

Tecnologias da Biomassa para Conversão de Energia

Prof. Dr. Waldir A. Bizzo

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica



UNICAMP

Waldir Bizzo





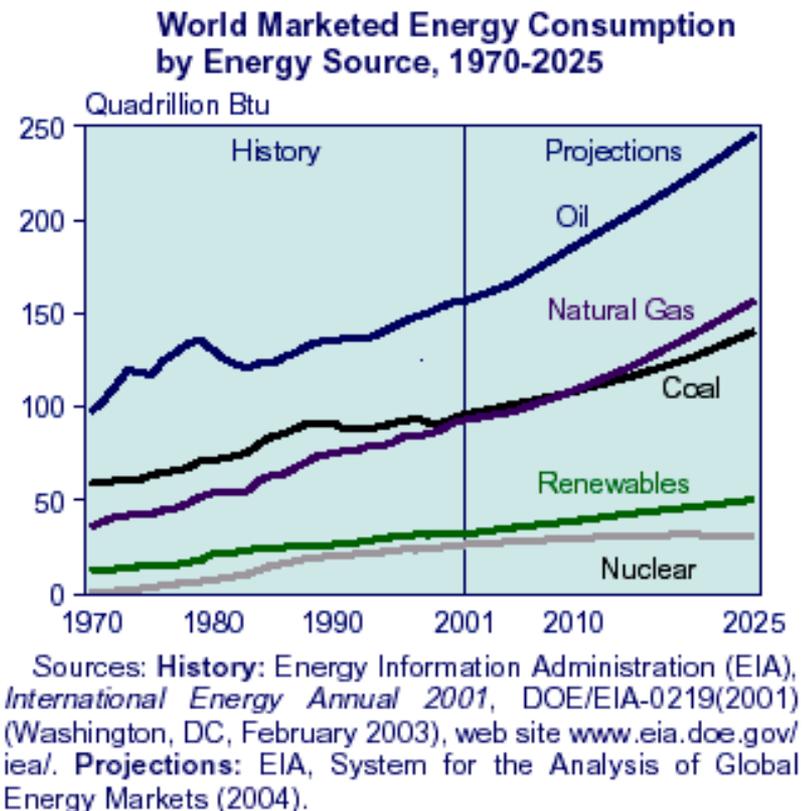
Matriz energética mundial

Matriz energética mundial:

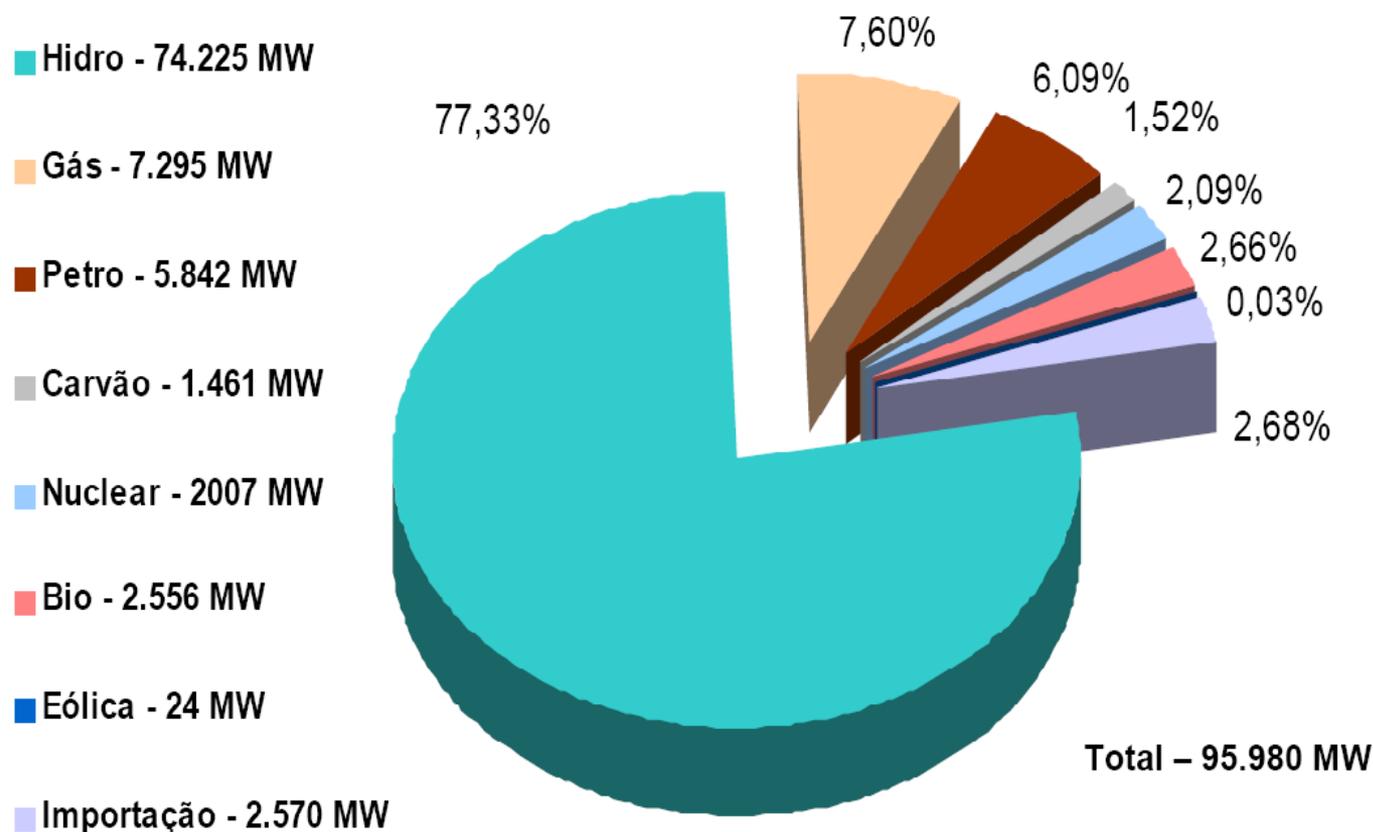
- ✓ apresenta-se diversificada em relação às suas fontes;
- ✓ crescimento contínuo;

Razões ao aumento no consumo:

- ✓ dependência cada vez maior aos produtos industrializados;
- ✓ integração econômica mundial;
- ✓ crescimento populacional;



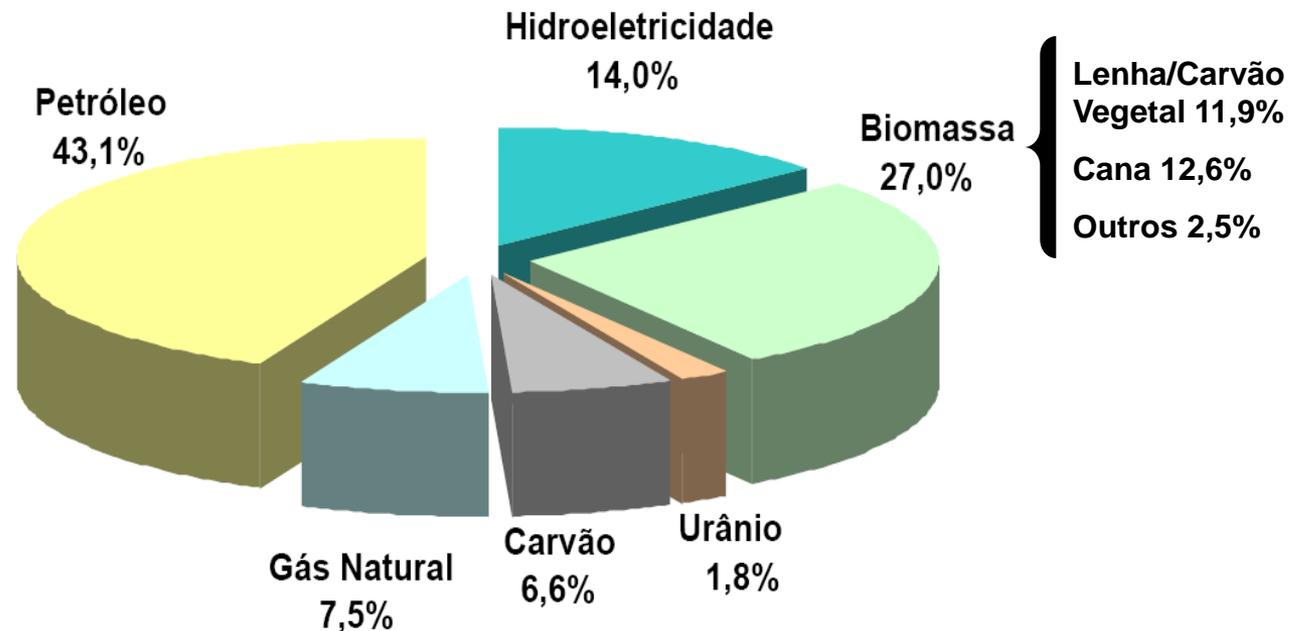
Matriz energética brasileira (eletricidade)



Fonte: MME, 2004

Matriz energética brasileira (energia primária)

Segundo apresentam os dados do MME 41% da oferta interna de energia no Brasil, provém de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 14%.



Fonte: MME, 2004

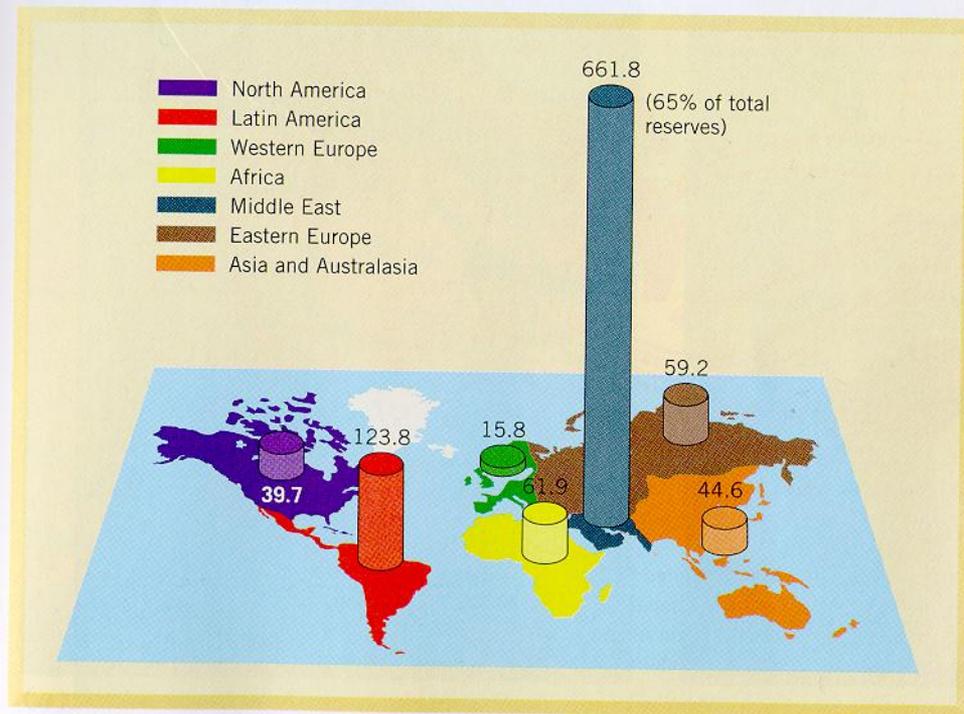
Waldir Bizzo

Reservas estimadas de petróleo

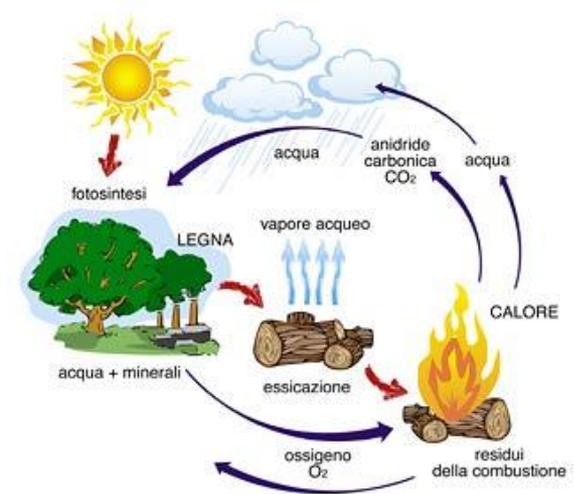
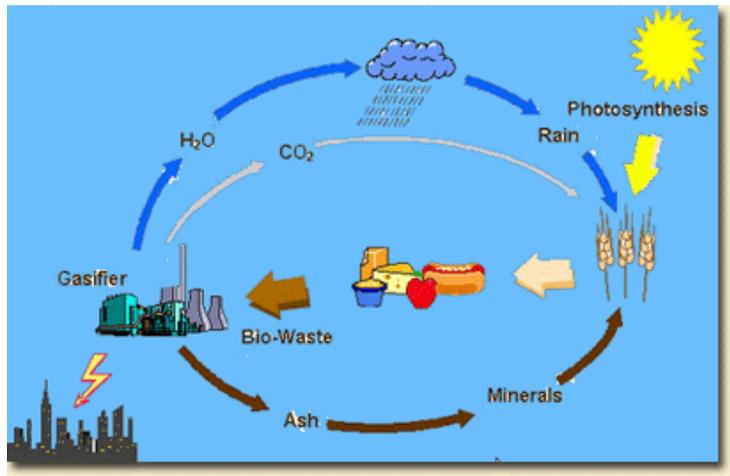
	<i>Reservas totais estimadas (bilhões de barris)</i>	<i>Produção (bilhões de barris/dia)</i>	<i>Vida estimada (anos)</i>
Industrializados	577	0.022	72
Eurasia	443	0.010	122
Em desenvolvimento	1913	0.045	116
TOTAL	2933	0.077	104

Distribuição geográfica das reservas de petróleo

FIGURE 16.3 Proven world oil reserves (billions of barrels) in 1992. The Middle East dominates with 65% of total reserves. (SOURCE: From The British Petroleum Company, 1993, *BP Statistical Review of World Energy*.)



O ciclo da biomassa



Biomassa é energia solar

Composição da biomassa

	Composição Elementar (%)					
Tipo de Biomassa	C	H	O	N	S	cinzas
Pinus	49,2	5,9	44,3	0,06	0,03	0,3
Eucalipto	49,0	5,8	43,9	0,030	0,01	0,72
Casca de arroz	40,9	4,3	35,8	0,40	0,02	18,3
Bagaço de cana	44,8	5,3	42,3	0,38	0,01	1,5
Casca de coco	48,2	5,2	33,1	2,98	0,12	10,25
Sabugo de milho	46,5	5,8	45,4	0,47	0,01	1,40
Ramas de algodão	47,0	5,3	40,7	0,65	0,21	5,89

Comparação biomassa X petróleo/gás

	% em massa	
Elemento	petróleo	biomassa
C	83 a 87	44 a 50
H	11 a 14	5 a 6
S	0,05 a 8	<0,01
N	0,1 a 1,7	0,5 a 2
O	~0,5	42 a 48
Metais(Fe, Ni, V, etc.) e cinzas	~0,3	0,5 a 2 (típico)
Poder Calorífico	38 a 45 MJ/kg	16,5 a 20 MJ/kg

Energia da Biomassa: Ciclo de produção

- Produção agrícola
- Processamento primário
- Processamento secundário
- Utilização:
 - Energia térmica
 - Energia elétrica
 - Transporte automotivo
- Algumas características:
 - Baixa densidade de energia
 - Produção dispersa

Principais fontes

- Lenha
- Cana-de-açúcar
- Grãos
- Frutos oleosos
- Resíduos vegetais
- Resíduos orgânicos

Principais combustíveis e derivados

- Lenha in natura
- Resíduos vegetais
- Bagaço de cana e resíduos da cana
- Etanol
- Biogás
- Gás de gaseificação
- Bio-óleo
- Gás de pirólise
- Óleo vegetal
- Biodiesel



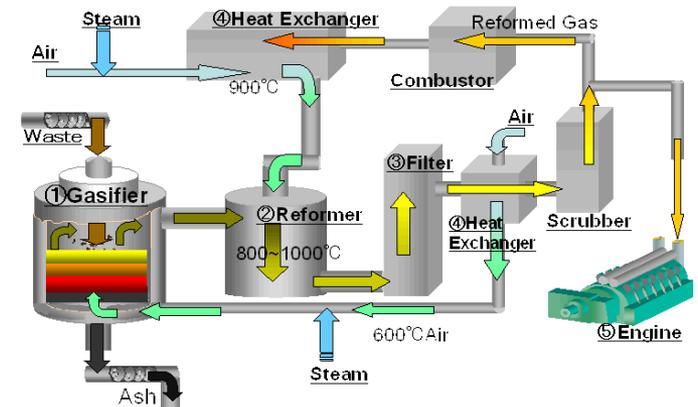
Processamento primário

- In natura
- Cominuição
- Peletização
- Fermentação
- Biodigestão anaeróbia
- Gaseificação
- Pirólise
- hidrólise



Processamento secundário

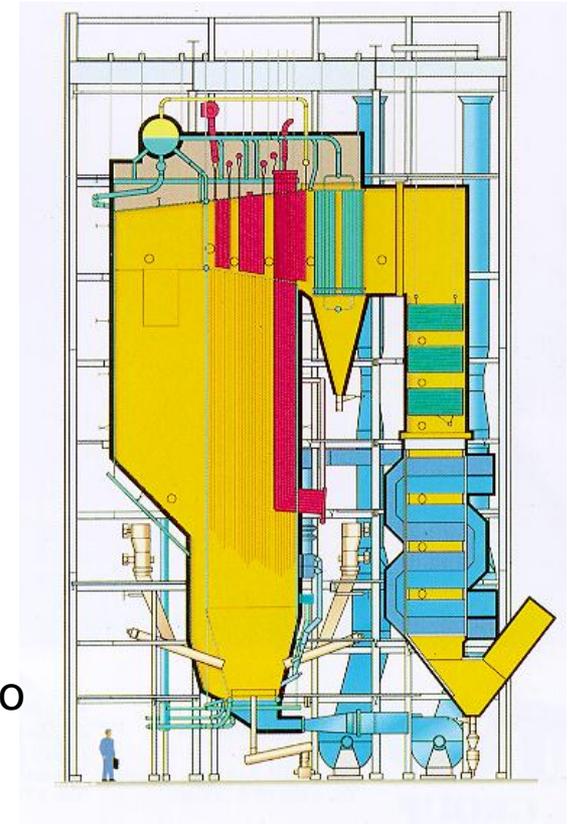
- Destilação
- Transesterificação
- Síntese de gás



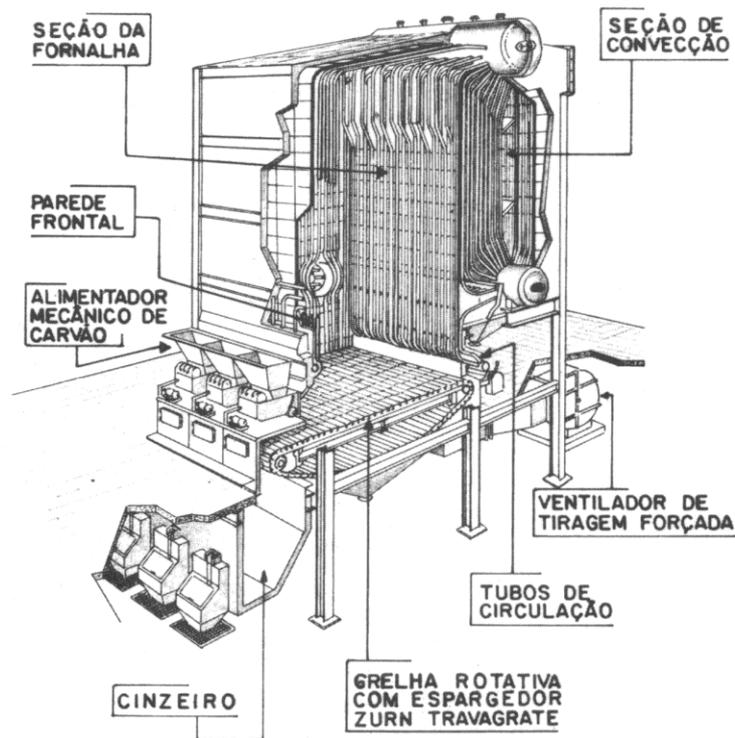
System flow of the Star-Meet system

ENERGIA TÉRMICA INDUSTRIAL

- Tecnologia de combustão de sólidos:
 - Leito fixo
 - Em suspensão
 - Leito fluidizado
 - Leito circulante
- Desenvolvimento tecnológico:
 - Melhoria e otimização dos processo
 - Minimização de emissões (material particulado e NOx)

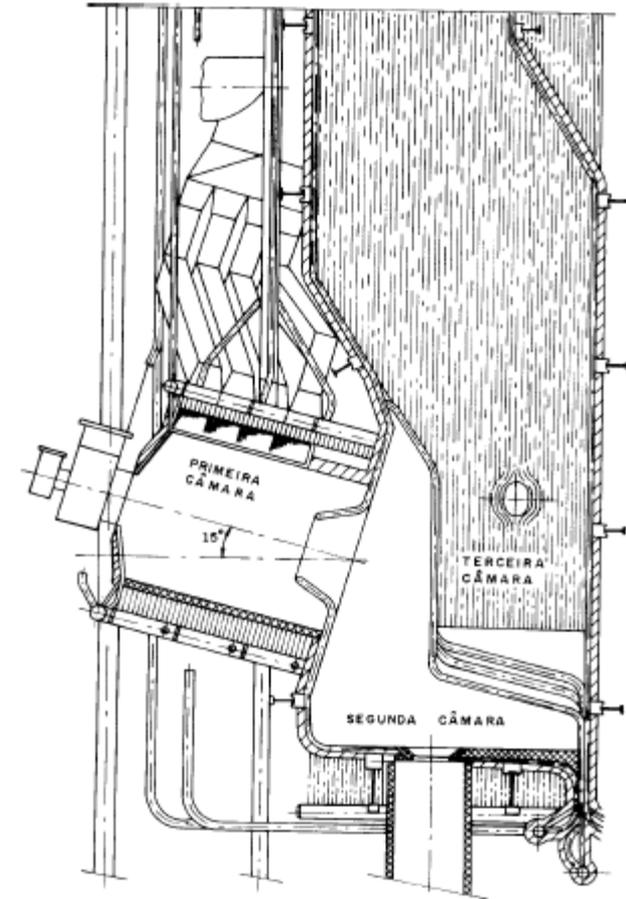


Combustão de sólidos



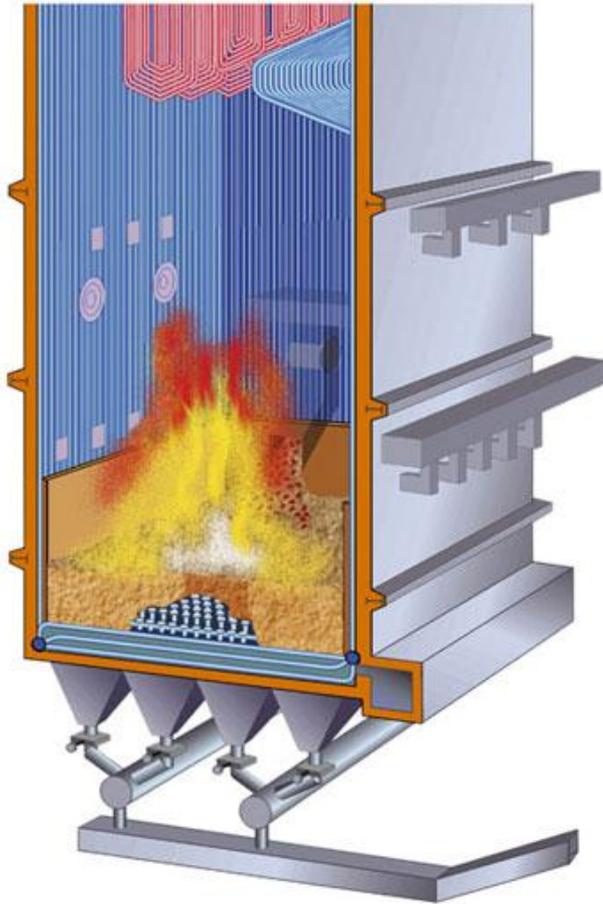
Caldeira DEDINI ZURN - Modelo "VC"

Leito fixo



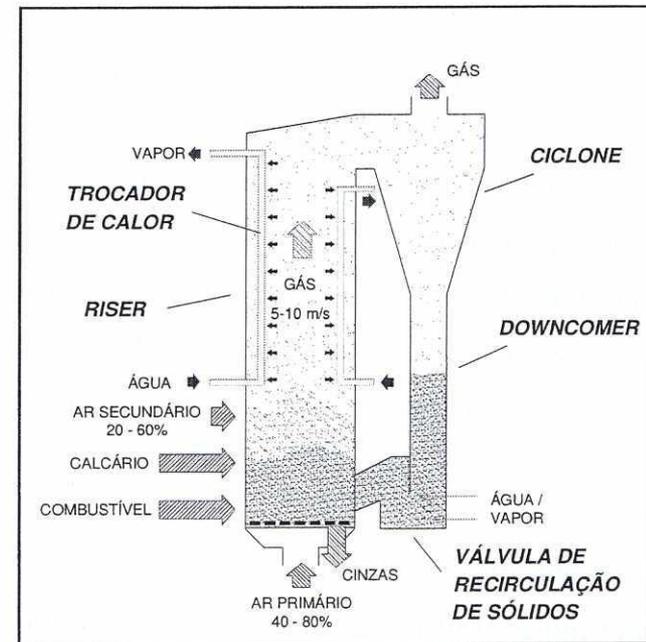
Combustão de sólidos em suspensão

Combustão em leito fluidizado



Leito Fluidizado Borbulhante

Waldir Bizzo



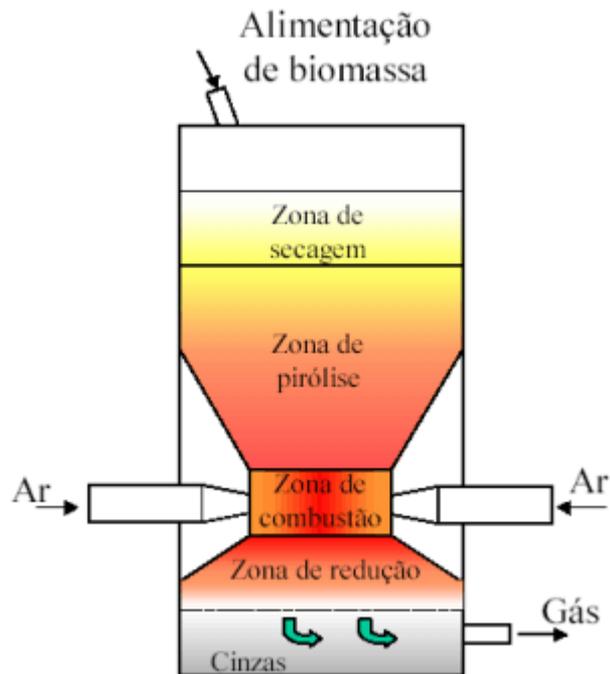
Leito Fluidizado Circulante

ENERGIA ELÉTRICA por biomassa

- Ciclo rankine
- Gaseificação e motor de C.I.
- Ciclo combinado: BIG-GT
- Etanol e óleos em turbinas a gás
- Desafios:
 - Integração dos processos
 - Limpeza dos gases de gaseificação e pirólise
 - Otimização do sistema



Gaseificação de biomassa



Composição do Gás

CO	12 a 20%
H ₂	8 a 14%
CH ₄	0,5 a 3%
CO ₂	9 a 13%
N ₂	45 a 55%

Poder Calorífico:

1000 a 2000 kcal/m³

Impurezas:

- material particulado
- alcatrão

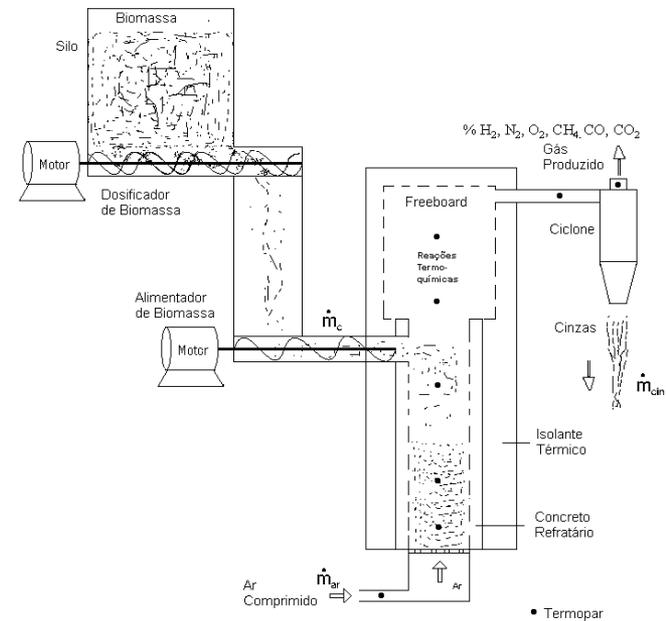
Tecnologias de Gaseificação de Biomassa

Diversas tecnologias em desenvolvimento:

- Leito movente contra-corrente
- Leito movente co-corrente
- Leito fluidizado borbulhante
- Leito fluidizado circulante
- Gaseificador ciclônico

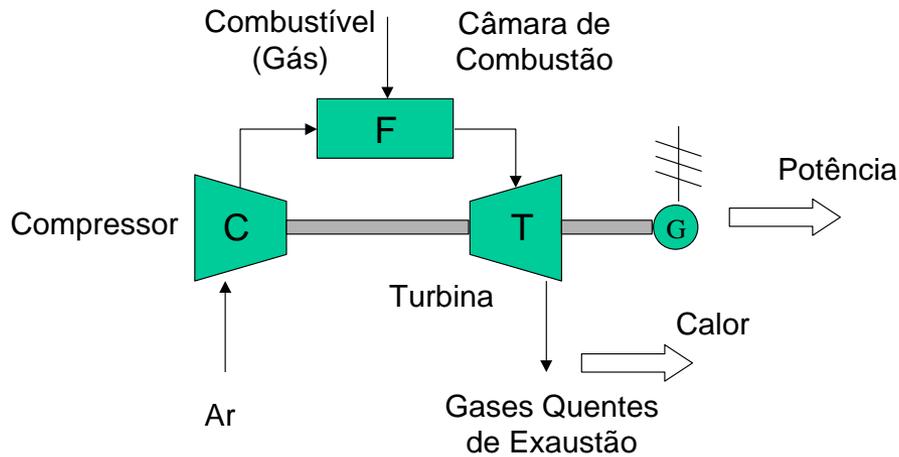
•Tecnologias em pequena escala razoavelmente consolidada

•Tecnologia em escala industrial e para grandes potências ainda em desenvolvimento

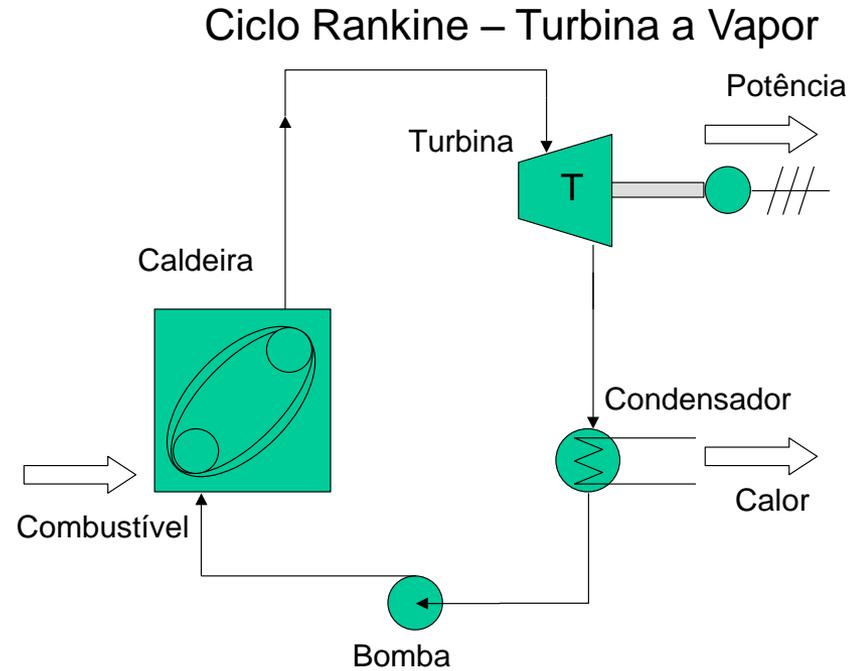


Gaseificador de leito fluidizado

Ciclos Termodinâmicos Clássicos

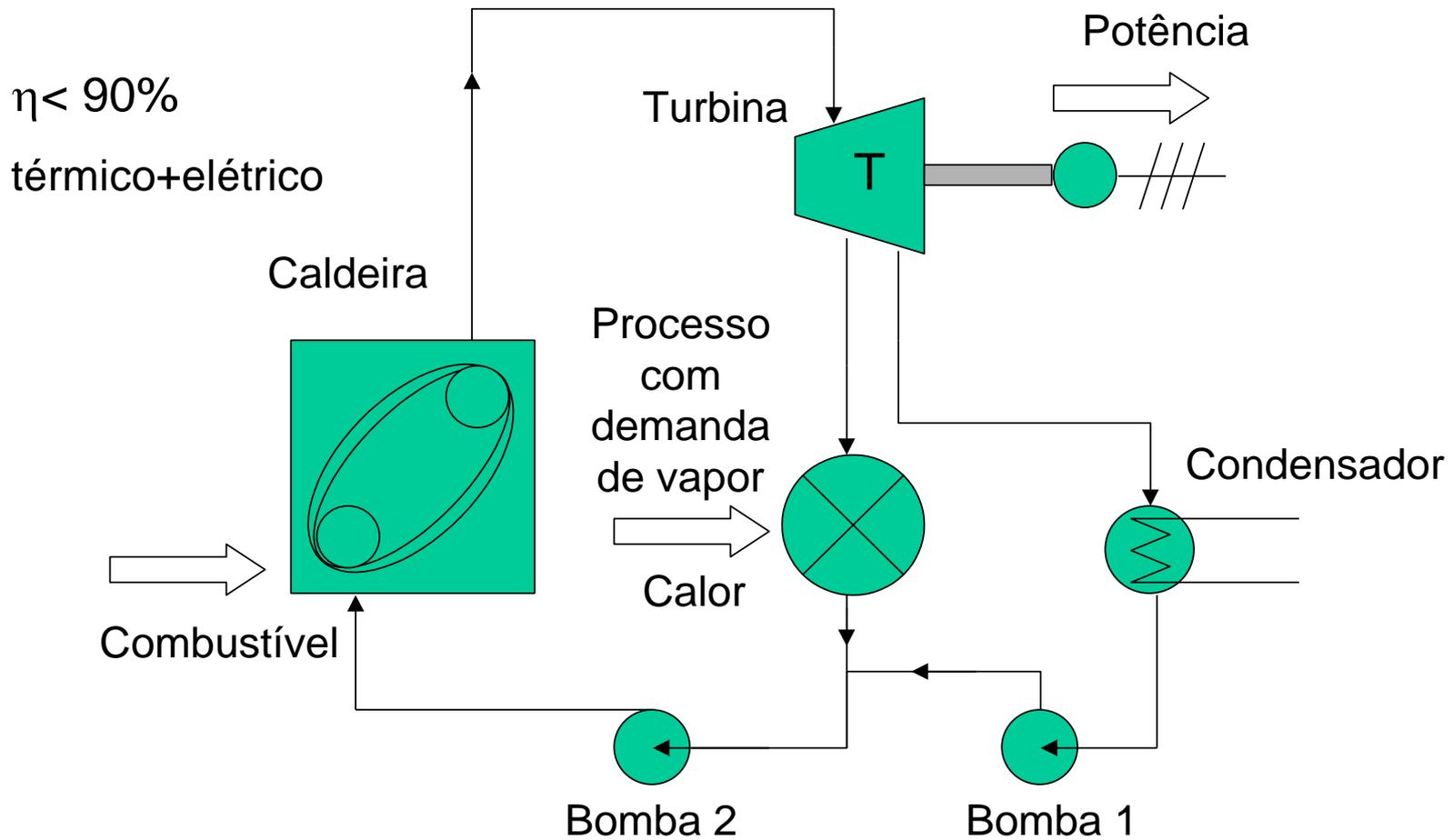


Ciclo Brayton – Turbina a Gás

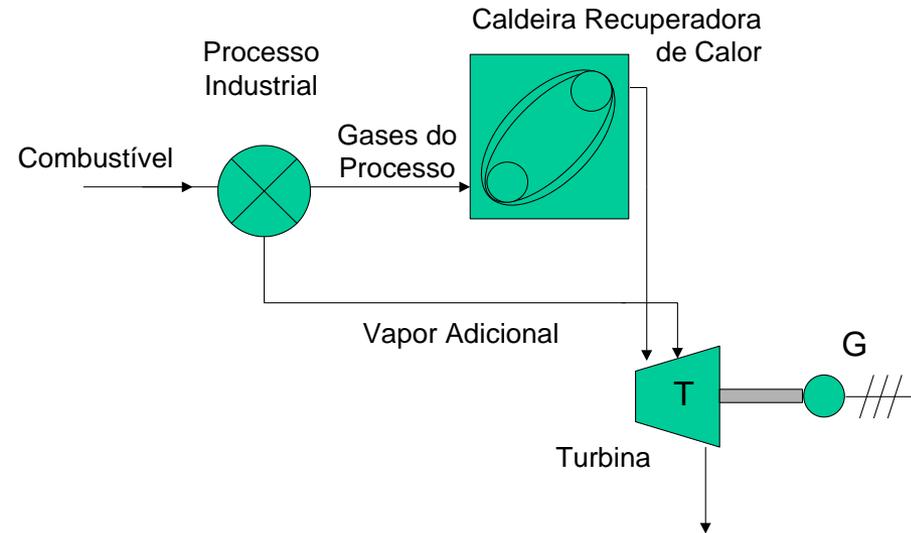


$$\eta < 33\%$$

Co-geração de vapor e eletricidade

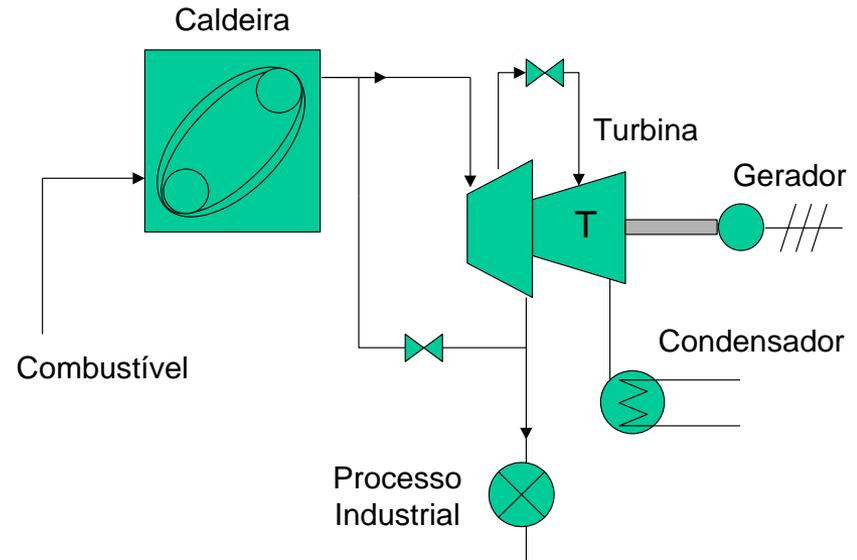


Co-geração de calor e eletricidade

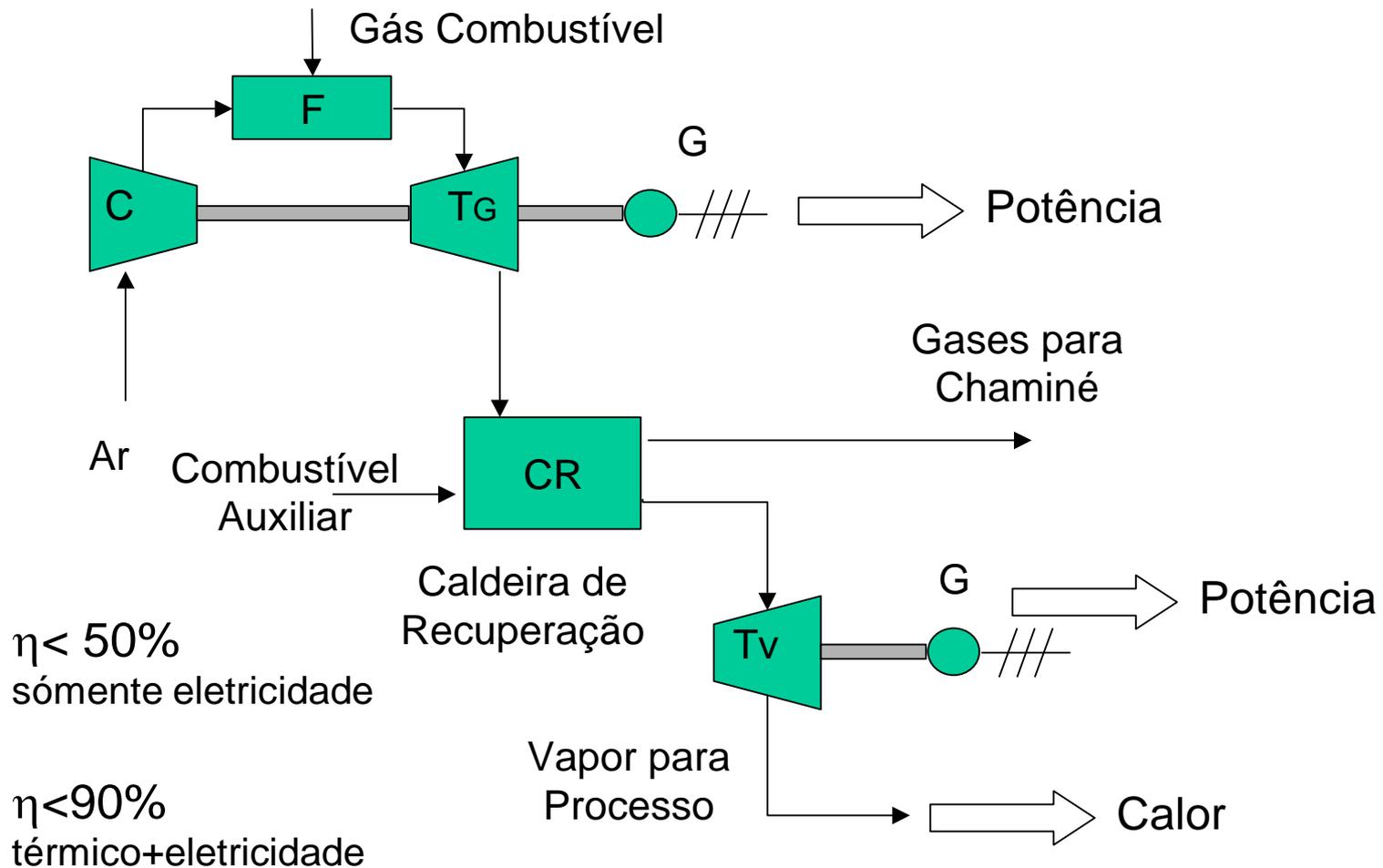


Processos de média e alta temperatura ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)

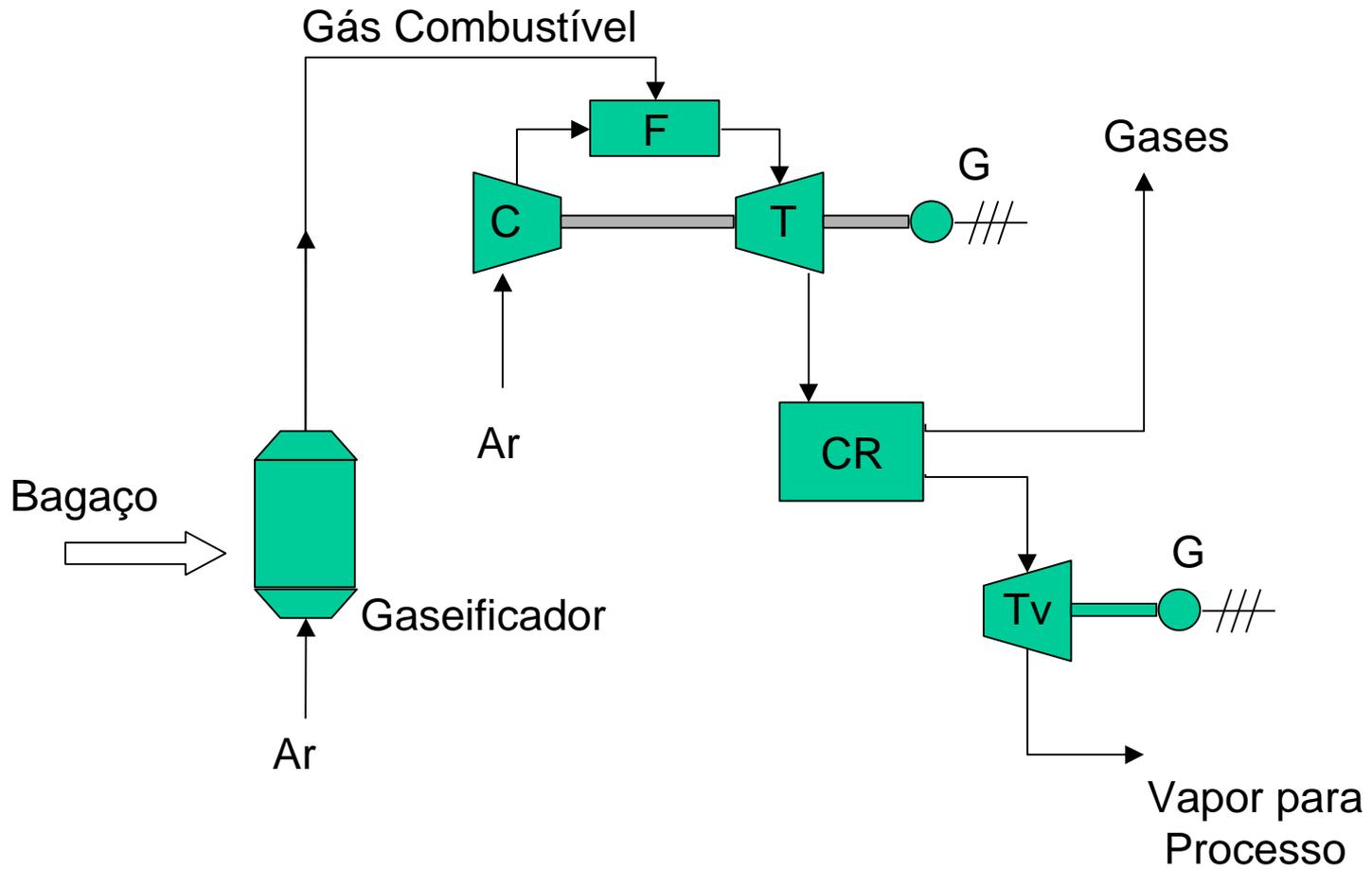
Processos de baixa temperatura ($< 140\text{ }^{\circ}\text{C}$)



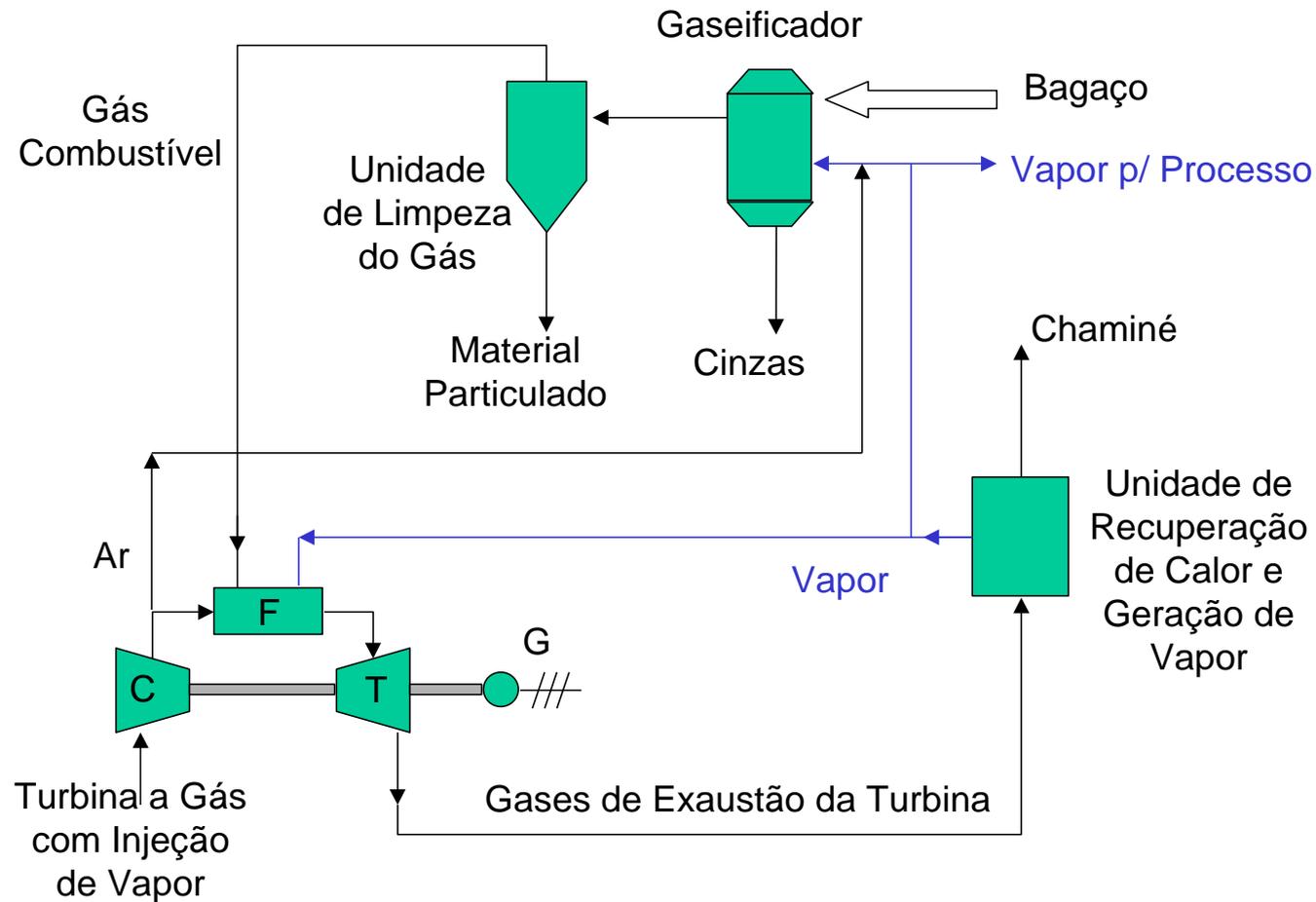
Ciclos combinados Vapor e Gás



BIG-GT – Biomass Integrated Gasification and Gas Turbine



BIG-STIG – Biomass Integrated Gasification and Steam Injected Gas Turbine



Produtividade de biomassas

biomassa		matéria seca t/ha.ano	umidade % (b.u.)
Eucalipto		11,5	50
Bambu		12,5	50
Pinus		11,5	50
Mandioca	<i>raízes</i>	7,5	60 a 70
	<i>resíduos</i>	2,8	58 a 70
Cana	<i>bagaço</i>	11	50
	<i>palha</i>	14	10 a 42
	<i>etanol</i>	6,7	-

Potencial de produção de eletricidade por biomassa

Ciclo a Vapor (Rankine) $\eta = 30\%$

Área de 1.000 ha

biomassa		Potência kW	
Eucalipto		2.250	<i>umidade 25%</i>
Bambu		2.500	
Pinus		2.250	
Mandioca	<i>raízes</i>	<i>alimento</i>	
	<i>resíduos</i>	490	<i>abandonado no campo</i>
Cana	<i>bagaço</i>	1.900	<i>utilizado no processo</i>
	<i>palha</i>	2.250	<i>queimado no campo</i>
	<i>etanol</i>	2.870	<i>ciclo combinado $\eta = 50\%$</i>

Desafios tecnológicos para desenvolvimento da biomassa como fonte de energia

- Principais dificuldades
 - Baixa densidade e produção dispersa
 - Estado físico sólido
 - Umidade
- Desenvolvimento tecnológico
 - Tecnologias de colheita e logística
 - Aprimorar tecnologias de conversão energética
 - Aumentar eficiência de processos de produção de energia e de combustíveis líquidos
- Principal vantagem:
 - **RENOVÁVEL**

Produção de biodiesel

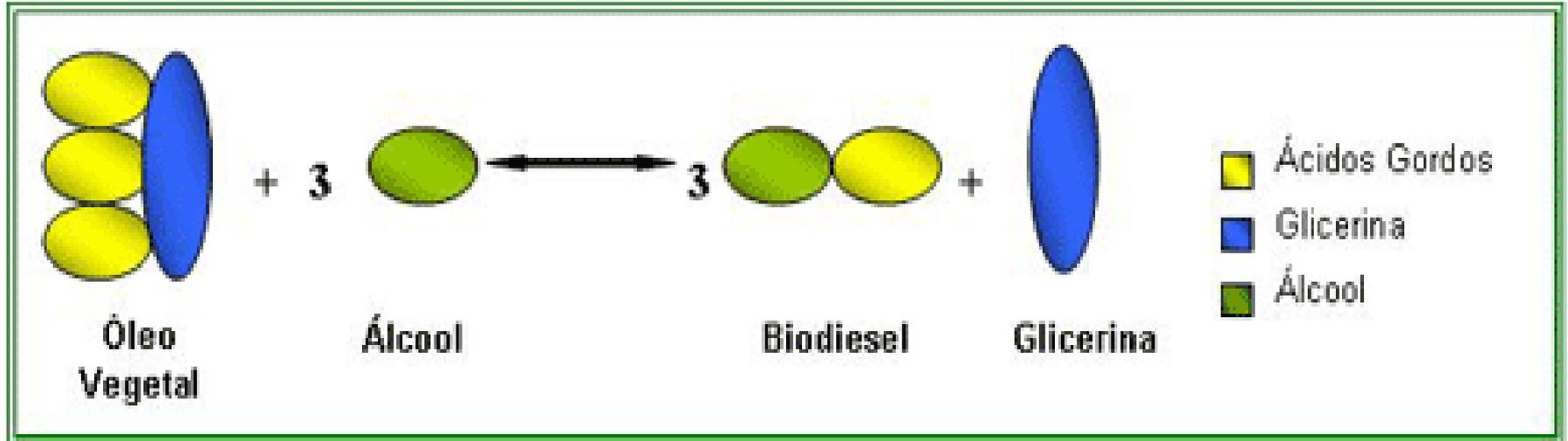
- pode ser produzido a partir de qualquer fonte de ácidos graxos.
- óleos vegetais, óleos de frituras, borras de refinação, matéria graxa de efluentes ou gorduras animais

- √ Soja;
- √ Mamona;
- √ Dendê;
- √ Girassol;
- √ Canola;
- √ Palmiste;
- √ Babaçu;
- √ Amendoim;
- √ Tucumã;
- √ Carço de algodão;
- √ Pequi;
- √ Sementes de gergelim;
- √ Pinhão-manso;
- √ Buriti;
- √ Nabo forrageiro;
- √ Jojoba;
- √ Linhaça;
- √ Sebo ou gordura animal;
- √ Óleos de fritura;
- √ Resíduos da indústria de refino de óleo.



A reação de transesterificação

triacilgliceróis reagem com o metanol, na presença de um catalisador, produzindo glicerol (subproduto) e o éster metílico de ácido graxo (biodiesel).

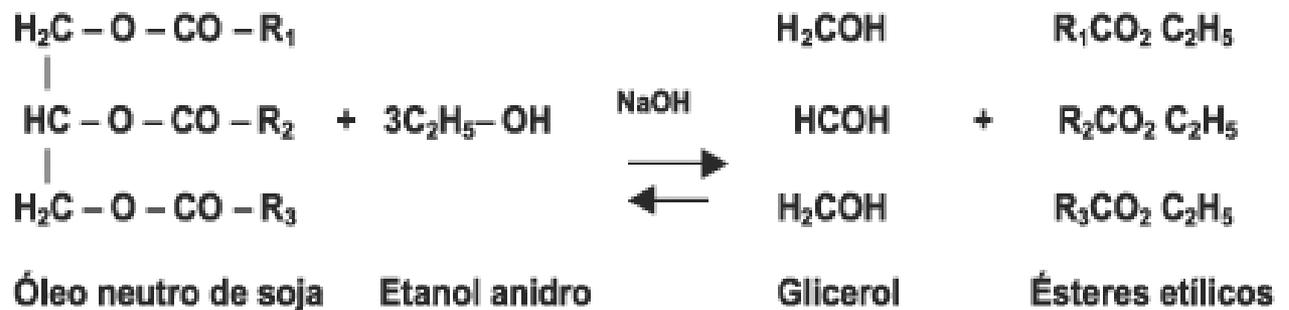
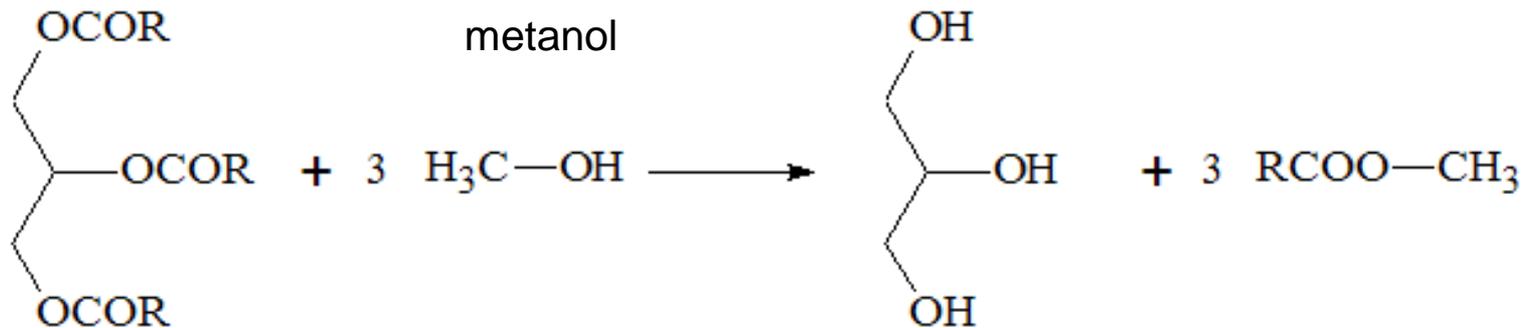


Utilização do etanol

Pode ser também utilizado o etanol, caso do Brasil, devido ao baixo custo e disponibilidade de etanol

-Biodiesel (éter metílico):

reação de transesterificação com catalisador



Etanol

Figura 1. Transesterificação de triglicerídeos, onde R_1 , R_2 e R_3 representam as cadeias carbônicas dos ácidos graxos



Biodiesel

Conteúdo de óleos, colheitas e rendimentos de algumas culturas oleaginosas no Brasil

Espécie	Conteúdo de óleo (%)	Rendimento (ton/ha)	Óleo(ton/ha)
Algodão	15,0	0,8 – 3,0	0,1-0,2
Amendoim	40,0 – 43,0	2,1	0,6-0,8
Babaçu	66,0	0,15 – 0,45	0,1-0,3
Coco	55,0 – 60,0	6,5	1,3-1,9
Canola/Colza	40,0 – 48,0	1,25 – 2,25	0,5-0,9
Dendê	20,0	9,1	3,0-6,0
Girassol	38,0 – 48,0	1,3	0,5-1,9
Mamona	43,0 – 45,0	0,95	0,5-0,9
Soja	17,0	2,7	0,2-0,4

Fontes: Meirelles, 2003; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004

TRANSPORTE AUTOMOTIVO

- Desafios do biodiesel:
 - Transesterificação *X in natura*
 - Processos de produção de biodiesel por esterificação consolidados e otimizado
 - Desenvolvimento de uma gliceroquímica ou aproveitamento total da glicerina na produção de biodiesel
 - Estabilidade química e sistemas de injeção de óleo *in natura*
 - Desenvolvimento de motores e minimização da emissões
 - Questões sócio-ambientais no campo

Bio-etanol

- $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ Etanol

Fontes de alto conteúdo de sacarose

- Cana-de-açúcar
- Beterraba sacarina
- Melaços
- Sorgo sacarino

Fontes

Alto conteúdo de amido (etanol)

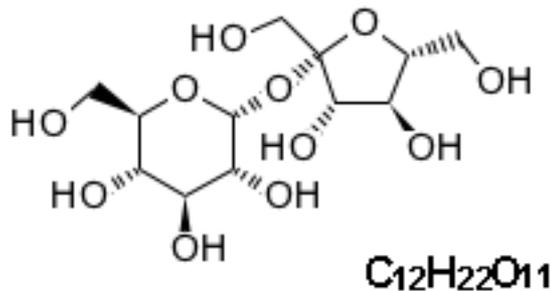
- Milho
- Batatas
- Mandiocas

Alto conteúdo de celulose (Metanol)

- Madeira
- Resíduos agrícolas

Produção de etanol de fontes sacarósicas

Sacarose é disacarídeo



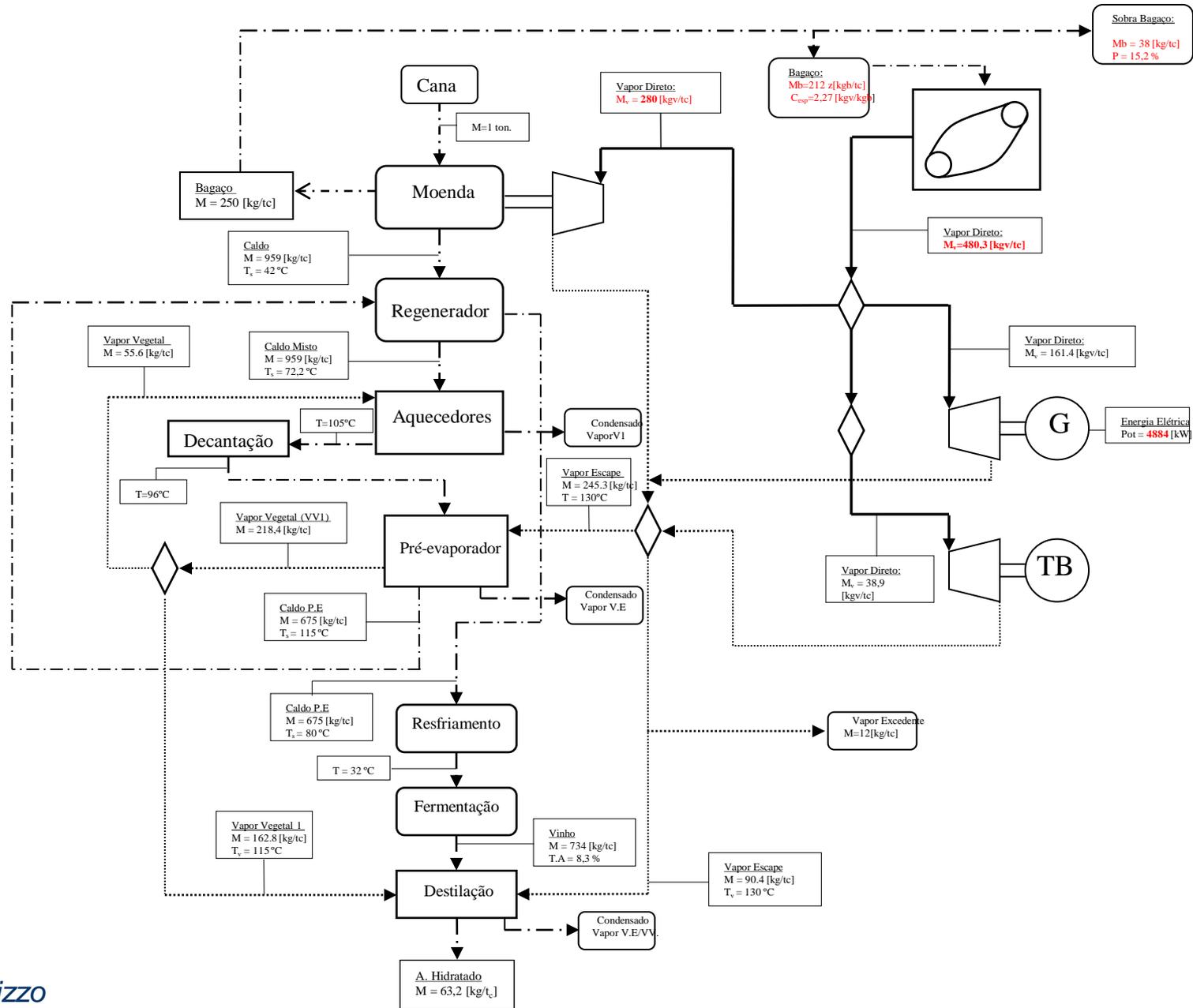
Glicose + Frutose

180 g açúcar produzem 84,6 g etanol

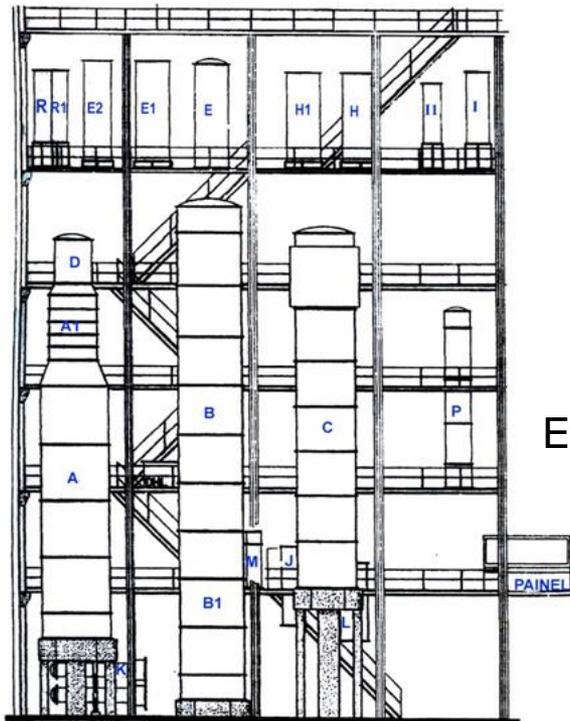
- 1 mol açúcar produz:
- 47 % etanol
- 5% glicerol, ácido succínico, ácido láctico, 2-3-butanoediol, ácido acético, etc.
- 2,5 % consumido pelas leveduras
- 5 % açúcares residuais



FLUXOGRAMA – Balanço Energético Planta Etanol



Destilação do etanol



Etanol hidratado (92% massa): 2 colunas de destilação

Etanol anidro (99% massa): mais uma coluna azeotrópica

Consumo de energia para produção de trabalho mecânico em uma usina típica, vapor 22 bar/ 320 °C.

Equipamento	Consumo específico (MJ/tc)	Eficiência de conversão (%)	Consumo de vapor (kg/tc)	% Consumo de vapor
Moendas	54	55	280	58,3
Turbo-bombas	6,14	45	38,9	8,1
Turbo-gerador	39,6	70	161,4	33,6
Total			480,3	100

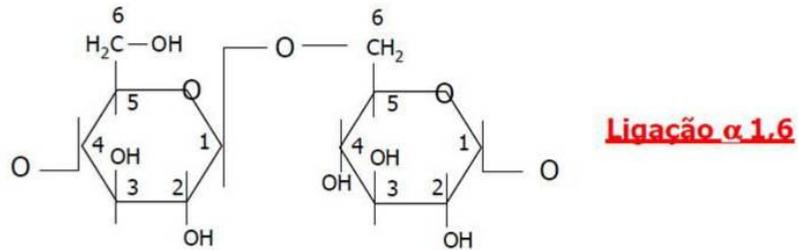
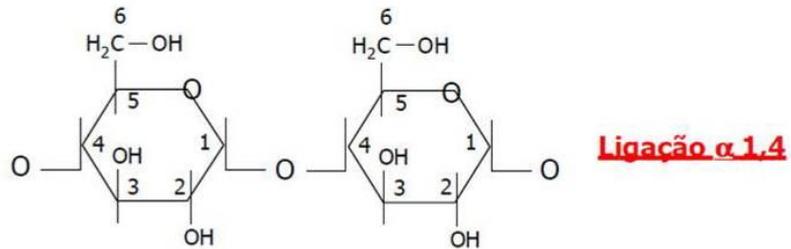
Consumo de energia térmica no processo de produção de etanol, vapor saturado 2,5 bar.

Etapa	Vapor de escape (kg/tc)	Vapor vegetal 1° efeito (kg/tc)	Vapor de processo Total (kg/tc)	(%) Consumo de vapor
Aquecedor		55,6	55,6	10
Pré-evaporador	245,3		245,3	44,3
Destilação	90,4	162,8	253,2	45,7
Total	335,7	218,4	554,1	100

Parâmetros de operação e geração de vapor em uma planta típica

Etapas	Parâmetros	Unidade	Calculado
Processo	Conteúdo de fibra	%	12,5
	Produção de bagaço	kg/tc	250
	Produção Etanol	L/tc	80
	Consumo de vapor na planta	kg/tc	480
Geração de vapor	Consumo de bagaço na caldeira	kg/tc	211,6
	Sobra de bagaço	kg/tc	38,4
	Eficiência do gerador de vapor	%	80
	Produção específica de vapor	kg vapor/kg	2,27
Co-geração	Eficiência de cogeração térmica	%	69,5
	Eficiência de cogeração de	%	6,3
	Eficiência de cogeração	%	75,8

Produção de etanol a partir de amido



Hidrólise do amido: transformação de amido em açúcares

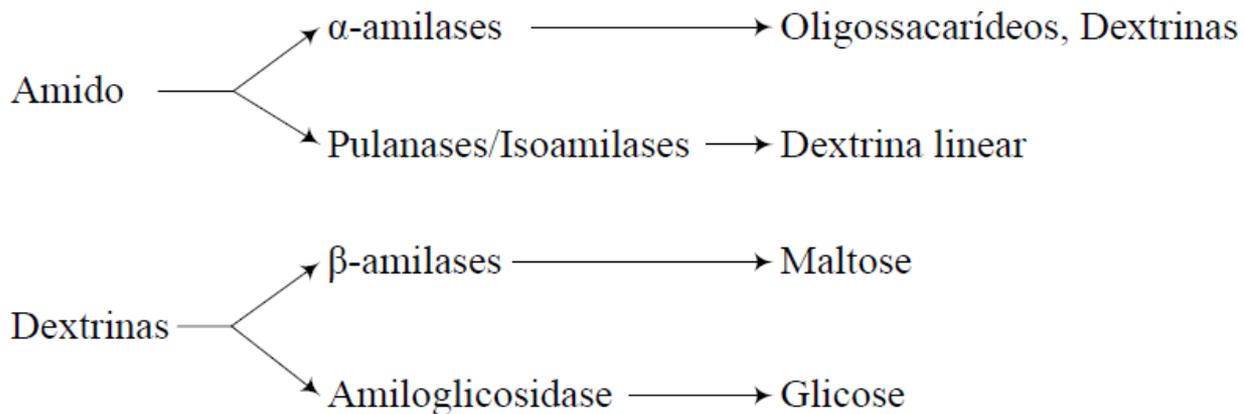


Figura 8 – Hidrólise enzimática do amido pelas enzimas amilolíticas, adaptado de Aehe (2007)

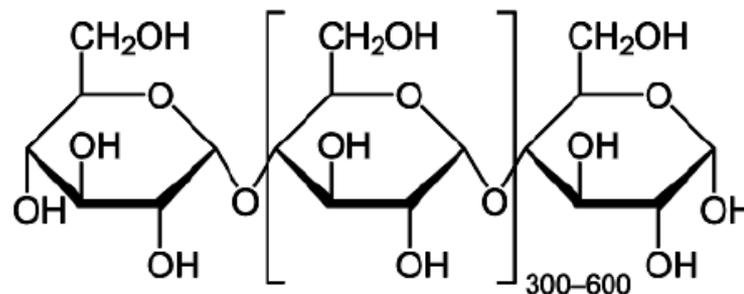


Figura 4 – Estrutura da amilose. Adaptado de Tester; Karkalas e Qi (2003)

Rotas de hidrólise: hidrólise **enzimática** e hidrólise ácida

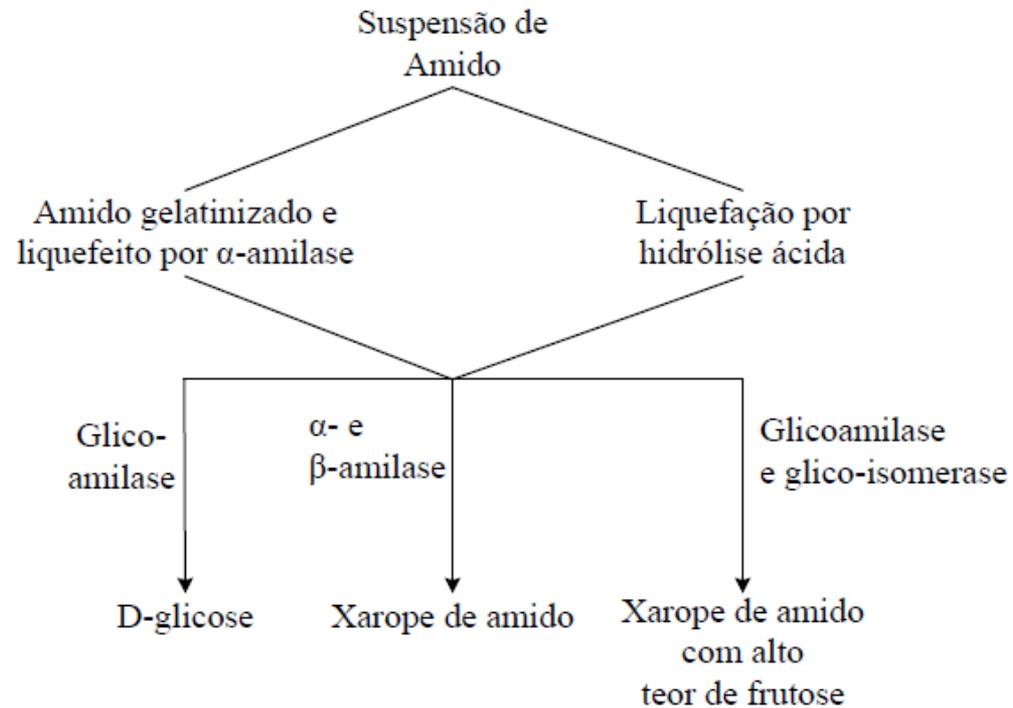
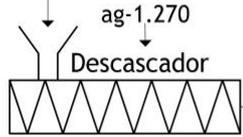


Figura 11 – Fluxograma das hidrólises ácida e enzimática do amido, Aehle(2007)

1.000 kg mandioca (b.u.)
ag-630; am-320; aç-20; na-30



ag-1.314; am-19;
aç-1,2; na-4,2

Moinho de facas



214 kg água

α -amilase (0,184 kg)

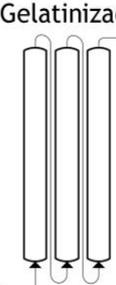


32 °C

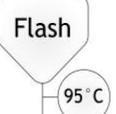
Regenerador

Vapor: 73,7 kg Mg⁻¹
127,4 °C
2,5 bar

105 °C



Vapor



95 °C

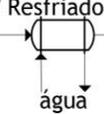


Glucoamilase e Maltogenase
(0,335 kg)

1.120 kg água



65 °C



32 °C



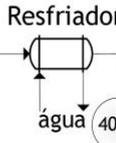
32 °C



32 °C

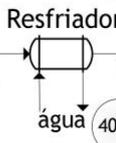


Vapor: 662 kg Mg⁻¹
127,4 °C; 2,5 bar



40 °C

163 kg Etanol
95,6 GL



40 °C

1.868 kg
Vinhaça

40 kg fibra e material
insolúvel + 33 kg H₂O

Legenda
ag - água;
am - amido;
aç - açúcares redutores;
na - outros.

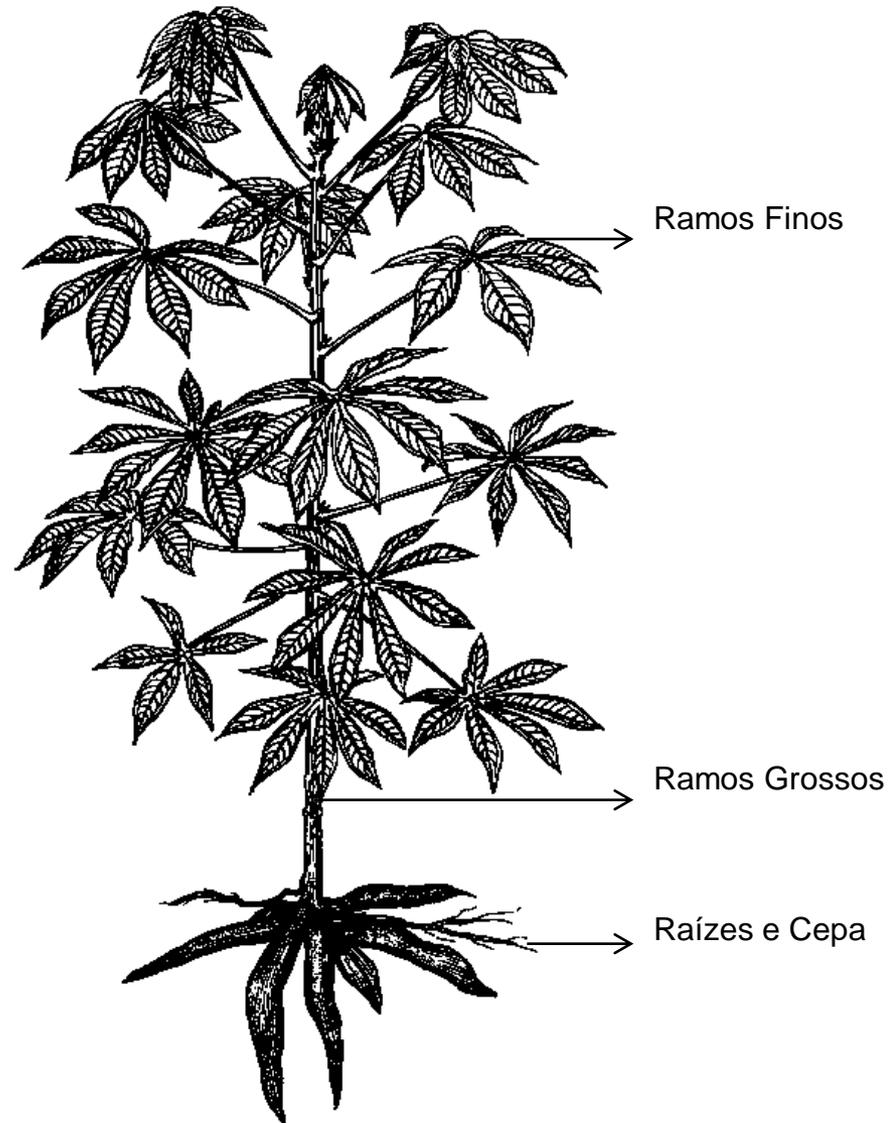
Tabela 3.1: Etapas e eficiências utilizadas para o cálculo do fluxo de massa

Etapa	Fator de conversão	Proporção
Fator estequiométrico de conversão de amido em glicose (Serra et al. 1978)	1,3071	$\frac{kg\ glicose}{kg\ amido}$
Eficiência da hidrólise do amido em glicose (Leonel e Cereda 1999)	0,9000	$\frac{kg\ glicose\ (produzida)}{kg\ glicose\ (estequiométrica)}$
Fator estequiométrico de conversão de glicose em etanol (IPT, 1990)	0,6471	$\frac{L\ etanol}{kg\ glicose}$
Eficiência da fermentação (IPT, 1990)	0,8910	$\frac{L\ etanol\ (produzido)}{L\ etanol\ (estequiométrico)}$
Eficiência da destilaria (IPT, 1990)	0,9663	$\frac{L\ etanol\ (recuperado)}{L\ etanol\ (produzido)}$

Utilização dos resíduos para produção de energia

- Família: Euphorbiaceae;
- Gênero: *Manihot*;
- Espécie: *Manihot esculenta*;

- Parte aérea (ramos, folhas e pecíolos) e subterrânea (cepa e raízes);



Ciclo Rankine com extração de vapor e condensação

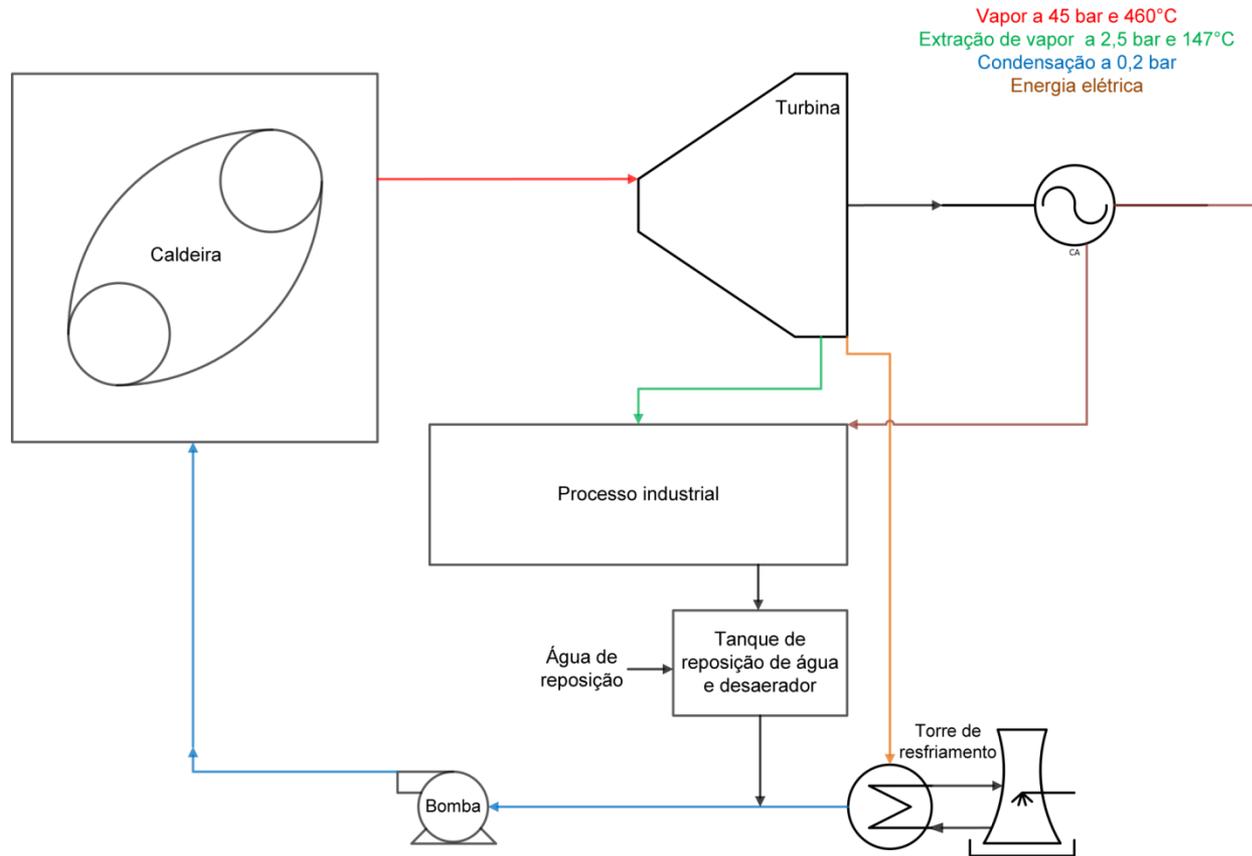


Tabela 4.21: Índices de produtividade por hectare e por ano para as culturas da mandioca e cana-de-açúcar

Mandioca (neste estudo)		Cana-de-açúcar		Fonte
Raiz (b.u.)	30,12 Mg	Colmo (b.u.)	85,00 Mg	Brasil (2011)
Resíduos (b.s.)	9,52 Mg	Bagaço (b.s.)	11,05 Mg	CTC (2005)
		Palha (b.s.)	11,90 Mg	CTC (2005)
Etanol	6.220 L	Etanol	6.800 L	Seabra (2008)
Eletricidade excedente	21,8 GJ	Eletricidade excedente*	4,4 GJ	Conab (2011)

*Média para o estado de São Paulo na safra 2009-2010

Autor	Cultura	Produtividade (Mg ha⁻¹)	Etanol (l ha⁻¹ ano⁻¹)
Silva et al. (1976)	Cana-de-açúcar	54	3.564
	Sorgo sacarino	-	3.775
	Mandioca	14,5	2.523
Serra et al. (1978)	Cana-de-açúcar	52	4.590
	Sorgo sacarino	35	2.080
	Mandioca	12,5	3.775

Açúcares e amidos

Venkatasubramanian e Keim (1985)	Cana-de-açúcar	6 - 12	3.600 - 7.200
	Beterraba açucareira	5 - 7	3.000 - 4.200
	Sorgo sacarino	2 - 7	1.500 - 4.400
	Batata	3 - 7	1.800 - 4.200
	Milho	2 - 4	1.200 - 2.400
	Mandioca	3 - 12	1.800 - 7.200

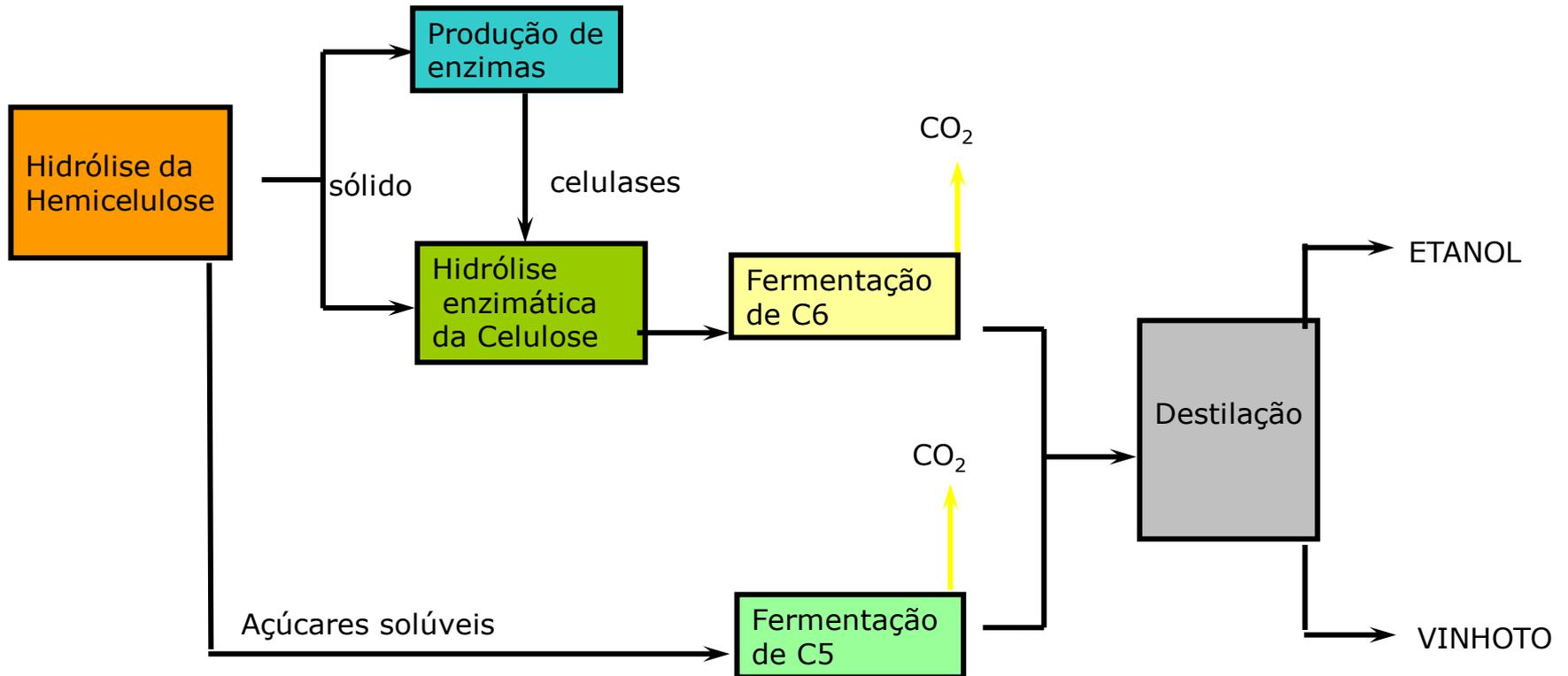
		Ano		Ano	
		1980	2005	1980	2005
		Leal et al. (2008)	Cana-de-açúcar	45	72
Sorgo sacarino	35		50	1.925	6.000
Batata-doce	10		11,2	1.250	1.770
Milho	1,5		3	580	1.200
Mandioca	12		13,8	2.160	2.750
Salla (2008)	Cana-de-açúcar	85		7.199	
	Milho	6		1.980	
	Mandioca	33		6.197	



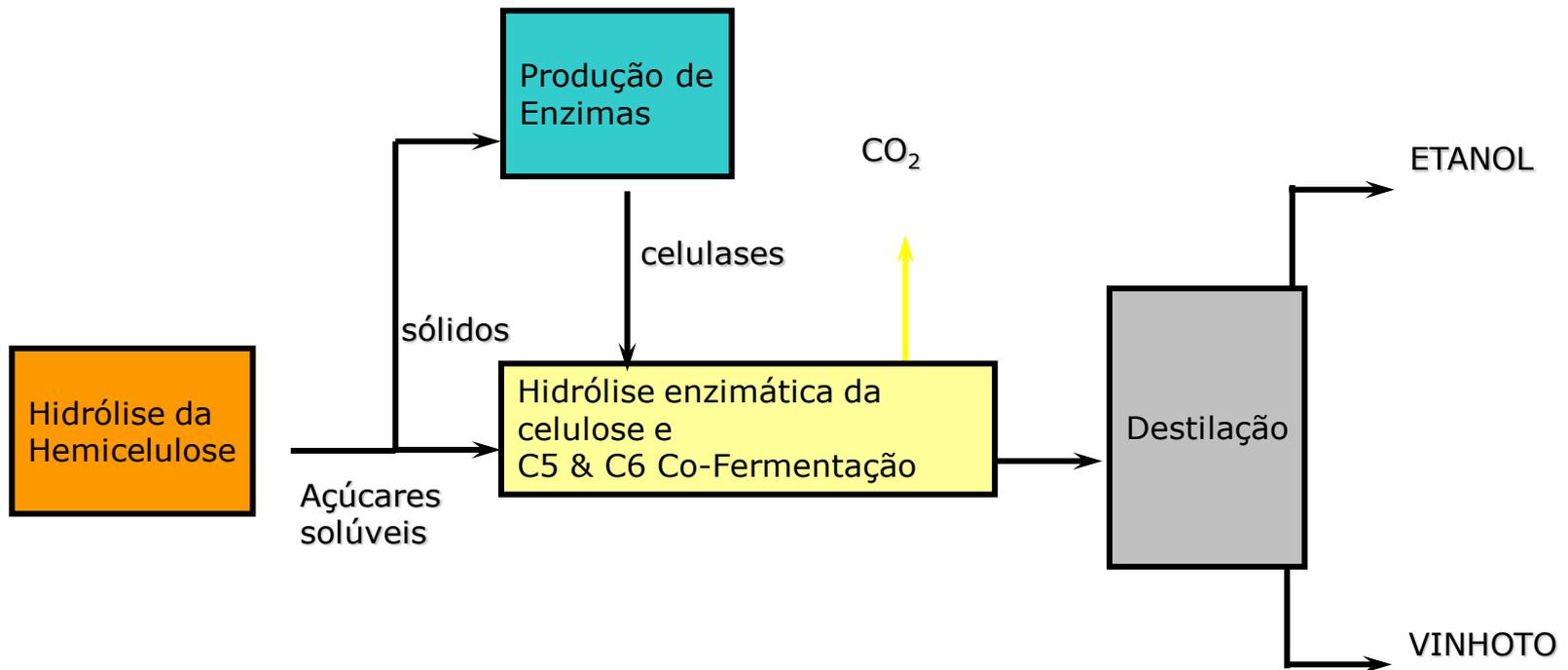
combustíveis líquidos

- hidrólise da biomassa:
 - transformação da celulose em açúcares
 - fermentação para produção de etanol
- tipos de hidrólise:
 - ácida
 - básica
 - enzimática

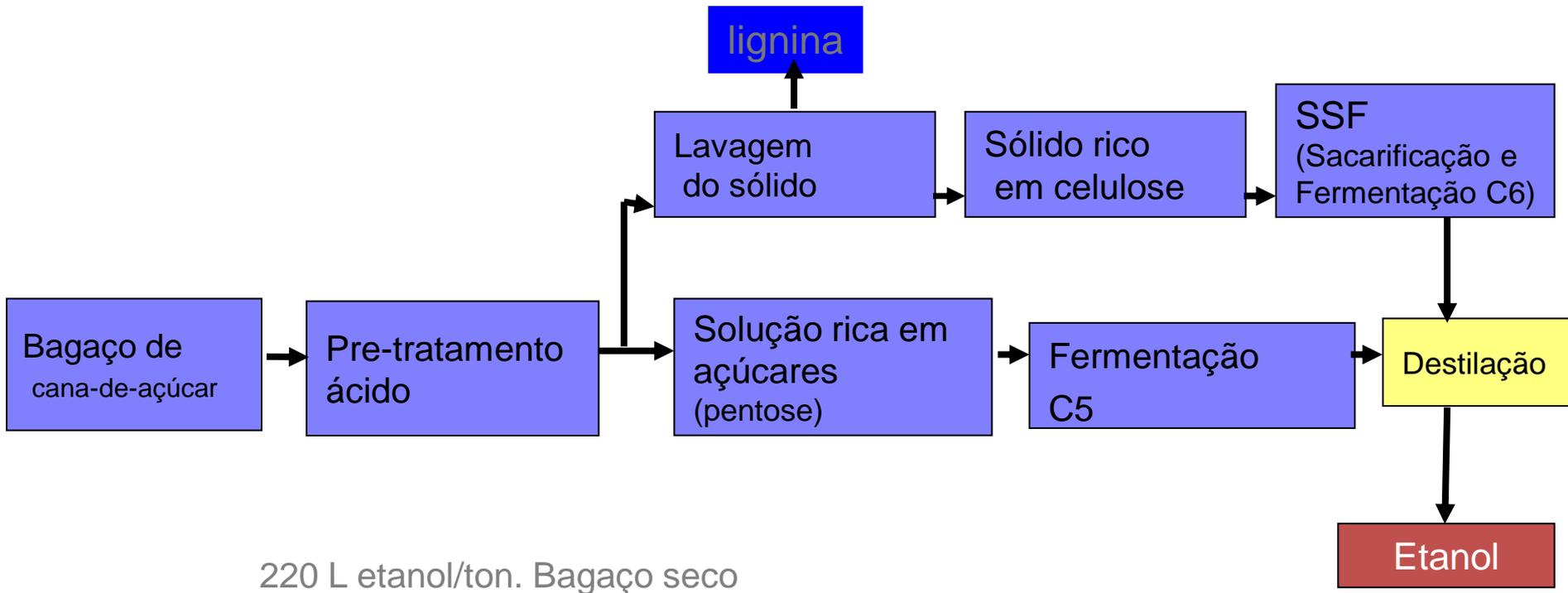
SHF: Hidrólise e Fermentação Separadas



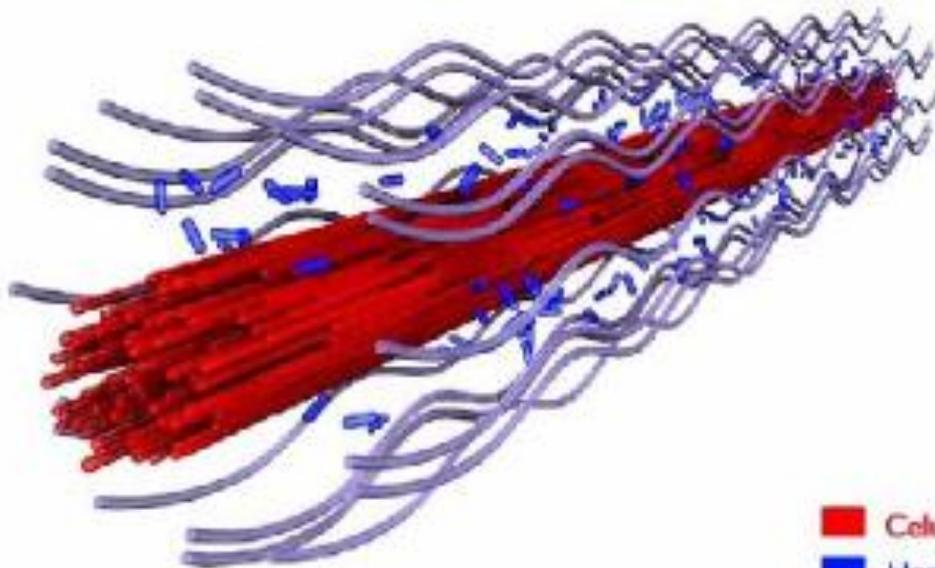
SSCF: Sacarificação e Co-Fermentação Simultâneas



PRODUÇÃO DE ETANOL



Fibra lignocelulósica



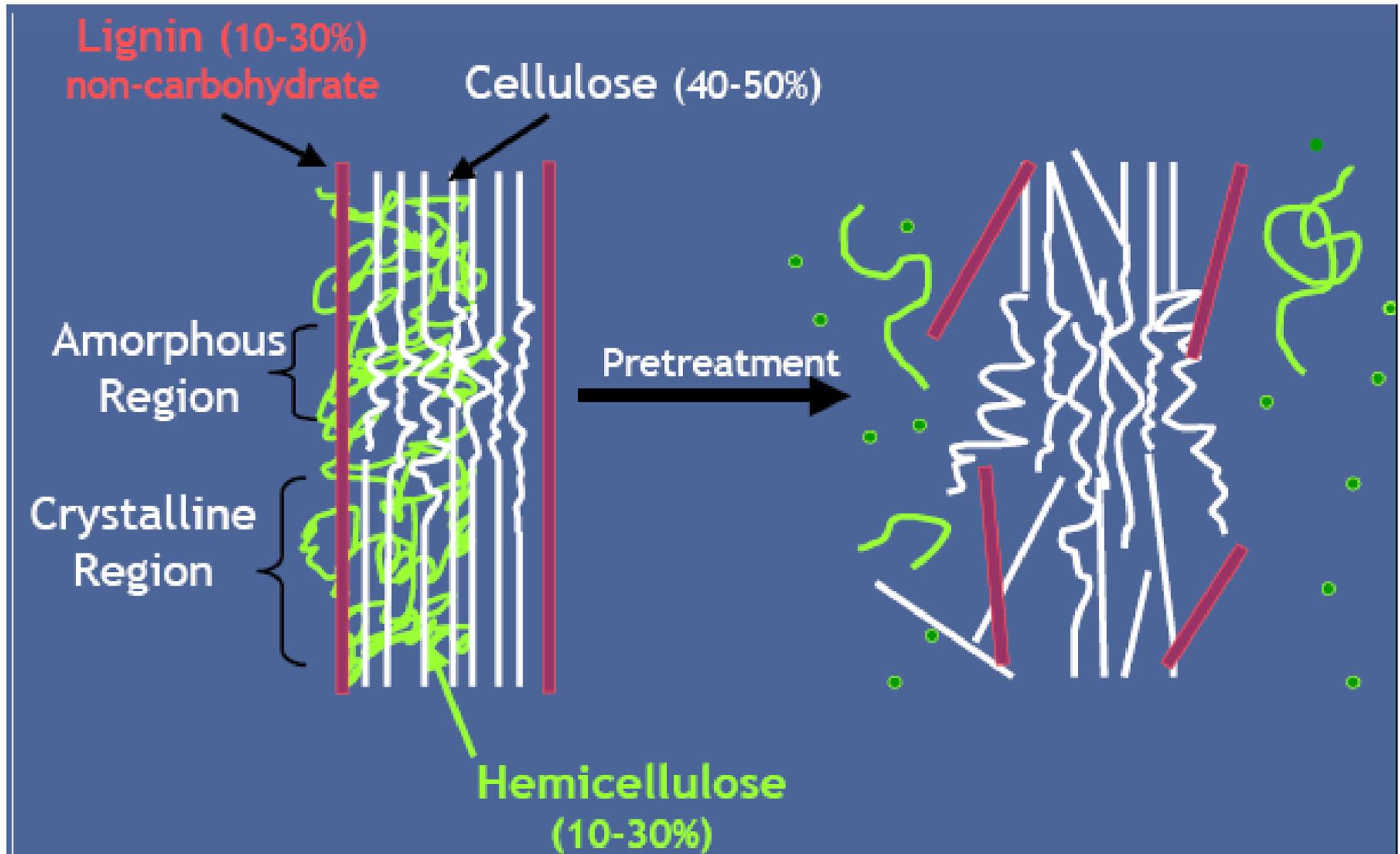
■ Celulose
■ Hemicelulose
■ Lignina

COMPOSIÇÃO BÁSICA

- Celulose (40 -60 %)
- Hemicelulose (20 – 40 %)
- Lignina (10 – 25%)

Pré-tratamento do material lignocelulósico

Visa desorganizar o complexo lignocelulósico e, como consequência, aumento da acessibilidade das enzimas às moléculas de celulose

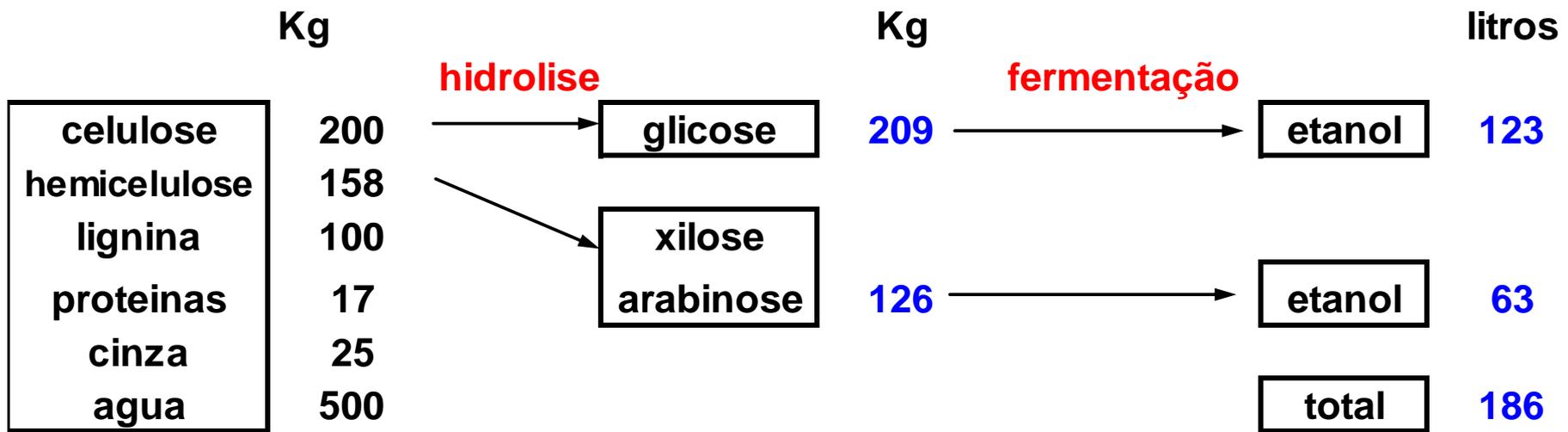


PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE PRÉ-TRATAMENTO

- ***EXPLOSÃO COM VAPOR***
- ***EXPLOSÃO COM VAPOR CATALISADA***
- ***HIDRÓLISE ÁCIDA DILUÍDA***
- ***TERMOHIDRÓLISE***

Setor Sucroalcooleiro e a Produção de Etanol. Transformações após o Protocolo de Kioto

Potencial de conversão do Bagaço em etanol



Resíduo sólido combustível: lignina



UNICAMP

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica

Grupo de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental



**REDE NACIONAL DE
COMBUSTÃO**