionalmente a estas propiedades hay que sumar la posibilidad de mecanizado de los canales de flujo, la conductividad térmica, su capacidad hidrofóbica y el peso y volumen del *stack* final.

Todos los materiales se ven, en su mayoría, afectados por los mismos problemas en mayor o menor medida.

Pequeñas diferencias son la clave para conseguir hacer una elección balanceada. Y que, además de cumplir con los requisitos para que el funcionamiento de la pila sea el más cercano a lo óptimo, lleve asociados los menores costes posibles, tanto de materias primas como de proceso productivo como se verá en el apartado 2.3.

### 2.2.1. Metálicas

Las placas metálicas surgen de la necesidad de disminuir el espesor de las placas bipolares y aumentar las propiedades mecánicas para algunas aplicaciones que lo requerían. Este cambio de características, entre otras, buscaba también la disminución del coste de la pila. Un posible aspecto de una placa bipolar metálica se puede observar en la figura 33.

El menor coste de la materia prima y del proceso de producción, la disminución del espesor junto con las buenas propiedades mecánicas y eléctricas ha establecido este tipo de placas en muchos de los ámbitos disponibles pero principalmente en el sector del automóvil.

Como aspecto negativo, uno de los fenómenos que más afecta a las placas bipolares metálicas es la corrosión. El ambiente en el que tienen que trabajar es muy propenso a provocar este inconveniente y por lo tanto, la fabricación de este tipo de placas debe estar acompañada de recubrimientos de otros materiales.

Estos recubrimientos deben de reducir la corrosión y el espesor de la capa de pasivación sin mermar las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales.



La reducción del espesor conduce a no aumentar la resistividad del sistema al tratarse de una capa aislante y alargar la vida útil del componente.

La resistencia de contacto entre las placas bipolares y la GDL es la responsable de en torno al 60% de las pérdidas. En el caso de las placas metálicas, este valor de ICR suele ser alto, siendo un aspecto importante a corregir.

Otro parámetro a tener en cuenta, es el acabado superficial de la placa ya que una superficie muy rugosa puede provocar mayor corrosión y una superficie muy lisa, al haber menos puntos de contacto entre la capa colindante (GDL) puede provocar mayor ICR.

Otros de los problemas asociados a la corrosión es el envenenamiento de la membrana y el catalizador por los iones metálicos generados en la corrosión. La degradación de la MEA provoca la liberación de ácido fluorhídrico lo cual favorece a la corrosión. A su vez, la generación de hidróxidos provoca el deterioro de la membrana.

Las principales ventajas de los materiales metálicos son:

- Alta conductividad eléctrica y térmica.
- Facilidad y variedad en su fabricación.
- Capacidad de hacer canales complejos.
- Impermeabilidad frente a gases.
- Alta resistencia mecánica y tenacidad.
- Menor espesor.
- Proceso de producción y procesado barato.

Las principales desventajas de los materiales metálicos son:

- Susceptible a la corrosión.
- Necesidad de recubrimiento.
- Envenenamiento de la membrana y catalizador.
- Alto nivel de ICR.
- Alta densidad y por tanto mayor peso.
- Dependencia de canales de flujo delanteros y traseros.
- Vida útil corta.

A continuación, se van a exponer los materiales base y recubrimientos que pueden ser los mejores candidatos en búsqueda de un material barato, con buen comportamiento ante la corrosión y un bajo ICR.

El comportamiento de los recubrimientos varía según el tipo de base sobre el que se aplique pero también según el subtipo de material, por lo que se van a

tomar como referencia algunos de los mejores resultados obtenidos sobre algunos tipos de materiales concretos.



Figura 33. Placa bipolar metálica [30]

El proceso habitual por el cual se realizan este tipo de placas bipolares es del de estampación, en el apartado 2.3 se abordará con mayor detalle.

#### **2.2.1.1. Bases y recubrimientos**

##### Acero inoxidable

Los aceros inoxidables se van a dividir en los austeníticos (SS300) con alto contenido en cromo y níquel (mínimo del 16 y 6%, respectivamente) y los ferríticos (SS400), de cromo directo (10,5-30% de Cr).

La utilización de estos materiales desnudos es posible y puede llegar a ser realmente atractivo su uso debido a su bajo coste y alta disponibilidad. Pero, debido a los objetivos de resistencia eléctrica o de contacto, el uso individual del material directamente se descarta, ya que la generación de una capa pasiva mayor disminuye la conductividad eléctrica de las placas bipolares.

En el caso de los materiales austeníticos, con cromo y níquel, el alto contenido de cromo proporciona la resistencia ante la corrosión.

De la variedad de metales austeníticos, uno de los más utilizados es el SS316/316L. Principalmente por su menor coste ya que contiene menos cantidad de grafito. Este menor contenido en grafito provoca mayor resistencia a la corrosión debido a la inhibición de formaciones de carburos de cromo que podrían reducir la estabilidad de la capa pasiva formada.

También es ampliamente usado el acero inoxidable austenítico SS304/304L, que si se compara con el 316/316L, su principal ventaja también es su bajo precio. Por otro lado, en aspectos como las caídas de voltaje o el ICR, su comportamiento no es mejor.

En el caso de los ferríticos, su coste normalmente es algo más bajo, manteniendo una buena resistencia a la corrosión. En contra, la conformabilidad junto al acero inoxidable no es tan buena como la de otros materiales.

La solución a la alta corrosión de los aceros se realiza a través de una capa de otro compuesto a modo de recubrimiento que además de resistir a la corrosión, consiga aumentar el transporte de electrones. Siendo indispensable la correcta adhesión al material base.

A continuación se exponen los compuestos más usados para el recubrimiento de aceros inoxidables.

### Carburos

Los carburos aportan conductividad eléctrica, dureza y resistencia a la corrosión. Los más interesantes son el carburo de titanio ligado a carbonos amorfos ( $TiC_x/a-C$ ), el carburo de niobio ( $NbC$ ) y de cromo ( $CrC_x$ ).

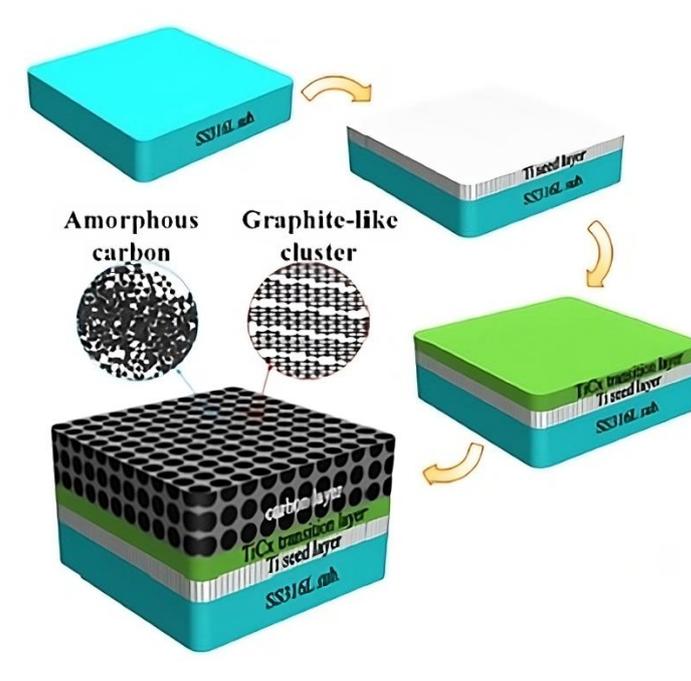


Figura 34. Esquema de recubrimientos sobre acero inoxidable [31]



En la actualidad los recubrimientos de carbono amorfo y nanocarbono están acaparando el interés de los estudios, siendo su aplicación en el material como la mostrada en la figura 34.

Asimismo, los recubrimientos de carbono arrojan excelentes resultados de rendimiento y estabilidad. Sus niveles de ICR son buenos, incluso mejores que los del propio grafito [32].

#### Nitruros

Los nitruros más estudiados y utilizados por proporcionar las mejores prestaciones en cuanto a dureza, conductividad eléctrica y estabilidad química son el nitruro de titanio (TiN), de cromo (CrN), de circonio (ZrN), de tántalo (TaN) y de niobio (NbN).

Además, todos ellos tienen un coste aceptable aplicándose como recubrimientos. Tanto el TiN como el NbN muestran un bajo ICR a la hora de aplicarse sobre distintos tipos de acero. Son asequibles económicamente y versátiles.

#### Metales

El oro (Au), la plata (Ag) o el platino (Pt) son buenos recubrimientos en cuanto a sus propiedades en general, siendo su resistencia ante la corrosión similar a la del grafito [32] pero al tratarse de metales nobles, su coste se ve incrementado considerablemente.

El cromado es una posibilidad también para conseguir aumentar la resistencia a la corrosión y disminuir el ICR en aceros de bajo carbono.

#### Polímeros

Los polímeros conductores, polianilina (PANI) y polipirrol (PPy) proporcionan un buen comportamiento ante la corrosión, en concreto, eliminan la probabilidad de que se produzcan envenenamientos por iones metálicos durante la creación de la capa de pasivación. Además de no aumentar el valor del ICR [32].

En el caso concreto de recubrir acero SS304 [33] con PANI y PPy, se puede determinar que los niveles de ICR son superiores en el caso de PANI. Mientras que los



niveles de corrosión son más elevados con PPy que con PANI. Cabe recalcar que en ambos casos los niveles de corrosión han sido reducidos y los de resistencia de contacto se mantienen en valores aceptables pero deben ser controlados.

A pesar de sus ventajas, los polímeros aún no están preparados para conseguir trabajar a las temperaturas intermedias necesarias y existen diferencias de expansión entre materiales.

En cualquier caso, el recubrimiento de polímeros sobre aceros inoxidable mejora el rendimiento de los aceros desnudos.

### Titanio

Otra preferencia es el Titanio, esta base proporciona una baja densidad, lo que hace que sea un material poco pesado, y una alta resistencia a la corrosión.

Su conductividad frente a otro tipo de metales no es destacable pero no se puede considerar que tenga mala conductividad eléctrica, aunque al pasivarse aumenta la resistencia eléctrica de la superficie.

El coste del recubrimiento además del alto coste del titanio limita la utilización de este material en algunos sectores como el del automóvil, donde el gasto en componentes debe ser siempre lo más bajo posible. Mientras que aspectos como el poco peso del componente, es un punto a favor.

Por otra parte, los daños producidos por envenenamiento de la membrana se ven disminuidos ya que los iones de titanio no son tan tóxicos como lo pueden ser los del acero inoxidable.

También destaca por ser fácil de procesar, por tener buena impermeabilidad frente al hidrógeno y buen comportamiento térmico.

Aunque su procesamiento sea sencillo, el volumen de producción es menor comparado con el del acero inoxidable, esto se debe a que requiere de varias etapas. Primero es necesario obtener  $TiCl_4$  del mineral óxido y posteriormente reducirlo a titanio metálico.



Los compuestos más usados para el recubrimiento de titanio son:

### Nitruros

La mayoría de los nitruros utilizados para el recubrimiento de aceros inoxidables se usan también en el de titanio. Un ejemplo que aporta buenos resultados sobre el titanio es el nitruro de titanio [34].

Se obtuvo una ligera mejora en la conductividad eléctrica, se mejoró la resistencia mecánica y su potencial de corrosión se vio incrementado. El mayor aumento se refleja en la densidad de corriente, teniendo un aumento de más del doble del titanio desnudo. Bajo una voltaje de 0,6 V se pasó de 0,396 a 0,888  $A/cm^2$ .

Se considera una de las mejores opciones a la hora de recubrir las bases de titanio. Proporciona alta conductividad, muy buena estabilidad en distintas condiciones de operación y un coste asumible, aportando también variedad de utilidades industriales.

### Metales

El oro es uno de los materiales referentes en cuanto a buena conductividad eléctrica y buena resistencia ante la corrosión. Consigue prevenir la formación de capas de óxido que supondrían una alta resistividad [35].

Un ejemplo del uso de titanio es Toyota, quienes cambiaron en 2014 sus placas bipolares de acero inoxidable a titanio. Este cambio suponía el uso de carbono amorfo como recubrimiento en vez del usado hasta entonces, el oro, suponiendo un mayor coste del componente. La empresa desarrolladora de este material es Kobe Steel, la cual lleva años estudiando la tecnología del titanio.

### Aluminio

El aluminio es otra de las opciones principalmente contempladas para la fabricación de las placas bipolares debido a su bajo coste de producción y alta disponibilidad de esta materia prima.

Consigue resultados aceptables en cuanto a la resistencia, ante la corrosión y el posible envenenamiento iónico, pero es necesario su recubrimiento.



Por otra parte, comparándolo con las placas bipolares metálicas y de titanio, su densidad y resistividad es mucho menor, tiene mayor conductividad térmica y se puede procesar más fácilmente.

En el caso del aluminio, los recubrimientos son los siguientes:

#### Carburos

Este tipo de recubrimientos en el caso del aluminio proporciona alta durabilidad ante la corrosión. Consiguiendo que se mantenga un rendimiento estable sin que se formen capas pasivas suficientemente anchas como para aumentar el ICR y bajar la conductividad. No se producen envenenamientos de membrana ni afecta al catalizador [36].

#### Nitruros

El uso de Nitruro de titanio vuelve a ser el más interesante, cumple con los requisitos establecidos para los niveles de ICR y mejoran la resistencia a la corrosión.

#### Metales

El galvanizado, proceso usado habitualmente para crear una capa pasivada que evite la corrosión del metal base, es una opción a considerar en este caso.

#### Polímeros

El uso del polímero PANI implica una disminución considerable de la corrosión. Mientras que el uso de PPy no, por la mala deposición de este sobre el aluminio.

Si se compara directamente el acero inoxidable con el titanio teniendo en cuenta el ICR y la conductividad, el titanio tendrá un rendimiento superior. Mientras que si comparamos estos dos con el aluminio, en términos de conductividad este tiene mejor comportamiento pero la corrosión es mayor por lo que no se recomienda su uso por delante del acero o el titanio.

Por lo tanto, de cara a aumentar el rendimiento total de la pila, las placas bipolares de acero inoxidable y de titanio son las más recomendables, necesitando ambas un recubrimiento para cubrir las desventajas que arrojan sus propiedades en estado desnudo.



Los recubrimientos de nitruros, en concreto, CrN y TiN, proporcionan en general una buena densidad de corriente y una buena resistencia a la corrosión.

### 2.2.2. Grafito

Como se ha comentado anteriormente, el grafito fue el principal material para la realización de placas bipolares debido a sus buenas propiedades eléctricas y químicas, donde se incluye el bajo ICR y la resistencia a la corrosión.

El gran inconveniente al que se enfrenta el uso de este tipo de material es el coste que supone su procesado a pesar de su bajo precio de compra, lo que condiciona su uso en la actualidad comparándolo con las placas metálicas o las de polímeros dopados.

Los costes de procesamiento en gran parte se deben a la creación de los canales de flujo, ya que este material no aporta suficiente resistencia mecánica, siendo bastante quebradizo y poroso.

En primera instancia, este problema podría resolverse aumentando el espesor del componente pero esto afectaría directamente a otras características importantes, como por ejemplo el ICR.

La dificultad en el diseño de sus canales de flujo puede verse como una ventaja ya que existe la libertad de poder trazar distintas formas en un lado y otro de la placa bipolar, algo que en la estampación de las placas bipolares metálicas no es posible.

A pesar de los costes iniciales por su procesado, a largo plazo, el ahorro puede ser mayor debido a su mayor vida útil y su posibilidad de reutilización.

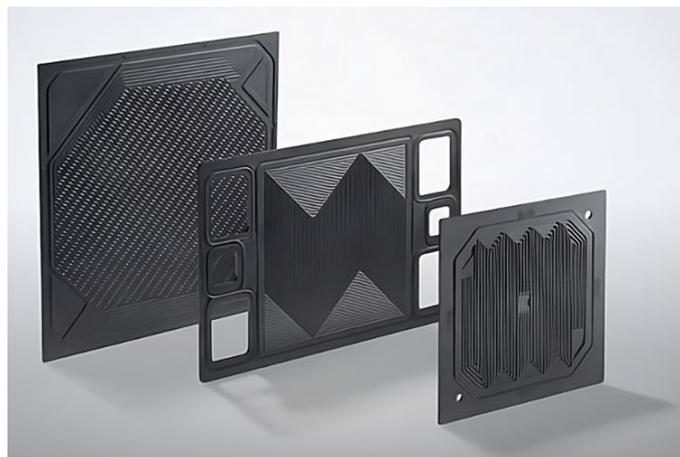


Figura 35. Placa bipolar de grafito [37]

A continuación se resumen sus principales ventajas:

- Muy alta resistencia a la corrosión.
- Bajo ICR y por ende alta potencia electroquímica.
- Baja densidad.
- Superficie con bajos niveles de mojabilidad y energía superficial.



Y desventajas:

- Baja resistencia mecánica.
- Material quebradizo.
- Alto peso y volumen (debido a la necesidad de aumento de espesor).
- Alto coste de procesado (mecanizado de canales).

Su alta porosidad se contrarresta mediante un tratamiento térmico que consigue sellar la superficie para que se convierta en impermeable ante los reactivos.

El alto coste junto al resto de inconvenientes hicieron que los estudios se centrasen en la mezcla de este material con otros, en búsqueda de recubrimientos o rellenos que ayudasen a mejorar el comportamiento general del grafito. De esta forma se empezaron a desarrollar los polímeros dopados, que se explican en el siguiente apartado.

### 2.2.3. Polímeros dopados

Los compuestos de polímeros dopados, al tratarse de matrices poliméricas tienen una conductividad eléctrica muy baja, lo cual implica tener que añadir rellenos que consigan aumentar la conductividad eléctrica a niveles aceptables para que puedan cumplir el cometido de las placas bipolares.

La conductividad eléctrica está relacionada principalmente con la cantidad de relleno que se añade a la matriz.

Esta cantidad varía según el tipo de compuesto que se vaya a mezclar y normalmente se representa mediante una gráfica que enfrenta dicha conductividad con el porcentaje de relleno.

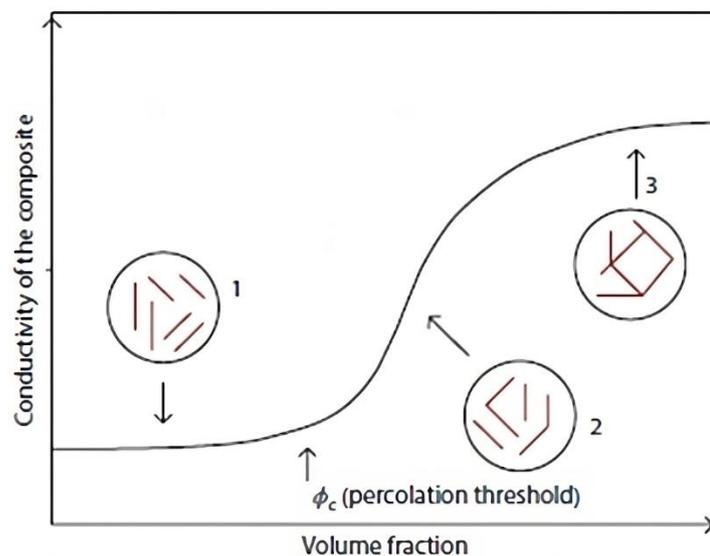


Figura 36. Umbral de percolación, conductividad-relleno [16]

Si se observa la figura 36, se puede apreciar que la conductividad se ve incrementada de forma considerable tras alcanzar una determinada cantidad de relleno. Este porcentaje de relleno en el cual la conductividad aumenta se denomina umbral de percolación ( $\phi$ ).

Si el nivel de relleno se está por debajo del umbral, el material en su conjunto se comportaría como un aislante. Mientras que una vez alcanzado y superado el umbral de percolación, el material alcanza su mayor nivel de conductividad eléctrica y la adición de relleno deja aumentar la conductividad y empieza a aumentar propiedades como la resistencia de contacto.

Asimismo y de mayor importancia, es como afecta este aumento de relleno en la resistencia mecánica del material ya que a la vez que se aumenta la conductividad, esta disminuye.

Por lo tanto, además de superar el umbral de percolación para adquirir una buena conductividad, se debe llegar a un balance correcto entre la conductividad y la resistencia mecánica de la placa.

Una de las principales soluciones a este problema como se verá posteriormente, es el uso de rellenos secundarios que no aporten conductividad pero si resistencia mecánica u otras propiedades que favorezcan el comportamiento de la placa.

Otras de las ventajas asociadas a los polímeros dopados es la buena resistencia ante la corrosión, son poco pesados, sencillos de mecanizar tanto para su fabricación como para la creación de los canales de reactivos y son en general, baratos.

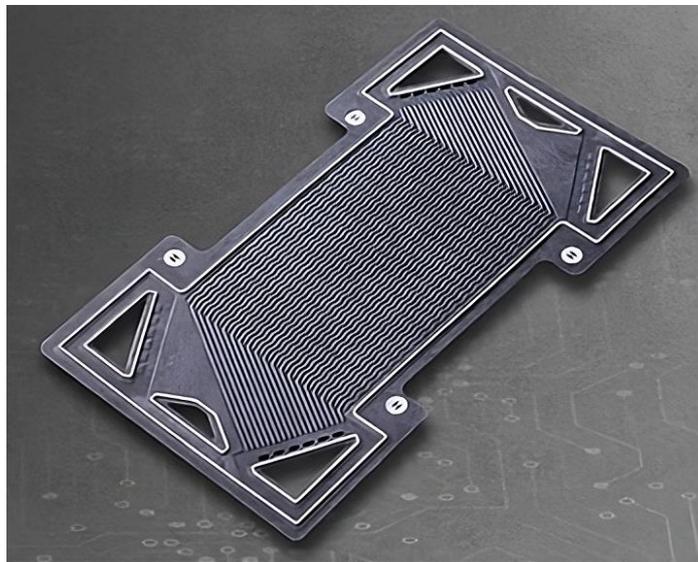


Figura 37. Placa bipolar de polímero dopado [38]

Resumiendo sus ventajas:

- Muy buena resistencia a la corrosión.
- Baja densidad y peso.
- Bajo coste de fabricación y procesado.

Y desventajas:

- Baja resistencia mecánica.
- Conductividad eléctrica media o baja.

En este caso, los procesos por los cuales suelen producirse las placas de polímeros dopados son la compresión o la inyección. Al igual que en los anteriores materiales, este tema se tratará con mayor detalle en el apartado 2.3.



### 2.2.3.1. *Matrices*

#### Termoestables

Las matrices termoestables son los compuestos más empleados para realizar placas bipolares, este hecho radica en las características favorables que aportan:

- Baja viscosidad, lo que implica una mayor capacidad de ser rellenados con otros materiales que complementen sus propiedades conductoras.
- Baja densidad.
- Fuertes enlaces covalentes, lo que implica una fuerte red continua entrelazada que forma un sólido rígido que no puede deshacerse al aumentar la temperatura del plástico.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Estabilidad mecánica sin contracciones.
- Estabilidad térmica. No requieren enfriamiento tras su procesado.

A pesar de ser los más empleados, de cara a realizar producciones en masa, son peor opción ante los termoplásticos ya que tienen un ciclo de moldeo más largo y baja tenacidad.

Las matrices termoestables suelen combinarse con rellenos de grafito, grafito expandido, fibras de carbono, carbono negro y/o nanotubos de carbono. Los porcentajes de combinación dependerán de la matriz y las propiedades buscadas, pero lo ideal es mantener un balance entre la resistencia mecánica y la conductividad eléctrica.

Además, la composición de los rellenos va a condicionar el coste de la placa bipolar y las condiciones sobre las que se tiene que operar en la producción, en este caso, de moldeo por compresión.

#### Epoxy

Se trata de un compuesto orgánico que se compone de una resina aglutinante y un catalizador que endurece la estructura obtenida por la mezcla de Bisfenol A o F con Epiclorhidrina. Sus principales ventajas son:

- Bajo peso molecular.
- Buena estabilidad térmica y mecánica.



- Buena conductividad eléctrica, ya que pueden contener altos niveles de relleno.
- Alta resistencia ante la corrosión.
- Capacidad de adherencia y fácil procesamiento.
- Contracción mínima durante el proceso de curado.
- Bajo coste.

Un estudio muy interesante es el realizado en 2017 por Kang et al [39], en el cual se desarrolló una placa bipolar ultra ligera y muy fina a partir de resina Epoxy y relleno de grafito.

La composición de las placas bipolares era de 90% en peso de relleno y un 10% de resina. A partir de este contenido crearon la multicapa de prepeg (combinación de una matriz de resina y una fibra a modo de refuerzo) de 0,6 mm que proporcionaba muy buen comportamiento eléctrico, alcanzando los 172 S/cm en el plano y 38 S/cm a través de él.

El proceso de fabricación se realizó mediante prensado en caliente para el prepeg de grafito, paso en el que se consigue una buena distribución del grafito (partículas de 6 micrómetros) y posteriormente se añadió la capa de composite moldeando el conjunto por compresión, facilitando la formación de los canales de flujo.

Para asegurar el correcto comportamiento del conjunto de la placa bipolar, se debería de realizar otros test habituales como los de corrosión, resistencia mecánica o ICR.

### Fenólicos

Los compuesto fenólicos se producen a través de una reacción de condensación del formaldehido y fenol. Sus principales ventajas son:

- Buena resistencia térmica y mecánica.
- Bajo coste.

Estas ventajas, ligadas a un comportamiento constante que mantiene un rendimiento estable, han conseguido que actualmente sean el tipo de resinas de matriz polimérica más empleadas para la realización de placas bipolares.



Según el catalizador usado y la composición de la mezcla, se pueden obtener los compuestos Resoles o Novalac. En el primer caso, es necesario Tetramina de Hexametileno, con un grupo Metinol. En el caso de Novalac, es necesaria una reacción de formaldehído con gran cantidad de fenol junto a un catalizador.

Otro estudio realizado en 2020 por Simaafrookhteh et al [40] comparó placas bipolares realizadas con composites fenólicos de Novalac y Ésteres de vinilo.

En el caso de los compuestos vinílicos, no se alcanza a tener la composición exacta ya que se trata de muestras comerciales, pero se estima un 40% de la resina junto con relleno de grafito, fibras de carbono y grafito expandido.

El compuesto fenólico que arrojó mejores resultados, está compuesto de un 30% de resina Novalac y un contenido de grafito y grafito expandido del 30 y 40%, respectivamente.

Durante los ensayos, realizaron distintas muestras y pudieron comprobar que el aumento de carga de grafito expandido conseguía disminuir la resistencia de contacto interfacial y por lo tanto aumentar la conductividad eléctrica. Asimismo, los test de resistencia mecánica fueron también exitosos, ya que se consiguieron resistencias superiores a las requeridas por el DOE, alcanzando los 45 MPa.

En comparación a las muestras realizadas mediante el compuesto comercial, este, arrojaba mejores resultados bajo distintas presiones de compactación, pero algo menos uniformes que las del compuesto óptimo de Novalac.

En el aspecto eléctrico, el comercial superaba los requisitos del DOE, mientras que el compuesto vinílico se quedaba por debajo, no siendo lo suficientemente bueno.

#### Ésteres de Vinilo

Las resinas de éster vinílico son mezclas entre un poliéster y un Epoxy. Sus principales ventajas frente a otros materiales son:

- Alta resistencia a la corrosión.
- Bajo coste y por ende placas bipolares más baratas.



- Bajo peso.
- Baja viscosidad.

La baja viscosidad hace que pueda tener mayor carga conductora y por lo tanto suele trabajar como matriz aglutinante.

Un modelo de vinílicas, desarrolladas en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, muestran mejores propiedades en general que las placas bipolares de resina Epoxy y su tiempo de curado es menor.

Además, tienen mayor facilidad para ser producidas que las placas de resinas fenólicas. Pero sus propiedades de conducción y resistencia mecánica con grafito como relleno, no consiguen alcanzar los requisitos necesarios.

Aunque algunas empresas, como LyondellBasell, uno de los mayores fabricantes de compuestos termoestables de moldeo a granel de Norteamérica, tiene un modelo, 940-8649 Vinyl Ester, el cual consigue satisfacer los requisitos del DOE [41].

En general, las propiedades de los termoestables son muy similares, pequeñas diferencias consiguen decantar la balanza hacia el uso de un tipo u otro.

Como en la mayoría de los ámbitos, el coste es un factor determinante.

### Termoplásticos

Los compuestos termoplásticos son compuestos con buena resistencia mecánica y química, gran disponibilidad a bajo coste y buena impermeabilidad de gases.

Las causas por las que este tipo de polímeros se usan menos que los termoestables son:

- Menor estabilidad química y térmica que los termoestables (se funden).
- Menor capacidad de contener rellenos conductores por tener mayor viscosidad que los termoestables.
- Menor conductividad eléctrica al tener menor cantidad de rellenos conductores que los termoestables.



Aunque como se ha visto, estos materiales son menos atractivos inicialmente, el hecho de que se puedan producir sin solventes y en un tiempo de ciclo más corto, sigue atrayendo numerosos estudios.

#### Polipropileno (PP)

Es uno de los materiales más usados para la fabricación de las placas bipolares dentro de los termoplásticos. Esto se debe a su bajo precio, su facilidad para ser procesado y las buenas propiedades mecánicas que tiene.

El futuro potencial que podrían tener los composites se muestra en estudios como el de Alo et al. (2020) [42].

En este estudio se realiza una mezcla de polipropileno, resina Epoxy y grafito, siendo la composición de este último de un 80%.

El hecho de que se componga de un solo tipo de relleno y se lleguen a cumplir parámetros establecidos por el DOE, como la resistencia a la flexión, la densidad (peso y volumen) o la absorción de agua, muestran el gran potencial de los composites mezclados con rellenos conductores.

Relacionado con la conductividad eléctrica, en este caso, no puede llegar a cumplirse el requerimiento, quedándose tanto en la conductividad sobre el plano como a través de él, por debajo.

Existen algunos proveedores fabricantes de polímeros dopados con este tipo de matriz, Ensinger [43] es uno de ellos. Sus compuestos únicamente tienen rellenos de Grafito, consiguiendo una conductividad eléctrica de 168 S/cm y una resistencia a flexión de 37 MPa.

#### Fluoruro de Polivinilideno (PVDF)

Sus buenas propiedades relacionadas con la impermeabilidad ante los gases reactivos y la humedad junto a una buena estabilidad química y mecánica, hacen que este material sea otra alternativa dentro de los termoplásticos.



### Sulfuro de Polifenileno (PPS)

Su principal atractivo es la posibilidad de albergar gran cantidad de carga conductora (relleno) en su estructura, además de tener buenas propiedades mecánicas.

Con un 13% de este compuesto [44], la empresa alemana Eisenhuth ha realizado placas bipolares mediante compresión. Obteniendo un espesor de 3,91 mm, lo cual es bastante grande pero los resultados arrojados son bastante favorables sabiendo las limitaciones de estos materiales.

Se han alcanzado 40,7 S/cm a través del plano, superando por el doble el requerimiento del DOE y en el resto de propiedades como la permeabilidad ante el hidrógeno, la resistencia mecánica, control de agua, densidad, etc, alcanza o se mantiene cercano a los requisitos.

Otros resultados recogidos por Cunningham et al. (2007) [45], se han alcanzado conductividades en el plano de 271 S/cm a partir de composiciones de PPS con un 70% de grafito y un 6% de fibras de carbono. Manteniendo igualmente buenos niveles de resistencia a tracción y flexión.

Al igual que en el caso de matriz de PP, Ensinger también fabrica compuestos con PPS y una mezcla de rellenos de grafito y carbono, alcanzando una conductividad eléctrica de 122 S/cm y una resistencia a flexión de 55 MPa [43].

### Polietileno (PE)

Este termoplástico proporciona buenas propiedades mecánicas y un procesado sencillo y barato en comparación con otros procesos.

La obtención de buenas características materiales se ve afectada sobre todo por la correcta dispersión de las cargas conductoras. En cambio, la carencia de grupos polares en su estructura evita esta dispersión y por lo tanto no se consiguen buenas propiedades eléctricas.

De cara a solucionar este problema, se puede optar por el injerto directo de grupos polares funcionales para conseguir una buena distribución de los rellenos.



### 2.2.3.2. Rellenos

Como se ha introducido, los rellenos juegan un papel fundamental en la eficiencia de las placas bipolares producidas mediante polímeros. Estos consiguen mejorar una de las propiedades fundamentales como es la conductividad eléctrica.

Es muy importante tener en cuenta que composición de rellenos hay en el material. Esto condicionará el proceso de producción. En el caso de que el material aumente su viscosidad, se evitará la fabricación de placas bipolares mediante inyección.

#### Grafito

Compuesto que contiene un 99,91% de carbono. Se compone de múltiples capas hexagonales (anillos de carbono) y es el material de relleno más usado para esta aplicación.

Su punto fuerte principal es la alta conductividad eléctrica que aporta al material frente a otras cargas. Esta conductividad eléctrica va a depender de la dirección en la que cristalice, cuanta mayor deslocalización de electrones exista, mayor conductividad existirá en el plano.

Además, tiene una buena conductividad térmica, una buena resistencia a la corrosión, estabilidad química y una baja densidad de  $2 \text{ g/cm}^3$ .

El grado de carga habitual para conseguir un nivel de conductividad eléctrica aceptable es del 60-80%. Pero es necesario tener en cuenta que a mayor cantidad de relleno de grafito, habrá menor resistencia mecánica y mayor espesor de placa con el consiguiente peso y volumen.

#### Grafito Expandido (EG)

Tipo de grafito que tiene las capas muy similares a este pero en forma de escamas y con mayor distancia entre ellas. Tiene la capacidad de expandirse más de 150 veces que el propio grafito lo que provoca la creación de poros/espacios entre la matriz y el relleno.

Estas porosidades disminuyen la densidad del material y aumentan el área. Proporcionando una mayor conductividad eléctrica y térmica.

Las porosidades, debidas a la gran relación de aspecto que tiene el EG, supone también disminuir el umbral de percolación,

siendo necesario el uso de otro tipo de cargas para conseguir alcanzar una resistencia mecánica adecuada, como por ejemplo las fibras de carbono.

Suele usarse para conseguir placas de grafito algo más flexibles de cara a solventar problemas de fragilidad y no necesitar aumentar tanto el espesor, lo que conlleva mayor volumen y peso.

Si se comparan las placas bipolares donde se añade grafito expandido y las de grafito con respecto a las propiedades comentadas, se observa una similitud en su conductividad (siendo superior la de EG) pero en el caso del expandido el espesor se disminuye.

#### Nanotubos de Carbono (CNT)

Son partículas nanométricas de carbono, es decir, el ratio longitud/diámetro es superior a 1000, a esta característica se le denomina gran relación de aspecto.

Se puede observar dicha característica en el lado derecho de la figura 38.

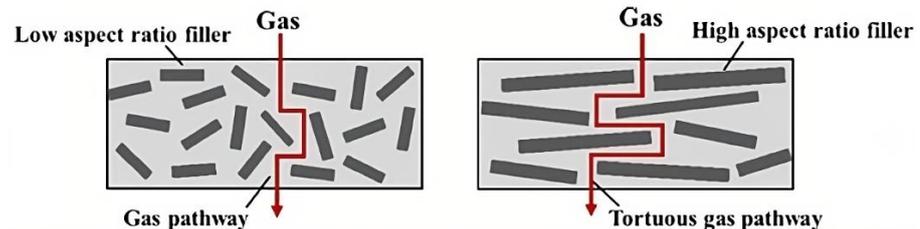


Figura 38. Baja y alta relación de aspecto [46]

Su fabricación se realiza principalmente mediante ablación láser pero otras técnicas como descarga de arco o crecimiento catalítico también son técnicas normalmente usadas.

Al igual que el grafito y el grafito expandido, consta de una alta conductividad eléctrica y es fácil de mecanizar.

Son una alternativa muy valorada para sustituir otras grandes partículas de carbono o grafito que aumentan el peso y disminuyen la cantidad de relleno. Y de esta forma obtener estructuras ligeras y más eficientes.

Cabe destacar también, que poseen resistencia a la corrosión pero esta propiedad y todas las anteriores depende de la distribución que adquieran al formarse el material.



Como se puede observar, los nanotubos de carbono tienen muy buenas características y estas van asociadas a un mayor coste del material. Es por ello que no se usan en gran porcentaje en comparación con otros rellenos y se sigue estudiando su viabilidad en las placas bipolares de cara a cumplir con ciertos requisitos de coste establecidos.

#### Carbono Negro (CB)

Es una forma de carbono paracristalino, es decir, compuesto por partículas con formas amorfas y de distinto tamaño pero manteniéndose en una escala pequeña y desordenada.

Se produce de forma sintética mediante la combustión parcial de productos pesados derivados del petróleo (alquitranes).

Este relleno no suele usarse de forma individual en la fabricación de placas bipolares ya que sus propiedades eléctricas y mecánicas no son tan buenas.

De cara a su utilización junto con otro tipo de cargas, puede implicar rebaja de peso o coste del componente, además de ligeras mejoras en el resto de propiedades habituales si la cantidad adicionada es la justa (según el material y el relleno principal, este porcentaje variará).

Puede llegar a alcanzar el 30-40% de carga, pero lo habitual es no llegar al 10% por los motivos descritos. Aunque sus propiedades eléctricas no son muy buenas, el hecho de mezclarlos con otros rellenos incrementa gratamente la conductividad eléctrica en el plano y a través del mismo.

En el caso de usarse con termoplásticos, las mezclas actúan como compuesto antiestáticos.

En relación al estudio sobre el Polipropileno [42], se van a complementar y justificar las características del CB con el estudio realizado por Alo et al. (2021) [47].

En este caso, se han realizado distintas muestras de compuestos, siendo el principal objeto de estudio, la comparativa entre el material con un 80% de grafito y el material con un 73% de grafito y un 7% de carbono negro, ambos compuestos tienen como matrices base el polipropileno y la resina Epoxy.



Debido a las propiedades del carbono negro, se consigue una mejora de la conductividad en el plano de 20 S/cm y a través del plano de 7 S/cm. Ante estos resultados, los compuestos siguen estando por debajo de los requisitos pero se observa una tendencia favorable hacia las necesidades actuales.

#### Fibras de Carbono (CF)

El principal cometido de las fibras de carbono es conseguir disminuir el peso del compuesto final.

Su alta relación de aspecto hace que la resistencia del compuesto aumente haciéndolo más rígido. Dicha relación de aspecto afecta al umbral de percolación, disminuyendo el mismo.

Su uso hace que aumente la porosidad y con ella la permeabilidad al hidrogeno por lo que este tipo de relleno se debe usar junto a otros rellenos que consigan estabilizar el comportamiento de la placa bipolar.

Por lo tanto, una vez detallados los rellenos más relevantes hay que tener en cuenta que siempre que se realice un polímero compuesto por una matriz base y un relleno se debe conocer el punto de equilibrio entre las propiedades eléctricas y las de resistencia.

Con este objetivo, lo más recomendable es la adición de varios rellenos en la matriz.

Algunos resultados interesantes recogidos en el libro de Inamuddin et al. (2023) [16], están referidas a las siguientes composiciones procesadas mediante compresión.

Resina termoestable fenólica tipo resol en un 25% con 64% de grafito natural, 5% de carbono negro, 5% de fibra de carbono y 1% de grafeno. Esta composición proporciona unas conductividades eléctricas de 435 S/cm y 130 S/cm, en el plano y a través de él, respectivamente.

Características similares se obtienen si el 25% de resina fenólica resol se mezcla con un 70% de grafito natural y un 5% de carbono negro. Proporcionando 425 S/cm en el plano y 115 S/cm a través del plano.



### Cotton Flock

El uso de fibras de algodón no es muy habitual pero puede aportar ciertas ventajas a la hora de ahorrar costes o combinarlo con alguno de los rellenos anteriores pero teniendo en cuenta no es conductor.

Estas fibras muestran mejoras en las propiedades mecánicas, por ejemplo, si se combina con ésteres vinílicos reforzados con algodón [48], aunque los resultados son similares a su combinación con termoplásticos. Esto se debe sobre todo a la facilidad que tiene el algodón, al ser una fibra porosa, para absorber la resina usada generando un matriz más fuerte. Cuanto menos viscosa sea la resina, mejores propiedades adquirirá el conjunto.

Por lo tanto, las propiedades finales variaran según las combinaciones que se alcancen a la hora de fabricar la placa bipolar.

De forma resumida, el grafito de la misma forma que contribuye a aumentar la conductividad, hace que el material sea más quebradizo. De igual forma, la conductividad eléctrica se ve afectada por el tamaño de las partículas de grafito y su distribución en la estructura del polímero.

La cantidad de grafito a suministrar a la base es de entre el 50 y 80% para no comprometer la conductividad ni su resistencia mecánica, respectivamente. Por lo tanto si comparamos ambas matrices (con rellenos conductores) a modo resumen, las ventajas de los termoestables frente a los termoplásticos son la mayor temperatura de operación, el menor ICR y el menor tiempo de ciclo.

En el lado opuesto, el proceso de fabricación de los termoplásticos es más fácil de automatizar ya que puede realizarse mediante inyección.

Como desventaja relevante, ninguno es capaz de adquirir una gran conductividad eléctrica. En el caso de los termoplásticos, además, no soportan altas temperaturas de operación, el proceso de inyección no tolera gran cantidad de rellenos y no tienen buena estabilidad química como ya se había adelantado en su definición.

Ambos pueden realizarse mediante moldeo por compresión y ambos necesitan un posterior proceso de mecanizado. Además, en el caso de los termoplásticos, suele usarse el moldeo por inyección, como se verá en el apartado 2.3, donde se ven descritos los procesos de fabricación de las placas bipolares.



### 2.2.4. Comparativa

Las placas metálicas aportan importantes ventajas en comparación con las placas de grafito, suponen una mayor conductividad eléctrica y térmica, mayor impermeabilidad frente a gases y mejor estabilidad mecánica. Como se ha comentado, existen materiales los cuales ya están muy establecidos en la fabricación de placas bipolares, como el acero inoxidable, pero existen numerosas investigaciones que tratan de encontrar otras alternativas.

El Nitruro de Titanio, TiN es considerado uno de los mejores recubrimientos debido a la alta conductividad que proporciona al conjunto, su capacidad de amoldarse a distintas condiciones de operación y el coste asequible que tiene.

En caso de comparar las resinas termoestables y termoplásticas, se pueden detectar ciertas ventajas hacia las termoestables, como mejor estabilidad térmica, menor tenacidad, resistencia a la fluencia, menor tiempo de curado y al tratarse de compuestos menos viscosos, mayor nivel de carga eléctrica. Asimismo, los termoplásticos tienen mayor resistencia mecánica [49].

Por lo general, enfocado a aplicaciones como vehículos, el uso de placas bipolares que no sean metálicas es algo complejo. Esto se debe a que las empresas del sector, apuestan totalmente por materiales que sean de alta resistencia mecánica y además puedan trabajar a altas temperaturas aunque se traten de PEMFC de baja temperatura.

Por lo tanto, las placas de grafito quedan apartadas por su fragilidad y las placas de polímeros dopados, quedan limitadas por aspectos de temperatura. Ciertas líneas de desarrollo se centran en compuestos con grafito expandido y resina Benzoxazina que consigue soportar hasta 120 °C [32].

Como se acaba de explicar, existen numerosos tipos de bases y recubrimientos a la hora de fabricar placas bipolares, se puede observar un pequeño esquema resumen de los más usados en la tabla 4.

Metales		No metales
Con recubrimiento	Sin recubrimiento	
<p>Bases:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acero inoxidable</li> <li>▪ Titanio</li> <li>▪ Aluminio</li> </ul> <p>Recubrimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grafito</li> <li>▪ Nitruros y Carburos</li> <li>▪ Metales y Polímeros</li> </ul>	<p>Acero inoxidable:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Austenítico</li> <li>▪ Ferrítico</li> </ul>	<p>Grafito (no poroso)</p>



Composites	
Bases metálicas	Bases de carbono
Acero inoxidable	<p>Bases:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Termoestables (Epoxy, Fenólicas y Vinílicas)</li><li>▪ Termoplásticos (PP, PVDF, PPS, PE)</li></ul> <p>Rellenos:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Grafito</li><li>▪ Grafito Expandido</li><li>▪ Nanotubos de Carbono</li><li>▪ Carbono Negro</li><li>▪ Fibras de carbono</li><li>▪ Fibras de algodón</li></ul>

Tabla 4. Principales materiales estudiados (Elaboración propia apoyado en [50])



## 2.3. Procesos de fabricación

En este último apartado del diseño y producción de placas bipolares se van a desarrollar los principales procesos de fabricación para las placas metálicas, de grafito y de polímeros dopados. Como se ha podido observar, la elección del material va a afectar totalmente al comportamiento y coste del componente y por ende también al proceso.

En el caso de las placas bipolares metálicas, debido a la necesidad de recubrir el material base, también se explicarán los principales procesos de recubrimiento.

### 2.3.1. Placas Bipolares Metálicas

A pesar de que existen numerosas técnicas de procesos de fabricación de placas bipolares metálicas, las únicas realmente establecidas como método para realizar una producción a mayor escala son la estampación y el hidroconformado. Posteriormente a la fabricación de las placas monopolares (una sola cara), se deben unir mediante soldadura, normalmente soldadura láser.

#### 2.3.1.1. Procesos de la base

##### Estampación

Uno de los procesos más utilizados es la estampación, más concretamente las variantes de estampación, en caliente o *Hot pressing*, rollo a rollo o *Roll to roll* y el conformado por almohadillas de caucho o *Rubber Pad Forming*.

Todos ellos, al tratarse de un proceso de estampación consisten en aprisionar el material a moldear entre dos matrices aplicando una fuerza suficiente para crear la forma deseada.

En cada uno de los siguientes casos, estas matrices serán de distintas características.

##### *Hot Pressing*

En este primer método se debe prestar especial atención al concepto de la temperatura de recristalización del material a modelar (metal en polvo), temperatura del material en la que este se recristaliza dando lugar a nuevas microestructuras con menores defectos en la red.

Al tratarse de una estampación en caliente, la temperatura de operación de este proceso está por encima de la temperatura de recristalización.

El aumento de temperatura, necesario en todo el material por igual, ayuda a que el material sea más fácilmente maleable teniendo un menor límite elástico. También implicará tener una menor presión de aplicación en su procesamiento.

En contraposición se tendrá menor precisión a la hora de cumplir requisitos dimensionales que otros procesos pero sus resultados son de buena calidad y con buenos acabados.

Aunque los otros dos procesos que se van a desarrollar pueden ser también en caliente. Cuando se hable de *Hot Pressing* siempre se va a referir a máquinas de estampación planas fija.

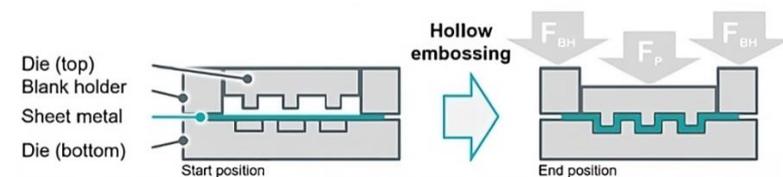


Figura 39. Proceso de *Hot pressing* [51]

El proceso consiste en provocar una deformación plástica que genere los canales de flujo necesarios sobre la placa metálica mediante dos matrices rígidas (una matriz macho y otra hembra, es decir, contramatrices) y una fuerza externa.

Mediante este proceso se pueden obtener placas metálicas de muy pequeño espesor, 0,05 mm, y de una gran resistencia. Ambas características se consiguen de forma uniforme en toda la superficie de la placa. Asimismo, se puede lograr una alta producción a un bajo coste consiguiendo mantener las características nombradas.

Adicionalmente al problema de precisión dimensional se debe tener en cuenta el coste asociado a las herramientas necesarias.

Suele requerir varias estaciones o un mayor número de operaciones debido a la recuperación elástica que sufre el material al ser estampado, ya que afecta directamente

al espesor y a la calidad de su superficie, pudiendo provocar grietas y/o arrugas.

Pueden por tanto inducirse tensiones en el material o mantener rebabas peligrosas para el manejo de las placas.

Al tratarse de uno de los procesos más utilizados en la fabricación de placas bipolares metálicas hace que su aplicación se haya extendido sobre todo en el sector de la automoción. Siendo utilizado en empresas mundialmente conocidas como Toyota o Hyundai.

Una empresa que por lo contrario realiza este proceso pero en frío, es Cell Impact, se puede observar en la siguiente figura 40, el conjunto del proceso.



Figura 40. Proceso real de estampación en frío [52]

#### *Roll to roll*

Proporciona mayores velocidades de producción, lo cual es un factor muy importante a tener en cuenta, pero las instalaciones y sus posibles modificaciones son más complejas. Este proceso puede realizarse en frío o en caliente.

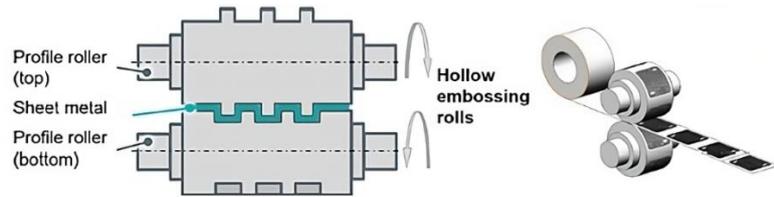


Figura 41. Proceso de *Roll to Roll* [51]

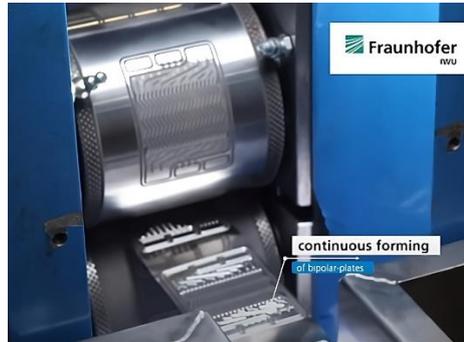


Figura 42. Proceso real de *Roll to Roll* [53]

De la misma forma que en la estampación en caliente, la aparición de arrugas y la recuperación elástica son problemas reales que aún están estudiándose para intentar disminuir sus efectos perjudiciales en el rendimiento y calidad de las placas.

Por lo tanto se obtienen ventajas en cuanto a la relación de aspecto y el tiempo de ciclo. Pero se necesita tener espacio suficiente para la colocación de los distintos rollos y hay problemas de planitud del componente.

### *Rubber Pad Forming*

En esta última variante de la estampación, se utiliza una matriz rígida en la cual se aplica la fuerza externa y una superficie de caucho (poliuretano) que consigue deformar la lámina metálica deformándose ella misma, amoldándose a la forma de la matriz rígida.

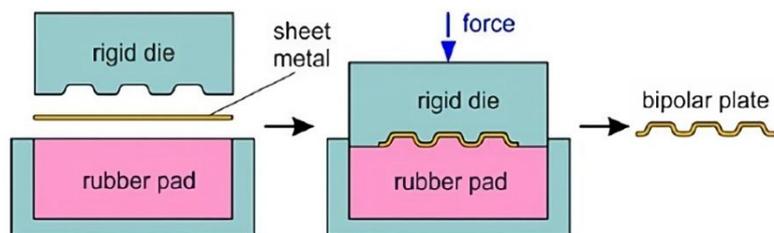


Figura 43. Proceso de *Rubber Pad Forming* [54]

Es únicamente necesario el diseño de una de las matrices, la superior, por lo tanto no existen problemas de ajustes de ensamblaje entre matriz superior e inferior como podría ocurrir en los anteriores casos.

También existe una buena capacidad de producción junto a un bajo coste de las herramientas necesarias, pero este ahorro se ve afectado por el coste asociado al poliuretano. Además, también existe la posibilidad de la formación de arrugas.

El tiempo estimado en cada una de las piezas creadas se encuentra en torno a los 10 segundos.

Una desventaja de este tipo de proceso es la falta de uniformidad en la pieza final, pudiendo provocar roturas en las esquinas.

Otro aspecto limitante es el precio que puede suponer la compra de poliuretano ya que al ser una herramienta clave a la hora de realizar las configuraciones de canales debe tener un espesor y una dureza concreta para poder ejercer la presión suficiente para conformar el diseño.

#### Hidroconformado

En este proceso la fuerza opuesta a la aplicada en el lado del molde rígido es generada por agua a alta presión.

De esta forma se consiguen mejores resultados con respecto a la estampación ante los problemas dimensionales y de calidad de la superficie pero se disminuye la alta tasa de producción alcanzada por la estampación.

Además, el proceso se reduce a una única operación, disminuyendo la recuperación elástica del material y pudiendo fabricar diseños más complejos.

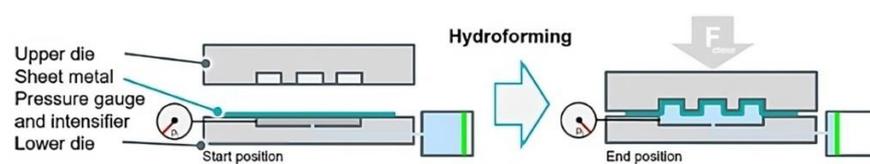


Figura 44. Proceso de Hidroconformado [51]

Un aspecto importante a tener en cuenta en los procesos que se han descrito hasta ahora, es la relación de aspecto de los

canales de flujo, profundidad-anchura. Este aspecto va a variar según el proceso usado.

Cuanto mayor pueda ser este ratio, menor posibilidad de creación de arrugas en el material y por consiguiente, mayor rendimiento en el funcionamiento de las placas bipolares. Estas impurezas se crean normalmente debido a que las matrices en este tipo de procesos son rígidas [9].

Dichas matrices y herramientas en altas producciones sufren desgastes que implican costes adicionales. Además, este pequeño espesor conseguido, puede provocar roturas en el componente.

Las tandas cortas de producción se pueden ver limitadas debido al coste de posproceso para solventar los distintos errores nombrados en este tipo de métodos.

#### Grabado Químico (Chemical Etching)

El grabado químico o fotograbado es un proceso sustractivo de mecanizado que consigue eliminar láminas de la superficie del metal. En la figura 45 pueden observarse los distintos pasos a realizar y a continuación se van a explicar uno a uno junto a las ventajas de este proceso.



Figura 45. Proceso de Grabado químico [55]



- **Selección de material:** prácticamente cualquier metal puede tratarse mediante esta tecnología pero es seguro que los principales materiales de las placas bipolares como los aceros y aceros inoxidables, el aluminio, el níquel y sus aleaciones o el titanio pueden ser grabados químicamente.

Ciertos materiales como el aluminio o el titanio los cuales son algo difíciles de procesar por estampación debido a su naturaleza blanda y dura, respectivamente, pueden ser utilizados sin problema.

Por tanto las limitaciones en cuanto a tipos de materiales es prácticamente nula.

- **Limpieza y laminación:** la superficie de material debe de estar limpia de posibles desechos antes de ser recubierta con una capa fotorresistente sensible a luz ultravioleta.
- **Impresión y Grabado:** se somete el conjunto a una luz ultravioleta que mediante una máscara, consigue grabar el diseño de las placas bipolares en el recubrimiento.

Posteriormente el conjunto se ve bañado por el producto químico que va disolver el material de las zonas impresas, grabando perfectamente el material.

- **Decapado, inspección y finalización:** se elimina la capa fotorresistiva y se retira el material restante, dejando únicamente la pieza útil.

Este proceso tiene por tanto ventajas en cuanto a la generación de tensiones en el material ya que no se ve sometido a impactos ni a una generación de aristas ni rebabas debido a que no tiene que ser cortado.

En cuanto a la precisión, la calidad de las piezas tiene un alto nivel, llegando a espesores inferiores a la estampación. El tipo de diseño tampoco es una limitación.

Aunque no supone costes adicionales posteriores al proceso principal, la inversión inicial de las instalaciones es alta y puede suponer una limitación mantener las mismas.



Otros procesos menos utilizados pero que pueden tenerse en cuenta son la forja, la fundición, el mecanizado de tocho o el electroformado.

Adicionalmente a los procesos nombrados, otra variante a tener en cuenta es el corte por láser. En este caso los problemas principales surgen del calor generado por la herramienta sobre los bordes que va generando.

Estas altas temperaturas pueden provocar deformaciones debidas a las tensiones térmicas que se inducen. Aunque el comportamiento del material puede llegar a ser controlado, las tensiones térmicas pueden suponer una limitación para cumplir con los exigentes requisitos de estos componentes.

### **2.3.1.2. Procesos de recubrimiento**

Como se ha visto, es imprescindible el recubrimiento de las placas bipolares metálicas para asegurar su correcto funcionamiento y asegurar que las características principalmente contra la corrosión y la resistencia de contacto son las correctas.

Deben mantener la conductividad eléctrica y tener buena adhesión al material, soportando las expansiones en conjunto que tenga la pieza debido a cambios térmicos.

Existen diversos procesos capaces de cubrir estas necesidades de fiabilidad pero se debe tener en cuenta también el factor coste. La elección del proceso dependerá del tipo de recubrimiento a usar y la base.

#### Electrodeposición

La electrodeposición consiste en la aplicación del recubrimiento metálico sobre la superficie base que está sometido a una corriente eléctrica. Los elementos que se consiguen depositar son cationes.

Es habitual hablar del proceso de galvanizado en este caso, este consiste en el recubrimiento de zinc con el objetivo de proteger a la pieza en la que se va a depositar de la corrosión. Los espesores de este proceso son de micras, varios ordenes de magnitud más grandes que los nanómetros que se pueden alcanzar en los procesos que se van a detallar a continuación.

Algunas placas bipolares fabricadas de aluminio o aleaciones de aluminio usan este proceso de recubrimiento.

#### Deposición física de vapor (PVD)

Método de deposición al vacío usado para realizar recubrimientos de poco espesor, teniendo un gran control sobre esta característica.



Es un proceso físico-térmico que consigue transformar el material del recubrimiento, en este caso suelen ser nitruros como TiN, CrN o ZrN (también pueden ser carburos y otros materiales), en estado de plasma gaseoso que consiguen a través del vacío depositarse por condensación átomo a átomo sobre la superficie. Es decir, pasa de estar condensado, a fase de vapor y de esta vuelve a condensarse pero ya en forma de una fina capa superficial.

Este tipo de deposición va a aportar, normalmente, mayor dureza a la pieza y una mejor resistencia contra la oxidación, sin aumentar la resistencia de contacto que procesos como el galvanizado u otros procesos de electrodepositado.

Se aplican varias capas, las necesarias hasta alcanzar el espesor requerido, suele establecerse el rango habitual entre 2 nanómetros y 6 micrómetros.

Se consigue una buena adherencia sobre la superficie y una gran durabilidad. Además, producen fuerzas de compresión que consiguen reforzar los bordes de la pieza. Su temperatura de operación habitual está entre 400 y 600°C. Asimismo, no tiene un gran impacto ambiental y tampoco necesita tratamientos de limpieza posteriores a su realización.

Dentro de la deposición física de vapor existen distintas variantes como por ejemplo, la Pulverización Catódica por Magnetron (MS) o el Recubrimiento Ionico por Arco (AIP).

***Magnetron Sputtering (MS)***: es uno de los principales tipos de PVD y que más se usa en la realización de recubrimientos de materiales. El tiempo medio de deposición es de 15 minutos y consigue espesores de 60 nm. El material más usado como recubrimiento en estos casos es el Nitruro de titanio, entre otros.

***Recubrimiento Iónico por Arco (AIP)***: se recubre la superficie de la pieza, cargada negativamente, mediante las cargas positivas generadas por un arco eléctrico que ionizan el vapor del material con el que se va a revestir.

También suelen usarse nitruros, consiguiendo recubrimientos muy adhesivos y duros. Es una de las técnicas que proporciona mejores resultados en cuanto a la resistencia ante corrosión.



### Deposición química de vapor (CVD)

Este tipo de deposición puede realizarse tanto al vacío como a presión atmosférica. Al ser una reacción química en la que se producen subproductos (volátiles), estos se deben eliminar con otra corriente que los saca de la cámara de operación.

El proceso de deposición consiste en la descomposición térmica del compuesto con el que se va a recubrir en la superficie del sustrato para formar la capa protectora. Es necesario el uso de precursores de vapor.

La temperatura de operación en este caso es más alta, 720-900 °C, esto puede suponer problemas según el material que se vaya a tratar.

Este proceso proporciona también muy buenos resultados en cuanto a la calidad y la uniformidad del recubrimiento en términos de resistencia de contrato y de corrosión.

De cara a aumentar la eficiencia, tanto del proceso de diseño y conformado, como el de recubrimientos, es recomendable seguir la forma de trabajo que ya han implementado muchas empresas. Primeramente se reviste las láminas y posteriormente se conforman. El recubrimiento puede aplicarse mediante una línea de rollos.

Las futuras líneas de desarrollo se orientan hacia el uso de la pulverización catódica por magnetrón mediante multicapas de carbono amorfo y otros metales como la plata, el cromo o el zirconio. De esta forma se disminuye el ICR y algunas tensiones internas que podrían surgir entre el recubrimiento y el material base [56].

Mediante este mismo proceso, MS, el uso de Nitruro de Titanio (TiN) y Nitruro de Titanio y Niobio (TiNbN) proporciona buenos resultados.



### 2.3.2. Placas Bipolares de Grafito

En general, el proceso de fabricación de grafito puro muestra dificultades e impedimentos. Su uso directo es a partir de polvo de grafito o láminas. Es un proceso el cual aún no está preparado para su realización en grandes lotes, siendo además, caro.

Es por ello que en su mayoría, las placas bipolares de grafito acaban siendo de polímeros dopados con alto contenido en grafito. Aun así, los principales métodos de fabricación de grafito son el mecanizado, la extrusión y la compresión.

En el caso del mecanizado existen limitaciones en las configuraciones de canales, ya que no pueden ser muy complejas. Por otro lado, en el caso de la extrusión y la compresión, como se ha comentado, acaban siendo mezclas con polímeros termoplásticos y termoestables, respectivamente.

El uso de polímeros también se ve involucrado a la hora de unir piezas de grafito donde pueden usarse para soldadura, en este caso, polímeros termoplásticos.

Algunas de las empresas dedicadas a este tipo de placas bipolares son el grupo Schunk, Ballard o IAG, ya sea a partir de polvo de grafito o de láminas del mismo. Existen líneas de futuros desarrollos alrededor del grafito debido a sus buenas características y la posibilidad de hacer placas bipolares flexibles y reutilizables.

### 2.3.3. Placas Bipolares de Polímeros Dopados

A la hora de procesar placas bipolares de polímeros dopados es recomendable distinguir de nuevo entre termoestables y termoplásticos ya que cada tipo de polímero va a tener una composición que puede ser favorecedora o no al proceso en cuestión.

De forma inicial, el proceso de compresión se va a aplicar a compuestos termoestables, mientras que el proceso de inyección se va a aplicar a compuestos termoplásticos. El proceso de sinterización laser puede aplicarse a ambas, siendo la materia prima a usar en forma de polvo.

#### 2.3.3.1. Compresión / Estampación

Como ya se ha adelantado, el proceso de compresión se realiza sobre compuestos termoestables ya que consigue una buena estructura del material y existen emisiones volátiles, además de tener un corto tiempo de ciclo, debido a que el curado es más rápido que el enfriamiento de los termoplásticos.

Es uno de los procesos más utilizados para grandes volúmenes de producción de placas bipolares de polímeros dopados. Un esquema orientativo es el mostrado en la figura 46.

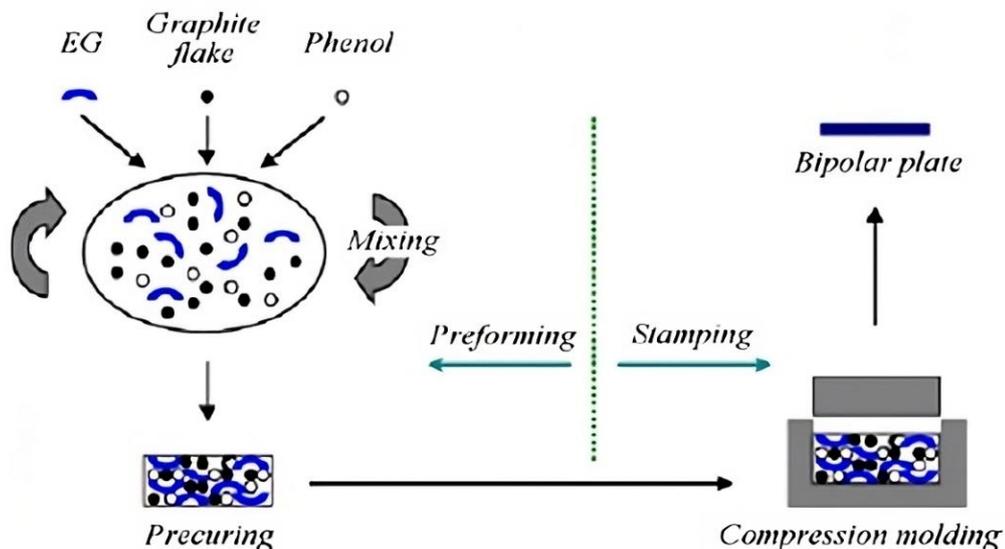


Figura 46. Proceso de Compresión [57]

Una de las principales ventajas de este proceso y relacionado con el hecho de que sea más adecuado para termoestables es que la viscosidad no tiene por qué ser muy baja para poder llevarse a cabo. Pudiendo añadir grandes cantidades de relleno implicando mejores características.

Por otra parte, se trata de una compresión en caliente y plana-fija, teniendo que ser las condiciones operativas constantes a alta temperatura y presión constante, esto en la inyección no es posible en su totalidad.

Para los termoestables es algo crítico ya que es necesario para poder eliminar los gases generados en el curado y de esta forma eliminar la porosidad.

Ambas matrices son sólidas como se puede observar en la figura 47.

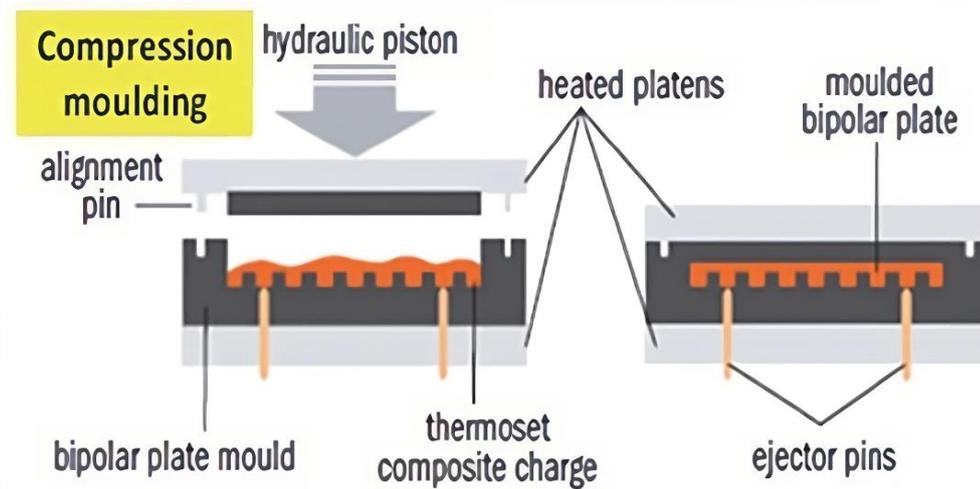


Figura 47. Proceso de compresión en caliente [58]

El modo de producción comenzaría fabricando la mezcla del compuesto polimérico con la composición requerida para las características buscadas, el preformado o precurado.

Esta primera parte del proceso aumenta considerablemente el tiempo de producción. Posteriormente este compuesto se vierte en los moldes y a partir de este punto sería el método de estampado.

### 2.3.3.2. Inyección

Se trata del principal proceso para el tratamiento de materiales termoplásticos. Es uno de los procesos que menos coste de producción en grandes volúmenes de producción tiene, aunque su inversión inicial es grande y más fácil de automatizar. Además, es un proceso en el que se pueden obtener buenas especificaciones de producto relacionadas con su espesor, su peso y tolerancias generales.

El compuesto en forma granular se vierte en una tolva la cual se encarga de ir suministrando el material hacia el tornillo infinito que alimenta el molde. Este tornillo gira desplazando en material en la dirección en la que está colocado el molde.

Los moldes deben de estar sujetos y cerrados para que una vez llenos, el material comience a solidificarse hasta crear las piezas. En ese momento se extrae la misma y se procede a repetir todo el proceso.

En la figura 48 se puede observar un esquema general del proceso.

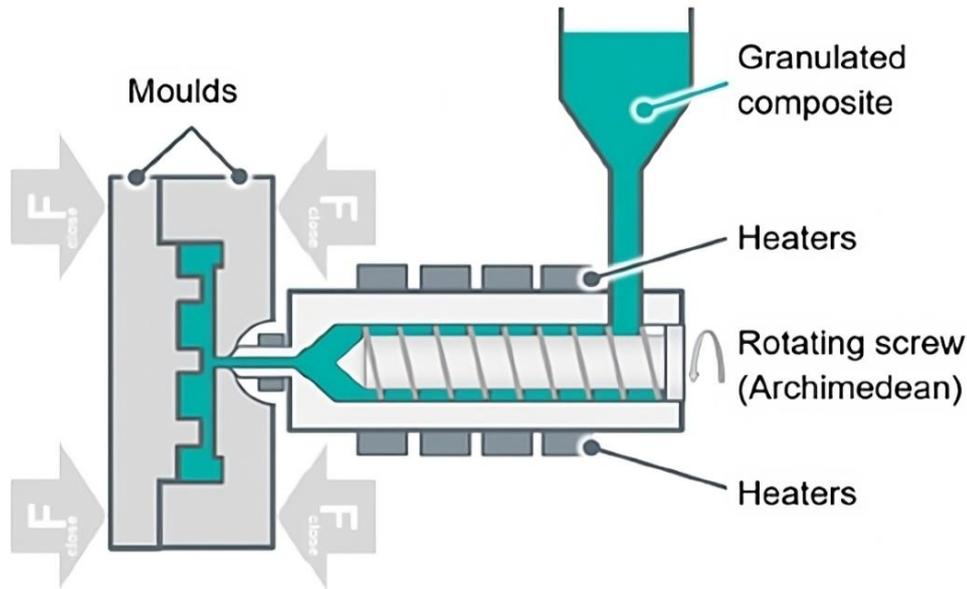


Figura 48. Proceso de Inyección [51]

Aunque el proceso sea sencillo, surgen ciertos problemas que pueden limitar la calidad ideal del producto o aumentar sus costes.

Estos problemas son, el considerable desgaste de las matrices y la limitada relación de tamaño. A estas desventajas dimensionales se les debe sumar que las propiedades eléctricas y térmicas no son tan buenas como en otros casos.

Otra de las desventajas a tener en cuenta y que comparte con el proceso de compresión, es la necesidad de diseñar y fabricar los distintos moldes. Lo que aumenta los costes, sin tener en cuenta el tiempo requerido para ello.

### 2.3.3.3. Sinterizado Láser

Aunque se trata de un método usado también en placas bipolares metálicas, su uso está siendo mayormente en polímeros dopados ya que los puntos de fusión son más bajos. Se genera la pieza a partir de un modelo en tres dimensiones realizado por ordenador a través de un proceso aditivo, lo cual es su principal ventaja.

Al poder realizar el modelo por ordenador, ahorra tiempo y dinero además de dar la posibilidad de poder tener configuraciones de canales complejos.

También es usado para aportar flexibilidad a la pieza si es necesario. Actualmente no está contemplado su uso en la producción en masa.

Como se puede observar en la figura 49, en la parte izquierda se encuentra almacenado el compuesto en cuestión en polvo, este, se desplaza hacia la parte derecha mediante un rodillo y una vez allí, se comienza a generar la pieza.

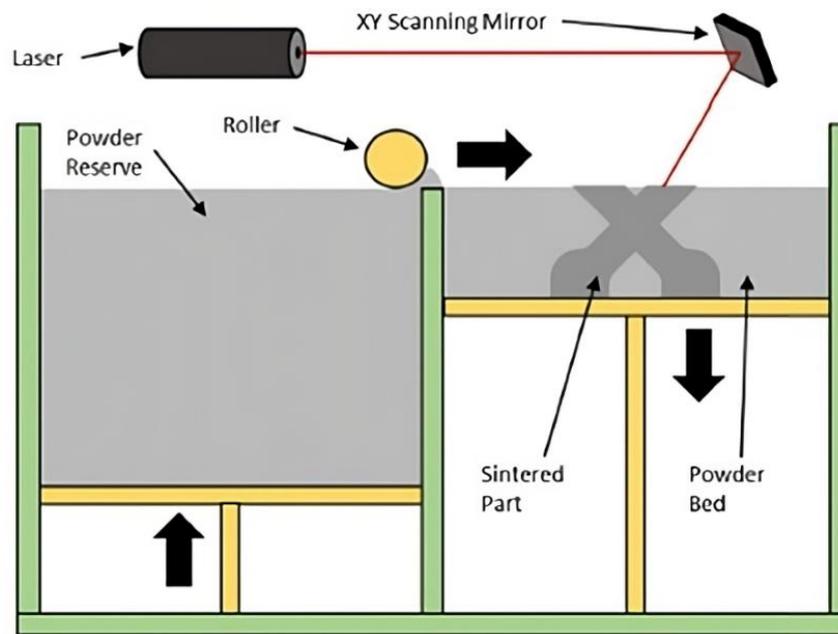


Figura 49. Proceso de Sinterizado Láser [59]

El láser se proyecta sobre un espejo que refleja el haz con dirección al compuesto que se encuentra acumulado en un lecho de polvo de polímero dopado y lo funde.

Una vez termina de fundir el polvo de esa superficie, se baja la parte derecha y se eleva la parte izquierda para desplazar de nuevo y cubrir la parte fundida con otra capa de polvo que también será fundida. De esta forma se va creando la pieza en tres dimensiones.

### 2.3.4. Comparativa

Los principales aspectos relacionados directamente con el proceso de producción del componente, como ya se han mencionado a lo largo de este apartado, son:

- Ratio Área activa/Área total.
- Costes asociados tanto al proceso como a las herramientas.
- Durabilidad del componente.
- Calidad de la pieza.
- Vida útil placa bipolar (placa bipolar entera).
- Tasa de producción.

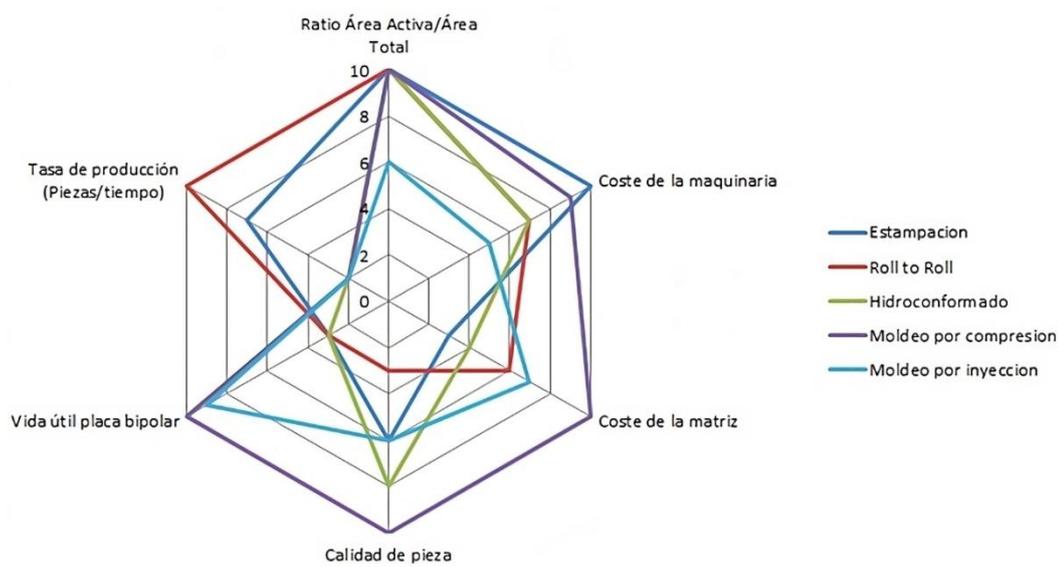


Figura 50. Comparativa aspectos importantes de procesos (Elaboración propia apoyado en [51])

Tanto el estampado como el hidroconformado son procesos realmente factibles para la fabricación de placas bipolares metálicas en serie pero se ven superadas por el proceso mediante rollos.

Totalmente opuesto es la facilidad para cumplir especificaciones en tolerancias, siendo mucho menos factible en roll to roll. Todos ellos requieren una gran inversión inicial.

Entre el estampado y el hidroconformado por tanto, podemos ver diferencias en la calidad superficial, obteniendo resultados menos abrasivos en el hidroconformado, esto mejora la resistencia de contacto y la durabilidad de la placa. También tiene un mejor comportamiento ante la recuperación elástica del material, reduciendo la posibilidad de arrugas o grietas.

En el nivel de producción también hay diferencia como ya se ha comentado, siendo superior en este aspecto la estampación.



Es interesante también la mejora considerable, 60%, de algunas empresas al implementar el proceso roll to roll ya sea mediante PVD o CVD en comparación con galvanizados u otras electrodeposiciones [60]. En el caso de CVD, el tiempo requerido es algo superior y la capacidad para controlar la cantidad depositada es menor que en PDV. Esta última, suele tener una mejor superficie resultante, más lisa.

La electrodeposición es un proceso muy estudiado y tiene ventajas en cuanto a que no tiene limitaciones de tamaño o que su realización en producciones en masa es muy viable.

Una de las principales diferencias entre los dos principales procesos de fabricación de placas bipolares de polímeros dopados, es la capacidad de relleno de la matriz base. Este aspecto, como ya se ha tratado en el apartado de materiales, es muy importante ya que condiciona directamente las características eléctricas de la pieza.

El proceso con mayor capacidad de producción de materiales con gran composición de rellenos es la compresión. Esto principalmente se debe a que en el caso de la compresión, el compuesto se introduce directamente en el molde a la espera de ser comprimido. Mientras que en la inyección tiene que desplazarse por el tornillo y este puede llegar a obstruirse con este tipo de partículas.

En el caso de la compresión, el material puede tener una alta viscosidad, mientras que en la inyección, el compuesto debe de ser poco viscoso para que pueda fluir fácilmente por el tornillo rotativo.

Cabe destacar, que aunque principalmente, un mayor contenido de relleno implique mayor conductividad y por ende mejores eficiencia de las placas. Este parámetro depende también en su mayoría de la dirección en la que se estructuran los mismos, pudiendo ser mejor en la inyección, por lo que en muchos casos, ambos procesos acaban siendo equiparables.

### Capítulo 3: Análisis económico

En este capítulo se va a analizar económicamente la producción a gran escala de placas bipolares metálicas mediante un proceso semi-automatizado. Se realizará un desglose de los distintos costes asociados a la fabricación de placas bipolares.

Todos los procesos de fabricación se ven desarrollados en la propia empresa, completándose la fabricación de las placas a lo largo de 4 células o estaciones de trabajo. Cada una de ellas se explicará de forma más precisa en el apartado correspondiente a los procesos de fabricación.

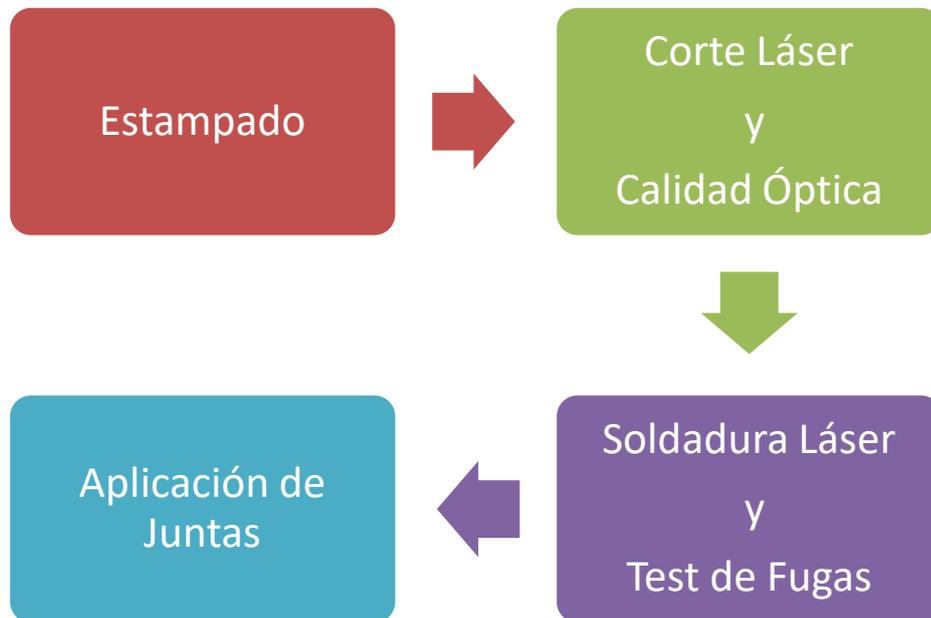


Figura 51. Esquema de Células de Trabajo de la Línea de Producción (Elaboración propia)

Los distintos factores a estudiar son:

- **Inversión inicial**, asociada a la maquinaria y células de trabajo necesarias para la producción de placas bipolares.
- **Materia prima**, coste asociado a la compra de los recursos materiales para la fabricación de placas bipolares.
- **Costes de operación y mantenimiento de las instalaciones del proceso de producción de placas bipolares**, donde se ven incluidos los sueldos de los trabajadores de las células de trabajo y los servicios generales o auxiliares.
- **Ingresos**, derivan de la venta del producto final, es decir, de la venta de las placas bipolares fabricadas.



Antes de comenzar a desarrollar los diversos costes asociados, se va a estimar el tiempo útil anual de producción.

Inicialmente se va a abordar el estudio estableciendo un único turno de 8 horas diarias en un periodo de 218 días laborables.

Tipo de día	Cantidad
Días al año	365
Sábados y domingos	104
Días de vacaciones	22
Días festivos	14
Días de asuntos propios	3
Días de formación de trabajador	4
<b>Días laborables</b>	<b>218</b>

Tabla 5. Días laborables (Elaboración propia)

Esto implica un total de 1.744 horas laborables requeridas al año.

Tipo de día	Cantidad
Turnos	1
Horas por turno	8
Días laborables al año	218
<b>Horas laborables requeridas al año</b>	<b>1.744</b>

Tabla 6. Días y Horas requeridas (Elaboración propia)

Para el cálculo del tiempo útil de fabricación es necesaria la obtención del rendimiento operacional de las máquinas, OEE, de sus siglas en inglés, *Overall Equipment Effectiveness*.

Y se calcula a partir de tres parámetros, la disponibilidad, el rendimiento y la calidad.

$$OEE(\%) = Disponibilidad \cdot Rendimiento \cdot Calidad$$

Ecuación 2. Rendimiento Operacional de las Máquinas

- La disponibilidad, es el tiempo que las máquinas han estado funcionando en comparación con el tiempo que han estado disponibles para funcionar y se ha estimado en un 95%.
- El rendimiento, es el cociente entre el tiempo óptimo de producción y el tiempo real de producción, se ha estimado en un 95%.
- La calidad, es el porcentaje de placas bipolares que sirven para fabricar *stacks*, el cual se supone del 100% pero se va a restar un 2% asociado al concepto de SCRAP, índice que mide la cantidad de producto no conforme que no se puede recuperar ni convertir en producto de venta, se considera residuo e impacta de forma directa a la calidad. Por tanto se obtiene un valor de la calidad del 98%.

Se fija como hipótesis inicial el establecimiento de los anteriores porcentajes para alcanzar un rendimiento operacional superior al 85%, valor habitualmente considerado como un buen rendimiento operacional de las máquinas, teniendo en cuenta las distintas pérdidas producidas.



Figura 52. Parámetros del Rendimiento Operacional de las Máquinas [61]

Por lo tanto, el OEE obtenido mediante la ecuación 2 es,

$$OEE = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,8845 \rightarrow 88,45\%$$

El tiempo útil de fabricación anual bajo las condiciones establecidas es,

$$Tiempo \text{ útil anual} = 1.744 \cdot 0,8845 = 1.542 \text{ horas}$$

### 3.1. Inversión inicial

La inversión inicial va directamente asociada a la maquinaria necesaria para la realización del proceso de producción de cada una de las células de trabajo.

En la primera célula de trabajo, el coste a imputar de la estampadora es de 500.000 €.

En la segunda célula de trabajo, los costes iniciales asociados son de la cortadora láser, 300.000 €, y de la comprobación de calidad mediante métodos ópticos, 80.000 €.

En la tercera célula de trabajo, donde se ubican la soldadura láser y el control de calidad mediante test de fugas, los costes son de 310.000 € y 190.000 €, respectivamente.

Por último y como cuarta célula de trabajo, la maquinaria necesaria para la aplicación de juntas tiene un coste de 130.000 €.

Los distintos costes asociados a la inversión inicial de las máquinas han sido obtenidos de acuerdo con las ofertas recibidas por expertos de diferentes proveedores o por expertos del sector en *Fundación Cidaut*.

Se ha establecido que el periodo de amortización de la maquinaria sea de 10 años, mientras que el valor residual se ha fijado en el 10% de la inversión inicial. Valores habitualmente usados en la industria.

$$Cuota\ Anual = \frac{Inversión\ inicial - Valor\ Residual}{Periodo\ de\ Amortización}$$

Ecuación 3. Cuota Anual de Amortización

Los datos asociados a cada uno de los procesos se recogen en la siguiente tabla 7.

Proceso	Inversión Inicial (€)	Valor Residual (€)	Base Amortizable (€)	Cuota Anual (€)
Estampado	500.000,00	50.000,00	450.000,00	45.000,00
Corte Láser	300.000,00	30.000,00	270.000,00	27.000,00
Calidad Óptica	80.000,00	8.000,00	72.000,00	7.200,00
Soldadura Láser	310.000,00	31.000,00	279.000,00	27.900,00
Test de Fugas	190.000,00	19.000,00	171.000,00	17.100,00
Aplicación de Juntas	130.000,00	13.000,00	117.000,00	11.700,00
<b>Total</b>	<b>1.510.000,00</b>	<b>151.000,00</b>	<b>1.359.000,00</b>	<b>135.900,00</b>

Tabla 7. Costes de Inversión Inicial y anualidad (Elaboración propia)

El coste total anual referido a las anualidades de las máquinas es de 135.900 €.

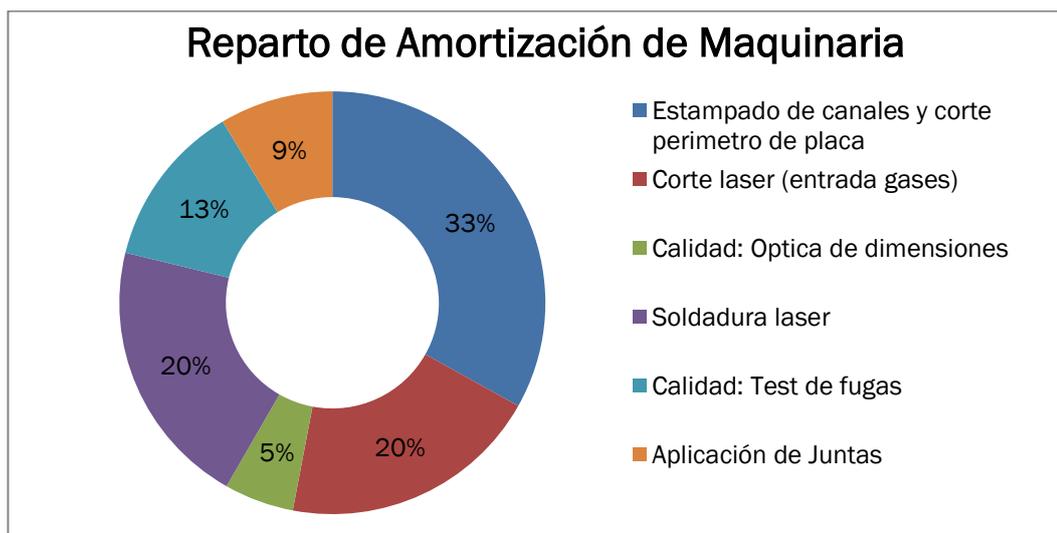


Figura 53. Reparto de Amortización de Maquinaria (Elaboración propia)



### 3.2. Materia prima

En este apartado se han planteado varios escenarios tanto en la compra de materia prima para las placas bipolares como para el sellado de las mismas. Siendo el número total de placas bipolares fabricadas de 104.772,28 unidades al año (cifra calculada a partir del tiempo de ciclo del apartado 3.3.3).

En el caso del material base de las placas bipolares, existe la posibilidad de comprar el acero inoxidable 316L directamente recubierto o por lo contrario, comprar el acero inoxidable 316L, el recubrimiento y realizar el proceso de recubrimiento mediante un proceso, por ejemplo, de PVD.

Por otro lado, en el proceso de sellado, se ha planteado la utilización de juntas planas comercializadas en bobinas, por lo que es necesario su recorte previo. O el uso de juntas de hilo, comercializado en tubos con el material de sellado y su correspondiente máquina para su depositado.

El acero inoxidable 316L ya recubierto y vendido por Sandvik [60] tiene una densidad de  $8.050 \text{ kg/m}^3$  y un precio de 9,63 €/kg. La venta de este material se produce en bobinas de 510 mm de ancho y un espesor de 0,10 mm. Para cada una de las placas bipolares es necesario 0,25 kg, ya que las dimensiones de la plancha para estampar son de 310x510x0,10 mm, lo que implica un volumen de  $15.810 \text{ mm}^3$ . El coste por placa bipolar es de 2,45 €, sumando un total de 256.687,60 € anuales.

El acero inoxidable 316L sin recubrir tiene un precio de 3,50 €/kg, como para cada una de las placas bipolares es necesario 0,25 kg, el coste por placa bipolar es de 0,89 €. Siendo el coste total anual de este material de 93.340,94 € anuales.

El recubrimiento de nano óxidos mediante PVD sobre acero inoxidable, realizado por la empresa PVT [62] tiene un coste por placa bipolar estimado de 5,00€. Ascendiendo a un coste anual de 523.861,40 €.

Las juntas planas de PET con recubrimiento de silicona y vendido por Lauferberg [63] tiene un precio de 21,94 €/m, con una anchura de bobina de 0,56 m. Como para cada una de las placas bipolares es necesario 0,30 m de longitud, el coste por placa bipolar es de 6,58€. Por lo que el coste anual es de 689.532,57 €.

Las juntas de hilo de Silicona Elastosil E14 tiene un precio de 0,036 €/ml. El perímetro a sellar es de 2.045 mm por cada lado de la placa bipolar. El cordón necesario es de 2 mm de radio, lo que significa  $12,57 \text{ mm}^2$  de área y un volumen de  $25.698,23 \text{ mm}^3$  por cada lado, siendo necesario por placa



bipolar un volumen de 51,4 ml en total. El coste por placa bipolar por tanto es de 1,85 €. El coste por año de hilo para sellado es de 193.683,55 €.

Los costes de materia prima, han sido obtenidos o estimados de acuerdo con ofertas de los respectivos proveedores. Además, los gastos de gestión y transporte del material hasta la localización de la empresa están incluidos en el precio de venta.

Los costes anuales de las distintas opciones se recogen en la siguiente tabla 8.

Material	Coste (€)
Acero inoxidable SS316L recubierto con Sandvik	256.687,60
Acero inoxidable SS316L	93.340,94
Recubrimiento PVD	523.861,40
Juntas planas	689.532,57
Juntas de hilo	193.683,55
Total anual (SS316L + Recubrimiento + Junta Plana)	1.306.734,92
Total anual (SS316L Sandvik + Junta Plana)	946.220,17
Total anual (SS316L + Recubrimiento + Junta de Hilo)	810.885,90
Total anual (SS316L Sandvik + Junta de Hilo)	450.371,15

Tabla 8. Costes Materia Prima (Elaboración propia)

La opción más viable en una producción a gran escala es el uso de acero inoxidable 316L ya recubierto por Sandvik y el uso de juntas de hilo. Por tanto, es la elegida para realizar el estudio, siendo los costes anuales en materia prima de 450.371,15 €.

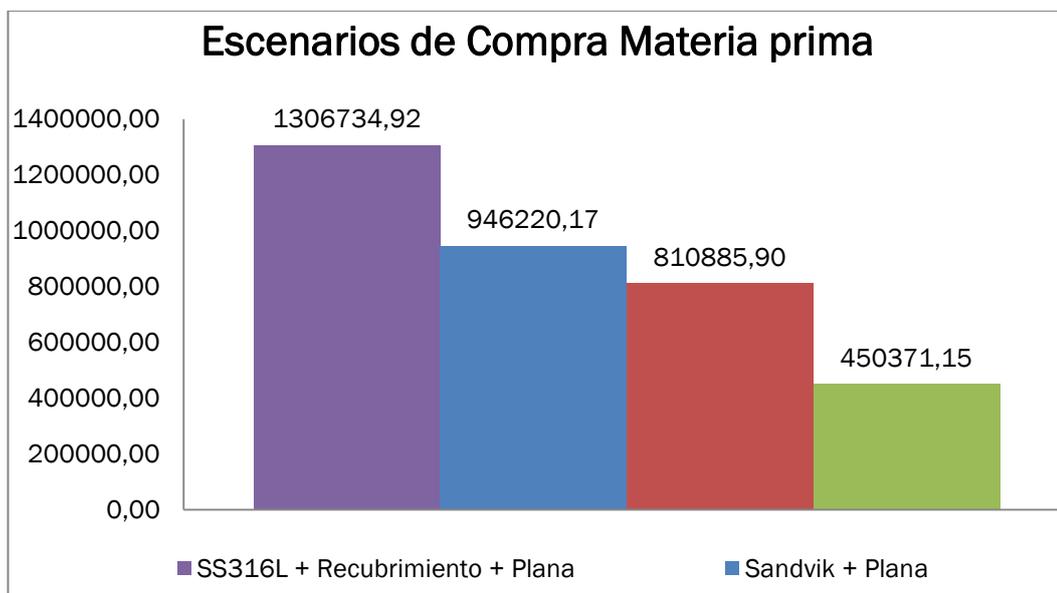


Figura 54. Comparativa de Escenarios de Compra de Materia Prima (Elaboración propia)



Debido a la gran producción a realizar, los costes de los pedidos de material bajan considerablemente. También se produce un ahorro de inversión inicial en las máquinas de PVD, que tienen un alto coste y en el sueldo del trabajador de esta célula de trabajo. Además, esta máquina requiere un alto tiempo de ciclo, necesitando de varias etapas para completar el recubrimiento, algo que reduciría los niveles de producción notablemente.

Las pérdidas de material en cada proceso han sido imputadas en los costes por pérdida de calidad, fijados como el 2% de SCRAPS en el cálculo del OEE.



### 3.3. Costes de operación y mantenimiento

Se van a detallar los costes asociados a la operación y el mantenimiento del proceso de fabricación de placas bipolares donde se ven involucrados los distintos tipos de costes de mano de obra, los respectivos costes de servicios generales o auxiliares y los procesos.

#### 3.3.1. Mano de Obra

Los costes de Mano de Obra (MO) se van a dividir en Mano de Obra Directa (MOD), es decir, el coste del personal que tenga contacto directo con el producto en su etapa de fabricación y en Mano de Obra Indirecta (MOI), los cuales no intervienen directamente con el proceso de producción.

Los costes asociados a MOD se corresponden a cada una de las células de trabajo. Constan de un operario por cada una de las operaciones realizadas en ellas, con un total de 6 operarios.

El sueldo anual según el convenio colectivo de la industria, las nuevas tecnologías y los servicios del sector del metal de Valladolid [64] de los oficiales de primera corresponde a 20.510,50 €.

Lo que implica un total de Mano de Obra Directa de,

$$MOD = 20.510,50 \cdot 6 = 123.063,00 \text{ €}$$

El coste debido a MOI ha sido calculado como el 20% de los costes de mano de obra directa [65], como viene siendo habitual en los proyectos de industria manufacturera, referido a puestos administrativos, entre otros.

A este coste se le ha sumado la mano de obra del jefe de turno, al que según el convenio anterior [64] le corresponden 25.850,58 €/año.

$$MOI = (MOD_{Total} \cdot 0,20) + MO_{Jefe\ de\ Turno} = 50.463,18 \text{ €}$$

Es necesario tener en cuenta en el análisis económico los posibles costes por absentismo, esta tasa se ha fijado en un 6,5% de la mano de obra directa [66].

$$Costes\ por\ Absentismo = MOD_{Total} \cdot 0,065 = 7.999,10 \text{ €}$$

Mano de Obra	Coste (€)
Mano de Obra Directa	123.063,00
Mano de Obra Indirecta	50.463,18
Absentismo	7.999,10
<b>Total MO</b>	<b>181.525,28</b>

Tabla 9. Costes de Mano de Obra (Elaboración Propia)

Supone por tanto un coste total por mano de obra de 181.525,28 €.



### 3.3.2. Servicios Generales o Auxiliares

Los costes referidos a electricidad, agua, administración, mantenimiento de instalaciones o herramientas, se agrupan en los llamados Servicios Generales o Auxiliares. En este caso, se ha supuesto un porcentaje del 20% sobre el coste de los gastos indirectos [65], es decir, la mano de obra indirecta y las amortizaciones.

$$\begin{aligned} \text{Costes por Servicios Generales} &= (MOI + \text{Amortiz.}) \cdot 0,20 = \\ &= 50.463,18 + 135.900,00 = 37.272,64 \text{ €} \end{aligned}$$

En general, los útiles de trabajo de las máquinas utilizadas albergan un gran número de ciclos de vida útil por lo que el coste asociado anualmente no es muy grande.

Los porcentajes asociados a la repartición en cada célula son los recogidos en la tabla 10.

Célula de Trabajo	Reparto (%)	Coste (€)
Estampado	20	7.454,53
Corte Láser y Calidad Óptica	20	7.454,53
Soldadura Láser y Test de Fugas	30	11.181,79
Aplicación de Juntas	10	3.727,26
Otros servicios	20	7.454,53
Total anual	100	29.818,11

Tabla 10. Costes de Servicios Generales (Elaboración propia)

Supone un coste anual de 29.818,11 €.



### 3.3.3. Procesos

Se van a indicar los distintos parámetros a tener en cuenta en el proceso, como pueden ser los tiempos de operación de máquina asociados a cada proceso, su unidad de fabricación o sus potencias.

En el caso de los tres primeros procesos la unidad de fabricación es la placa monopolar, correspondiente a media placa bipolar y en los tres siguientes, es la placa bipolar.

El coste por uso afecta de forma muy pequeña en el coste de producción final, es por ello, que aunque existen ociosidades de las máquinas, se ha supuesto un trabajo constante durante todo el año.

Se ha calculado el coste por uso a partir de las fichas técnicas de las máquinas proporcionadas por expertos de diversos proveedores o consultas a expertos del sector de la *Fundación Cidaut*, teniendo en cuenta únicamente las de mayor potencia, la estampación, la soldadura láser y el corte láser.

La potencia del láser en la soldadura y el corte es de 2.000 W, que fijando en un 10% el rendimiento del láser, suponen unas potencias de 20.000 W cada una. Por otro lado, la estampación supone 10.000 W, sumando un total de 50.000 W. El coste por tanto es de 13.906,66 €. Este valor ha sido calculado a partir del precio medio de 0,15948 €/kWh según la OMIE [67] de la electricidad en España.

El tiempo de ciclo (TC) junto al desembolso inicial es el factor más importante dentro de las características del proceso de producción, siendo este el tiempo transcurrido entre la fabricación de 2 piezas consecutivas, coincidente con el tiempo del cuello de botella. Esto se debe a que el aumento del tiempo de ciclo es el parámetro que más afecta al coste final por placa o por kilovatio de potencia.

Todas las máquinas tienen una capacidad de una sola placa monopolar o una sola placa bipolar, según el tipo de máquina. A excepción de la operación de estampación, cuya capacidad es de dos placas monopolares, siendo capaz de conformar la placa monopolar anódica y catódica a la vez.

Los costes asociados al desarrollo y fabricación del utillaje de todas las máquinas necesarias en el proceso, como la matriz de estampación para la realización de los canales y el perímetro de la placa monopolar, se incluyen en el coste de la inversión inicial proporcionados por cada proveedor.

A continuación se va a describir cada una de las operaciones de las que se ve formada la línea de producción.



En la primera célula de trabajo se encuentra la estampadora, siendo necesarias dos operaciones para satisfacer los requisitos de espesor sin que el material sufra desperfectos. Su tiempo de operación de máquina se ha estimado en 30 segundos.

Posteriormente, las placas pasan a la segunda célula de trabajo, donde primeramente se someten a una operación de corte láser para la realización de los orificios de refrigeración y de entrada y salida de gas reactivo, lo que corresponde con 779 mm. Como su velocidad de corte es de 3,74 m/min tiene un tiempo de operación de máquina de 12,5 segundos por cada placa monopolar.

Después se realiza una prueba de calidad óptica, donde se comprueban las características dimensionales generales de las placas monopolares tras la estampación y el corte mediante un análisis comparativo en dos dimensiones. Esta operación tiene un tiempo de operación de máquina estimado de 14 segundos por cada placa monopolar.

En el supuesto de no cumplir los requisitos dimensionales, la pieza será retirada y se realizarán las comprobaciones correspondientes para solucionar la falla en los procesos anteriores.

En este punto, el conjunto de operaciones de la segunda estación componen el cuello de botella de la línea de producción. Por lo que será el principal objeto de estudio para mejorar el proceso.

Es necesario realizar las operaciones de la segunda estación dos veces para obtener dos placas monopolares. Y por lo tanto, un conjunto de placa bipolar.

Ambas placas monopolares pasan a la tercera célula de trabajo, aquí se realiza la soldadura láser. En este punto del proceso, la unidad de producción pasa a ser la placa bipolar entera. Tiene una velocidad de soldadura de 3 m/min y es necesario soldar una distancia total de 2.045 mm. El tiempo de operación de máquina es de 40 segundos por placa bipolar.

Es uno de los procesos más críticos ya que va a determinar si existen fugas o no en los distintos canales. Este tipo de fallo implica una bajada muy grande del rendimiento de la pila o directamente el no funcionamiento de la misma.

En esta célula también se realiza la calidad del proceso anterior, la detección de fugas. Es muy importante que las placas bipolares satisfagan los requisitos de calidad de este proceso.

Se realiza la comprobación en y entre los tres canales de flujo, el de hidrógeno, el de aire u oxígeno y el de refrigeración, lo que se traduce en un tiempo de operación de máquina de 20 segundos por placa bipolar.



En caso de que no cumpla con la calidad, esta pieza será retirada y se procederá a la revisión de los procesos anteriores para detectar que está produciendo defectos en el componente. Cabe indicar que tanto en el proceso de calidad óptica como en el proceso de detección de fugas se realiza a la totalidad de la producción.

Como última célula de trabajo y proceso de producción placas bipolares, se aplican las juntas de hilo para conseguir la estanqueidad necesaria. La velocidad de aplicación de juntas es de 10 m/min lo que implican un tiempo de operación de máquina correspondiente a esta célula de 24,5 segundos.

Los distintos tiempos de operación proporcionados, se han obtenido o calculado a través de las ofertas recibidas por proveedores o información proporcionada por expertos de producción de *Fundación Cidaut*, ya sea mediante la obtención directa del tiempo de operación o mediante las velocidades de cada herramienta.

A continuación se resumen los distintos tiempos de operación de máquinas según su unidad de fabricación en las tablas 11 y 12, de cara a obtener el tiempo de ciclo de todo el proceso.

Operación	Tiempo (s)
Estampado	30
Corte Láser	12,5
Calidad: Óptica	14
Tiempo de Operación de Máquinas Total	56,5

Tabla 11. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Monopolares (Elaboración propia)

Como son necesarias dos placas monopolares, el tiempo de operación total de este conjunto pasa a ser de 83 segundos. Ya que deben duplicarse los tiempos del corte láser y de la calidad óptica.

Operación	Tiempo (s)
Soldadura Láser	40
Calidad: Test de Fugas	20
Aplicación de Juntas	24,5
Tiempo de Operación de Máquinas Total	84,5

Tabla 12. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Bipolares (Elaboración propia)

El tiempo de operación total del conjunto de máquinas de placas bipolares es de 84,5 segundos.

El diagrama de proceso descrito se puede observar en la figura 55.



Capacidad:



Figura 55. Diagrama de proceso (Elaboración propia)

Como tiempo de producción por unidad o tiempo total que tarda una pieza desde que entra al sistema hasta que sale, se obtiene una suma de 167,5 segundos.

Como ya se ha anticipado en la descripción de los procesos, el valor que rige nuestra capacidad de producción es el tiempo de ciclo, equivalente al cuello de botella del proceso.

Por ende, se obtiene un tiempo de ciclo de 53 segundos con el que se ha calculado la capacidad de producción de placas bipolares ya que la producción debe esperar a tener dos placas monopolares para poder continuar con la operación de soldadura.

$$TC = (12,5 + 14) \cdot 2 = 53 \text{ segundos}$$

### 3.4. Ingresos

Los ingresos generados por la venta, en su totalidad, de las placas bipolares fabricadas, han sido calculados a partir de los costes que se ven recogidos de los anteriores puntos principales en la tabla 13 y figura 56.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	135.900,00
Materias Primas	450.371,15
Operación y Mantenimiento	232.704,57
<b>Total anual</b>	<b>818.975,72</b>

Tabla 13. Costes imputados a la producción (Elaboración propia)

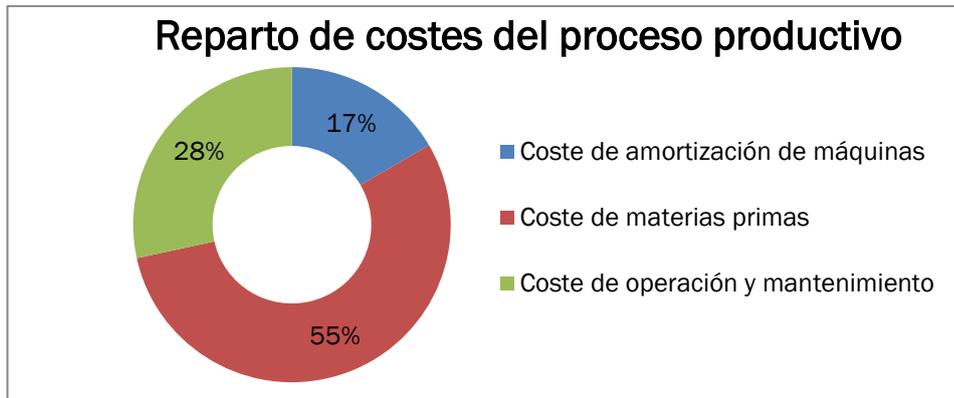


Figura 56. Reparto de costes del proceso productivo (Elaboración propia)

El número de placas bipolares fabricadas es de 104.772,28 unidades anuales. Siendo el coste de cada placa de 7,82 €/placa bipolar.

La configuración del *stack* es la mostrada en la figura 57, por tanto la capacidad de un *stack* de 50 kW debe estar formada por 300 celdas y por ende 300 placas bipolares.

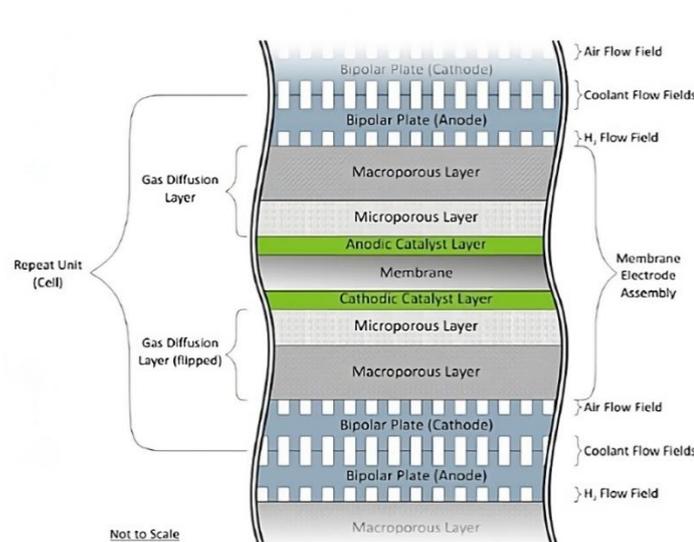


Figura 57. Esquema de Colocación de Componentes en una Celda [68]



Para el cálculo del coste de cada placa por kilovatio es necesario tener en cuenta el punto de funcionamiento de una celda con un área activa de  $441 \text{ cm}^2$ , como se muestra en la tabla 14.

Concepto	Cantidad
Voltaje	0,65 V
Intensidad	265 A
Potencia bruta	172,25 W

Tabla 14. Punto de funcionamiento de una celda

Como el *stack* se compone de 300 celdas, se obtienen las siguientes características brutas y netas en las tablas 15 y 16, respectivamente.

Concepto	Cantidad
Densidad de potencia bruta	$0,3906 \text{ W/cm}^2$
Densidad de corriente bruta	$0,6009 \text{ A/cm}^2$
Potencia bruta total	51.675 W

Tabla 15. Características brutas del *stack*

Concepto	Cantidad
Densidad de potencia neta	$0,3779 \text{ W/cm}^2$
Densidad de corriente neta	$0,5813 \text{ A/cm}^2$
Potencia neta total	50.000 W

Tabla 16. Características netas del *stack*

Según el tiempo de ciclo obtenido de 53 segundos y la capacidad total de producción de placas bipolares de 104.772,28 unidades anuales, se obtiene la siguiente capacidad productiva de *stacks* y correspondiente potencia neta anual.

$$N^{\circ} \text{ de Stacks} = \frac{104.772,28 \text{ Placas Bipolares}}{300 \text{ Placas Bipolares/Stack}} = 349,24 \text{ stacks}$$

$$\text{Potencia Neta Anual} = 349,24 \text{ stacks} \cdot 50 \text{ MW/stack} = 17,46 \text{ MW}$$

A partir de estos valores, se obtiene el coste por potencia neta, siendo este valor el más relevante a la hora de comparar y estudiar nuestro proceso, junto al coste por placa bipolar.

$$\frac{\text{Coste de Producción Anual}}{\text{Potencia Neta Anual}} = \frac{818.975,72 \text{ €}}{17.462,05 \text{ kW}} = 46,90 \text{ €/kW}$$

Por la venta de las placas bipolares producidas, fijando un beneficio industrial del 15% y por tanto su PVP en 10,88 €/placa bipolar, los ingresos ascenderían a 941.822,07 €.



Mediante estos datos se va a calcular el beneficio bruto y neto, junto al flujo de caja y el periodo de retorno. Para el cálculo del beneficio neto, se ha aplicado un impuesto de beneficio de sociedades de tipo general del 25%.

$$\begin{aligned} \text{Beneficio Bruto} &= \text{Ingresos} - \text{Costes} = 941.822,07 - 818.975,72 = \\ &= 122.846,36 \text{ €} \end{aligned}$$

Ecuación 4. Beneficio Bruto

$$\text{Beneficio Neto} = \text{Beneficio Bruto} - \text{Beneficio Bruto} \cdot 0,25 = 92.134,77 \text{ €}$$

Ecuación 5. Beneficio Neto

$$\text{Flujo de Caja} = \text{Beneficio Neto} + \text{Amortizaciones} = 228.034,77 \text{ €}$$

Ecuación 6. Flujo de Caja

Mediante el periodo de retorno se asegura que la recuperación de la inversión inicial debida a las máquinas se va a recuperar antes de que sea necesaria su renovación.

$$\text{Periodo de Retorno} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo de Caja}} = \frac{1.510.000,00}{228.034,77} = 6,62 \text{ años}$$

Ecuación 7. Periodo de Retorno

El resumen final de resultados es el mostrado en la tabla 17.

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	104.772,28 uds
Capacidad de Producción: Stacks	349,24 uds
Capacidad de Producción: Potencia	17,46 MW
Coste por placa bipolar	7,82 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	46,90 €/kW
PVP	10,88 €
Beneficio neto	92.134,77 €
Periodo de Retorno	6,62 años

Tabla 17. Resumen de Resultados (Elaboración Propia)

Adicionalmente, se ha calculado el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) [69] para los 10 primeros años, periodo en el cual se cumple la amortización de la maquinaria.

Para este cálculo se ha fijado una inflación anual del 3% y un interés nominal del 3,25%, resultado de su cociente, el interés real.

$$\text{Interés real} = \frac{\text{Interés nominal}}{\text{Inflación anual}} = \frac{3,25\%}{3\%} = 1,083\%$$

Ecuación 8. Interés real

Los flujos, en euros (€), aplicando dicha inflación, se muestran en la siguiente tabla 18.



Año	1	2	3	4
Amortización	135.900,00	139.977,00	144.176,31	148.501,60
Gastos	818.975,72	843.544,99	868.851,34	894.916,88
Ingresos	941.822,07	970.076,74	999.179,04	1.029.154,41
Beneficio Bruto	122.846,36	126.531,75	130.327,70	134.237,53
Beneficio Neto	92.134,77	94.898,81	97.745,78	100.678,15
Flujo de Caja	228.034,77	234.875,81	241.922,09	249.179,75

Año	5	6	7
Amortización	152.956,65	157.545,35	162.271,71
Gastos	921.764,38	949.417,31	977.899,83
Ingresos	1.060.029,04	1.091.829,90	1.124.584,81
Beneficio Bruto	138.264,66	142.412,60	146.684,98
Beneficio Neto	103.698,49	106.809,45	110.013,73
Flujo de Caja	256.655,14	264.354,79	272.285,44

Año	8	9	10
Amortización	167.139,86	172.154,05	177.318,68
Gastos	1.007.236,83	1.037.453,93	1.068.577,5
Ingresos	1.158.322,35	1.193.072,02	1.228.864,17
Beneficio Bruto	151.085,52	155.618,09	160.286,63
Beneficio Neto	113.314,14	116.713,57	120.214,97
Flujo de Caja	280.454,00	288.867,62	297.533,65

Tabla 18. Flujos de Caja Anuales (Elaboración propia)

Por tanto, siendo  $n$ , la vida económica de la actuación;  $I_0$ , la inversión inicial e  $i_r$ , el interés real o tasa de descuento social, el VAN y TIR tienen los siguientes valores.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Flujo\ de\ Caja_i}{(1 + i_r)^i} = 948.458,72 \text{ €}$$

Ecuación 9. Valor Actual Neto

$$VAN = 0 \rightarrow TIR = 11\%$$

Ecuación 10. Tasa Interna de Retorno

Como se puede observar con los valores obtenidos de VAN y TIR, el proyecto generará beneficios, siendo el valor actual neto de la inversión de 948.458,72 €.

En cuanto al valor del TIR de 11%, implica que el proyecto de implantación de una línea productiva de este tipo es rentable y viable económicamente.

▪ **Escalado a 3 turnos**

Si se escala esta producción a 3 turnos al día de 8 horas, los costes imputados a la producción y el resumen de resultados son los siguientes.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	135.900,00
Materias Primas	1.351.113,45
Operación y Mantenimiento	643.753,70
<b>Total anual</b>	<b>2.130.767,15</b>

Tabla 19. Costes imputados a la producción a 3 turnos (Elaboración propia)

Se ven incrementados los costes de materia prima por la mayor capacidad de producción y los costes de operación y mantenimiento porque son necesarios por turno, 6 operarios y 1 jefe de turno.

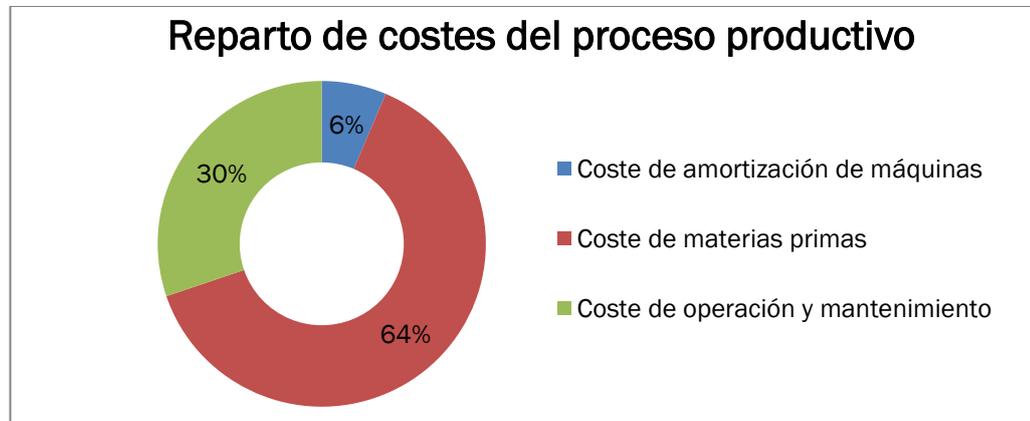


Figura 58. Reparto de costes del proceso productivo a 3 turnos (Elaboración propia)

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	314.316,84 uds
Capacidad de Producción: Stacks	1.047,72 uds
Capacidad de Producción: Potencia	52,39 MW
Coste por placa bipolar	6,78 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	40,67 €/kW
PVP	9,43 €
Beneficio neto	239.711,30 €
Periodo de Retorno Simple	4,02 años

Tabla 20. Resumen de Resultados a 3 turnos (Elaboración Propia)

Se obtiene esta vez un VAN y un TIR a 3 turnos del siguiente valor.

$$VAN = 2.539.491,63 \text{ €}$$

$$TIR = 24\%$$

Se ve aumentada la rentabilidad del proceso en 13 puntos porcentuales debido principalmente al aumento de ventas por la mayor capacidad productiva anual.



### 3.5. Líneas de mejora

En este apartado se van a proponer un conjunto de líneas de mejora obteniendo distintos resultados de producción, los cuales van a ser estudiados.

Para conseguir alcanzar un menor coste de placa bipolar, ante los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se ha considerado como objeto de estudio la reducción del tiempo de ciclo del proceso.

#### 3.5.1. Duplicación de la máquina de corte láser y calidad por lotes

De forma inicial, para reducir el tiempo de operación de los procesos encargados de la fabricación de las placas monoplares, se ha optado por duplicar el corte láser.

La segunda estación de trabajo donde se encuentra el corte de placas monoplares ahora se compone de dos máquinas en paralelo dedicadas al corte láser. De esta forma, no es necesario duplicar el tiempo de este proceso, eliminándose el cuello de botella en este punto. Se ha disminuido el tiempo de operación del conjunto corte laser y calidad óptica de 53 a 40,5 segundos.

Con el objetivo de seguir reduciendo el tiempo de ciclo del proceso, se va a optar por realizar la calidad de las piezas tanto óptica dimensional como de estanqueidad mediante test de fugas, cada 20 piezas. Lo que equivale a la producción de menos de 20 minutos. El criterio a seguir si la pieza comprobada es mala, es retirar las 20 piezas del lote analizado.

Mediante este método de validación de la calidad, el tiempo dedicado a las operaciones de calidad óptica y test de fugas repartido entre las 20 unidades es de 0,7 y 1 segundo, respectivamente. Valores obtenidos a partir del cociente entre el tiempo de operación de la máquina, 14 y 20 segundos, respectivamente, y las 20 unidades de producción.

En el caso del tiempo de la calidad óptica ha sido necesario duplicar el valor, ya que se deben comprobar ambas líneas de placas monoplares, suponiendo 1,4 segundos.

Una vez aplicadas estas mejoras, los tiempos de operación de máquinas son los recogidos en las tablas 21 y 22.

Operación	Tiempo (s)
Estampado	30
Corte Láser	12,5
Calidad: Óptica	1,4
Tiempo de Operación de Máquinas Total	43,9

Tabla 21. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Monoplares 3.5.1 (Elaboración propia)



Operación	Tiempo (s)
Soldadura Láser	40
Calidad: Test de Fugas	1
Aplicación de Juntas	24,5
Tiempo de Operación de Máquinas Total	65,5

Tabla 22. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Bipolares 3.5.1 (Elaboración propia)

El diagrama de proceso con las mejoras aplicadas es el definido en la figura 59.



Figura 59. Diagrama de proceso 3.5.1 (Elaboración propia)

El tiempo de operación total del conjunto de máquinas de placas monopolares y bipolares es de 43,9 y 65,5 segundos, respectivamente. Como tiempo de producción por unidad se obtiene una suma de 109,4 segundos.

En este caso, el mayor tiempo de operación de máquina y por tanto el cuello de botella, se encuentra en la soldadura láser. El tiempo de ciclo que rige en este caso la capacidad de producción es de 40 segundos. Se ha reducido en 13 segundos con respecto a la línea de producción inicial.

Se recoge el resumen de costes de cada uno de los factores estudiados en las siguientes tablas. En el caso de la amortización, se ha aumentado el coste correspondiente a la nueva máquina de corte láser.

Proceso	Inversión Inicial (€)	Valor Residual (€)	Base Amortizable (€)	Cuota Anual (€)
Estampado	500.000,00	50.000,00	450.000,00	45.000,00
Corte Láser	600.000,00	60.000,00	540.000,00	54.000,00
Calidad Óptica	80.000,00	8.000,00	72.000,00	7.200,00
Soldadura Láser	310.000,00	31.000,00	279.000,00	27.900,00
Test de Fugas	190.000,00	19.000,00	171.000,00	17.100,00
Aplicación de Juntas	130.000,00	13.000,00	117.000,00	11.700,00
Total	1.810.000,00	181.000,00	1.629.000,00	162.900,00

Tabla 23. Costes de Inversión Inicial y anualidad 3.5.1 (Elaboración propia)

En este caso el periodo de amortización también ha sido establecido en 10 años.

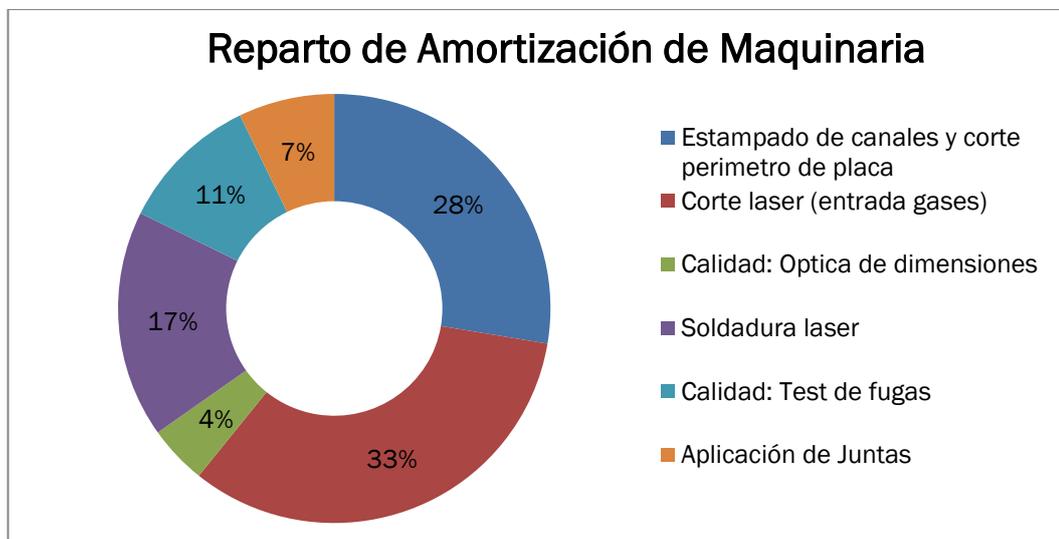


Figura 60. Reparto de Amortización de Maquinaria 3.5.1 (Elaboración propia)

En el caso de la Materia Prima.

Material	Coste (€)
Acero inoxidable SS316L recubierto con Sandvik	340.111,06
Juntas de hilo	256.630,71
<b>Total anual</b>	<b>596.741,77</b>

Tabla 24. Costes Materia Prima 3.5.1 (Elaboración propia)

En el caso de la mano de obra.

Mano de Obra	Coste (€)
Mano de Obra Directa	102.552,50
Mano de Obra Indirecta	46.361,08
Absentismo	6.665,91
<b>Total MO</b>	<b>155.579,49</b>

Tabla 25. Costes de Mano de Obra 3.5.1 (Elaboración Propia)

El coste total de mano de obra se ha reducido debido a que en las operaciones de calidad, al haberse reducido su operación a una pieza por cada lote de 20, dejará de encargarse un operario de ellas y serán los operarios de la operación anterior, el corte láser para la óptica o soldadura láser para el test de fugas, los encargados de realizar esta operación.

Únicamente se ha reducido en un operario, ya que al haberse duplicado la operación de corte láser, es necesario asignar un operario a dicha operación.

Tanto la estampación como la soldadura y la aplicación de juntas se mantienen con su operario correspondiente.

Los servicios generales o auxiliares se reparten de la misma forma y suponen un coste anual de 41.852,22 €.

Respecto a los ingresos.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	162.900,00
Materias Primas	596.741,77
Operación y Mantenimiento	222.463,69
<b>Total anual</b>	<b>982.105,46</b>

Tabla 26. Costes imputados a la producción 3.5.1 (Elaboración propia)

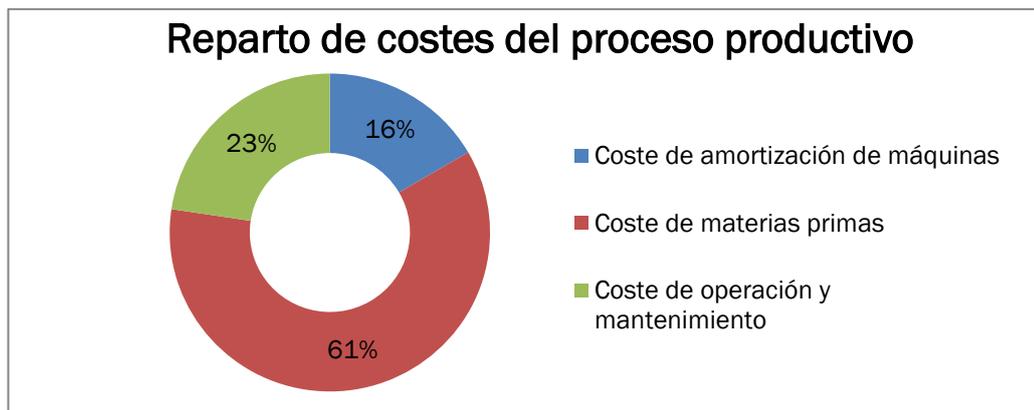


Figura 61. Reparto de costes del proceso productivo 3.5.1 (Elaboración propia)

Tras las mejoras aplicadas, el resumen de costes es el siguiente.

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	138.823,27 uds
Capacidad de Producción: Stacks	462,74 uds
Capacidad de Producción: Potencia	23,14 MW
Coste por placa bipolar	7,07 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	42,45 €/kW
PVP	9,84 €
Beneficio neto	110.486,86 €
Periodo de Retorno	6,62 años

Tabla 27. Resumen de Resultados 3.5.1 (Elaboración Propia)

En este caso los índices de rentabilidad son los mostrados a continuación.

$$VAN = 1.137.402,83 \text{ €}$$

$$TIR = 11\%$$

Se puede ver que en este caso, la rentabilidad del proyecto a pesar de la mejora, se mantiene con la misma rentabilidad. Esto se debe a que la mejora en producción no supe los gastos en maquinaria necesarios para reducir el tiempo de ciclo, además de la bajada correspondiente del precio de venta.

▪ **Escalado a 3 turnos**

Si se escala esta producción a 3 turnos al día de 8 horas, los costes imputados a la producción y el resumen de resultados son los siguientes.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	162.900,00
Materias Primas	1.790.225,32
Operación y Mantenimiento	602.231,07
<b>Total anual</b>	<b>2.555.356,38</b>

Tabla 28. Costes imputados a la producción 3.5.1 a 3 turnos (Elaboración propia)

Se ven incrementados los costes de materia prima por la mayor capacidad de producción y los costes de operación y mantenimiento porque son necesarios por turno 5 operarios y 1 jefe de turno.

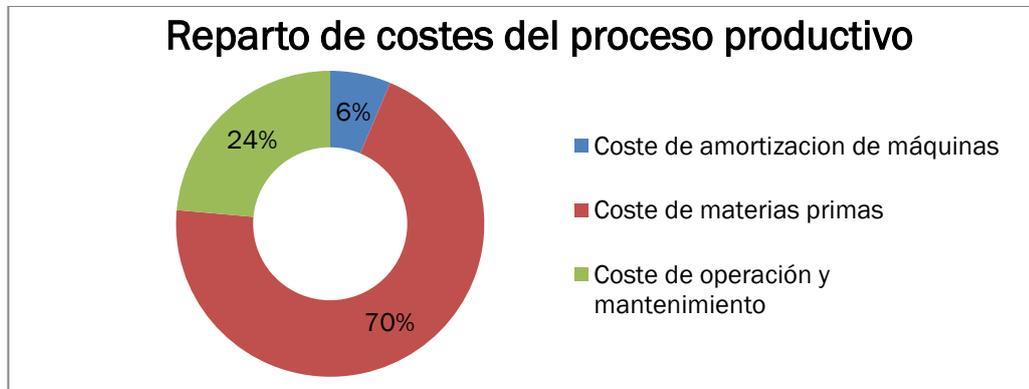


Figura 62. Reparto de costes del proceso productivo 3.5.1 a 3 turnos (Elaboración propia)

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	416.469,82 uds
Capacidad de Producción: Stacks	1.388,23 uds
Capacidad de Producción: Potencia	69,41 MW
Coste por placa bipolar	6,14 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	36,81 €/kW
PVP	8,54 €
Beneficio neto	287.477,59 €
Periodo de Retorno Simple	4,02 años

Tabla 29. Resumen de Resultados 3.5.1 a 3 turnos (Elaboración Propia)

Se obtiene esta vez un VAN y un TIR a 3 turnos del siguiente valor.

$$VAN = 3.195.988,49 \text{ €}$$

$$TIR = 21\%$$

En este caso, la mejora que anteriormente no proporcionaba una mayor rentabilidad, operando a 3 turnos, aumenta en diez puntos porcentuales la rentabilidad del proyecto. Pero disminuye con respecto al anterior caso debido a la bajada del PVP.



### 3.5.2. Duplicación de la máquina de soldadura láser

De cara a seguir reduciendo el tiempo de ciclo y por ende conseguir mejorar la capacidad de producción, lo cual deriva en una reducción de los costes por unidad de producto fabricado, se va a duplicar la máquina de soldadura láser.

Mediante este duplicado, el tiempo de operación de soldadura se divide a la mitad, 20 segundos.

Además, la siguiente operación en esa misma célula, es el test de fugas. Tiene un tiempo de operación de máquina de 20 segundos también, por lo que no se producirían acumulaciones de material cuando sea necesario realizar el test de fugas cada 20 placas bipolares.

La aplicación de la mejora sobre esta operación se debe a que la soldadura láser es el cuello de botella de la anterior situación de forma que, con este duplicado, el cuello de botella pasa a ser la primera operación.

La primera operación, la estampación, tiene un tiempo de operación de máquina de 30 segundos.

Para la obtención de costes asociados a estas mejoras es necesario incrementar de nuevo la inversión y correspondiente cuota de amortización anual de la nueva máquina de soldadura, el operario encargado de la misma y el aumento de materia prima por aumento de capacidad de producción.

Una vez aplicada esta modificación, los tiempos de operación de máquinas son los recogidos en las tablas 30 y 31.

Operación	Tiempo (s)
Estampado	30
Corte Láser	12,5
Calidad: Óptica	1,4
Tiempo de Operación de Máquinas Total	43,9

Tabla 30. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Monoplares 3.5.2 (Elaboración propia)

En este caso, los tiempos de operación de las máquinas encargadas de transformar las placas monoplares no sufren ningún cambio.

Operación	Tiempo (s)
Soldadura Láser	20
Calidad: Test de Fugas	1
Aplicación de Juntas	24,5
Tiempo de Operación de Máquinas Total	45,5

Tabla 31. Tiempos de Operación de Máquinas de Placas Bipolares 3.5.2 (Elaboración propia)

Para las máquinas de placas bipolares se ve reducido a un valor de 45,5 segundos.



El diagrama de proceso en este caso es el mostrado en la figura 63.



Figura 63. Diagrama de proceso 3.5.2 (Elaboración propia)

El tiempo de operación total del conjunto de máquinas de placas monopolares y bipolares es de 43,9 y 45,5 segundos, respectivamente.

Como tiempo de producción por unidad se obtiene una suma de 89,4 segundos. Siendo el tiempo de ciclo que rige en este caso la capacidad de producción de 30 segundos, correspondiente a la operación de estampación.

Se ha reducido en 10 segundos más con respecto al anterior tiempo de ciclo y un total de 23 segundos con respecto a la línea inicial de producción. Lo que se traduce en una reducción del 43% con respecto al inicio.

Se recoge el resumen de costes de cada uno de los factores estudiados en las siguientes tablas.

En el caso de la amortización, se ha aumentado el coste correspondiente a la nueva máquina de soldadura láser.

Proceso	Inversión Inicial (€)	Valor Residual (€)	Base Amortizable (€)	Cuota Anual (€)
Estampado	500.000,00	50.000,00	450.000,00	45.000,00
Corte Laser	600.000,00	60.000,00	540.000,00	54.000,00
Calidad Óptica	80.000,00	8.000,00	72.000,00	7.200,00
Soldadura Láser	620.000,00	62.000,00	558.000,00	55.800,00
Test de Fugas	190.000,00	19.000,00	171.000,00	17.100,00
Aplicación de Juntas	130.000,00	13.000,00	117.000,00	11.700,00
<b>Total</b>	<b>2.120.000,00</b>	<b>212.000,00</b>	<b>1.908.000,00</b>	<b>190.800,00</b>

Tabla 32. Costes de Inversión Inicial y anualidad 3.5.2 (Elaboración propia)

El periodo de amortización también ha sido establecido en 10 años.

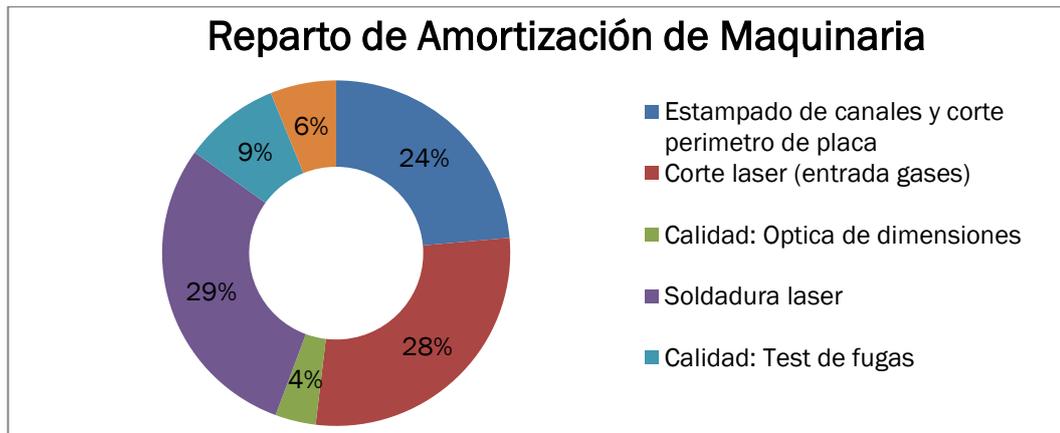


Figura 64. Reparto de Amortización de Maquinaria 3.5.2 (Elaboración propia)

En el caso de la Materia Prima.

Material	Coste (€)
Acero inoxidable SS316L recubierto con Sandvik	453.481,42
Juntas de hilo	342.174,28
<b>Total anual</b>	<b>795.655,70</b>

Tabla 33. Costes Materia Prima 3.5.2 (Elaboración propia)

En el caso de la mano de obra.

Mano de Obra	Coste (€)
Mano de Obra Directa	123.063,00
Mano de Obra Indirecta	50.463,18
Absentismo	7.999,10
<b>Total MO</b>	<b>181.525,28</b>

Tabla 34. Costes de Mano de Obra 3.5.2 (Elaboración Propia)

El coste total de mano de obra ha aumentado debido al operario correspondiente a la nueva máquina de soldadura láser. El resto de operarios están repartidos de la misma forma que en la anterior mejora estudiada en el apartado 3.5.1.

Los servicios generales o auxiliares se reparten de la misma forma y suponen un coste anual de 48.252,64 €.

Respecto a los ingresos.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	190.800,00
Materias Primas	795.655,70
Operación y Mantenimiento	257.591,22
<b>Total anual</b>	<b>1.244.046,92</b>

Tabla 35. Costes imputados a la producción 3.5.2 (Elaboración propia)

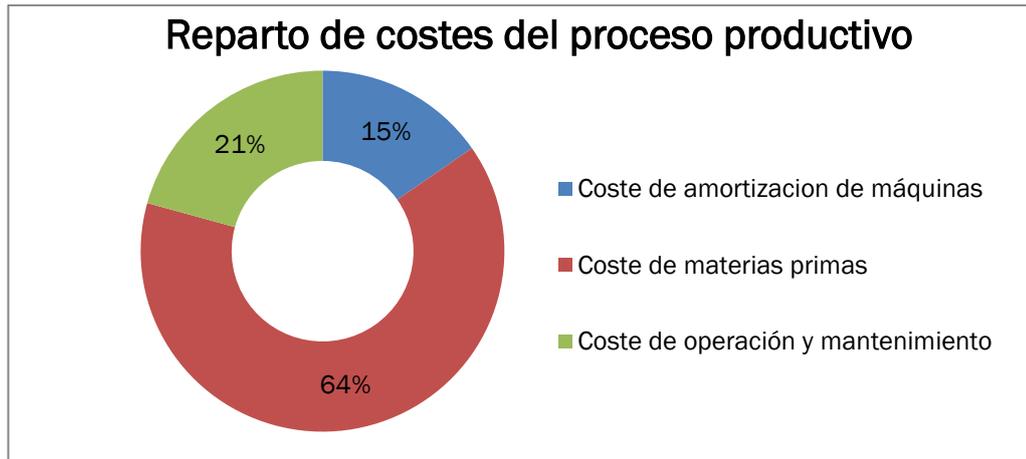


Figura 65. Reparto de costes del proceso productivo 3.5.2 (Elaboración propia)

Tras la modificación, el resumen de costes es el siguiente.

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	185.097,70 uds
Capacidad de Producción: Stacks	616,99 uds
Capacidad de Producción: Potencia	30,85 MW
Coste por placa bipolar	6,72 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	40,33 €/kW
PVP	9,35 €
Beneficio neto	139.955,28 €
Periodo de Retorno Simple	6,41 años

Tabla 36. Resumen de Resultados 3.5.2 (Elaboración Propia)

El Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno tras esta mejora son los siguientes.

$$VAN = 1.445.895,69 \text{ €}$$

$$TIR = 12\%$$

En este último caso, se obtiene un punto porcentual más de rentabilidad de proyecto que en la línea inicial y en la anterior mejora, a un solo turno.

▪ **Escalado a 3 turnos**

Si se vuelve a escalar a 3 turnos al día de 8 horas, los costes imputados a la producción y el resumen de resultados son los mostrados en la tabla 37.

Factor de coste	Coste (€)
Amortización de Máquinas	190.800,00
Materias Primas	2.386.967,09
Operación y Mantenimiento	696.453,67
<b>Total anual</b>	<b>3.274.220,76</b>

Tabla 37. Costes imputados a la producción 3.5.2 a 3 turnos (Elaboración propia)

Se ven incrementados los costes de materia prima por la mayor capacidad de producción y los costes de operación y mantenimiento porque son necesarios por turno 7 operarios y 1 jefe de turno.

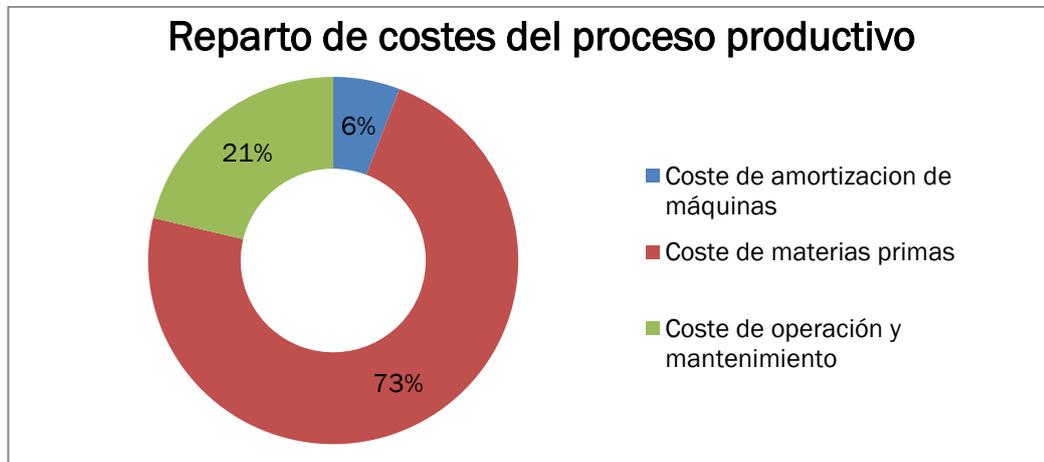


Figura 66. Reparto de costes del proceso productivo 3.5.2 a 3 turnos (Elaboración propia)

Siendo los resultados finales del último caso con mejoras y a 3 turnos los de la tabla 38.

Concepto	Cantidad
Capacidad de Producción: Placas bipolares	555.293,09 uds
Capacidad de Producción: <i>Stacks</i>	1.850,98 uds
Capacidad de Producción: Potencia	92,55 MW
Coste por placa bipolar	5,90 €/placa bipolar
Coste por kilovatio	35,38 €/kW
PVP	8,20 €
Beneficio neto	368.349,84 €
Periodo de Retorno	3,79 años

Tabla 38. Resumen de Resultados 3.5.2 a 3 turnos (Elaboración Propia)

Para este último caso escalado, los índices de rentabilidad son los siguientes.

$$VAN = 3.908.233,32 \text{ €}$$

$$TIR = 26\%$$

Los resultados obtenidos en este caso reflejan una obtención alta de beneficio de la implantación de la línea de producción y una alta rentabilidad del mismo en el periodo de 10 años establecido.

La rentabilidad en este caso es mayor que en cualquiera de los casos anteriores, superando por dos puntos porcentuales a la línea de producción inicial y en cuatro a la anterior mejora, a tres turnos.



## Capítulo 4: Resultados y conclusiones

En este capítulo, se van a desarrollar las conclusiones obtenidas tras la realización del estudio técnico relacionado con el diseño de las placas bipolares, el material del que se fabrican y el correspondiente proceso productivo.

Y las conclusiones alcanzadas a través de la comparativa de los resultados del estudio económico del proceso productivo de placas bipolares metálicas, junto con la comparativa de resultados bajo la premisa de un precio de venta al público fijo.

### 4.1. Estudio técnico

Tras la realización del análisis técnico surgen las siguientes conclusiones alineadas con la situación actual y tendencia futura de las placas bipolares.

Los procesos productivos a gran escala actualmente están decantándose por la producción de placas bipolares metálicas, especialmente mediante distintos procesos de estampación, destacando el hidroconformado como una opción fiable y precisa.

La producción en masa de las placas bipolares de acero inoxidable o aluminio hace que una de las desventajas de estos materiales frente a los polímeros, como es el precio debido a la propia materia prima o la necesidad de recubrimientos que favorezcan su comportamiento, desaparezca. Haciendo a estos materiales más atractivos en términos de viabilidad económica.

Las líneas de desarrollo de placas bipolares compuestas por polímeros dopados establecen una oportunidad de mejorar esta tecnología ya que estos son mucho más baratos, pesan menos y son reciclables, pero existen aún grandes barreras en cuanto a propiedades eléctricas o dimensionales, como mayores espesores. A pesar de ello, grandes empresas como Ballard, apuestan actualmente por la producción de este tipo de placas bipolares lo que hace prever que su uso en diversas aplicaciones no está muy alejado en el tiempo.

Finalizado el estudio y la comparativa de las distintas vertientes a la hora de diseñar y fabricar placas bipolares, no se puede llegar a una conclusión definitiva con respecto a cuál es la mejor opción, ya que esta tecnología se encuentra en pleno auge y su futuro aún es incierto. Cada uno de los aspectos tratados alberga ventajas que pueden resultar de gran interés.

Existen aún múltiples desafíos previos a su total implementación en los distintos sectores. Las continuas investigaciones y desarrollos en busca de mejores rendimientos y la viabilidad económica, allanan día a día el camino hacia un futuro energéticamente hablando, más sostenible.



#### 4.2. Análisis Económico

Desde la perspectiva de los resultados obtenidos en el análisis económico, se destaca que la opción más propicia para garantizar la rentabilidad del negocio radica en la capacidad de establecer líneas de producción continua escalables.

Los costes de las materias primas son altos, por lo que la compra de esta en pequeñas cantidades, ligado a las altas inversiones iniciales necesarias en maquinaria, hacen que la fabricación a nivel no industrial sea poco competitiva y poco rentable.

Es esencial considerar distintas estrategias para asegurar la eficiencia de la línea y que la calidad de las placas bipolares producidas es óptima. Nuevos procesos enfocados a la calidad, como la limpieza de las placas bipolares, fortalece la excelencia en la fabricación.

A continuación, se presenta la comparativa de los resultados del análisis económico, recogiendo las distintas variantes estudiadas en las siguientes tablas. De cara a facilitar la lectura de las tablas, se establecen las distintas mejoras como líneas.

- Línea 1, corresponde con la línea inicial sobre la que se aplican las mejoras.
- Línea 2, corresponde con el duplicado de la máquina de corte láser y la calidad por lotes.
- Línea 3, corresponde con el duplicado de la máquina de soldadura láser.

Línea	TC (s)	Amortización (€)	MMPP (€)	O&M (€)	Coste Producción (€)
Línea 1	53	135.900,00	450.371,15	232.704,57	818.975,72
Línea 1 a 3 turnos	53	135.900,00	1.351.113,45	643.753,70	2.130.767,15
Línea 2	40	162.900,00	596.741,77	222.463,69	982.105,46
Línea 2 a 3 turnos	40	162.900,00	1.790.225,32	602.231,07	2.555.356,38
Línea 3	30	190.800,00	795.655,70	257.591,22	1.244.046,92
Línea 3 a 3 turnos	30	190.800,00	2.386.967,09	696.453,67	3.274.220,76

Tabla 39. Comparativa de TC y Costes de Producción (Elaboración propia)

- El tiempo de ciclo del proceso llega a reducirse tras las mejoras en 23 segundos, lo que representa una disminución del 43%.
- En lo relacionado a los costes de amortización, se ven aumentados debido a la compra de nueva maquinaria para reducir el tiempo de



ciclo. Estos aumentos se producen únicamente tras la aplicación de mejoras sobre la línea y no al escalar la producción de la propia línea.

- En cuanto a los costes de materia prima, es notable el aumento de estos costes tanto al escalar la producción a tres turnos, como en la comparativa entre las tres líneas al aplicar las mejoras.
- Con respecto a los costes de operación y mantenimiento, si bien se puede observar una tendencia al alza en la mayoría de los casos, la reducción de personal en la línea 2 provoca que los costes sean menores en esta línea.
- Como comparativa sobre los costes de producción totales siempre son superiores con respecto a la anterior línea, comparando las líneas de un solo turno o de tres turnos.

Los resultados referidos a las capacidades productivas y correspondientes costes por placa y kilovatio se recogen en la tabla 40.

Línea	Placas (uds)	Potencia (kW)	Coste (€/placa)	Coste (€/kW)
Línea 1	104.772,28	17.462,05	7,82	46,90
Línea 1 a 3 turnos	314.316,84	52.386,14	6,78	40,67
Línea 2	138.823,27	23.137,21	7,07	42,45
Línea 2 a 3 turnos	416.469,82	69.411,64	6,14	36,81
Línea 3	185.097,70	30.849,62	6,72	40,33
Línea 3 a 3 turnos	555.293,09	92.548,85	5,90	35,38

Tabla 40. Comparativa de Capacidades de Producción y Costes por placa y kilovatio (Elaboración propia)

- Las capacidades de producción de placas y de potencia aumentan progresivamente según se van aplicando las distintas mejoras debido a la reducción del tiempo de ciclo del proceso.
- Los costes por placa y por kilovatio de potencia calculados a partir de los costes de producción, se reducen en un 24,5% reflejando una mejora del proceso.

La tendencia de los precios unitarios por placa y kilovatio con respecto al tipo de línea y del tiempo de ciclo se puede observar en la figura 67.

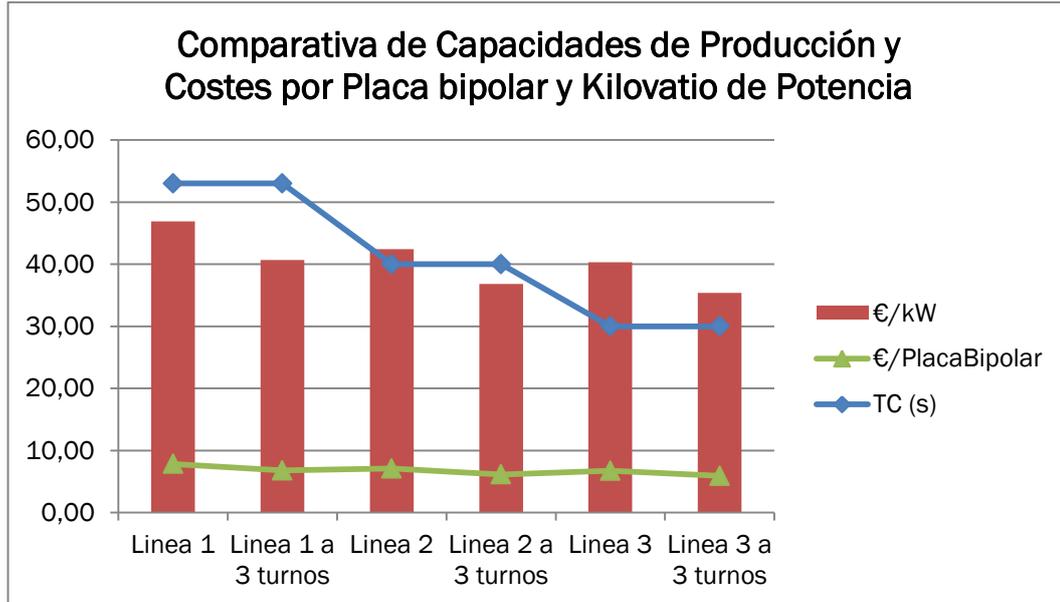


Figura 67. Comparativa de Capacidades de Producción y Costes por placa y kilovatio (Elaboración propia)

Para conseguir alcanzar los niveles de producción que permitan disminuir el coste por kilovatio establecido por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, es necesario automatizar completamente la producción y aumentar el número de líneas. Los objetivos establecidos para 2025 están fijados en función de una producción de 500.000 pilas de combustible de 80 kW, lo que implicaría una producción entre de 100 y 240 millones de placas bipolares según su punto de funcionamiento, en Estados Unidos, más concretamente para los grupos afiliados al *Fuel Cell Technical Team*, donde se encuentran fabricantes de automóviles como Ford o General Motors, entre otros colaboradores.

A partir de las tablas 41 y 43 se va a poder comparar la evolución del beneficio ligado al precio de venta al público de las placas bipolares junto con la capacidad de recuperación de la inversión y la rentabilidad de las líneas.

Línea	PVP (€)	Beneficio (€)	Periodo de Retorno (años)
Línea 1	10,88	92.134,77	6,62
Línea 1 a 3 turnos	9,43	239.711,30	4,02
Línea 2	9,84	110.486,86	6,62
Línea 2 a 3 turnos	8,54	287.477,59	4,02
Línea 3	9,35	139.955,28	6,41
Línea 3 a 3 turnos	8,20	368.349,84	3,79

Tabla 41. Comparativa PVP, Beneficio obtenido y Periodo de Retorno Simple (Elaboración propia)

- En lo relacionado al PVP, este disminuye al haber aumentado la capacidad productiva y haber disminuido el coste de producción, manteniéndose en un valor en el cual se obtiene beneficio tras el



ejercicio anual o el beneficio sea nulo. Esto se cumple siempre y cuando el precio sea superior a los PVP recogidos en la tabla 42.

Línea	PVP (€)
Línea 1	9,46
Línea 1 a 3 turnos	8,20
Línea 2	8,56
Línea 2 a 3 turnos	7,42
Línea 3	8,13
Línea 3 a 3 turnos	7,13

Tabla 42. PVP mínimo (Elaboración propia)

- Los beneficios en consecuencia se ven incrementados, y por tanto el periodo de retorno simple de la inversión en maquinaria asociada al proceso se ve reducido.

Si se comparan los valores de los índices de Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, podemos observar las mismas tendencias.

Línea	VAN (€)	TIR (%)
Línea 1	948458,72	11
Línea 1 a 3 turnos	2539491,63	24
Línea 2	1137402,83	11
Línea 2 a 3 turnos	3045552,20	24
Línea 3	1445895,69	12
Línea 3 a 3 turnos	3908233,32	26

Tabla 43. Comparativa de VAN y TIR (Elaboración propia)

- A partir del TIR, se observa una tendencia favorable frente a la implantación de las mejoras, la situación entre la línea 1 y la línea 2 únicamente es más rentable si se escala a tres turnos. En el resto de los casos, la implantación de mejoras con respecto a la línea 1 siempre va a suponer una mayor rentabilidad.

Con la intención de obtener un mayor beneficio y comparar el precio obtenido con el de placas bipolares en el mercado actual se va a fijar el precio de venta al público en el primer precio obtenido en la línea 1, es decir, PVP de 10,88 €.

Línea	Beneficio (€)	Periodo de Retorno (años)	TIR (%)
Línea 1	92.134,77	6,62	11
Línea 1 a 3 turnos	521.024,30	2,30	45
Línea 2	199.356,59	5,00	18
Línea 2 a 3 turnos	891.289,77	1,72	61
Línea 3	314.879,06	4,19	23
Línea 3 a 3 turnos	1.288.077,17	1,43	72

Tabla 44. Resumen de Resultados bajo precio fijo (Elaboración propia)



- En lo que respecta al periodo de retorno, este alto beneficio haría recuperar la inversión inicial en el peor de los casos en 6,62 años, mientras que en el mejor de los casos, en menos de un año y medio.
- En relación a los valores obtenidos de rentabilidad, los valores de las producciones a tres turnos son muy altos, debido a la gran capacidad de producción que tienen estas líneas y por tanto el gran beneficio que se obtiene por la venta de las mismas.

Este valor de venta al público se ha comparado con el precio estimado a través del precio de venta de un modelo de vehículo movido por pila de hidrógeno.

Los porcentajes de coste se han obtenido a través las fichas técnicas del vehículo y expertos del sector.

$$PVP \text{ Toyota Mirai} = 75.600 \text{ €}$$

$$PVP \text{ Pila de Combustible} = PVP \text{ Toyota Mirai} \cdot 0,30 = 22.680 \text{ €}$$

$$PVP \text{ Stack} = PVP \text{ Pila de Combustible} \cdot 0,6 = 13.608 \text{ €}$$

$$PVP \text{ Placa Bipolar} = \frac{PVP \text{ Stack} \cdot 0,25}{\text{Celdas del Stack}} = \frac{13.608 \cdot 0,25}{370} = 9,19 \text{ €}$$

Se ha fijado en un 30% los costes referidos a la pila de combustible con respecto al vehículo. En un 60% los costes del *stack* sobre la pila de combustible, siendo el 40% restante el coste equivalente al balance de planta. Y en un 25% el coste de las placas bipolares con respecto al *stack* [23].

Además, para la estimación del PVP de la placa bipolar, se ha tenido en cuenta el número de celdas por las que se ve compuesto el *stack* del vehículo, 370 placas bipolares [70].

El precio estimado de venta se encuentra por debajo del fijado en el estudio pero cercano al mismo, esto puede estar encaminado a que probablemente el producto se esté vendiendo por encima del coste real, el cual es complejo de obtener con seguridad. Esta situación explica la gran rentabilidad obtenida al fijar el precio de venta al público en 10,88 €, siendo más fiel a la realidad la bajada de este precio.

El actual momento de crecimiento del mercado y producción de placas bipolares hace que los precios sean muy variables a corto plazo y sea complicado asegurar un precio exacto del producto.



Por otra parte, el número de celdas por *stack* y por tanto del vehículo depende de la densidad de corriente de las placas bipolares, donde las grandes empresas han conseguido valores muy altos.

Para asegurar que las posibles variaciones de costes debidas a las estimaciones realizadas a lo largo del documento son válidas y no afectan de forma directa al resultado final, se ha realizado un estudio de sensibilidad de cada uno de los aspectos estimados.

Como conclusión final al estudio económico realizado, se evidencia una mejora del proceso productivo de placas bipolares a través de las rentabilidades de cada una de las líneas. La reducción de los costes por unidad en cada una de las mejoras aplicadas junto al análisis relacionado con el precio de venta al público, hace que se pueda optar por un precio más competitivo y el consecuente fortalecimiento de la posición del producto en el mercado.



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Capítulo 5: Líneas Futuras

Sobre el presente estudio se pueden realizar distintas investigaciones y comparativas directamente relacionadas con la fabricación de placas bipolares.

Es de gran interés la comparativa de costes entre las distintas tecnologías de fabricación disponibles actualmente, de esta forma se podría optar por la línea de producción más óptima según el tipo de material usado.

El principal problema de esta línea de estudio es la falta de información tangible sobre la variedad de máquinas, el coste de materiales y sobre todo, del comportamiento de los materiales de los que se ven compuestas las placas bipolares sin una experimentación propia.

Conforme al estudio técnico, las principales líneas de trabajos futuros son, ya sea mediante simulación o experimentación, la determinación de la mejor geometría de canales con respecto al material del que se vayan a fabricar y la determinación de las mejores propiedades físicas y eléctricas según el material y la aplicación de las placas bipolares.

Como ampliación del propio estudio económico realizado, sería de interés, la completa automatización del proceso y un estudio extenso relacionado con *Lean Manufacturing*. Contemplando almacenamientos, distribuciones favorables en planta, disminución de mano de obra correspondiente a operarios por línea de producción, etc.

Por otra parte, la fabricación de placas bipolares está directamente relacionada con la fabricación de *stacks*. Entre los distintos componentes que forman los *stacks*, una línea de estudio muy interesante y que puede proporcionar información relevante es la fabricación de la llamada MEA compuesta por la membrana, la GDL y el catalizador.

La elección de los materiales de la membrana, la capa de difusión de gases y el catalizador pero en concreto, la forma en la que se fabrican y prepara el conjunto MEA condicionan el coste final del *stack* y su propio funcionamiento.

Este estudio ligado al de la fabricación de placas bipolares y el montaje final del *stack*, daría una idea completa de lo que sería el coste final de una pila de combustible.



ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN  
DE PLACAS BIPOLARES PARA PILAS DE COMBUSTIBLE PEM





## Bibliografía

- [1] Perry, M. D., & Fuller, T. F. (2002). A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(7), S59. <https://doi.org/10.1149/1.1488651>
- [2] Pollegri A, Spaziante PM. US Patent No. 4,197,178, 1980.
- [3] Wu, M., & Shaw, L. L. (2004). On the improved properties of injection-molded, carbon nanotube-filled PET/PVDF blends. *Journal of Power Sources*, 136(1), 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.04.016>
- [4] Iversen AK. Stainless steels in bipolar plates – surface resistive properties of corrosion resistant steel grades during current loads. *Corros Sci* 2006;48(5):1036–58
- [5] Joseph S, McClure JC, Chianelli R, Pich P, Sebastian PJ. Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *Int J Hydrogen Energy* 2005;30(12):1339–44
- [6] Küpeli, S., Celik, E., & Karagoz, I. (2021). Response of a proton exchange membrane fuel cell to step changes in mass flow rates. *Fuel Cells*, 21(4), 338-346. <https://doi.org/10.1002/fuce.202000170>
- [7] Kaur, G. (2021). *PEM fuel cells: Fundamentals, Advanced Technologies, and Practical Application*. Elsevier.
- [8] Porstmann, S., Wannemacher, T., & Drossel, W. (2020). A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends. *Journal of*



*Manufacturing Processes*, 60, 366-383.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041>

- [9] Xu, Z., Qiu, D., Yi, P., Peng, L., & Lai, X. (2020). Towards Mass Applications: A review on the challenges and developments in metallic bipolar plates for PEMFC. *Progress in Natural Science: Materials International*, 30(6), 815-824. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2020.10.015>
- [10] Kazula, S., De Graaf, S., & Enghardt, L. (2023). Review of fuel cell technologies and evaluation of their potential and challenges for electrified propulsion systems in commercial aviation. *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, 7, 43-57. <https://doi.org/10.33737/jgpps/158036>
- [11] Andújar, J. M., & Segura, F. (2009b). Fuel Cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2309-2322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.015>
- [12] Asociación Española de Pilas de Combustible. (2023, 15 febrero). *Pilas de combustible - APPICE*. APPICE. <https://appice.es/pilas-de-combustible/> (Última Fecha de Consulta 17/07/23)
- [13] Islam, M. S., Shabani, B., Rosengarten, G., & Andrews, J. E. (2015). The potential of using nanofluids in PEM fuel cell cooling Systems: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 48, 523-539. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.018>
- [14] Grado en Ingeniería Energética UVa (2023). Apuntes Pila de combustible.
- [15] Kunze; Cap 4, Kreuer (ed.), *Fuel Cells: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2013.



- [16] Inamuddin, Moradi, O., & Ahamed, M. I. (2023). *Proton exchange membrane fuel cells: Electrochemical Methods and Computational Fluid Dynamics*. John Wiley & Sons.
- [17] Maiyalagan, T., & Pasupathi, S. (2010). Components for PEM fuel cells: An overview. *Materials Science Forum*, 657, 143-189.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.657.143>
- [18] Omrani, R., & Shabani, B. (2017). Gas diffusion layer Modifications and Treatments for improving the performance of proton exchange membrane fuel cells and electrolysers: a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(47), 28515-28536.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.132>
- [19] Pollet, B. G., Kocha, S. S., & Staffell, I. (2019). Current status of automotive fuel cells for sustainable transport. *Current Opinion in Electrochemistry*, 16, 90-95.  
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.021>
- [20] Tellez-Cruz, M., Escorihuela, J., Solorza-Feria, O., & Compañ, V. (2021). Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs): Advances and challenges. *Polymers*, 13(18), 3064.  
<https://doi.org/10.3390/polym13183064>
- [21] Leng, Y., Ming, P., Yang, D., & Zhang, C. (2020). Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: materials, flow channel design and forming processes. *Journal of Power Sources*, 451, 227783. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227783>
- [22] US Drive, Fuel Cell Technical Team Roadmap. *Energy.gov*. (s. f.).  
<https://www.energy.gov/> (Última Fecha de Consulta 03/08/23)



- [23] Hala, M., Mališ, J., Paidar, M., & Bouzek, K. (2022). Characterization of commercial Polymer–Carbon composite bipolar plates used in PEM fuel cells. *Membranes*, 12(11), 1050. <https://doi.org/10.3390/membranes12111050>
- [24] Reimer, U., Nikitsina, E., Janssen, H., Müller, M., Froning, D., Beale, S., & Lehnert, W. (2021). Design and modeling of metallic bipolar plates for a fuel cell range extender. *Energies*, 14(17), 5484. <https://doi.org/10.3390/en14175484>
- [25] Kahraman, H., & Orhan, M. (2017). Flow Field Bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling. *Energy Conversion and Management*, 133, 363-384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.053>
- [26] Li, X., & Sabir, I. (2005). Review of bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-field Designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4), 359-371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.019>
- [27] Carton, J., & Olabi, A. (2017). Three-dimensional proton exchange membrane fuel cell model: Comparison of double channel and open pore cellular foam flow plates. *Energy*, 136, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.010>
- [28] Kumar, A., & Reddy, R. G. (2003). Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 113(1), 11-18. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(02\)00475-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(02)00475-5)
- [29] *Fuel cell & Clean Energy Solutions | Ballard Power*. (s. f.). <https://www.ballard.com/> (Última Fecha de Consulta 21/08/23)



- [30] Alberto García Luis. *Materiales para Pilas de Combustible*. Presentación Tecnalia en Jornada Virtual SERAUTO
- [31] Yi, P., Zhang, D., Peng, L., & Lai, X. (2018). Impact of film thickness on defects and the graphitization of nanothin carbon coatings used for metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(40), 34561-34572.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b08263>
- [32] Stolten, D., Samsun, R. C., & Garland, N. (2016). *Fuel cells: Data, Facts, and Figures*. John Wiley & Sons.
- [33] Joseph, S., McClure, J. P., Chianelli, R. R., Pich, P., & Sebastian, P. (2005). Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(12), 1339-1344.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.011>
- [34] Lee, K. H., Jin, C. K., Kang, C. G., Seo, H., & Kim, J. D. (2014). Fabrication of titanium bipolar plates by rubber forming process and evaluation characteristics of TIN coated titanium bipolar plates. *Fuel Cells*, 15(1), 170-177. <https://doi.org/10.1002/face.201400091>
- [35] Wang, S., Peng, J., Lui, W., & Zhang, J. (2006). Performance of the gold-plated titanium bipolar plates for the light weight PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 162(1), 486-491.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.084>
- [36] Tawfik, H., Hung, Y. S., & Mahajan, D. (2007). Metal bipolar plates for PEM Fuel Cell—A review. *Journal of Power Sources*, 163(2), 755-767.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.09.088>



- [37] *Bipolar plates*. (s. f.). Schunk Carbon Technology. <https://www.schunk-group.com/carbon-technology/en/products/bipolar-plates> (Última Fecha de Consulta 23/08/23)
- [38] Hycco. (2022, 28 septiembre). *HYCCO • carbon components for Tommorrow's hydrogen fuel cells*. <https://hycco.fr/> (Última Fecha de Consulta 04/09/23)
- [39] Kang, K., Park, S., Jo, A., Lee, K., & Ju, H. (2017). Development of ultralight and thin bipolar plates using epoxy-carbon fiber prepregs and graphite composites. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1691-1697. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.027>
- [40] Simaafrookhteh, S., Khorshidian, M., & Momenifar, M. (2020). Fabrication of multi-filler thermoset-based composite bipolar plates for PEMFCs applications: Molding defects and Properties Characterizations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(27), 14119-14132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.105>
- [41] Lyondellbasell. [https://www.lyondellbasell.com/globalassets/products-technology/advanced-polymer-solutions/technical-data-sheets/bulk-molding-compounds/bmc.940.8649.tds\\_1.16.2020.pdf](https://www.lyondellbasell.com/globalassets/products-technology/advanced-polymer-solutions/technical-data-sheets/bulk-molding-compounds/bmc.940.8649.tds_1.16.2020.pdf) (Última Fecha de Consulta 05/09/23)
- [42] Alo, O. A., Otunniyi, I. O., & Pienaar, H. (2020). Development of graphite-filled polymer blends for application in bipolar plates. *Polymer Composites*, 41(8), 3364-3375. <https://doi.org/10.1002/pc.25625>
- [43] *Compounds* | *Ensinger*. (s. f.). <https://www.ensingerplastics.com/en/compounds#/?filter=N4lgogMgwiBcoEYAOC6gM4FMA2mDGALpgCZwEBOArpkiAG4CG21cICAPqgL60B>



MSAZjQgsuQiTgAzJllqNmmVr3ZCeIACxJ1w0fiKIY07LPpMWsDe21cbQA

A (Última Fecha de Consulta 07/09/23)

- [44] Hala, M., Mališ, J., Paidar, M., & Bouzek, K. (2022b). Characterization of commercial Polymer–Carbon composite bipolar plates used in PEM fuel cells. *Membranes*, 12(11), 1050.  
<https://doi.org/10.3390/membranes12111050>
- [45] Cunningham, B. D., Huang, J., & Baird, D. G. (2007). Review of materials and processing methods used in the production of bipolar plates for fuel cells. *International Materials Reviews*, 52(1), 1-13.  
<https://doi.org/10.1179/174328006x102556>
- [46] Jeong, K., Oh, J., Song, S. H., Lee, D., Lee, D. G., & Kim, S. S. (2021). A review of composite bipolar plates in proton exchange membrane Fuel cells: electrical properties and gas permeability. *Composite Structures*, 262, 113617. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113617>
- [47] Alo, O. A., Otunniyi, I. O., Pienaar, H., & Sadiku, E. R. (2021). Electrical and mechanical properties of polypropylene/epoxy blend-graphite/carbon black composite for proton exchange membrane fuel cell bipolar plate. *Materials Today: Proceedings*, 38, 658-662.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.642>
- [48] Mahlon S. Wilson, Deanna N. Busick, & Los Alamos, NM (US). (s. f.). *Composite bipolar plate for electrochemical cells* (Patent N.º US 6,248,467 B1).  
<https://patentimages.storage.googleapis.com/59/4b/44/234409e5e3a63a/US6248467.pdf>



- [49] *Ultrathin bipolar plates for fuel cells*. (2021, 21 julio). Kunststoffe: Nachrichten, Stellenmarkt, Produkte für die Kunststoffindustrie | Kunststoffe.de. <https://en.kunststoffe.de/a/specialistarticle/ultrathin-bipolar-plates-for-fuel-cells-337290> (Última Fecha de Consulta 11/09/23)
- [50] Wilberforce, T., Ijaodola, O., Ogungbemi, E., Hassan, Z. E., Thompson, J. F., & Olabi, A. G. (2018). Effect of bipolar plate materials on performance of fuel cells. En *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11272-x>
- [51] Porstmann, S., Wannemacher, T., & Drossel, W. G. (2020b). A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 366-383. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.041>
- [52] Cell Impact. (s. f.). *Cell Impact Forming™ – Cell Impact*. <https://www.cellimpact.com/cell-impact-forming> (Última Fecha de Consulta 14/09/23)
- [53] *Fraunhofer Institute for Production Technology IPT*. (s. f.). Copyright. <https://www.ipt.fraunhofer.de/en.html> (Última Fecha de Consulta 14/09/23)
- [54] Trzepieciński, T. (2020). Recent developments and trends in sheet metal forming. *Metals*, 10(6), 779. <https://doi.org/10.3390/met10060779>
- [55] Micro, P. (2023). A guide to chemical etching for design engineers. *Precision Micro*. <https://www.precisionmicro.com/design-engineers-guide-photo-chemical-etching/> (Última Fecha de Consulta 14/09/23)



- [56] Wilberforce, T., Ijaodola, O., Ogungbemi, E., Khatib, F., Leslie, T., El-Hassan, Z., Thomposon, J., & Olabi, A. G. (2019). Technical Evaluation of Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell performance – A review of the effects of bipolar plates coating. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 113, 109286.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109286>
- [57] Antunes, R. A., De Oliveira, M. C. L., Ett, G., & Ett, V. (2011). Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve Electrical performance. *Journal of Power Sources*, 196(6), 2945-2961.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.041>
- [58] Cuppoletti, J. (2011). *Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry*. BoD – Books on Demand.
- [59] Tang, A., Crisci, L., Bonville, L. J., & Jankovic, J. (2021). An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 13(2).  
<https://doi.org/10.1063/5.0031447>
- [60] *Alleima startpage*. (s. f.). Alleima. <https://www.alleima.com/en/> (Última Fecha de Consulta 18/09/23)
- [61] *OEE Eficiencia General de equipos*. (s. f.). <https://www.mejora8.com/oeo> (Última Fecha de Consulta 03/11/23)
- [62] *PVT | High-performance coatings*. (s. f.). PVT.  
<https://www.ptvacuum.de/en/h2-technology/coatings/> (Última Fecha de Consulta 27/10/23)



- [63] Laufenberg GmbH. (2018, 9 enero). *Startseite - Laufenberg Release Liner*. Laufenberg Release Liner. <https://laufenberg.info/> (Última Fecha de Consulta 27/10/23)
- [64] Boletín Oficial de la Provincia de Valladolid. *Convenio Colectivo Estatal de la Industria, las Nuevas Tecnologías y los Servicios del Sector del Metal*.  
<https://bop.sede.diputaciondevalladolid.es/boletines/2023/septiembre/26/BOPVA-B-2023-184.pdf>
- [65] Máster en Ingeniería Industrial UVA (2020). Apuntes Tecnología de Procesos Integrados de Fabricación. Costes de Producción.
- [66] Oteo, C. (2023, 23 octubre). *Informe Absentismo laboral | Segundo trimestre 2023*. | Randstad Research. Randstad Research.  
<https://www.randstadresearch.es/absentismo-laboral-segundo-trimestre-2023/> (Última Fecha de Consulta 27/10/23)
- [67] OMIE. (s. f.). <https://www.omie.es/> (Última Fecha de Consulta 26/10/23)
- [68] James, B. D., Kalinoski, J. A., & Baum, K. N. (2010c). *Mass production cost estimation for Direct H2 PEM fuel cell systems for automotive applications. 2009 update*. <https://doi.org/10.2172/1218889>
- [69] Del Mar Carlos Alberola, M., & Mendoza, F. J. C. (2019). Cuaderno de problemas resueltos de proyectos de ingeniería. En *Universitat Jaume I eBooks*. <https://doi.org/10.6035/sapientia153>
- [70] Lohse-Busch, H., Stutenberg, K., Duoba, M., & Iliev, S. (2018). *Technology assessment of a fuel cell vehicle: 2017 Toyota Mirai*.  
<https://doi.org/10.2172/1463251>

