UFPA
Universidade **F**ederal do **Pa**rá

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Grupo de Energia, Biomassa e Meio Ambiente

EBMA
Energia **B**iomassa e **M**eio **A**mbiente

PFRH 37 – COPPE/RJ
Conversão de Biomassa Vegetal em Potência e Calor

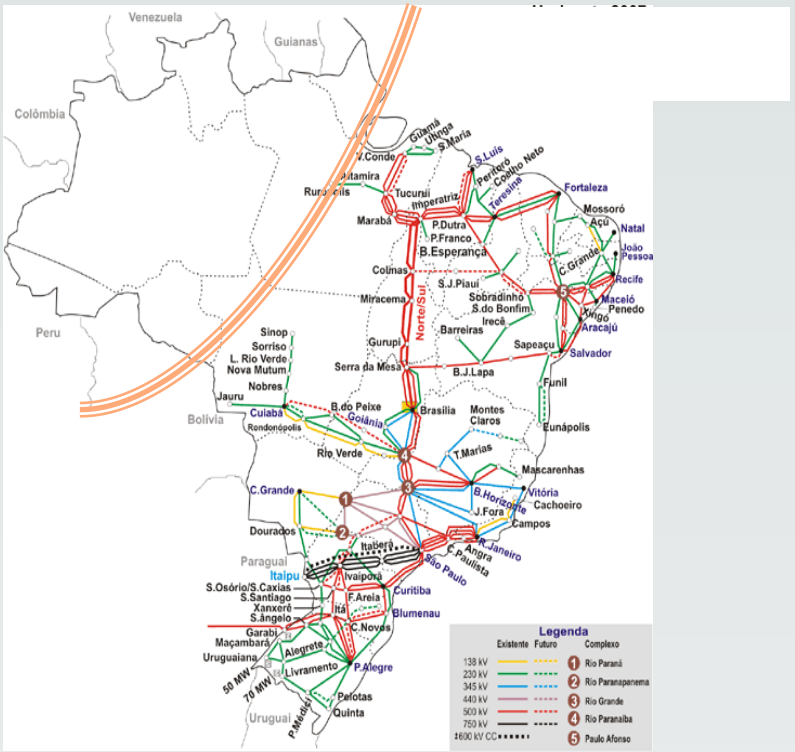
Agosto 2013

Manoel Fernandes Martins Nogueira
mfmn@ufpa.br

North Region of Brasil

OFF-GRID SYSTEM

- Basically Thermal Power
- Fossil Fuel -- Diesel



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
GRUPO ENERGIA, BIOMASSA E MEIO AMBIENTE

Marajo Project at Breves, Marajo Island – MME/CNPq/PNUD Program Light for All

It is an income plant:

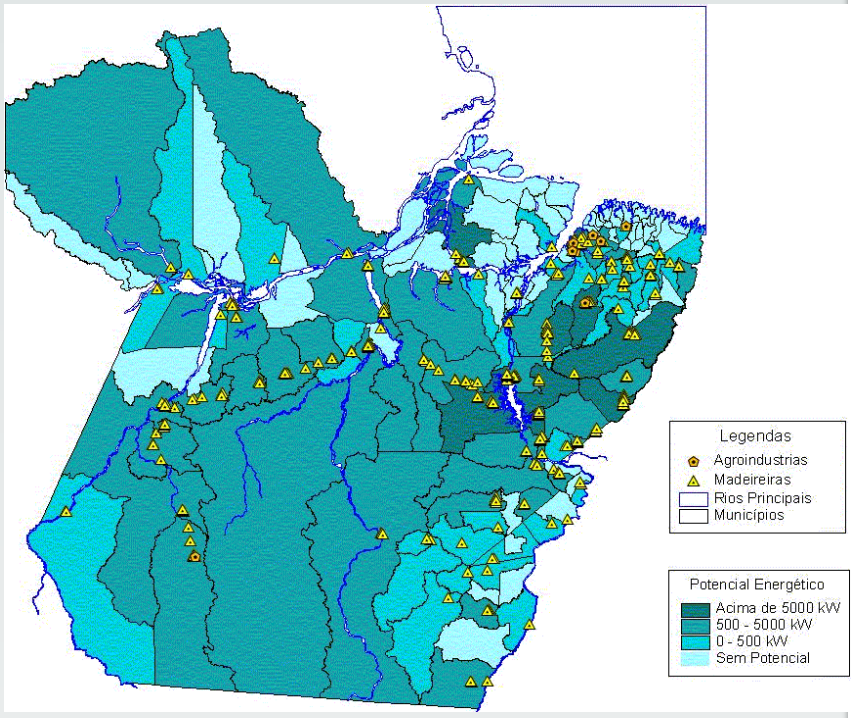
- Steam power plant fed with sawmill residues – Rankine cycle
- Vegetable oil crushing unit
- Ice production and industrial freeze.

Rivers take place of roads and trails as main way to move people and cargo.

Electricity Generation Cost
As far as
US$ 300 / MWh
National Mean Value
US$ 45/MWh

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
GRUPO ENERGIA, BIOMASSA E MEIO AMBIENTE

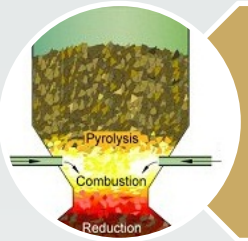
Large amount of forest and agricultural residues available in amount suitable for power generation units ranging from 100 to 5000 kW



TECNOLOGIAS

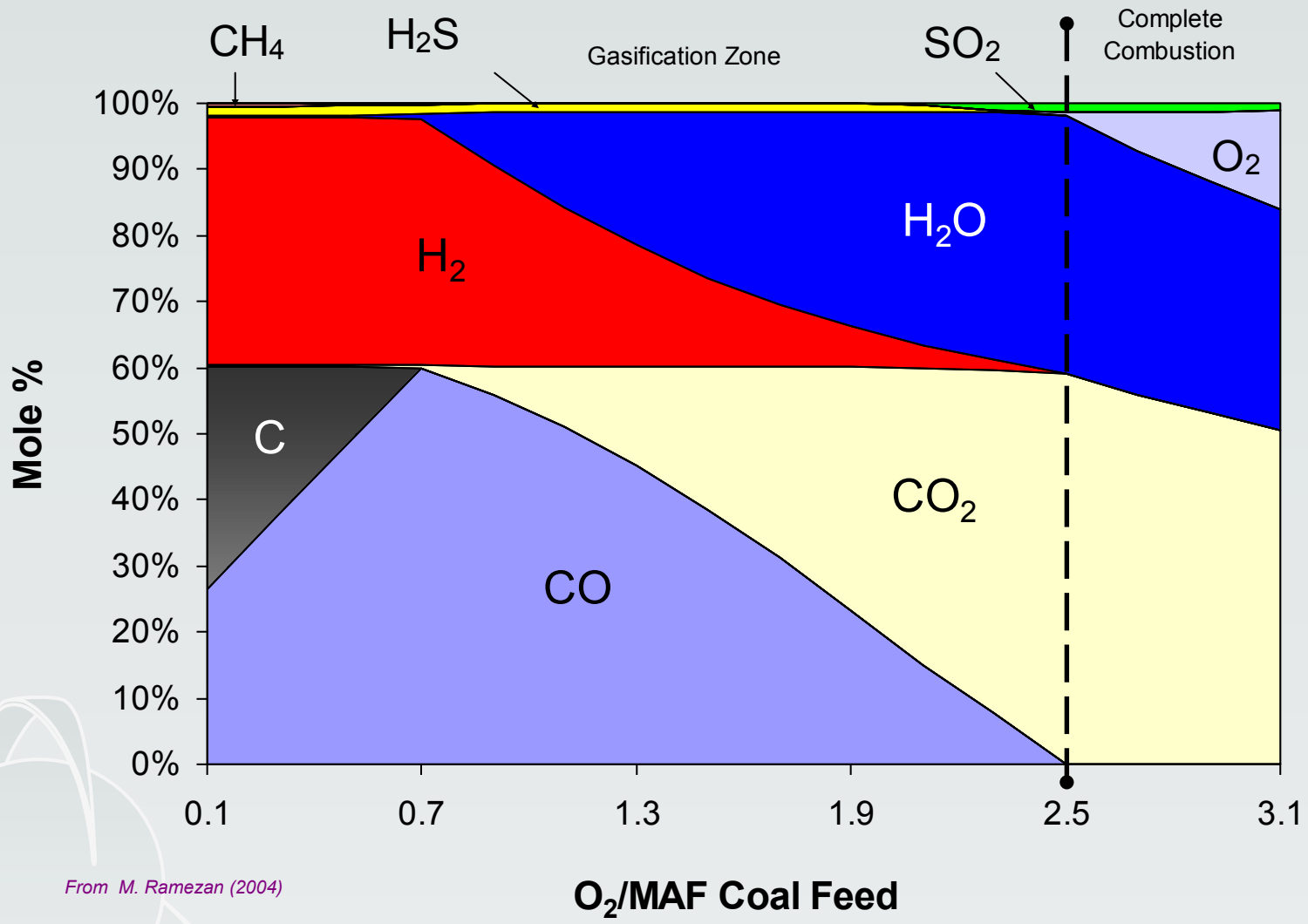
Caracterização

Combustão



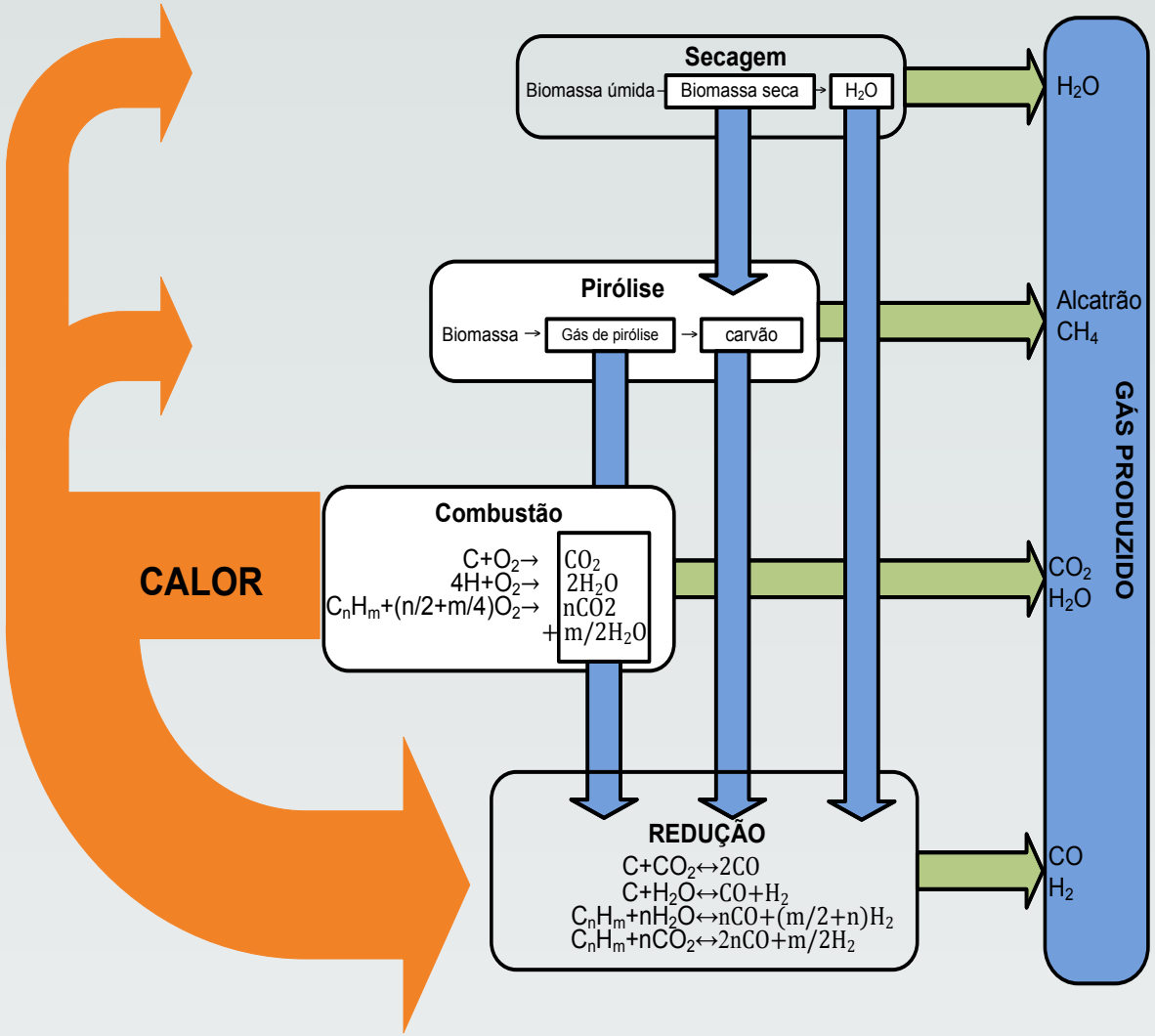
Gasificação

EFEITO DA RAZÃO OXIGÊNIO-CARVÃO NA COMPOSIÇÃO DAS EMISSÕES



From M. Ramezan (2004)

ESQUEMA GLOBAL DE GASIFICAÇÃO DE SÓLIDOS



CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA

- **Análise Imediata: % mássica em base seca ou úmida, c/ ou s/ cinza**
  - Umidade, voláteis, carbono fixo, cinzas
- **Análise elementar: % mássica**
  - C, H, N, S e O
- **Análise Termogravimétrica**
  - Taxa de perda de massa
- **Composição das cinzas: % mássica**
  - K, Na, Ca, Mg, P, Si, Fe
- **Poder calorífico: (kJ/kg)**
- **Outras propriedades termo-físicas:**
  - Condutividade térmica (kJ/m-K), calor específico (kJ/kg-K), fusibilidade das cinzas (K), densidade a granel (kg/m_3), massa específica (kg/m_3), porosidade (%), dimensões e formatos, ângulo de repouso.

Figura – Forno mufla horizontal

CARACT. ENERGÉTICA BIOMASSA
ANÁLISE IMEDIATA

Base seca em % mássica

	Voláteis	Cinzas	Carbono fixo
Casca de arroz	63,6	20,6	15,8
Fibra de coco	70,60	4,7	24,67
Caroço de açaí	79,44	1,1	19,45
T ^{o}C	500		

Entre os voláteis estão alcatrão e óleo que condensam entre 120-150 ºC

CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA
PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O PCS do combustível é determinado reagindo o combustível com oxigênio em um calorímetro e medindo o calor liberado a uma quantidade conhecida de água.

O calor libertado durante este procedimento representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da biomassa por combustão.

O PCS somente é uma propriedade do combustível se a amostra estiver seca.

ID	Nome Comercial	Nome científico:	*PCS (kcal/kg)*	*Carbono Fixo (%)*	*Voláteis (%)*	*Cinzas (%)*	*DG (kg/m3)*
1	**Acapu**		4944,30	20,91	78,72	0,3745	250
2	**Andiroba**	*Carapa guianensis Aubl.*	4720,67	10,14	89,86	**0,0002**	**290**
3	**Angelim**		4183,33	15,13	**70,01**	14,8550	280
4	**Angelim Pedra**	*Hymenolobium spp.*	4739,40	17,15	81,56	1,2977	265
5	**Angelim vermelho**	*Dinizia excelsa*	4881,00	20,34	79,61	0,0457	250
6	**Bambu**		4533,67	17,78	81,34	0,8777	267
7	**Breo**		4756,20	14,19	85,62	0,1900	259
8	**Buchas trituradas de dendê**		4142,40	15,23	72,86	**9,9105**	298
9	**Cacho seco de amêndoa**		4622,67	16,60	80,55	2,8533	200
10	**Caroço de açaí**	*NT*	4576,00	19,45	79,44	1,1057	240
11	**Casca de amêndoa**		**5308,33**	20,66	77,73	1,6106	220
12	**Casca de palmito**		**3864,67**	18,00	76,14	5,8642	240
13	**Cascas de castanha do Pará**		4843,60	**27,07**	71,04	1,8823	240
14	**Cascas de nozes**		5039,00	22,49	75,86	1,6515	260
15	**Cedro**		4827,20	15,27	84,63	0,1031	249
16	**Copaíba**	*Copaifera spp.*	4755,00	**9,05**	**90,87**	0,0847	250
17	**Cumaru**	*Dipteryx odorata*	4810,30	13,29	86,65	0,0658	270
18	**Falso Pau-Brasil**		5257,20	21,42	78,39	0,1874	220
19	**Fibra de coco**		4458,33	24,67	70,60	4,7314	282
20	**Fibra de dendê**		3953,18	19,59	76,21	4,2005	200
21	**Garapa**		4463,00	18,33	78,51	3,1655	200
22	**Jatobá**	*Hymenaea courbaril*	4636,60	19,99	79,63	0,3808	**200**
23	**Louro-Faia**	*Euplassa spp.*	4710,00	17,75	82,04	0,2106	230

CARACT. ENERGÉTICA BIOMASSA
ANÁLISE ELEMENTAR

EBMA

- C, H, N, S e por diferença O: Cuidado com a umidade → acrescenta H e O → base seca. Ex: madeira $C_{3,3\text{-}4,9}H_{5,1\text{-}7,2}O_{2,0\text{-}3,1}$

	C	H	N	S	O	Cinzas
Casca de arroz	38,3	4,4	0,83	0,06	35,5	21
Pinheiro	59	7,2	-		32,7	1,13
Caroço de açai	46	6,0	0,8	-	46,0	1,2
População H/C aproximadamente 1,5 e de O/C de aproximadamente 0,6						

O resultado da análise elementar permite calcular o poder calorífico superior e inferior

CARACT. ENERGÉTICA BIOMASSA
PODER CALORIFICO SUPERIOR
X
PODER CALORÍFICO INFERIOR

Combustível
+
Oxidante

m_{comb} P T umid.

COMBUSTÃO

$CO_2 + H_2O + N_2 +$
Cinzas

m_{cinzas} P T

Calor de Reação
Q_R [kJ]

$$PCS = \frac{Q_R}{m_{comb}} \left[\frac{kJ}{kg_{comb}} \right]$$

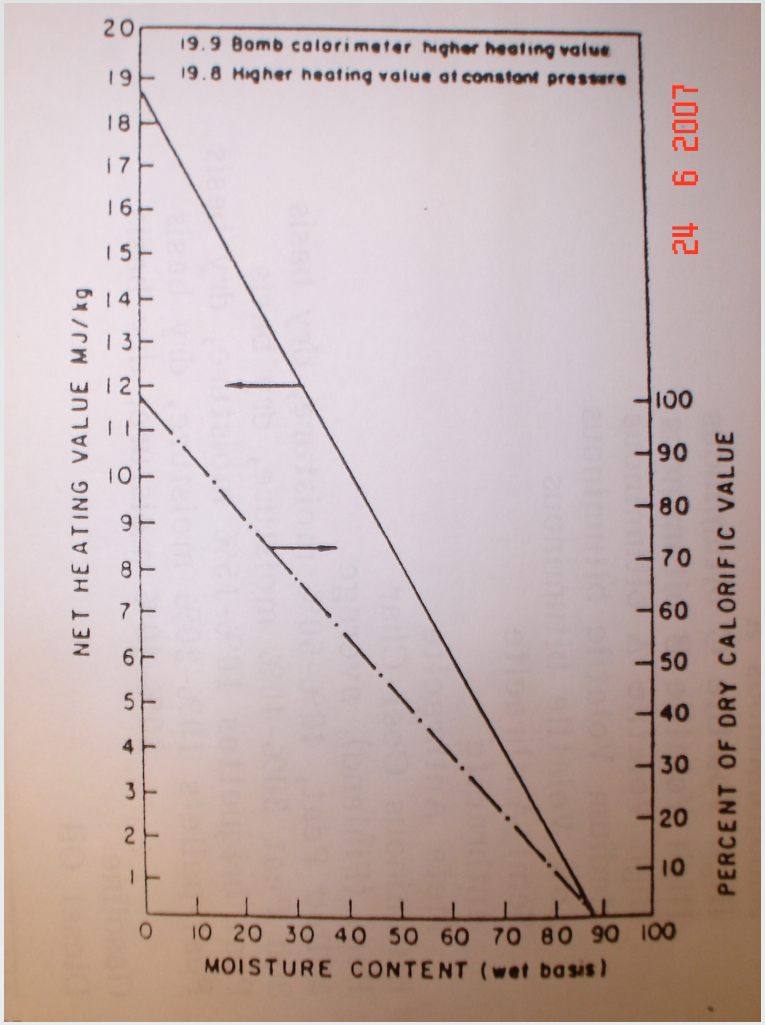
Líquidos nos produtos é inconveniente.

$$PCI = \frac{Q_{R-V}}{m_{comb}} = PCS - \frac{m_{H_2O,P}}{m_{comb,R}} L(P)$$

PCI depende da umidade da biomassa

CARACT. ENERGÉTICA BIOMASSA
PODER CALORIFICO SUPERIOR
X
PODER CALORÍFICO INFERIOR

EBMA



PCI não é propriedade.

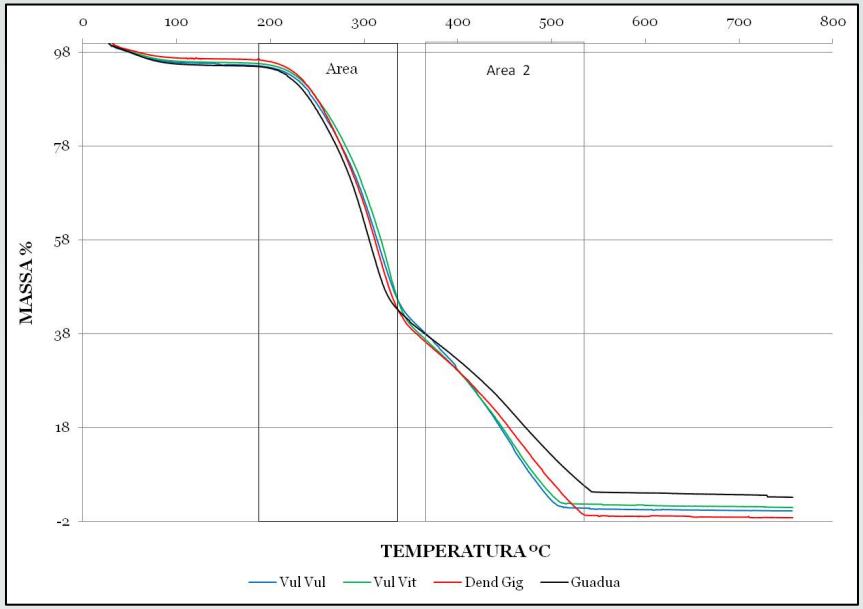
Mais importante para biomassas sólidas do que as líquidas.

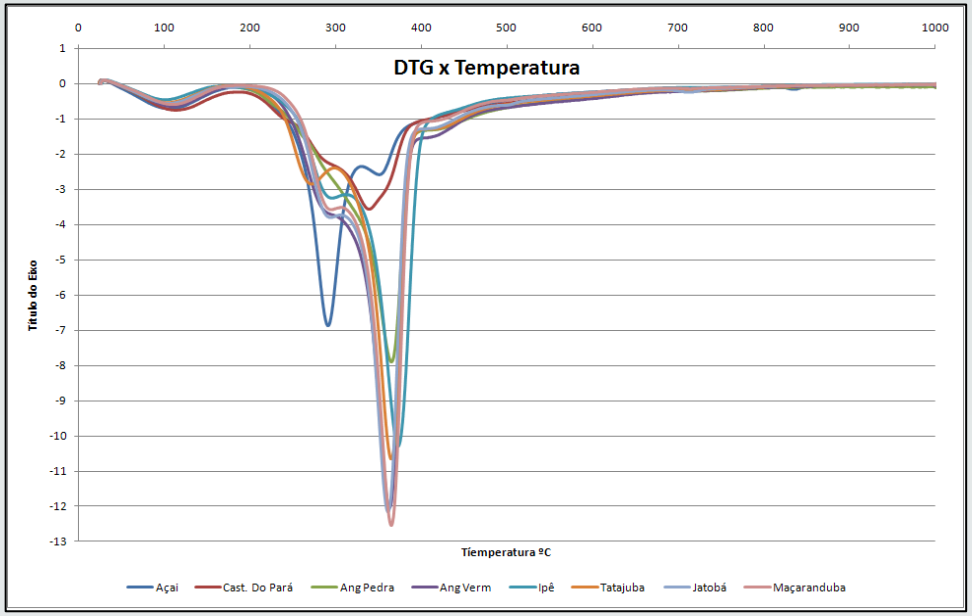
PCI decresce com o aumento do teor de umidade.

Teores de umidade acima de 70% inibem chama.

Vejamos o Filme 1 e 2

ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA





$$\ln\left[\frac{d\alpha/dt}{(1-\alpha)}\right] = \ln[A] - \frac{E}{RT}$$

Species	2º range of temp.	Adjustment Eq.	R²	Ea	A
AÇAI	457-574 K	15.329 – 11,239x	0.9929	93,32	7,39E+05
BRASILIAN NUTS	450-575 K	4.1963 – 6,423.4x	0.9868	53,41	6,64E+01
JATOBÁ	469-644 K	10.835 – 10,378x	0.9790	86,29	5,08E+04
ANG. PEDRA	450-575 K	8.1061 – 7,803.5x	0.9922	64,67	5,28E+02

COMPOSIÇÃO DAS CINZAS

- SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 (95%)
- Aumento de teor de cinzas, reduz PCS
- Cinza pode derreter formando escoria líquida:

  Sequência: Amolece → Fundi → Flui → Solidifica
- Consequência: obstrução, isolamento, cobrimento.
  - Ca, Mg → Dificulta o derretimento das cinzas
  - K → Facilita
  - Cl, S, K, Na → Promotores de corrosão (gases corrosivos, condensáveis 100 – 150 ºC)
  - Cd e Zn → Problemas ambientais

BANCO DE DADOS DE BIOMASSA

EBMA

1. IEA Bioenergy: composition of fuels and ashes

   www.ieabioenergy-task32.com

2. BIOBIB database: resultados de análises elementares e imediatas mais informações sobre fusibilidade de cinzas

   www.vt.tuien.ac.at

3. Phyllis: composição e dados de biomassa

   www.ecn.nl/phyllis

CRITÉRIO PARA UM BOM COMBUSTÍVEL

	Voláteis	Carbono Fixo	Cinza
Combustão	> 75% b.s.	< 25% b.s.	< 3% b.s.
Gasificação	< 75% b.s.	> 25%	----------

COMBUSTÃO

Usinas térmicas e queimadores

- Produção de vapor para geração de energia elétrica.
- Queima de serragem.

Motores de CI

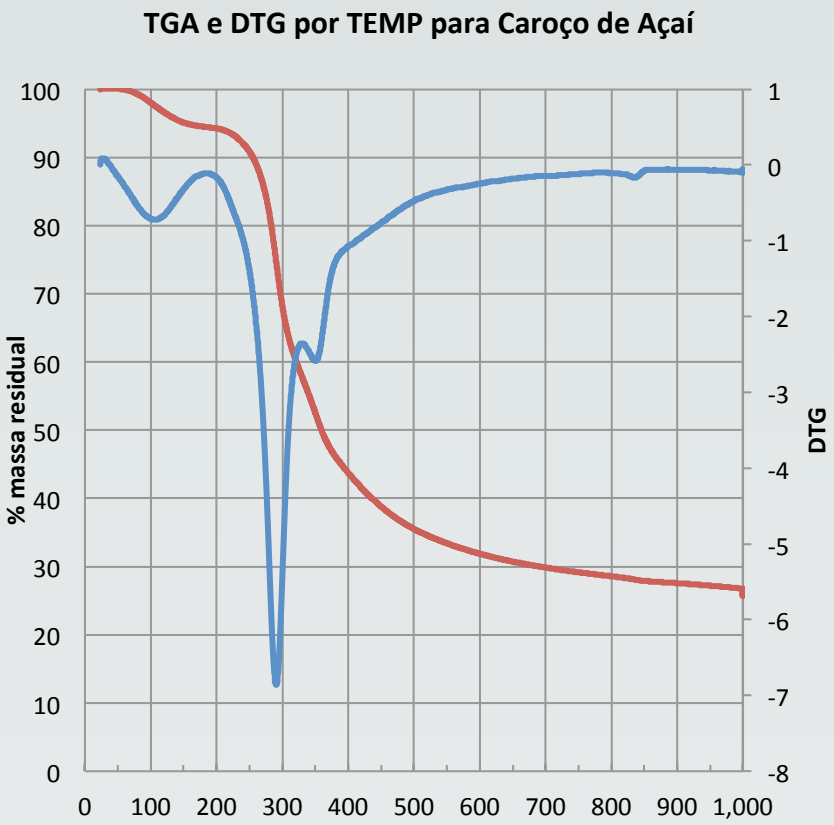
- Biodiesel
- Óleo vegetal
- Óleo usado

PROCESSOS FUNDAMENTAIS

DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA

Sólido + Calor → Gases

Biomassa:
- Água
- Lignina
- Hemicelulose
- Celulose
- Lignina
- Cinzas



Visualização do Processo de Combustão de Sólidos

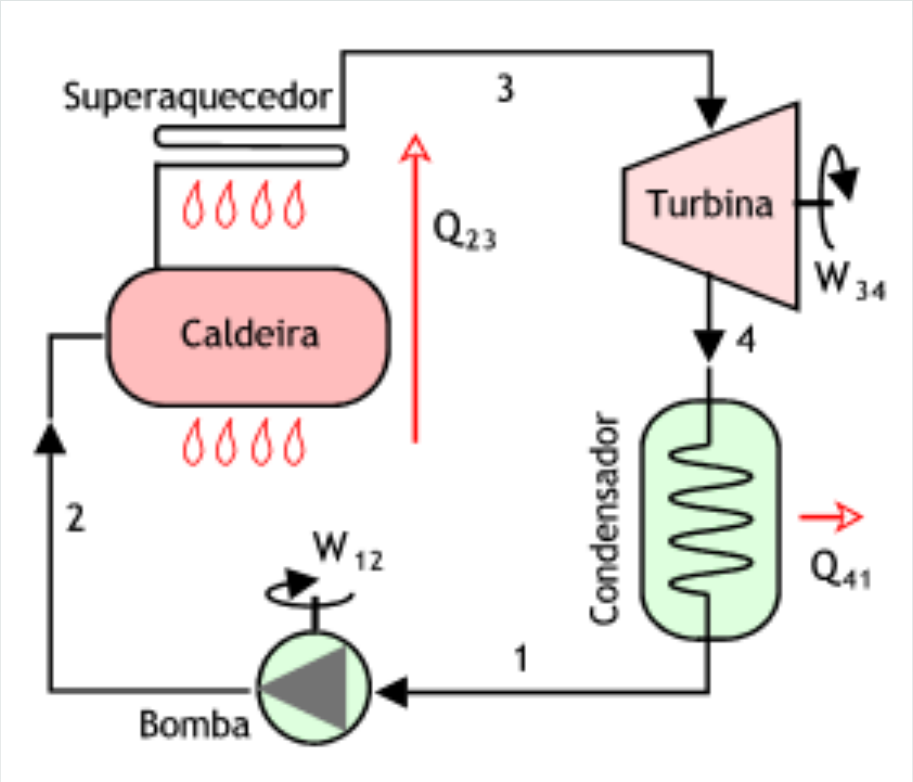
Exemplo de Combustão em Leito Fixo: fogão a lenha

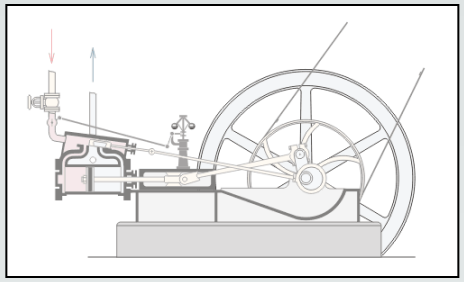
Açaí pit: not able to sustain a flame. It needs external heat.

Visual observation had identified that there are some species that are not able to sustain a flame and others very flammable and easily able to go a explosion

Ipê (wood): very fast combustion.

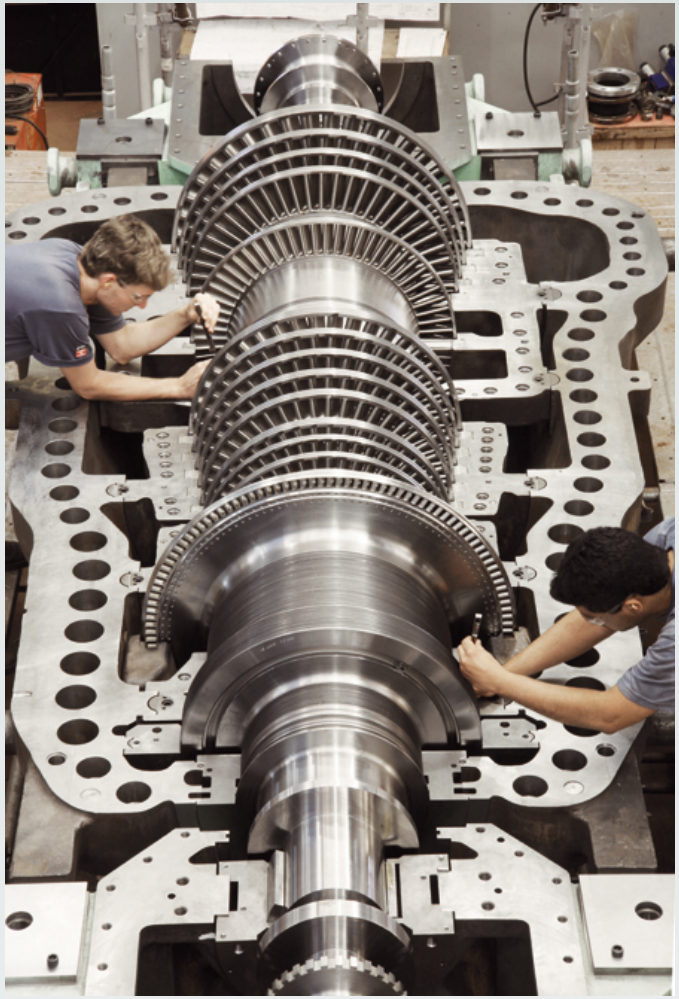
GERAÇÃO DE POTÊNCIA



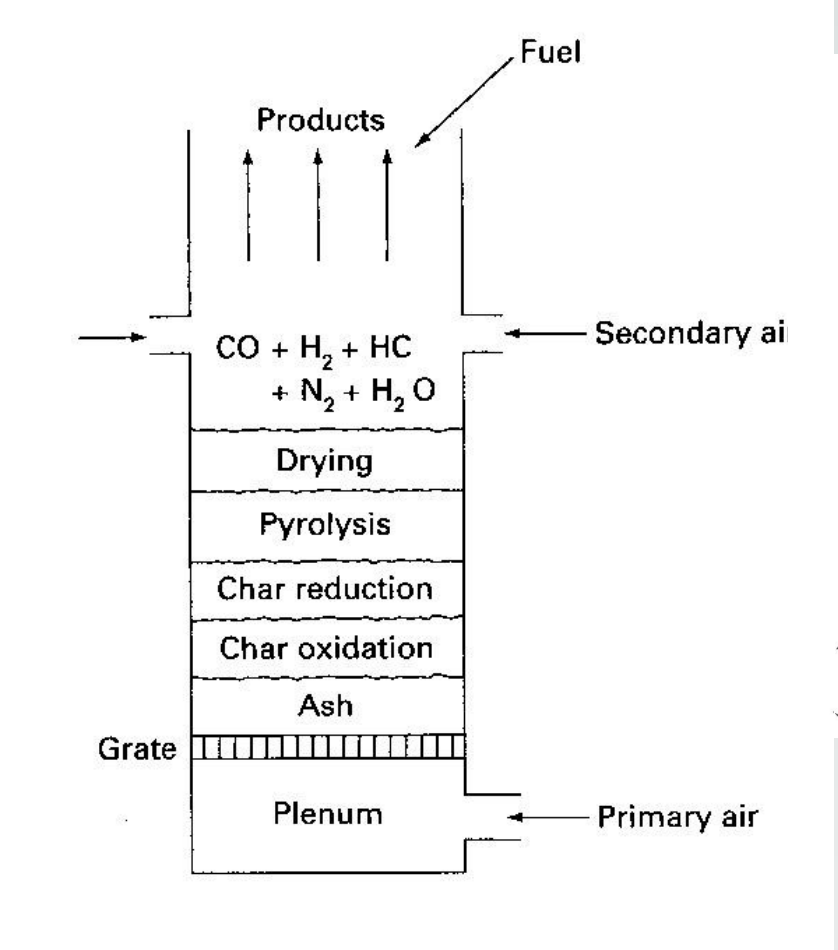


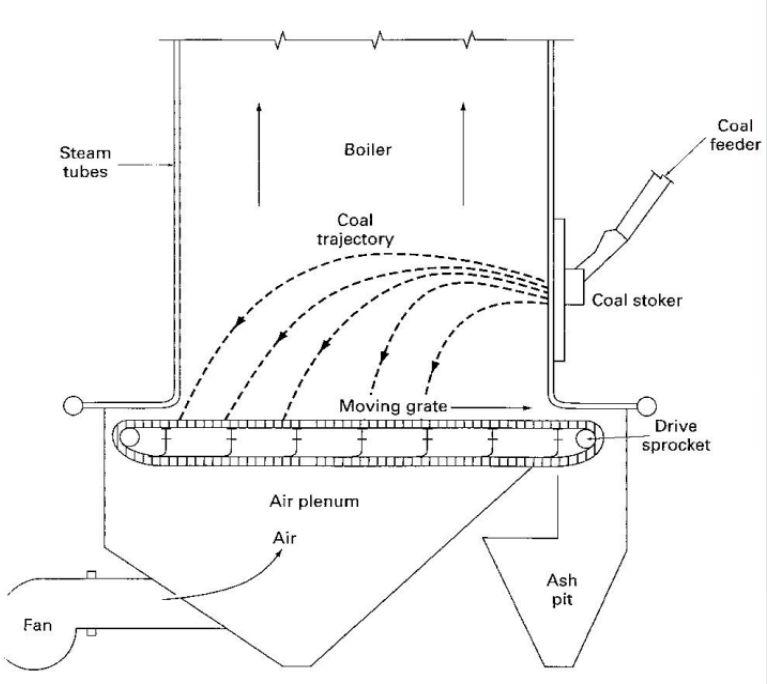
Ciclo Rankine
- Turbina ou motor
- Fechado ou aberto

CALDEIRA E TURBINA



Exemplo de Combustão em Leito Fixo: caldeiras

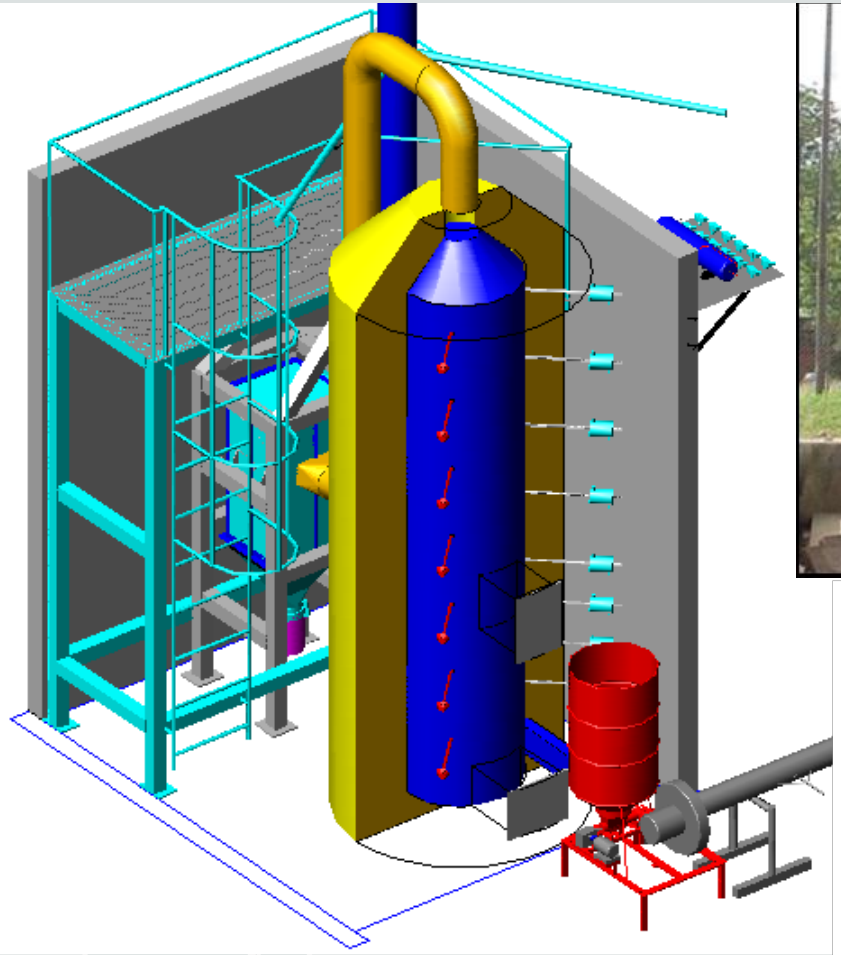




$$\eta = \frac{q}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI + \dot{W}_{ar}}$$

CINZAS

CYCLONIC FURNACE FOR SAWDUST BURNING



Comciclone:

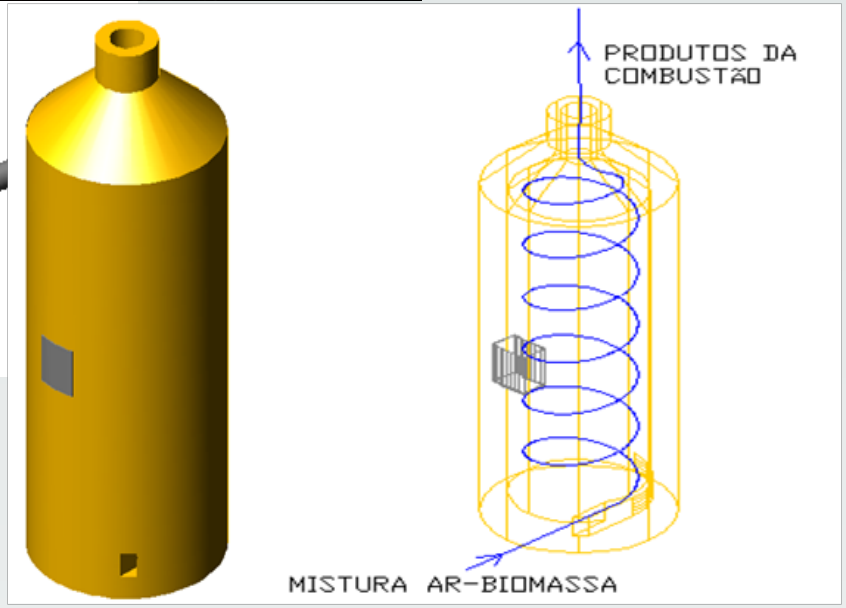
Development of a compact furnace for sawdust with high rate of sawdust comsumption.

Apparattus

0,8 x 4,0 m; Temp: 1200 ºC

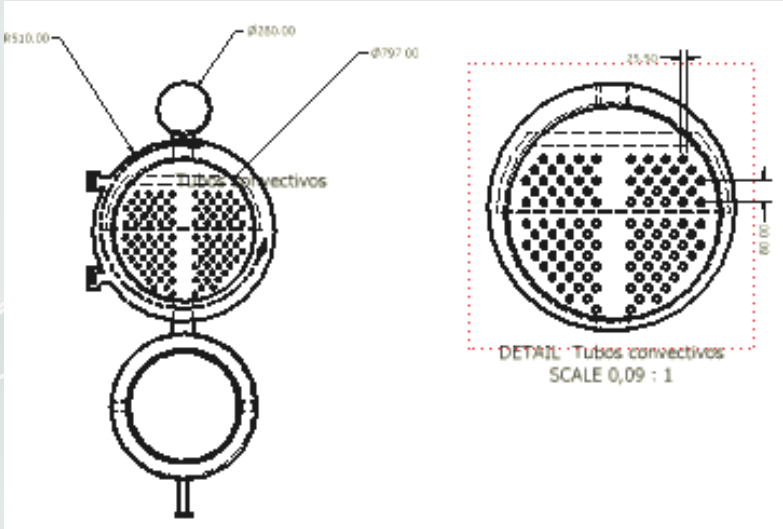
Mass flow rate: 150-200 kg/h

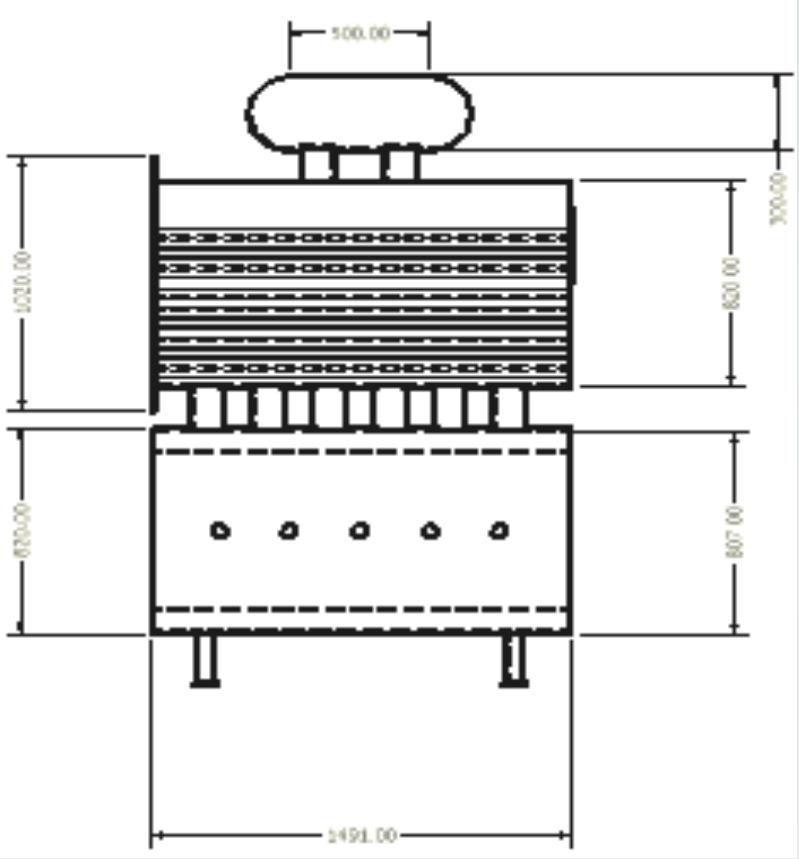
Low cost.



Ciclone Boiler: Comcilone III

- **Steam Production**
- **Fluidized combustion**
- **Lift combustion.**
- **Compact and with low cost.**

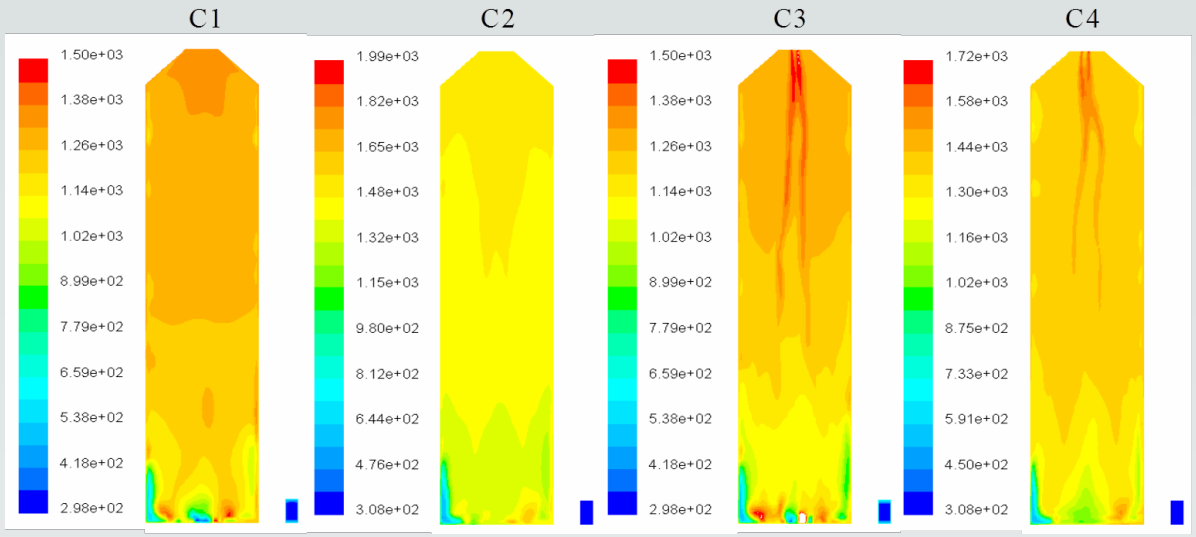




Ciclone Boiler: COMCICLONE III"

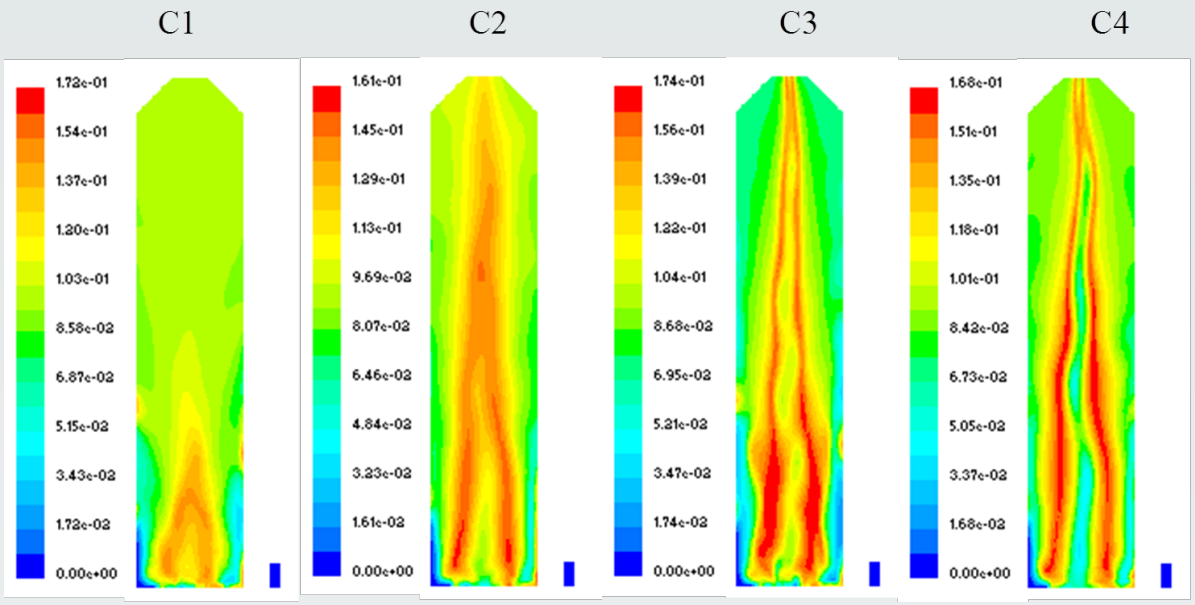
Specifications	Values
Steam production	100 kg/h
Steam pressure	10 atm
Total intensity energy	115 kW
Theoretical thermal efficiency of the boiler	85%
Fuel mass flow rate	34 kg/h
Air mass flow heat	190 kg/h
Averageexpected temperature in combustor	1223 K

Projeto: "Combustor ciclônico: COMCICLONE I e II"



CO_2

- **Simulação computacional**
  - Fluent
  - Chemkin
  - Fortran



Temperatura

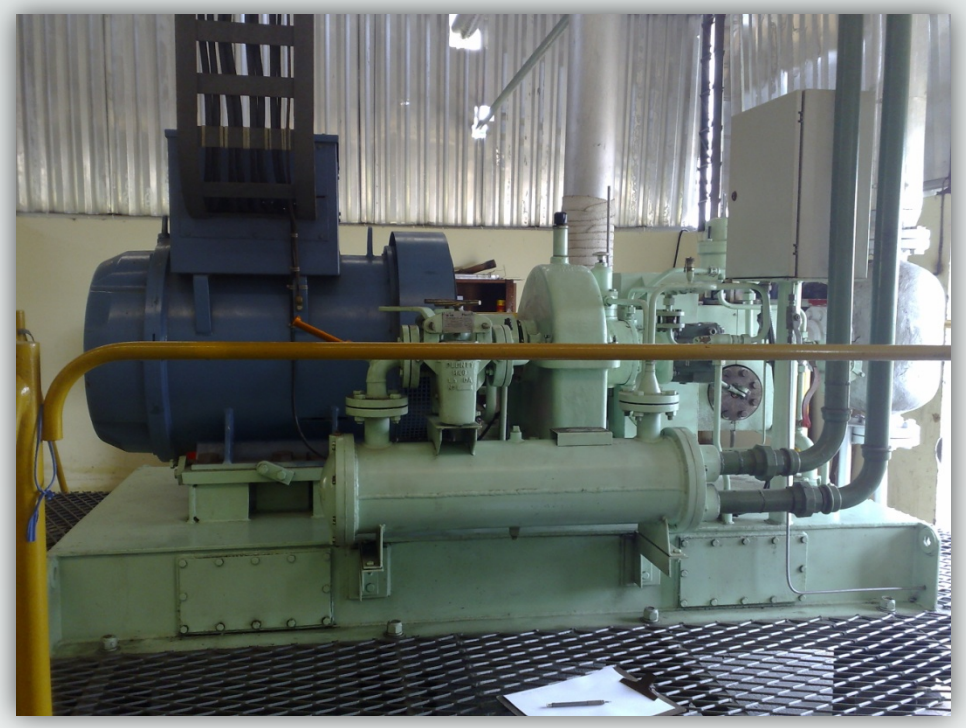
Marajo Project at Breves, Marajo Island – MME/CNPQ/PNUD Program Light for All

Thermal Power Plant

- **Boiler: 18kgf/cm^2, 4.000 kg/h de vapor.**
- **Steam Turbine: 10.000 rpm, 320kW.**
- **Generator: 1.800 rpm, 200kW/380V**

Thermal Power Plant

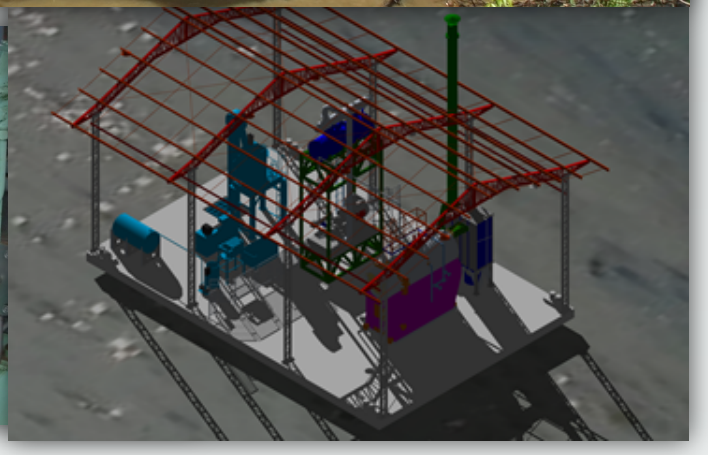
- **All components Brazilian made**
- **Boiler: Sermatec**
- **Steam Turbine: TGM**
- **Generator: WEG**

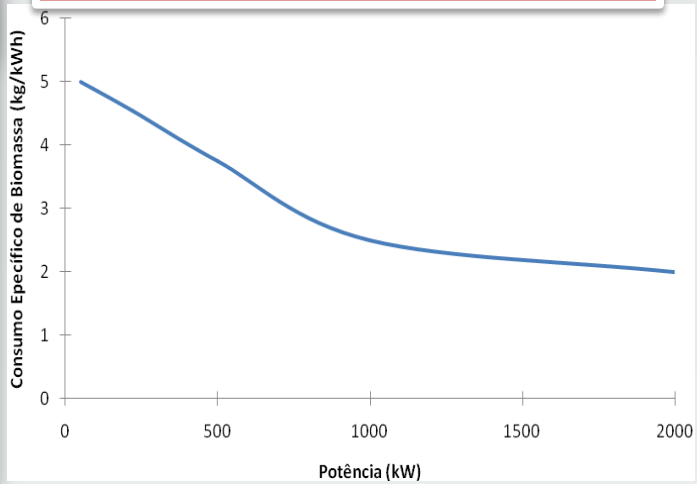


On Board Income Plant

- **Steam power plant 50 kW.**
- **Seed crushing for vegetable oil production.**
- **Construction at favarable location and transported to the off grid comunity.**

Downside: fuel consumption





COMBUSTÃO

Usinas térmicas e queimadores

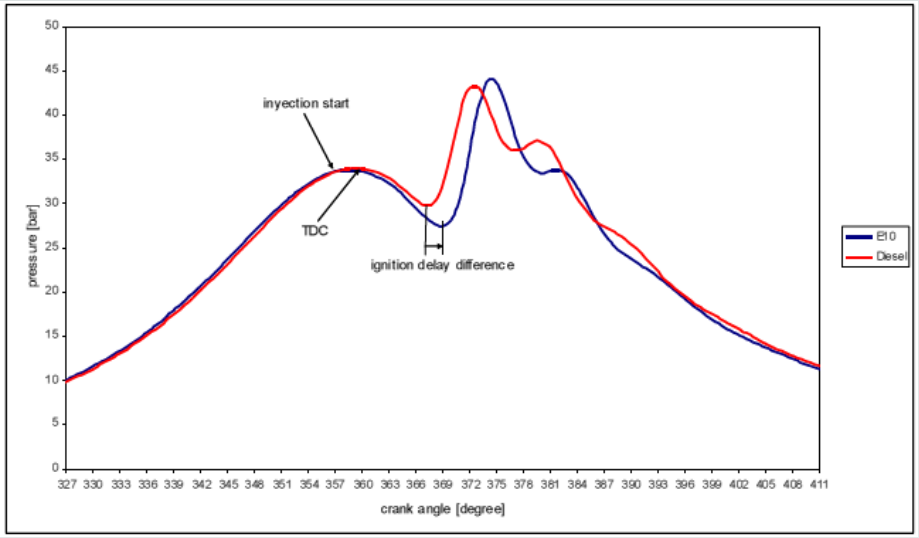
- Produção de vapor para geração de energia elétrica.
- Queima de serragem.

Motores de CI

- Biodiesel
- Óleo vegetal
- Óleo usado

ESQUEMA GLOBAL DE COMBUSTÃO DE LÍQUIDOS

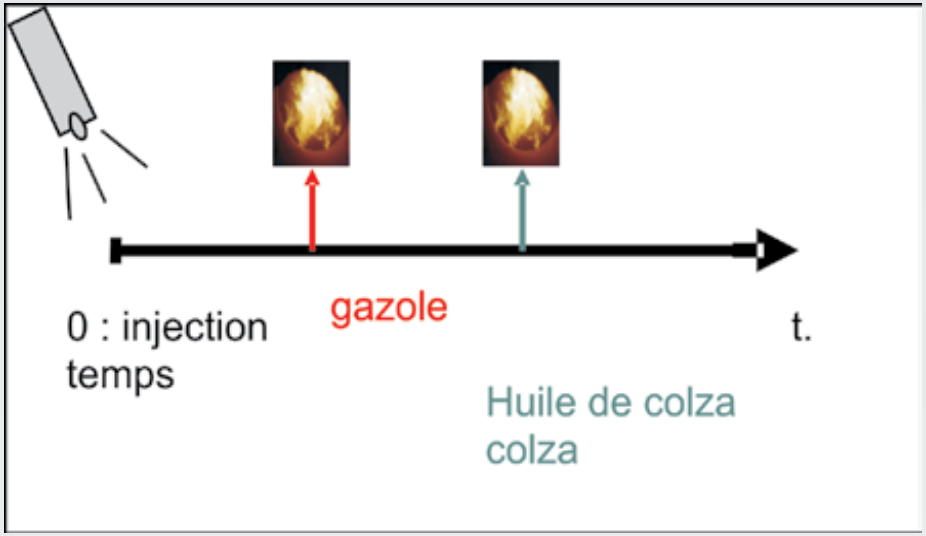
- Pulverização
- Vaporização
- Difusão
- Ignição
- Combustão (cinética química)



Processo dominante (o mais lento)

Vaporização

Todos os processos são direto dependentes da temperatura



PURO ÓLEO VEGETAL

EBMA

- Propriedades Termo-físicas dos Óleos Vegetais:

Property		Diesel	Palm Oil	Methods available for analysis
Gross heating value [kJ/kg]		42200	40700	ASTM D 240 ABNT NBR 8633
Net heating value [kJ/kg]		39200	38100	
Volatile content (% mass)		99.7	99.7	ABNT NBR 8112
Fixed carbon content (%mass)		0.3	0.25	ABNT NBR 14318 ASTM D 189, D 4530
Flash point [°C]		60	>344	ABNT NBR 7974 ASTM D93
Viscosity [cSt]	40° C	2.6	38.23	ABNT NBR 10441
	60°C	---	20.07	ABNT NBR 10441
	100°C	1.10	8.064	ASTM D445 e D1545
Density [kg/m^3] at 20°C		836.7	929.2	ABNT NBR 7148
Density [kg/m^3] at 85°C		---	858.4	ABNT NBR 7148

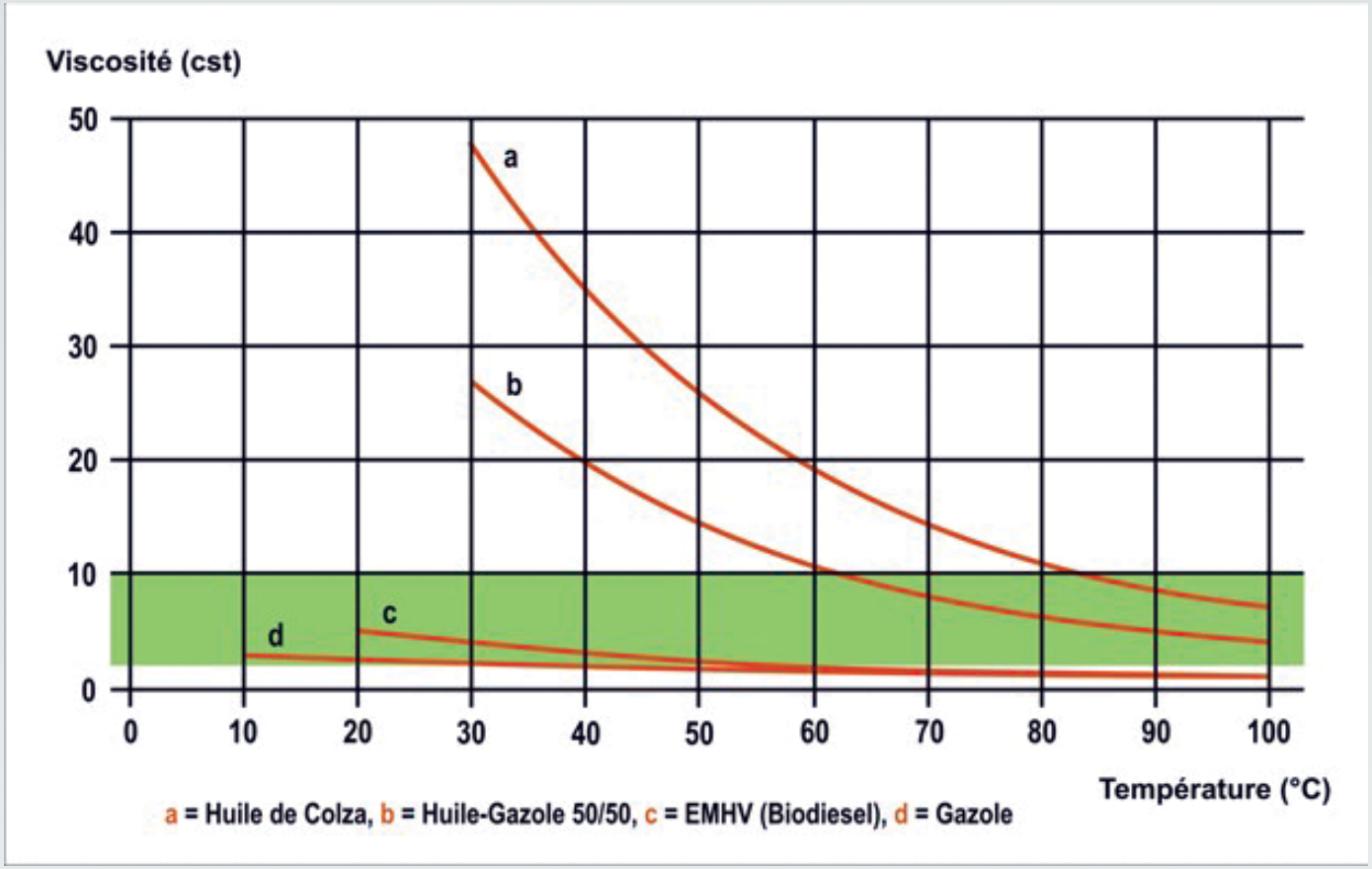
PCI em base volumétrica
Diesel: 32,7 GJ/m^3
Dendê: 35,4 GJ/m^3

Property	%C	%H	%N	%O	%S
Palm oil	75.54	12. 23	3. 61	8.62	0
Diesel	85.80	13.50	0	0	0.7

Note que OV diesel possui mais C que OV

Dênde tem nitrogênio portanto espera-se um pequeno aumento de NOX

VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO COM A TEMPERATURA



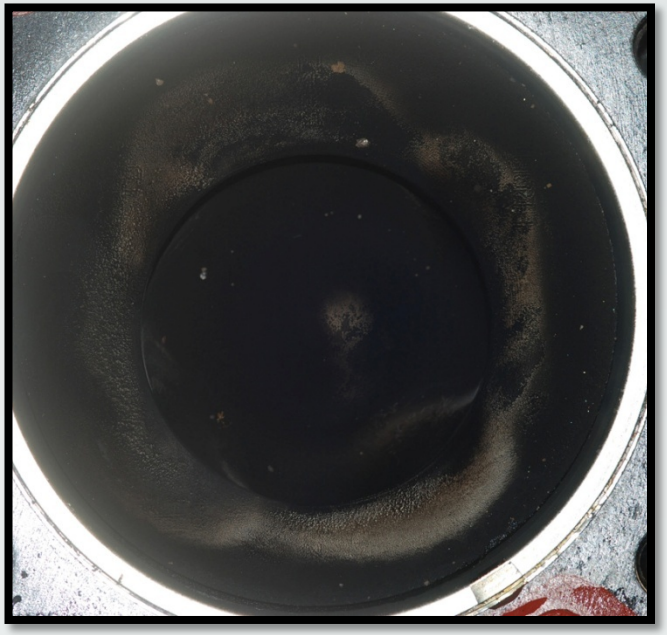
BIODIESEL B100 VERSUS DIESEL B5 FROM PALM OIL

PROPERTY		B100 OF PALM OIL	DIESEL
Ultimate analysis	C [%]	78.93	85,80
	H [%]	13.45	13,50
	O [%]	3.00	0
	N [%]	3.25	0
	S [%]	1.37	1.30
Gross heating value [MJ/kg]		33.11	42.2
Net heating value [MJ/kg]		30.15	39.2
Density[kg/m^3] at 25° C		861.25	839.7
Water content [ppm]		56	------
Acidity index [mgNaOH/g]		0.45	------
Index soap [ppm]	at 60° C	456	-------
	at 80° C	4.864	
Flash point [ºC]		162	60
Viscosity (at 60° C) [cSt]		8.54	2.1

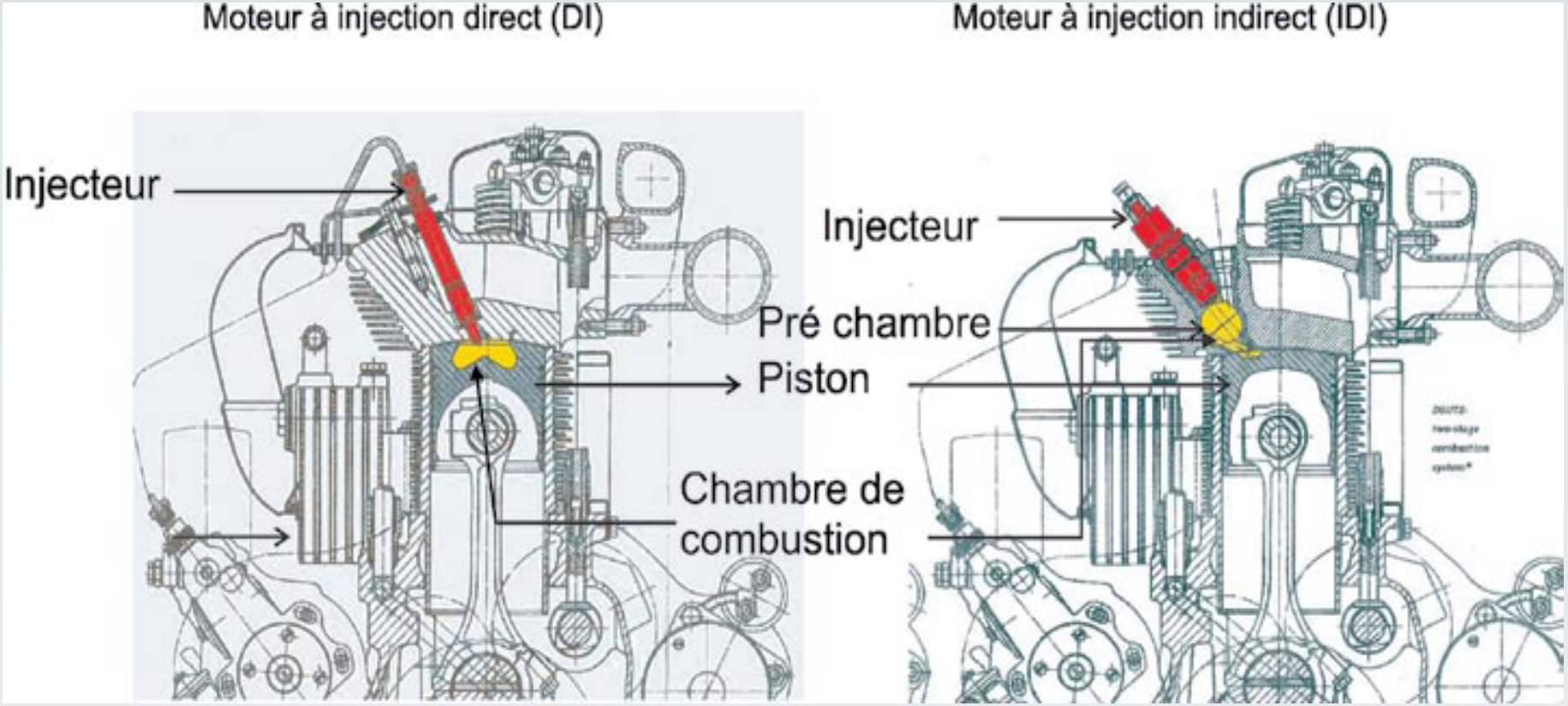
HHV in volumetric basis
Diesel B5: 35,4 GJ/m^3
B100: 28,5 GJ/m^3

B100 from Palm oil has less GJ/m^3 than Diesel B5, therefore lower output power should be observed.

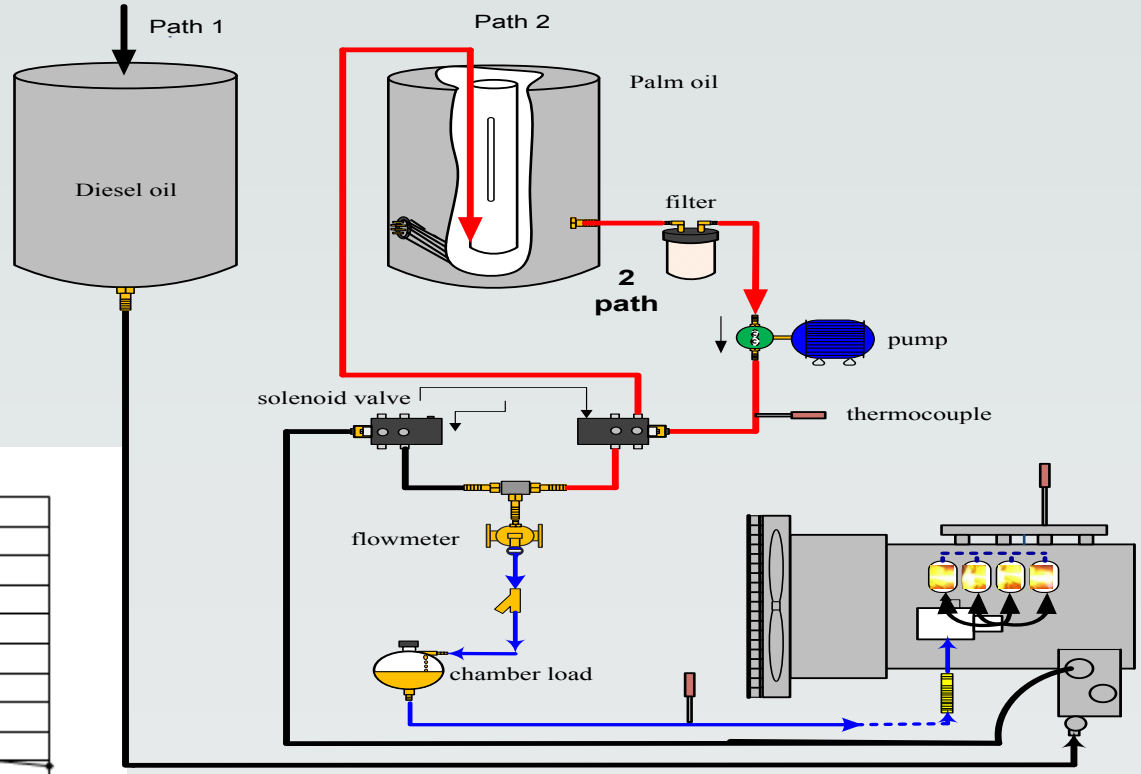
Piston head after 21 h of idle operation (direct injection)
Consequence of low combustiom temperature.

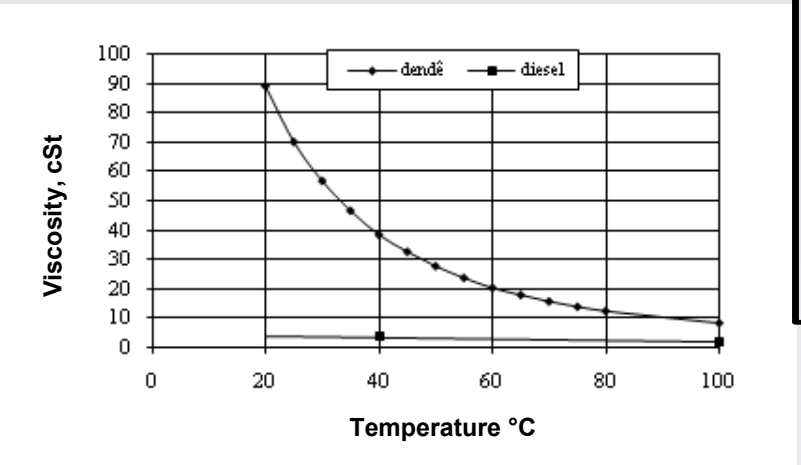


TIPOS DE MOTORES ENSAIADOS

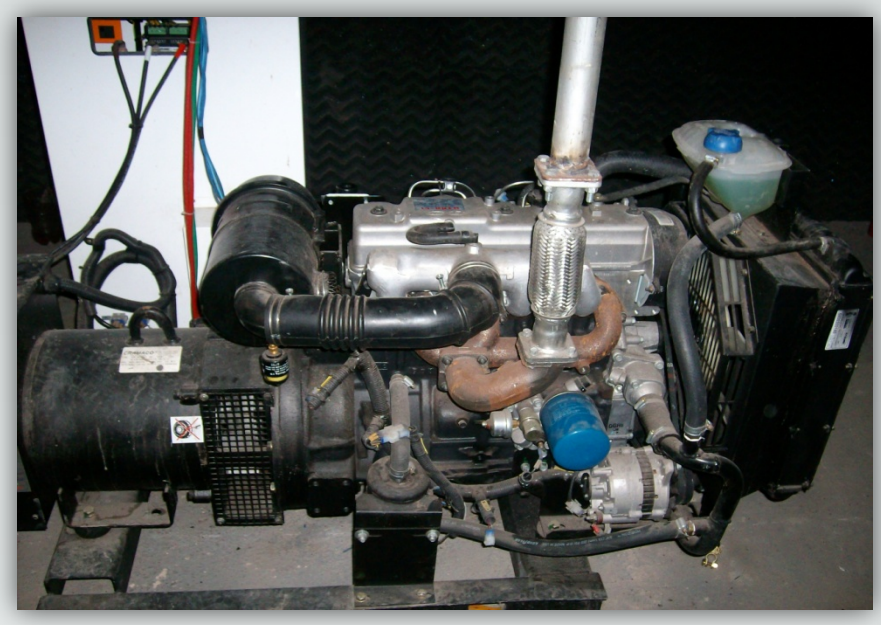


SISTEMA PARA A OPERAÇÃO COM ÓLEO VEGETAL

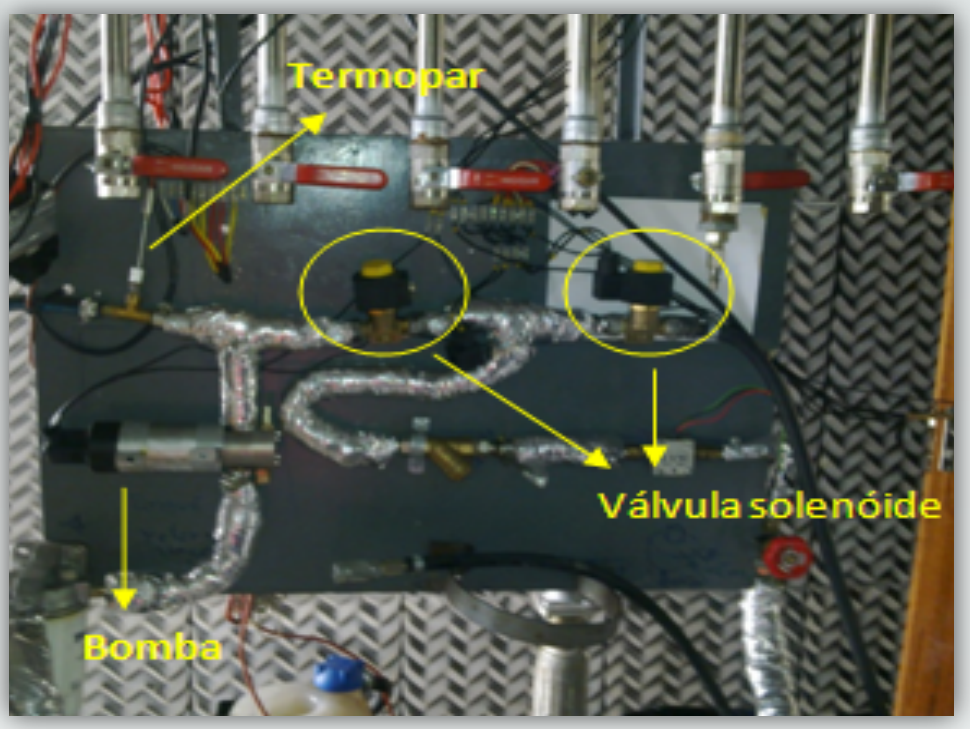




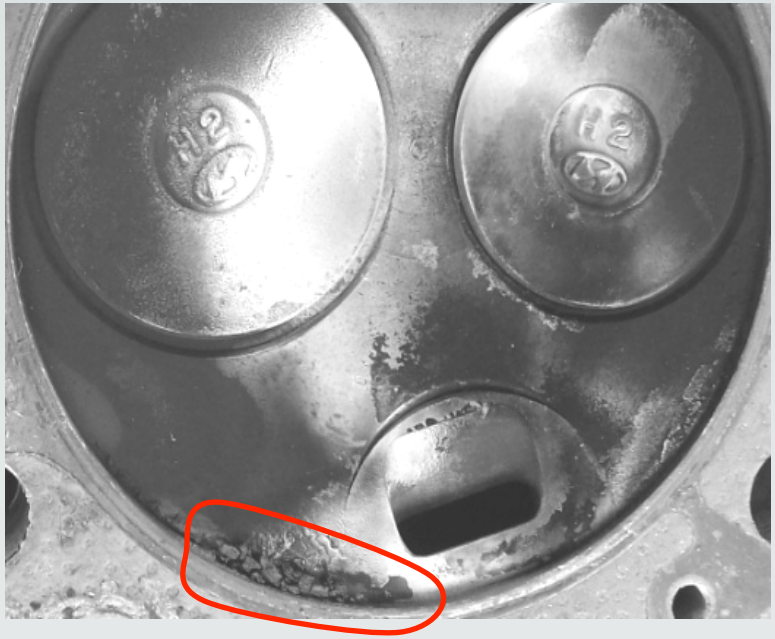
Projeto: "Desempenho de motores diesel operando com óleo de palma (dendê) in natura"

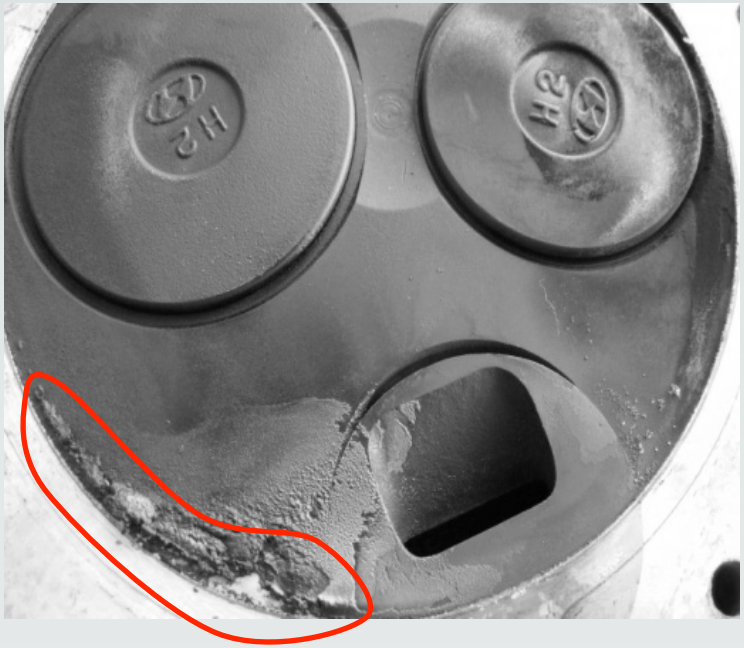


- **Disponibilização do combustível em sistemas isolados.**
- **Eletrificação de comunidades isoladas e uso em motores de embarcação.**



IMPACTOS OPERAÇÃO COM B100



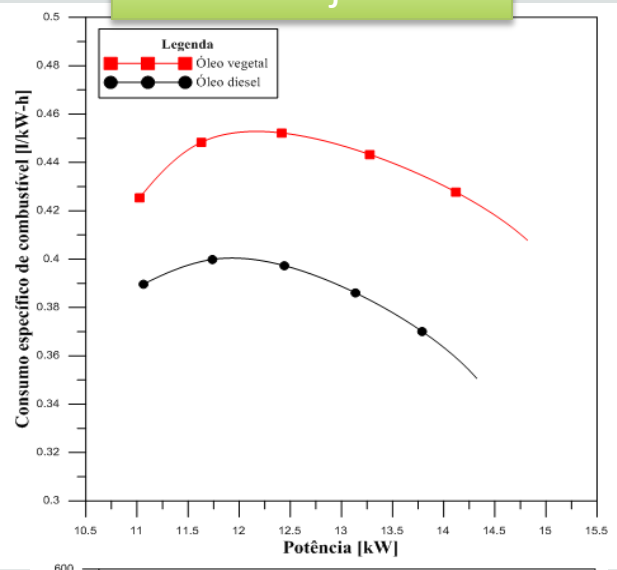


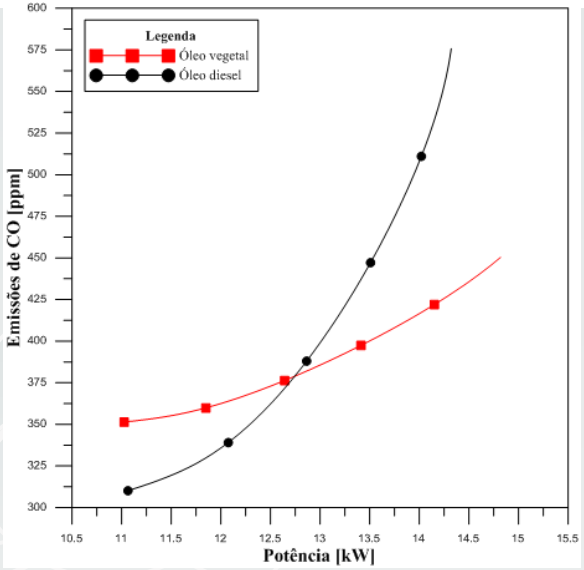
IMPACTS AFTER 500 HOURS OF OPERATION WITH DIESEL-B5

Residues extract from the service tank – filter line operating with Diesel B5 at 50 °C after 500 hours

RESULTS PALM OIL X DIESEL B5
DIRECT AND INDIRECT INJECTIONS

Indirect Injection





Specific Fuel Consumption (l/kWh): red = palm oil; black = diesel B5

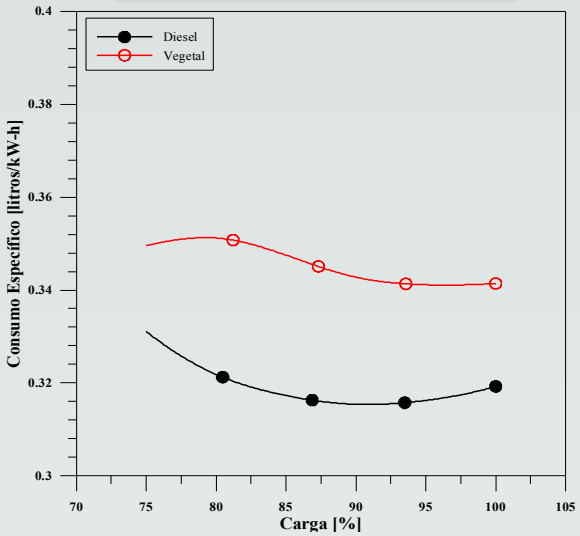
CO emission: red = palm oil; black = diesel B5

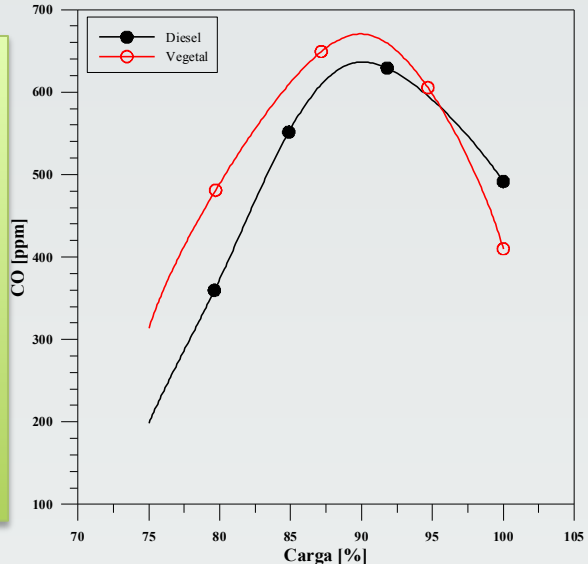
At high load, palm oil performs well

At low loads, doesn´t but can be improved

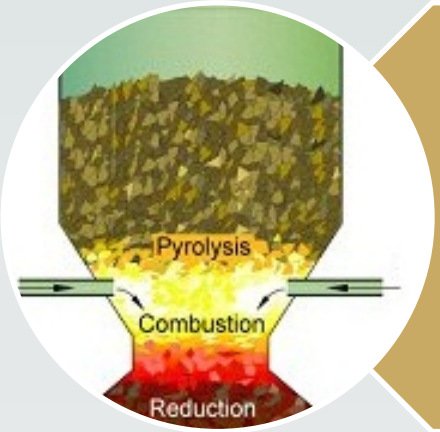
- Increasing fuel injection pressure,
- reducing droplet size
- advancing fuel injection point.

Direct Injection





TECNOLOGIAS



Gasificação

COMPARAÇÃO ENTRE COMBUSTÃO E GASIFICAÇÃO

Parâmetro de Escolha	Equipamento			
	Caldeira + Máquina a vapor	**Caldeira + Turbina a vapor**	**Gasificador + Motor a centelha**	**Gasificador + Motor a diesel**
Potência (kVA)	40 – 250	250 – 150.000	1 – 25	25 – 500
Eficiência (%)	9 – 15	13 – 25	20 – 30	25 – 35
Maturidade tecnológica	Sim	Sim	Não	Não
Custo de investimento R$/ kW	2.700	2.400 (> 1MW) 2.800 (< 1MW)	5.000	6.000
Custo de operação e manutenção R$/ kWh	140	150	500	500
Intermitência de fornecimento	Sim	Não	Sim	Sim
Flexibilidade variação de carga	Sim	Pouca	Pouca	Sim
Manutenção	Frequente	Pouca	Pouca	Freqüente

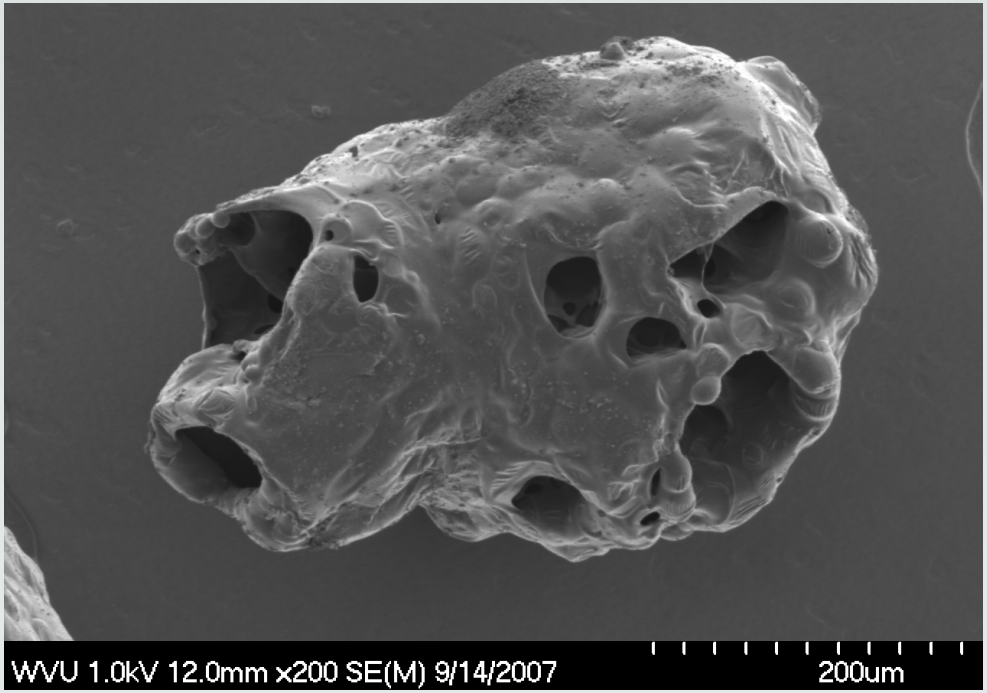
DOWNDRAFT GASIFIER OPEN TOP

Processos Fundamentais

- **Secagem**
- **Pirólise**
- **Gasificação**

Consequência desses processos

- Aumentam as dimensões
- Reduz a massa específica
- Índice de porosidade ~ 0,9 (90% de vazios).
- Área interna na ordem de 1000 m2/g



Excelente para micro-filtragem

Fotografia de microscópio eletrônico mostrando carvão mineral ativado.

NETL

Sasol plant in South
Africa

Gasification Chemistry

From M. Ramezan (2004)

Gasification with Oxygen

$$C + {}^{1}/_{2}\, O_2 \longleftrightarrow CO$$

Combustion with Oxygen

$$C + O_2 \longleftrightarrow CO_2$$

Gasification with Carbon Dioxide

$$C + CO_2 \longleftrightarrow 2CO$$

Gasification with Steam

$$C + H_2O \longleftrightarrow CO + H_2$$

Gasification with Hydrogen

$$C + 2H_2 \longleftrightarrow CH_4$$

Water-Gas Shift

$$CO + H_2O \longleftrightarrow H_2 + CO_2$$

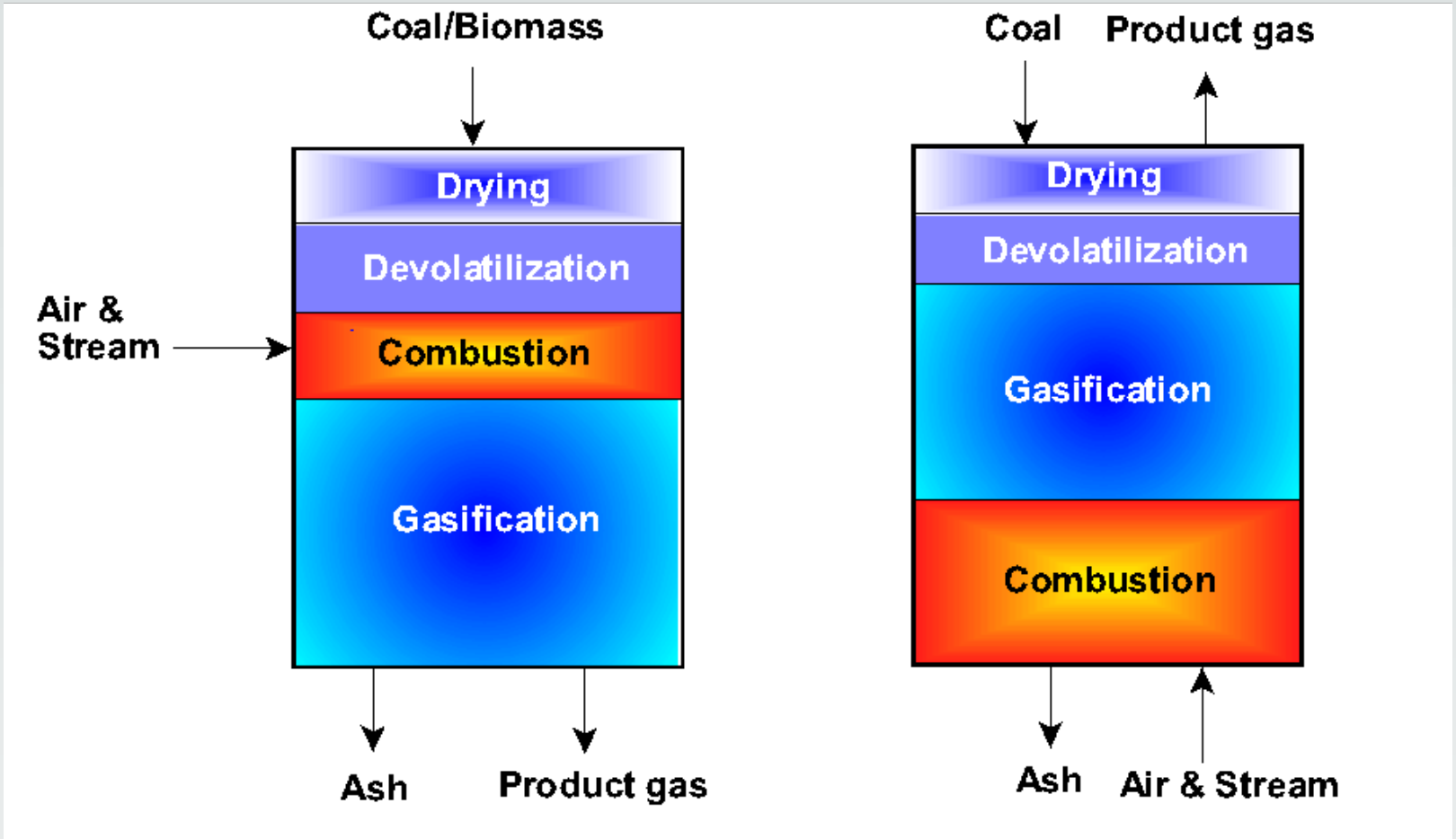
Methanation

$$CO + 3H_2 \longleftrightarrow CH_4 + H_2O$$

Gasifier Gas Composition (Vol %)

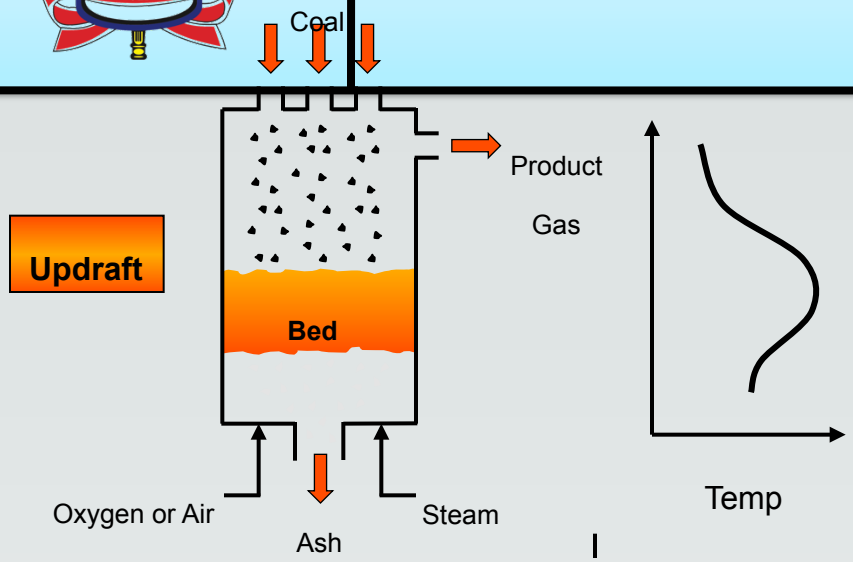
H_2	25 - 30
CO	30 - 60
CO_2	5 - 15
H_2O	2 - 30
CH_4	0 – 5
H_2S	0.2 - 1
COS	0 - 0.1
N_2	0.5 – 4
NH_3 + HCN	0 -0.3
Ash/Slag/PM	

SCHEMATIC FOR FIXED- OR MOVING-BED GAS PRODUCER



E.R. Monazam and L.J. Shadle, (1998).

Types of Gasifiers
1) Moving Bed

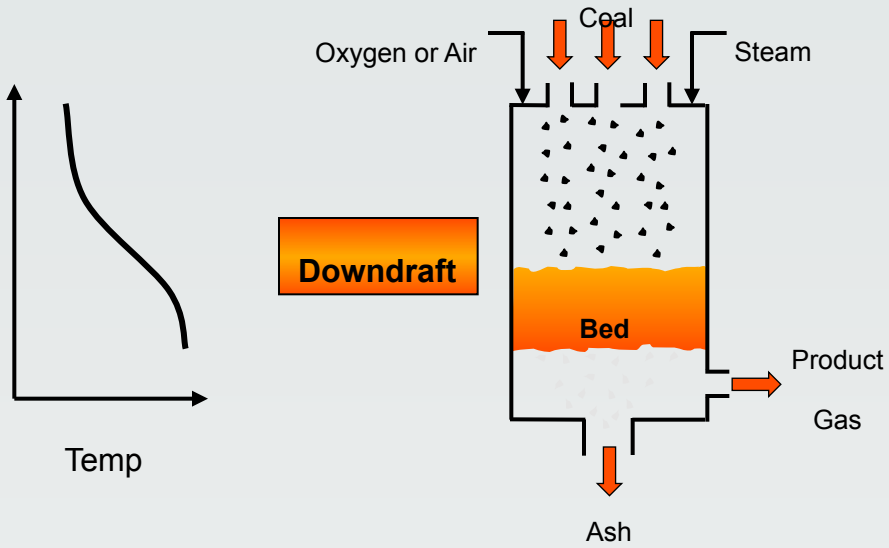


Countercurrent Flow

- Product Gas "COLD" (425-650ºC)
- Tars in Product Gas
- Ash can be Dry or Slagging

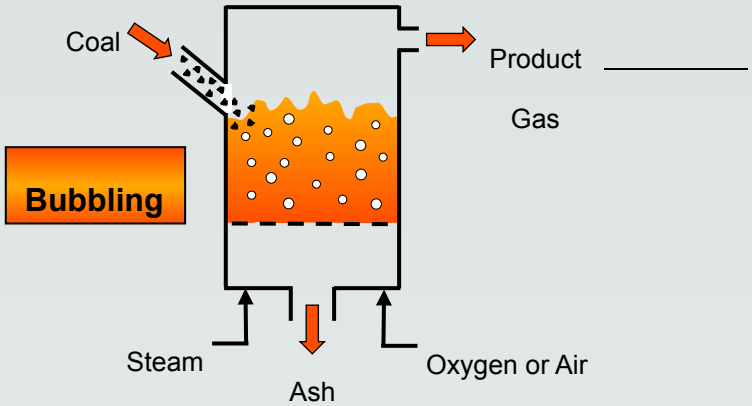
Co-current Flow

- Product Gas "HOT" (700ºC)
- Little Tar in Product Gas

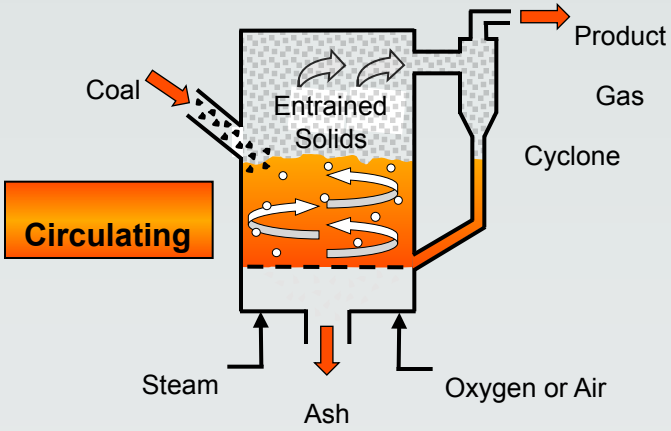


Types of Gasifiers
2) Fluid Bed

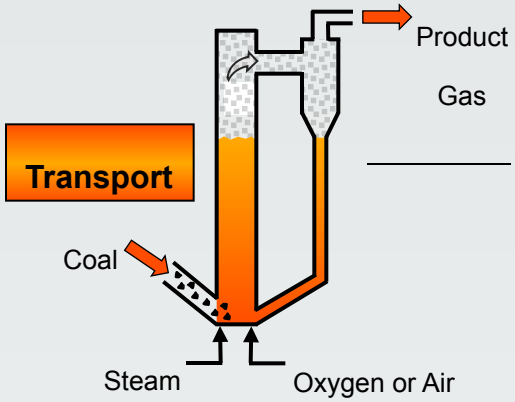
Product Gases 900 - 1,050°C



Low Gas Velocity (<3 m/s)
Solids Disengage from Gas

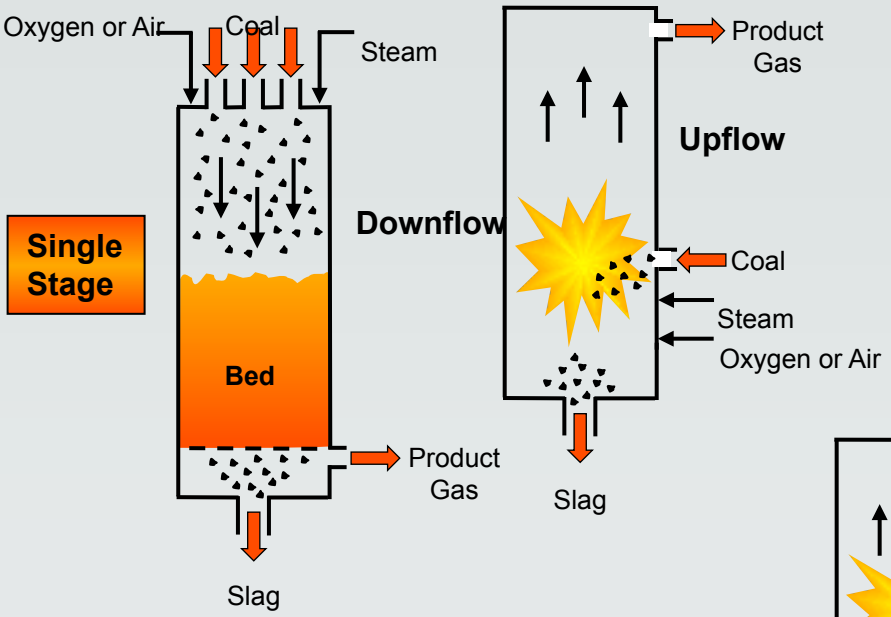


Moderate Gas Velocity (3-6 m/s)
Large Solids Disengage from Gas
Small Solids Entrained, then Recirculated



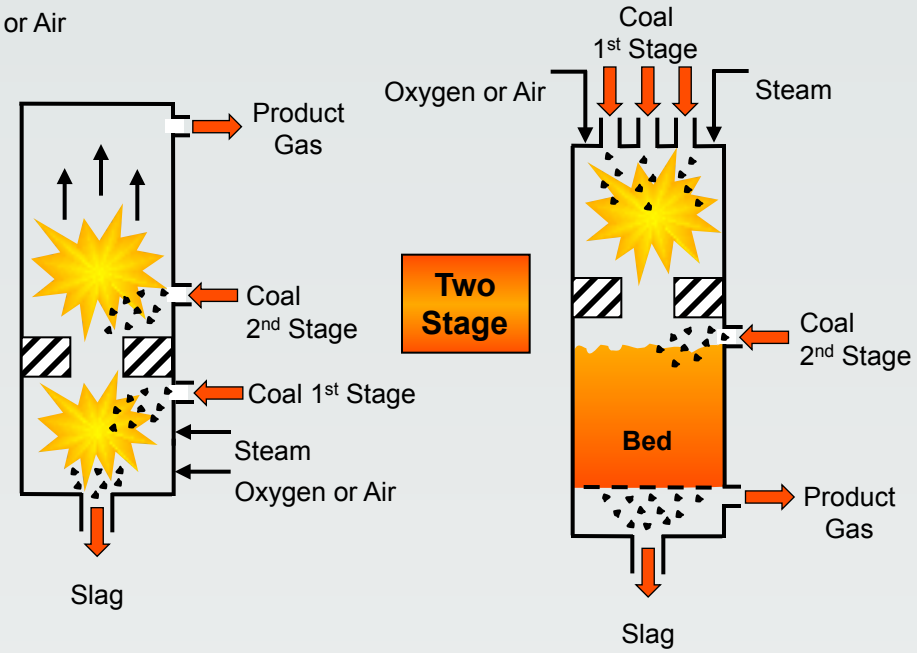
High Gas Velocity (>6 m/s)
All Solids Entrained, then Recirculated

Types of Gasifiers
3) Entrained



High Temperature (>1,250°C)
- **+ Ash Removed as Inlet Slag**
- **+ High Carbon Conversion**
- **+ Negligible Tars**

- **- High Oxygen Consumption**



High Temperature First Stage (>1,250°C)
Second Stage Uses Heat From First
- **+ Lowers Oxygen Consumption**
- **+ Reduces Product Gas Temperature**

F-T PRODUCES 2ND GENERATION OF BIOFUELS

Biosyngas requires high pressure and temperature

BTL – biomass to liquid
CTL – coal to liquid

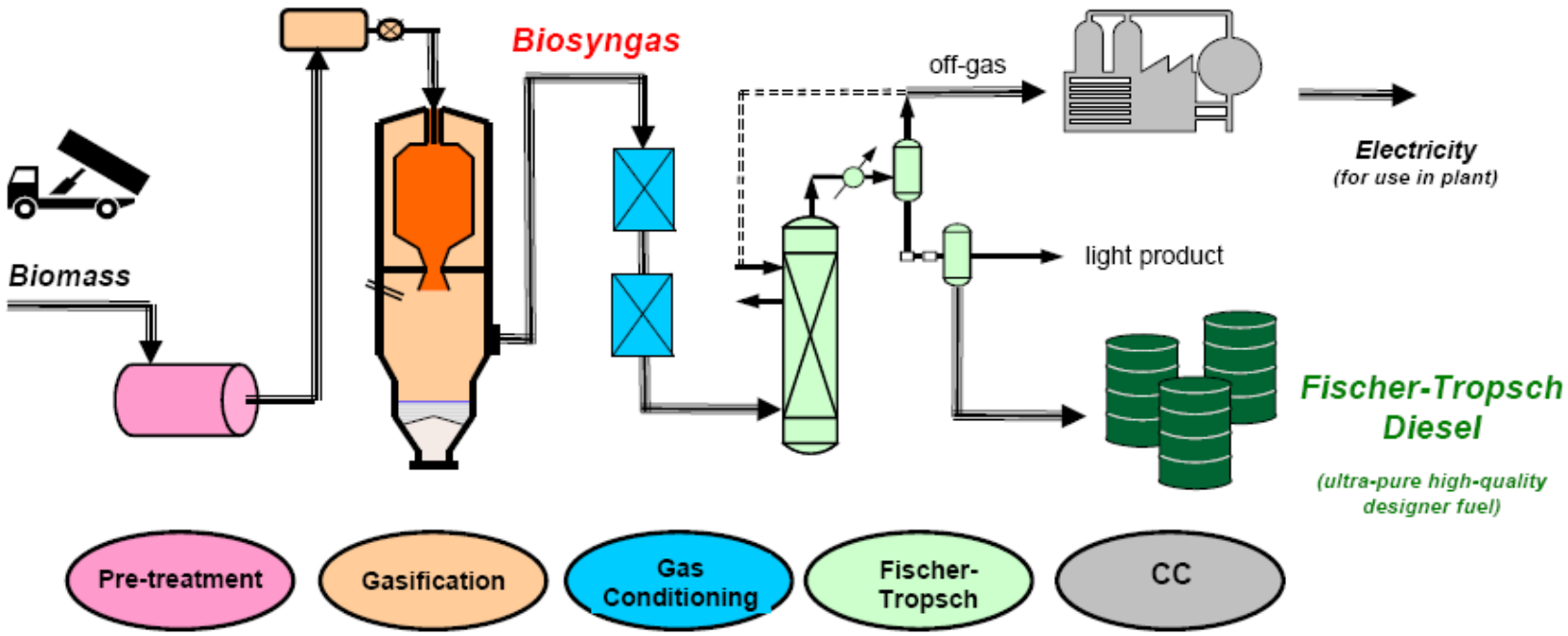
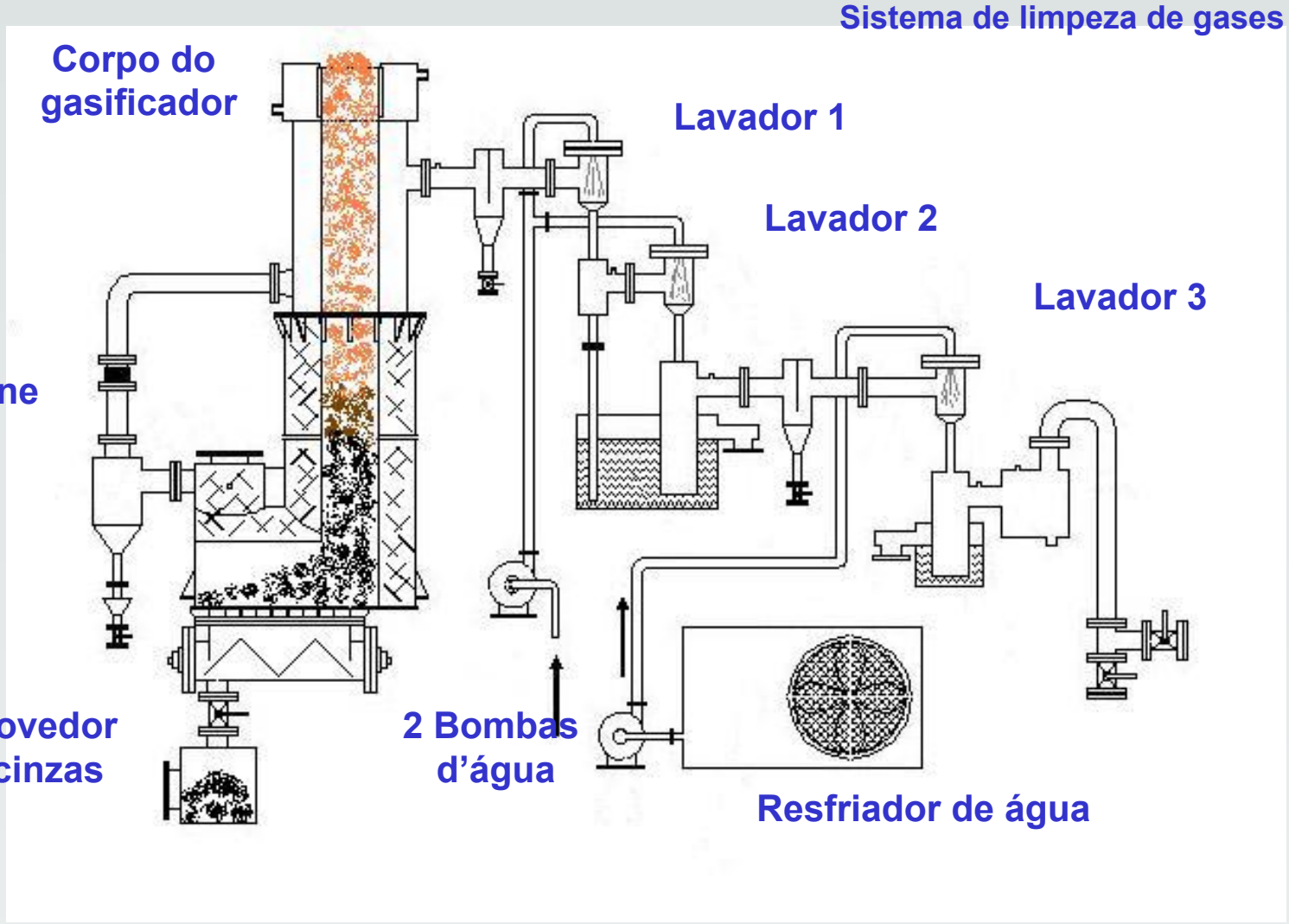
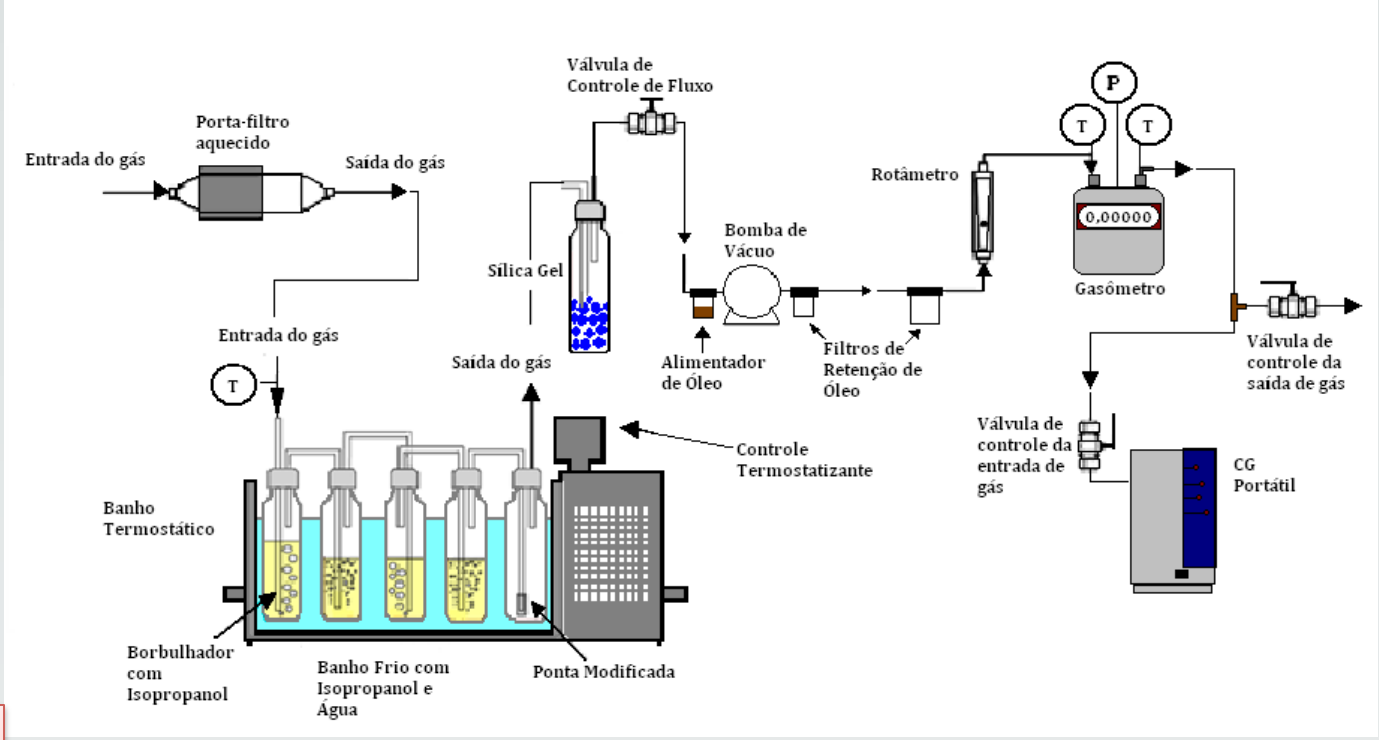


Figure 3.1. Schematic line-up of the integrated BTL plant.

COMPONENTES PRINCIPAIS DO GASIFICADOR



DEVELOP SYSTEM TO QUANTIFY TAR CONTENT

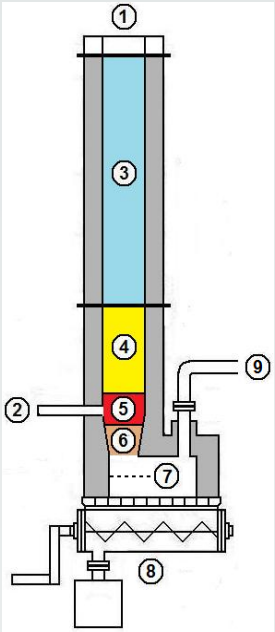


Tar accumulation in the gasifier exit pipe line

OPERATION WITH AÇAI SEEDS WITH AND WITHOUT PEEL

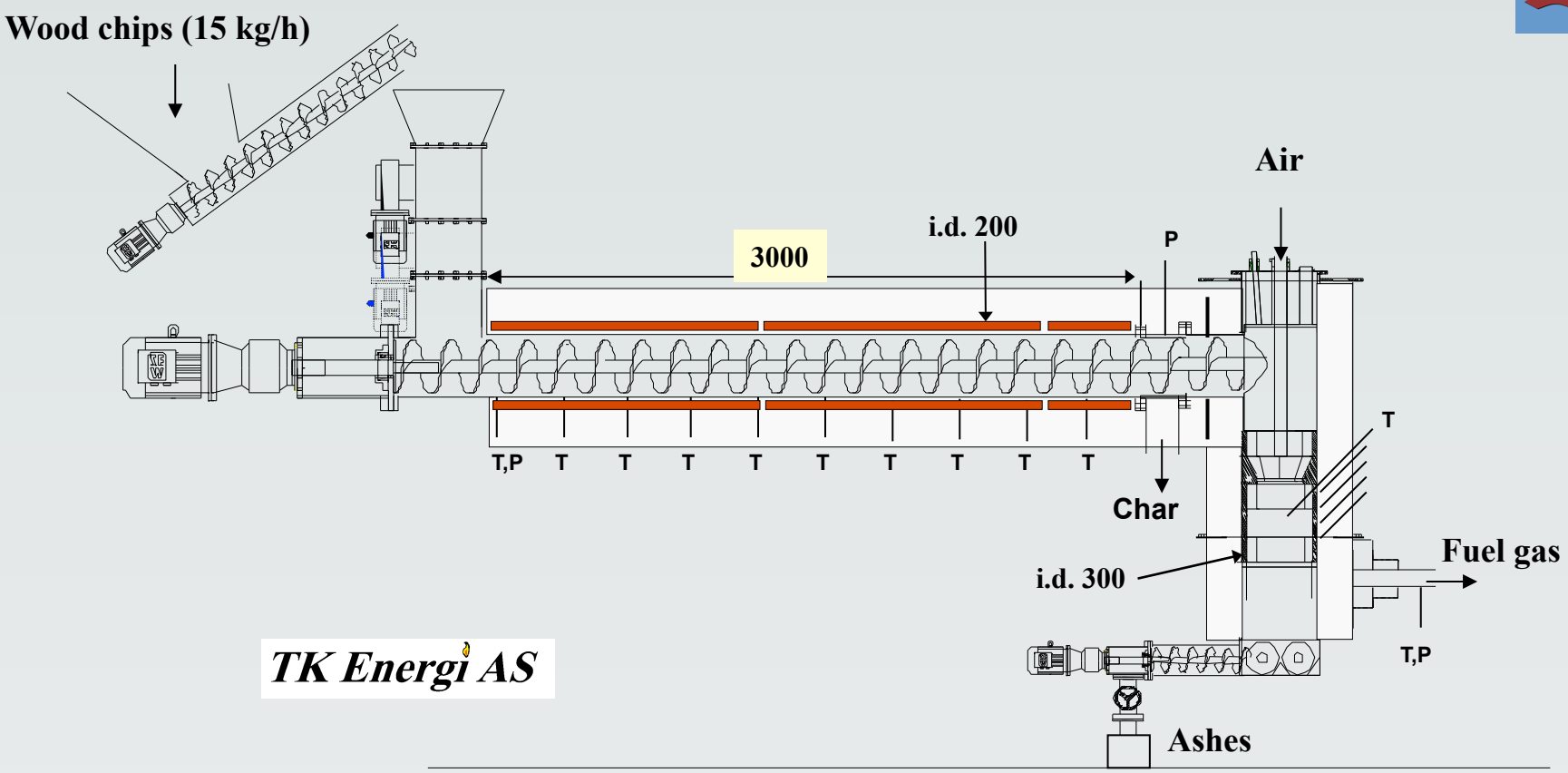
Açai Fruit

Açaí Seed.



Legenda:
1. Entrada de ar superior e de biomassa;
2. Entrada de ar lateral;
3. Região de secagem;
4. Região de pirólise;
5. Região de combustão;
6. Região de redução do resíduo carbonoso;
7. Grelha;
8. Coletor de resíduos;
9. Saída dos gases para o sistema de limpeza.

Two-stage gasifier (75 kWth)

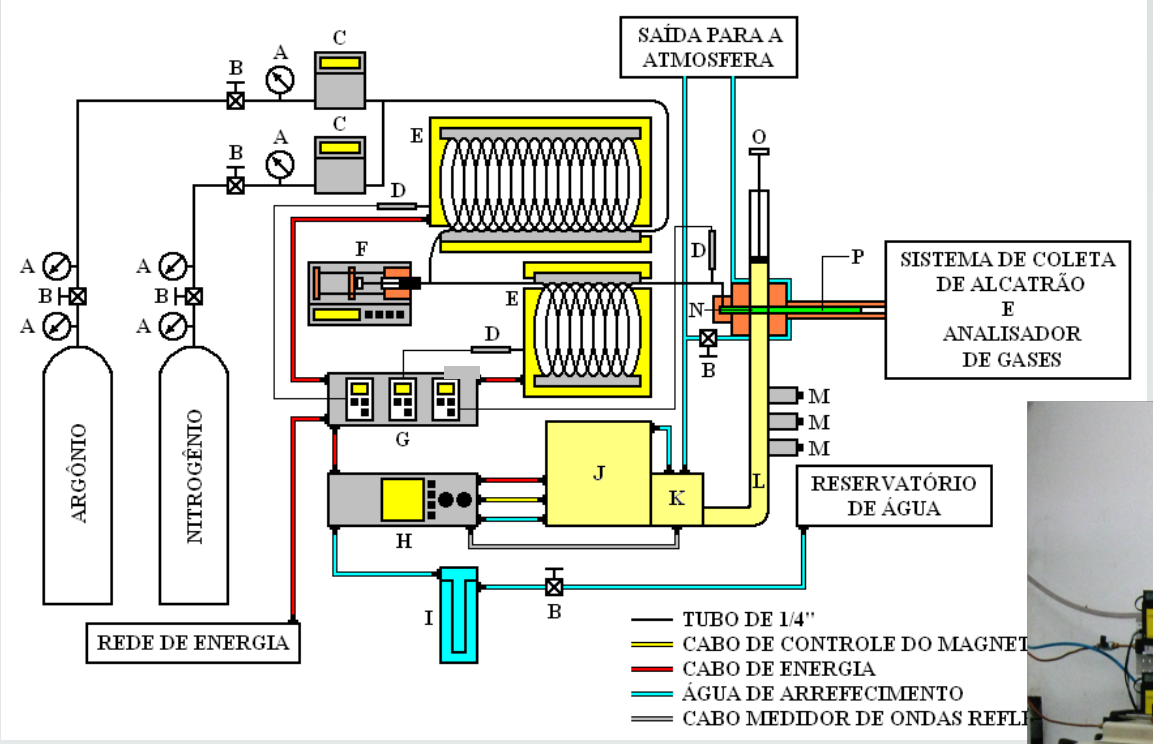


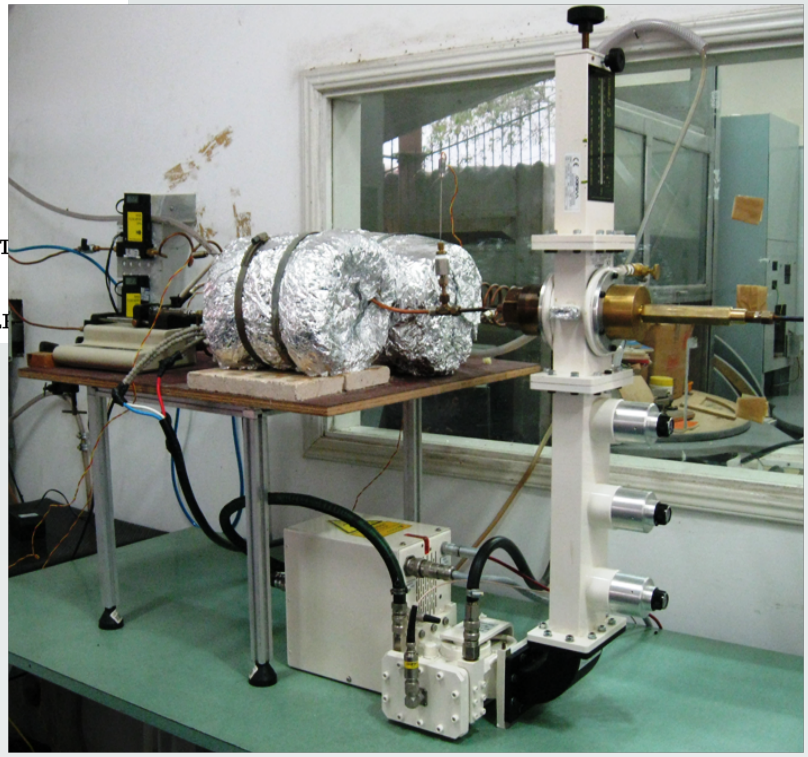
TK Energi AS

Projeto: "Gasificador de dois estágios (Viking) para comunidades isoladas "

- **Gasificação de caroço açaí.**
- **Geração de energia elétrica.**

Plasma Reactor to convert tar into smaller species

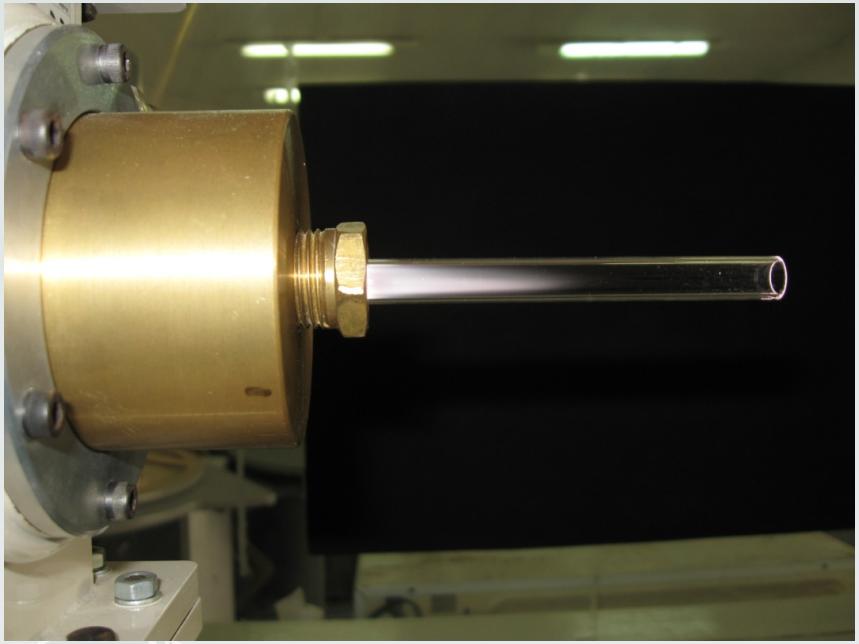




Reactant : Argon-Nitrogen-H2O-Tar/Ethanol

LIMPEZA DE GASES: TOCHA DE PLASMA

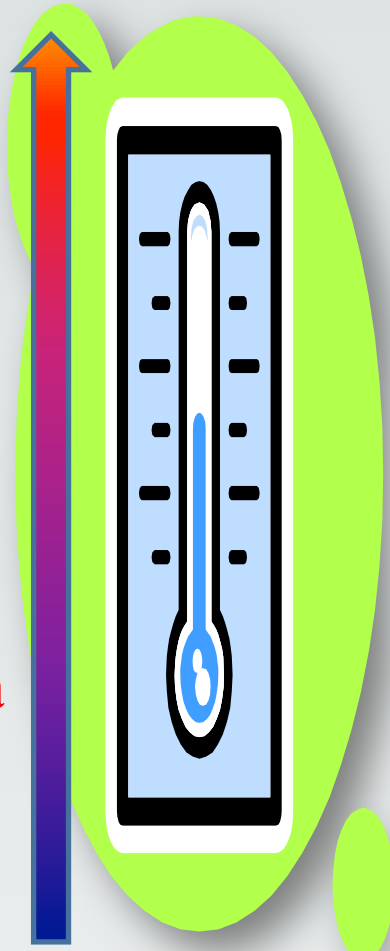
Projeto: "Gasificador com Limpeza de Gases Assistida a Plasma" CNPq/ ITA



Mistura : Argônio-Nitrogênio-H2O-Alcatrão/ Etanol

Termoconversão da biomassa

- Combustão (<1000°C): calor
- Gaseificação (700 até 1000°C): gases
- Carbonização (300 até 700°C):carvão vegetal
- **Torrefação (200 até 300°C): madeira torrada**
- Secagem (até 120°C) : biomassa original



A torrefação: uma definição

- Torrefação é um tratamento termoquímico caracterizado por ocorrer na faixa de temperatura entre 200 e 300°C.

- É conduzido em pressão atmosférica e na presença de uma quantidade mínima de oxigênio, visando evitar a combustão espontânea.

Porque a torrefação?

Objetivos:

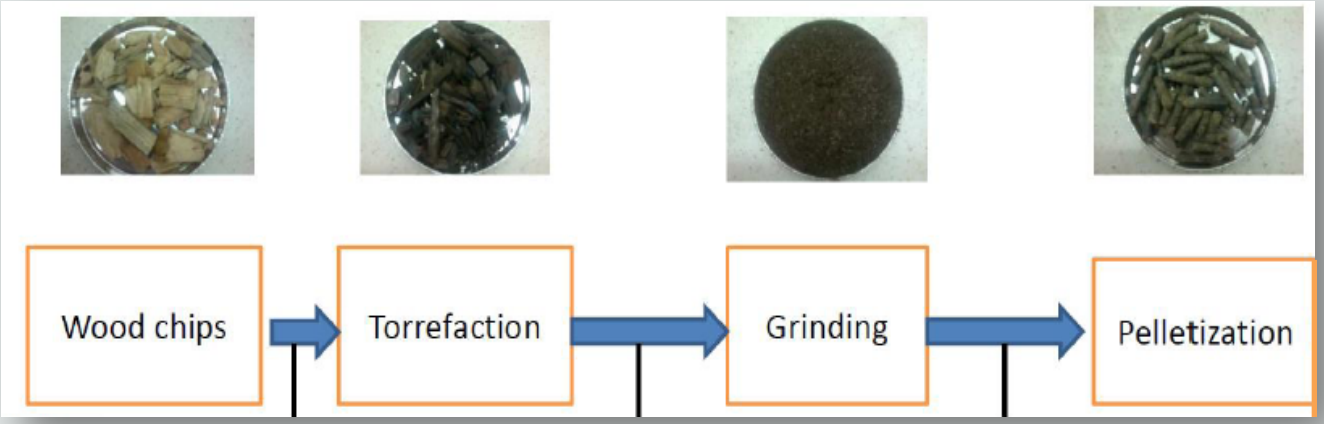
- Produzir um combustível com características físicas, mecânicas e energéticas adaptadas
- Produção de multi-produtos condensáveis com alta padronização;

Algumas consequências:

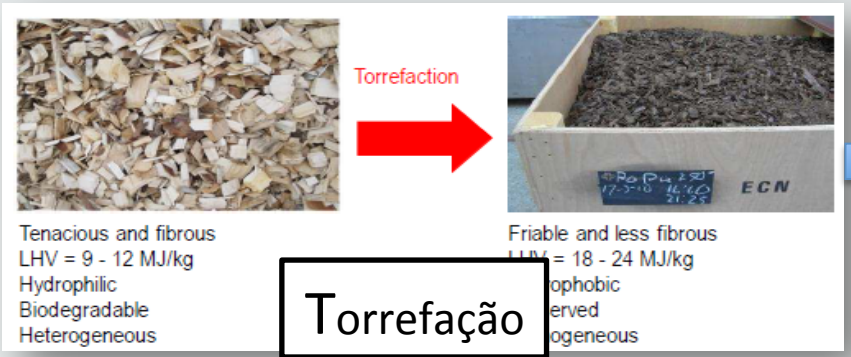
- Redução do custo de moagem, aumentando a friabilidade
- Uso na co-combustão com carvão mineral, o que proporcionaria benefícios ambientais pela redução de emissões de dióxido de enxofre;
- Uso nos gaseificadores com injeção mista (< 0,2mm);
- Substituir moléculas de origem fóssil

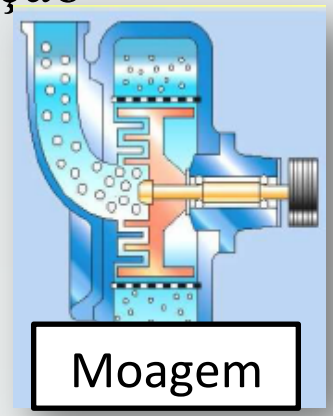
Exemplo de uso da Torrefação

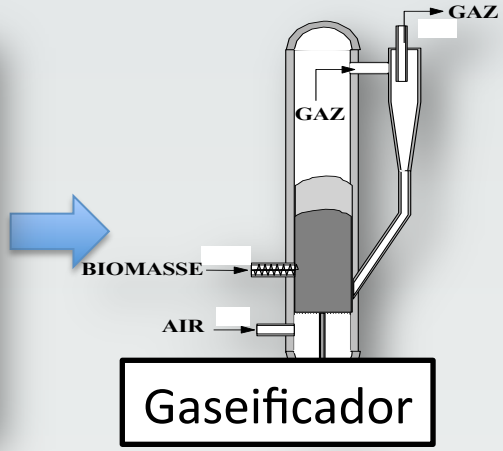
Compactação



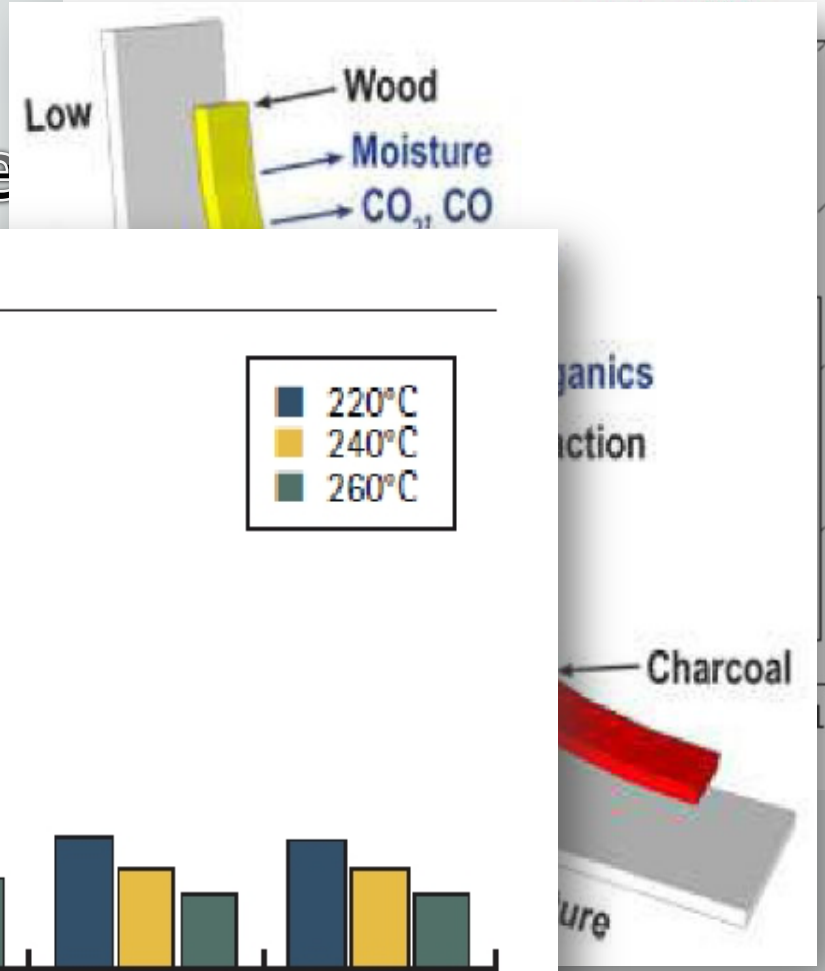
Gaseificação

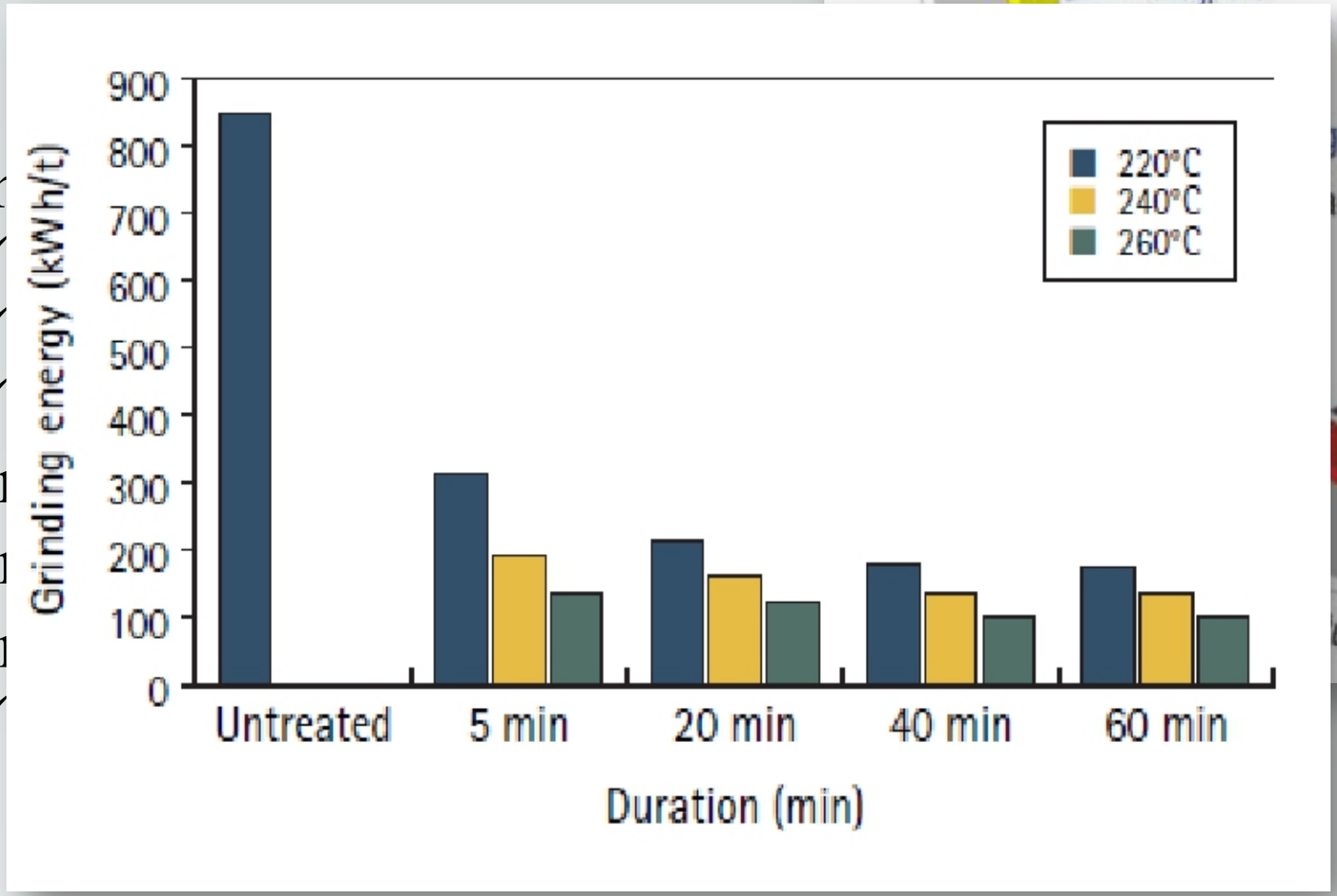






Novas propriedade





- Um
  - ✓
  - ✓
  - ✓
- Per
- Au
- Au
  - ✓

EBMA

GRUPO DE ENERGIA, BIOMASSA & MEIO AMBIENTE

http://www.cultura.ufpa.br/ebma/

UFPA
Universidade **F**ederal do **Pa**rá

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Grupo de Energia, Biomassa e Meio Ambiente

EBMA
Energia **B**iomassa e **M**eio **A**mbiente

PFRH 37 – COPPE/RJ
Conversão de Biomassa Vegetal em Potência e Calor

Agosto 2013

Manoel Fernandes Martins Nogueira
mfmn@ufpa.br