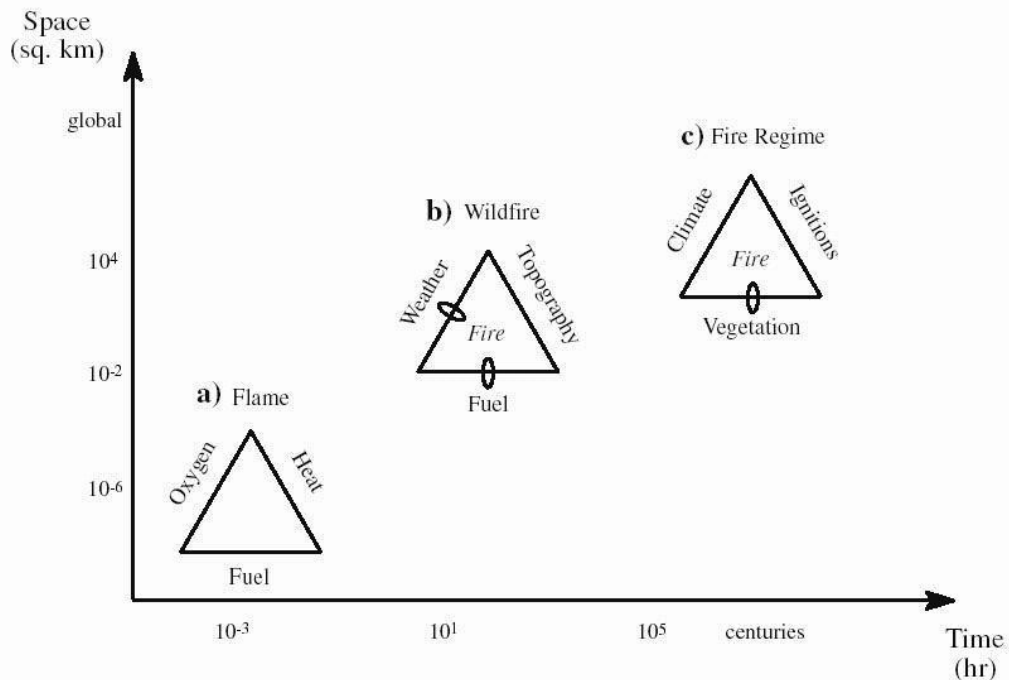


# Física e Química da Combustão de Vegetação





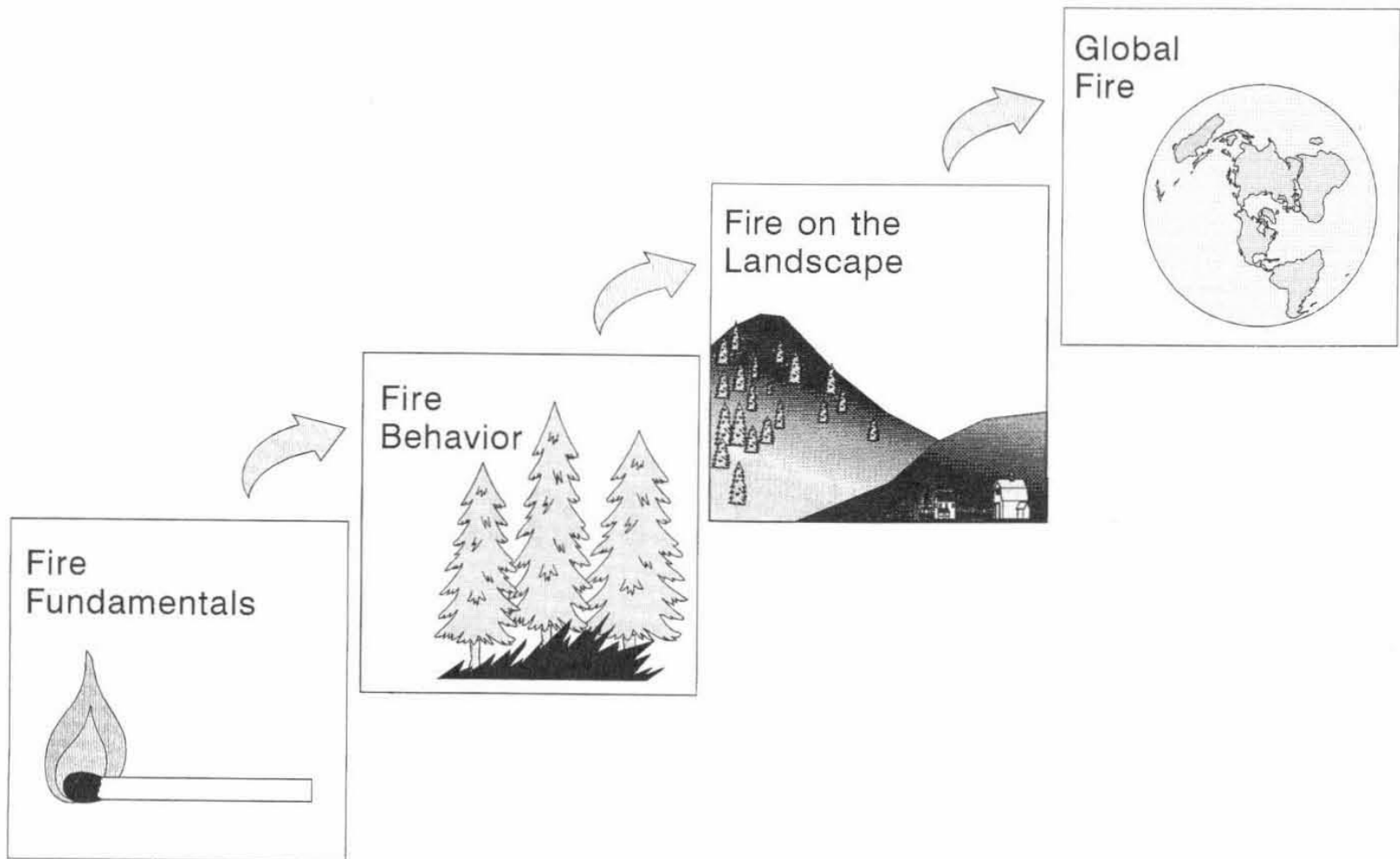
**Triângulos do fogo:** factores fundamentais em interacção.

Variam com a escala de espaço e de tempo considerada.

Triângulos:

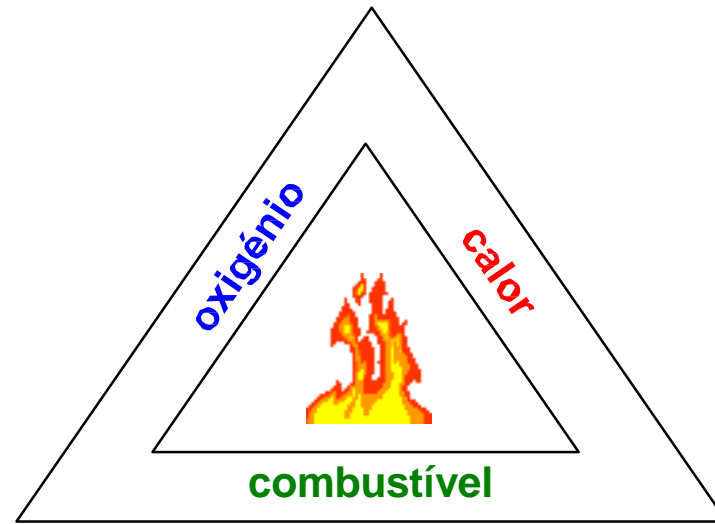
- **Combustão**
- **Comportamento do fogo**
- **Regime do fogo**

0 Representam retroacções. Ex: a vegetação influencia o fogo, mas o fogo também influencia a vegetação.



**Figure 1.1.** Expanding view of wildland fire. The dominating influence factors change with the scale.

## Triângulo da chama ou da combustão



- Reacção de combustão: combustível combina-se com comburente ( $O_2$ ), originando produtos.
- A reacção de combustão é exotérmica, mas necessita de energia de activação para se iniciar.
- O triângulo da chama representa a necessidade de coexistência dos três factores.

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

- São as propriedades dos tecidos das plantas que afectam o comportamento do fogo durante a reacção de combustão:
  - Composição química
  - Densidade
  - Condutividade térmica
  - Calor específico
  - Calor de combustão / Poder calorífico

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Composição química

- Tecidos vegetais: constituídos por polímeros com cerca de 50% C, 44% O e 5% H (% da massa).

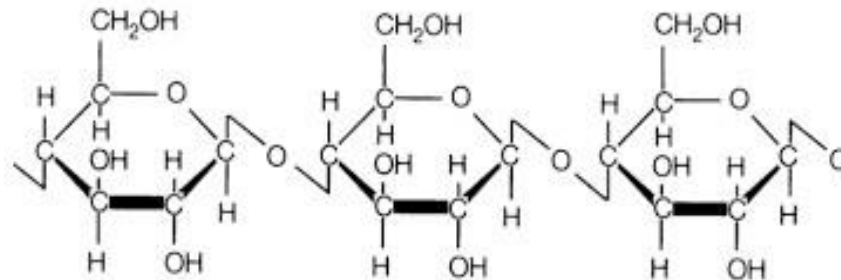
As moléculas mais importantes são:

- Celulose
- Hemicelulose
- Lenhina
- Terpenos e resinas (são componentes dos óleos essenciais; mais abundantes nas resinosas)
- Minerais

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

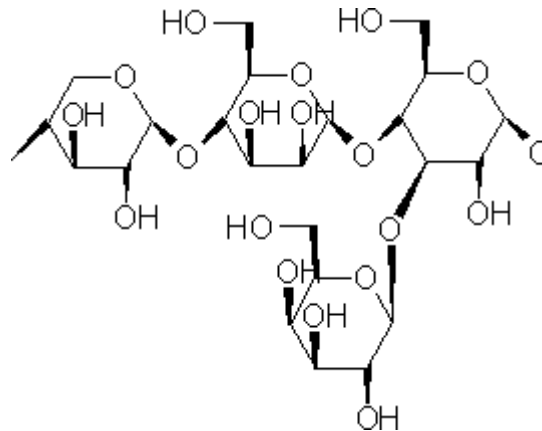
## Celulose

- Principal polissacárido estrutural das plantas (componente principal das paredes celulares vegetais, onde também se encontra a hemiceluloses e a lenhina.)
- Hidrato de C de cadeias lineares longas de  $\beta$ -D-glucose ( $C_6 H_{10} O_5$ )<sub>n</sub>.
- Massa molecular de 300.000 - 500.000 g.mol<sup>-1</sup>.
- Calor de combustão de 16.000 kJ.kg<sup>-1</sup>.
- Constitui  $\approx$  50% da massa dos combustíveis vegetais.



## Hemicelulose

- Hidrato de C de cadeia mais curta, com igual calor de combustão.
- Constitui  $\approx 25\%$  da massa dos combustíveis vegetais.

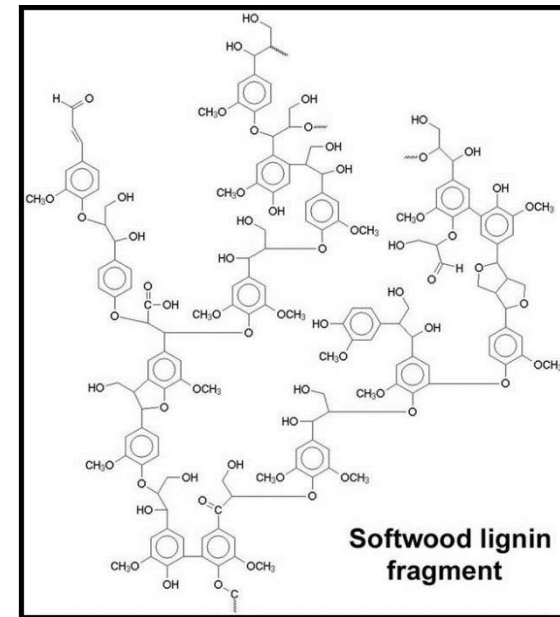




# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Lenhina

- Polímero aromático de cadeia ramificada.
- Confere a rigidez ao lenho.
- Tem calor de combustão de  $24.400 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Mais resistente à decomposição biológica, existe em > % nos combustíveis mortos.
- Constitui  $\approx 25\%$  da massa dos combustíveis vegetais.



# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

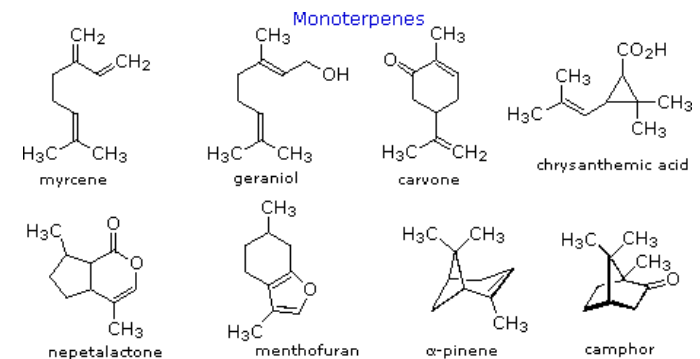
## Terpenos e Resinas

- Os terpenos são hidrocarbonetos polímeros do isopreno ( $C_5H_8$ )<sub>n</sub>:

- Volatilizam a temperaturas baixas.
- As folhas e ramos finos têm 0-2%, mas pode chegar aos 6% (*Cedrus*).

- As resinas são pouco voláteis e formadas por ácidos gordos, ácidos resínicos e fitoesteróis.

- O calor de combustão conjunto de terpenos e resinas é 32.200 kJ.kg<sup>-1</sup>, o dobro do da celulose.



# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Minerais ou cinzas

- Presentes em pequena quantidade mas influenciam a combustão.
- A madeira tem <2% de cinza. As folhas podem ter 5-10%. Halófitas (plantas que toleram grandes concentrações salinas no solo) podem ter até 40% (e.g. *Atriplex*: <https://flora-on.pt/#/1atriplex>, *Tamarix*: <https://flora-on.pt/#/1tamarix>).
- Catalizam a pirólise da celulose, favorecendo a formação de carvão, em detrimento da de voláteis.
- Plantas ricas em minerais ardem com mais dificuldade.

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Densidade

- A densidade dos combustíveis vegetais,  $\rho$ , varia com a humidade.
- A densidade relativa é adimensional (em relação à água).
- A massa volúmica ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) tem dimensões de massa / unid. volume.
- Considerando combustível seco,  $320 \text{ kg.m}^{-3} \leq \rho \leq 720 \text{ kg.m}^{-3}$ .
- Para efeitos de modelação do comportamento do fogo usa-se um valor intermédio, de  $512 \text{ kg.m}^{-3}$ .

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Condutividade térmica

- Representa-se por  $k$  e mede a capacidade duma substância para conduzir o calor.
- Tem valor igual ao quociente entre a densidade de fluxo térmico e o gradiente de temperatura.
- Aumenta com a densidade, humidade e temperatura.
- Tem valores 0,1 - 1,4  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  .

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Calor específico

- Representa-se por  $C_p$  e é a quantidade de energia necessária para elevar de 1 °C a temperatura de uma unidade de massa ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).
- Na madeira, depende da temperatura e da humidade.
- $C_p$  da madeira seca, a 27 °C, é de  $1,2632 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Calor de combustão / Poder calorífico

- É a quantidade de energia que se liberta durante a reacção de combustão, por unidade de massa ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ ). Representa-se por  $\Delta H_c$ .
- A determinação de  $\Delta H_c$  é imprática para materiais tão complexos como a madeira. A única forma de determinar o que calor que a combustão liberta é medi-lo experimentalmente.
- Nestas circunstâncias, fala-se de **poder calorífico**.

# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Poder calorífico

- Mede-se queimando uma amostra de combustível numa bomba calorimétrica adiabática (sistema que está isolado de quaisquer trocas de calor), que recolhe numa massa de água o calor libertado. A elevação de temperatura da massa de água quantifica o calor libertado ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ ).
- Este poder calorífico contabiliza o calor libertado por condensação do vapor nas paredes da bomba e designa-se por **poder calorífico superior**  $(\text{PCS})_0$ .



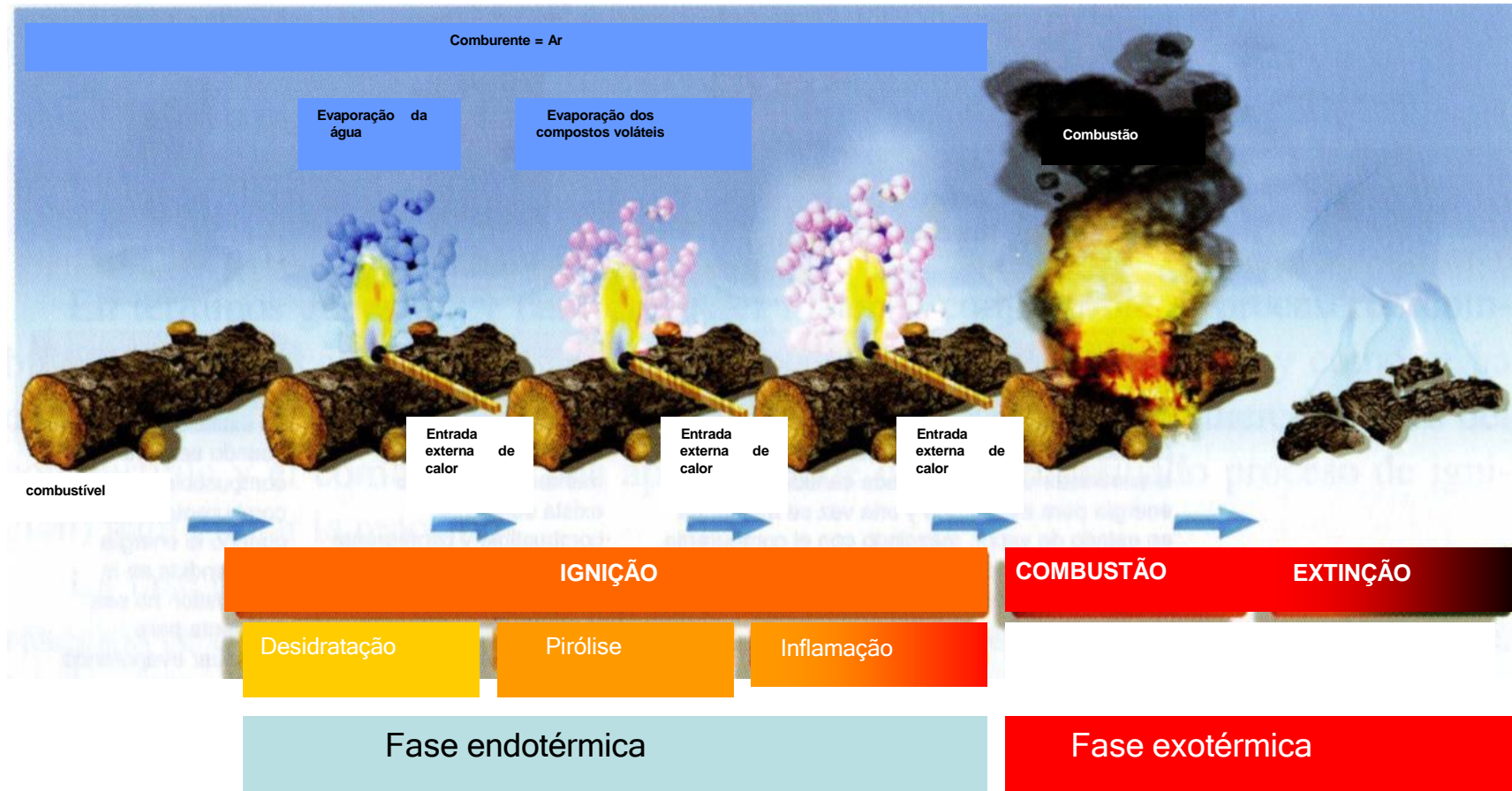
# Propriedades intrínsecas dos combustíveis

## Poder calorífico

- Num incêndio florestal, este calor seria perdido para a atmosfera, resultando no **poder calorífico inferior**  $(PCI)_0$ .
- O  $(PCI)_0$  da madeira é de  $18.810 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

Componente	$(PCI)_0$
Resina+voláteis	35.530 - 41.800
Lenhina	25.500 - 25.916
Celulose	17.347 - 18.183
Minerais	-

# Fases da combustão



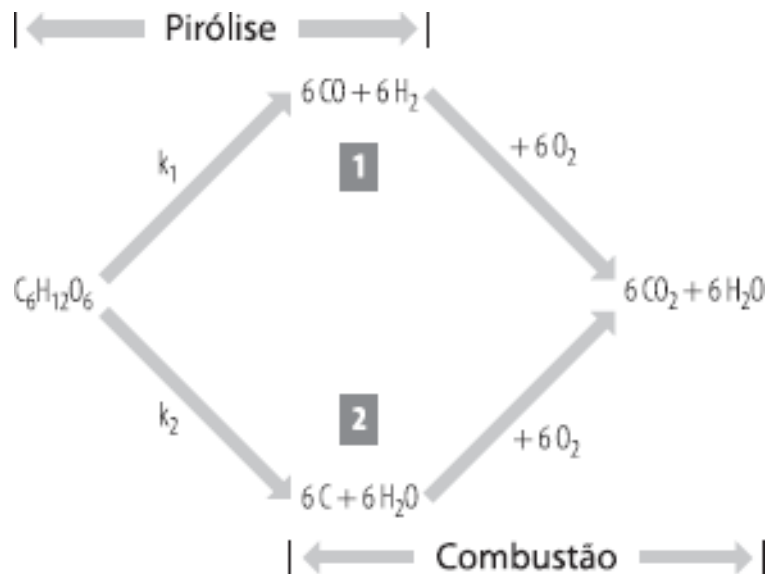
# Fases da combustão

- Ignição
  - Desidratação:
    - O aquecimento inicial evapora compostos com baixo ponto de vaporização, como resinas, terpenos e ceras (plantas secretam ceras como uma forma de controlar a evaporação e a hidratação). Ocorre à temperatura ambiente num dia quente, daí o cheiro característico das florestas.
  - A evaporação da humidade do combustível dá-se a 100°C.

# Fases da combustão

- Ignição
  - Pirólise
    - Após a desidratação, a temperatura do combustível ultrapassa os 100°C e continua a elevar-se.
    - A **pirólise** é a degradação, por via térmica, das moléculas ou polímeros, antes da combustão.
    - A pirólise de combustíveis vegetais produz voláteis, alcatrões, resíduo carbonoso e cinza mineral.
    - A pirólise da celulose faz-se segundo **duas vias alternativas**:
      1. Produção de voláteis e alcatrão, a temperaturas mais altas.
      2. Produção de carvão e água, a temperaturas relativamente mais baixas.

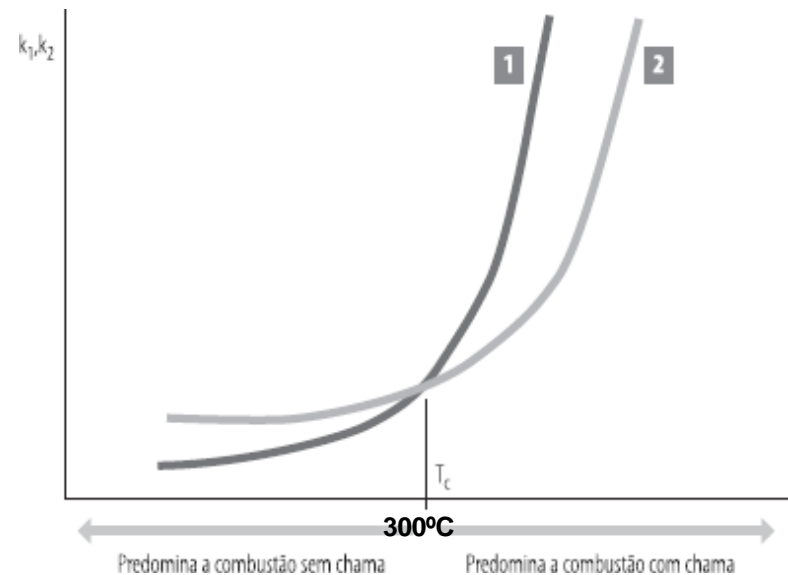
- Fases da combustão



- Os **produtos finais** da combustão **completa** são os mesmos em ambos os casos:  **$CO_2$**  e  **$H_2O$** .

- A **via 1** liberta  $CO$  e  $H_2$ , **gases inflamáveis** que reagem com o  $O_2$ , produzindo combustão com **chama**, em **fase gasosa**.

- A **via 2** queima carbono sólido, com o  $O_2$  a difundir-se até à superfície do combustível. É, essencialmente, uma **desidratação** e produz combustão **sem chama**, em **fase sólida**.



- Fases da combustão

## Pirólise

- **Taxa de conversão do combustível:**

$$dM / dt = - (k_1 + k_2) M$$

- M é a massa de combustível e  $k_1 + k_2$  constantes da reacção, dadas por expressões de Arrhenius do tipo:

$$k = B e^{-E_b / RT}$$

- B é o factor pré-exponencial,  $E_b$  a **energia de activação**, R a constante universal dos gases e T a temperatura absoluta (K).

- Como as energias de activação, barreiras energéticas que os reagentes têm de ultrapassar para se converter em produtos, são diferentes ( $E_{b1} \neq E_{b2}$ ), predominam diferentes reacções a diferentes temperaturas.

- Fases da combustão

## Ignição

- Uma partícula de combustível que recebe calor pode responder de 3 formas:
  - **não ignição**: a partícula não chega a inflamar-se, porque a duração do aquecimento é curta ou a intensidade é baixa.
  - **ignição transiente**: ocorre combustão, mas apenas enquanto se mantém a fonte de calor. Muito comum nos fogos florestais.
  - **ignição persistente**: a combustão inicia-se e continua, mesmo sem a fonte de calor inicial - combustão auto-sustentada.

- Fases da combustão  
Ignição

- A velocidade e o sucesso da ignição dependem de **propriedades da partícula** de combustível e de **características da fonte de calor**.
- Propriedades da partícula de combustível
  - razão superfície / volume elevada, i.e. combustível fino, favorece aquecimento rápido.
  - riqueza em extractivos voláteis, induz temperatura de ignição mais baixa.
- Características da fonte de calor
  - modo de transferência: condução, convecção ou radiação.
  - potência calorífica transmitida (energia / unid. tempo).
  - duração do aquecimento.



- Fases da combustão

## Combustão

A energia contida no combustível provém da energia solar, via fotossíntese.



- A reacção de combustão da fitomassa é a reacção inversa da fotossíntese e liberta a energia das ligações químicas do combustível.

- Fases da combustão

## Combustão

- A combustão é uma reacção química **auto-sustentada** e **exotérmica**, que pode ocorrer com ou sem a presença de chama.
- A combustão sem chama pode ser **lenta** (*smoldering*) ou **incandescente** (*glowing*).
- A combustão com chama domina na fase inicial do processo. Os combustíveis finos fornecem os voláteis para sustentar as reacções rápidas de oxidação no ambiente da chama.
- Quando se começa a formar carvão à superfície dos combustíveis sólidos, a pirólise já não produz gases inflamáveis em quantidade suficiente para manter a chama.
- Para que o processo continue, o oxigénio tem que se difundir até à superfície do combustível e a combustão passa a ocorrer em fase sólida, sem chama.

- Fases da combustão

## Combustão

- As chamas são uma mistura de gases em combustão e de partículas incandescentes.
- As chamas típicas dos fogos florestais designam-se por **chamas de difusão**, porque os gases combustíveis e o comburente estão, inicialmente, separados e a combustão ocorre na zona em que se misturam.
- O aparecimento de chamas exige que a mistura de ar e gases inflamáveis aqueça até aos 425°C - 480°C.
- A temperatura de chama típica dos incêndios florestais é de 700°C - 1000°C, podendo excepcionalmente, chegar aos 1600°C.
- De modo geral, uma chama vermelha é relativamente fria. À medida, que a sua temperatura aumenta a cor torna-se laranja, amarela, branca, violeta e azul.

- Fases da combustão

- A **combustão lenta** não produz chama e ocorre a relativamente baixa temperatura.
- É exclusiva de materiais porosos (para facilitar a entrada de ar) que formam carvão sólido quando aquecidos. Isto inclui a generalidade dos combustíveis florestais.
- A **combustão incandescente** está associada à oxidação superficial do carvão. A única diferença para a combustão lenta é que, neste caso, não há decomposição térmica do combustível, porque os voláteis já desapareceram antes do início da combustão.
- Normalmente, depois da combustão com chama, sobra um resíduo rico em carbono e sem voláteis, que continua a arder, apesar da chama se ter apagado.

- Fases da combustão

- A **eficiência da combustão** mede a capacidade oxidativa global para a queima de combustível, para um dado tipo de material e condições meteorológicas.
- Define-se como a razão entre a massa de C libertada sob a forma de  $\text{CO}_2$  e a massa de C no combustível original, porque quando a combustão é completa todo o C é oxidado a  $\text{CO}_2$ .
- Varia entre 0.98 na combustão com chama de erva completamente seca, sem combustão lenta, até 0.75 para combustão lenta de folhada semi-decomposta.
- Também se usa o conceito de **eficiência de combustão modificada**, mais fácil de medir na prática e dado por:

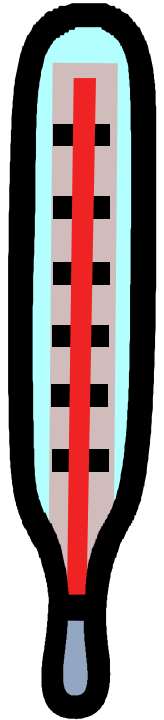
$$\Delta\text{CO}_2 / (\Delta\text{CO}_2 + \Delta\text{CO}) ,$$

em que CO é o monóxido de carbono.

## • Extinção

- Quando as disponibilidades de combustível,  $O_2$  ou energia decrescem abaixo de certo limiar, o fogo extingue-se.
- A extinção do fogo é um processo lento. A energia no combustível vai diminuindo e a sua temperatura vai descendo sucessivamente abaixo dos valores típicos da combustão sem chama, da ignição transiente, e da temperatura requerida para a pirólise e desidratação.
- Todas as técnicas de extinção do fogo assentam na remoção de pelo menos um dos lados do triângulo da combustão:
  - remover o combustível, com um aceiro ou corta-fogo.
  - remover o  $O_2$ , p.ex. lançando terra sobre o material em combustão.
  - arrefecer a zona de reacção, usando água.
  - interferir com os processos moleculares das reacções em cadeia, usando retardantes químicos.

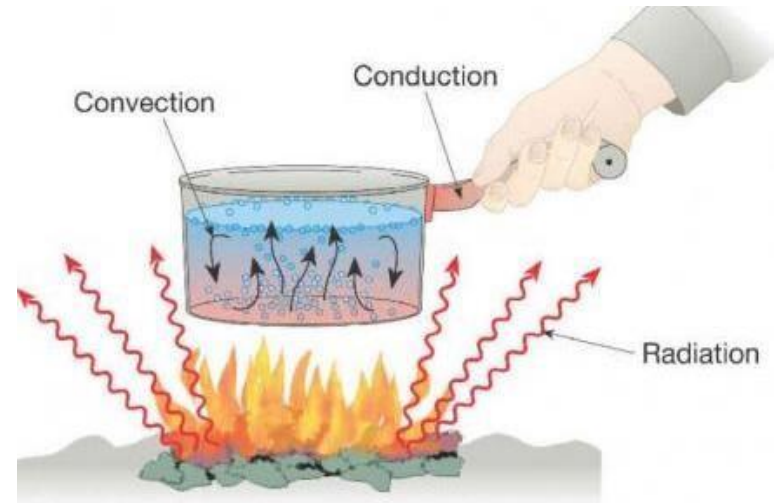
- Estágios térmicos de uma partícula de combustível.
  - $<100^{\circ}\text{C}$ : vaporização de resinas, terpenos, ceras
  - $100^{\circ}\text{C}$ : desidratação = vaporização da humidade do combustível
  - $200^{\circ}\text{C}$  -  $260^{\circ}\text{C}$ : pirólise da hemicelulose
  - $240^{\circ}\text{C}$  -  $350^{\circ}\text{C}$ : pirólise da celulose
  - $280^{\circ}\text{C}$  -  $500^{\circ}\text{C}$ : pirólise da lenhina
  - $350^{\circ}\text{C}$  -  $600^{\circ}\text{C}$ : inflamação dos gases resultantes da pirólise



- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação
  - O **calor** é energia em trânsito, devido a uma diferença de temperatura. A **transferência de calor** é o processo ou mecanismo pelo qual a energia é deslocada.

- Os três **mecanismos** físicos de transferência de calor são:

- Condução
- Convecção
- Radiação



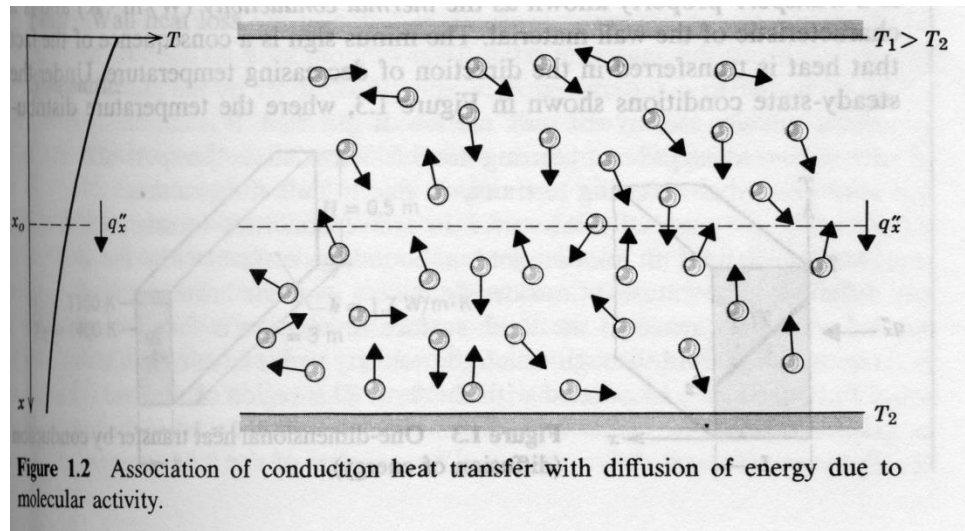
- Nos fogos florestais, o mecanismo dominante depende da estrutura e disposição do combustível, da velocidade do vento que sopra sobre o fogo, do declive do terreno, e da direcção de propagação do fogo, relativamente ao vento e ao declive.



- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Condução

- É a transferência de calor entre partes de uma substância, por via da actividade molecular, sem que haja movimentação ou deslocação da substância, como um todo.
- A transferência líquida de energia devida à actividade molecular aleatória designa-se por **difusão** de calor.



- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Condução

- A **lei de Fourier** descreve a transferência de calor por condução.

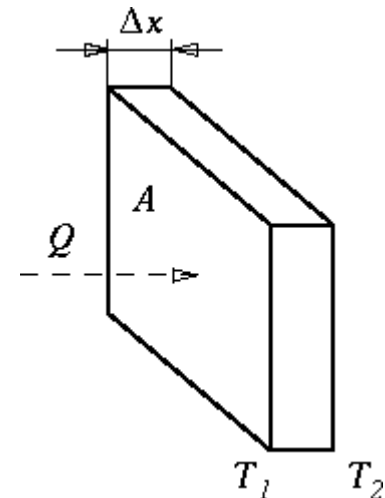
$$\frac{Q}{t} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

$\frac{Q}{t}$  - **fluxo de calor**, a taxa de transferência de calor na direcção x, por unidade de área normal à direcção de transferência ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$\frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$  - gradiente de temperatura ( $\text{K.m}^{-1}$ )

k - condutividade térmica ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

A - área ( $\text{m}^2$ )



- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Condução

- A taxa de transferência de calor para um objecto é igual à condutividade térmica do material de que o objecto é feito, multiplicada pela área da superfície em contacto com a fonte de calor, multiplicada pela diferença de temperatura entre os dois lados do objecto, dividida pela espessura do material.

$$\frac{Q}{t} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

### Condução

- A condução é importante porque transfere calor da superfície para o interior dos combustíveis florestais e também da superfície do solo para as camadas mais profundas.
- A condutividade térmica dos combustíveis florestais aumenta com a densidade do combustível, tal como a capacidade calorífica. Por isso, combustíveis mais densos precisam de mais calor para atingir a ignição do que combustíveis menos densos.
- O calor é conduzido mais rapidamente para o interior do combustível, reduzindo o aumento de temperatura à superfície.
- A madeira em decomposição conduz mal o calor e tem baixa capacidade calorífica, pelo que facilmente entra em ignição.

- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Convecção

- É a transferência de calor através do movimento de massa de um gás ou líquido. É o mecanismo dominante em fluidos e gases.
- Distinguem-se dois tipos de convecção, de acordo com a natureza do fluxo: natural e forçada.
  - Natural: o fluido move-se devido à impulsão, resultante da diferença de massa específica em relação ao fluido envolvente, a qual resulta numa diferença de temperatura.
  - Forçada: o fluxo é causado por meios externos, por exemplo o vento.

- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Convecção

- É descrita pela **lei de Newton**:

$$\frac{Q}{t} = h(T_s - T_\infty)$$

$Q/t$  - fluxo convectivo de calor ( $\text{W.m}^{-2}$ ).

$T_s$  - temperatura da superfície.

$T_\infty$  - temperatura do fluido.

$h$  - constante de proporcionalidade, designada por coeficiente de transferência convectiva de calor ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}$ ).

- **h** depende de condições na camada-limite, influenciadas pela geometria da superfície, a natureza do movimento do fluido e por várias propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

### Convecção

- As correntes de convecção são as principais responsáveis pelo pré-aquecimento dos estratos mais elevados de vegetação arbustiva e herbácea.
- A convecção forçada (vento) aumenta o afluxo de  $O_2$  à zona de combustão e provoca a inclinação das chamas sobre o combustível não-inflamado, promovendo o seu pré-aquecimento.
- O vento transporta os produtos quentes da combustão, transferindo energia térmica para a vegetação “a jusante” da frente de chamas, secando-os e facilitando a sua ignição.

- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Radiação

- A radiação térmica é energia emitida pela matéria devido a alterações nas configurações electrónicas dos átomos e moléculas suas constituintes.
- A energia do campo de radiação é transportada por ondas electromagnéticas ou fótons e não requer a presença de um meio material para se propagar, podendo fazê-lo no vazio.
- O fluxo máximo ao qual a radiação pode ser emitida por uma superfície é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\frac{Q}{t} = \sigma T_s^4$$

$Q/t$  - fluxo máximo ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ )

$T$  - temperatura absoluta (K)



- Mecanismos de transmissão do calor em fogos de vegetação

## Radiação

- Uma superfície capaz de radiar o fluxo máximo chama-se **corpo negro**. O fluxo emitido por superfícies reais é menor que o de um corpo negro e é dado por:

$$\frac{Q}{t} = \varepsilon \sigma T_s^4$$

- $\varepsilon$  varia entre 0 e 1 e é uma propriedade radiativa da superfície, chamada **emissividade**. Indica o grau de eficiência com que uma superfície radia, relativamente a um corpo negro.
- Se a radiação incidir sobre uma superfície, a taxa à qual a energia é absorvida, por unidade de área, calcula-se conhecendo a **absorvidade**,  $\alpha$ :

$$\frac{Q}{t_{abs}} = \alpha \frac{Q}{t_{inc}}$$