bombers

MAN.GRAL.008
V.1

SGO

Manual Operatiu

Manual operatiu bàsic de la teoria del foc i agents extintors

Generalitat de Catalunya

Control de versions

Versió	
01	**Unitat redactora:** Unitat redactora
	Data de redacció de la versió: 01/02/2026
	Canvis: Redacció inicial del document

Índex

1. Introducció 5
1.1. Objectiu del manual 5
2. Reaccions d'oxidació 5
3. La combustió 6
3.1. Tipus de combustions 6
3.1.1. Segons la velocitat de propagació 6
3.1.2. Segons la quantitat de comburent (combustió completa vs incompleta) 7
4. Triangle i tetraedre del foc 8
4.1. Triangle del foc 8
4.2. Tetraedre del foc 8
5. Combustibles: classificació i propietats 9
5.1. Classificació segons el seu estat físic 9
5.2. Classificació segons la reacció al foc dels materials 9
5.3. Propietats físico-químiques dels combustibles relacionades amb el foc 10
5.3.1. Punts d'inflamació, combustió i autoignició 10
5.3.2. Límits d'inflamabilitat 11
5.3.3. Densitat relativa de vapors 13
5.3.4. Poder calorífic del combustible 13
6. Comburents 14
7. Fonts d'ignició 14
8. Condicionants que afecten la combustió 16
8.1. Concentració d'oxigen 16
8.1.1. Concentració d'oxigen >21% 16
8.1.2. Concentració d'oxigen <21% 16
8.2. Superfície de contacte de combustible-comburent 17
8.3. Humitat del combustible 17
8.4. Ventilació 17
8.5. Temperatura del combustible 18
9. Transmissió de la calor i mecanismes de propagació 18
9.1. Transmissió de la calor 18
9.1.1. Conducció 19
9.1.2. Convecció 19
9.1.3. Radiació 19
9.2. Mecanismes de propagació 20
10. Efectes de la calor en els materials 21
10.1. Dilatació tèrmica 21
10.2. Pèrdua de resistència dels materials 21
11. Fenòmens extrems: *Backdraft* i *Flashover* 22

11.1. Backdraft 22
11.2. Flashover 23
12. Productes de la combustió 23
12.1. Gasos 24
12.2. Fum 24
12.3. Flama i calor 25
12.4. Residus sòlids i contaminació post-Incendi 25
13. Teoria de l'extinció 26
13.1. Tècniques d'extinció 26
13.2. Agents extintors 27
13.2.1. Aigua 28
13.2.2. Escuma 29
13.2.3. Pols química seca 32
13.2.4. Agents extintors gasosos 33

En aquest text, per a les referències fetes a col·lectius, s'ha utilitzat el masculí amb valor genèric.

1. Introducció

El foc ha estat al llarg de la història un element essencial per al progrés humà, però també una de les principals fonts de risc per a la vida, els béns i el medi ambient. Comprendre'n la naturalesa, els mecanismes que en regulen el comportament i les tècniques per a la seva extinció constitueix un requisit fonamental per a tots aquells que intervenen en la seguretat i la gestió d'emergències.

1.1. Objectiu del manual

Aquest manual recull de manera estructurada els conceptes bàsics de la teoria del foc i dels agents extintors, amb l'objectiu de proporcionar un coneixement sòlid, coherent i aplicable en l'àmbit de bombers. Al llarg dels diferents capítols s'analitzen els processos físics i químics que intervenen en la combustió, els factors que n'afecten la propagació i les propietats dels principals agents extintors, amb la finalitat de fonamentar la selecció i aplicació de les tècniques d'extinció més adequades en funció de cada escenari.

2. Reaccions d'oxidació

Una reacció d'oxidació és un procés químic on una substància es combina amb un agent oxidant (generalment oxigen). L'oxidació pot anar acompanyada d'un alliberament d'energia en forma de calor o llum, però no totes les reaccions d'oxidació són combustions, ja que la velocitat i la quantitat de calor alliberada poden variar enormement.
Es poden classificar per la seva rapidesa i el seu alliberament d'energia:

- **Oxidació Lenta:** És una reacció d'oxidació que té lloc a velocitats molt baixes i a temperatures properes a l'ambient. L'energia s'allibera de forma tan gradual que no es percep un augment de temperatura ni apareix flama. Són processos continus que requereixen presència d'oxigen i, sovint, humitat.
  Exemples: El rovell del ferro (quan el ferro reacciona amb l'oxigen de l'aire i l'aigua), la descomposició d'alguns aliments que s'espatllen o els complexos processos metabòlics que tenen lloc a les nostres cèl·lules per obtenir energia.
- **Combustió:** És una reacció molt ràpida i energètica que implica la combinació d'un material combustible amb un comburent (generalment l'oxigen de l'aire). La característica distintiva de la combustió és l'alliberament important de calor i llum, sovint amb l'aparició de flama. Perquè s'iniciï, necessita una energia d'activació inicial, com una espurna o una font de calor.
  Exemples: La crema de fusta en una foguera, el gas natural en una cuina o la gasolina en un motor.
- **Reacció Termita:** Aquesta és una forma particular d'oxidació extremadament ràpida i extremadament exotèrmica. Tot i que no produeix una flama visible i persistent com la combustió de gas o fusta, la reacció de termita genera una temperatura tan elevada (superant els 2.500ºC) que el material incandescent emet una llum intensa molt similar a

la d'una soldadura, i es produeixen metalls fosos. La reacció típicament involucra la pols d'alumini com a combustible reaccionant amb un òxid metàl·lic (com l'òxid de ferro) com a comburent (l'oxigen prové de la molècula de l'òxid i no de l'aire).
Exemples: la soldadura de vies de tren.

3. La combustió

A nivell químic, una combustió és una reacció d'oxidació, molt ràpida i exotèrmica (allibera calor), que es produeix entre una substància combustible i un comburent (generalment l'oxigen de l'aire, encara que no sempre).

El foc és la manifestació perceptible d'una combustió. Es caracteritza per la producció de calor i llum, acompanyada de flama, fum i gasos.

També podem trobar combustions sense flama, on l'emissió de calor i llum es manifesta en forma d'incandescència, amb presència de fums, però sense flama visible.

3.1. Tipus de combustions

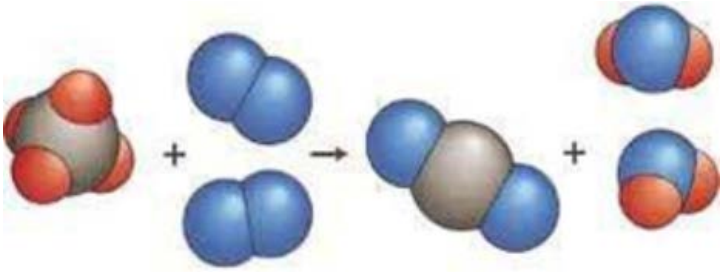
Les reaccions de combustió no sempre es produeixen de la mateixa manera; la seva classificació depèn de diversos factors, com la velocitat de propagació de la flama, la quantitat de comburent disponible i la presència o absència de flama visible.

3.1.1. Segons la velocitat de propagació

- **Combustió Lenta:** És una combustió que es produeix sense flama visible, amb un despreniment de calor molt gradual i una velocitat de propagació molt baixa. És la combustió d'una soca (brasa), una cigarreta.
- **Combustió Ràpida:** És el que coneixem com a foc, caracteritzat per la presència de flama, calor i llum intenses. Es propaga a una velocitat moderada.
- **Explosió:** És una combustió extremadament ràpida que genera un augment brusc de temperatura, volum i pressió.
  Es diferencien principalment per la velocitat de propagació del seu front de reacció, en:
  - **Deflagració**: És un tipus d'explosió on la combustió es propaga a una velocitat superior a 1 m/s però inferior a la velocitat del so en el medi (subsònica). Es produeix una pressió notable a causa de l'expansió ràpida dels gasos calents, però sense generar una ona de xoc d'alta energia.
  - **Detonació**: És un tipus d'explosió on la combustió es propaga a una velocitat supersònica (superior a la velocitat del so en el medi), creant una potent i destructiva ona de xoc. Tota la massa del combustible entra gairebé instantàniament en combustió.

3.1.2. Segons la quantitat de comburent (combustió completa vs incompleta)

La quantitat de comburent (generalment oxigen) disponible respecte al combustible és determinant per a l'eficiència de la combustió, l'energia obtinguda i els productes resultants. Per entendre aquests conceptes, utilitzarem la combustió del metà (CH_4), el principal component del gas natural, com a exemple.



$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

- **Combustió Completa (o Estequiomètrica):** Es produeix quan hi ha una quantitat suficient o excessiva d'oxigen (comburent) perquè tot el combustible reaccioni completament. En una combustió completa, els productes de la combustió són principalment diòxid de carboni (CO_2) i aigua (H_2O), amb una màxima alliberació d'energia.
  - La **mescla estequiomètrica** es refereix a la proporció exacta de combustible i comburent necessària perquè la combustió sigui completa, sense que hi hagi excés significatiu ni d'un ni de l'altre. És la proporció ideal per a l'eficiència energètica i per la menor generació de productes no desitjats.
    Exemple (reacció del metà en combustió completa):
    CH_4 (metà) + $2 \cdot O_2$ (oxigen) → CO_2 (diòxid de carboni) + $2 \cdot H_2O$ (aigua)
  - Aquest tipus de combustió es busca en calderes o motors per maximitzar el rendiment energètic i minimitzar la contaminació. La flama sol ser blava i estable.

- **Combustió Incompleta:** Es produeix quan no hi ha prou oxigen per a la combustió completa del combustible, o quan la barreja de combustible i oxigen no és l'adequada. Com a resultat, el combustible no s'oxida totalment i es generen subproductes que poden ser perillosos, tòxics o menys eficients energèticament.
  - Els productes d'una combustió incompleta solen incloure **monòxid de carboni (CO)** (un gas altament tòxic, incolor i inodor), **carboni pur (sutge)** en forma de partícules de fum negre, a més de diòxid de carboni i aigua en menor proporció que en una combustió completa. La combustió incompleta allibera menys energia que la completa.
    Exemple (reacció del metà en combustió incompleta, una de les moltes possibilitats): $2 \cdot CH_4$ (metà) + $3 \cdot O_2$ (insuficient) → 2 CO (monòxid de carboni) + $4 \cdot H_2O$

- La combustió incompleta es pot observar en flames taronges o grogues, sovint acompanyades de la producció de molt fum negre i calor. És un problema greu en incendis, motors i sistemes de calefacció, ja que genera gasos perillosos i sutge que s'acumula.

4. Triangle i tetraedre del foc

4.1. Triangle del foc

Tradicionalment, s'ha utilitzat el concepte de Triangle del foc per representar els tres components essencials per a l'inici d'un foc:

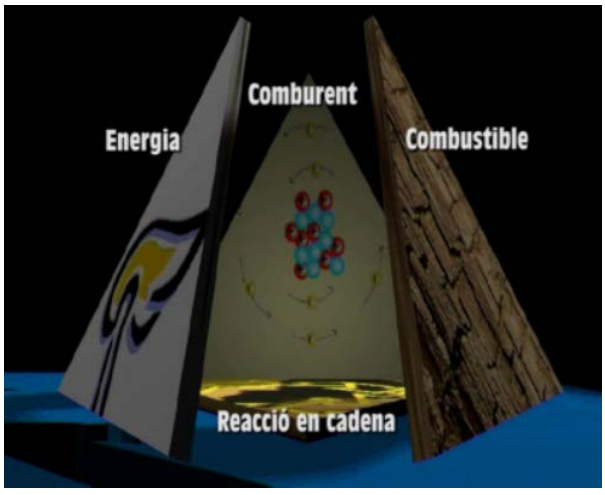
1) **Combustible:** És qualsevol material que pot cremar (fusta, paper, gasolina...)
2) **Comburent:** L'oxidant necessari per a la combustió (generalment l'oxigen de l'aire). No obstant això, és important saber que en certes situacions o tipus de materials, el comburent pot ser una substància diferent de l'oxigen atmosfèric, o l'oxigen pot provenir d'un compost químic que el cedeix durant la reacció (com és el cas de la reacció termita). La majoria de focs necessiten almenys un 16% d'oxigen a l'atmosfera per mantenir-se.
3) **Calor (o Energia d'Activació):** És l'energia inicial necessària per iniciar la reacció (una espurna, una flama, un curtcircuit, la calor generada per fricció...).

Si manca qualsevol d'aquests tres elements, la combustió no pot iniciar-se o s'apagarà.

4.2. Tetraedre del foc

El tetraedre del foc és una evolució del triangle del foc que afegeix un quart element necessari per explicar com el foc es manté i s'autoalimenta:

4) **Reacció en Cadena:** Aquest és el motor del foc. És el procés químic autosostingut on els productes d'una reacció anterior (especialment els radicals lliures) actuen com a reactius per a les reaccions posteriors, mantenint la flama activa. Sense aquesta reacció en cadena, el foc no es pot autoalimentar i s'extingiria un cop retirada la font de calor inicial.



La importància del tetraedre del foc rau en la seva aplicació pràctica per a l'extinció, com veurem més endavant.

5. Combustibles: classificació i propietats

El combustible és el material que s'oxida i crema en una reacció de combustió. Perquè es produeixi un foc, és indispensable que hi hagi combustible present.

Tot i que parlem de combustibles sòlids, líquids i gasosos, el que realment crema són els gasos o vapors inflamables, que es desprenen d'aquests materials.

5.1. Classificació segons el seu estat físic

Els combustibles es classifiquen tradicionalment segons el seu estat físic a temperatura i pressió ambient, i cadascun presenta un mecanisme diferent per generar els vapors que alimenten la flama:

- **Combustibles gasosos:** Ja es troben en la fase gasosa a temperatura ambient, no necessiten cap transformació prèvia per barrejar-se amb el comburent (generalment l'oxigen de l'aire) i iniciar la reacció de combustió immediatament quan hi ha una font d'ignició. Per la seva naturalesa poden estar íntimament barrejats amb l'oxigen de l'aire, i això fa que les velocitats de propagació puguin ser molt altes i el risc d'explosió elevat.
  Exemples: Gas natural (metà), propà, butà, hidrogen, acetilè, etc.
- **Combustibles líquids:** El que crema són els **vapors** del líquid que es desprenen de la seva superfície. Hi ha líquids que a temperatura ambient ja generen prou quantitat de gasos inflamables, i n'hi ha que requereixen ser escalfats prèviament.
  Exemples: Gasolina, dièsel, alcohol, querosè, olis de cuina, etc.
- **Combustibles sòlids:** Els combustibles sòlids són els que requereixen el procés més complex per alliberar els vapors inflamables. Hi ha materials sòlids que en elevar la temperatura primer es fonen i seguidament emeten vapors inflamables *(Exemples: la cera de les espelmes o la majoria de plàstics)*, altres requereixen una descomposició tèrmica (piròlisi) en la que per acció de la calor es trenquen les molècules i els productes resultants són gasos combustibles que poden cremar.
  Exemples: fusta, paper, carbó...

5.2. Classificació segons la reacció al foc dels materials

La reacció al foc d'un material es refereix a la seva contribució al desenvolupament d'un incendi quan s'exposa a una font de calor o flama. Una possible classificació molt bàsica podria ser:

- **Materials no combustibles (o incombustibles)**: Són aquells que no s'encenen ni contribueixen al creixement del foc. Bàsicament, no cremen.
  Exemples: roca, vidre, ceràmica, metalls (en massa).
- **Materials combustibles:** Són aquells materials que, tot i ser capaços de cremar, requereixen una aportació d'energia considerable o condicions específiques per iniciar la combustió. La seva ignició no és immediata a temperatura ambient.
  Exemples: fusta, cartró, plàstics, gasoil.
- **Materials inflamables:** Són aquells materials que s'encenen amb facilitat en presència d'una font d'ignició, fins i tot a temperatures ambientals. La seva perillositat rau en la rapidesa amb què poden generar una flama. *Exemples: alcohol, acetona.*
- **Materials molt inflamables:** Són aquells materials que s'encenen amb extrema facilitat, amb fonts d'ignició mínimes, i propaguen el foc de manera molt ràpida. Representen el risc més alt.
  Exemples: gasolina, gas natural, pilota de ping-pong (cel·luloide), poliestiré expandit (porexpan), alguns sòlids en pols (farina, sucre glaç).

Hi ha altres classificacions més detallades i elaborades, recollides en normatives internacionals. *Per exemple, en el sector de la construcció es parla de les Euroclasses (EN-13501-1) que estableixen una classificació que, a més de la contribució al foc, considera altres factors importants per la seguretat de les persones, dels serveis d'emergència i integritat dels edificis.*

5.3. Propietats fisicoquímiques dels combustibles relacionades amb el foc

Algunes propietats ajuden a predir com es comportarà un combustible davant una font de calor o ignició.

5.3.1. Punts d'inflamació, combustió i autoignició

- **Punt d'Inflamació (*Flash Point*):** És la temperatura mínima a la qual un combustible emet prou vapors per formar una barreja inflamable amb l'aire, que pot encendre's momentàniament en presència d'una font d'ignició externa (una flama, una guspira, etc.). A aquesta temperatura, la flama no es manté de forma continuada i s'apaga.
- **Punt de Combustió (*Fire Point*):** És la temperatura mínima a la qual un combustible emet prou vapors per mantenir la combustió (la flama) de forma continuada, un cop s'ha encès amb una font d'ignició externa. El punt de combustió és sempre lleugerament superior al punt d'inflamació (normalment uns pocs graus més alt), ja que requereix una generació de vapors més sostinguda per mantenir la flama activa.
- **Punt d'autoinflamació o autoignició (*Autoignition Temperature*):** És la temperatura a la qual un combustible s'encén espontàniament sense necessitat de cap font d'ignició externa. La temperatura d'autoignició és molt més elevada que la de combustió.

Els punts d'inflamació i combustió només apliquen a combustibles sòlids i líquids. No tenen sentit per als gasos, que ja es troben en fase de vapor a temperatura ambient. La temperatura d'autoinflamació té aplicació a sòlids, líquids i gasos. Com més baixes són aquestes temperatures més fàcilment inflamable és la substància, i més gran és el risc d'incendi.

Risc d'incendi

Categoria	Substància	Punt d'inflamació (°C)	Punt d'autoinflamació (°C)
Sòlids	Fusta de pi	225	280
	Polietilè	340	350
	Poliestirè	345	490
Líquids	Gasolina	< –20	≈ 220
	Alcohol etílic	12	370
	Acetona	– 19	465
	Gasoil	60	220–300
	Aiguarràs	35	253
Gasos	Metà	–	540
	Propà	–	465
	Butà	–	360
	Hidrogen	–	560
	Acetilè	–	350
	Etilè	–	425

5.3.2. Límits d'inflamabilitat

Perquè una substància combustible s'encengui i es mantingui la flama en presència de l'oxigen de l'aire, no n'hi ha prou amb la presència de vapors i una font d'ignició. La concentració d'aquests vapors a l'aire ha d'estar dins d'un rang molt específic, conegut com els **límits d'inflamabilitat**. Fora d'aquest rang, la barreja és massa "pobra" o massa "rica" en combustible per poder cremar.

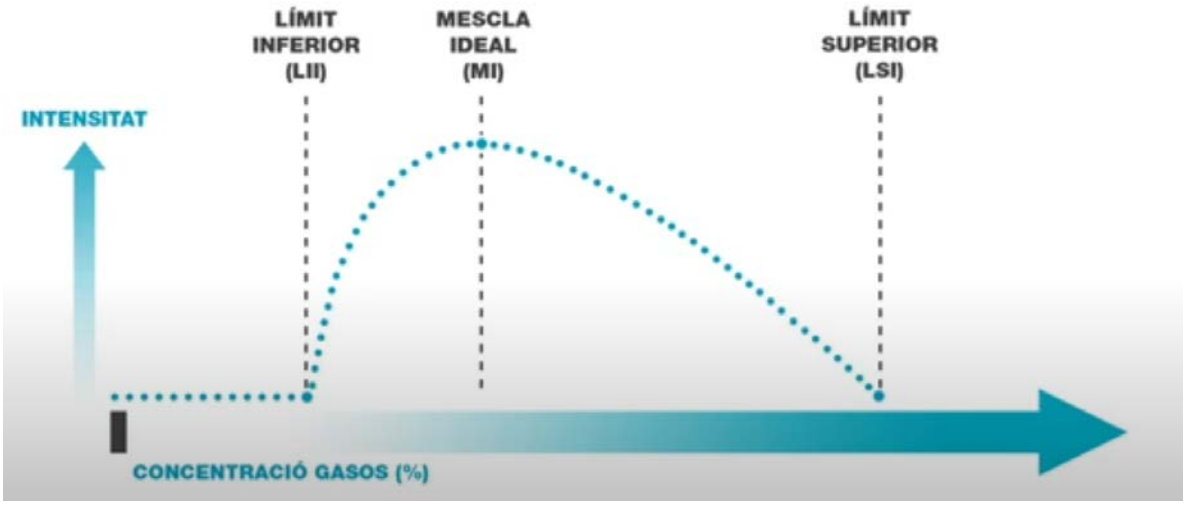
- **Límit inferior d'inflamabilitat (LII):** És la concentració mínima de vapor o gas combustible a l'aire (expressada en percentatge en volum) per sota de la qual la barreja és massa "pobra" o diluïda (no hi ha prou combustible) per encendre's. Per sota de l'LII, la barreja no crema ni explota.

- **Límit superior d'inflamabilitat (LSI):** És la concentració màxima de vapor o gas combustible a l'aire (expressada en percentatge en volum) per sobre de la qual la barreja és massa "rica" (hi ha massa combustible i no hi ha prou oxigen) per encendre's. Per sobre de l'LSI, la barreja tampoc crema ni explota.
- **Rang d'inflamabilitat:** És l'interval de concentracions entre l'LII i l'LSI. Qualsevol barreja de gas o vapor combustible amb l'aire que es trobi dins d'aquest rang és susceptible d'encendre's i cremar o explotar en presència d'una font d'ignició. Com més ampli sigui aquest rang, més gran és el risc que la substància formi una barreja perillosa amb capacitat d'encendre's.

Rang d'inflamabilitat

Substància	LII (%)	LSI (%)	Rang d'Inflamabilitat (%)
Hidrogen (H_2)	4	75	71
Monòxid de Carboni (CO)	12,5	74	61,5
Metà (gas natural)	5	15	10
Propà	2,1	9,5	7,4
Butà	1,8	8,4	6,6
Gasolina	1,4	7,6	6,2

Nota: valors típics a temperatura ambient, amb oxigen ambient.



D'altra banda, els vapors de combustible poden arribar a explotar si es troben en un lloc tancat, depenent del punt del rang on ens trobem. Així, es defineixen els valors de l'**LIE (límit inferior d'explosió) i l'LSE (límit superior d'explosió)**, com els valors mínim i màxim respectivament de mescla combustible gas-oxigen atmosfèric que pot arribar a explotar (una deflagració més ràpida de 1m/s). Els valors són molt semblants als dels LII i LSI i en molts casos, idèntics.

5.3.3. Densitat relativa de vapors

La densitat de vapor (relativa a l'aire) d'una substància és la relació entre la massa d'un volum determinat de gas o vapor i la massa del mateix volum d'aire a la mateixa temperatura i pressió. La densitat de l'aire es pren com a referència (valor 1). Aquesta propietat ens permet entendre com els vapors combustibles es comporten en l'ambient i on es poden acumular.

- **Densitat de vapor ≈ 1 (similar a l'aire):** Aquests vapors es barregen fàcilment amb l'aire per difusió i convecció, formant una barreja potencialment inflamable que es pot estendre per tot l'espai.
  Exemple: Monòxid de Carboni (CO) ≈ 0.97.
- **Densitat de vapor < 1 (més lleugers que l'aire):** Aquests vapors tendeixen a pujar i acumular-se a les zones superiors d'un recinte (sostres) o a dispersar-se ràpidament a l'aire lliure. El perill rau en l'acumulació en espais elevats o tancats a dalt, on poden formar capes explosives.
  Exemples: Metà (Gas Natural) ≈ 0.55; Hidrogen ≈ 0.07.
- **Densitat de vapor > 1 (més pesats que l'aire):** Aquests són particularment perillosos. Tendeixen a baixar i acumular-se a prop del terra, en zones baixes, fosses, depressions o soterranis. Poden desplaçar l'oxigen, crear "llacs" invisibles de vapor inflamable i viatjar distàncies considerables al llarg del terra fins a trobar una font d'ignició.
  Exemples: Propà ≈ 1.55; Butà ≈ 2.0; Vapors de Gasolina ≈ 3-4; Vapors de molts dissolvents (Acetona ≈ 2.0; Toluè ≈ 3.1).

Tots els gasos i vapors, amb el temps, s'acaben barrejant amb l'aire per un procés anomenat **difusió**. No obstant això, una gran diferència de densitat pot alentir o alterar significativament la rapidesa i la manera en què es produeix aquesta barreja homogènia, especialment en condicions d'aire tranquil o amb grans fuites.

5.3.4. Poder calorífic del combustible

El **Poder calorífic (PC)** d'una substància és la quantitat d'energia (calor) que s'allibera per la combustió completa d'una unitat de massa o volum d'aquesta substància. Aquesta ens dona ràpidament una idea de la virulència potencial que pot desenvolupar un incendi. Un PC elevat indica que el combustible alliberarà molta energia, contribuint a una major intensitat, a un augment ràpid de la temperatura i a una major capacitat de propagació del foc.

El poder calorífic ens permet quantificar la **càrrega de foc** d'un espai o edifici, que representa la quantitat total d'energia tèrmica potencial que pot alliberar-se durant un incendi en aquest lloc.

Substància	PCI (MJ/kg)	Substància	PCI (MJ/kg)
Hidrogen	120	Gasolina	44
Metà (gas natural)	50	Gasoil	43
Propà	46,3	Polietilè	43
Butà	45,7	Fusta de pi (seca)	18,5

6. Comburents

Un comburent és una substància capaç de provocar o afavorir la combustió en reaccionar amb un combustible i és imprescindible per a l'existència del foc.

- **L'oxigen atmosfèric**: És el comburent per excel·lència, i que estarà present en la gran majoria dels focs que coneixem. L'oxigen atmosfèric és aproximadament el 21% de l'aire que respirem. La majoria de materials necessiten almenys un 16% d'oxigen per poder mantenir una flama.

No obstant això, hi ha altres substàncies que poden actuar com a comburents, especialment en condicions específiques o quan es tracta de materials altament reactius:

- **Oxigen en compostos:** Alguns materials tenen oxigen integrat en la seva pròpia estructura química, el qual alliberen durant la reacció de combustió. Així aquests materials poden cremar sense necessitat d'oxigen extern de l'aire.
  Exemples: Les bateries de ió liti, en cas de Thermal Runaway, poden alliberar oxigen a partir dels materials del càtode (com òxids de cobalt, manganès o níquel), mantenint la combustió fins i tot sense aire exterior. Els nitrats (presents en fertilitzants, com el nitrat d'amoni, que és un potent oxidant i pot ser explosiu) o els clorats (usats com a herbicides) també són agents oxidants i poden reaccionar violentament amb combustibles, els peròxids (com l'aigua oxigenada), que són agents oxidants potents.
- **Altres comburents gasosos:** Si bé és poc habitual, diferents gasos poden actuar com a comburents amb certs materials en processos industrials o experiments.
  Exemples: Els hidrocarburs poden cremar en una atmosfera de clor (Cl_2), l'alumini o el magnesi poden cremar en una atmosfera de nitrogen (N_2), l'hidrogen pot cremar en una atmosfera de clor gasós.

La presència de comburents concentrats o que s'alliberen internament, fins i tot en l'absència d'oxigen de l'aire, representa un risc significatiu i requereix mesures de seguretat i tècniques d'extinció específiques.

7. Fonts d'ignició

La **calor**, o **energia d'activació**, és el factor que inicia la reacció de combustió, elevant la temperatura del combustible fins al seu punt d'ignició i desencadenant les primeres reaccions.

Les fonts d'ignició són nombroses i variades, i la seva classificació ens ajuda a entendre els orígens dels incendis:

- **Fonts tèrmiques:**
  - Flames obertes: llumins, encenedors, espelmes, fogueres, etc.
  - Materials incandescents: brases, xemeneies, tubs d'escapament, etc.
  - Superfícies calentes: estufes, radiadors, bombetes elèctriques, planxes, maquinària amb parts sobreescalfades (motors, rodaments, canonades), etc.
  - Soldadura i oxitall: processos que generen calor intensa i projecció de partícules incandescents.
  - Fenòmens naturals: la radiació solar concentrada (efecte lupa), o els llamps d'una tempesta elèctrica.
- **Fonts mecàniques:**
  - Fricció i fregament: generació de calor per la fricció continuada entre dues superfícies. Si aquesta calor s'acumula, pot ser suficient per encendre un material proper.
    Exemples: Fregament de rodaments o corretges en maquinària, frens sobre-escalfats.
  - Guspires mecàniques (Impacte): Generació de guspires per l'impacte o xoc de materials, especialment metalls o pedres, entre ells. Aquestes guspires són petites partícules incandescents amb prou energia per iniciar una combustió.
    Exemples: eines mecàniques (esmoladores, motoserres), maquinària agrícola (segadores, desbrossadores), rodes de tren.
- **Fonts Elèctriques:**
  - Sobrecàrregues i curtcircuits: un corrent excessiu, que supera la capacitat dels conductors i provoca sobre-escalfament dels materials aïllants.
  - Guspires elèctriques, arcs voltaics: generats per soldadura elèctrica, connexions defectuoses, curtcircuits o descàrregues d'electricitat estàtica.
- **Fonts Químiques:**
  - Reaccions exotèrmiques: alguns productes químics, en barrejar-se, reaccionen alliberant una gran quantitat de calor, que pot ser suficient per encendre materials combustibles propers.
  - Combustió espontània: certs materials orgànics (com algunes teles impregnades d'oli, fenc, piles de matèria orgànica o encenalls de fusta emmagatzemats incorrectament) poden generar calor lentament a través de processos d'oxidació o bacterians. Si aquesta calor no es dissipa i s'acumula, la temperatura pot augmentar fins al punt d'ignició sense una font de calor externa.

Entendre aquestes fonts és fonamental per a la prevenció d'incendis, ja que permet identificar i controlar els riscos potencials en qualsevol entorn.

8. Condicionants que afecten la combustió

8.1. Concentració d'oxigen

L'oxigen és el comburent essencial per a la majoria de les combustions. Una variació en la seva concentració altera dràsticament el comportament d'un incendi.

8.1.1. Concentració d'oxigen >21%

Tot i que difícilment trobarem concentracions superiors al 21% de l'aire ambient, en entorns industrials, laboratoris i centres hospitalaris fan servir oxigen pur que es podria veure involucrat en un incendi. També es poden trobar concentracions superiors d'oxigen en presència de substàncies comburents que alliberen oxigen en descompondre's (nitrat d'amoni utilitzat com a fertilitzant).

Una major concentració d'oxigen accelera la velocitat de combustió, augmenta la intensitat de les flames i la temperatura. Per exemple, amb una concentració del 24% d'oxigen, la velocitat de la combustió es duplica respecte a l'aire normal, i amb un 40% d'oxigen la velocitat es multiplica per 4. Fins i tot, materials que en l'aire ambient no poden entrar en combustió (només s'oxiden lentament), en atmosferes altament riques en oxigen s'encenen vivament *(per exemple, llana d'acer, pols d'alumini).*

A més, amplia el rang d'inflamabilitat, augmentant particularment el Límit Superior d'Inflamabilitat (LSI). Això significa que la barreja pot cremar en un ventall més ampli de proporcions, incloent barreges que en condicions habituals serien massa riques per cremar (amb la concentració normal d'oxigen a l'aire).

8.1.2. Concentració d'oxigen <21%

La disminució de la concentració d'oxigen és una situació molt més habitual en incendis, especialment en espais tancats o amb ventilació deficient.
A mesura que l'oxigen es consumeix, si no hi ha aportació d'aire fresc, la intensitat del foc disminueix, les flames es fan mes petites, es redueix l'alliberament de calor, la velocitat de propagació es frena. Per la majoria de combustibles, per sota d'un 14% d'oxigen aproximadament, la flama s'extingeix. No obstant, en molts casos, una baixa concentració d'oxigen no garanteix l'extinció del foc.

Encara que la flama s'hagi extingit per manca d'oxigen, els materials poden continuar cremant sense flama (foc latent), en forma de **brases**, fins i tot amb concentracions d'oxigen tan baixes com el 5-8%. Això és extremadament perillós en espais confinats, ja que els combustibles poden seguir pirolitzant i generant gasos combustibles. Si posteriorment es produeix una entrada sobtada d'aire (ventilació), es pot desencadenar una reignició violenta (***backdraft*)**.

8.2. Superfície de contacte de combustible-comburent

Per una mateixa substància combustible (sòlida o liquida), la superfície de contacte amb el comburent té una influència notable, i sovint espectacular, en la velocitat de combustió.
En combustibles sòlids i líquids, com més gran és la superfície de contacte, o com més fines les partícules, més facilitat per generar vapors i més oxigen pot interactuar amb aquests.
Exemples: encenalls de fusta o branquillons prims per encendre la barbacoa, l'herbassar sec o els rostolls (envers troncs gruixuts); la gasolina polvoritzada (en forma de boira fina) pot cremar gairebé instantàniament i explosivament, a diferència d'un bassal que crema i propaga gradualment.

Un cas particularment perillós són els **sòlids en pols**. En reduir la mida de partícula d'un sòlid fins a convertir-lo en pols, la seva superfície de contacte amb l'aire augmenta de manera exponencial. Si aquesta pols es dispersa a l'aire, pot formar un núvol de partícules combustibles que, en presència d'una font d'ignició, pot provocar una explosió de pols extremadament violenta, amb una alliberació de calor rapidíssima i una gran pressió.
Exemples: La pols de fusta en serradores, la pols de farina, sucre glaç, la pols de cereals en sitges...

En el cas de combustibles en estat gasós no podem parlar de la mida de les partícules, però el mateix efecte és aplicable a tenir una barreja molt homogènia del gas combustible amb l'oxigen, ja que les molècules de combustible i comburent estan més ben distribuïdes per interaccionar, i permet que la reacció es produeixi de manera més ràpida i eficient.

8.3. Humitat del combustible

La presència d'aigua en el combustible pot tenir un efecte significatiu en la seva inflamabilitat i velocitat de combustió.

L'aigua ha d'evaporar-se abans que el combustible pugui començar a cremar o continuar cremant eficaçment. Aquest procés d'evaporació consumeix una quantitat considerable d'energia (calor latent de vaporització), absorbint calor que d'altra manera s'utilitzaria per escalfar i, eventualment, pirolitzar el combustible. Per tant, una humitat elevada retarda significativament l'ignició i disminueix la velocitat de combustió. En alguns casos, pot fins i tot impedir la combustió si la humitat és excessiva.
Exemple: La fusta humida és molt més difícil d'encendre i crema amb menys intensitat que la fusta seca. En incendis forestals, els combustibles vegetals amb alt contingut d'humitat actuen com un fre natural a la propagació del foc.

8.4. Ventilació

La ventilació fa referència al moviment de l'aire cap i des de la zona de combustió, afectant directament el subministrament d'oxigen i l'evacuació dels productes de la combustió.

Incendi limitat pel combustible (**ILC**): Amb una ventilació adequada (aire fresc entrant) s'assegura un subministrament continu d'oxigen al foc, la qual cosa afavoreix una combustió completa i intensa. També ajuda a evacuar els fums calents i tòxics, evitant que s'acumulin gasos no cremats i permetent que el foc es desenvolupi lliurement. El foc està governat per la disponibilitat de combustible.

Incendi limitat per la ventilació (**ILV**): Amb una ventilació limitada (espais tancats), pot provocar una ràpida consumició d'oxigen i l'acumulació de fums i gasos combustibles sense cremar. Això pot reduir la intensitat del foc o fins i tot portar-lo a una fase latent, on la combustió de flama s'atura per manca d'oxigen. El foc està governat per la disponibilitat d'oxigen. Malgrat no tenir un foc que es pot desenvolupar lliurement ni molt altes temperatures, els materials poden continuar pirolitzant i generant gasos combustibles. En aquestes condicions una aportació d'aire sobtada i no controlada (trencament d'una finestra, obertura d'una porta, col·lapse d'un sostre) pot canviar radicalment el comportament del foc i desencadenar una reignició violenta.

8.5. Temperatura del combustible

La temperatura a la qual es troba el combustible abans de la ignició és un factor que influeix directament en la facilitat amb què s'encendrà i la velocitat amb què es propagarà el foc.

Com més alta és la temperatura a la qual es troba el combustible, menys energia externa (provinent de la font d'ignició o de la calor d'altres zones del foc) serà necessària per escalfar-lo fins a la seva temperatura d'ignició. Això fa que la ignició sigui més ràpida i fàcil, i que el foc es propagui amb més facilitat un cop iniciat.

Per exemple:

- No és el mateix intentar encendre una fusta que està a la temperatura exterior a l'hivern que una que ja està preescalfada al costat de l'estufa.
- En un incendi forestal, la calor radiant del foc principal preescalfa la vegetació circumdant, assecant-la i augmentant-ne la temperatura. Quan el front de flama arriba, la propagació és ràpida.
- En els motors de combustió interna, en climes molt freds el motor pot tenir dificultats per arrancar. Alguns motors dièsel necessiten sistemes complementaris per preescalfar.

9. Transmissió de la calor i mecanismes de propagació

La propagació d'un incendi depèn directament de com la calor es transfereix d'un punt a un altre, escalfant el combustible adjacent fins a la seva temperatura d'ignició. Hi ha tres mecanismes principals de transmissió de la calor: conducció, convecció i radiació.

9.1. Transmissió de la calor

9.1.1. Conducció

La conducció és la transferència de calor a través del contacte directe entre molècules. L'energia tèrmica es mou de les partícules més calentes a les més fredes mitjançant vibracions i col·lisions, sense un desplaçament significatiu de la matèria.

És el principal mecanisme de transmissió de calor en sòlids. La velocitat de conducció depèn de la conductivitat tèrmica del material: els metalls són bons conductors, la fusta o l'aire són bons aïllants.

En els incendis la calor es pot transmetre a través de parets, estructures metàl·liques (bigues, conductes) o d'altres materials sòlids, escalfant combustibles al costat oposat o en zones allunyades del punt d'origen. No és el mecanisme de transmissió més important.

9.1.2. Convecció

La convecció és la transferència de calor mitjançant el moviment d'un fluid (líquid o gas). En un incendi, principalment implica el moviment dels gasos calents i fums.

Els fluids calents es tornen menys densos i ascendeixen, mentre que els fluids més freds i densos baixen, creant corrents de convecció. Aquests corrents transporten l'energia tèrmica.

En els incendis els gasos de combustió i els fums calents ascendeixen i s'acumulen al sostre d'un compartiment, formant una capa de gasos calents. Aquesta capa pot estendre's horitzontalment per tota la sala i, si troba obertures (portes, finestres, escales, conductes), pot propagar-se a altres habitacions o pisos, transportant la calor de l'incendi. La convecció és un mecanisme important en la propagació d'incendis en edificis.

9.1.3. Radiació

La radiació és la transferència de calor en forma d'ones electromagnètiques. No requereix un medi físic per transmetre's, pot viatjar pel buit, com *per exemple la calor que ens arriba del Sol.*

Tots els objectes calents emeten radiació tèrmica. Com més alta és la temperatura de l'objecte, més energia radiant emet. La potència d'aquesta radiació depèn de la superfície de l'objecte i, sobretot, de la seva temperatura (elevada a la quarta potència, T^4), per la qual cosa les altes temperatures (com les de les flames) són particularment perilloses. Per tant, cal anar amb compte amb l'exposició a grans superfícies, però especialment a altes temperatures (flames).

La transmissió de calor per radiació es transmet en línia recta des de la font que la genera (*per exemple, les flames*), i en totes direccions. La intensitat de radiació emesa que rebem és

inversament proporcional al quadrat de la distància. Per protegir-nos (a nosaltres o a les víctimes), cal anar degudament protegits, resguardar-se 'a l'ombra' o allunyar-nos de la font (si és possible). Els objectes calents també en generen, però no tant com les flames; per exemple, un cop extingit el foc, els objectes calents segueixen radiant calor.

En els incendis les flames radien molta calor i escalfen combustibles propers (sense contacte directe) fins a la seva temperatura d'ignició. Fins i tot els fums i gasos calents radien molta calor a objectes amb els quals ni tant sols entren en contacte. És un dels mecanismes més importants per a la propagació del foc.



9.2. Mecanismes de propagació

Un cop el foc s'ha iniciat, la seva propagació a nous combustibles propers segueix un cicle continu d'escalfament i ignició, impulsat principalment pels mecanismes de transmissió de calor. Aquest procés es pot entendre en els següents passos seqüencials:

1) **Transmissió de calor**: Els combustibles adjacents al foc reben calor, que els arriba principalment per radiació (directament de les flames i els gasos calents) i per convecció (a través del contacte amb els gasos de combustió calents que ascendeixen i es desplacen).
2) **Augment de la temperatura:** La calor rebuda eleva la temperatura del combustible no cremat.
3) **Emissió de gasos combustibles:** A mesura que el combustible s'escalfa, comença a alliberar vapors i gasos combustibles inflamables, per piròlisi o evaporació.
4) **Ignició dels gasos:** Aquests gasos i vapors s'encenen per diverses vies:
    - Per **contacte directe amb la flama** del foc existent.
    - Per **autoignició**, si assoleixen la seva temperatura d'autoignició abans que els arribi la flama.

- Per **projecció de partícules enceses**: com brases arrossegades pel vent en un incendi forestal, degoteig de materials fosos encesos, o caiguda de materials encesos col·lapsats.

En els gasos combustibles, la propagació és inherentment més senzilla i directa. Com que el combustible ja es troba en fase gasosa, la propagació es produeix pel moviment del front de flama a través de la barreja de gasos combustibles i oxigen. Els gasos que encara no cremen són escalfats pel front de flama fins a la seva temperatura de combustió i s'encenen ràpidament per contacte directe amb la flama.

10. Efectes de la calor en els materials

A més dels efectes dels mecanismes de propagació, la calor comporta un augment de temperatura important en tots els materials, i en els no combustibles pot tenir conseqüències negatives o no desitjades. Aquests efectes són fonamentals per entendre el comportament de les estructures i els materials durant un incendi.

10.1. Dilatació tèrmica

La **dilatació tèrmica** és l'augment de volum que experimenten els materials quan s'escalfen. En un incendi, aquest efecte es manifesta amb una força considerable en tot tipus de materials, especialment en metalls com l'acer de les bigues estructurals. Aquesta força es considera pràcticament imparable, els materials dilatant-se poden exercir una pressió immensa sobre els elements adjacents. Aquesta pressió pot provocar fissures, esquerdes i, en els casos més greus, el col·lapse de murs o la ruptura de les unions estructurals. Un cop l'incendi és extingit i l'estructura es refreda, es produeix la **contracció** del material. Aquesta contracció pot no ser uniforme, deixant l'estructura deformada, inestable i sense la seva integritat original. Per això, moltes estructures afectades per un incendi no poden ser recuperades i han de ser enderrocades.

10.2. Pèrdua de resistència dels materials

L'increment de temperatura redueix dràsticament la **resistència mecànica** de molts materials. Aquest fenomen és particularment crític en els components estructurals. Per això, les normatives de construcció modernes exigeixen que les estructures siguin dissenyades per resistir l'acció del foc durant un temps determinat en minuts (R30, R60, R90, R120, etc.) sota condicions normalitzades. L'objectiu és donar temps suficient per a l'evacuació segura dels ocupants i per a l'actuació dels equips d'emergència.
Aquest fenomen afecta de manera diferent els materials:

- **Metalls**: L'acer perd ràpidament la seva capacitat de càrrega a partir dels 300°C i esdevé pràcticament inútil a temperatures superiors als 550-600°C. Aquest debilitament provoca la seva deformació i, finalment, el col·lapse de l'estructura.

- **Formigó**: Tot i ser un material més resistent al foc, les altes temperatures poden provocar l'evaporació de l'aigua interna, generant tensions que causen el despreniment de la capa superficial (fenomen conegut com a *spalling*). Això deixa al descobert el ferro intern, que aleshores perd resistència de forma accelerada.
- **Fusta**: La capa carbonitzada que es forma a la superfície durant la combustió actua com a aïllant tèrmic, protegint l'interior de la peça durant un temps. Quan les estructures de fusta no estan protegides amb altres materials, es sobredimensionen per compensar la pèrdua de secció que patiran per la carbonització, assegurant així que mantinguin la seva capacitat de càrrega estructural durant el temps de resistència al foc exigit per la normativa.

Aquests efectes ressalten la importància d'avaluar no només la combustibilitat d'un material, sinó també el seu comportament tèrmic per garantir la seguretat en un incendi.

11. Fenòmens extrems: *Backdraft* i *Flashover*

En el desenvolupament d'un incendi, especialment en espais tancats, es poden donar certes condicions que porten a fenòmens extrems i altament perillosos per als ocupants i els equips d'emergència. Els dos més coneguts són el ***backdraft*** i el ***flashover***. Tot i que sovint es confonen, són fenòmens diferents impulsats per mecanismes diferents.

11.1. Backdraft

El *backdraft* és una reignició explosiva d'un incendi que es troba en una fase de ventilació limitada.

- **Condicions de formació:** Es produeix en un compartiment tancat on un incendi ha consumit gairebé tot l'oxigen disponible. El foc, per tant, es troba "dormit" o en una fase latent, sense flama activa, però els materials combustibles continuen pirolitzant-se a causa de l'alta temperatura, omplint l'espai de gasos i vapors altament combustibles, però sense suficient oxigen per cremar. L'acumulació de fum espès i sense moviment, de color marronós o groguenc, juntament amb “respiracions” a les escletxes (fum pulsant), són senyals de la seva possible presència.
- **Mecanisme:** Quan s'obre una porta o finestra (o qualsevol obertura que permeti l'entrada d'aire), es produeix una entrada sobtada d'oxigen a aquesta atmosfera carregada de gasos calents i combustibles. Aquest oxigen es barreja ràpidament amb els gasos calents, creant una barreja inflamable que s'encén de manera sobtada i explosiva. La flama es propaga violentament cap a l'obertura per on ha entrat l'oxigen, projectant flames i gasos calents cap a l'exterior.
- **Perillositat:** La seva perillositat rau en la força explosiva que allibera, i en la ràpida propagació del foc per l'espai i cap a l'exterior.

11.2. Flashover

El *flashover* és la transició ràpida d'un incendi localitzat a un incendi totalment desenvolupat en un espai, on totes les superfícies combustibles s'encenen gairebé simultàniament.

- **Condicions de formació:** Es produeix quan la calor generada pel foc (tant per convecció dels gasos calents acumulats al sostre com per radiació directa de les flames) irradia intensament sobre tots els materials combustibles de la sala. Aquesta radiació escalfa gradualment totes les superfícies exposades fins a la seva temperatura d'ignició. Afavorit per una càrrega de foc elevada i combustibles amb baix punt d'ignició.
- **Mecanisme:** A mesura que tots els materials del compartiment arriben a la seva temperatura d'autoignició gairebé al mateix temps, s'encenen de forma sobtada i generalitzada. Això provoca que tot l'espai es trobi en flames en qüestió de segons. A diferència del *backdraft*, que és un fenomen impulsat per la manca d'oxigen i la seva posterior entrada d'aire, el *flashover* és principalment un fenomen tèrmic, resultat de l'acumulació de calor i la radiació.
- **Relació amb la ventilació:** Un *flashover* pot produir-se tant en espais amb bona ventilació (si el foc té prou combustible per generar la calor radiant necessària) com en espais amb ventilació limitada. En aquests últims, una entrada sobtada d'aire pot actuar com a detonant, accelerant el procés tèrmic que ja s'estava gestant.
- **Perillositat:** La seva perillositat rau en la sobtada i completa implicació de l'espai en flames, les altíssimes temperatures assolides i la ràpida destrucció que provoca.

12. Productes de la combustió

En una combustió ideal (per exemple del metà), el combustible reacciona perfectament amb l'oxigen, generant només diòxid de carboni (CO_2) i aigua (H_2O).

Però la realitat dels incendis és molt diferent. La combustió és gairebé sempre incompleta i molt més complexa, produint una gran varietat de substàncies addicionals degut a la:

- **Composició dels combustibles:** Els materials quotidians (fusta, plàstics, tèxtils, etc.) contenen una àmplia gamma d'elements químics que, en cremar, alliberen gasos i compostos que van més enllà del CO_2 i l'aigua.
- **Combustió incompleta:** En un incendi, no sempre hi ha prou oxigen per cremar tot el combustible de manera eficient, o la reacció és tan ràpida que no hi ha temps per una oxidació completa. Això genera subproductes com el monòxid de carboni (CO), un gas letal inodor i incolor, i partícules de sutge (carboni sense cremar).
- **Descomposició tèrmica:** Per acció de la calor i les altes temperatures, molts materials es descomponen, generant una multitud de gasos i vapors combustibles i no combustibles que s'afegeixen a la barreja de productes de l'incendi. Fins i tot materials no combustibles o poc combustibles poden contribuir activament a l'incendi.

El resultat és una barreja de:

- **Gasos:** Alguns d'ells tòxics, asfixiants o contaminants.
- **Fum visible:** Barreja de gasos i partícules en suspensió.
- **Flama i calor**
- **Residus sòlids:** Cendres, sutge i restes cremades, que poden ser dispersats pel vent o arrossegats per l'aigua d'extinció.

12.1. Gasos

Els gasos generats en un incendi són un dels perills més grans i la causa principal de mortalitat.

- **Gasos Tòxics i Contaminants:** El monòxid de carboni (CO) és el producte de combustió incompleta més comú i perillós. Es produeix quan hi ha una falta d'oxigen per a la combustió. És inodor, incolor i insípid, i s'uneix a l'hemoglobina de la sang amb molta més afinitat que l'oxigen, impedint el seu transport i provocant ràpidament asfíxia cel·lular i la mort. En espais confinats el CO pot romandre en l'ambient molt temps després que les flames s'hagin extingit. Per això, és de vital importància mesurar la seva concentració amb detectors de gas i garantir una ventilació adequada dels espais afectats abans de permetre-hi l'accés.
  Actualment tenim un ampli ventall de materials sintètics que ens envolten (a casa, al cotxe a la indústria...). Aquests materials, en cremar, alliberen compostos complexos. Per exemple el cianur d'hidrogen (HCN), un gas extremadament tòxic que es genera en la combustió de materials com el poliuretà (sofàs, aïllaments i entapissats de mobles). Altres fonts comunes d'aquests gasos inclouen les coles i resines de mobles prefabricats, els plàstics d'aparells domèstics i els interiors de cotxes moderns. L'incendi de bateries de ió-liti, cada cop més presents en l'àmbit domèstic i en vehicles, generen també una àmplia varietat i quantitat de gasos altament tòxics.
- **Gasos Asfixiants:** El diòxid de carboni (CO_2), en concentracions moderades, pot ser lleugerament tòxic, provocant mal de cap, falta de concentració o somnolència. No obstant això, en un incendi, es genera en grans quantitats i la seva perillositat principal rau en la seva capacitat d'actuar com a asfixiant, desplaçant l'oxigen de l'aire, reduint la concentració d'aquest per sota dels nivells necessaris per a la respiració, la qual cosa pot provocar pèrdua de consciència i la mort per asfíxia.

12.2. Fum

El fum es la barreja dels gasos de combustió (esmentats anteriorment), vapor d'aigua i partícules en suspensió (cendra, sutge). El fum sol ser dens i visible, i precisament el color, la densitat i el comportament (quantitat, velocitat i turbulència) són fonts valuoses d'informació, que poden donar pistes del què i el com està cremant.

Més enllà de la toxicitat dels gasos que conté, el fum pot reduir dràsticament la visibilitat, dificultant l'orientació i l'evacuació de persones, i la feina dels bombers. A més, el fum pot provocar dificultats per respirar, asfíxia i mort. L'elevada temperatura del fum calent pot provocar cremades a les vies aèries, i és un vector important de propagació.

12.3. Flama i calor

La flama és la part visible del procés de combustió, la regió de gasos incandescents on es produeix la reacció de combustió. La calor és l'energia alliberada en aquestes reaccions, i ambdós són fonamentals per a la propagació de l'incendi.

L'alta temperatura i la radiació emesa per la flama i els gasos calents representen un risc elevadíssim per a la vida, provocant cremades greus i ràpides. Tot i això, en la majoria d'incendis, la causa principal de mortalitat no és directament la flama o la calor, sinó la inhalació de fum i gasos tòxics.

La calor té un impacte devastador en la integritat de les estructures. Els materials de construcció (acer, formigó, fusta) perden la seva resistència mecànica a altes temperatures. L'acer es deforma i col·lapsa, el formigó es desprèn i perd capacitat de càrrega, i la fusta es carbonitza. Això pot portar al col·lapse total o parcial de l'edifici, posant en risc la vida de les persones atrapades i dels equips d'intervenció.

12.4. Residus sòlids i contaminació post-Incendi

Un cop extingit el foc, un incendi deixa un llegat material que planteja nous desafiaments, tant operatius com ambientals.

Els residus sòlids generats inclouen cendres, sutge adherit a les superfícies i restes de materials totalment o parcialment cremats. Aquests residus, en funció del que hagi cremat, poden contenir una gran varietat de substàncies tòxiques i contaminants.

- **Contaminació de l'aigua d'extinció:** No tota l'aigua utilitzada per extingir el foc s'evapora i desapareix, bona part es barreja amb els productes de la combustió (cendres, sutge, compostos tòxics i altres substàncies químiques). Aquesta "aigua d'extinció" es converteix en un residu altament contaminant. Si no es gestiona adequadament, pot fluir cap al sòl, infiltrar-se i contaminar aqüífers subterranis, o arribar a rius i rieres i la xarxa de clavegueram, causant un impacte ambiental a considerar. La seva recollida, emmagatzematge i tractament són un repte logístic i ambiental important en les fases d'incendi i post-incendi.
- **Contaminació del lloc:** Més enllà de l'aigua, els residus sòlids i les partícules tòxiques s'assenten i s'adhereixen a totes les superfícies de l'espai afectat (habitatges, naus industrials, oficines, etc.). Aquesta contaminació pot suposar un risc continu per a la salut de les persones que tornin a accedir al lloc i per al personal encarregat de la neteja i

rehabilitació. Requereix processos de descontaminació especialitzats i sovint costosos abans que els espais puguin ser utilitzats de nou amb seguretat.
Un cas particularment delicat és la presència de fibrociment (cobertes, xemeneies, dipòsits, ...) Si bé no és combustible, les altes temperatures d'un incendi poden disgregar les seves fibres d'amiant, convertint-les en partícules molt fines que es dispersen amb el fum, queden en suspensió o s'assenten en l'entorn. Aquestes fibres, un cop inhalades, són causa de greus malalties pulmonars (asbestosi) i càncer.

La gestió d'aquests residus i la descontaminació post-incendi són fases crítiques que asseguren la protecció del medi ambient i la salut pública un cop el foc ha estat extingit.

13. Teoria de l'extinció

Recordem el tetraedre del foc, què necessita un foc per existir:

- **Combustible:** El material que crema.
- **Comburent:** Normalment l'oxigen de l'aire.
- **Calor:** L'energia necessària per iniciar i mantenir la reacció.
- **Reacció en cadena:** El procés químic continu que manté el foc.

Per extingir un incendi, hem d'eliminar un o més dels costats del tetraedre. No cal eliminar-los tots, només un perquè la reacció de combustió s'aturi.

13.1. Tècniques d'extinció

Les tècniques bàsiques d'extinció es basen en eliminar o reduir algun del següents elements:

- **Eliminació del combustible (Inanició o separació):** Consisteix a retirar o separar el material que crema o que podria cremar. Sense combustible, el foc no pot alimentar-se i s'extingeix.
  Exemples:
  Tallar el subministrament de gas o líquid (canonades, fuites...)
  Retirar objectes i material combustible del camí del foc, manualment o amb maquinària pesada (piles de deixalles, vegetació...)
  Cremes d'eixamplament en incendis forestals
- **Eliminació del comburent (Sufocació):** Perquè un foc cremi, necessita oxigen (generalment un mínim del 16% en l'aire). La sufocació consisteix en eliminar o reduir la concentració d'oxigen per sota d'aquest nivell (o el que sigui crític per a un combustible particular).
  Exemples:
  Cobrir la paella amb una tapa o drap humit (ben escorregut).
  Cobrir el foc amb manta ignífuga, escuma o sorra.

Inundar un espai amb gasos no combustibles, com el diòxid de carboni (CO_2) o el nitrogen, per desplaçar l'oxigen.

- **Eliminació de la calor (Refredament):** Aquesta és la tècnica més comuna i eficaç. Consisteix a reduir la temperatura del combustible per sota del seu punt d'ignició. Sense prou calor, la reacció de combustió no es pot mantenir.
  Exemple:
  Aplicar aigua directament sobre el combustible per absorbir la calor. Refreda materials propers, disminueix o elimina l'emanació de gasos combustibles, evita la propagació.
- **Ruptura de la reacció en cadena (Inhibició o Interrupció Química):** Alguns agents extintors actuen interferint amb la reacció química de la combustió. Aquests agents (substituts dels halons, i algunes pols químiques) alliberen productes que es combinen amb els radicals lliures de la flama, trencant el cicle de la reacció.
  Exemple:
  Aplicar un agent extintor.

13.2. Agents extintors

Com hem vist, algunes tècniques d'extinció consisteixen en aportar substàncies específiques per apagar el foc; són el que anomenem **agents extintors**. La tria de l'agent extintor adequat és crucial per a l'èxit de la intervenció, ja que no tots els agents són eficaços per a tots els tipus de foc, i alguns fins i tot poden ser perillosos si s'utilitzen incorrectament.

Segons la norma europea EN 2 (adoptada a Espanya com a UNE-EN 2) els focs es classifiquen en diferents classes segons el tipus de combustible que crema. S'estableix la següent classificació:

- **Classe A:** Focs de materials sòlids que formen brases, generalment d'origen orgànic com la fusta, el paper, els teixits, la palla, el carbó o certs plàstics que cremen deixant brases. La seva combustió es produeix en superfície i en profunditat.
- **Classe B:** Focs de líquids inflamables o sòlids liquables (gasolina, gasoil, olis, dissolvents, alcohols, pintures, vernissos, quitrà o ceres). La combustió es produeix principalment en superfície.
- **Classe C:** Focs de gasos inflamables (propà, butà, gas natural, metà, acetilè, hidrogen, etc.).
- **Classe D:** Focs de metalls combustibles (magnesi, alumini, sodi, potassi, titani o zirconi). Aquests focs reaccionen de manera violenta amb agents extintors comuns com l'aigua.
- **Classe F (abans Classe K en altres normes):** Focs derivats de l'ús d'olis i greixos d'origen animal o vegetal en aparells de cuina (restaurants, cuines industrials). Aquests greixos tenen un punt d'autoignició molt alt i requereixen agents que actuen per saponificació (transformen el greix en sabó, que no crema).

No existeix una Classe E de focs elèctrics. L'electricitat no crema, el que sí que podem tenir són focs (Classe A, B, C...) amb presència d'electricitat. Cal tenir-ho present a l'hora de triar el mètode i l'agent extintor.

Ara que coneixem els tipus de foc, veurem els agents extintors més comuns, els seus mecanismes d'acció principals i per a quines classes de foc estan indicats.

13.2.1. Aigua

L'aigua és l'agent extintor per excel·lència. Emprat des de temps immemorials, molt abundant i barat. La seva eficàcia rau especialment en la seva gran capacitat d'absorció de calor.

- **Mecanismes d'extinció:**
  1) **Refredament (principal):** L'aigua té una extraordinària capacitat d'absorbir calor. Això es deu principalment a:
     - **Elevada calor específica:** L'aigua en fase líquida pot absorbir una gran quantitat de calor per augmentar la seva temperatura (en fase vapor també però menys, aproximadament la meitat).
     - **Elevat calor latent de vaporització:** Sobretot, absorbeix una gran quantitat de calor en el canvi de fase de líquid a vapor (a 100°C). Cada litre d'aigua que es converteix a vapor retira una energia considerable del foc, reduint dràsticament la temperatura del combustible per sota del seu punt d'ignició.
  2) **Sufocació (secundari):** Quan l'aigua es vaporitza, genera un gran volum de vapor (aproximadament 1.700 litres de vapor per cada litre d'aigua). Aquest vapor pot desplaçar l'oxigen que envolta el foc, i contribuir amb la sufocació.
- **Camp d'aplicació:** Principalment eficaç en focs de **Classe A** (materials sòlids amb brases: fusta, paper, teixits, etc.).
- **Formes d'aplicació:**
  - Pot aplicar-se a galledes o amb mànegues, a raig compacte (per abast i penetració) o atomitzat (con d'atac). Com més petita és la partícula d'aigua més eficaç i eficient, aconseguim vaporitzar més quantitat d'aigua, millorant la capacitat de refredament i reduint danys per aigua.
  - En forma de cortina d'aigua (ventall de protecció), serveix de protecció als equips d'intervenció o estructures i objectes adjacents, absorbint i aturant bona part de la calor transmesa per radiació.
  - Un cas particular, en incendis forestals generalment, és el llançament d'aigua des de l'aire amb mitjans aeris (avions i helicòpters).
- **Limitacions:**
  - **Perill elèctric:** Conductora de l'electricitat. No s'ha d'utilitzar en presència de tensió elèctrica.
  - **Líquids inflamables (Classe B)**: Tot i que en determinades condicions pot funcionar, generalment no és l'agent més eficaç ni el recomanat per a aquests focs. Això es deu a diverses raons:

corregit · DGPEIS 10/2026

- La major part de la capacitat de refredament de l'aigua s'obté en vaporitzar a 100°C. Si el líquid inflamable genera vapors combustibles a una temperatura inferior a aquesta, l'aigua no el refredarà prou eficaçment per aturar l'emissió de vapors.
- Si el líquid inflamable és més lleuger que l'aigua, surarà sobre ella, i l'aigua el pot dispersar i escampar, estenent el foc i empitjorant la situació.
- En focs de líquids inflamables menys densos que l'aigua i continguts en recipients (hidrocarburs per exemple), l'aigua d'extinció va a parar al fons del recipient, per sota del combustible que crema. Aquesta aigua s'escalfa, fins i tot per sobre dels 100°C, sense bullir a causa de la pressió exercida pel combustible que té al damunt. A mesura que el combustible es consumeix i la pressió que fa aquest sobre la superfície de l'aigua disminueix, l'aigua sobreescalfada pot bullir, de cop, massivament i sense senyals d'avís, projectant el combustible en flames fora del recipient (fenomen conegut com a *boil-over*), escampant el foc i empitjorant dràsticament la situació.

- **Metalls combustibles (Classe D):** Reacciona violentament amb molts metalls combustibles, provocant explosions o alliberant gasos inflamables (per exemple, hidrogen amb el magnesi), augmentant el perill.

– **Danys per aigua:** Pot causar danys significatius en béns materials sensibles a l'aigua (equipament electrònic, biblioteques, obres d'art).
– **Additius:** Per millorar l'eficàcia de l'aigua o adaptar-la a diferents situacions, es poden afegir diversos additius:
  - **Agents humectants/tensioactius:** Redueixen la tensió superficial de l'aigua, permetent-li penetrar millor en materials porosos i densos (focs de Classe A).
  - **Espesseïdors:** Augmenten la viscositat de l'aigua, fent-la més adherent a les superfícies (especialment útil en estructures verticals) i reduint el drenatge.
  - **Agents escumògens:** Són els concentrats que, barrejats amb aigua i aire en proporcions específiques, generen escuma per a la sufocació (utilitzats en focs de Classe B i A).
  - **Agents encapsulants:** Són additius més moderns que actuen encapsulant les partícules de combustible i els vapors inflamables, interferint amb la combustió i reduint la seva propagació. *Per exemple: F-500, eFP-600*.

  Existeix una gran varietat d'additius al mercat, i si bé molts tenen eficàcia comprovada per a aplicacions específiques, és crucial conèixer les seves propietats i assegurar-se del seu rendiment real i la seva compatibilitat abans de la seva utilització operativa generalitzada.

13.2.2. Escuma

És un cas particular de l'aigua, a la que li afegim escumogen i aire per formar una capa de bombolles lleugera.

- **Mecanismes d'extinció:**
  1) **Sufocació (principal):** Forma una capa aïllant sobre la superfície del combustible, separant-lo de l'oxigen atmosfèric i evitant l'alliberament de vapors inflamables.
  2) **Refredament:** L'aigua present a l'escuma contribueix a refredar el combustible**.**
  3) **Separació de vapors:** La capa d'escuma evita que els vapors combustibles s'alliberin de la superfície del líquid.
- **Tipus:** Les escumes, i els escumògens que les originen, es poden classificar segons:
  - **Segons la seva composició química:**
    - **Escumes proteíniques (P):** Basades en proteïnes animals hidrolitzades. Generen escuma de gran estabilitat i bona resistència a la calor, però amb una fluïdesa més lenta.
    - **Escumes fluoro-proteíniques (FP i FFFP):** Són escumes amb base proteínica (d'origen natural) amb additius fluorats (PFAS). Les *FP (Fluoroprotein*) milloren la fluïdesa i la resistència a la reignició de les proteíniques. Les *FFFP (Film-Forming Fluoroprotein)* són una evolució de les FP que incorporen tensioactius fluorats per obtenir també capacitat de formació de pel·lícula (Prohibides a partir del 4 juliol 2025).
    - **Escumes sintètiques (S):** Basades en tensioactius i altres polímers d'origen sintètic.
    - **Escumes formadores de pel·lícula aquosa (AFFF):** Aquestes escumes són sintètiques i depenen exclusivament de la presència de tensioactius fluorats (PFAS) per la seva capacitat de formar una pel·lícula aquosa (Prohibides a partir del 4 juliol 2025).
    - **Escumes Lliures de Fluor (*3F o FFF - Fluorine-Free Foams*):** Sintètiques per composició, es caracteritzen per no contenir compostos fluorats (PFAS). Són la nova generació de productes, dissenyats com a alternatives ecològiques i amb rendiments creixents, sent l'opció prioritària en l'actualitat.
  - **Segons les seves propietats:**
    - **Escumes formadores de pel·lícula aquosa (*AFFF - Aqueous Film-Forming Foam*):** Caracteritzades per la seva capacitat de formar una fina pel·lícula aquosa sobre la superfície del combustible, la qual cosa proporciona una ràpida extinció i supressió de vapors. Aquesta propietat es deriva de la seva composició amb tensioactius fluorats (Prohibides a partir del 4 juliol 2025).
    - **Escumes Resistents a Alcohols (AR):** Dissenyades per a combustibles polars (com alcohols, cetones, èsters, etc.) que, per la seva miscibilitat amb l'aigua, destruirien les escumes convencionals. Contenen polímers que formen una barrera protectora entre l'escuma i el combustible. Històricament, moltes eren versions AR-AFFF, però amb la prohibició dels PFAS, el mercat tendeix ara cap a alternatives com les AR-FFF.
    - **Escumes Polivalents / Multi-propòsit:** Dissenyades per ser efectives tant en focs de Classe A (materials sòlids amb brases) com en focs de Classe B (líquids inflamables), incloent-hi sovint tant hidrocarburs com, en alguns casos,

dissolvents polars (si posseeixen també la característica AR). No confondre amb les multi-expansió.

- **Segons el coeficient d'expansió:** relació entre el volum d'escuma generat i el volum de barreja aigua/escumogen:
  - **Baixa expansió (fins a 20:1):** Gran projecció, bona penetració i adherència en superfícies verticals..
  - **Mitjana expansió (20:1 a 200:1):** S'utilitza per omplir volums mitjans i en focs amb vessaments.
  - **Alta expansió (més de 200:1):** Per omplir grans espais tancats (hangars, magatzems) o per a focs tridimensionals, a causa del gran volum de bombolles generat.
  - **Escumes Multi-expansió:** Alguns concentrats escumògens estan dissenyats per generar escumes amb diferents coeficients d'expansió (baixa, mitjana o alta) en funció del tipus de generador d'escuma amb què es combinin, oferint flexibilitat amb un sol producte.

- **Dosificació:** La proporció d'escumogen en aigua sol ser del 1%, 3% o 6%, depenent del tipus d'escuma i l'aplicació. Amb els sistemes de dosificació moderns, que han millorat precisió, la tendència és a anar a escumògens concentrats, que permeten, per un mateix volum d'escumogen, obtenir més quantitat d'escuma.
- **Compatibilitat:** És crucial assegurar la compatibilitat entre el concentrat escumogen i el tipus de combustible, així com evitar la barreja de diferents tipus d'escumes si no està expressament indicat pel fabricant. A més, algunes pols químiques poden trencar la manta d'escuma, excepte les formulacions de pols compatibles amb escuma.
- **Formes d'Aplicació:** L'aplicació efectiva de l'escuma requereix un procés controlat de barreja d'aigua, concentrat escumogen i aire.
  - La solució d'aigua i escumogen (que anomenem escumant) es prepara habitualment mitjançant prebarrejadors en línia o sistemes de dosificació en bomba. Posteriorment, a la llança d'escuma, s'incorpora aire per formar les bombolles.
  - Per a la producció d'escumes d'alta expansió, donada la gran quantitat d'aire que han de capturar, es requereixen generadors d'escuma especials que utilitzen ventiladors per forçar l'entrada d'aire i crear un gran volum de bombolles.
  - En els Sistemes d'Escuma d'Aire Comprimit (CAF - *Compressed Air Foam*), l'aire s'injecta a pressió directament a la línia de mànegues, abans de la llança, juntament amb la barreja d'aigua/escumogen.
- **Taxa d'aplicació:** Per a una extinció efectiva i eficient, és fonamental aplicar l'escuma a un ritme d'aplicació mínim (volum d'escuma per unitat de temps i superfície, p. ex., L/min·m²). Per sota aquesta taxa mínima, la capa d'escuma es pot trencar i no ser efectiva.
- **Camp d'aplicació:** Principalment en focs de **Classe B** (líquids inflamables). També són efectives en focs de **Classe A** (sòlids amb brases, on poden penetrar i refredar).

- **Ús preventiu**: També es fan servir preventivament per segellar vessaments de líquids inflamables, cobrint la superfície per suprimir l'emissió de vapors i evitar la ignició abans que es produeixi el foc, i la reignició un cop extingit.

- **Limitacions:**
  - **Conductivitat elèctrica**: La majoria d'escumes basades en aigua són conductores de l'electricitat, amb les mateixes limitacions que l'aigua en presència de tensió.
  - **Impacte ambiental i legal**: A partir del **4 de juliol de 2025**, està prohibida a la UE la comercialització i utilització (amb algunes excepcions temporals) d'escumes amb compostos fluoroalquilats (PFAS), degut al seu alt impacte ambiental (persistència, mobilitat i bioacumulació en la cadena alimentària) i els riscos per a la salut humana. Aquesta regulació ha impulsat el desenvolupament i l'adopció d'alternatives lliures de PFAS (*Fluorine-Free Foams* - FFF).
  - **Interferències**: Pot ser arrossegada pel vent o desintegrar-se en contacte amb focs molt intensos. Es destrueix amb l'aplicació d'aigua a sobre, un cop formada.
  - **Danys per neteja:** Deixa residus que requereixen neteja posterior.
  - **Reactivitat amb metalls**: No apta per a focs de metalls combustibles.

13.2.3. Pols química seca

La pols química seca és un agent extintor sòlid, compost per partícules molt fines (entre 10 i 20 micres) de sals metàl·liques i altres substàncies químiques, conegut per la seva ràpida i eficaç capacitat d'extinció.

- **Mecanismes d'extinció:**
  1) **Inhibició (principal):** La seva acció principal es basa en la interrupció de la reacció en cadena del foc.
  2) **Sufocació (secundari):** crea una barrera entre el combustible i l'oxigen.
- **Propietats Extintores:**
  - És apta per a una àmplia gamma de focs (classes A, B, C i D, depenent del tipus de pols).
  - Ofereix una ràpida extinció.
  - Té una bona capacitat d'adherència sobre superfícies sòlides, la qual cosa ajuda a evitar la reignició.
  - És un agent no conductor de l'electricitat.
- **Tipus de Pols Química:**
  - **Pols ABC (Polivalent)**: És la més comuna i versàtil, efectiva en focs de Classe A (materials sòlids amb brases), B (líquids inflamables) i C (gasos inflamables). Està composta principalment per fosfat monoamònic.
  - **Pols BC (Convencional)**: Efectiva en focs de Classe B (líquids inflamables) i C (gasos inflamables). Sol estar basada en bicarbonat de sodi o potassi.
  - **Pols Químiques Especials (per a Focs de Classe D)**: Dissenyades específicament per a focs de metalls combustibles (Classe D), com el magnesi,

sodi, titani, etc. Cada tipus de pols especial està formulada per a un metall o un grup de metalls concret.

- **Formes d'Aplicació:** Aquestes pols es poden aplicar tant amb extintors portàtils com amb sistemes fixos (d'inundació total o local).
- **Limitacions:**
  - **Danys a equips sensibles:** No és adequada per a entorns amb equips electrònics delicats (ordinadors, sales de control), ja que el residu de la pols pot comprometre la seva funcionalitat.
  - **Risc de reignició:** No crea una atmosfera inerta duradora, fet que pot provocar la reignició del foc si no s'actua amb rapidesa o no es combina amb altres mètodes.
  - **Dificultat de neteja:** La neteja posterior a l'ús és complexa, especialment amb la pols ABC, que deixa una capa enganxosa i pot ser corrosiva.
  - **Ús en espais tancats**: En àrees confinades, l'ús de pols pot reduir severament la visibilitat i augmentar el risc d'asfíxia o irritació respiratòria. Es recomana prendre mesures per evitar la inhalació.

13.2.4. Agents extintors gasosos

Els agents extintors gasosos són una família d'agents d'extinció que actuen principalment mitjançant la sufocació (reducció d'oxigen) o la inhibició química de la flama.

Propietats i Limitacions Comunes:

- **Absència de residus:** No deixen cap tipus de residu després de la descàrrega, cosa que els fa crucials per protegir equips delicats i actius de gran valor.
- **No conductors d'electricitat:** Són segurs per utilitzar en la proximitat d'equips i instal·lacions elèctriques sota tensió.
- **Aplicacions en entorns sensibles:** La seva naturalesa "neta" i no conductora els fa ideals per a la protecció d'equips electrònics, sales de control, centres de dades, arxius, museus, laboratoris, i altres espais on els danys per residus serien inacceptables.
- **Formes d'aplicació:** S'utilitzen en sistemes fixos (per inundació total en espais tancats o per aplicació local sobre el punt de risc). Els sistemes d'inundació total requereixen alarmes predescàrrega, per garantir l'evacuació segura les persones. També en extintors portàtils (especialment el CO_2).
- **Eficàcia en focs de Classe B i C:** Són molt eficaços en la supressió de focs de líquids inflamables (Classe B) i gasos (Classe C).
- **Ineficàcia en focs de Classe A profunds:** No són eficaços en incendis de materials sòlids amb brases profundes (Classe A), ja que no penetren en el material.
- **Risc de reignició:** Donat que es dispersen una vegada descarregats, no mantenen una atmosfera inerta de forma duradora, podent-se produir reignició si la font de calor no ha estat completament eliminada o refredada.
- **Ineficàcia en exteriors/ventilació:** La seva eficàcia es redueix dràsticament en exteriors o en àrees amb molta ventilació, ja que el gas es dilueix i desapareix ràpidament.

a) Gasos que actuen per sufocació (dilució o eliminació d'oxigen)

Aquests gasos redueixen la concentració d'oxigen en l'ambient per sota del necessari per mantenir la combustió.

- **Diòxid de carboni (CO_2):** Gas incolor, inodor i més dens que l'aire. S'emmagatzema a alta pressió.
  - **Mecanismes d'extinció:** Sufocació (principal) i refredament (secundari, pel canvi de fase de líquid a gas).
  - **Perill per a les persones**: A les concentracions extintores, el CO_2 és extremadament perillós i ràpidament mortal per la seva toxicitat directa (mal de cap, desorientació, pèrdua de consciència) i el desplaçament d'oxigen (mort per asfíxia). Per això, el seu ús en espais ocupats requereix estrictes protocols de seguretat.
  - **Altres limitacions**: Possible xoc tèrmic en equips sensibles.

- **Gasos inerts (Nitrogen, Argó i mescles: IG-55, IG-541...):** Gasos fisiològicament inerts, incolors, inodors.
  - **Mecanismes d'extinció**: Actuen exclusivament per sufocació, diluint la concentració d'oxigen.
  - **Seguretat:** A diferència del CO_2, la seva acció sobre les persones és només per reducció d'oxigen. Els sistemes es dissenyen per extingir el foc a nivells d'oxigen (normalment entre 10-12,5%) que permeten una exposició humana curta i segura per a l'evacuació, sense els efectes tòxics directes del CO_2.
  - **Altres avantatges:** No provoquen xoc tèrmic.
  - **Aplicacions**: Preferits en espais ocupats amb equips sensibles (sales de control, arxius) on no es vol el risc del CO_2. S'apliquen en sistemes fixos d'inundació total.

b) Gasos que actuen per inhibició química (agents nets)

Aquests gasos interfereixen directament amb la reacció en cadena de la combustió.

- **Halons (Històric):** Hidrocarburs halogenats (amb brom, clor i fluor).
  - **Gran Eficàcia:** Van ser els agents per inhibició més eficaços, ràpids i nets, sense deixar residus. Ideals per a equips electrònics i aplicacions crítiques.
  - **Prohibició:** Producció i ús prohibits a partir del 1994 (Protocol de Montreal) a causa del seu alt potencial de destrucció de la capa d'ozó (ODP). Només es permeten els halons recuperats i reciclats per a un nombre molt limitat “d'usos crítics", en els casos en què no s'han trobat alternatives viables que compleixin els mateixos requisits de seguretat i rendiment (aviació civil, instal·lacions militars i nuclears).
- **Substituts dels Halons (agents nets de nova generació: HFCs, FK-5-1-12...):** Són compostos halogenats (amb fluor, no tenen ni brom ni clor) o altres substàncies químiques

amb un perfil ambiental molt més favorable (baix o nul ODP i reduït GWP- *Global Warming Potential)*.

- **Mecanismes d'extinció**: Actuen principalment per inhibició química, amb un efecte secundari de refredament.
- **Eficàcia**: Són molt eficaços, similars als Halons però generalment amb una eficàcia extintora lleugerament inferior, requerint a vegades concentracions més altes.
- **Altres avantatges**: No provoquen xoc tèrmic significatiu i són segurs per a les persones a les concentracions d'extinció.