



AEMES Smart

Associació d'Empreses de Mobilitat,
Entorn Sostenible i Smart

SmartVision Paper#6: Captura, Ús i Emmagatzematge de CO₂

Amb la col·laboració de:

eurecat
Centre Tecnològic de Catalunya



Novembre de 2025

AEMES SMART

Av. Fabregada 93, 1r 3a, Esc. Dreta

08901 L'Hospitalet - Barcelona

Telf.: 93 337 04 50

E-mail: info@aemes-smart.com

www.aemes-smart.com

ÍNDEX

Resum executiu	3
Glossari	6
Introducció: marc normatiu de la descarbonització i de les tecnologies CCUS	8
Captura, Transport, Emmagatzematge i Ús de Carboni	12
Context internacional i local: anàlisi del marc global i com es posiciona el territori en aquest àmbit.....	24
Casos d'èxit: exemples de projectes o indústries que implementen CCUS	27
Repercussions econòmiques: anàlisi de l'impacte econòmic, incloent la creació d'oportunitats laborals i el desenvolupament de nous mercats	32
Anàlisi d'indústries relacionades: avaluació de com les CCUS poden beneficiar o transformar indústries emissores clau	35
Reptes i Oportunitats: identificació de barreres normatives, tècniques, estratègiques i polítiques, i explorar les oportunitats associades	37
Conclusions i recomanacions	41

Resum executiu

La transició cap a una economia climàticament neutra obliga a desplegar, de manera combinada, totes les **palanques de descarbonització** disponibles: **eficiència energètica, electrificació, energies renovables, hidrogen renovable, bioeconomia** i, molt especialment, les **tecnologies de captura, ús i emmagatzematge de CO₂ (CCUS)** en els sectors de difícil abatiment.

Aquest SmartVision Paper analitza el marc normatiu, tecnològic, econòmic i industrial del CCUS i planteja una visió estratègica per a Catalunya i Espanya en el context europeu i internacional. El document revisa la cadena de valor completa —captura, transport, emmagatzematge i ús del CO₂—, el posicionament internacional i local, les repercussions econòmiques, els casos d'èxit i les indústries prioritàries, així com els principals reptes i oportunitats associats al desplegament d'aquestes tecnologies.

Missatges clau:

Tecnologies de captura, ús i emmagatzematge de CCUS, un complement imprescindible. En el sector energètic, on els combustibles fòssils s'utilitzen principalment pel seu contingut energètic, les primeres opcions de descarbonització continuen sent l'eficiència energètica, l'electrificació i les energies renovables. Però en el sector químic i en moltes indústries de procés, el repte és diferent: aquestes activitats no depenen només de l'energia dels combustibles fòssils, sinó també del seu contingut en carboni, que és indispensable per fabricar materials i productes químics. En aquests casos, les emissions són intrínseques al procés i no es poden eliminar només electrificant. Per això, les tecnologies de captura, ús i valorització del CO₂ esdevenen essencials per substituir el carboni fòssil per carboni renovable o reciclat i avançar cap a una indústria completament desfossilitzada.

La cadena CCUS és tecnològicament viable però intensiva en energia i capital. El document descriu els principals mètodes de captura (precombustió, postcombustió, oxicombustió i captura directa de l'aire), les tecnologies de separació (absorció, adsorció, membranes, criogènia, carbonatació/mineralització), les opcions de transport (canonades, vaixells, camions cisterna) i les rutes d'emmagatzematge geològic i d'ús del CO₂, tant directes com mitjançant la seva conversió en productes químics i combustibles sintètics.

El context internacional mostra una acceleració clara del CCUS. Als Estats Units, la combinació d'incentius fiscals i programes federals està impulsant grans projectes de captura. Per altra banda, a l'Àsia, països com la Xina i Corea del Sud també han incorporat

la captura i l'emmagatzematge de carboni (CCS) en les seves polítiques energètiques nacionals, reconeixent la seva importància per a l'assoliment de la neutralitat de carboni. A Europa, la Llei d'Indústria d'Emissions Netes Zero fixa per al 2030 una capacitat mínima d'injecció de CO₂ i obliga els estats membres a planificar i declarar les seves capacitats d'emmagatzematge. Noruega, Països Baixos, Dinamarca, Regne Unit i Itàlia ja estan desplegant hubs de transport i emmagatzematge al mar del Nord i a l'Adriàtic.

Les necessitats de captura per assolir la neutralitat climàtica són molt significatives. Segons l'Agència Internacional de l'Energia, el món haurà de capturar i emmagatzemar diverses gigatonnes anuals de CO₂ a mitjan segle. Per a la Unió Europea es parla d'entre 300 i 600 milions de tones anuals, i per a Espanya, d'uns 35-40 milions de tones, principalment en sectors com el ciment, la química de base, la refinació i la siderúrgia.

El CCUS obre una nova cadena de valor industrial i de coneixement. Les inversions previstes en captura, transport, emmagatzematge i ús del CO₂ generen oportunitats en les etapes d'enginyeria, construcció, operació, manteniment dels diferents projectes que es posin en marxa, amb la incorporació de nous materials (sorbents, catalitzadors,...) i en la producció de combustibles o productes químics sintètics, per exemple. El desenvolupament d'aquests mercats contribuirà a la reindustrialització verda, a la creació d'ocupació qualificada i al posicionament internacional de les empreses capdavanteres.

Catalunya disposa d'actius diferencials per liderar el CCUS al sud d'Europa. El clúster químic i energètic de Tarragona, l'ecosistema de l'hidrogen, la presència d'infraestructures logístiques i portuàries de primer nivell, la capacitat de recerca i innovació, així com la definició del Centre de Descarbonització de la indústria catalana i el projecte TarraCO₂ com a magatzem *offshore*, situen el territori en una posició privilegiada per esdevenir un hub de gestió del carboni i de combustibles sintètics.

El Centre de Descarbonització i les quatre plantes pilot mòbils són peces clau de la transició. Les unitats d'assaig de captura per absorció líquida, adsorció sòlida i carbonatació, juntament amb la planta de conversió Reverse Water Gas Shift & Fischer-Tropsch, permetran assajar tecnologies CCUS en condicions reals d'indústria, reduir el risc dels projectes a gran escala i accelerar la seva maduració tecnològica i econòmica.

Recomanacions estratègiques:

Definir una estratègia integrada de CCUS per a Catalunya i Espanya, alineada amb el marc europeu, que identifiqui sectors prioritaris, recorreguts tecnològics, necessitats d'infraestructura i objectius quantitatius de captura i emmagatzematge a 2030, 2040 i 2050.

Aprofitar les oportunitats que els necessaris desplegaments tecnològics suposen per la nostra indústria i ecosistema empresarial, tant per les indústries usuàries de la tecnologia, com per les que poden desenvolupar-la.

Planificar i desplegar una xarxa coordinada de transport i emmagatzematge de CO₂, combinant ceoductes, terminals portuàries i magatzems geològics *offshore* i *onshore*, amb especial atenció al corredor mediterrani i al paper del projecte TarraCO₂.

Impulsar un marc regulador i de finançament estable i previsible, que complementi el senyal de preu del CO₂ (EU ETS) amb instruments de suport a la inversió i l'operació (ajuts CAPEX, contractes per diferència, mecanismes de risc compartit), i simplifiqui i acceleri els procediments d'autorització i avaluació ambiental.

Reforçar el rol dels centres tecnològics, centres de recerca, universitats i infraestructures d'assaig, com el del futur Centre de Descarbonització, espai de prova, demostració i transferència al teixit industrial, i com a plataforma de formació de talent especialitzat en CCUS i hidrogen.

Treballar l'acceptació social i la transparència, explicant de forma rigorosa els beneficis i riscos del CCUS, i assegurant una governança participativa dels projectes, especialment en relació amb l'emmagatzematge geològic i les noves infraestructures.

Glossari

Acord de París de 2015: tractat internacional jurídicament vinculant adoptat en el marc de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic que estableix el compromís global de limitar l'augment de la temperatura mitjana mundial promovent estratègies nacionals de reducció d'emissions.

Agenda 2030: full de ruta global de les Nacions Unides per promoure un desenvolupament econòmic, social i ambientalment sostenible, que inclou els Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS).

AVR (Accreditation and Verification Regulation): Reglament europeu que estableix els requisits d'acreditació dels verificadors independents i la periodicitat de les auditories en el marc del seguiment de les emissions de CO₂.

Cap and trade: Mecanisme de mercat que estableix un límit màxim d'emissions i permet la compra i venda de drets d'emissió.

CCS (Carbon Capture and Storage): tecnologies de captura i emmagatzematge geològic permanent del CO₂.

CCU (Carbon Capture and Utilisation): tecnologies de captura i utilització del CO₂ com a recurs en processos industrials.

CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage): conjunt integrat de tecnologies per capturar, utilitzar i emmagatzemar el CO₂.

Comunicació de la Comissió sobre els Cicles de Carboni Sostenibles (COM(2021) 800): comunicació de la Comissió Europea que promou la creació d'un marc coherent per a l'emmagatzematge i la reutilització del carboni, integrant l'ús del CO₂ capturat en materials, productes i sòls agrícoles.

COP30: 30a Conferència de les Parts de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC) celebrada entre el 10 i el 21 de novembre de 2025 a Belém, Brasil.

DAC (Direct Air Capture): captura directa de CO₂ de l'aire ambient.

EOR (Enhanced Oil Recovery): tècnica de recuperació avançada de petroli mitjançant la injecció de CO₂ als jaciments.

EU ETS (European Union Emissions Trading System): règim de comerç de drets d'emissió de la Unió Europea, basat en el principi de cap and trade.

FEDER (Fons Europeu de Desenvolupament Regional): instrument financer de la Unió Europea destinat a reduir les desigualtats entre les diferents regions d'Europa i afavorir el desenvolupament econòmic, social i territorial equilibrat.

Fit for 55: paquet legislatiu europeu per assolir l'objectiu que regula la Llei Europea del Clima de neutralitat en emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per a l'any 2050.

GEH (Gasos amb Efecte d'Hivernacle): gasos que contribueixen a l'escalfament global, com el CO₂, el metà, etc.

IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle): tecnologia de gasificació integrada en cicle combinat per a la generació d'electricitat amb captura de CO₂.

Llei Europea del Clima: reglament europeu que confereix caràcter vinculant a l'objectiu de neutralitat en emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per a l'any 2050.

Llei de Canvi Climàtic: llei espanyola que regula la transició energètica i la reducció d'emissions.

Llei d'Indústria d'Emissions Netes Zero (Net Zero Industry Act): Llei europea que fixa objectius d'emmagatzematge de CO₂ i obliga els estats membres a informar sobre les seves capacitats.

MRR (Monitoring and Reporting Regulation): reglament europeu que estableix els criteris tècnics per quantificar el CO₂ capturat, transportat i emmagatzemat.

ODS (Objectius de Desenvolupament Sostenible): són els 17 objectius globals adoptats per les Nacions Unides el 2015 dins l'Agenda 2030, que estableixen un full de ruta per assolir un desenvolupament econòmic, social i ambientalment sostenible arreu del món.

Pacte Verd Europeu (European Green Deal): full de ruta estratègica adoptada per la Unió Europea el 2019 per transformar l'economia europea cap a la neutralitat climàtica. Inclou mesures per reduir emissions, fomentar l'eficiència energètica, impulsar l'economia circular, protegir la biodiversitat i garantir una transició justa, convertint la lluita contra el canvi climàtic en una prioritat transversal de totes les polítiques europees.

PNIEC (Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima): pla espanyol que estableix objectius de reducció d'emissions, energies renovables i eficiència energètica.

Règim de Comerç de Drets d'Emissió de la Unió Europea (EU ETS): mecanisme de mercat creat per la Unió Europea per limitar i reduir les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle de manera rendible i econòmicament eficient.

STEP (Strategic Technologies for Europe Platform): iniciativa europea per mobilitzar fons públics i impulsar projectes industrials en tecnologies estratègiques —digitals, net-zero i biotecnològiques— amb l'objectiu d'enfortir la competitivitat de la UE i reduir la seva dependència estratègica.

Introducció: marc normatiu de la descarbonització i de les tecnologies CCUS

La transició cap a una economia climàticament neutra constitueix un dels principals reptes regulatoris i tecnològics del nostre temps. En aquest context, el desenvolupament de l'**hidrogen verd** i les tecnologies de **captura, utilització i emmagatzematge de carboni**—classificades habitualment en **CCS** (captura i emmagatzematge geològic permanent), **CCU** (captura i utilització del CO₂ en processos industrials) i **CCUS**, que integra totes dues opcions— esdevenen instruments essencials per assolir els objectius internacionals i europeus de descarbonització. Aquesta distinció és rellevant per situar l'abast d'aquest informe, centrat principalment en el CCUS, en sintonia amb l'orientació estratègica de la Unió Europea cap a una gestió integrada del carboni. Cal destacar que el seu impuls i desplegament no depenen únicament de la maduresa tecnològica, sinó també d'un **entramat normatiu** que articula compromisos, obligacions, incentius i mecanismes de suport.

El punt de partida d'aquest marc jurídic és l'**Acord de París de 2015**, tractat internacional jurídicament vinculant adoptat en el marc de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic. Aquest acord estableix el compromís global de **limitar l'augment de la temperatura mitjana mundial molt per sota dels 2 °C i de continuar els esforços per no superar els 1,5 °C**, promovent estratègies nacionals de reducció d'emissions. Aquest compromís ha servit de **base per a l'acció climàtica de la Unió Europea**, que ha assumit un paper de lideratge normatiu i polític en aquest àmbit.

En l'àmbit comunitari, el **Pacte Verd Europeu (*European Green Deal*)**, adoptat per la Comissió Europea l'any 2019, constitueix el full de ruta per transformar el model econòmic de la Unió Europea cap a la neutralitat climàtica i l'eficiència en l'ús dels recursos. Aquest marc estratègic es concreta en diversos instruments jurídics, entre els quals destaca el **Reglament (UE) 2021/1119**, conegut com a **Llei Europea del Clima**, que confereix caràcter vinculant a l'objectiu de neutralitat en emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per a l'any 2050 i fixa una fita intermèdia de reducció d'almenys el 55% per l'any 2030 respecte als nivells de 1990. Per materialitzar aquest objectiu, la Comissió va impulsar el **paquet legislatiu "*Fit for 55*"**, conformat per un conjunt de directives i reglaments que reformen la política energètica, de transport i de comerç de drets d'emissió.

En relació amb els drets d'emissió, un dels instruments derivats més rellevants que hi trobem és el **Règim de Comerç de Drets d'Emissió de la Unió Europea (*EU ETS*)**, regulat per la Directiva 2003/87/CE, actualitzat recentment per la Directiva (UE) 2023/958 i la Directiva (EU) 2023/959 i regulat a Espanya per la Llei 1/2005, de 9 de març. Es tracta

d'un mecanisme de mercat basat en el principi de *cap and trade* (és a dir, "limitar i comerciar") que es considera la pedra angular de la política climàtica de la Unió Europea, ja que permet reduir les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle d'una manera rendible i econòmicament eficient. Aquest estableix un límit màxim d'emissions i permet la compra i venda de drets d'emissió, generant així un incentiu econòmic per reduir el carboni.

A més, la recent **Llei d'Indústria d'Emissions Netes Zero (Net Zero Industry Act)**¹, aprovada el 2024, reforça el compromís industrial amb la neutralitat climàtica, fixant l'obligació dels estats membres d'informar sobre les seves capacitats anuals d'emmagatzematge de CO₂ abans del 31 de desembre de 2026 i establint l'objectiu comú de capturar i emmagatzemar 50 milions de tones anuals de CO₂ l'any 2030. De manera complementària, la **Comunicació de la Comissió sobre els Cicles de Carboni Sostenibles (COM(2021) 800)** promou la creació d'un marc coherent per a l'emmagatzematge i la reutilització del carboni, integrant l'ús del CO₂ capturat en materials, productes i sòls agrícoles.

El desplegament d'aquestes polítiques es recolza en diversos organismes de la Unió Europea, com ara el Fons d'Innovació, destinat a impulsar tecnologies netes a gran escala; el Fons de Transició Justa, que dona suport a les regions més afectades per la descarbonització; i els programes de cohesió i desenvolupament regional (FEDER 2021–2027), actualment alineats amb la iniciativa STEP (*Strategic Technologies for Europe Platform*) per prioritzar projectes de descarbonització industrial i tecnologies de zero emissions netes.

En aquest context internacional, cal destacar la recent Declaració de Belém sobre industrialització verda global, adoptada el 16 de novembre de 2025 a la COP30, que impulsa la descarbonització de la indústria pesant a escala mundial mitjançant la cooperació internacional, la transferència tecnològica i el suport financer als països emergents. Aquesta declaració, subscrita per més de trenta països, reforça el compromís d'avançar cap a una indústria més neta, circular i competitiva, alineada amb els objectius de l'Acord de París. Cal destacar que Espanya s'ha adherit a la Declaració de Belém, comprometent-se a descarbonitzar sectors com l'acer, el ciment i la química, impulsar la innovació tecnològica i la cooperació internacional, i liderar projectes industrials verds amb un enfocament en la justícia climàtica.

A Espanya, el **Pla Nacional Integrat d'Energia i Clima 2021–2030 (PNIEC)**, actualitzat el 2023, constitueix l'eix de la **política energètica i climàtica**. Estableix l'objectiu de reduir almenys un 23% de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle per al 2030 respecte al 1990, augmentar les energies renovables i millorar l'eficiència energètica.

¹ Reglament (UE) 2024/1735 del Parlament Europeu i del Consell, de 13 de juny de 2024.

Aquest pla s'articula amb la **Llei 7/2021, de canvi climàtic i transició energètica ("Llei de Canvi Climàtic")**, i amb el desenvolupament normatiu recent que inclou el **Reial decret 91/2025**, sobre el mecanisme de governança energètica i climàtica, i el **Reial decret 214/2025**, que actualitza el registre d'empremta de carboni i obliga grans empreses i entitats públiques a elaborar plans de reducció quinquennals.

En matèria de **captura i emmagatzematge de carboni**, Espanya ha incorporat la **Directiva 2009/31/CE²** mitjançant la **Llei 40/2010, de 29 de desembre, d'emmagatzematge geològic de diòxid de carboni**, que regula l'autorització, control i clausura dels emmagatzematges geològics de CO₂, així com les garanties de seguretat ambiental i responsabilitat posterior. D'acord amb la Llei 40/2010, el carboni capturat i emmagatzemat de manera permanent en un lloc autoritzat no es considera "emès" a efectes de l'EU ETS, sempre que es compleixin els requisits de monitoratge i verificació establerts per la normativa europea.

En l'àmbit català, han sorgit diverses iniciatives orientades a cooperar en l'assoliment dels objectius comunitaris i estatals en matèria de descarbonització, entre les quals es troba l'**Estratègia de l'Hidrogen de Catalunya 2020-2030**, impulsada pel Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural i l'Institut Català d'Energia (ICAEN), constitueix l'instrument de planificació principal per fomentar la producció i l'ús d'hidrogen renovable. Aquesta estratègia es complementa amb la Vall de l'Hidrogen de Catalunya, una iniciativa de col·laboració pública i privada que integra empreses, centres de recerca, universitats, centres tecnològics i administracions amb l'objectiu de crear un ecosistema industrial efectiu de l'hidrogen verd, en línia amb les directives europees sobre descarbonització.

En aquest mateix context, destaca el **Projecte de Descarbonització de la Indústria Electroatensiva de Catalunya**, que impulsa l'Aliança per a la Descarbonització de la Indústria de Tarragona i presentat a l'Institut Català d'Investigació Química (ICIQ) el 12 de febrer de 2025. L'objectiu principal és el desenvolupament de solucions innovadores per a la captura i ús del CO₂ en sectors clau, mitjançant la creació de quatre plantes pilot experimentals mòbils, d'escala preindustrial, per ser assajades a la indústria. Aquest projecte compta amb un finançament inicial de 5 milions d'euros i està inclòs en el Programa FEDER Catalunya 2021-2027.

² Directiva 2009/31/CE del Parlament Europeu i del Consell, de 23 d'abril de 2009, relativa a l'emmagatzematge geològic de diòxid de carboni i per la qual es modifiquen la Directiva 85/337/CEE del Consell, les Directives 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE i el Reglament (CE) núm. 1013/2006 del Parlament Europeu i del Consell.

Així mateix, segons un **informe elaborat pel Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural³**, actualment l'ecosistema de l'hidrogen a Catalunya ja genera 426 milions d'euros amb la presència de 140 empreses al llarg de la seva cadena de valor que generen més de 1.300 llocs de treball.

A més a més, cal tenir present que el marc normatiu de la descarbonització s'inscriu també dins l'**Agenda 2030 de les Nacions Unides** i els seus **Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS)**, adoptats l'any 2015 com a full de ruta global per promoure un desenvolupament econòmic, social i ambientalment sostenible. En aquest context, l'**ODS 13: Acció pel Clima**, d'acord amb l'Acord de París, el Pacte Verd Europeu i la Llei Europea del Clima, actua com a marc transversal que estableix el compromís dels estats membres de "prendre mesures urgents per combatre el canvi climàtic i els seus efectes", integrant la mitigació i l'adaptació climàtica en les polítiques públiques i en les estratègies de desenvolupament.

A escala estatal i autonòmica, les estratègies de descarbonització i el desplegament de tecnologies CCUS contribueixen directament a l'assoliment de l'ODS 13, alhora que afavoreixen altres objectius complementaris, com l'**ODS 7 (Energia assequible i no contaminant)**, l'**ODS 9 (Indústria, innovació i infraestructura)** i l'**ODS 12 (Producció i consum responsables)**. D'aquesta manera, la integració dels ODS en el marc regulador espanyol i europeu no només reforça la coherència de les polítiques climàtiques, sinó que també consolida un enfocament sistèmic on la lluita contra el canvi climàtic es vincula amb la competitivitat econòmica, la innovació i la justícia social.

En conjunt, tot aquest entramat d'instruments jurídics i econòmics actua com un **motor de transformació econòmica i ambiental** i conforma un **ecosistema regulador orientat a garantir que la captura, l'emmagatzematge i la utilització del CO₂ es despleguin de forma segura i eficient**, fomentant el desenvolupament d'eines efectives per assolir la neutralitat climàtica, promovent alhora la competitivitat industrial, la innovació tecnològica i la sostenibilitat ambiental. En aquest context, **Catalunya es posiciona com un territori capdavanter** en l'aplicació pràctica d'aquests objectius europeus, amb un clar **compromís per integrar la recerca, la tecnologia i la indústria** amb l'objectiu d'**avançar cap a un model productiu més net, circular i competitiu**.

³ Informe elaborat pel Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, titulat «*L'ecosistema de l'hidrogen a Catalunya ja genera una facturació de 426 milions d'euros, segons un estudi d'ACCIO*», publicat el 18 de juliol de 2022 al lloc web d'ACCIO: <https://www.accio.gencat.cat/ca/accio/premsa-comunicacio/cercador-premsa-actualitat/article/20220718-hidrogen-verd-catalunya>.

Captura, Transport, Emmagatzematge i Ús de Carboni

El **CO₂** o **diòxid de carboni** és un dels principals **gasos amb efecte d'hivernacle (GEH)** generat per les activitats humanes i industrials. L'increment de les concentracions de CO₂ a l'atmosfera està accelerant la **crisi climàtica** a causa de l'escalfament global que provoca.

La **captura, ús i emmagatzematge de carboni (CCUS)** són un conjunt de tecnologies clau en la lluita contra el canvi climàtic, que seran imprescindibles per a poder assolir els **objectius del Pacte Verd de la UE (Green Deal)**, establerts el desembre 2019 de conformitat amb l'Acord Internacional de París. I més, quan el desembre de 2020, els líders europeus van acordar incrementar l'**objectiu de reducció d'emissions** netes de gasos amb efecte d'hivernacle del 40% al **55% pel 2030**, en comparació amb els nivells del 1990, aprovant el paquet de mesures "Fit for 55", per tal de fer realitat els objectius de la Llei Europea del Clima, que estableix i defineix l'objectiu de **neutralitat climàtica d'Europa per al 2050**, i que precisament integra les tecnologies CCUS com a eines per assolir-la.

Segons les últimes dades de la IEA (**Agència Internacional de l'Energia**), les **emissions globals de CO₂** han continuat incrementant-se, però de manera més lenta que l'activitat econòmica global i **en el 2024 van pujar un 0,8% respecte al creixement del 3,2% del PIB global**, el que significa que es manté des del 2021 un cert desacoblament entre el creixement de l'economia i el creixement de les emissions. Aquest increment del 0,8% representa un augment d'aproximadament 300 milions de tones de CO₂, assolint un màxim històric de 37,8 gigatonnes de CO₂, i la **concentració mitjana de CO₂ a l'atmosfera** ha estat d'aproximadament **422,5 ppm**, un nou rècord de concentració de gasos d'efecte hivernacle.

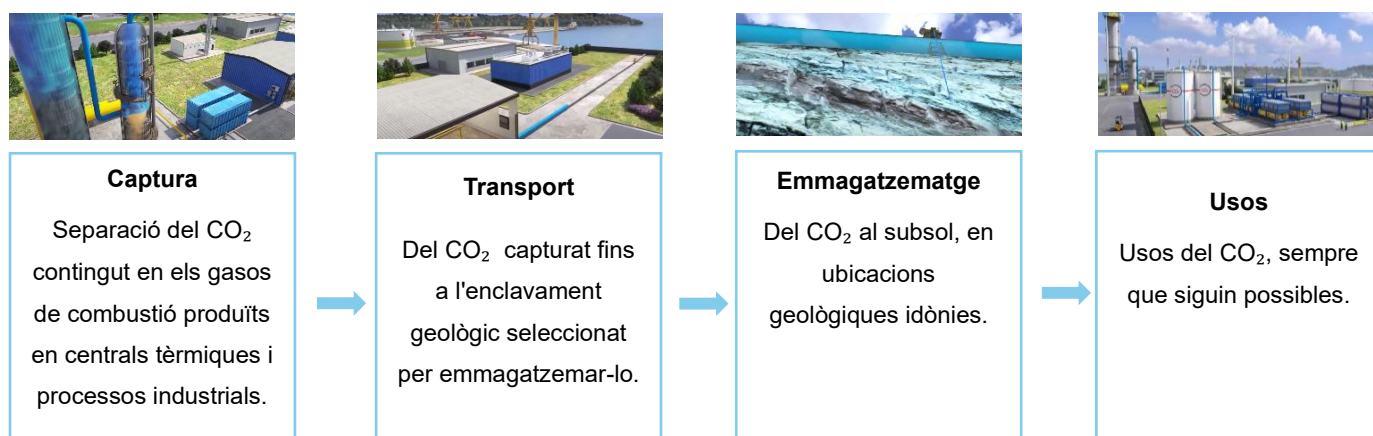
A la **Unió Europea**, segons l'anàlisi del CREA (Centre for Research on Energy and Clean Air), les **emissions de CO₂** provinents de combustibles fòssils **el 2024 van disminuir un 2,9% respecte a l'any 2023**, amb un **creixement del PIB europeu de l'1%**, i s'han reduït aproximadament un 37% en comparació amb els nivells del 1990, però **encara queda per reduir un 18% adicional per arribar a l'objectiu del 2030**.

L'eficiència energètica i les energies renovables, tant l'electricitat com la biomassa, seran l'eix central dels esforços per assolir la descarbonització de la UE, però per diferents sectors, entre els quals els corresponents a la **indústria d'ús intensiu d'energia**, serà molt difícil que tècnicament i/o econòmicament puguin utilitzar energies renovables per descarbonitzar-se. Per tant, **capturar, emmagatzemar i utilitzar el carboni** serà l'**única opció viable en les dècades vinents**.

El CCUS s'ha d'entendre com un complement específic per als sectors i processos on les emissions són intrínseques al mateix procés productiu (com en la fabricació de clínquer de ciment, calç o determinats fertilitzants) o bé on la combustió continuarà sent necessària durant dècades, com passa en la valorització energètica de residus o en alguns processos siderúrgics i de refinació. En aquests casos, la captura, l'ús i/o l'emmagatzematge de CO₂ permeten reduir de manera significativa unes emissions que difícilment es podrien eliminar només amb eficiència i electrificació.

Ja existeix un consens científic internacional que la lluita contra el canvi climàtic necessita una combinació de solucions entre les quals apareix amb força la captura, el transport, l'emmagatzematge, els usos i la transformació del CO₂ perquè, entre altres coses, difícilment la humanitat podrà viure sense carboni i del que es tracta principalment és de **desfossilitzar-se**, és a dir, **evitar l'extracció de més carboni de combustibles fòssils i utilitzar el carboni de les mateixes emissions de CO₂**, que no es podran evitar, per a transformar-lo en els seus diferents derivats.

A partir d'aquí, aquest apartat s'endinsa en la definició i funcionament del CCUS, proporcionant una comprensió detallada de com aquestes tecnologies operen per mitigar les emissions de diòxid de carboni (CO₂), un dels principals gasos d'efecte hivernacle que contribueix al canvi climàtic.



Font: elaboració pròpia

En primer lloc, explorarem la captura de CO₂ que es realitza a les instal·lacions industrials, incloent-hi plantes de generació d'energia i fàbriques, on el CO₂ és separat dels altres gasos abans que aquests arribin a l'atmosfera.

El CO₂ contingut en els gasos de combustió industrials es genera de forma molt intensa durant els procediments químics utilitzats per a fabricar materials com l'acer i el ciment i, també es produeix, quan es genera energia a partir de la combustió de carboni

contingut en combustibles fòssils i orgànics. Això passa, per exemple, quan es transformen residus no reciclables en calor i electricitat. Per tant, la combinació de la captura, ús i emmagatzematge del CO₂ serà bàsica en les properes dècades per descarbonitzar també el sector dels residus.

Després, el CO₂ es pot transportar fins al seu emmagatzematge a profunditats subterrànies, o bé es pot utilitzar com a matèria primera en la fabricació de productes industrials i/o combustibles sintètics.

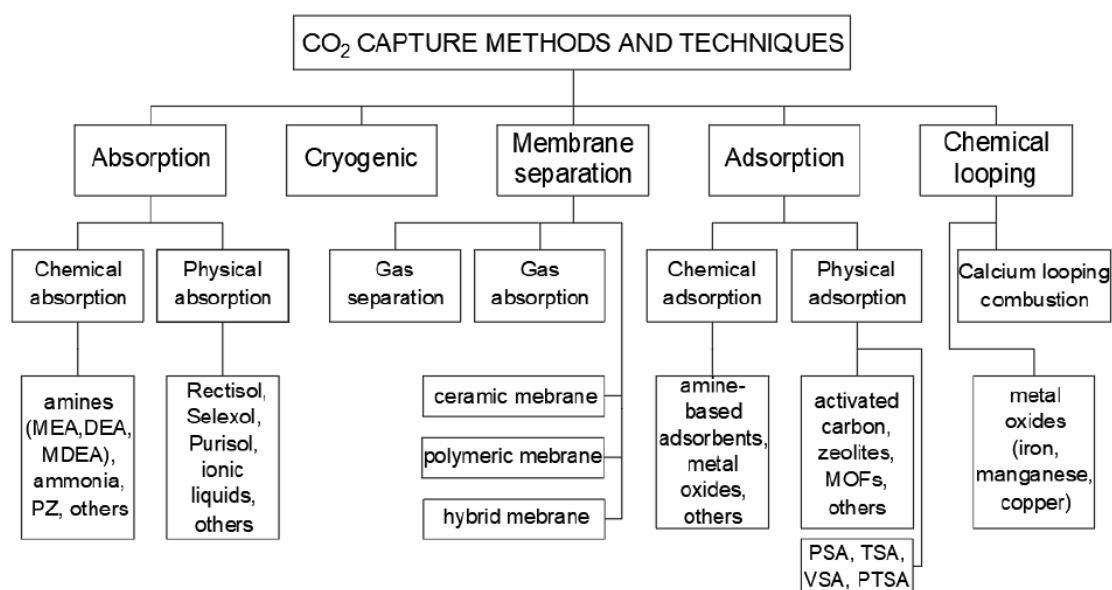
El seguiment i la verificació del CO₂ capturat, transportat i emmagatzemat s'han de fer segons el Reglament de Seguiment i Notificació i el Reglament de Verificació i Acreditació⁴ (**MRR** i **AVR**, respectivament, per les seves sigles en anglès). El MRR estableix els criteris tècnics per quantificar el CO₂ capturat, comprimit, transportat i injectat. D'altra banda, el règim de verificació de l'AVR fixa també els requisits d'acreditació dels verificadors independents, la seva competència tècnica i la periodicitat de les auditories. Aquest marc europeu assegura que la informació declarada per les empreses que operen instal·lacions de CCS és consistent, precisa i verificable, evitant dobles comptabilitzacions i garantint la integritat ambiental del sistema EU ETS.

Mètodes i tecnologies de captura de CO₂

Bàsicament, existeixen tres mètodes de captura de CO₂: **captura de carboni precombustió**, per **oxicombustió** i **postcombustió**, en funció de com es tracta la font de carboni. De manera resumida, les tecnologies de precombustió impliquen la conversió del combustible en productes gasosos com l'hidrogen i el monòxid de carboni, coneguts habitualment com a gas de síntesi (o "syngas"), que posteriorment mitjançant la reacció Water Gas Shift poden produir CO₂ i H₂ amb l'addició d'aigua. Les tecnologies d'oxicombustió consisteixen a cremar el combustible en presència d'oxigen pur, eliminant el nitrogen de la mescla combustible i d'aquesta manera, s'obté una mescla de CO₂ i aigua, que es pot eliminar fàcilment per condensació, quedant el CO₂ pur. I finalment, les tecnologies de post-combustió permeten recuperar el CO₂ després de cremar el combustible. Més endavant, en parlarem en més detall.

Per altra banda, existeixen diferents tecnologies de separació de CO₂, entre elles:

⁴ Reglament d'Execució (UE) 2018/2066 de la Comissió, de 19 de desembre de 2018, sobre el seguiment i la notificació de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle en aplicació de la Directiva 2003/87/CE del Parlament Europeu i del Consell, i pel qual es modifica el Reglament (UE) núm. 601/2012 de la Comissió (MRR); i el Reglament d'Execució (UE) 2018/2067 de la Comissió, de 19 de desembre de 2018, relatiu a la verificació de les dades i a l'acreditació dels verificadors de conformitat amb la Directiva 2003/87/CE del Parlament Europeu i del Consell (AVR).



Font: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. *Energies* 2022, 15, 887.

Una de les **tecnologies de separació** més avançades és la d'**absorció mitjançant sorbents líquids**, també coneguda com a captura de carboni a base de dissolvents, que utilitza habitualment absorbents líquids com amines, encara que darrerament també s'estan emprant líquids iònics o d'altres tipus de sorbents. Les amines presenten una alta capacitat de captura, una bona cinètica de reacció i és una tecnologia prou madura, però necessita millorar l'estabilitat dels dissolvents, que tendeixen a descompondre's i formar compostos tòxics, són altament corrosius i el procés de regeneració té un alt consum energètic. Els líquids iònics són sals líquides a temperatura ambient que presenten una alta afinitat pel CO₂, tenen una baixa volatilitat i alta estabilitat tèrmica, però tenen una alta viscositat que dificulta la seva manipulació i la seva toxicitat i biodegradabilitat s'ha d'acabar d'avaluar. Altres tipus de sorbents, com els orgànics, presenten una baixa corrosivitat i la possibilitat de regeneració a temperatures més baixes, però també presenten una alta toxicitat i baixa biodegradabilitat, així com fins ara una baixa capacitat de captura.

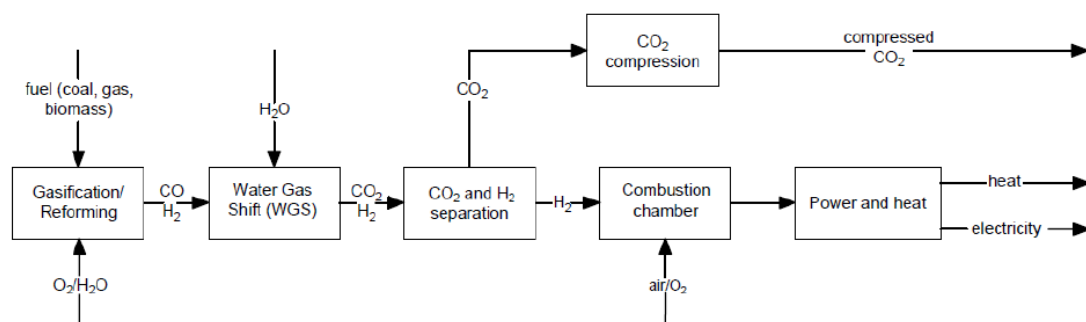
Una altra tecnologia de separació amb projecció de futur és la d'**adsorció mitjançant sorbents sòlids**, també coneguda com a captura de carboni en estat sòlid, que utilitza habitualment adsorbents sòlids tipus MOFs (estructures metal·lo-orgàniques d'alta porositat i gran superfície específica, en anglès Metal–Organic Framework), zeolites (materials cristal·lins amb una estructura microporosa formats per àtoms de silici i alumini units per àtoms d'oxigen), materials basats en carboni (carbó actiu, nanotubs, grafè, carbons porosos) o combinacions d'aquests materials amb amines o líquids iònics suportats. Aquesta tecnologia té diferents reptes de desenvolupament que inclouen l'optimització del rendiment del material adsorbent, la millora de l'eficiència energètica

de les etapes de captura i regeneració, la reducció de costos i la garantia de la compatibilitat amb els diferents processos industrials.

Per altra banda, existeixen tecnologies de captura que combinen la captura i l'ús a la vegada, com seria la tecnologia de **carbonatació** o mineralització on es transforma el CO₂ capturat en minerals carbonatats estables. Aquesta tecnologia té com a objectiu emmagatzemar CO₂ de manera permanent i al mateix temps produir materials valuosos de baixa petjada de carboni que poden trobar diferents aplicacions, per exemple, en el sector de la construcció. Els reptes a abordar són diversos, com la disponibilitat de materials alcalins adequats, la cinètica de reacció, l'escalabilitat del procés i les aplicacions dels productes finals, així com la integració energètica del procés per optimitzar l'eficiència global.

Passem ara a descriure els diferents **mètodes de captura en funció de si el CO₂ es captura abans o després de la combustió**.

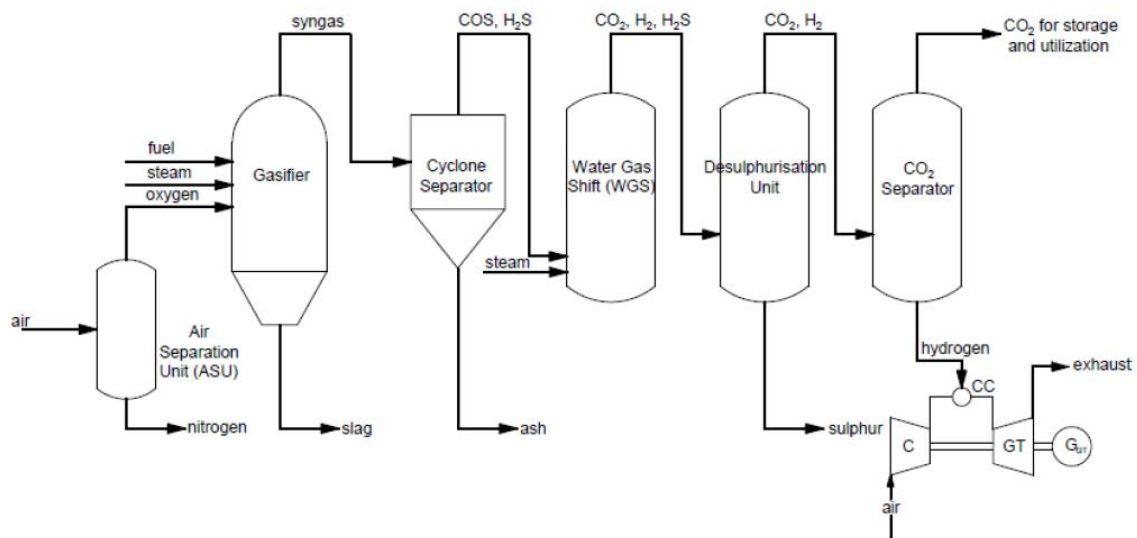
La **captura de carboni precombustió** té lloc abans del procés de combustió mitjançant la gasificació del combustible amb oxigen, per exemple, la tecnologia de gasificació integrada en cicle combinat, en anglès IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle). En aquest mètode, el combustible (carbó, gas, biomassa) no es crema completament dins del reactor, sinó que es converteix en una mescla de CO i H₂ durant el procés de reformació o gasificació. Posteriorment, aquest gas de síntesi addicionant aigua i mitjançant la reacció Water Gas Shift produeix CO₂ i H₂. L'hidrogen s'aprofita energèticament en una turbina de gas per a produir electricitat, o bé s'emmagatzema per al seu ús posterior. D'altra banda, el CO₂ se separa per transportar-lo i emmagatzemar-lo o usar-lo.



Font: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. *Energies* 2022, 15, 887.

Aquest tipus de captura s'aplica àmpliament en la producció de fertilitzants, productes químics, combustibles gasosos (H₂, CH₄) i producció d'energia.

L'esquema de la tecnologia de gasificació integrada en cicle combinat (IGCC) per a la generació d'electricitat, utilitzant una turbina de gas i la captura de CO₂ precombustió podria ser la següent:

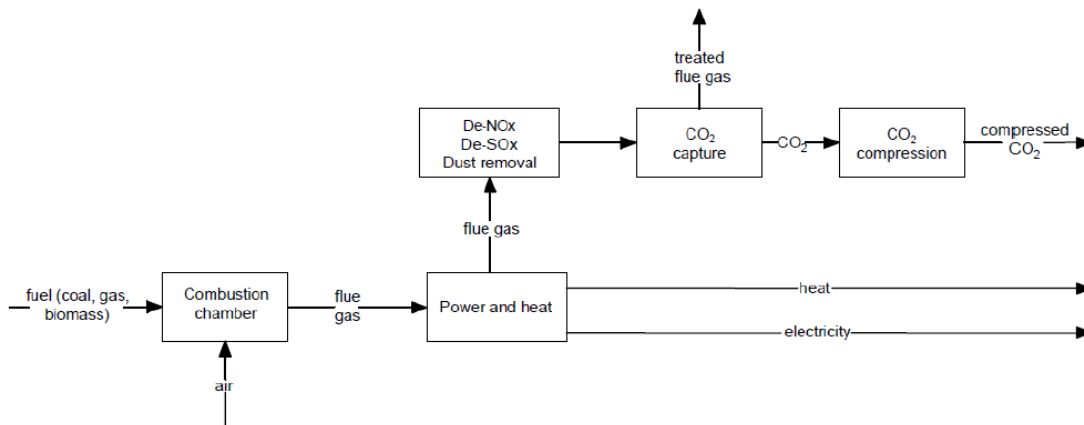


Font: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - *Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies*. *Energies* 2022, 15, 887.

El procés de captura precombustió utilitza habitualment tecnologies de captura físiques i químiques. Els absorbents químics, com els carbonats, i els solvents físics, com el polipropilè glicol i el metanol, s'utilitzen comercialment a les indústries per capturar CO₂. El cost i el consum energètic de la captura de carboni depenen de la infraestructura i del procés de captura. Una tecnologia de captura de carboni precombustió amb solvents o absorbents efectius pot aconseguir capturar més del 90% del CO₂, però, al mateix temps, redueix l'eficiència de la planta.

Els mètodes de precombustió són molt efectius en la separació de CO₂ a causa de l'alta concentració de CO₂ en el combustible abans de la combustió, però són costosos a causa de la necessitat d'una unitat de gasificació.

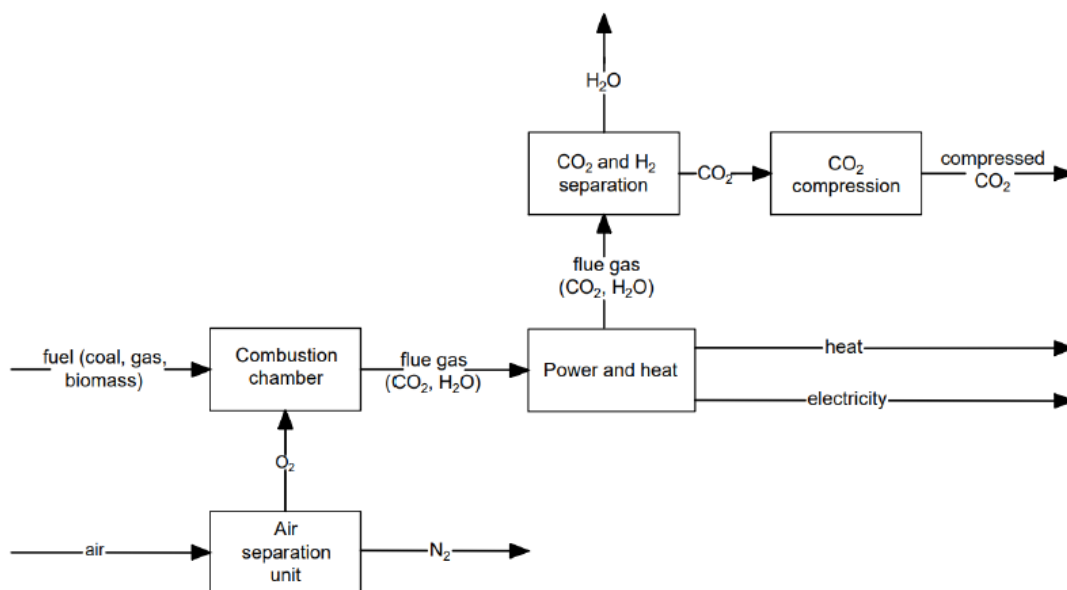
La **captura de carboni postcombustió** té lloc després del procés de combustió. El CO₂ es separa dels gasos generats després de la combustió convencional de combustibles fòssils. En aquest mètode de captura s'utilitza habitualment les tecnologies de captura per absorció química, adsorció física, separació amb membranes o l'ús d'un bucle químic.



Font: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. Energies 2022, 15, 887.

Aquest és l'esquema que s'aplicaria a les centrals elèctriques de combustibles fòssils. El CO₂ es captura dels gasos de combustió de les centrals elèctriques o altres fonts puntuals. La tecnologia està ben entesa i s'utilitza actualment en altres aplicacions industrials, tot i que en una escala molt més petita.

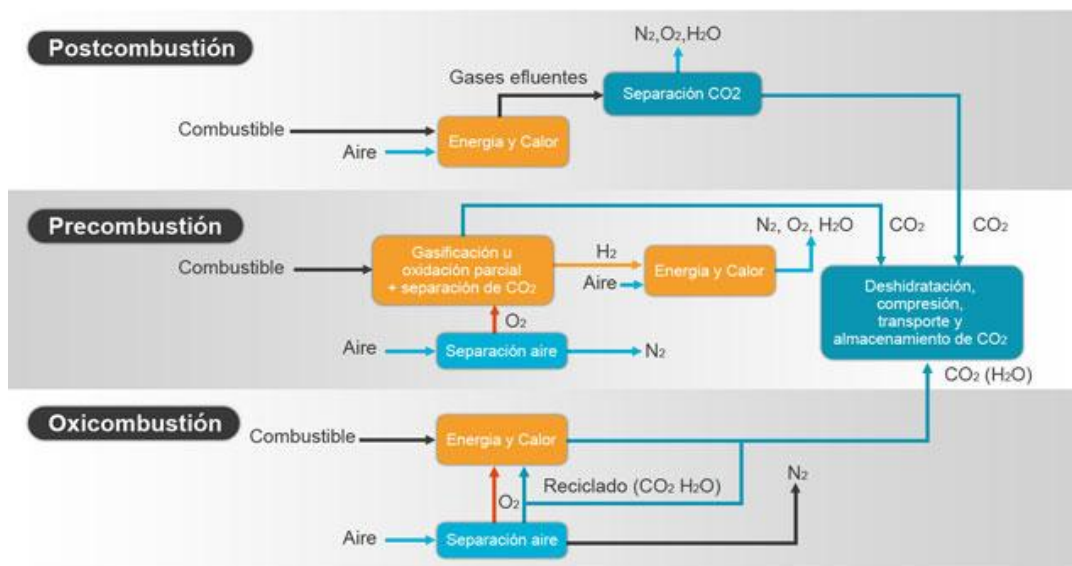
La **captura de carboni per oxidació** té lloc després del procés de combustió en una atmosfera d'oxigen, separant el CO₂ generat durant el procés d'oxidació, per exemple, utilitzant una turbina de gas d'oxigen. L'atmosfera d'oxigen es pot obtenir eliminant el nitrogen de l'aire abans del procés de combustió.



Font: Madejski, P.; Chmiel, K.; Subramanian, N.; Kus, T. - Methods and Techniques for CO₂ Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. Energies 2022, 15, 887.

En la combustió amb oxigen (oxicombustió), el combustible es crema en oxigen pur en lloc d'aire. Per limitar les temperatures de flama resultants als nivells comuns durant la combustió convencional, el gas de combustió refredat es recircula i s'injecta a la cambra de combustió. El gas de combustió consta principalment de CO₂ i vapor d'aigua, aquest últim es condensa mitjançant refredament. El resultat és un corrent de CO₂ gairebé pur. Els processos de les centrals elèctriques basats en la combustió amb oxigen es coneixen a vegades com a cicles "sense emissions", ja que el CO₂ emmagatzemat no és una fracció extreta del corrent de gas de combustió (com en els casos de captura pre i postcombustió), sinó del mateix corrent de gas de combustió. Una fracció del CO₂ acaba inevitablement a l'aigua condensada. Per garantir l'etiqueta "sense emissions", l'aigua hauria de ser tractada o eliminada adequadament.

En resum, els tres mètodes de captura de CO₂, ja descrits, que s'utilitzen més habitualment per a capturar el CO₂ en instal·lacions industrials, abans que arribi a l'atmosfera, es podrien esquematitzar i comparar de la següent manera:



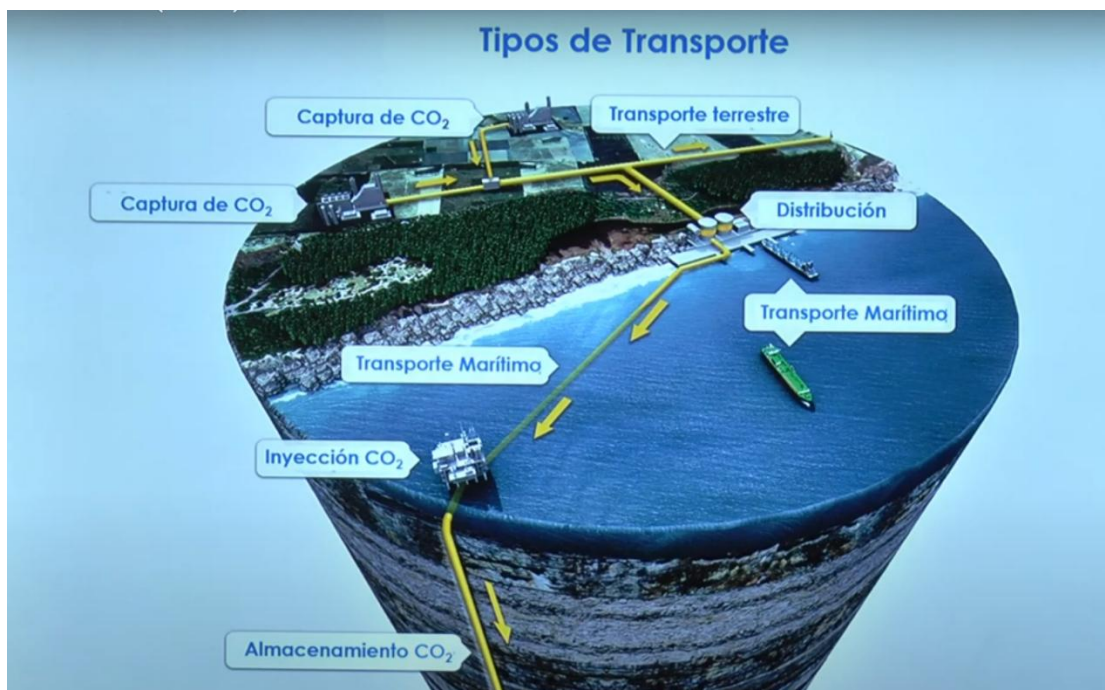
Font: <https://pteCO2.es/captura/>

Per altra banda, un altre mètode de captura de CO₂ alternatiu als anteriors, seria el de **captura directa de l'aire** ambient que respirem (en anglès DAC, Direct Air Capture). En aquest cas, però, la concentració més baixa de CO₂ a l'aire (només 422,5 ppm) en comparació amb les fonts de combustió (fins a 150.000 ppm en una central elèctrica amb carbó) complica l'enginyeria de procés i, per tant, fa que el procés sigui molt més car. Per tant, capturar el CO₂ és més efectiu des de fonts puntuals, com podrien ser grans instal·lacions d'energia basades en combustibles fòssils, indústries amb emissions importants de CO₂ (per exemple, producció de ciment, siderúrgia o residus), processament de gas natural, plantes de combustible sintètic i plantes de producció d'hidrogen basades en combustibles fòssils.

De totes maneres, un repte important a tenir en compte en qualsevol d'aquestes tecnologies és que la captura i el tractament del CO₂ consumeixen molta energia i només té sentit la seva aplicació si es fa amb generació d'energia verda.

Per altra banda, totes aquestes tecnologies també plantegen reptes i preocupacions rellevants en el procés posterior a la captura, com serien en les fases de **transport i emmagatzematge i usos del CO₂**.

A continuació, detallarem els mètodes de transport del CO₂ capturat i comprimit, que generalment inclouen el seu trasllat a través de canonades o per transport marítim o terrestre, fins a llocs on pot ser definitivament emmagatzemat. La selecció de la metodologia de transport depèn de factors com la distància, cost i infraestructura disponible.



Font: Global CCS Institute

Transport:

Quan el CO₂ comprimit s'ha de transportar al seu lloc d'emmagatzematge existeixen bàsicament tres opcions de transport:

- A través de canonades, també anomenades ceoductes, similars als gasoductes utilitzats per la indústria del gas natural.
- Emprant camions cisterna.
- Mitjançant vaixells, sobretot si la font de CO₂ està molt allunyada de l'àrea d'emmagatzematge.
- D'altres tècniques experimentals

Si ens centrem en la xarxa de transport de CO₂ per canonades, aquesta no hauria de semblar-se obligatòriament a l'actual xarxa de gas natural que dona servei a pràcticament tots els negocis de la UE i la majoria dels edificis. La xarxa de CO₂ s'hauria de focalitzar en els pols industrials, on es produiria la demanda de captura i en la ubicació dels possibles emplaçaments d'emmagatzematge i ús.

En qualsevol cas, serà important desenvolupar un pla progressiu per al desenvolupament de la xarxa de transport i de l'emmagatzematge de CO₂ a Europa, per a garantir que, com a mínim, els pols industrials més importants estiguin connectats abans del 2030, quan és probable que el Règim de Comerç de Drets d'Emissions (EU ETS) es converteixi en rellevant per a aquestes empreses.

I cal tenir en compte, que la reutilització de canonades de gas i petroli no utilitzades també podria ser una opció per a reduir significativament les inversions i accelerar la xarxa de transport de CO₂, per incrementar i fer més viables els projectes de CCS, per una banda, i per reduir el cost social i l'impacte ambiental associat amb el desmantellament d'aquestes instal·lacions.

Emmagatzematge:

En aquest apartat abordarem les opcions d'**emmagatzematge del CO₂**, que sovint impliquen la injecció del gas en formacions geològiques subterrànies com ara camps de petroli i de gas esgotats o aqüífers salins profunds. Aquesta fase del procés és crucial per garantir que el CO₂ es mantingui aïllat de l'atmosfera durant milers d'anys, contribuint així efectivament a la reducció de les emissions globals.

En aquests dipòsits subterranis, que tenen prou capacitat per emmagatzemar volums molt grans de CO₂, el diòxid de carboni s'injecta a una profunditat de 800 metres o més, omplint tot l'espai porós del dipòsit subterrani fins a assolir la capa de roca impermeable. A mesura que la profunditat augmenta, es registra un increment simultani a la pressió i la temperatura. En aquestes condicions, el CO₂ romandrà atrapat a la roca durant milers d'anys. La seguretat al lloc d'emmagatzematge es regeix pels controls ambientals estrictes.

Les caveres de sal terrestres també es plantegen com una possible solució per a l'emmagatzematge d'hidrogen. Nombroses investigacions subratllen que es tracta d'una solució d'emmagatzematge permanent i segura.

La Comunicació de la Comissió sobre Cicles del Carboni Sostenibles estableix: "Els jaciments de petroli i gas esgotats i els aqüífers salins tenen el potencial d'emmagatzemar milers de milions de tones de CO₂ en emplaçaments a alta mar, i la unió del CO₂ a roques basàltiques o altres processos de mineralització del diòxid de carboni són altres opcions potencialment desplegable a gran escala".

Des del punt de vista legal, cal tenir present que els projectes d'emmagatzematge geològic de CO₂, tal com es defineixen a la Directiva 2009/31/CE, estan sotmesos a avaluació d'impacte ambiental (AIA) d'acord amb la Directiva 2011/92/UE, modificada per la Directiva 2014/52/UE. L'AIA ha de valorar la caracterització geològica, els riscos de fuites i sismicitat, la protecció dels aquífers i els plans de seguiment i clausura, garantint la seguretat a llarg termini de l'emmagatzematge.

A Espanya, aquestes obligacions es recullen a la referida Llei 21/2013, d'avaluació ambiental, i a la Llei 40/2010, sobre emmagatzematge geològic de CO₂, de manera que no pot atorgar-se l'autorització d'explotació sense una declaració d'impacte ambiental favorable.

Cal tenir present, però que, tot i que la normativa europea no prohibeix emmagatzemar CO₂ en caveres de sal si es demostra que el lloc és segur, alguns països ho limiten o directament no ho volen fer en terra ferma. Per això, el que s'està impulsant més a curt termini són magatzems mar endins (sobretot al Mar del Nord), i caldrà una bona xarxa de transport —canonades i vaixells— per portar-hi el CO₂.

Usos del CO₂

El CO₂ capturat de processos industrials té una varietat d'usos que poden contribuir a la seva reutilització i a la reducció de l'impacte ambiental. Aquests usos es poden dividir en ús directe (on el CO₂ s'utilitza en la seva forma capturada) i ús indirecte (on es transforma en altres productes):

Usos directes:

- Producció de begudes carbonatades: El CO₂ s'utilitza per crear les bombolles en begudes com refrescos, cervesa i aigua amb gas.
- Injecció en camps petrolífers: En la tècnica de recuperació avançada de petroli (EOR, per les seves sigles en anglès), el CO₂ s'injecta als jaciments per augmentar la pressió i extreure petroli residual.
- Indústria alimentària: S'utilitza en forma líquida o sòlida (gel sec) per refrigerar, conservar aliments o envasar aliments en atmosferes controlades.
- Fabricació de materials: S'utilitza en processos de fabricació de plàstics, com a refrigerant industrial i en la fabricació de compostos químics com la urea.
- Fixació en materials de construcció: El CO₂ capturat es pot utilitzar per curar formigó, incorporant-lo permanentment dins d'aquest material i millorant-ne les propietats mecàniques.
- Cultiu d'algues: El CO₂ s'utilitza com a font de carboni per al creixement d'algues, que es poden utilitzar per produir biocombustibles, aliments o altres productes químics.
- Gas medicinal: Es fa servir en cirurgies laparoscòpiques o per a teràpies respiratòries.

- Investigació en laboratoris: Es pot utilitzar per simular condicions d'atmosferes específiques o en experiments de fixació de carboni.

Usos indirectes com a matèria primera química:

- **Conversió a polímers:** Es pot utilitzar per a fabricar plàstics i altres materials polimèrics a través de reaccions amb epòxids.
- **Producció de combustibles sintètics:** El CO₂ es pot transformar en metanol, etanol i altres combustibles sintètics mitjançant processos químics amb hidrogen verd, oferint una alternativa als combustibles fòssils per a les indústries i el sector del transport de difícil electrificació, com podria ser el sector marítim i l'aviació.

A més dels processos químics convencionals, també s'estan desenvolupant processos electroquímics per convertir CO₂ en metanol, etanol i altres productes químics. Aquests processos ofereixen una solució més eficient i adaptable, amb la possibilitat d'integrar-los amb fonts d'energia renovable com l'hidrogen verd, potenciant encara més el caràcter circular de les tecnologies CCUS.

Alguns exemples destacats inclouen: Electròlisi de CO₂ a metanol i etanol, mitjançant l'ús d'elèctrodes i catalitzadors específics, el CO₂ pot ser reduït a metanol i etanol, processos que es poden integrar directament a les cadenes de producció industrials i contribuir a la descarbonització dels sectors que necessiten combustibles líquids. Diverses instal·lacions estan provant aquestes tecnologies electroquímiques a petita i mitjana escala, per a validar-ne la seva viabilitat tècnica i econòmica, amb l'objectiu de demostrar la capacitat d'integrar aquestes solucions en processos industrials a gran escala.

Context internacional i local: anàlisi del marc global i com es posiciona el territori en aquest àmbit

El canvi climàtic fa que la descarbonització de l'economia sigui una prioritat. Com ja s'ha comentat, la captura, el transport, l'emmagatzematge i ús del diòxid de carboni ajuda a limitar i eliminar les emissions de CO₂ a l'atmosfera. Oferir la captura de CO₂ com a alternativa ens permet augmentar les nostres solucions per a reduir la petjada de carboni a sectors com el de l'energia i el sector industrial.

El compromís internacional consolidat per l'Acord de París de 2015 ha impulsat nombrosos països a adoptar tecnologies avançades de captura i emmagatzematge de carboni (CCS) i, de manera creixent, també a explorar la seva utilització en processos industrials (CCUS) com a **eines clau per assolir els seus objectius de descarbonització**. En aquest sentit, el context internacional es caracteritza per una acceleració en el desplegament d'aquestes tecnologies, integrada en els esforços globals per combatre el canvi climàtic, establir fites ambicioses de reducció d'emissions i situar la captura i gestió del CO₂ com una peça clau en les estratègies climàtiques nacionals.

A escala mundial, CCS i CCU són considerades eines crítiques per assolir la neutralitat de carboni. Segons **l'Agència Internacional de l'Energia (IEA), complir amb els objectius climàtics per al 2050 requerirà la captura i emmagatzematge d'aproximadament 7,6 gigatonnes anuals de CO₂**. Aquesta necessitat ha impulsat la creació de polítiques de suport, subvencions i marcs reguladors específics en regions clau com els Estats Units, la Unió Europea i països líders com Noruega, que estan desenvolupant projectes a gran escala com el "Northern Lights", amb la participació d'importantes empreses energètiques.

Països com els Estats Units, Canadà, Noruega i el Regne Unit han liderat l'adopció de **tecnologies de CCS**, gràcies en part a la seva àmplia experiència en la indústria petroliera i gasista, que facilita la infraestructura i el coneixement tècnic necessari per a la gestió del CO₂. Aquestes nacions han implementat polítiques favorables, com incentius fiscals i suport a la investigació i desenvolupament, que han estimulat la inversió tant pública com privada en projectes CCS.

Concretament, als Estats Units, el Departament d'Energia té un programa amb un pressupost d'aproximadament 2.500 milions de dòlars destinat al desenvolupament de sis instal·lacions de captura de carboni. L'objectiu és millorar l'eficiència, reduir costos, disminuir les emissions i millorar el rendiment ambiental en l'ús del carbó i del gas natural, així com l'absorció de CO₂ de l'atmosfera. L'agost del 2024, el Departament va anunciar una inversió de 1.200 milions de dòlars per a les dues primeres instal·lacions de captura directa de carboni (DAC), amb la intenció de tenir-ne quatre en total.

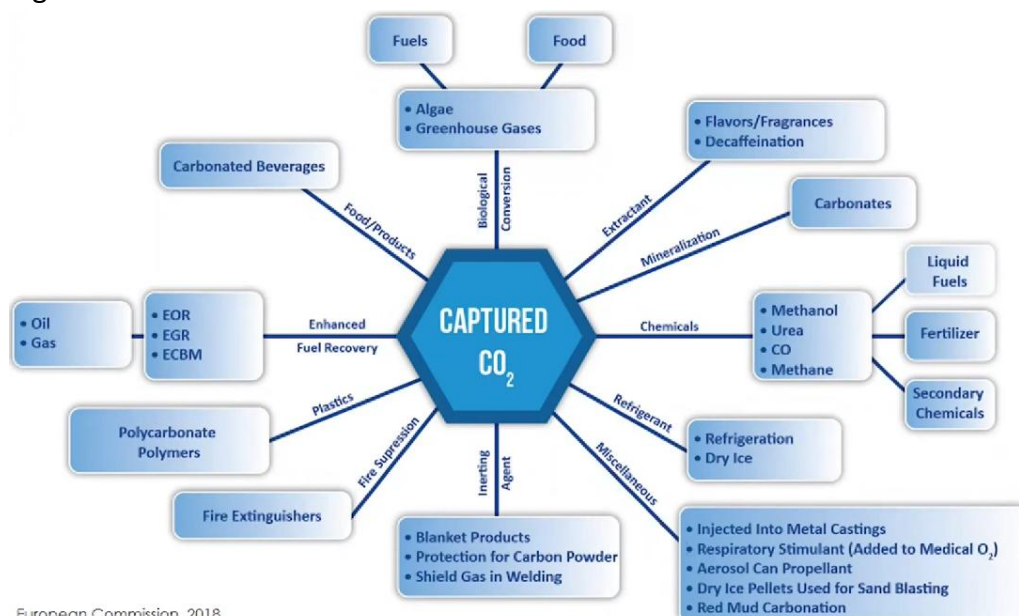
Aquestes instal·lacions destaquen per la capacitat d'absorbir i emmagatzemar fins a un milió de tones de CO₂ a l'any.

Per altra banda, a l'Àsia, països com la Xina i Corea del Sud també han incorporat la CCS en les seves polítiques energètiques nacionals, reconeixent la seva importància per a l'assoliment de la neutralitat de carboni.

L'Agència Internacional de l'Energia (AIE) va indicar recentment que hi ha al voltant de 130 plantes DAC en desenvolupament a tot el món, 27 de les quals ja estan operatives i 8 a punt d'entrar en funcionament. Tot i això, totes aquestes plantes són de petita escala i tenen una capacitat d'eliminació de CO₂ molt menor comparada amb les instal·lacions previstes als Estats Units.

A l'àmbit europeu, la Comissió Europea ha reconegut la necessitat d'una estructura legal robusta per al desplegament de la captura i l'emmagatzematge de carboni dins l'estratègia industrial verda de la Unió Europea. Aquesta prioritat s'ha materialitzat en la ja esmentada Llei de la Indústria amb Zero Emissions Netes (**Net Zero Industry Act**). L'objectiu és que, a partir de 2030, la UE disposi d'una capacitat operativa d'injecció d'almenys 50 milions de tones de CO₂ anuals, amb una contribució proporcional de cada estat segons el volum de les seves emissions.

Per assolir la neutralitat en carboni, la Unió Europea necessita capturar entre 300 i 600 milions de tones de CO₂ anualment, segons els experts. **A Espanya, s'estima que s'hauran de capturar entre 35 i 40 milions de tones de CO₂ a l'any**, amb aproximadament 22 milions de tones provinents de processos industrials en sectors com ara els de fabricació del ciment, la calç, la dolomita i la magnèsia. Aquests sectors generen CO₂ en descompondre carbonats per produir òxids necessaris per als seus productes. A més, 4 milions de tones més provenen de la petroquímica i la química orgànica, 4 milions més de la refinació de petroli i aproximadament 1 milió del sector siderúrgic.



European Commission, 2018

En el context de Catalunya, la regió es troba en una **posició privilegiada per contribuir a les tendències globals en descarbonització**. El país disposa d'una **base industrial sòlida** —especialment en els sectors químic, energètic i metal·lúrgic— que concentra una part important de les emissions de CO₂ i que, alhora, constitueix un àmbit prioritari per al desplegament de tecnologies CCUS. A més, Catalunya compta amb la **infraestructura industrial i les connexions logístiques adequades** per impulsar projectes integrats de captura i emmagatzematge que podrien esdevenir referents a escala europea. Aquest potencial s'alinea amb el **compromís de l'administració catalana amb la sostenibilitat i la innovació tecnològica**, materialitzat en diverses iniciatives i plans d'acció climàtica.

Per tant, Catalunya hauria de considerar una **estratègia integrada** que combini **polítiques de suport, inversió en recerca i desenvolupament, aliances estratègiques i iniciatives de sensibilització pública** per maximitzar els beneficis de la CCS i la CCU. Aquest enllaç entre el context local i internacional és crucial per a posicionar Catalunya com un líder en la transició cap a una economia baixa en carboni.

Catalunya també està ben posicionada per aprofitar el finançament europeu a través de programes com el Fons de Transició Justa, que proporciona recursos per a les regions que busquen transformar les seves economies cap a models més sostenibles. L'existència a Catalunya de centres de recerca, universitats i centres tecnològics facilita la investigació i el desenvolupament en CCU, convertint el CO₂ en productes de valor afegit que podrien generar un nou sector industrial sostenible.

A tall d'exemple, la Comissió Europea subvencionarà amb 205 milions d'euros (205.061.582 euros), a càrrec del Fons d'Innovació de la Unió Europea, el projecte TarraCO₂, un magatzem de CO₂ *offshore* davant la costa de Tarragona (a uns 45 quilòmetres en línia recta del polígon petroquímic de Tarragona), impulsat per Repsol. Es tracta d'un dels 77 projectes de descarbonització que acaben de signar el conveni de subvenció després que, l'octubre de 2024, s'anunciessin els resultats de la convocatòria de 2023. En el cas del projecte TarraCO₂, amb entrada en funcionament prevista per al 31 de desembre de 2030, la CE calcula que aquesta infraestructura serà capaç d'emmagatzemar uns 2 milions de tones de CO₂ equivalent a l'any, fins a una capacitat màxima de 54 milions de tones.

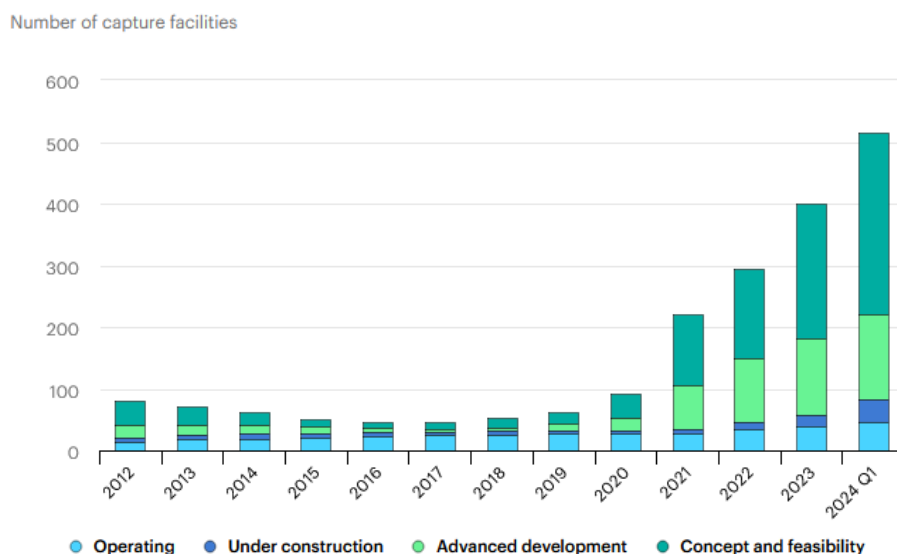
Casos d'èxit: exemples de projectes o indústries que implementen CCUS

Les xifres de projectes de captura i utilització de CO₂ ofereixen una projecció de creixement exponencial en els pròxims cinc anys, fins al 2030. Segons dades de l'**Agència Internacional de l'Energia (IEA)**, actualment les **plantes de CCUS a tot el món capturen anualment més de 50 Mt de CO₂**. **Existeixen un total de 45 plantes comercials de captura operant al món**, de les quals deu són d'escala gran (amb capacitats per sobre dels 100 Mt CO₂ /any i per sobre de les 1000 t CO₂ /any per aplicacions de captura directa de l'aire (DAC), que van entrar en operació el 2023).

A partir de l'any 2022, una vegada superada la pandèmia de COVID-19, s'han activat els projectes en desenvolupament a escala mundial i segons les projeccions de l'IEA, entre els projectes en operació, desenvolupament i estudi, se superaran les 400 Mt CO₂ /any de capacitat de captura. No obstant això, com podem observar a la figura següent, estem lluny de les més de 1000 Mt CO₂ /any necessàries per aconseguir l'objectiu d'emissions netes zero per al 2030.

Amb això, el missatge que volem transmetre és que són necessaris més esforços a tots els nivells, no només per capturar el CO₂ des de les fonts d'emissió, sinó també per treballar en el desenvolupament de noves tecnologies i la seva escalabilitat.

El nombre de plantes de captura de CO₂ no ha deixat de créixer des del darrer lustre, sobretot en fase de desenvolupament i estudi, havent experimentat un creixement exponencial des de l'any 2020. És destacable, segons les dades de l'IEA, el nombre de projectes en desenvolupament i estudi, en termes absoluts, més de 400 a tot el món.



Font: IEA.org

Per destacar alguns exemples de projectes operatius, als **EUA** hi ha diversos projectes operatius, com el Blue Flint Ethanol Project, Linde Clear Lake capture, entre altres. A la Xina, hi ha quatre projectes de gran capacitat, com el Jiling Petrochemical CCUS facility, el CNOCC, la primera fase del Guanghai Energy CCUS integration Project i la planta de generació d'energia China Energy Taizhou, aquesta última amb una capacitat de captura de 500kt/any de CO₂.

Pel que fa a l'**emmagatzematge a Europa**, actualment **Noruega** en té el lideratge, amb els projectes **Sleipner** (en operació des de 1996, ~1 Mt/any) i **Snøhvit** (des de 2008, fins a ~0,7 Mt/any), i recentment amb **Northern Lights**, la primera infraestructura oberta a tercers per a transport i emmagatzematge, que va iniciar les injeccions el 25 d'agost de 2025. En aquest darrer projecte, el CO₂ capturat s'entrega per vaixell a la terminal d'Øygarden i es condueix per una canonada submarina d'uns 100 km fins al reservori Aurora, situat a uns 2.600 m sota el fons marí. La Fase 1 té una capacitat d'1,5 Mt/any i ja s'ha aprovat l'expansió a ≥5 Mt/any a partir de 2028. Entre els primers clients hi ha Yara Sluiskil (Països Baixos), amb un acord comercial per a uns 800.000 t/any de CO₂.

Als **Països Baixos** el projecte **Porthos** està en construcció i preveu entrar en servei el 2026 amb 2,5 Mt/any d'emmagatzematge en camps de gas esgotats al mar del Nord. El projecte Athos es va cancel·lar el 2021 després que Tata Steel optés per la via d'acer amb DRI d'hidrogen. En paral·lel, **Aramis** avança com a infraestructura de transport i emmagatzematge amb objectiu operatiu cap a 2030.

A **Dinamarca**, **Greensand** té certificada una Fase 1 de 0,3–0,4 Mt/any (inici previst finals 2025/inicis 2026) amb potencial d'escala fins a 8 Mt/any el 2030 en el camp esgotat Nini West; el projecte **Bifrost** avança com a nou hub d'emmagatzematge al mar del Nord.

Al **Regne Unit**, els clústers **Track-1 (East Coast Cluster/Net Zero Teesside i HyNet North West)** han assolit fites regulatòries i de contractació; l'entrada en operació dels primers projectes amb captura i emmagatzematge s'espera al voltant de 2028. **H21 Leeds** continua com a programa de conversió a hidrogen associat als clústers, complementant la infraestructura CCS.

A **Itàlia**, **Ravenna CCS** va iniciar el 2024 la Fase 1 (aprox. 25.000 t/any) amb pla d'escala fins a ~4 Mt/any el 2030, utilitzant camps de gas esgotats a l'Adriàtic com a magatzem.

A **França**, al vessant nord dels Pirineus, el programa transfronterer **PyCASSO** s'ha concebut per desplegar tota la cadena **CCUS** per a la indústria del sud-oest de França i el nord d'Espanya, amb un ús prioritari de jaciments esgotats; la seva materialització depèn de decisions regulatòries i compromisos industrials.

És rellevant destacar que **Noruega** emmagatzema el CO₂ principalment en **aqüífers salins profunds** (Utsira a Sleipner; Johansen/Cook a Northern Lights; formacions salines a Snøhvit), mentre que a la resta d'Europa els projectes en marxa o construcció utilitzen

majoritàriament **camps de petroli i gas esgotats** (Porthos, Greensand, Ravenna, entre d'altres).

En conjunt, el **pipeline europeu de CCS** ha crescut amb força els últims anys —amb fites com la posada en marxa de Northern Lights (2025) i l'inici d'obres de Porthos (2024)— dins d'una acceleració global del sector reportada pel Global CCS Institute.

A Espanya, l'IGME-CSIC ha cartografiat **103 aqüífers salins profunds** com a emplaçaments potencials d'emmagatzematge i manté un visor cartogràfic específic dels possibles magatzems geològics de CO₂. Les estimacions recents situen la **capacitat total** d'emmagatzematge en un rang **12–44 GtCO₂**, per damunt de les xifres utilitzades anys enrere.

Pel que fa a projectes, el **pilot d'Hontomín** (Burgos) ha realitzat assajos d'injecció en fase líquida i s'utilitza com a infraestructura d'R+D (no és un magatzem comercial). En paral·lel, l'IGME impulsa el projecte **SEASTORAGE** per avaluar reserves *offshore* a les plataformes cantàbrica i mediterrània, mentre que s'exploren solucions logístiques per liquar i exportar CO₂ des de terminals energètiques com Saggas (Sagunt) i BBG (Bilbao) cap a hubs d'emmagatzematge europeus.

En planificació estratègica, el projecte europeu **STRATEGY CCUS** (H2020, 2019–2022) va definir el full de ruta regional per al CCUS a la Conca de l'Ebre (Tarragona–Nord Castelló–Nord Terol), identificant opcions d'emmagatzematge *onshore* i enllaços de transport amb la xarxa existent. I el projecte **PilotSTRATEGY** (2021–2026) està aprofundint en la geocaracterització dels aqüífers salins profunds i en el disseny de pilots a tres regions prioritàries (Conca de París, Conca Lusitana i Conca de l'Ebre) amb l'objectiu d'arribar a la fase pre-FID i a la sol·licitud de permisos abans d'acabar el projecte.

Continuant centrant-nos en **Espanya**, ja hi ha plantes industrials que capturen el CO₂ com a procés secundari com a subproducte de la producció d'hidrogen per reformat de gas natural, com la planta HyCo de Carbuos Metálicos a Tarragona.

A més de les plantes industrials, existeixen projectes operatius de plantes de petita capacitat on actualment s'està provant la viabilitat d'aquestes tecnologies de captura de CO₂. Alguns exemples són la planta de Holcim a Carboneras (Almeria), el Centre de Desenvolupament de Tecnologies de Captura de CO₂ (CIUDEN, Cubillos del Sil, Lleó), que separa el CO₂ mitjançant oxicombustió, o la planta de Captura i Reutilització de CO₂, que recupera el CO₂ emès per una planta de biomassa i el purifica a Garray (Sòria).

També cal tenir en compte els projectes futurs englobats dins de les valls de l'hidrogen i altres iniciatives privades, les quals requereixen grans quantitats de CO₂, d'origen biogènic o no, i que se sumaran en els pròxims anys a les capacitats de captura cada cop més creixents.

En aquest sentit, a **Catalunya**, la Generalitat se n'enorgulleix del projecte de la **Vall de l'Hidrogen**, que busca fomentar el desenvolupament de l'hidrogen verd com una font d'energia neta i sostenible, promovent-ne la producció, l'emmagatzematge i l'ús en diversos sectors industrials i de transport.

A més, la Generalitat, a través del Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, ha desenvolupat l'**Estratègia d'Hidrogen de Catalunya 2020-2030**. Aquesta estratègia té com a objectiu posicionar Catalunya com a líder en la producció i la utilització de l'hidrogen verd, impulsant projectes de recerca, desenvolupament i innovació, així com la creació d'infraestructures necessàries per a la seva implementació.

La perspectiva energètica de Catalunya per al 2050, assumida pel Departament d'Acció Climàtica, **se centra a assolir una economia neutra en carboni**, millorar-ne l'eficiència energètica i augmentar la quota d'energies renovables. Aquesta visió a llarg termini inclou mesures per promoure l'electrificació del transport, millorar l'eficiència dels edificis i fomentar l'economia circular. La Generalitat està treballant en la integració de tecnologies avançades i solucions innovadores per reduir les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle i garantir un subministrament energètic sostenible i resiliència.

Per altra banda, del pressupost de la Generalitat de l'exercici 2023, el departament de Recerca i Universitats va assignar una partida de 5 milions d'euros a l'Institut Català d'Investigació Química (ICIQ) per tal de començar a posar en marxa el **Centre de Descarbonització de la indústria catalana**, ubicat a Tarragona. Aquesta iniciativa, que ha de ser publicoprivada, es focalitzarà principalment en els **sectors de difícil abatiment del CO₂**, sectors com el **petroquímic, ciment, metal·lúrgic i dels residus**.

El primer projecte resultant d'aquesta dotació pressupostària va començar l'any passat amb la licitació del disseny de quatre plantes pilot d'assaig mòbils, cadascuna amb una tecnologia diferent: tres tecnologies de captura de CO₂ (adsorció amb sòlids, absorció amb líquids i carbonatació) i una tecnologia de conversió de CO₂ a productes d'alt valor afegit. Aquesta última planta amb tecnologia dual Reverse Water Gas Shift i Fischer-Tropsch, dissenyada pel Centre Tecnològic Eurecat i l'enginyeria Cirauqui, com la resta, es preveu que es pugui construir i posar en funcionament l'any 2026. Totes aquestes quatre primeres plantes pilot estan pensades per ubicar-se, de manera temporal, en diferents indústries per tal d'avaluar quina tecnologia de captura i ús és la més adequada en cada sector, en funció de les seves emissions i de la valorització que vulguin fer del CO₂ capturat i així, posteriorment, les empreses puguin invertir en la planta a escala industrial més adequada amb un risc menor. Cal tenir present que les plantes industrials de tecnologies CCU són inversions de molts milions d'euros i que poden superar fins i tot les inversions de les mateixes plantes productives.

Adicionalment, aquest projecte de descarbonització industrial per a les indústries catalanes intensives en energia i de difícil abatiment del CO₂, ha estat inclòs dins la

reprogramació del Programa FEDER de Catalunya 2021-2027, com un dels projectes estratègics d'alt impacte tecnològic sorgits de la iniciativa STEP de la Comissió Europea, amb un fons pressupostari addicional per a construir les altres tres plantes de captura i per poder acabar de consolidar el Centre de Descarbonització de Catalunya.

Perquè aquests projectes tinguin èxit, serà **necessari desenvolupar noves tecnologies, provar-les a escala planta pilot i estudiar la viabilitat en planta** de moltes d'aquestes iniciatives. En aquest punt, a Catalunya, un centre tecnològic com **Eurecat** pot jugar un paper molt important, sent el soci facilitador de la tecnologia, els processos i els coneixements necessaris per augmentar la viabilitat tècnica i econòmica d'aquests projectes. Són una eina clau, no només per contribuir a la reducció d'emissions i la producció de nous combustibles, sinó també per posar a punt i demostrar a escala industrial que és possible una forma diferent de produir combustibles, sense haver de dependre, o almenys reduir en la mesura del possible, la dependència de països tercers exportadors de combustibles d'origen fòssil.

Repercussions econòmiques: anàlisi de l'impacte econòmic, incloent-hi la creació d'oportunitats laborals i el desenvolupament de nous mercats

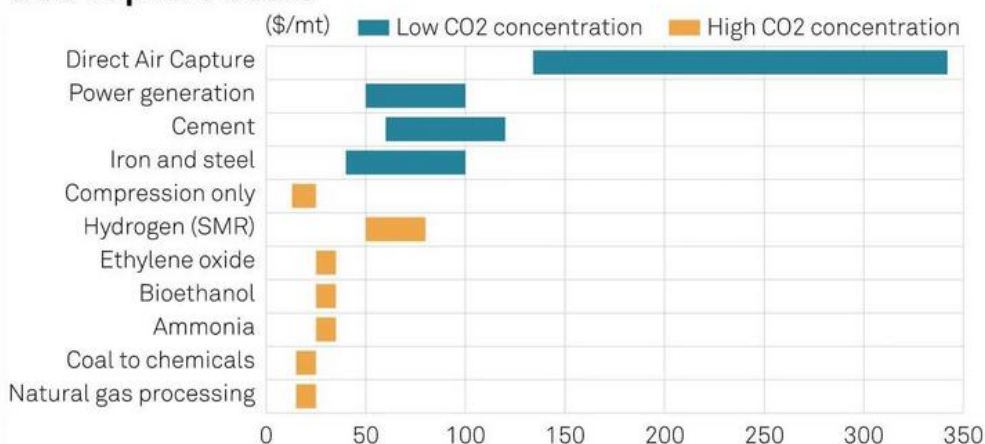
La transició cap a una economia descarbonitzada en el context actual de canvi climàtic i polítiques internacionals té un impacte econòmic significatiu així com el potencial de generar noves oportunitats laborals i desenvolupar nous mercats. A continuació, es presenta una anàlisi detallada d'aquests aspectes:

Impacte econòmic:

- 1. Inversions substancials:** Les inversions en tecnologies de descarbonització, com la captura i emmagatzematge de carboni (CCS), són impressionants. Per exemple, els Estats Units han destinat 135.000 milions de dòlars per reduir emissions al sector industrial. A més, el Departament d'Energia ha invertit 2.500 milions de dòlars en sis instal·lacions de captura de carboni i 1.200 milions més en plantes de captura directa de carboni (DAC). Aquestes inversions no només tenen el potencial de reduir significativament les emissions, sinó que també **estimulen l'economia en generar demanda per a noves tecnologies i serveis**.
- 2. Eficiència i reducció de costos:** La implementació de tecnologies de descarbonització pot millorar l'eficiència i reduir els costos a llarg termini en sectors industrials clau, com ara el ciment, l'acer, la petroquímica o la generació elèctrica, així com també la producció d'hidrogen verd. A mesura que aquestes tecnologies es desenvolupen i s'escalen, els costos d'implementació disminuiran, fent que la transició sigui econòmicament més viable.
- 3. Viabilitat econòmica i comparativa CCS vs. CCU:** Com ja s'ha mencionat, les tecnologies de captura de CO₂ utilitzades en una font d'emissions han de tenir en compte dos factors essencials: la tecnologia més adequada segons la concentració de CO₂ en el corrent d'entrada, així com la seva naturalesa i impureses, i l'ús final, que pot ser per a emmagatzematge (CCS) o per a utilització (CCU). L'impacte que tindrà sobre el cost per tona dependrà clarament del preu del producte de valor afegit que siguem capaços de produir i comercialitzar, que pot anar des del mateix CO₂ fins a combustibles sintètics o fertilitzants com el metanol, el metà, les parafines o la urea. A l'hora de calcular el cost, a més dels paràmetres associats a l'energia, la infraestructura i l'operació, cal tenir en compte el preu dels drets d'emissió de CO₂ (si provenen d'una font no biogènica), que actuen com una palanca en molts casos. Durant els primers mesos del conflicte a Ucraïna, els drets d'emissió van superar els 100 €/ton, ja que estan correlacionats amb el preu del gas. Actualment, l'abril de

2025, cotitzen a 60 €/ton. Cal tenir en compte que el dret d'emissió és un factor que cal considerar principalment quan l'objectiu final del CO₂ sigui el seu emmagatzematge. Podem arribar a la situació en què la suma dels costos de captura, transport i emmagatzematge superi el cost del dret d'emissió i, en termes estrictament financers, sigui més favorable emetre el CO₂. Per això, calen incentius i regulacions per garantir que la viabilitat d'un procés de captura no depengui únicament d'un indicador volàtil com és el dret d'emissió. En algunes aplicacions, per exemple, a la EOR utilitzada als EUA per obtenir més petroli de pous a final del seu cicle, es poden gestionar costos tan baixos com 2-14 \$/ton. Depenent del preu del cru i altres factors, el cost d'aquest emmagatzematge pot fins i tot ser negatiu si el preu del cru extret compensa l'operació. Si no tenim en compte aquesta variable, i comparem tots els processos industrials en què es captura CO₂ com a part del mateix procés productiu amb captures en processos on fins ara no s'havia capturat (per exemple, siderúrgia, producció de ciment o generació d'energia), ens trobem que la forquilla de preus varia entre 9-28 €/ton per processos d'alta concentració de CO₂, associats a productes químics, fins a més de 100 €/ton en el cas de la indústria cimentera.

CO₂ capture costs



Font: IEA

En el cas de les tecnologies basades en captura directa de l'aire (DAC), la forquilla és encara més àmplia, superant els 120 €/ton fins a valors per sobre dels 330 €/ton.

Com hem esmentat anteriorment, existeix una correlació directa entre el cost de la captura de CO₂ i la concentració de CO₂ present al procés, així com si aquest cost final pot amortitzar-se amb la producció de productes de valor afegit, a més de la maduresa tecnològica d'aquests. Serien aquelles indústries químiques on es captura CO₂ en alta concentració i s'utilitzen processos madurs a escala suficient, com la captura amb amines o la compressió criogènica.

En aquelles indústries on les concentracions són més baixes i els focus d'emissió solen tenir més contaminants (p. ex. òxids de nitrogen i sofre, partícules), es

requereixen processos addicionals de neteja i pretractament, a més d'una recuperació de calor extra per refredar els gasos a temperatures admissibles per les tecnologies. Tot això té un impacte directe sobre el cost de captura per tona.

Perquè els processos de captura de CO₂ siguin viables des d'un punt de vista tècnic i econòmic, és necessari millorar l'eficiència d'aquests processos mitjançant nous materials i sorbents, que augmentin la capacitat de recuperació de CO₂ d'aquestes plantes i l'eficiència energètica, que tindrà un impacte directe sobre els costos operatius de les plantes i, per tant, sobre el cost de captura del CO₂.

Un altre aspecte important és el desenvolupament del mercat dels combustibles sintètics que utilitzin aquest CO₂ capturat, com el metanol que es pot produir a partir d'hidrogen electrolític i aquest CO₂. Actualment, ha de competir amb el metanol produït en diferents economies globals amb forquilles de preus entre 365-625 €/ton, quan els costos actuals d'aquest metanol "verd" es mouen entre els 900-1000 €/ton. Per tant, serà necessari incentivar el seu ús, ja sigui de forma directa mitjançant subvencions a la producció i l'ús, com els mecanismes que fa uns anys s'estan implementant, que obliguen a incloure un percentatge de combustibles renovables als combustibles d'ús terrestre, aeri i marítim.

Així, doncs, la transició cap a una economia descarbonitzada no només representa una resposta crucial davant la urgència del canvi climàtic, sinó que també s'erigeix en un motor de transformació econòmica a escala global. Aquest canvi de paradigma, sustentat en inversions estratègiques i l'adopció progressiva de tecnologies d'avantguarda, desencadena una sèrie d'impactes econòmics de gran abast.

D'una banda, es generen oportunitats laborals en sectors relegats abans, ara en ascens gràcies a la demanda de mà d'obra especialitzada en àrees com l'enginyeria ambiental, la gestió de residus i l'eficiència energètica. Aquesta dinàmica no només revitalitza el mercat laboral, sinó que també fomenta la creació de llocs de treball de qualitat i el desenvolupament d'habilitats pertinents per al futur.

D'altra banda, la transició cap a una economia descarbonitzada impulsa la innovació i el sorgiment de nous mercats on la sostenibilitat i l'eco-eficiència són valors primordials. Des de la producció d'energies renovables fins a la fabricació de tecnologies netes i comercialització de productes i serveis respectuosos amb el medi ambient, s'obre un ventall d'oportunitats per a empreses i emprenedors compromesos amb un desenvolupament més equitatiu i sostenible. Tanmateix, perquè aquests beneficis es materialitzin plenament, és imperatiu un enfocament integrat que articuli polítiques globals coherents amb accions locals concretes. La col·laboració entre governs, institucions, empreses i la societat civil esdevé fonamental per garantir una transició justa i equitativa, on ningú no quedi endarrerit i tothom pugui participar activament en la construcció d'un futur més pròsper i respectuós amb el medi ambient.

Anàlisi d'indústries relacionades: avaluació de com les CCUS poden beneficiar o transformar indústries emissores clau

La captura, ús i emmagatzematge de carboni (CCUS) són tecnologies crucials per reduir les emissions de diòxid de carboni (CO₂) i mitigar el canvi climàtic. Les indústries clau que emeten grans quantitats de CO₂ i són candidates per implementar tecnologies de CCUS inclouen:

GENERACIÓ D'ENERGIA:

- 1. Plantes d'energia a base de carbó i gas natural:** Són una de les fonts principals d'emissions de CO₂ a causa de la crema de combustibles fòssils per a la generació d'electricitat.
- 2. Indústria del ciment:** La producció de ciment és una font significativa d'emissions de CO₂ a causa de la descomposició del carbonat de calci (calcària) i de l'ús intensiu d'energia en el procés de producció.
- 3. Indústria de l'acer:** La fabricació d'acer, especialment als alts forns, genera grans quantitats de CO₂ a causa de la reducció de mineral de ferro mitjançant coc (un derivat del carbó).
- 4. Indústria química:** La producció de productes químics com l'amoníac i l'etilè implica processos que alliberen CO₂ com a subproducte. Aquestes indústries també consumeixen grans quantitats d'energia.
- 5. Refinació de petroli:** Les refineries de petroli emeten CO₂ durant el processament del cru per produir combustibles i altres productes derivats del petroli.
- 6. Indústria del paper i polpa:** La producció de paper i polpa també contribueix a les emissions de CO₂, encara que en grau més baix en comparació de les indústries anteriors.
- 7. Plantes de valorització energètica de residus**

Beneficis i transformacions de les CCUS a aquestes indústries:

BENEFICIS:

- 1. Reducció d'emissions i compliment normatiu:**
 - **Compliment amb regulacions ambientals:** Les indústries poden complir les normatives ambientals i els objectius de reducció d'emissions establerts per governs i organismes internacionals, evitant multes i sancions.
 - **Millora de la imatge corporativa:** Adoptar CCUS pot millorar la reputació d'una empresa com a líder en sostenibilitat i responsabilitat ambiental, atraient inversors i clients conscients amb el medi ambient.

2. Aprofitament d'incentius financers:

- **Subsidis i crèdits fiscals:** Molts governs ofereixen incentius financers, com a subsidis i crèdits fiscals, per a la implementació de tecnologies de CCUS.
- **Participació en mercats de carboni:** les empreses poden vendre crèdits de carboni obtinguts per la reducció d'emissions i generar ingressos addicionals.

3. Innovació i competitivitat:

- **Desenvolupament de noves tecnologies:** L'adopció de CCUS pot impulsar la innovació en tecnologies netes i eficients, posicionant les empreses a l'avantguarda de la transició energètica.
- **Avantatge competitiu:** Les empreses que implementin CCUS poden obtenir un avantatge competitiu en avançar-se a futures regulacions més estrictes i demostrar el seu compromís amb la sostenibilitat.

TRANSFORMACIONS:

1. Canvi en processos operatius:

- **Optimització de processos:** La integració de CCUS pot portar a optimitzar processos industrials per maximitzar la captura de CO₂ i millorar l'eficiència energètica.
- **Desenvolupament de noves infraestructures:** Es requereix la construcció d'infraestructures addicionals per a la captura, el transport i l'emmagatzematge de CO₂, cosa que pot generar ocupació i estimular l'economia local.

2. Diversificació de productes i serveis:

- **Valorització del CO₂ capturat:** El CO₂ capturat pot ser utilitzat en la producció de productes valuosos, com ara combustibles sintètics, materials de construcció i productes químics, obrint noves línies de negoci.
- **Serveis de CCUS per a tercers:** Les empreses poden oferir serveis de CCUS a altres indústries, creant una nova font d'ingressos.

3. Sostenibilitat i adaptació al canvi climàtic:

- **Contribució a la mitigació del canvi climàtic:** En reduir les emissions de CO₂, les indústries contribueixen de manera significativa a la lluita contra el canvi climàtic, alineant-se amb els objectius globals de sostenibilitat.
- **Resiliència a llarg termini:** Les indústries que adoptin sistemes de CCUS estaran millor preparades per a un futur en què les regulacions ambientals siguin més estrictes i el cost de les emissions de carboni sigui més gran.

Així, doncs, la implementació de CCUS no només ajuda les indústries a reduir les seves emissions de CO₂ i complir les regulacions ambientals, sinó que també pot transformar les seves operacions, obrir noves oportunitats de negoci i millorar la seva competitivitat i sostenibilitat a llarg termini.

Reptes i Oportunitats: identificació de barreres normatives, tècniques, estratègiques i polítiques, i explorar les oportunitats associades

La introducció de l'hidrogen com a vector energètic i la captura de carboni presenten una oportunitat única per desenvolupar una nova cadena de valor industrial i infraestructures essencials a Catalunya i Espanya. Tot i això, aquest procés enfronta múltiples desafiaments i ofereix diverses oportunitats en l'àmbit regulatori, tècnic, estratègic i polític.

OPORTUNITATS

Desenvolupament industrial i reindustrialització:

- **Generació d'ocupació:** La creació de noves infraestructures per a la captura, el transport i l'emmagatzematge de CO₂ i per a la producció i la distribució d'hidrogen pot generar una gran quantitat de llocs de treball directes i indirectes. Aquests llocs de treball poden abastar des de la construcció i el manteniment de les infraestructures fins a rols en investigació, desenvolupament i operacions.
- **Atracció d'inversions:** La transició cap a una economia verda atraurà inversions nacionals i internacionals. Empreses del sector energètic, tecnològic i d'enginyeria estaran interessades a participar en aquests projectes, cosa que fomentarà el creixement econòmic.
- **Modernització industrial:** La implementació d'aquestes noves tecnologies pot catalitzar la modernització de la indústria existent, fent-la més eficient i menys dependent dels combustibles fòssils. Això pot augmentar la competitivitat de les indústries locals al mercat global.
- **Infraestructura i serveis:** La construcció i l'operació d'infraestructures de captura, ús i emmagatzematge de carboni requereixen el desenvolupament d'una xarxa logística i de serveis associats. Això inclou la creació d'instal·lacions d'emmagatzematge, sistemes de transport de CO₂ i serveis de manteniment i monitoratge, contribuint al desenvolupament d'un robust ecosistema econòmic.

Expansió del mercat:

- **Creixement del sector de captura de carboni:** S'estima que el mercat de captura de carboni podria créixer significativament els anys vinents. Espanya, en invertir en recerca i desenvolupament, es pot posicionar com a líder en aquest sector emergent, oferint tecnologies i solucions avançades a escala mundial.
- **Desenvolupament de nous productes i serveis:** La captura i utilització del carboni (CCU) pot donar lloc a la creació de nous productes, com ara materials de construcció

més sostenibles, combustibles sintètics i productes químics. Això diversificarà l'economia i obrirà noves oportunitats comercials.

- **Exportació de tecnologia:** Espanya té l'oportunitat de desenvolupar tecnologies avançades que no només s'utilitzin a escala local, sinó que també s'exportin a altres països, enfortint la seva posició al mercat global de tecnologies netes.

Mitigació del canvi climàtic:

- **Reducció d'emissions:** Implementant tecnologies CCUS en la indústria intensiva en emissions de CO₂, Catalunya i Espanya poden reduir significativament les seves emissions.
- **Compliment d'objectius climàtics:** La implementació efectiva d'aquestes tecnologies ajudarà Espanya a complir els objectius climàtics sota l'Acord de París i altres iniciatives internacionals. Això no només beneficiarà el medi ambient, sinó que també millorarà la reputació d'Espanya com a país compromès amb la sostenibilitat.
- **Innovació en energies netes:** El foment d'aquestes tecnologies impulsarà la innovació al sector d'energies netes, promovent el desenvolupament de noves solucions i augmentant la resiliència energètica del país.

REPTES

Barreres reguladores:

- **Processos de permisos llargs i complexos:** La normativa actual implica procediments burocràtics extensos per obtenir permisos necessaris per a la construcció i operació d'infraestructures de captura i emmagatzematge de CO₂, així com per a la producció i distribució d'hidrogen. Això retarda significativament els projectes i augmenta els costos.
- **Necessitat de marc regulador clar:** És essencial desenvolupar un marc regulador clar i favorable que faciliti la implementació d'aquestes tecnologies. Això inclou la creació d'incentius fiscals, subvencions i polítiques que promoguin la inversió en infraestructura i tecnologia verda.
- **Adaptació a normatives europees:** Encara que s'estan implementant decrets europeus, és crucial que Espanya adapti ràpidament la normativa per estar en línia amb les directrius europees i facilitar la cooperació internacional en projectes de captura de carboni i producció d'hidrogen.

Insuficiència de finançament:

- **Limitacions de fons públics:** Tot i que hi ha ajuts públics, aquests són insuficients per cobrir les necessitats d'inversió en infraestructures i tecnologies necessàries per a la captura de carboni i l'economia de l'hidrogen. La comparació amb països com Noruega, que ha invertit significativament més, destaca aquesta disparitat.

- **Necessitat de finançament privat:** Es requereix un augment en la participació del sector privat. Incentius i polítiques atractives poden fomentar la inversió privada, ajudant a cobrir el dèficit de finançament.
- **Accés a fons europeus:** Aprofitar els fons europeus de recuperació i altres mecanismes de finançament pot ser una solució viable. És essencial que Espanya desenvolupi projectes sòlids i competitius que puguin atraure aquest tipus de finançament.

Desenvolupament d'infraestructures:

- **Construcció d'infraestructures crítiques:** Sense les infraestructures necessàries, com ara xarxes de transport de CO₂, plantes d'emmagatzematge i producció d'hidrogen, els projectes de captura, ús i emmagatzematge de carboni no poden avançar. La manca d'aquestes infraestructures, tant a escala pilot com a escala industrial, limita la capacitat d'implementar tecnologies CCUS a gran escala. En aquest sentit, el Centre de Descarbonització de Catalunya pot exercir un paper clau en la introducció de tecnologies emergents al mercat i en la validació de tecnologies madures mitjançant plantes pilot que després es puguin escalar industrialment.
- **Coordinació i planificació:** És vital una planificació i coordinació eficaç entre els diferents nivells de govern i el sector privat per desenvolupar aquestes infraestructures. Això inclou la identificació de llocs adequats per a emmagatzematge i la construcció de xarxes de distribució d'hidrogen i de CO₂.
- **Manteniment i actualització:** Les infraestructures existents també han de ser mantingudes i actualitzades per assegurar-ne l'eficiència i la longevitat. Això implica inversions contínues i un enfocament a la sostenibilitat.

Homogeneïtzació normativa:

- **Harmonització de normatives:** L'harmonització de normatives i estàndards a escala europea i global és crucial per facilitar el comerç i la cooperació internacional al sector de captura de carboni i producció d'hidrogen. La manca d'uniformitat reguladora pot crear barreres addicionals i augmentar els costos de compliment.
- **Implementació de la Llei sobre Indústria amb Zero Emissions Netes:** La Llei sobre Indústria amb Zero Emissions Netes (Net Zero Industry Act) de la Comissió Europea és un pas clau per establir un mercat de gestió del carboni. Tot i això, la seva implementació requereix esforços concertats per part dels estats membres per informar sobre les seves capacitats d'emmagatzematge de carboni abans del 2026 i per desenvolupar marcs reguladors compatibles.
- **Col·laboració internacional:** La col·laboració internacional és essencial per establir estàndards comuns i compartir millors pràctiques. Espanya es pot beneficiar en participar activament en fòrums internacionals i en iniciatives de col·laboració per harmonitzar les normatives i fomentar la innovació conjunta.

Així doncs, Catalunya i Espanya tenen una oportunitat única per participar activament en la transició cap a una economia basada en la captura de carboni, l'hidrogen verd i els seus derivats. Superar les barreres reguladores, de finançament i d'infraestructura és fonamental per aprofitar al màxim les oportunitats industrials i ambientals que ofereix aquesta transició. Amb el compromís adequat, aquesta iniciativa pot posicionar Espanya i Catalunya com a líders en la lluita contra el canvi climàtic i en la innovació tecnològica sostenible.

L'electrificació de tots els sectors possibles i l'ús d'energies alternatives, com ara l'hidrogen verd, els biocombustibles i la captura de CO₂, són prioritats essencials.

Conclusions i recomanacions

1. **El CCUS és una palanca imprescindible en el mix de descarbonització, especialment per als sectors de difícil abatiment.** L'anàlisi tecnològica, normativa i econòmica del document mostra que la neutralitat climàtica no serà viable només amb eficiència, electrificació i renovables. En indústries com el ciment, la calç, els fertilitzants, la siderúrgia, la petroquímica o la valorització energètica de residus, la captura, ús i emmagatzematge del CO₂ és sovint l'única via realista per assolir reduccions profundes d'emissions.
2. **Les tecnologies CCUS han assolit un grau de maduresa suficient per a un desplegament significatiu aquesta dècada, però encara presenten reptes importants.** Hi ha ja desenes de plantes comercials al món, un nombre creixent de projectes i una experiència robusta en diversos segments de la cadena de valor. Alhora, el cost elevat, el consum energètic, la manca d'infraestructura i la incertesa reguladora exigeixen polítiques públiques actives i col·laboració estreta amb el sector privat per superar la "vall de la mort" tecnològica i financera.
3. **La Unió Europea i Espanya han posat les bases normatives, però cal accelerar la implementació.** El Pacte Verd, la Llei Europea del Clima, el paquet "Fit for 55" i la Llei de la Indústria amb Zero Emissions Netes (Net Zero Industry Act) proporcionen el marc general per al desplegament del CCUS, incloent-hi objectius quantitatius d'emmagatzematge i requisits d'informació sobre capacitats geològiques. A escala estatal, la transposició de la Directiva d'emmagatzematge geològic, el PNIEC i la Llei de Canvi Climàtic estableixen instruments rellevants, però encara és necessari concretar estratègies, procediments i incentius específics per a la gestió del carboni.
4. **Catalunya pot i ha d'aprofitar una finestra d'oportunitat per posicionar-se com a hub de CCUS al sud d'Europa.** La combinació d'un fort teixit industrial emissor, un ecosistema científic i tecnològic avançat, infraestructures logístiques i energètiques consolidades, el projecte TarraCO₂ com a magatzem *offshore* i el projecte del Centre de Descarbonització com a infraestructura de prova i demostració, configura un entorn únic per impulsar projectes integrats de captura, ús i emmagatzematge a escala preindustrial i industrial.
5. **El Centre de Descarbonització i les plantes pilot mòbils són instruments estratègics per reduir risc, generar coneixement i crear mercat.** Assajant tecnologies de captura (absorció, adsorció, carbonatació) i de conversió del CO₂ en combustibles i productes químics (RWGS–Fischer-Tropsch) sobre fonts reals d'emissió, es podrà determinar quines solucions són més adequades

tècnicament i econòmica per a cada sector, facilitant decisions d'inversió informades i accelerant la corba d'aprenentatge de la indústria catalana.

6. **Cal un marc integrat de polítiques públiques per desbloquejar inversions i assegurar una transició justa.** Les inversions necessàries en CCUS són de gran magnitud i de llarg termini; per tant, requereixen estabilitat reguladora, instruments de mitigació de risc, mecanismes de finançament mixt públicoprivat i una coordinació estreta entre administracions, operadors d'infraestructura, indústria, món acadèmic i societat civil. Alhora, la transició ha de preservar la competitivitat de les indústries exposades a la competència internacional i garantir oportunitats de requalificació i ocupació de qualitat per a la població.
7. **La planificació de la infraestructura de transport i emmagatzematge és urgent i estratègica.** El desenvolupament de ceoductes, terminals portuàries i magatzems geològics —especialment *offshore*— no pot quedar supeditat a decisions fragmentades projecte a projecte. És necessari impulsar una planificació proactiva a escala de corredor (per exemple, mediterrani), aprofitant sinergies amb les xarxes de gas i hidrogen, i integrant-la en els instruments de planificació energètica, territorial i de mobilitat.
8. **El CCUS ha de desplegar-se amb criteris de responsabilitat ambiental i social, evitant la dependència de models altament intensius en carboni.** El paper del CCUS és reduir emissions inevitables i descarbonitzar usos difícils, no perpetuar l'ús indiscriminat de combustibles fòssils. Per això, el seu desenvolupament s'ha de vincular a fulls de ruta clars de transició energètica, a objectius creixents de renovables i eficiència, i a una governança transparent que asseguri la integritat ambiental i el benefici social dels projectes.

En síntesi, el missatge d'aquest SmartVision Paper és clar: **si Catalunya i Espanya volen mantenir una indústria competitiva en un món climàticament neutre, les tecnologies CCUS han de formar part del seu ADN productiu i de la seva estratègia.** La pregunta ja no és si cal apostar per les CCUS, sinó amb quina velocitat, amb quina ambició i amb quin grau de coordinació institucional i empresarial caldrà fer aquest desplegament.

Aquest SmartVision Paper#6: Captura, Ús i Emmagatzematge del CO₂ ha estat elaborat per:
AEMES Smart

Direcció del Paper:

Agustí Chico, vocal de la Junta Directiva d'AEMES Smart i director de Projectes Singulars i Laboratoris Transversals d'Eurecat

Amb la col·laboració destacada de:

Sara Rafecas i Ramon Manyà, socis de Rousaud Costas Durán, SLP (RCD)

Altres col·laboradors:

Miriam Díaz de los Bernardos, directora de la UTTQ d'Eurecat i directora de la Xarxa H2CAT

Álvaro Reyes, promotor tecnològic de la UTTQ d'Eurecat

Júlia Viladoms, cap de la unitat de descarbonització industrial de l'ICIQ

Núria Sadurní i Isabel Vizcarro, advocades de RCD

Dissenyat, impulsat i coordinat per:

Neus Olea i Marcel Martínez d'AEMES Smart

Basat en les conclusions i aportacions realitzades en la Jornada Tècnica AEMES-Smart

La captura i l'emmagatzematge del CO₂. Mercat, cadenes de valor i oportunitats

Celebrada el 24/01/2024

Amb les intervencions de:

Neus Olea, directora d'AEMES Smart

Pere Condom, director de l'Àrea d'Anàlisi Estratègica de la Direcció General d'Indústria de la Generalitat de Catalunya

Oriol Vilaseca, secretari de Descarbonització d'AEMES Smart i CEO de Vilaseca Consultors

Josep Martin, director R&D de **Manufactura Moderna de Metales**

Frederic Clarens, director de la Unitat de Residus, Energia i Impacte ambiental d'Eurecat

Pedro Mora, president a **PTECO2**

Javier Uría Fernández, gerente de proyectos de Captura CO₂ para España de **Cemex España Operaciones S.L.U.** (representant de **Ciment Català**)

Amb el suport de l'Àrea Metropolitana de Barcelona:



Amb la col·laboració de:

