Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 26

Aula 26: Energia da Biomassa

TÓPICOS

1. *Introdução e a biomassa em Moçambique*
2. *Biomassa sólida, gasosa e líquida; tipos de biomassa*
3. *Ciclo do carbono*
4. *Tecnologias de conversão: pirólise, gaseificação, digestão anaeróbia, fermentação e transesterificação*
5. *Fontes alternativas e tecnologias emergentes*
6. *Eficiência dos sistemas e formulário*
7. *Cadeia de valor e estudos de caso*
8. *Vantagens e desvantagens*

26.1 – INTRODUÇÃO

Biomassa: toda a matéria orgânica de origem vegetal ou animal, excluindo os combustíveis fósseis – colheitas agrícolas e florestais, resíduos animais, massa microbiana e resíduos orgânicos renováveis anualmente (Hiler & Stout, 1985).

Do ponto de vista energético, a biomassa é **energia solar armazenada** pela fotossíntese:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + luz \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Pode ser usada directamente (combustão) ou convertida em combustíveis sólidos (carvão), líquidos (etanol, biodiesel, bio-óleo) ou gasosos (biogás, gás de síntese).

26.1 – INTRODUÇÃO

- A lenha foi a primeira fonte de energia da humanidade e ainda é a principal em grande parte de África.
- O interesse pela biomassa moderna cresceu no fim do séc. XX com a procura de alternativas aos combustíveis fósseis e com a preocupação com as alterações climáticas.
- **Origem vegetal:** madeira, resíduos agrícolas e florestais, culturas energéticas.
- **Origem animal:** estrume e dejectos de pecuária.
- **Resíduos:** fracção orgânica dos resíduos urbanos e industriais, lamas de ETAR.

26.1 – INTRODUÇÃO

- A biomassa é **renovável apenas se for gerida de forma sustentável**: a taxa de colheita não pode exceder a de regeneração. Com desmatamento, esgota-se.
- A combustão liberta **calor**, que é usado directamente (cozinha, secagem, processos) ou para produzir **vapor e electricidade**.
- O impacto ambiental depende da tecnologia: a queima tradicional em fogões abertos emite partículas e CO com efeitos graves na saúde; as centrais modernas, com controlo da combustão e filtros, emitem muito menos.

26.1 – A BIOMASSA EM MOÇAMBIQUE

- **Mais de 80%** dos agregados familiares cozinham com lenha ou carvão vegetal (Falcão, 2013).
- Nas zonas rurais, usa-se sobretudo lenha; nas cidades (Maputo, Beira, Nampula), predomina o **carvão vegetal**, produzido em fornos de terra de baixo rendimento.
- A produção de carvão para as cidades é uma das principais causas de desmatamento à volta dos centros urbanos.
- Potencial identificado para electricidade: **> 2 GW** (resíduos florestais, açucareiras, pasta de papel e RSU – ver 26.12).
- Medidas-chave: fornos de carbonização melhorados, fogões melhorados, plantações energéticas e cogeração industrial.

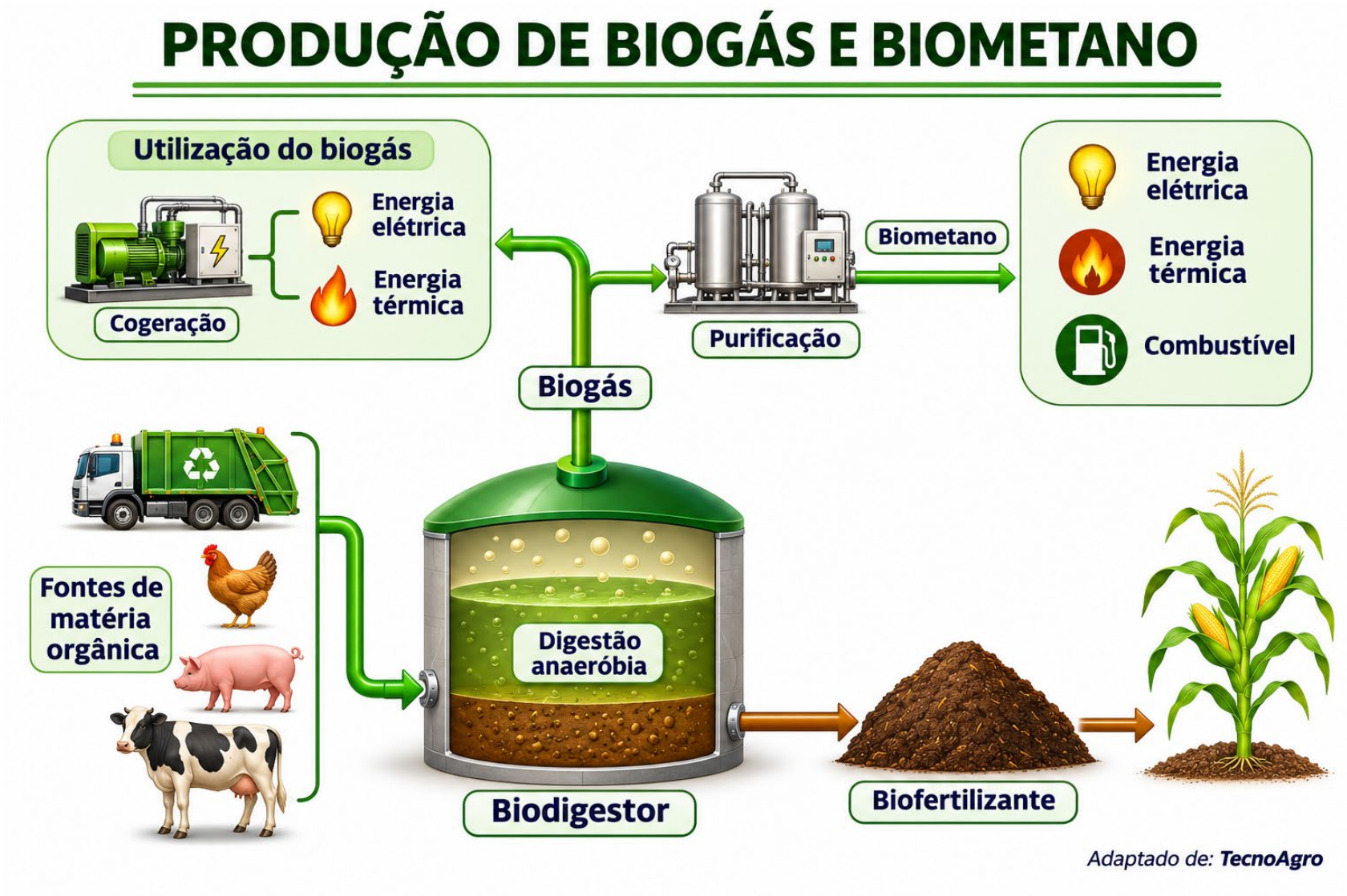
26.2 – A BIOMASSA SÓLIDA

- **Fontes:** produtos e resíduos agrícolas, resíduos florestais e da indústria da madeira, e a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.
- **Cadeia:** recolha → transporte → preparação (secagem, trituração) → conversão por **combustão directa** ou **gaseificação**.
- A **humidade** é a propriedade mais importante: a lenha verde tem 40–60% de água, o que reduz significativamente o poder calorífico útil (ver 26.10).
- Os resíduos florestais são transformados em **estilha** (lascas) ou **pellets/briquetes** para aumentar a densidade e reduzir o custo de transporte.
- **Centrais térmicas** (grelha ou leito fluidizado): produção de electricidade.
- **Cogeração (CHP):** electricidade + calor ou vapor de processo.
- **Uso directo: fornos, lareiras e fogões para aquecimento**.

26.3 – A BIOMASSA GASOSA

- **Biogás:** resulta da degradação anaeróbia de efluentes agro-pecuários, da agro-indústria, lamas de ETAR e aterros sanitários.
- **Composição:** 50–70% metano (CH_4,) 30–45% dióxido de carbono (CO_2), e vestígios de sulfureto de hidrogénio (H_2S), amoníaco (NH_3) e vapor de água.
- **PCI:** CH_4 puro ≈ 35,8 MJ/Nm^3; biogás com 60% CH_4 ≈ 21,5 MJ/Nm^3 (≈ 6 kWh/Nm^3).
- **Usos:** cozinha, motores-geradores, cogeração; depois de purificado (remoção de CO_2 e H_2S) dá **biometano**, equivalente ao gás natural.

26.3 – A BIOMASSA GASOSA



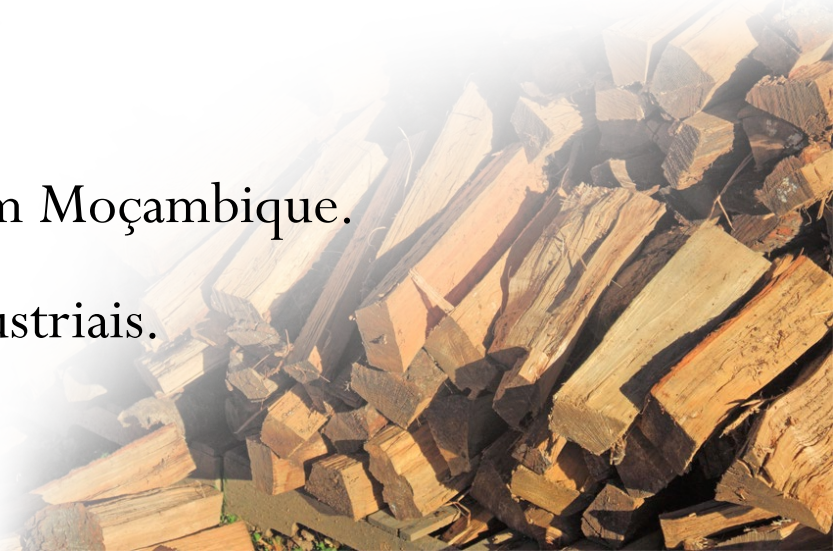
26.4 – A BIOMASSA LÍQUIDA

- **Biomassa líquida (bio-óleo):** produto altamente oxigenado obtido por **pirólise rápida** de resíduos florestais, bagaço de cana, cascas de cereais, etc.
- Pode ser armazenada, bombeada e transportada como os derivados do petróleo; queima-se em caldeiras, turbinas e motores do ciclo Diesel adaptados.
- **Biocombustíveis: etanol (fermentação de açúcares) e biodiesel (transesterificação de óleos), obtidos a partir** de culturas energéticas e utilizados em motores.

26.5 – TIPOS DE BIOMASSA

Lenha

- Principal energia doméstica em Moçambique.
- Lareiras, fornos, caldeiras industriais.
- Baixo custo.
- Países em desenvolvimento.



Carvão Vegetal

- Queima da madeira.



26.5 – TIPOS DE BIOMASSA

Óleos Vegetais

- Rícino, soja, coco, milho.
- Uso em motores e produção de biodiesel.
- Desenvolvimento sustentável.



Cana-de-Açúcar

- Cultura importante em Moçambique.
- Bagaço: ≈ 280 kg por tonelada de cana.



© Onur Ersin | Dreamstime.com

26.5 – TIPOS DE BIOMASSA

Resíduos Rurais

- Oriundos das actividades produtivas no sector rural.
- Resultantes da colheita, resíduos florestais e pecuários.



Resíduos Urbanos

- Resíduos domiciliares.
- Resíduos de limpeza urbana.
- Aterros sanitários.
- Alto teor de matéria orgânica.



Fonte: www.abolsamia.pt

© Photomyeye | Dreamstime.com

26.6 – CICLO DO CARBONO

O CO_2 libertado na combustão é o **mesmo** que a planta absorveu durante o crescimento – desde que seja reposta a mesma quantidade.

Por isso, a biomassa sustentável é considerada **neutra em carbono** ao longo de seu ciclo de vida (excepto as emissões de colheita, transporte e processamento).

Se a floresta **não** for reposta após o desmatamento, o CO_2 emitido é líquido e contribui para o aquecimento global.

Por 1 kg de biomassa seca (≈ 50% C) emitem-se ≈ 1,8 kg de CO_2:

$$m_{CO2} = m \cdot C \cdot 44/12$$

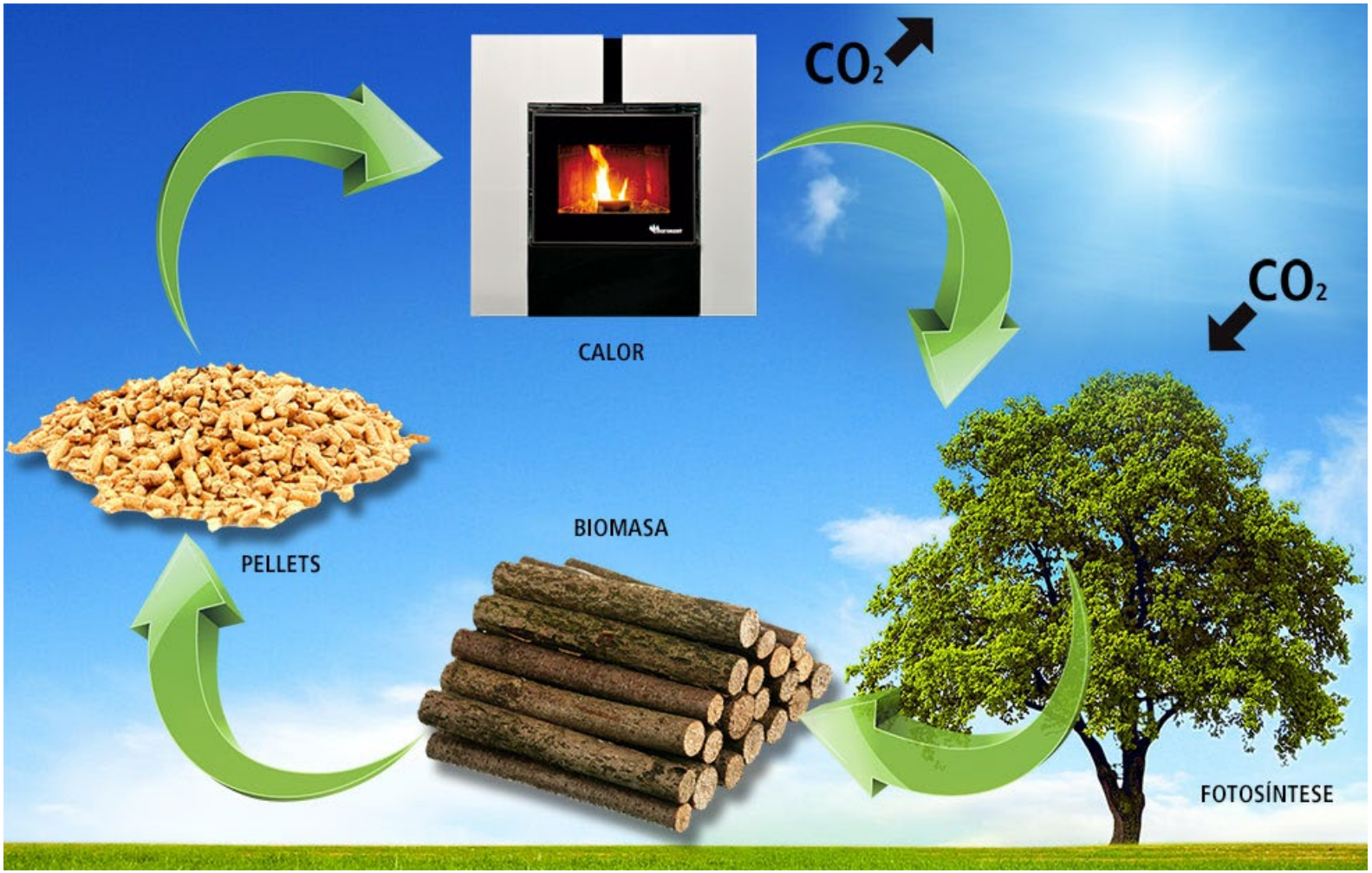
Onde:

m – massa de biomassa seca (kg);

C – fracção mássica de carbono (≈ 0,5);

44/12 – razão das massas molares CO_2/C.

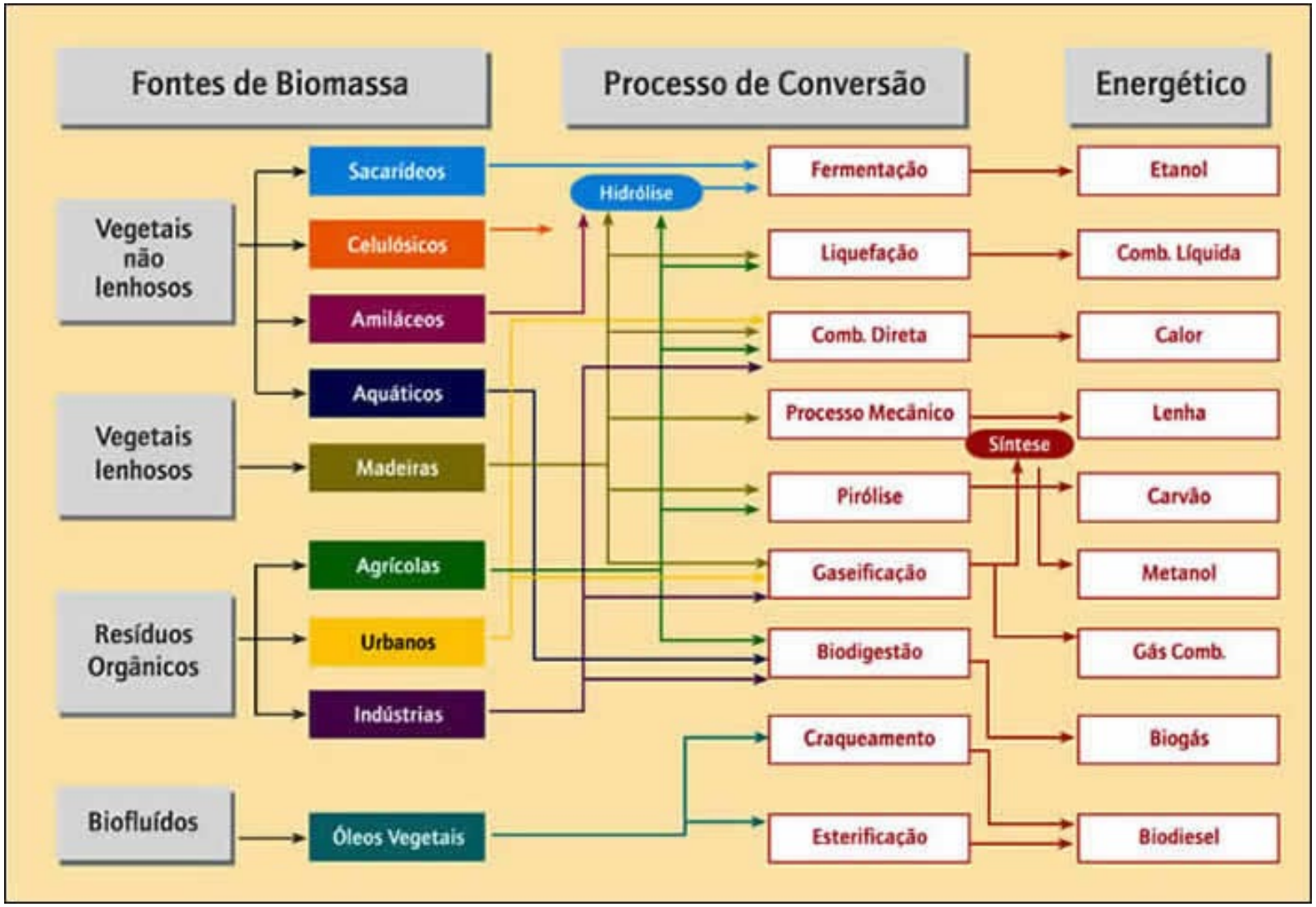
26.6 – CICLO DO CARBONO



26.7 – TECNOLOGIAS DO USO DA BIOMASSA

- **Biomassa tradicional:** combustão directa de lenha, carvão, resíduos agrícolas e animais em fogões abertos – cozinha, secagem, produção de carvão. Eficiência 5–15%.
- **Biomassa "aperfeiçoada":** combustão mais eficiente – fogões melhorados, briquetes e aglomerados, fornos industriais. Eficiência 20–35%.
- **Biomassa moderna:** conversão avançada em electricidade, calor de processo e biocombustíveis (centrais, cogeração, biogás, etanol, biodiesel).

26.7 – TECNOLOGIAS DO USO DA BIOMASSA



26.7.1 – TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO

Combustão directa para obtenção de calor e vapor:

- Fogões (cocção de alimentos).
- Fornos (metalurgia).
- Caldeiras.
- Geração de vapor - energia eléctrica.

Pirólise ou carbonização

- Aquecimento sem oxigénio (300–500 °C).
- Formação do carvão vegetal.

26.7.1 – TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO

Gaseificação

- Reacções termoquímicas que envolvem vapor quente e oxigénio.
- Combustível sólido transformado em gás.
- Motores de combustão interna e turbinas para geração de electricidade.

Digestão anaeróbia

- Decomposição por bactérias na ausência de O_2.
- Tratamento de dejectos orgânicos.
- Biogás – CH_4 e CO_2.

26.7.1 – TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO

Fermentação

- Agroindústria.
- Transformação de açúcar em álcool.
- Acção de microrganismos.
- Etanol.

Transesterificação

- Reacção para formar biodiesel.
- Óleos vegetais (babaçu, amendoim, soja e rícino).
- Óleo animal (sebo bovino).

26.7.2 – PIRÓLISE

- **Pirólise:** decomposição térmica da biomassa **na ausência de oxigénio**.

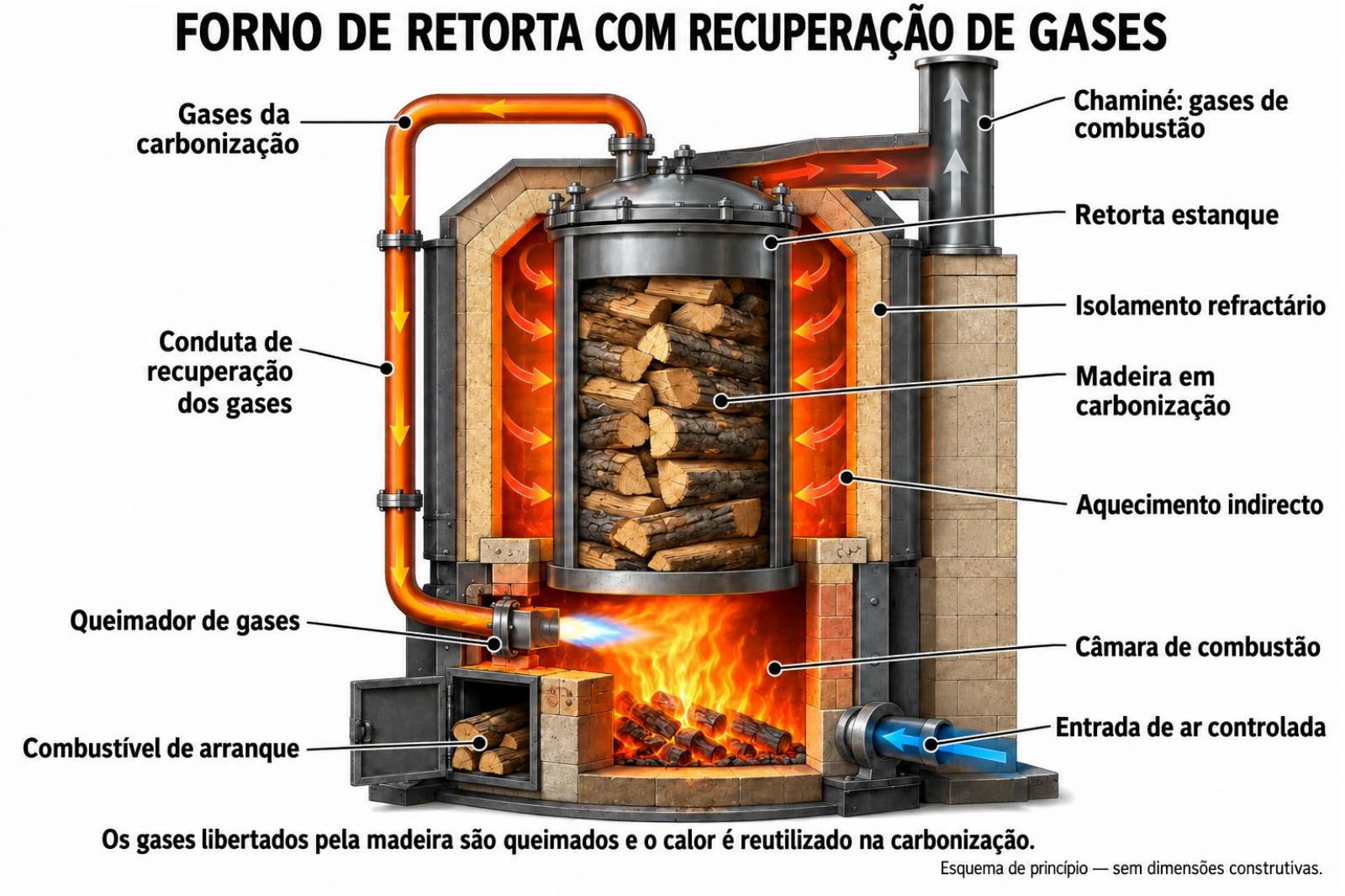
  Dá três produtos: **carvão** (sólido), **bio-óleo** (líquido) e **gás**.

- A proporção depende da temperatura e da velocidade de aquecimento:
  - **Lenta** (carbonização), 300–500 °C, horas: máximo de carvão (≈ 30 – 35%).
  - **Rápida**, ≈ 500 °C, segundos: máximo de bio-óleo (até ≈ 75%).
  - Acima de ≈ 700 °C predomina o gás e o processo aproxima-se da gaseificação.

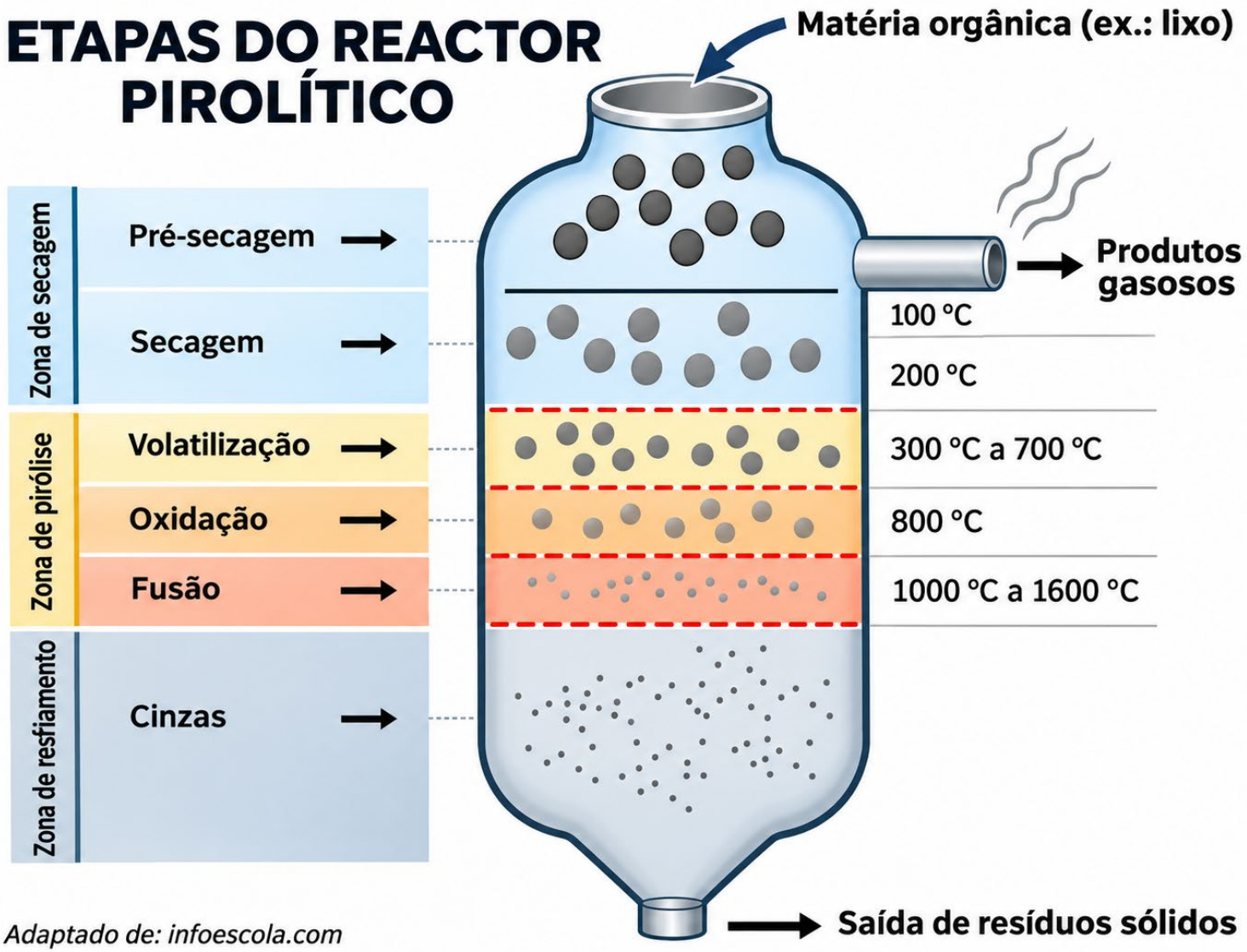
26.7.2 – PIRÓLISE

- O calor necessário pode vir de fora (aquecimento indirecto) ou da **queima de parte do gás e do bio-óleo** produzidos.
- Num forno de carvão tradicional, entra ar: parte da lenha **queima** para fornecer calor – daí o baixo rendimento (10–20% de carvão).
- Fornos melhorados (retortas) recuperam os gases e atingem 25–35%.
- Vantagens: produz um combustível sólido com PCI mais alto, bio-óleo armazenável e **biochar** (ver 26.9.3).

26.7.2 – PIRÓLISE



26.7.2 – PIRÓLISE



26.7.3 – GASEIFICAÇÃO

- **Gaseificação:** conversão termoquímica de um combustível sólido em um gás combustível por **oxidação parcial** com ar, O_2 ou vapor, em quantidade **inferior à estequiométrica** ($\lambda \approx 0{,}2–0{,}4$), a 700–1000 °C.
- O gás produzido (**gás pobre** ou **gás de síntese**) é usado em:
  - queimadores e caldeiras (calor);
  - motores de combustão interna e turbinas (electricidade);
  - síntese de metanol e combustíveis líquidos (Fischer-Tropsch).

26.7.3 – GASEIFICAÇÃO

Composição típica (gaseificação com ar): CO 15–25%, H_2 10–20%, CH_4 1–5%, CO_2 8–15%, N_2 45–55%, além de alcatrões e partículas.

Poder calorífico do gás:

$$PCI_{gás} = \Sigma\, y_i \cdot PCI_i \quad \text{(CO 12,6; } H_2 \text{ 10,8; } CH_4 \text{ 35,8 MJ/Nm}^3\text{)}$$

Eficiência de gás frio:

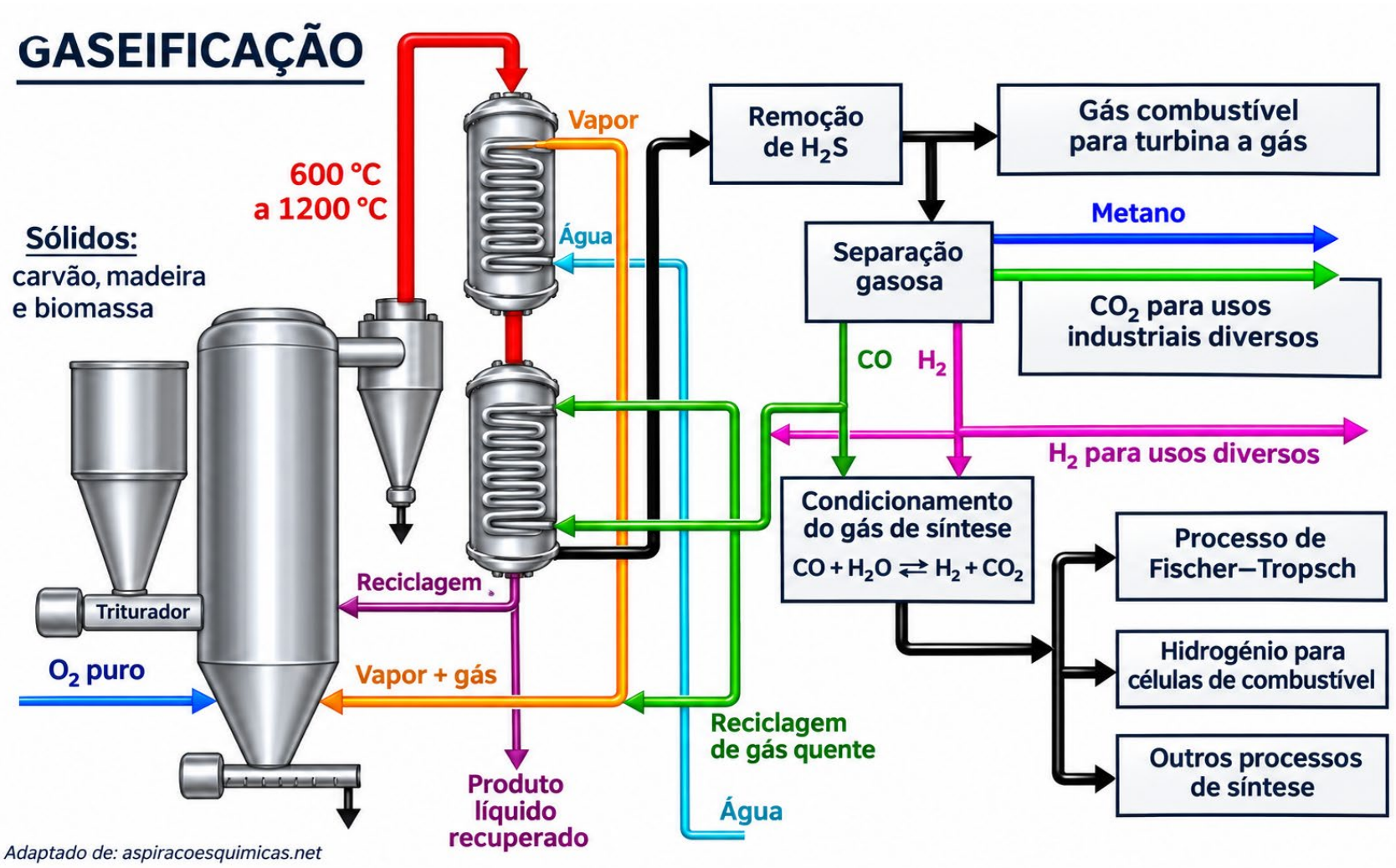
$$\eta_{gf} = \dot{V}_{gás} \cdot PCI_{gás} \,/\, (\dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}) \approx 70\text{–}80\%$$

Onde:

- y_i – fracção volúmica do gás i;
- $\dot{V}_{gás}$ – caudal de gás (Nm^3/s);
- $\dot{m}_{bio}$ – caudal de biomassa (kg/s);
- PCI_{bio} – PCI da biomassa (MJ/kg).

A composição depende da temperatura, da pressão, do tempo de residência, do agente (ar, O_2, vapor) e da biomassa (voláteis, carbono fixo, cinzas, humidade).

26.7.3 – GASEIFICAÇÃO



Adaptado de: aspiracoesquimicas.net

26.7.4 – DIGESTÃO ANAERÓBIA (I)

- **Digestão anaeróbia:** degradação biológica da matéria orgânica na **ausência de oxigénio**, por consórcios de bactérias, com produção de CH_4 e CO_2.
- Ficam na solução amónia, sulfuretos e fosfatos – o **digerido** é um bom fertilizante.
- **Quatro fases:** hidrólise → acidogénese → acetogénese → metanogénese.
- **Condições:** 30–40 °C (mesofílica) ou 50–55 °C (termofílica); pH 6,8–7,5; tempo de retenção hidráulica 20–40 dias.

26.7.4 – DIGESTÃO ANAERÓBIA (II)

- **Produção de metano:** $V_{CH4} = m_{SV} \cdot B_0$
- **Digestor:** $V_d = Q \cdot TRH$; $COV = m_{SV} / V_d$
- **Energia:** $E = V_{CH4} \cdot PCI_{CH4}$

Legenda

Símbolo	Significado	Unidade
V_{CH4}	Produção diária de metano	m^3/d
m_{SV}	Massa de sólidos voláteis alimentada por dia	kg SV/d
B_0	Produção específica de metano (bovino ≈ 0,2; suíno 0,3–0,45)	m^3 CH_4/kg SV
V_d	Volume útil do digestor	m^3
Q	Caudal diário de carga (estrume + água)	m^3/d
TRH	Tempo de retenção hidráulica (20–40)	d
COV	Carga orgânica volumétrica (1–4)	kg SV/(m^3·d)
E	Energia diária do metano	MJ/d
PCI_{CH4}	PCI do metano = 35,8 (≈ 10 kWh/m^3)	MJ/m^3

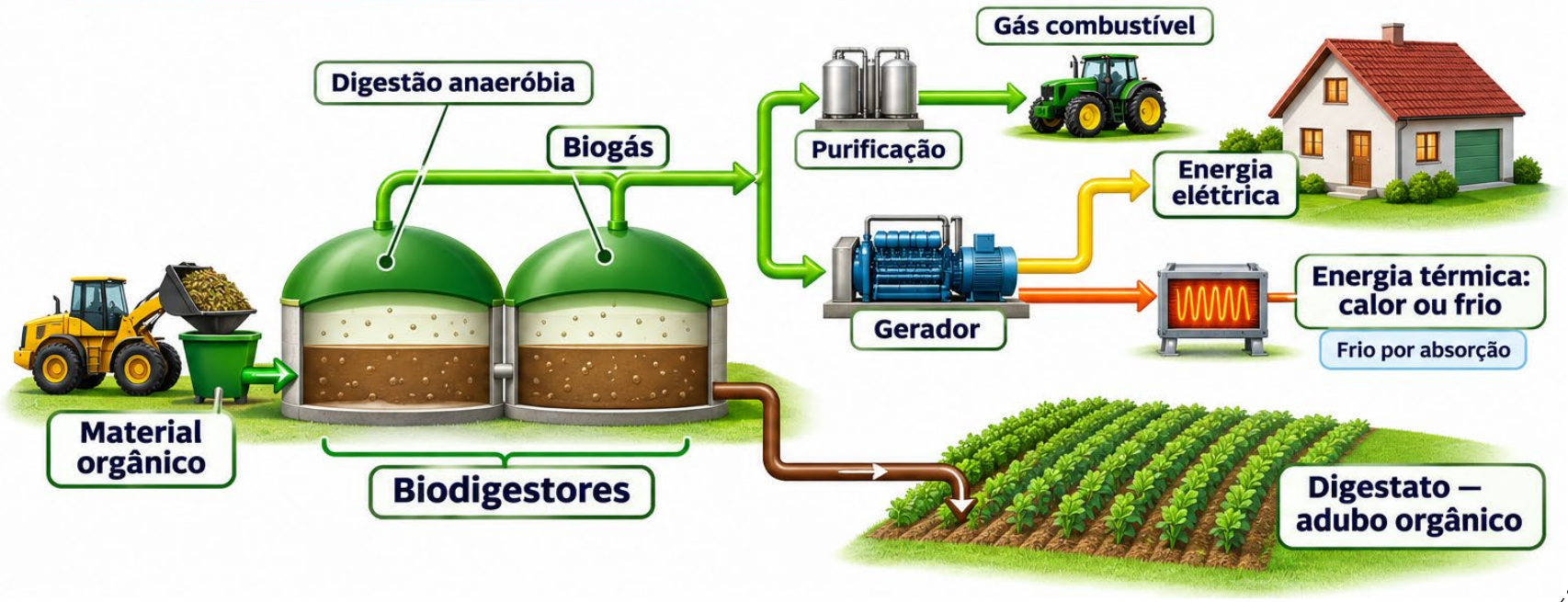
26.7.4 – DIGESTÃO ANAERÓBIA (III)

Princípio de funcionamento de um biodigestor



Matérias-primas orgãnicas

- Milho
- Resíduos sólidos orgânicos
- Soja
- Cana-de-açúcar
- Outros resíduos orgânicos



26.7.5 – FERMENTAÇÃO (I)

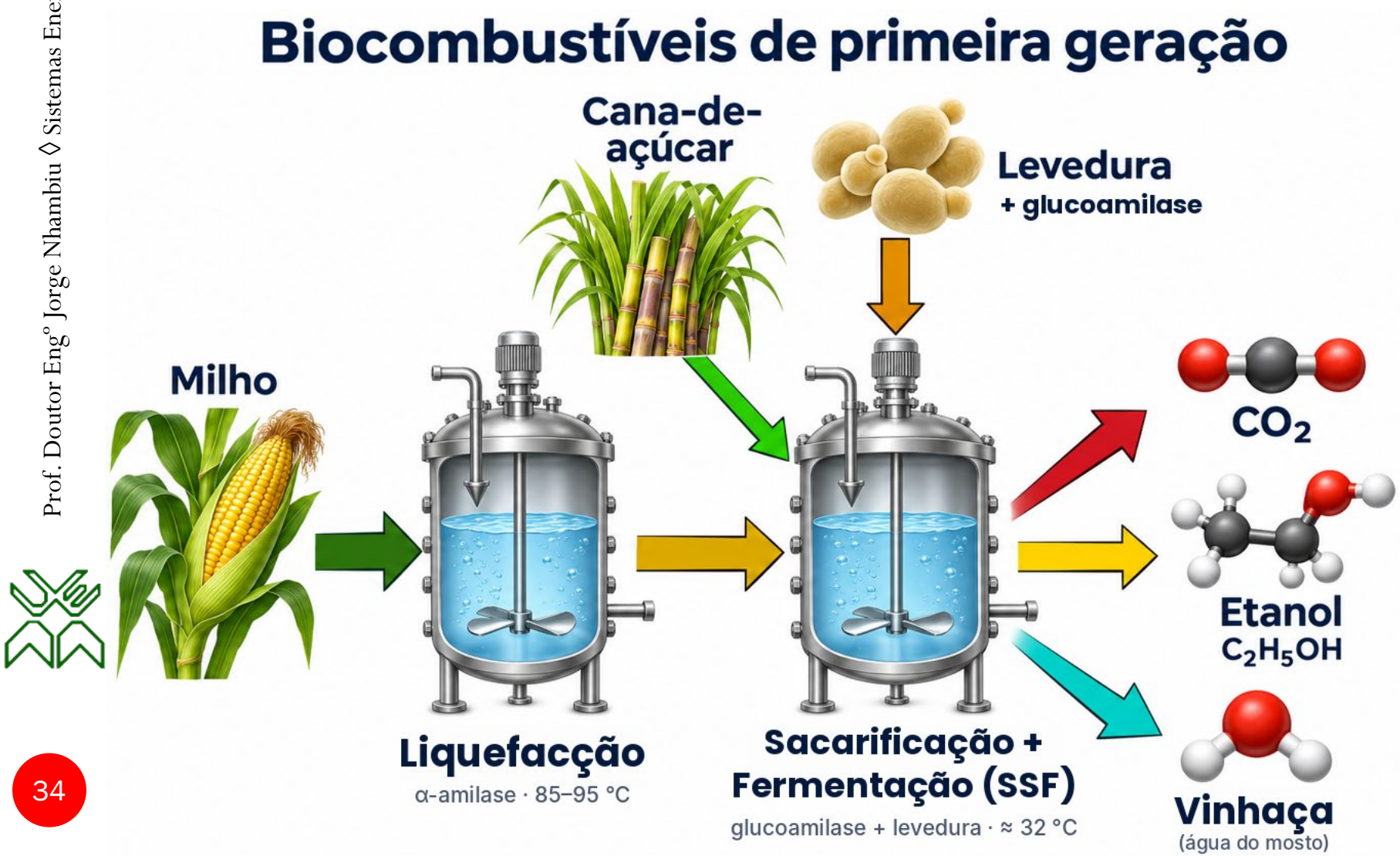
- **Fermentação alcoólica:** leveduras convertem açúcares (cana, milho, mandioca, sorgo, beterraba) em **etanol**:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$$

- Rendimento teórico: **0,511 kg de etanol por kg de glicose**; na prática, ≈ 90% desse valor.
- Etanol: PCI ≈ 26,8 MJ/kg; ϱ = 0,789 kg/L. Usa-se puro ou misturado com gasolina (E10 a E30, conforme o país).
- Uma tonelada de cana rende ≈ 70–85 L de etanol.

26.7.5 – FERMENTAÇÃO (II)

26.7.5 – FERMENTAÇÃO (III)



26.7.6 – TRANSESTERIFICAÇÃO (I)

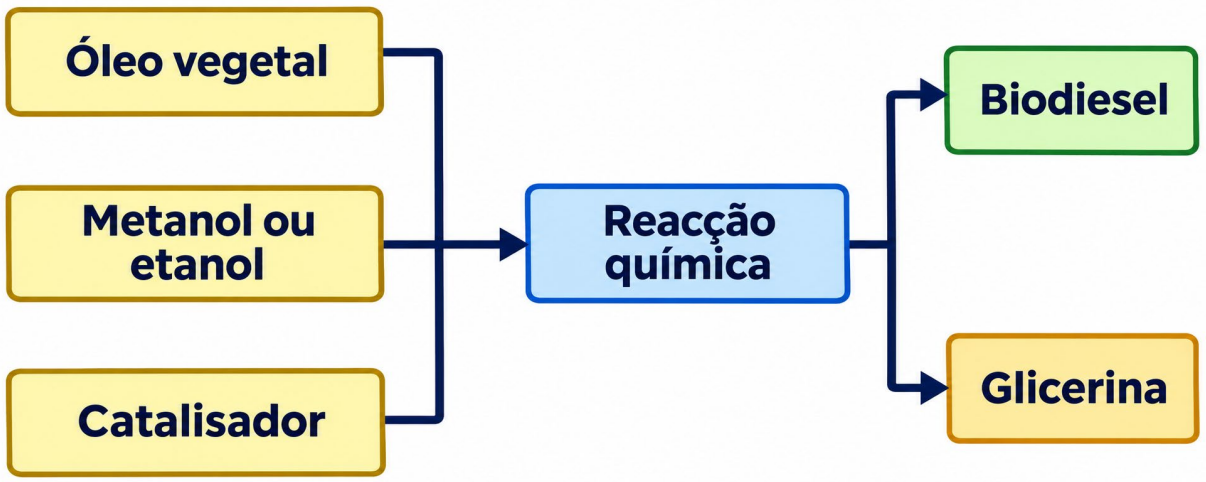
- Processo mais utilizado para produzir **biodiesel**.
- Os óleos vegetais são **triglicerídeos**: três ácidos gordos esterificados a um **glicerol**.
- O óleo reage com um álcool simples (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (ácido, básico ou enzimático):

$$\text{Triglicérido} + 3\ CH_3OH \rightarrow 3\ \text{ésteres metílicos (biodiesel)} + \text{glicerol}$$

- Usa-se um excesso de álcool (razão molar metanol: óleo ≈ 6:1) para deslocar o equilíbrio.

26.7.6 – TRANSESTERIFICAÇÃO (II)

- O glicerol, mais denso, separa-se por **decantação**; o biodiesel tem viscosidade muito menor do que o óleo de partida.
- Por 1 t de óleo, obtêm-se ≈ 0,96 t de biodiesel e ≈ 0,1 t de glicerol (subproduto para a indústria farmacêutica e cosmética).
- Biodiesel: PCI ≈ 37 MJ/kg (gasóleo ≈ 43 MJ/kg).

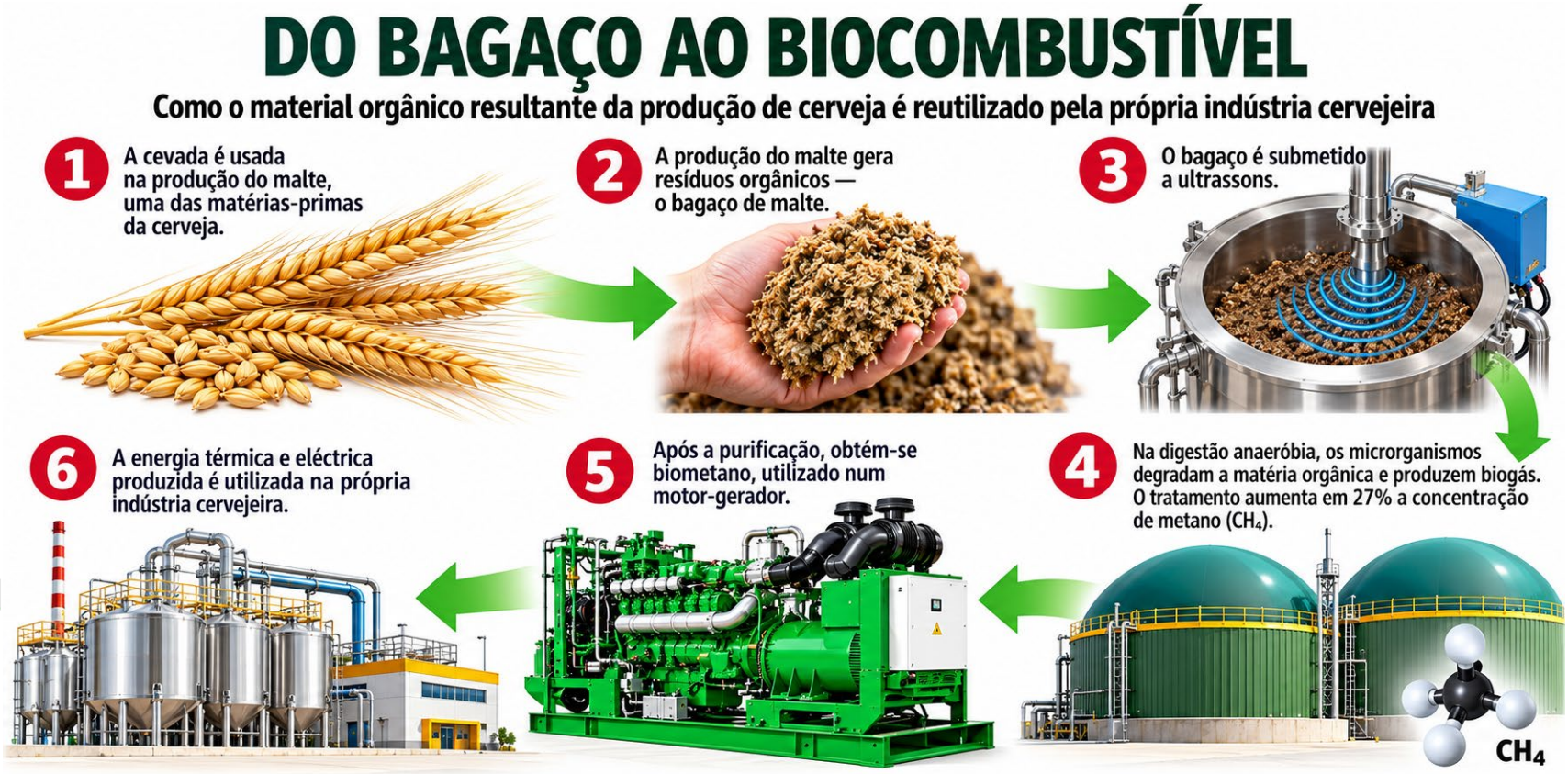


26.8 – FONTES ALTERNATIVAS DE BIOMASSA (I)

- Algas marinhas (microalgas e macroalgas) como matéria-prima para biocombustíveis.
- Culturas energéticas de crescimento rápido (Eucalyptus grandis, Jatropha curcas).
- Resíduos industriais orgânicos (cervejeiras, lacticínios, curtumes).



26.8 – FONTES ALTERNATIVAS DE BIOMASSA (II)



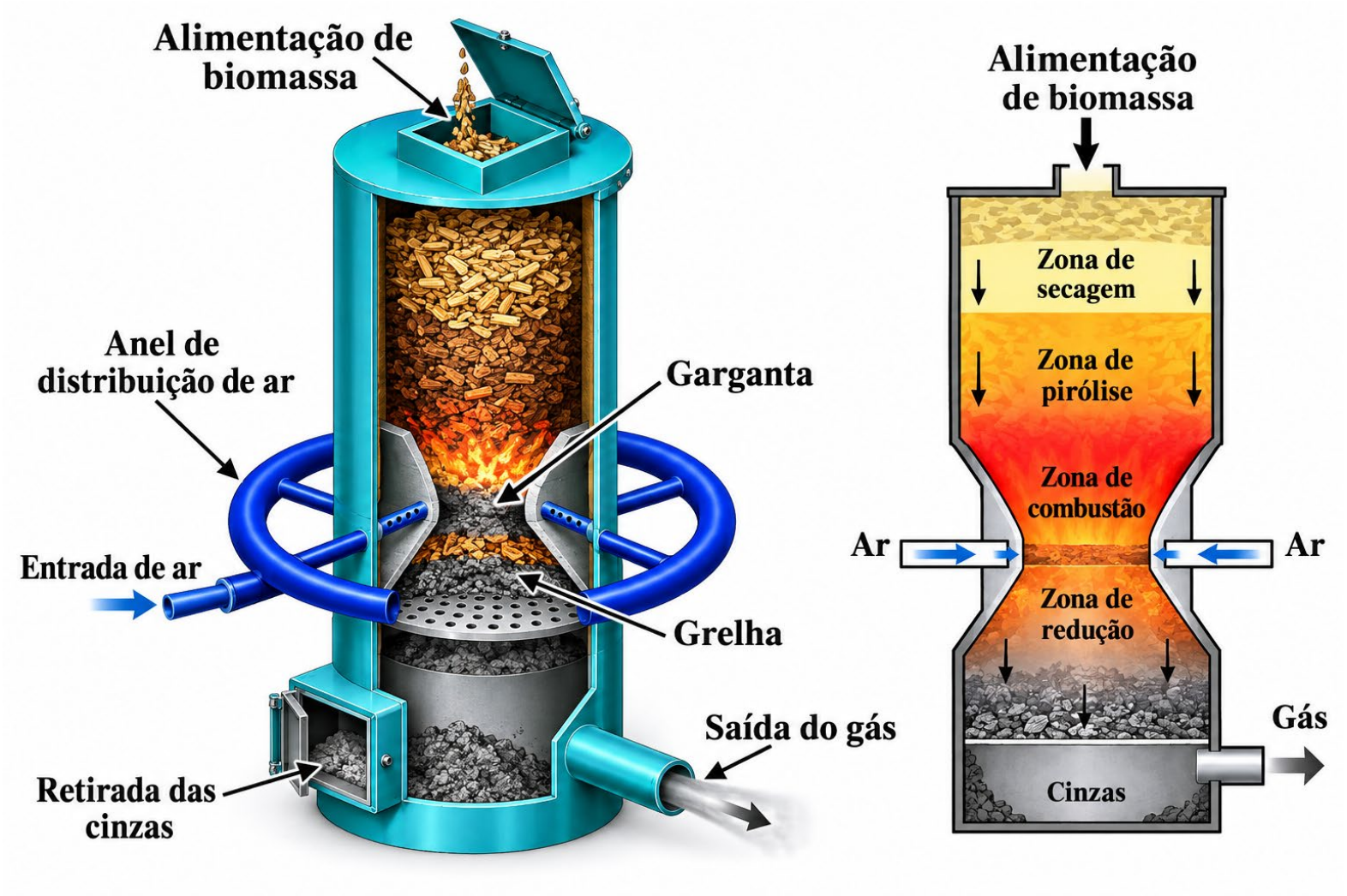
26.9 – TECNOLOGIAS EMERGENTES

- Objectivo: aumentar a **eficiência**, a **sustentabilidade** e a **versatilidade** da conversão.
- **Biocombustíveis de 2.ª geração (2G):** a partir de resíduos lenhocelulósicos (palha, bagaço, madeira), sem competir com os alimentos.
- Optimização de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise) e biológicos (digestão, fermentação).
- Três exemplos a seguir: gaseificadores modulares, biorrefinarias integradas e biochar.

26.9.1 GASEIFICADORES MODULARES (I)

- Convertem biomassa local (resíduos agrícolas, florestais, dejectos) em **gás de síntese** para electricidade e calor em comunidades isoladas.
- Potências típicas: 10–500 kW_e; gaseificador + filtro + motor-gerador.
- **Benefícios:** energia renovável, autonomia energética, versatilidade (calor + electricidade), criação de rendimento local.
- **Desafios:** limpeza dos alcatrões, operação e manutenção, abastecimento regular de biomassa seca.

26.9.1 GASEIFICADORES MODULARES (II)



26.9.2 BIORREFINARIAS INTEGRADAS (I)

Instalações que processam biomassa de forma integral para produzir vários produtos – biocombustíveis, electricidade, calor e produtos químicos – seguindo os princípios da **economia circular**.

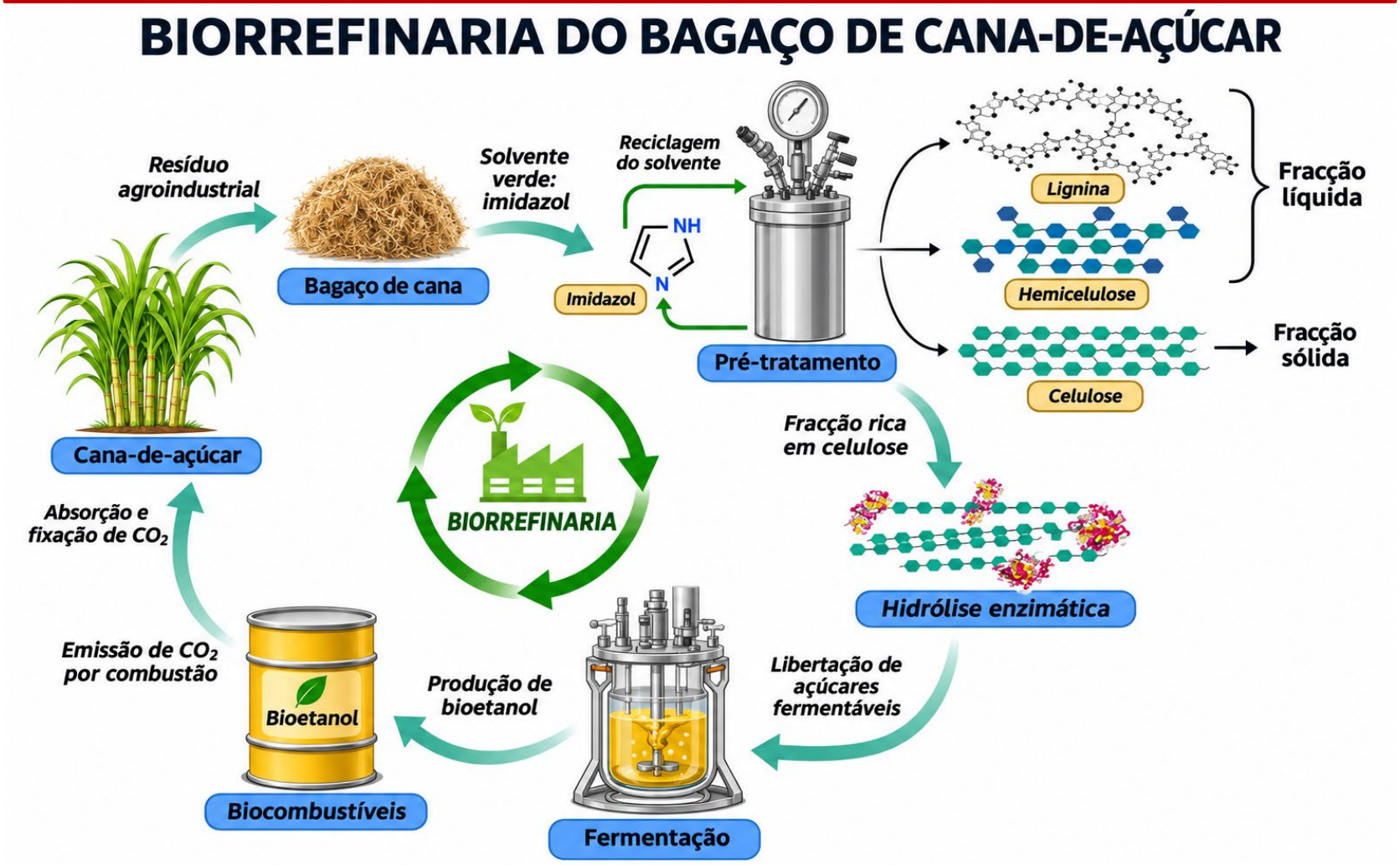
São o equivalente às refinarias de petróleo, mas com matéria-prima renovável (bagaço, resíduos agrícolas, madeira, algas).

Processam várias matérias-primas (cana, soja, resíduos agro-industriais) por rotas **bioquímicas, químicas e termoquímicas**.

Integração: o resíduo de um processo é a matéria-prima de outro, por exemplo:

- bagaço → caldeira → vapor e electricidade para a fábrica;
- vinhaça da destilação → biodigestor → biogás;
- glicerol do biodiesel → digestão ou química fina.

26.9.2 BIORREFINARIAS INTEGRADAS (II)



26.9.3 BIOCHAR COMO SUMIDOURO DE CARBONO E MELHORADOR DO SOLO (I)

- O **biochar** (biocarvão) é carvão produzido por pirólise para ser aplicado ao solo, e não queimado.
- **Sumidouro de carbono:** a estrutura carbonosa é estável – o carbono permanece no solo por séculos.
- **Melhorador do solo:** aumenta a retenção de água e de nutrientes e favorece os microrganismos.
- **Produção:** pirólise lenta de resíduos agrícolas, bagaço ou madeira (350–600 °C).
- **Estabilidade:** a decomposição natural da biomassa devolve o CO_2 em poucos anos; o carbono do biochar permanece no solo por centenas a milhares de anos.

26.9.3 BIOCHAR COMO SUMIDOURO DE CARBONO E MELHORADOR DO SOLO (II)

CO_2 sequestrado:

$$m_{CO2} = m_{bc} \cdot f_C \cdot F_{perm} \cdot 44/12$$

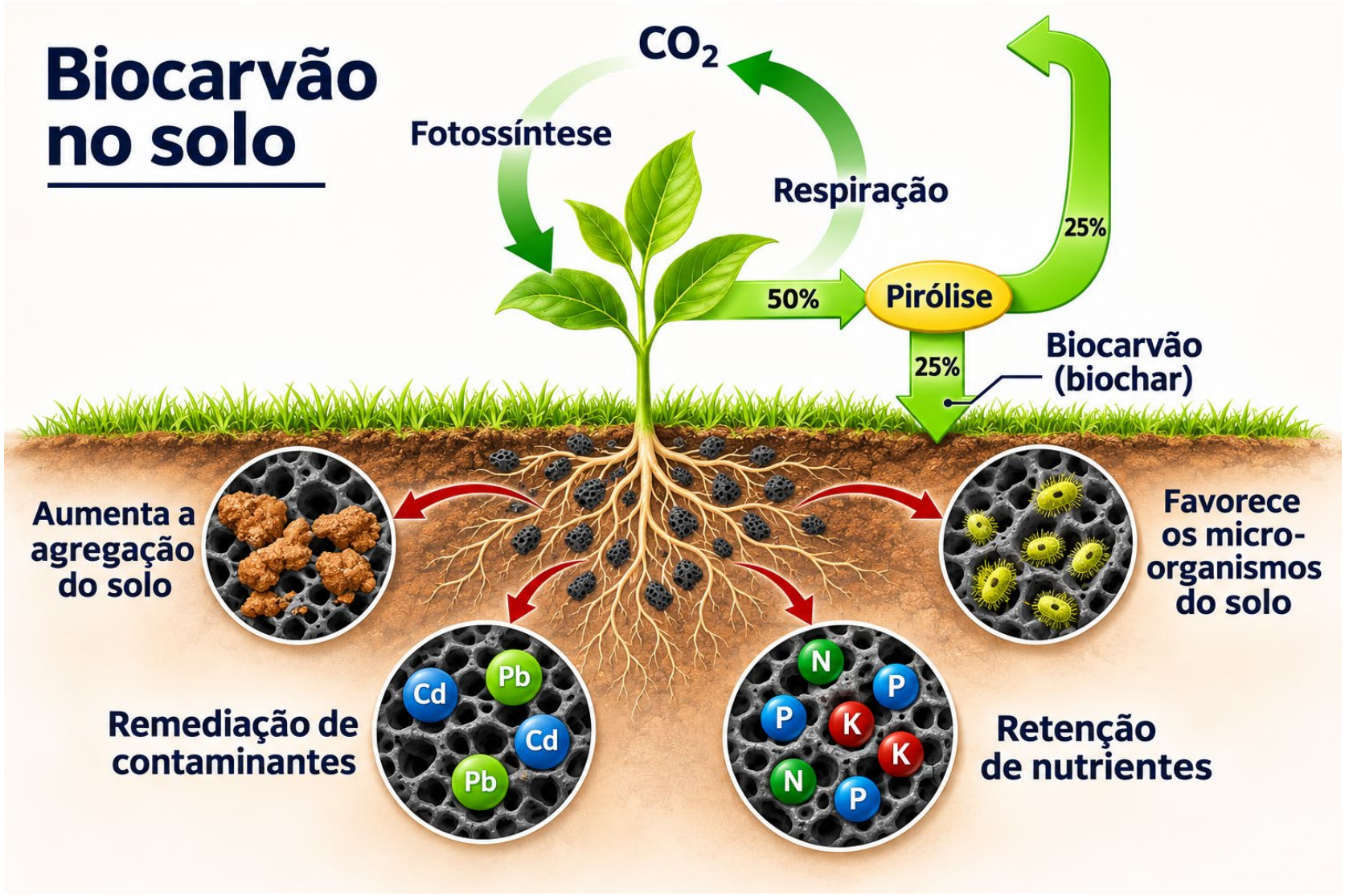
f_C – fracção de carbono (0,5–0,8);

F_{perm} – fracção que permanece a 100 anos (≈ 0,7–0,9).

Ex.: com $f_C = 0,5$ e $F_{perm} = 0,8$ → 1 t de biochar fixa ≈ 1,5 t de **CO_2** (não de carbono).



26.9.3 BIOCHAR COMO SUMIDOURO DE CARBONO E MELHORADOR DO SOLO (III)



Prof. Doutor Engº Jorge Nhambiu ◊ Sistemas Energéticos

26.10 – EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE BIOMASSA (I)

A eficiência mede a fracção da energia química da biomassa ($\dot{m} \cdot PCI$) que se transforma em energia útil.

É preciso dizer **qual** eficiência:

- **eléctrica:** $\eta_{el} = P_{el} / (\dot{m} \cdot PCI)$
- **térmica:** $\eta_{t} = Q_{útil} / (\dot{m} \cdot PCI)$
- **global (cogeração):** $\eta_{gl} = (P_{el} + Q_{útil}) / (\dot{m} \cdot PCI)$

Usa-se sempre o PCI da biomassa **tal como entra** no sistema (com a sua humidade)

Onde: $\dot{m}$ – caudal de biomassa (kg/s); PCI – poder calorífico inferior (MJ/kg); P_{el} – potência eléctrica (MW); $Q_{útil}$ – potência térmica útil (MW).

26.10 – EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE BIOMASSA (II)

Sistema	Eficiência	Tipo
Fogão tradicional (fogo aberto)	5–15%	térmica
Fogão melhorado	20–35%	térmica
Caldeira de biomassa (só calor)	75–90%	térmica
Central a vapor de biomassa	20–35%	eléctrica
Gaseificador (gás frio)	70–80%	química
Gaseificador + motor	20–30%	eléctrica
Biogás + motor-gerador	30–40%	eléctrica
Cogeração (CHP)	70–85%	global

A comparação só faz sentido entre eficiências do mesmo tipo.

26.10 – FORMULÁRIO: O COMBUSTÍVEL

Grandeza	Expressão	Notas
Humidade (base húmida)	$w = (m_h - m_s) / m_h$	lenha verde 0,4–0,6
Humidade (base seca)	$u = w / (1 - w)$	
PCI com humidade	$PCI_h = PCI_s(1 - w) - 2{,}442\ w$	MJ/kg
PCI a partir do PCS	$PCI = PCS - 2{,}442\ (9H + w)$	H, w em fracção mássica
PCS (Channiwala–Parikh)	$PCS = 0{,}3491C + 1{,}1783H + 0{,}1005S - 0{,}1034O - 0{,}0151N - 0{,}0211A$	% base seca; MJ/kg
Energia do combustível	$Q = m \cdot PCI$; $P_{comb} = \dot{m} \cdot PCI$	

Legenda: m_h, m_s – massa húmida e seca; w, u – humidade em base húmida e seca; PCI_s, PCI_h – PCI em base seca e húmida; PCS – poder calorífico superior; C, H, O, S, N, A – fracções de carbono, hidrogénio, oxigénio, enxofre, azoto e cinzas; $\dot{m}$ – caudal (kg/s).

PCI_s típicos: madeira 18–19; bagaço 17–18; casca de arroz 14–15; carvão vegetal 28–31 MJ/kg.

26.10 – FORMULÁRIO: COMBUSTÃO E RENDIMENTOS

Grandeza	Expressão	Notas
Ar estequiométrico	$A/C = 11{,}53C + 34{,}34(H - O/8) + 4{,}29S$	kg ar / kg comb.
Ar real	$\dot{m}_{ar} = \lambda \cdot (A/C) \cdot \dot{m}_{comb}$	λ = 1,3–2 (grelha)
CO_2 emitido	$m_{CO2} = m \cdot C \cdot 44/12$	C em fracção
Rendimento eléctrico	$\eta_{el} = P_{el} / (\dot{m} \cdot PCI)$	
Rendimento global (CHP)	$\eta_{gl} = (P_{el} + Q_{útil}) / (\dot{m} \cdot PCI)$	
Consumo específico	$b = 3{,}6 / (\eta_{el} \cdot PCI)$	kg/kWh (PCI em MJ/kg)
Área de plantação	$A = \dot{m}_{anual,\ seca}$ / produtividade	eucalipto 10–25 t/ha·ano

Legenda: A/C – razão ar/combustível; λ – factor de excesso de ar (ar real / ar estequiométrico); m – massa de biomassa seca; P_{el} – potência eléctrica; $Q_{útil}$ – potência térmica útil; $\dot{m}$ – caudal de biomassa (kg/s); b – consumo específico; produtividade em t (seca)/ha·ano.

26.10 – FORMULÁRIO: PROCESSOS DE CONVERSÃO

Processo	Expressão	Valores típicos
Carbonização	$\eta_{carv} = m_{carvão} / m_{lenha}$; $\eta_E = \eta_{carv} \cdot PCI_{carvão} / PCI_{lenha}$	η_{carv}: 10–20% (forno de terra); 25–35% (melhorado)
Gaseificação	$PCI_{gás} = \Sigma\, y_i\, PCI_i$; $\eta_{gf} = V_{gás}\, PCI_{gás} / (\dot{m}\, PCI)$	η_{gf} = 70–80%
Digestão anaeróbia	$V_{CH4} = m_{SV} \cdot B_0$; $V_d = Q \cdot TRH$	B_0 = 0,2–0,45 m^3/kg SV; TRH 20–40 d
Fermentação	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\, C_2H_5OH + 2\, CO_2$	0,511 kg etanol / kg glucose
Transesterificação	$TG + 3\, CH_3OH \rightarrow 3\, FAME + glicerol$	metanol:óleo = 6:1 (molar)

Legenda: η_{carv} – rendimento gravimétrico; η_E – rendimento energético; y_i – fracção volúmica do gás i; $V_{gás}$ – caudal de gás (Nm^3/s); η_{gf} – eficiência de gás frio; m_{SV} – sólidos voláteis (kg/d); B_0 – produção específica de CH_4; V_d – volume do digestor; Q – caudal de carga (m^3/d); TRH – tempo de retenção (d); TG – triglicérido; FAME – ésteres metílicos (biodiesel).

PCI (MJ/Nm^3): CO 12,6 ; H_2 10,8 ; CH_4 35,8. PCI (MJ/kg): etanol 26,8 ; biodiesel 37.

26.10 – EXEMPLO: FOGÃO MELHORADO

Uma família precisa de **10 MJ/dia** de calor útil para cozinhar. A lenha tem PCI_s = 18,5 MJ/kg e w = 30%. Compare um fogão tradicional (η = 10%) com um melhorado (η = 25%).

Grandeza	Cálculo	Resultado
PCI da lenha húmida	18,5 × 0,7 − 2,442 × 0,3	**12,2 MJ/kg**
Lenha/dia – tradicional	10 / (0,10 × 12,2)	**8,2 kg**
Lenha/dia – melhorado	10 / (0,25 × 12,2)	**3,3 kg**
Lenha/ano – tradicional	8,2 × 365	**3,0 t**
Lenha/ano – melhorado	3,3 × 365	**1,2 t**

O fogão melhorado poupa ≈ 1,8 t de lenha por família e por ano (−60%). Multiplicado por milhões de famílias, é uma das medidas mais eficazes contra o desmatamento.

26.11 – CADEIA DE VALOR DA BIOMASSA (I)

Conjunto de etapas desde a matéria-prima até à energia ou produto final:

- **1. Produção e gestão:** cultivo sustentável (cana-de-açúcar, eucalipto) ou recolha de resíduos (florestais, agrícolas, urbanos). Garante um abastecimento constante.
- **2. Logística:** manuseio, transporte e armazenamento. A biomassa é dispersa e tem **baixa densidade energética** – o transporte limita o raio económico de recolha (tipicamente < 50–100 km).
- **3. Pré-tratamento:** trituração, **secagem** (aumenta o PCI), densificação em pellets ou briquetes (facilita o transporte e o armazenamento).

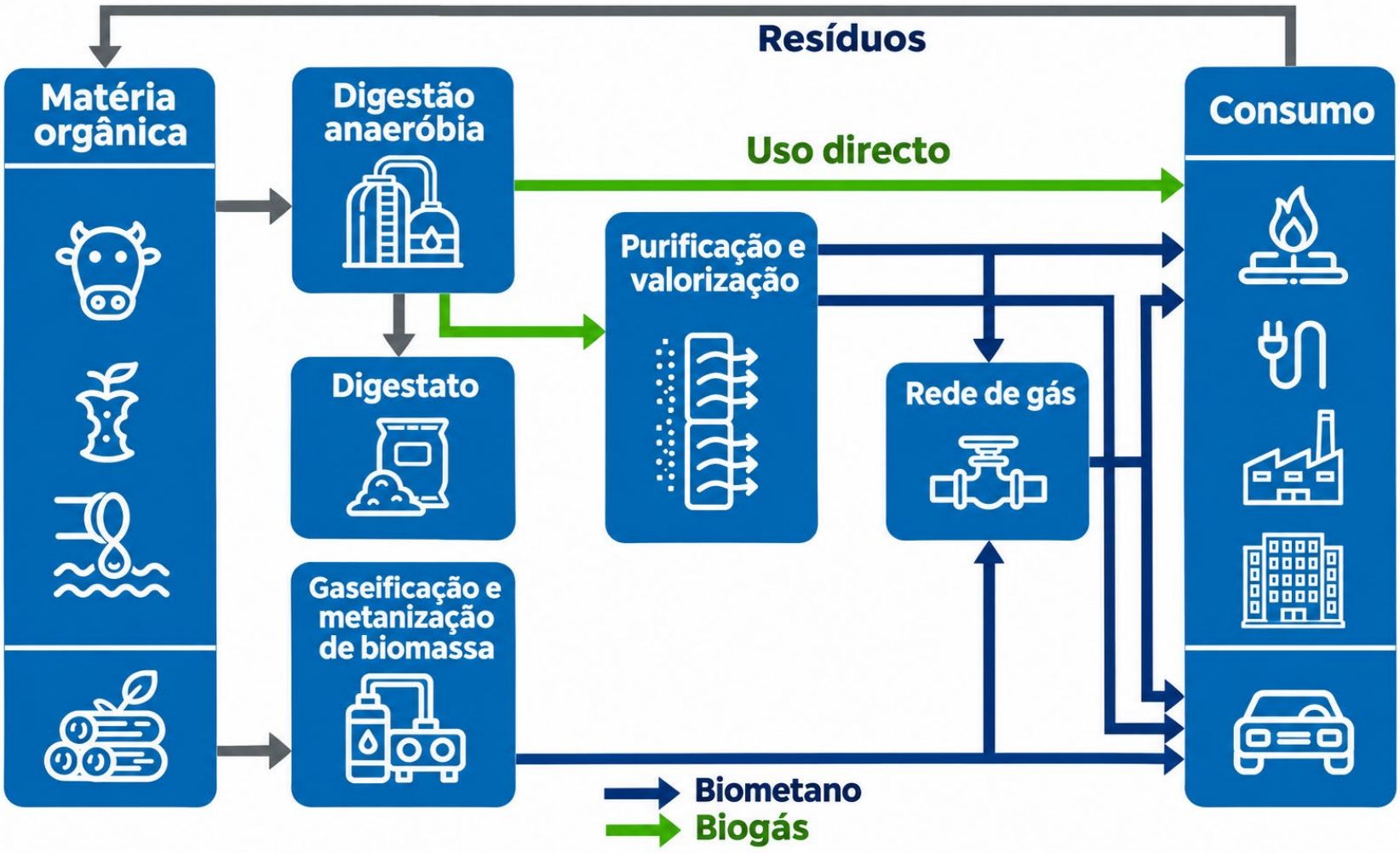
26.11 – CADEIA DE VALOR DA BIOMASSA (II)

4. Conversão:

- **Térmica** – combustão em caldeiras, gaseificação, pirólise.
- **Bioquímica** – digestão anaeróbia (biogás + biofertilizante), fermentação (etanol).
- **Química** – transesterificação (biodiesel).

5. Distribuição e consumo: electricidade, calor, vapor e combustíveis para a indústria, os transportes e as residências.

26.11 – CADEIA DE VALOR DA BIOMASSA (III)



26.12 – ESTUDOS DE CASO

Moçambique tem um potencial superior a **2 GW** em projectos de biomassa:

- 1 006 MW – biomassa florestal residual (com possível incorporação de resíduos agro-industriais);
- 832 MW – açucareiras (bagaço);
- 280 MW – indústria da pasta de papel;
- 63 MW – resíduos sólidos urbanos (RSU).
- Só ≈ 128 MW são considerados viáveis a curto prazo.

Fonte: Atlas de Energias Renováveis de Moçambique (FUNAE, 2013), p. 70.

26.12.1 – COGERAÇÃO COM BAGAÇO NAS AÇUCAREIRAS

- As açucareiras moçambicanas (Xinavane, Maragra, Marromeu, Mafambisse) queimam o **bagaço** em caldeiras para produzir **vapor de processo e electricidade** para consumo próprio.
- Cada tonelada de cana dá ≈ 280 kg de bagaço (w ≈ 50%, PCI ≈ 7,5 MJ/kg).
- Com caldeiras de alta pressão e turbinas mais eficientes, as fábricas podem **exportar electricidade** para a rede durante a safra – este é o potencial de 832 MW.

26.13 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA BIOMASSA

Vantagens

- Renovável e neutra em carbono, **se gerida de forma sustentável**.
- Disponível localmente; reduz a importação de combustíveis.
- Aproveita resíduos agrícolas, florestais, animais e urbanos.
- Pode ser armazenada e despachada quando necessário (ao contrário do sol e do vento).
- Cria emprego rural ao longo da cadeia de valor.
- Elevada eficiência global em **cogeração** (70–85%).

26.13 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA BIOMASSA

Consequências:

- Combate a poluição do solo e lençóis freáticos.
- Dejectos urbanos, industriais e agro-pecuários.
- Minimiza problema de espaço em aterros sanitários.
- Contribui para a diminuição do aquecimento global.



59

26.13 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA BIOMASSA

Desvantagens

- Sem gestão: **desmatamento** e perda de nutrientes do solo (carvão e lenha em Moçambique).
- Se não for reposta, o CO_2 emitido é líquido e contribui para o aquecimento global.
- A queima tradicional emite **partículas e CO**, contribuindo para a poluição do ar interior e para doenças respiratórias.
- Baixa densidade energética e alta humidade: logística cara.
- Exige muita área; as culturas energéticas podem competir com as culturas alimentares.
- Rendimentos eléctricos baixos (20–35%) em centrais pequenas.