

*Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP*

Pirólise Rápida de Cana-de-Açúcar

Seminário NIPE 2015

Ricardo Baldassin Jr

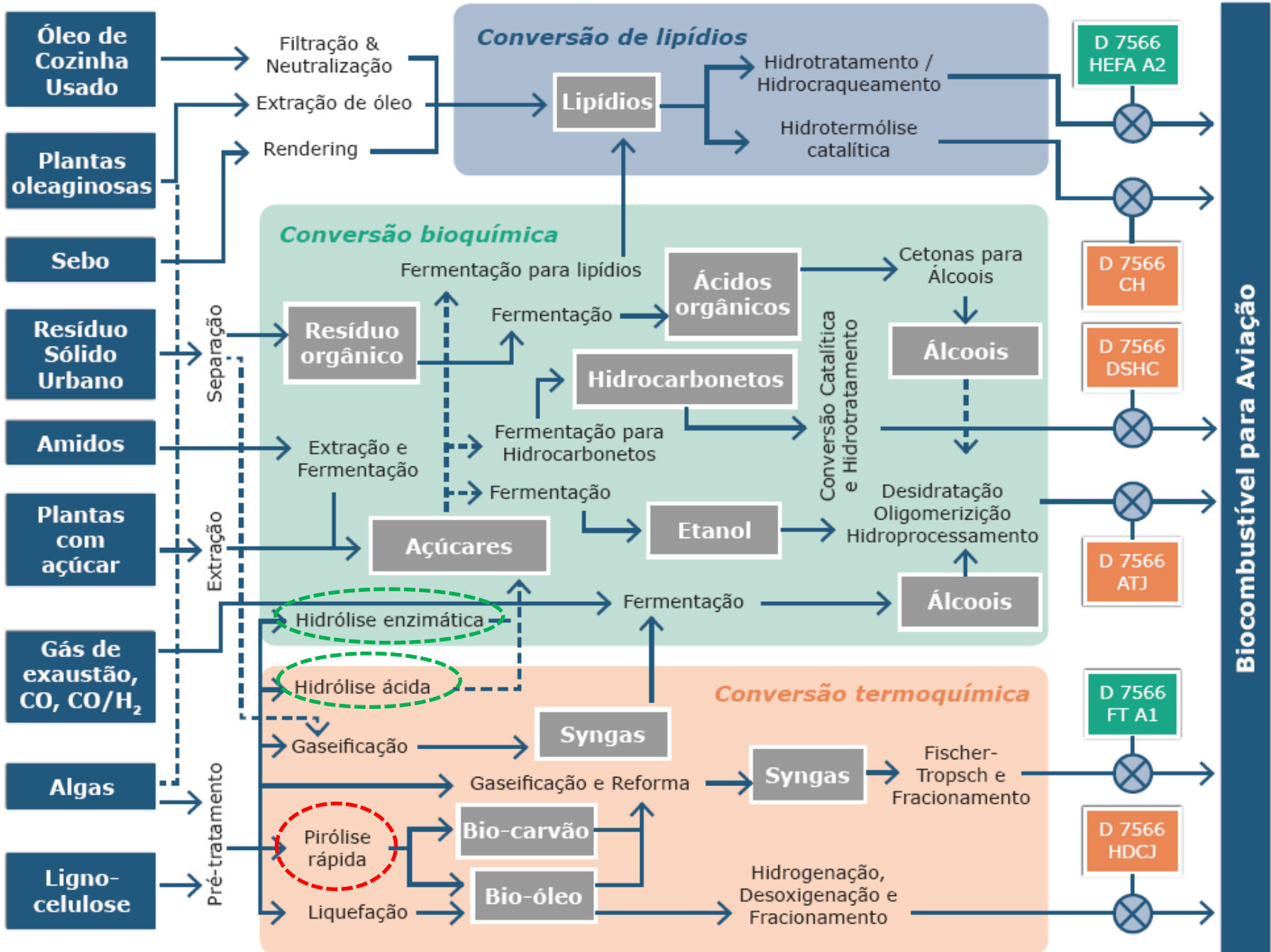
Orientador: Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Campinas - SP - 13 de maio de 2015

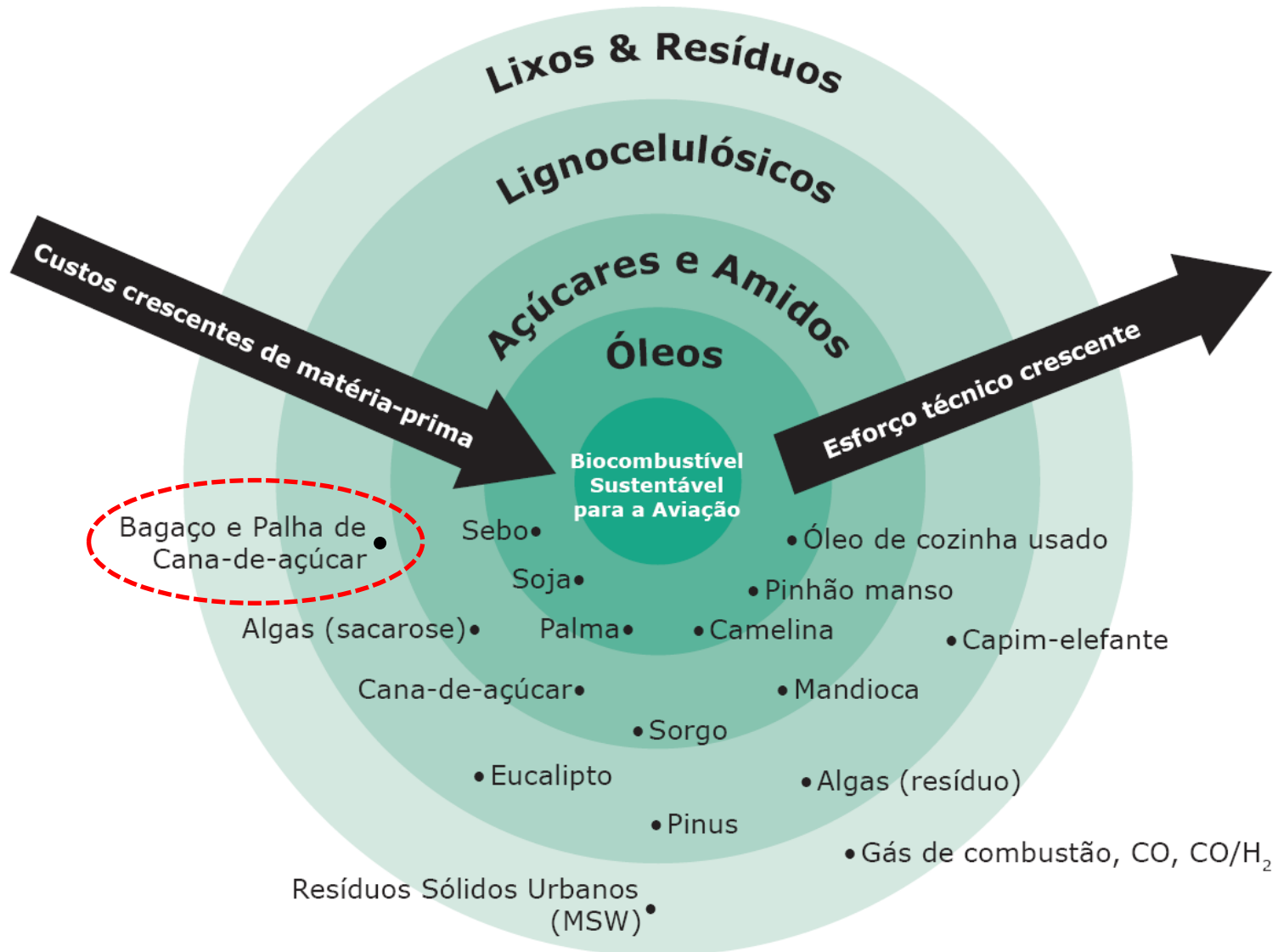


SUMÁRIO

- **O que pirólise**
- **Potenciais da pirólise**
- **A pesquisa de pirólise rápida na FEAGRI/UNICAMP**
- **A pirólise da cana-de-açúcar**
- **Os resultados obtidos**
- **Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros**



Produzindo biocombustíveis



A Pirólise: um processo termoquímico

Processo de degradação térmica na ausência de oxigênio, que basicamente, consiste da ruptura da estrutura molecular original em moléculas menores por meio do calor (ruptura das ligações carbono-carbono e formação de ligações carbono-oxigênio)

Celulose: $C_6H_{10}O_5$

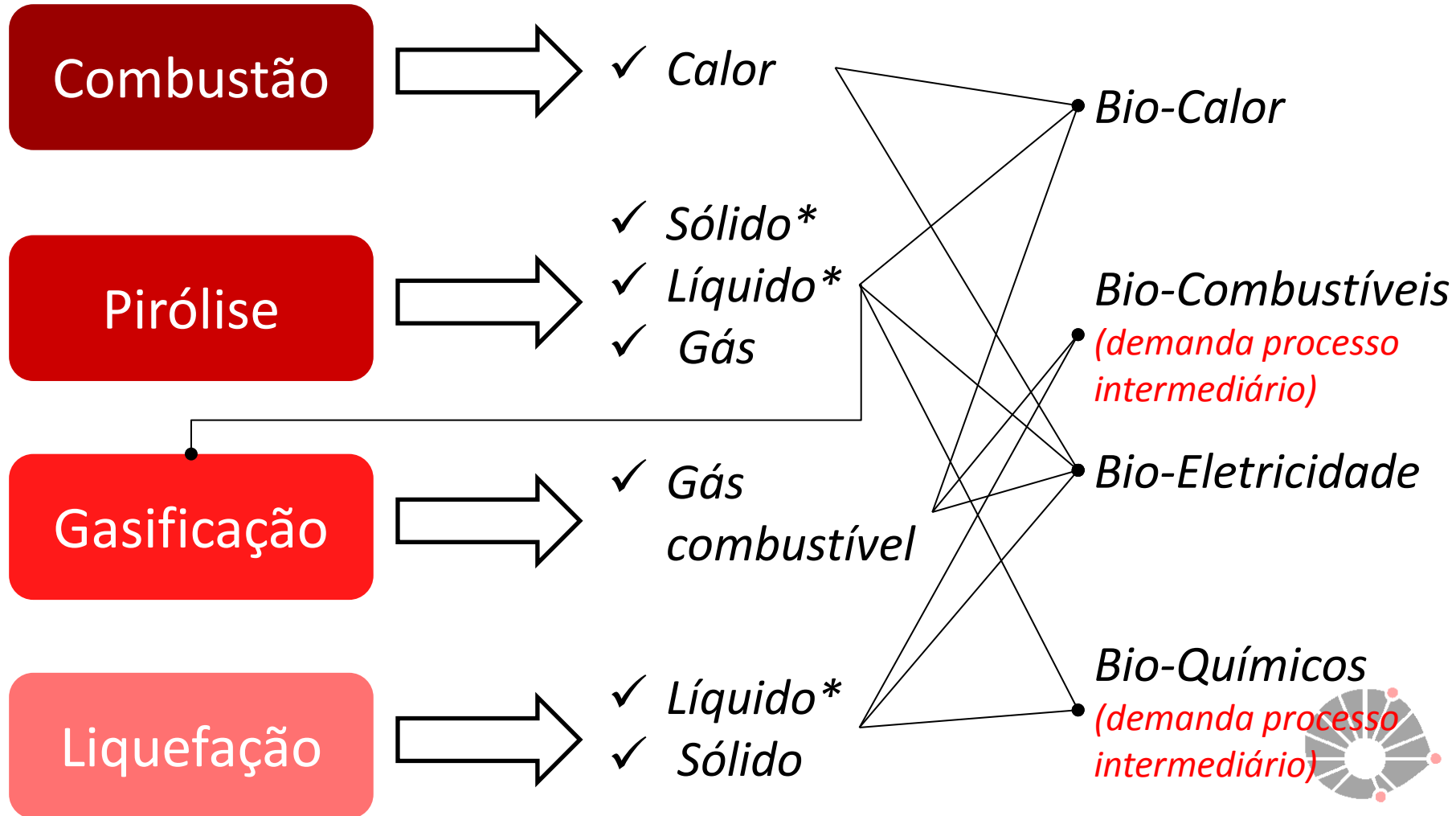
Hemicelulose: $C_5H_8O_4$

Lignina: $C_9H_{10}O_2$
 $C_{10}H_{12}O_3$
 $C_{11}H_{14}O_4$

OXIDAÇÃO - REDUÇÃO

- ✓ Fenóis
- ✓ Carvão
- ✓ Carboidratos
- ✓ Álcoois
- ✓ Aldeídos
- ✓ Cetonas
- ✓ Ácidos carboxílicos
- ✓ Ésteres
- ✓ Polímeros

Os processos termoquímicos

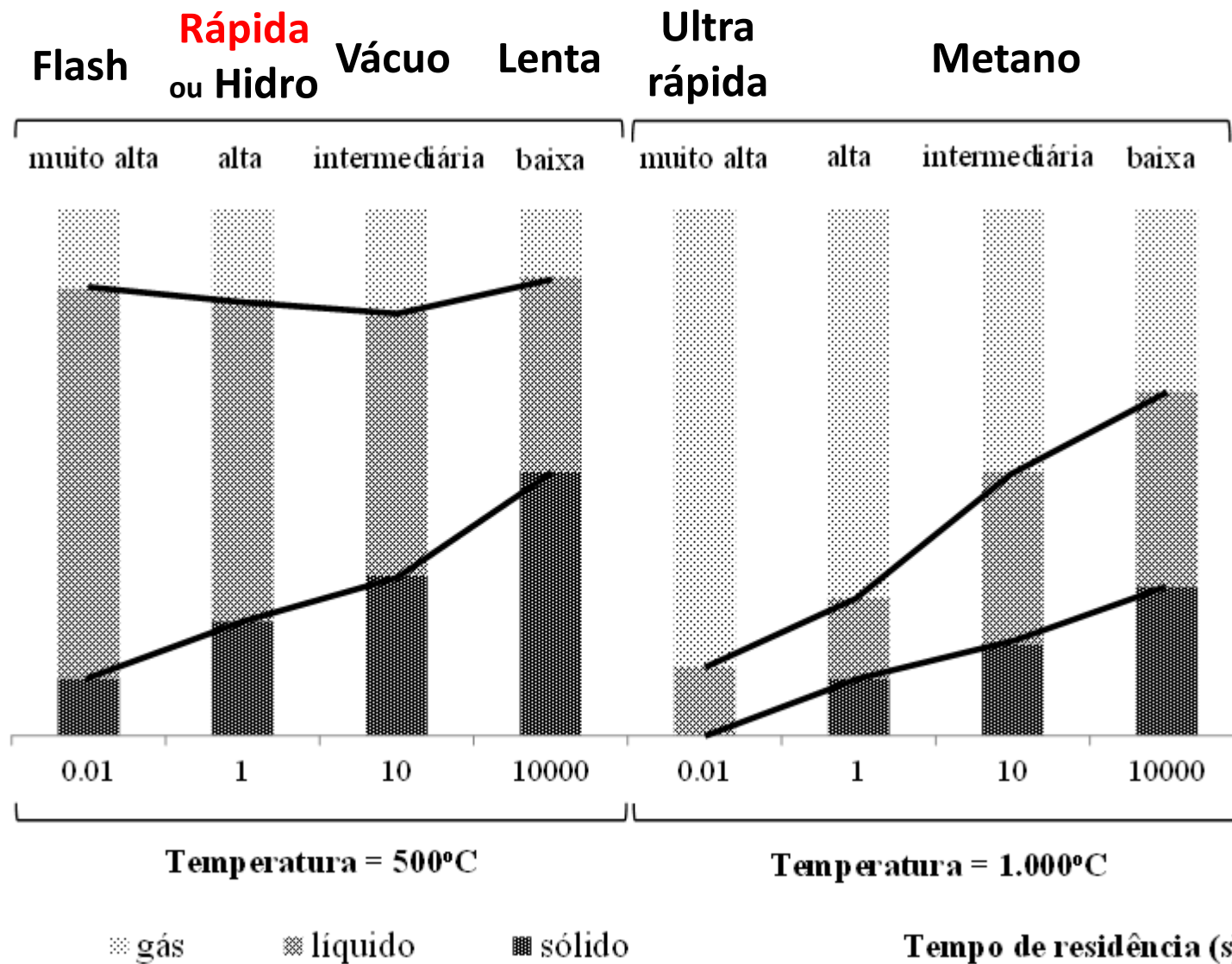


Potenciais da rota termoquímica

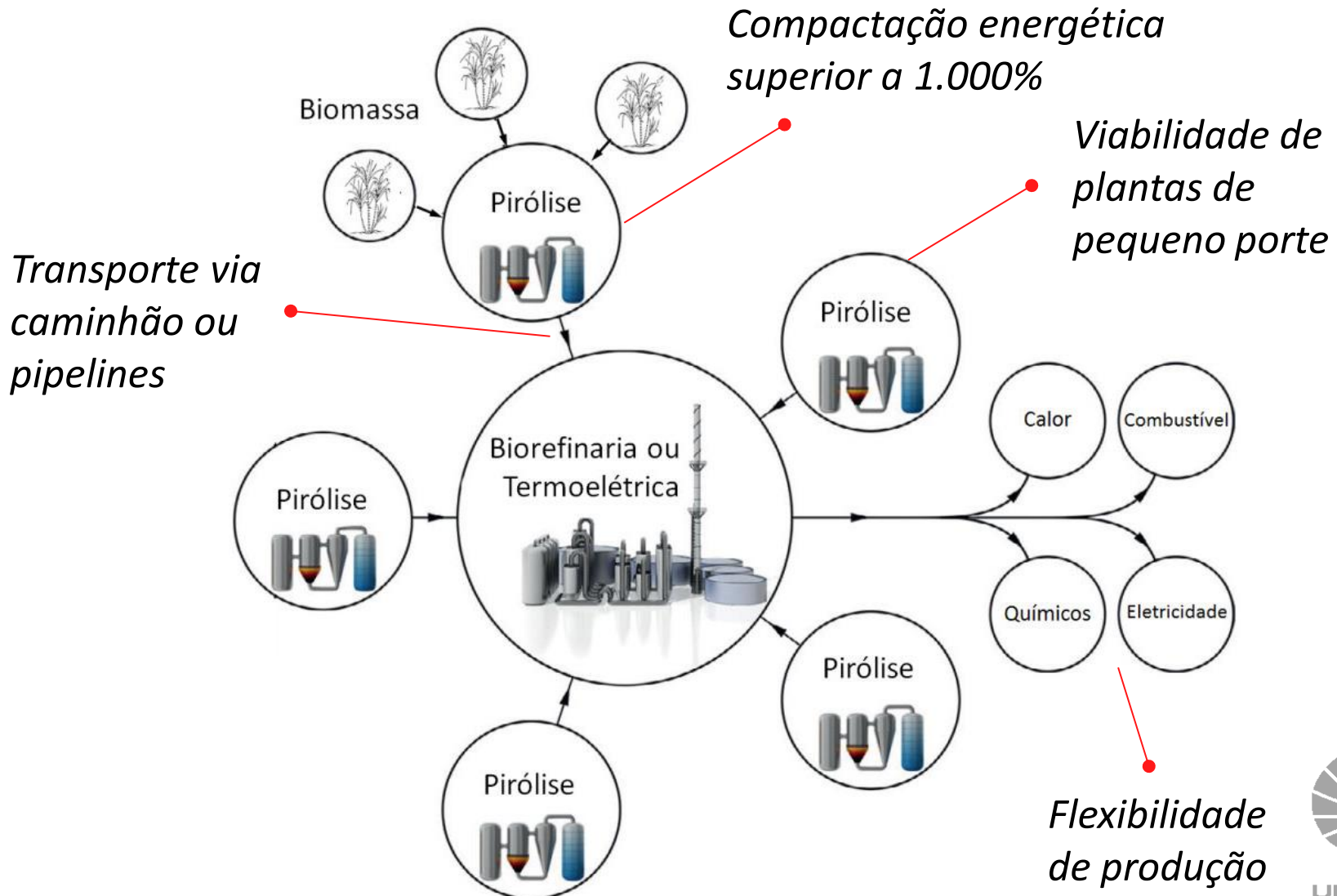
Flexibilização da produção de biocombustíveis e bioquímicos

	Produtos	Biológica	Física	Térmica
Bioenergia	Aditivos	○	○	○
	Álcool	○		○
	Carvão ✓			○
	Diesel		○	
	Líquidos (via Fischer-Tropsch) ✓			○
	Óleo combustível ✓			○
	Gás Combustível	○		○
	Gasolina			○
Bioquímicos	Hidrogênio	○		○
	Acetona	○		
	Carvão ativado ✓			○
	Butanol	○		
	Ethanol	○		○
	Fertilizantes / Pesticidas ✓	○		○
	Químicos finos ✓	○	○	○
	Aditivos alimentares ✓	○		○
	Hidrogênio	○		○
	Metano	○		○
	Metanol			○
	Resinas ✓			○

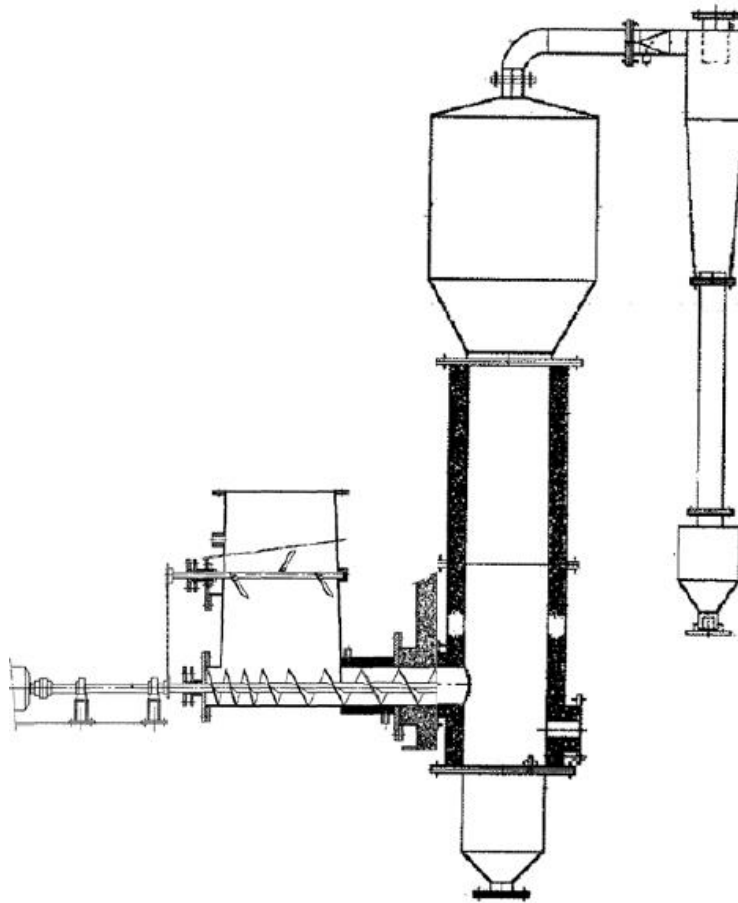
Os diferentes tipos de pirólise



Potenciais da pirólise rápida

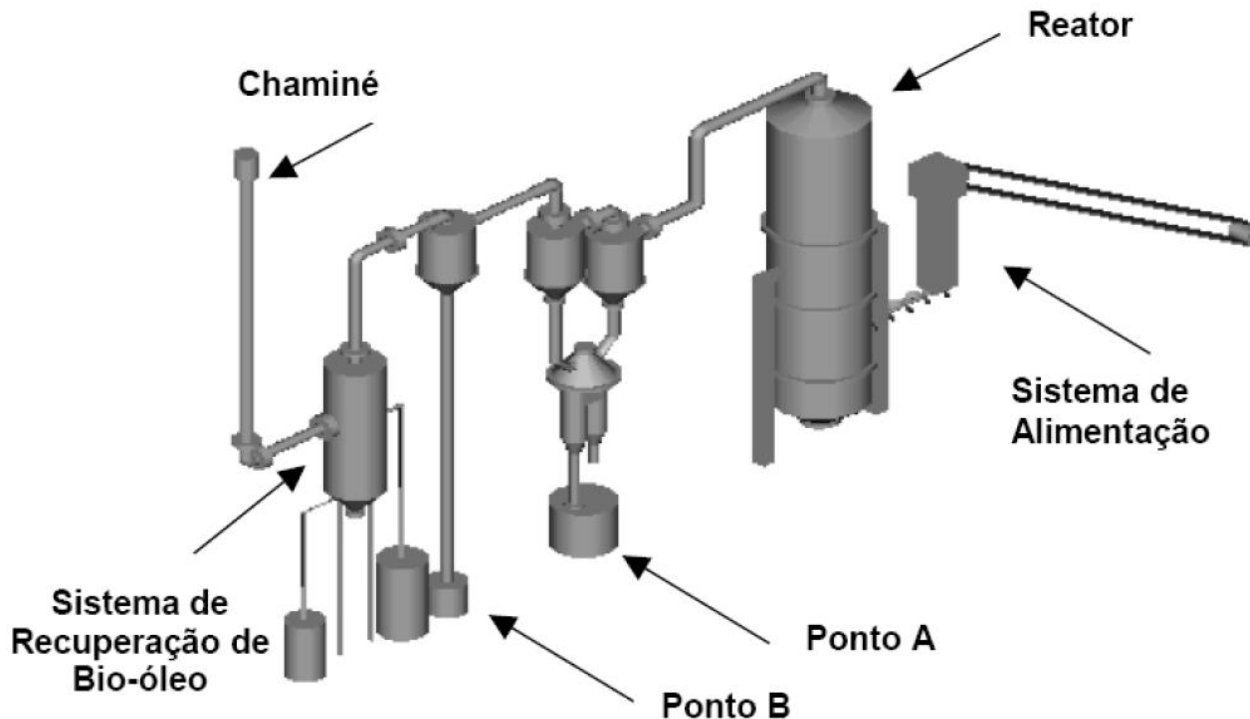


A experiência da Feagri/Unicamp



OLIVÁREZ GÓMEZ (1996) Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar

A experiência da Feagri/Unicamp



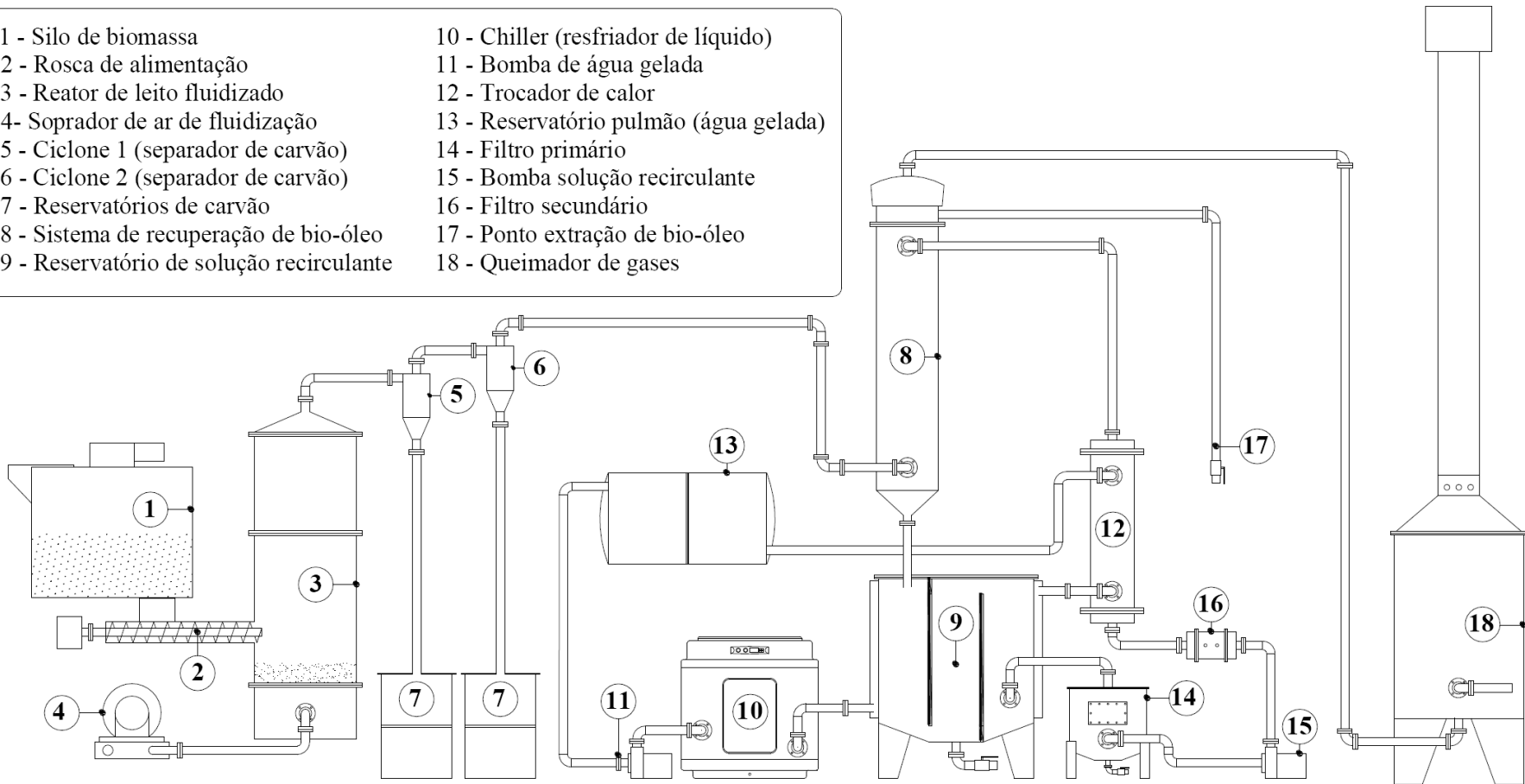
OLIVÁREZ GÓMEZ (2002) Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão

MESA-PÉREZ (2004) Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização

A experiência da Feagri/Unicamp

... atualmente

- | | |
|--|--|
| 1 - Silo de biomassa | 10 - Chiller (resfriador de líquido) |
| 2 - Rosca de alimentação | 11 - Bomba de água gelada |
| 3 - Reator de leito fluidizado | 12 - Trocador de calor |
| 4 - Soprador de ar de fluidização | 13 - Reservatório pulmão (água gelada) |
| 5 - Ciclone 1 (separador de carvão) | 14 - Filtro primário |
| 6 - Ciclone 2 (separador de carvão) | 15 - Bomba solução recirculante |
| 7 - Reservatórios de carvão | 16 - Filtro secundário |
| 8 - Sistema de recuperação de bio-óleo | 17 - Ponto extração de bio-óleo |
| 9 - Reservatório de solução recirculante | 18 - Queimador de gases |



PLANTA PILOTO (200 kg/h)

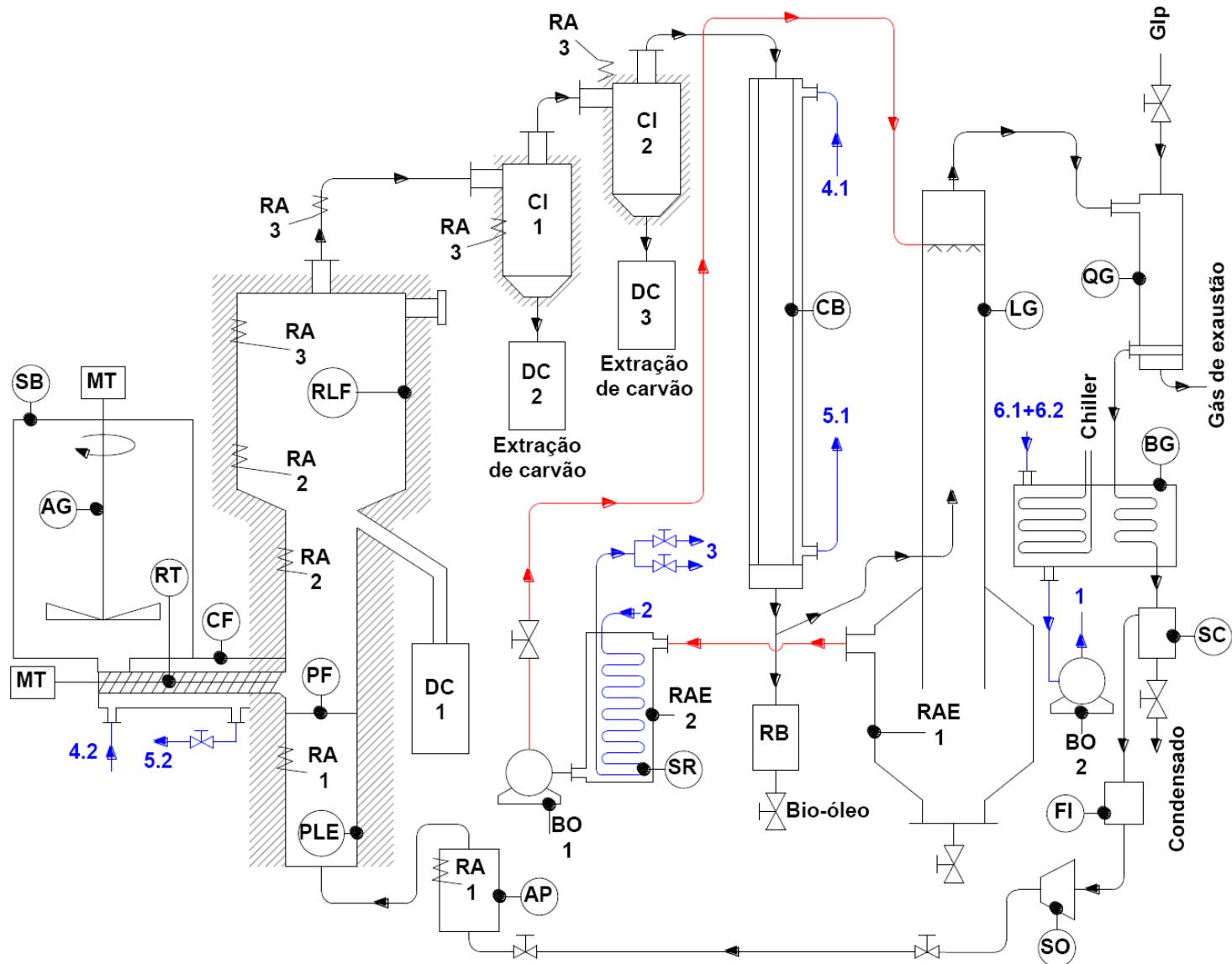
Adequações realizadas



A experiência da Feagri/Unicamp



A experiência da Feagri/Unicamp



Pré-tratamento das biomassas: Cana integral, Palha e Bagaço

1. Picagem



2. Secagem



a vácuo



ao sol

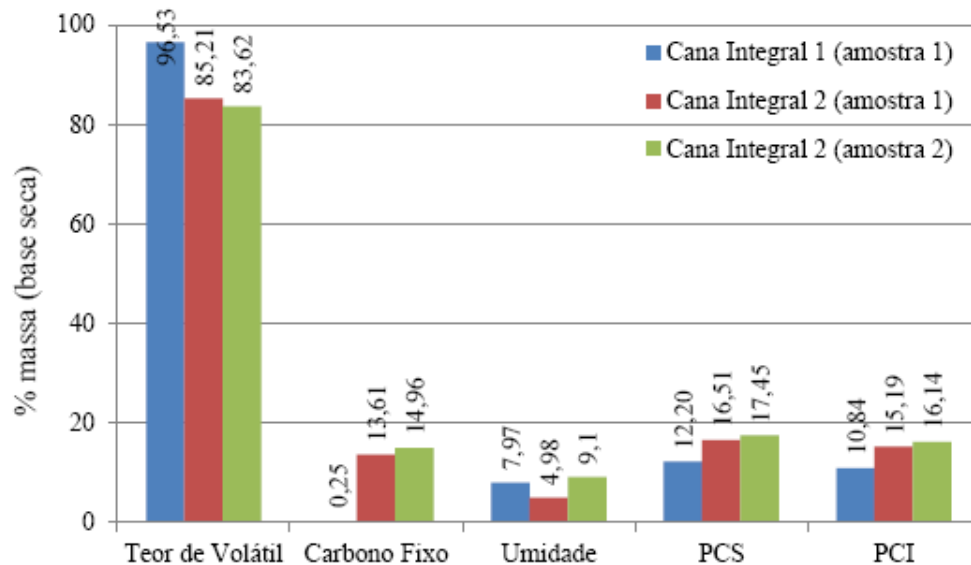
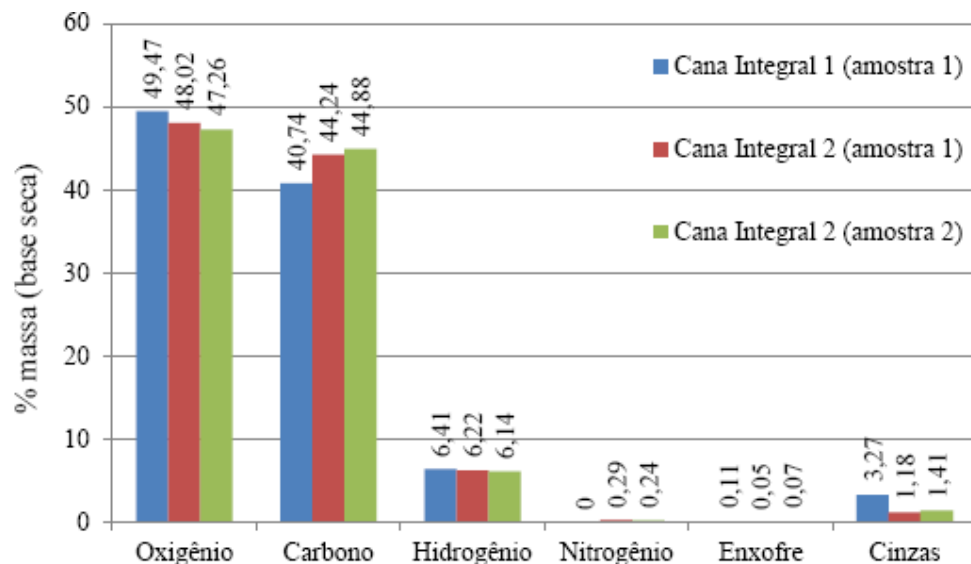
3. Moagem



RESULTADOS

Caracterização das biomassas

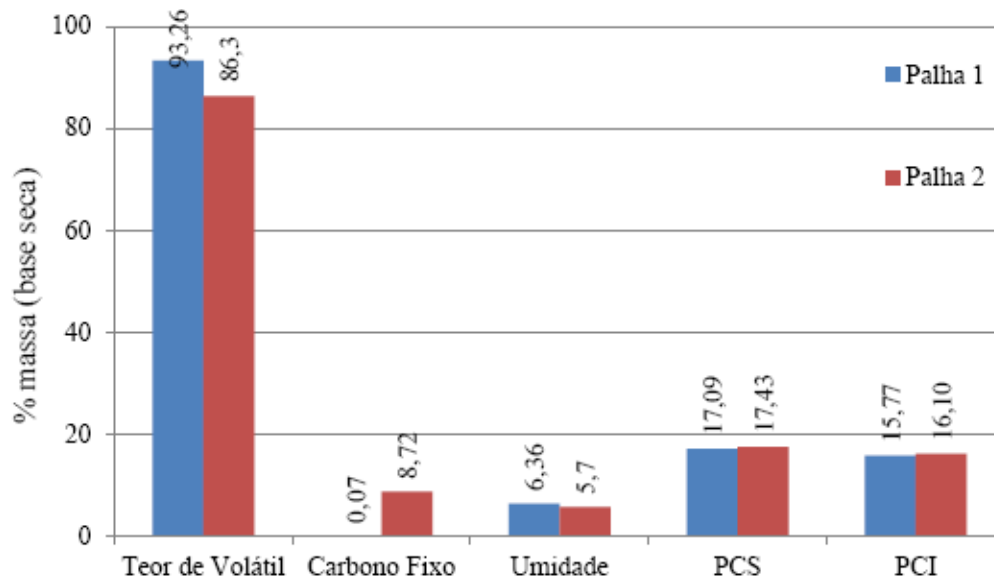
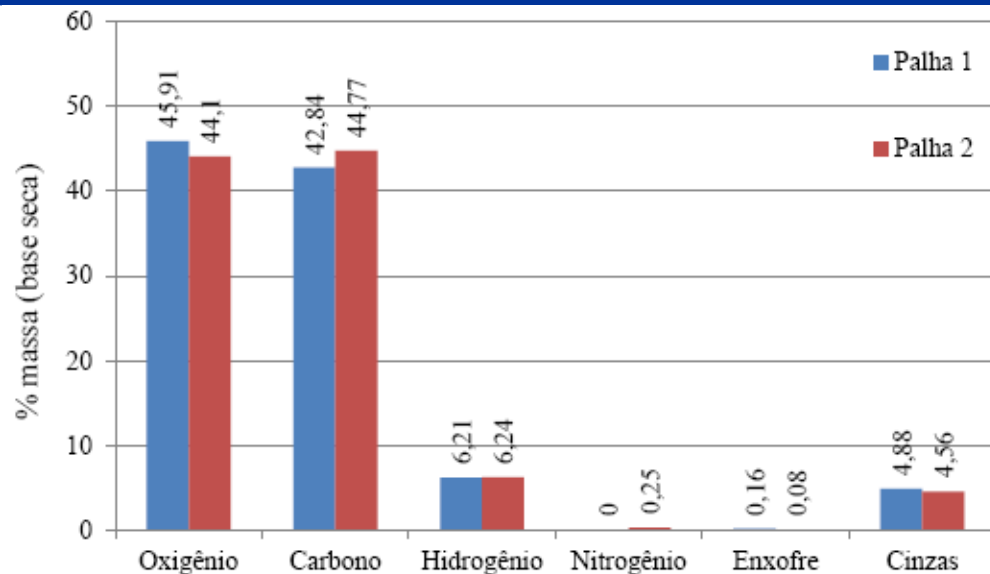
Cana Integral



RESULTADOS

Caracterização das biomassas

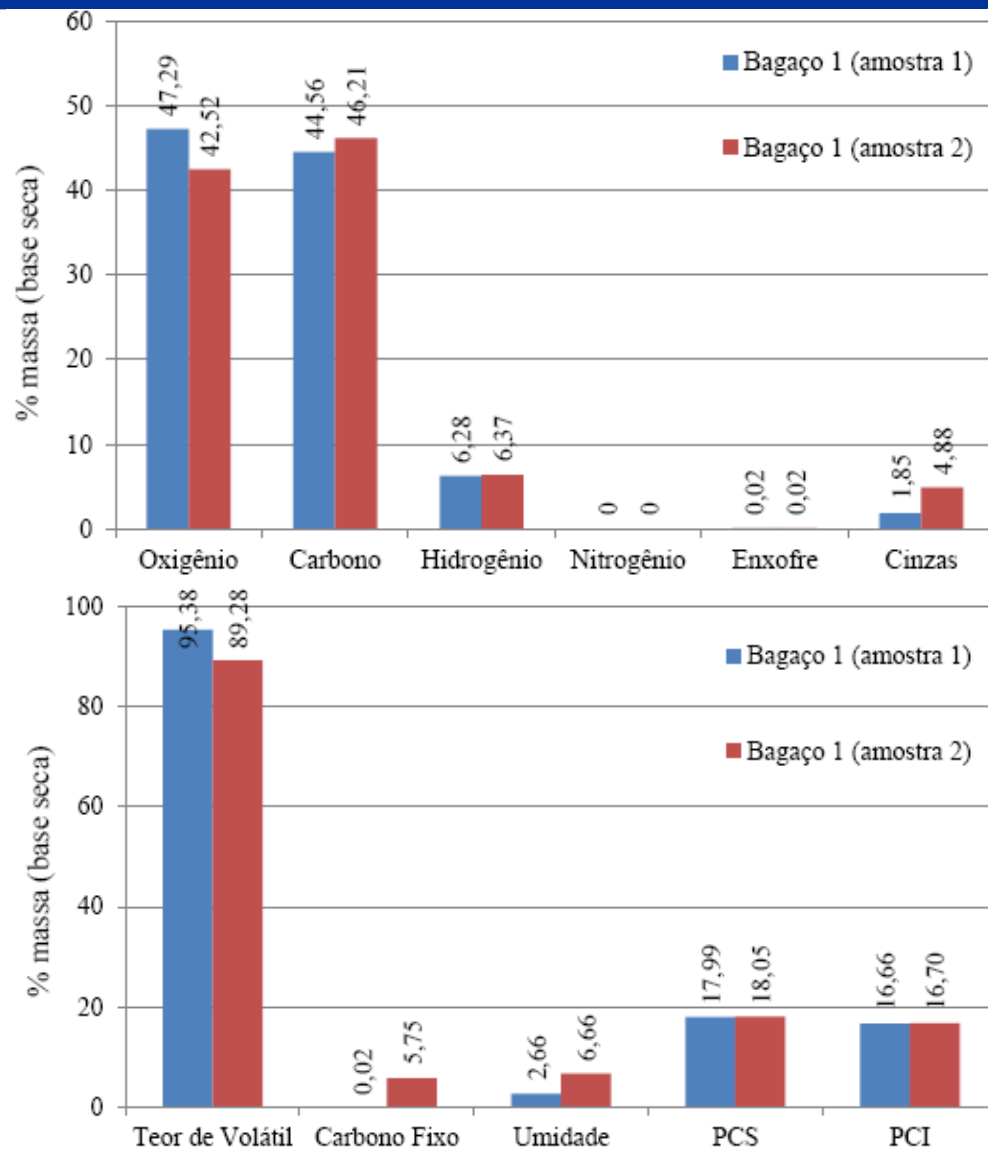
Palha



RESULTADOS

Caracterização das biomassas

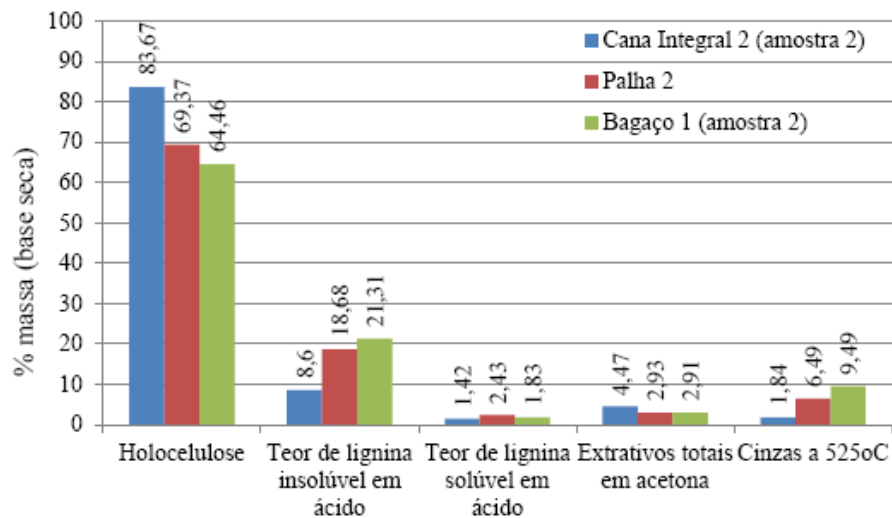
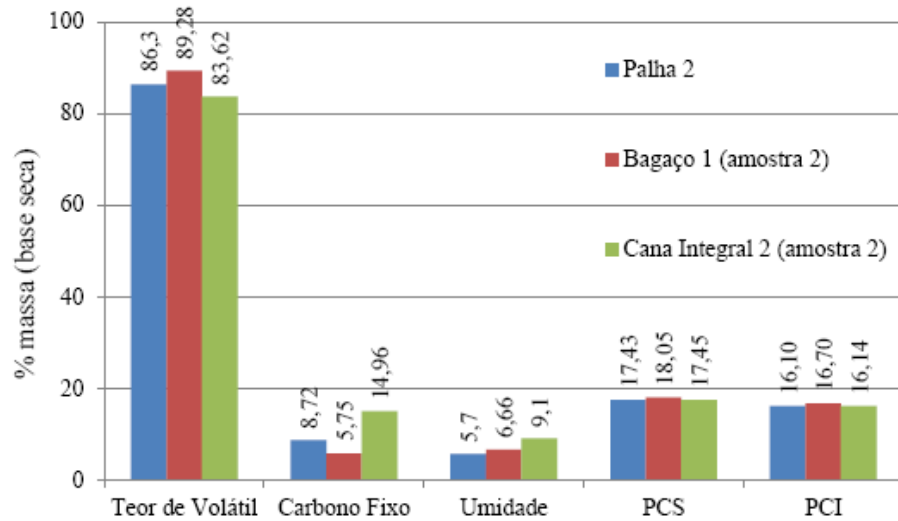
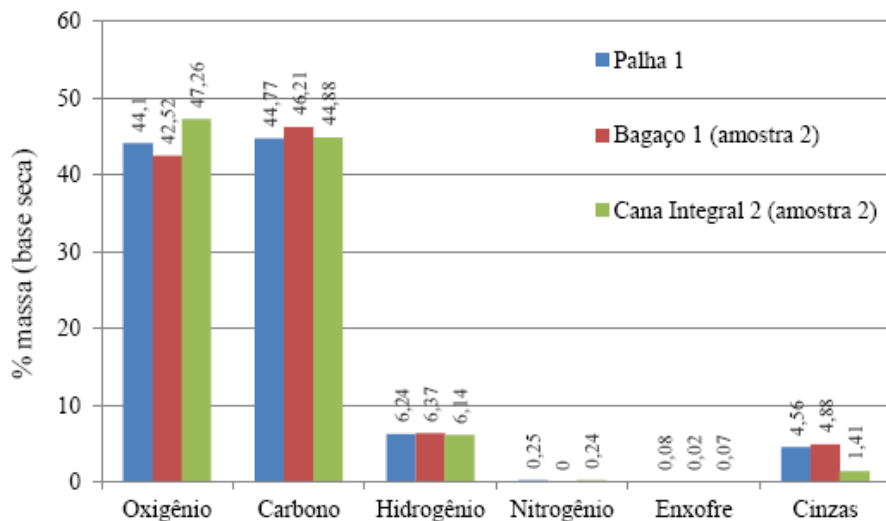
Bagaço



RESULTADOS

Caracterização das biomassas

Entre as 3 biomassas



Testes experimentais



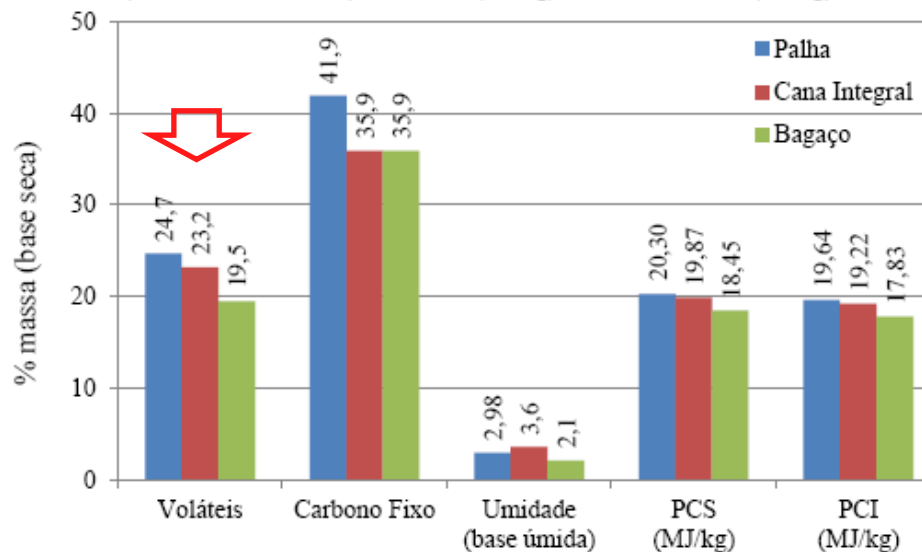
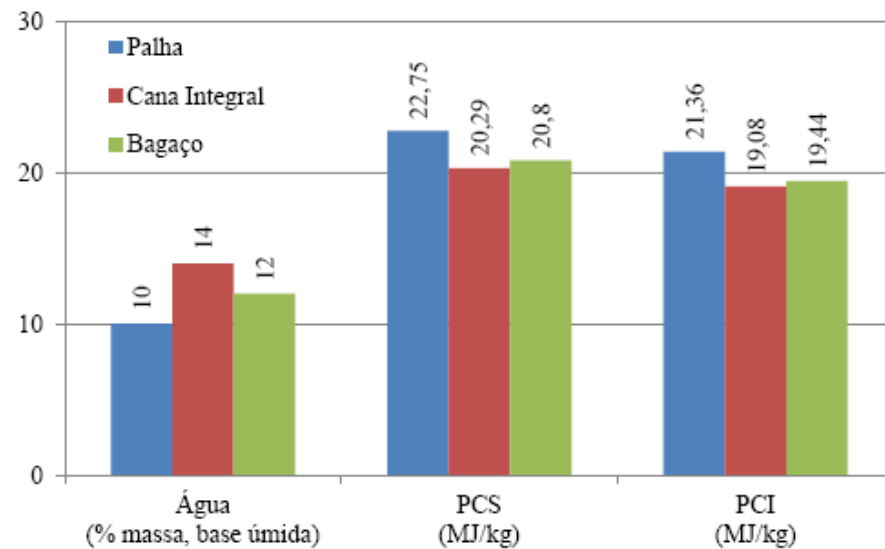
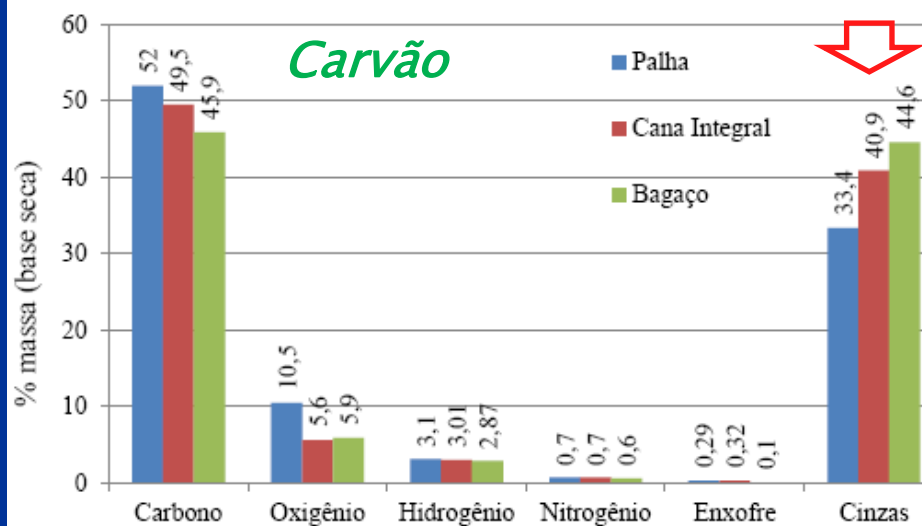
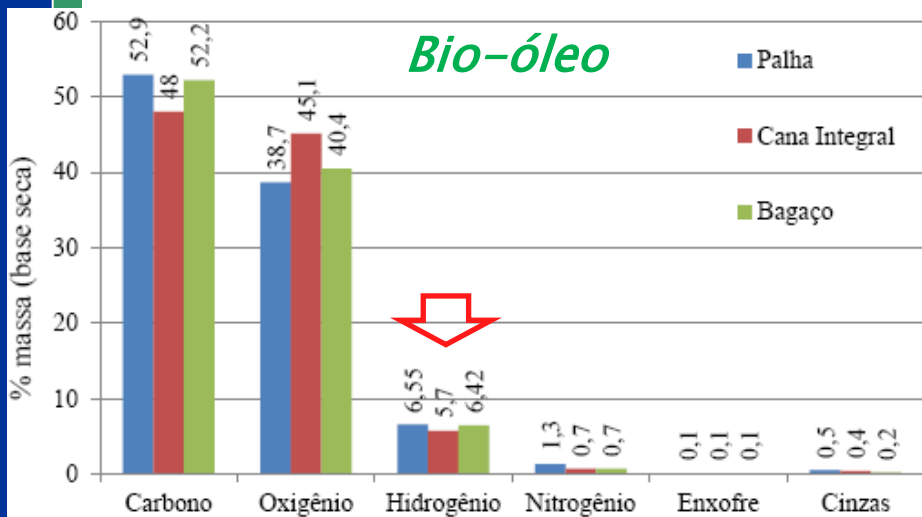
Experimentações

- ✓ **3x rodadas para cada biomassa**
- ✓ Temperatura leito: 400–450 °C
- ✓ Temperatura reator: 430–460 °C
- ✓ Pressão: 0,02 a 0,04 bar
- ✓ Vazão de biomassa: ~ **1 kg/h**
- ✓ Vazão de gás: **5 – 6 m³/h**
(0,1 m/s – leito / 0,03 m/s – topo)
- ✓ Carga de areia: 2,5 kg (3 cm)
(areia de quartzo 407/030)
- ✓ Tempo de experimentação: 90 min.



RESULTADOS

Experimentos de pirólise



RESULTADOS

Rendimentos da pirólise rápida

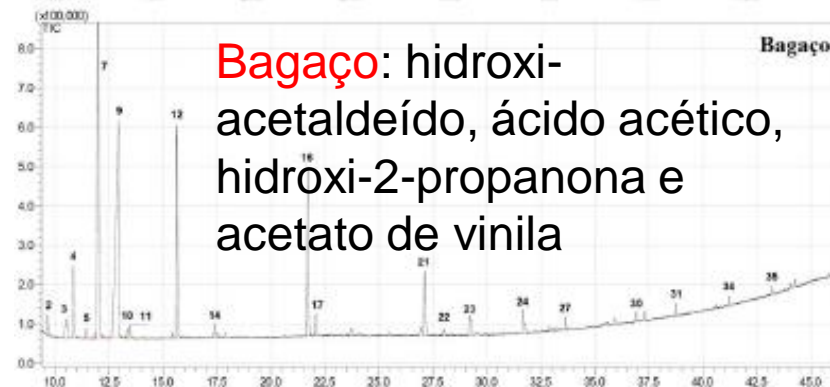
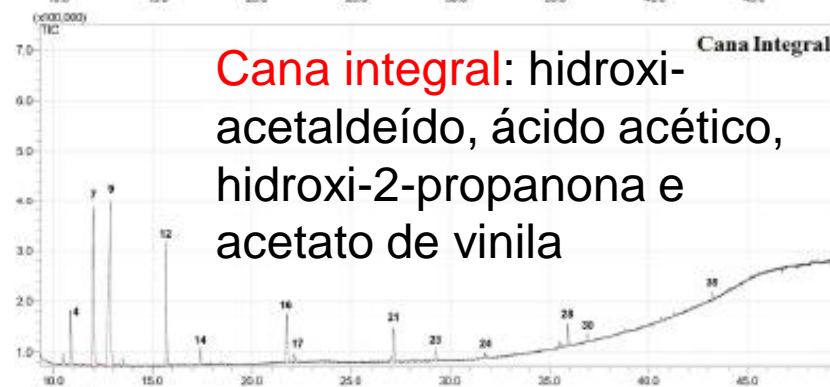
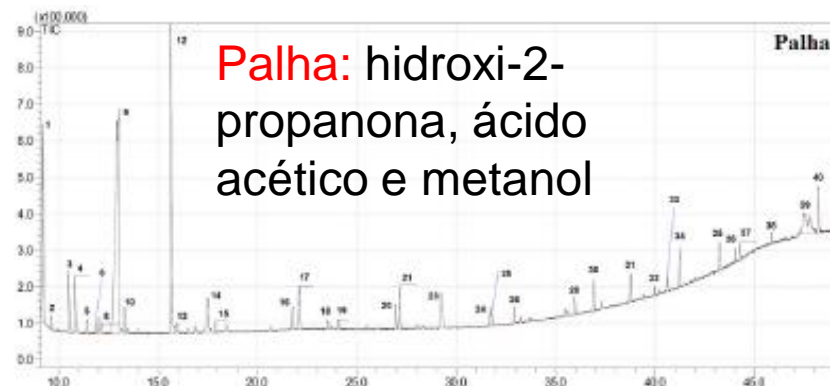
Rendimentos Mássicos de Produção		Palha	Cana Integral	Bagaço
Carvão	base de trabalho	26,8%	26,6%	25,3%
	base seca	27,6%	31,6%	26,6%
	base combustível	19,2%	18,9%	15,5%
Bio-óleo	base de trabalho	16,8%	12,2%	14,6%
	base seca	16,1%	11,5%	13,7%
	base combustível	16,8%	11,7%	14,4%
Total	base de trabalho	43,6%	38,8%	39,9%
	base seca	43,6%	43,1%	40,3%
	base combustível	36,0%	30,6%	29,9%

Rendimentos energéticos de conversão (%)		Palha	Cana Integral	Bagaço
Carvão		30,1	31,1	25,0
Bio-óleo		21,3	12,8	16,9
	Total	51,4	43,9	42,2

RESULTADOS

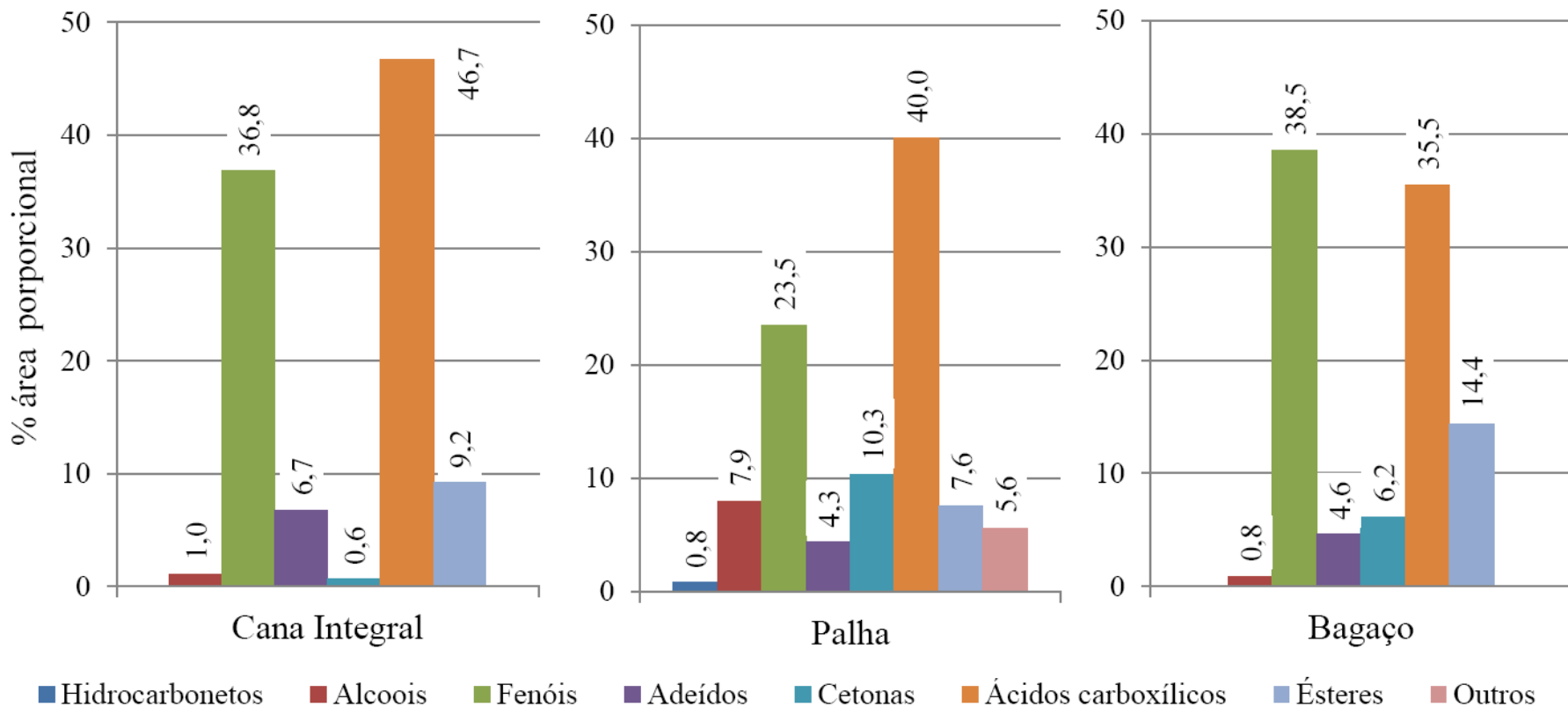
Identificação dos compostos orgânicos nos bio-óleos

ID	Composto	Fórmula molecular	Resultados (áreas proporcionais)		
			Palha	Cana Integral	Bagaço
1	Metanol	CH ₄ O	1600073	ND	ND
2	Metanoato de metila	C ₂ H ₄ O ₂	99701	ND	166974
3	Acetona	C ₃ H ₆ O	649474	ND	318724
4	Ácido fórmico	CH ₂ O ₂	586489	409755	844803
5	Acetato de metila	C ₃ H ₆ O ₂	106528	ND	69922
6	Propenol	C ₃ H ₆ O	87751	ND	ND
7	Hidroxi-acetaldeído	C ₂ H ₄ O ₂	ND	1185122	3865513
8	Iso-butanal	C ₄ H ₈ O	97718	ND	ND
9	Ácido acético	C ₂ H ₄ O ₂	7260485	2440065	4930755
10	Butanona	C ₄ H ₈ O	217536	ND	98265
11	Propilenoglicol	C ₃ H ₈ O ₂	ND	ND	141199
12	Hidroxi-2-propanona	C ₃ H ₆ O ₂	3420658	956929	2147961
13	Pentanal	C ₅ H ₁₀ O	74065	ND	ND
14	Ácido propanoico	C ₃ H ₆ O ₂	604407	126294	173457
15	2,3-Pentadiona	C ₅ H ₈ O ₂	122604	ND	ND
16	Acetato de vinila + NI	C ₄ H ₆ O ₂ +NI	322218	467085	1845351
17	1-Hidroxi-2-butanona	C ₄ H ₈ O ₂	496746	95151	253176
18	Ácido butírico	C ₄ H ₈ O ₂	89410	ND	ND
19	Ciclo-pentanona	C ₅ H ₈ O	131194	ND	ND
20	Ciclo-penten-3-ona	C ₅ H ₈ O	321607	ND	ND
21	2-Furaldeído	C ₅ H ₄ O ₂	545315	296798	769594
22	Metiletiltona	C ₄ H ₈ O	ND	ND	67273
23	Acetato de 1-hidroxi-2-propanona + furanometanol	C ₅ H ₈ O ₃ +C ₅ H ₆ O ₂	575234	117727	328779
24	Crotonolactona	C ₄ H ₄ O ₂	215034	39970	335667
25	Butirolactona	C ₄ H ₆ O ₂	150423	ND	ND
26	2-Metil-2-ciclo-pentenona	C ₆ H ₈ O	160545	ND	ND
27	Ciclohexanona	C ₆ H ₁₀ O	ND	ND	111153
28	5-Metilfurfural + N.I.	C ₆ H ₆ O ₂ +NI	208311	133131	ND
29	2,4-Dimetilfurano	C ₆ H ₈ O	ND	ND	ND
30	Fenol	C ₆ H ₆ O	261207	55863	64962
31	3-Metil-ciclopentano-1,2-diona	C ₆ H ₈ O ₂	223243	ND	100952
32	Cresol, provavelmente	C ₇ H ₈ O	64243	ND	ND
33	Cresol	C ₇ H ₈ O	108364	ND	ND
34	o-Metoxi-fenol (guaiacol)	C ₇ H ₈ O ₂	298876	ND	69754
35	Etil-fenol	C ₈ H ₁₀ O	201353	54244	56495
36	2-Metoxi-cresol	C ₈ H ₁₀ O ₂	84761	ND	ND
37	Naftaleno + di-hidrobenzofurano	C ₈ H ₁₀ +C ₈ H ₈ O	160194	ND	ND
38	p-Etilguaiacol	C ₉ H ₁₂ O ₂	86094	ND	ND
39	Siloxano (proveniente da coluna cromatográfica)	-	1189521	ND	ND
40	Ftalatodedi-isobutila	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	512486	ND	ND



RESULTADOS

Identificação dos compostos orgânicos nos bio-óleos



Planta experimental de pirólise rápida:

- ✓ Desempenho satisfatório, entretanto, melhorias e aperfeiçoamentos serão necessários visando aumentar os rendimentos de conversão e o uso de energia.

Pré-tratamento de biomassa:

- ✓ Tecnologias operaram satisfatoriamente e o processo de secagem ao sol mostrou ser eficaz, mas essa prática para grandes volumes é inviável;

Caracterização das biomassas:

- ✓ De modo geral, não foram observadas diferenças significativas entre as biomassa;



Experimentos de pirólise rápida:

- ✓ Desempenho satisfatório
- Pontos positivos: injeção de biomassa, recuperação primária de carvão, sistema de recirculação de gases
- Melhorias necessárias: fluidização, condensação de bio-óleo

Produtos da pirólise:

- ✓ Não houve diferenças significativas entre os produtos (composições química do bio-óleo e carvão)
- ✓ Entretanto, foram observadas diferentes concentrações de ácidos carboxílicos e fenóis



CONCLUSÕES

Trabalhos futuros

Biomassas:

- ✓ cana integral (avaliação da degradação do açúcar no pré-tratamento)

Pré-tratamento:

- ✓ processo de secagem

Planta de planta de pirólise rápida:

- ✓ soprador de gases (inversor de frequência)
- ✓ sistema de aquecimento
- ✓ reator (fluidização)
- ✓ separadores de carvão (melhorias no coletor anexo)
- ✓ condensador de bio-óleo (separador centrífugo, rede de resfriamento dedicado)
- ✓ lavador de gases (barreiras internas na coluna de lavagem)
- ✓ queimador de gases (medidor de vazão e um analisador de gases, novo projeto)

Experimentos de pirólise rápida

- ✓ nova rodada de experimentos na planta experimental e piloto (palha, bagaço, cana integral e outras biomassas)
- ✓ aplicação dos produtos da pirólise (bio-óleo e carvão).



Apoio Financeiro



Agradecimentos



UNICAMP



Obrigado !!

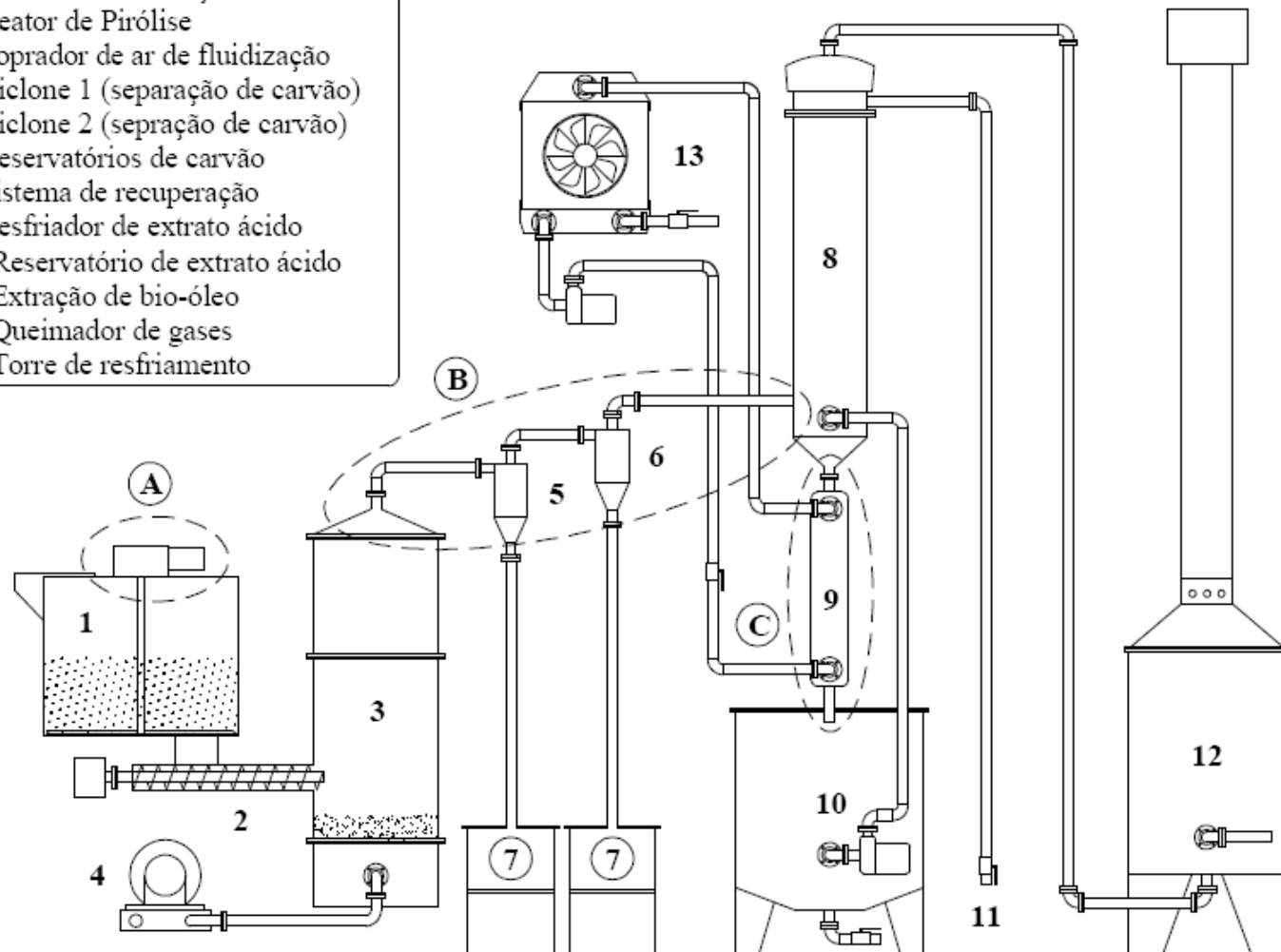


UNICAMP

PLANTA PILOTO (200 kg/h)

Adequações necessárias

- 1 - Silo de Biomassa
- 2 - Rosca de alimentação
- 3 - Reator de Pirólise
- 4 - Soprador de ar de fluidização
- 5 - Ciclone 1 (separação de carvão)
- 6 - Ciclone 2 (sepração de carvão)
- 7 - Reservatórios de carvão
- 8 - Sistema de recuperação
- 9 - Resfriador de extrato ácido
- 10 - Reservatório de extrato ácido
- 11 - Extração de bio-óleo
- 12 - Queimador de gases
- 13 - Torre de resfriamento



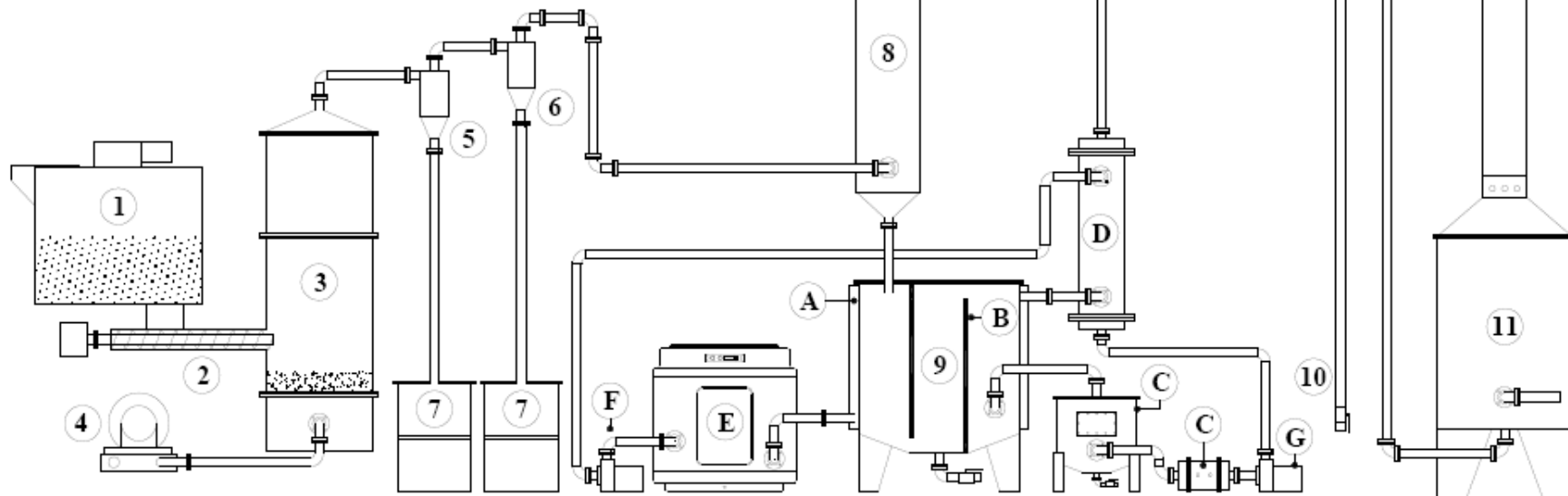
PLANTA PILOTO (200 kg/h)

Adequações realizadas

- 1 - Silo de biomassa
- 2 - Rosca de alimentação
- 3 - Reator de leito fluidizado
- 4 - Soprador de ar de fluidização
- 5 - Ciclone 1 (separador de carvão)
- 6 - Ciclone 2 (separador de carvão)
- 7 - Reservatórios de carvão
- 8 - Sistema de recuperação de líquido
- 9 - Reservatório da solução água- extrato ácido
- 10 - Ponto de extração de bio-óleo
- 11 - Queimador de gases

SISTEMA DE RESFRIAMENTO E FILTRAGEM

- A - Camisa fria
- B - Chicanas
- C - Filtros de sucção (primário e secundário)
- D - Trocador de calor casca-tubo
- E - Chiller (resfriador de líquido)
- F - Bomba de água gelada
- D - Bomba de recirculação da solução água-extrato ácido



PLANTA PILOTO (200 kg/h)

Adequações realizadas



SISTEMA DE MONITORAMENTO

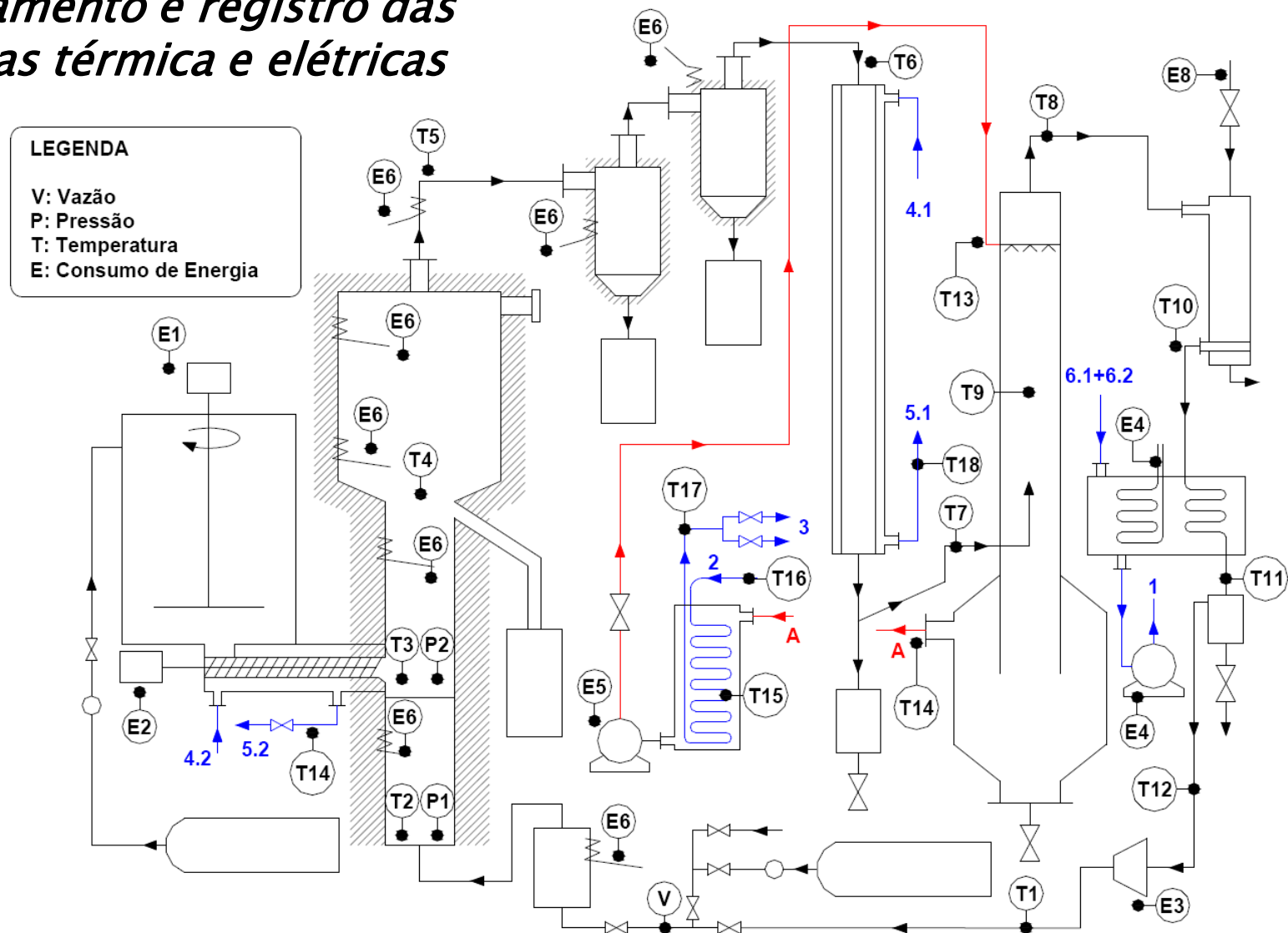
Planta experimental de pirólise rápida



SISTEMA DE MONITORAMENTO

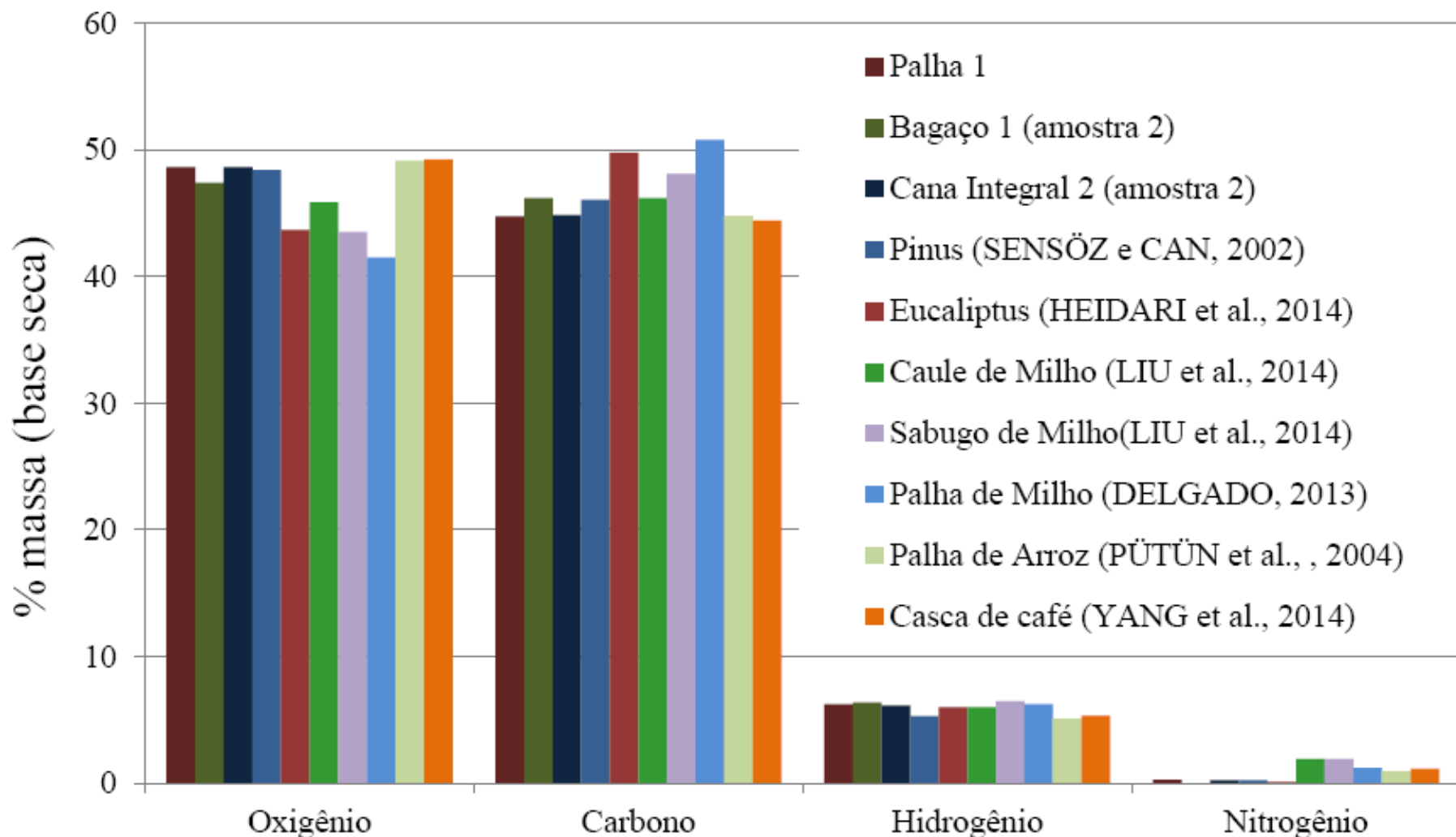
Planta experimental de pirólise rápida

Monitoramento e registro das grandezas térmica e elétricas



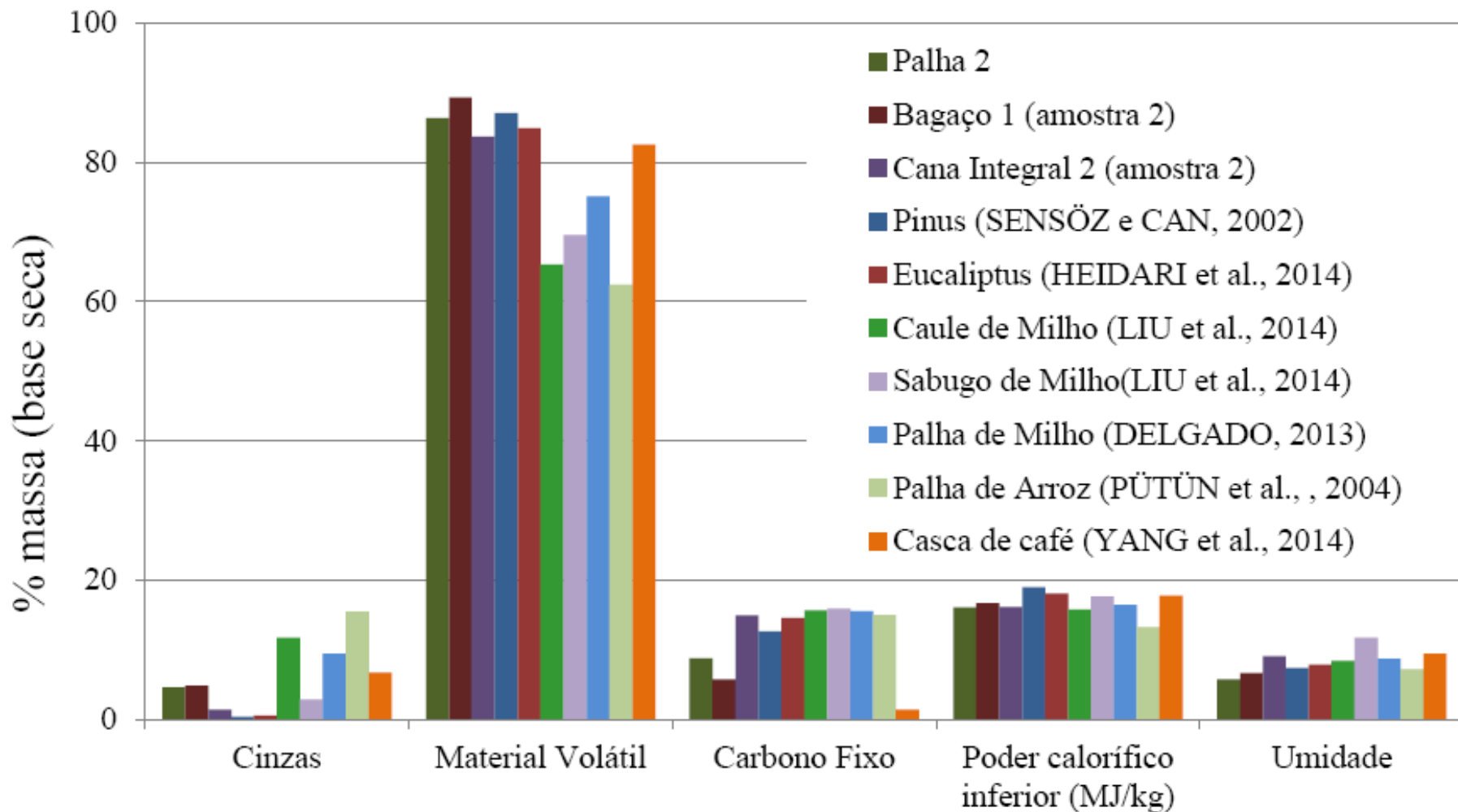
RESULTADOS

Comparativo entre biomassas



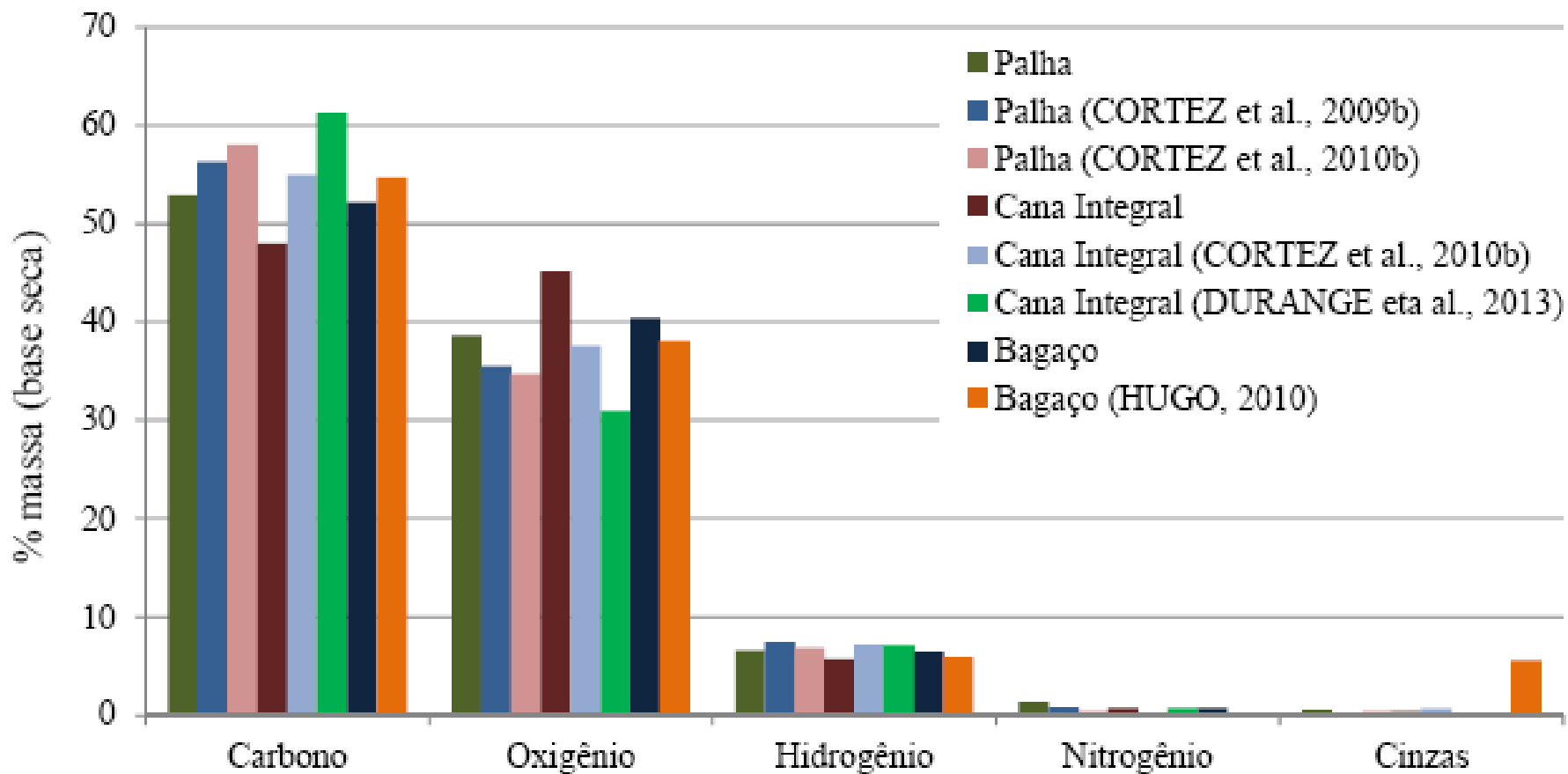
RESULTADOS

Comparativo entre biomassas



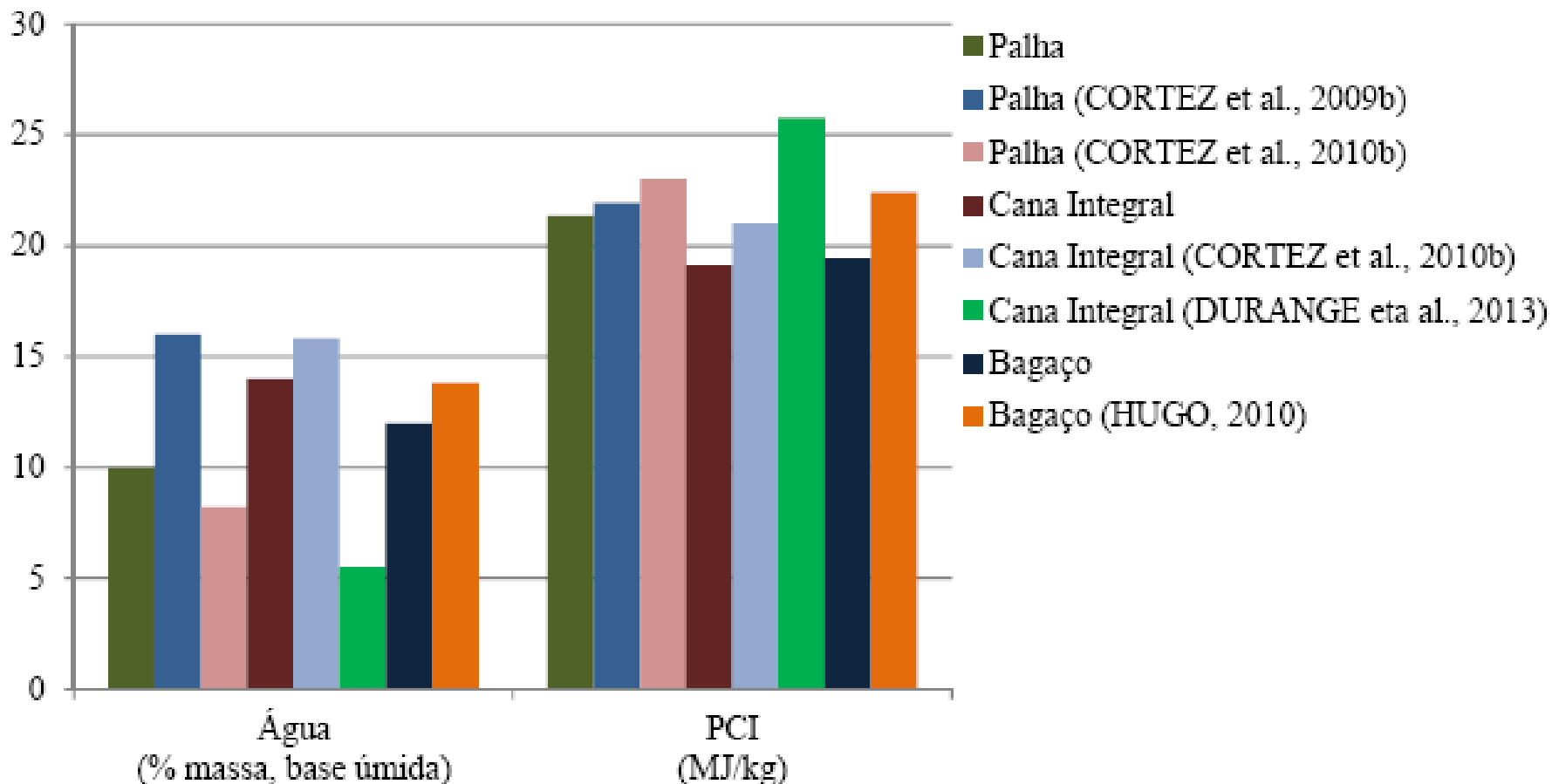
RESULTADOS

Comparativo entre bio-óleos



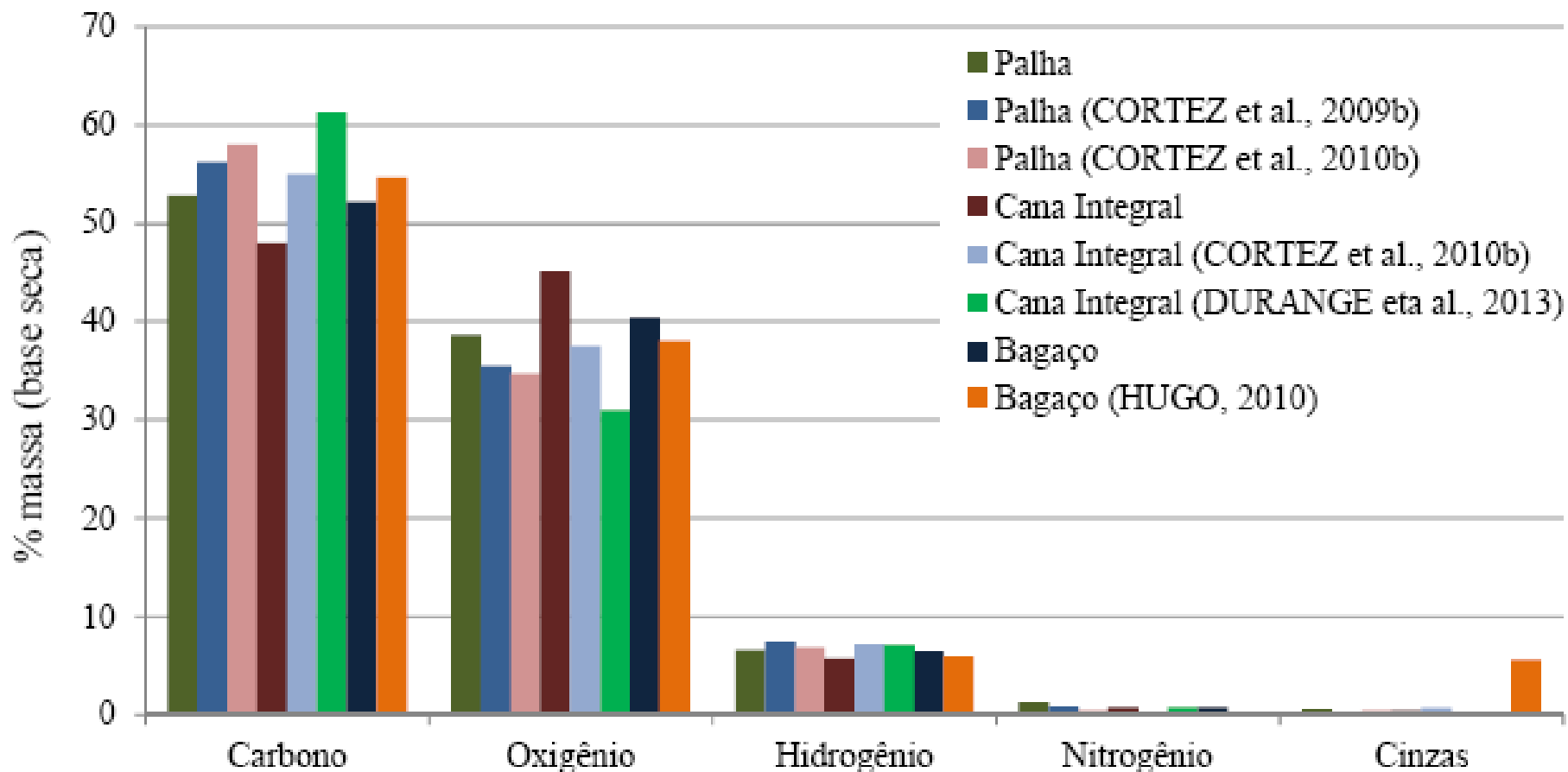
RESULTADOS

Comparativo entre bio-óleos



RESULTADOS

Comparativo entre bio-óleos



RESULTADOS

Comparativo entre bio-óleos

