



## Gaseificação seguida por Fischer-Tropsch

- ▶ Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna

# Definições



A gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido (que tenha **C**) em um produto gasoso combustível (**Gás de Síntese**), através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (**800 a 1100**) (LORA, et al., 2012).

A gaseificação da biomassa (BG) é considerada a mais rentável e eficiente forma de conversão de biomassa lignocelulósica em bioenergia (SIKARWAR et al., 2017).

# Definições

## BIOMASSA

É todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, sendo esta de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de energia. A biomassa constitui uma forma indireta de energia solar, pois as plantas capturam energia do sol, através do mecanismo de fotossíntese, transformando em energia química, esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor (CEMIG, 2012).

(BASU, 2006; SANTOS et al., 2013)



<http://www.b2blue.com/detalhes-anuncio/Venda/organicos-residuos-de-poda/>



<http://www.arrozkika.com.br/produtos.php?id=4>

Lenha de eucaliptos



Cavaco de madeira



Pellets de resíduos de madeira



Pellets de bagaço de cana de açúcar



<http://ecogetec.com.br/entenda-biomassa/>

# Definições



<http://www.griinreciclaje.es/reciclaje-de-residuos-de-madera/>

Os principais componentes químicos da biomassa são:

**Celulose - Hemiceluloses – Lignina - Pequena quantidade de cinzas, proteínas e amido**

A concentração de cada um desses componentes depende do tipo de biomassa, tipo de tecido, da idade da planta e das condições de crescimento;

(SANTOS et al., 2014)

Composição **química** (elementar, imediata, poder calorífico e da composição química) e **física** (granulométrica e densidade) da biomassa - afeta diretamente na composição final do **gás de síntese**;

# Importância

- A biomassa é um recurso de energia renovável que compreende principalmente **C, H, O e alguns minerais**.
- Baixa dependência do local e do clima (diferentes biomassas podem crescer em condições variadas).
- Facilidade de armazenamento e transporte (menor densidade de energia do que os combustíveis fósseis).
- Fácil disponibilidade de resíduos de biomassa (combustível de baixo custo).
- As nações desenvolvidas também estão se concentrando na biomassa como energia sustentável.



# Exemplos

## Projetos de demonstração GB-FT:

- Projeto BioTfuel na França
- Plataforma de síntese de gases na central de cogeração a biomassa Güssing , na Áustria
- Projeto Red Rock Biofuels nos EUA
- Projeto Fulcrum Bioenergy nos EUA

Ainda é necessário P&D

# Possibilidades

Resíduos Urbanos	Florestal	Agroindustrial	Outros
Madeira de demolição, resíduos de poda, esgoto, fezes, lixo orgânico, resíduos agrícolas, resíduos de culturas, resíduos de madeira de moinho, resíduos orgânicos urbanos...	Resíduos de madeira, serragem, lenha, arbustos e casca, culturas lenhosas de curta rotação, gramíneas...	Casca de arroz, bagaço de laranja, casca de coco, resíduos de culturas alimentares (grãos e oleaginosas), culturas de açúcar (cana-de-açúcar, beterraba sacarina, melão, sorgo), resíduos de culturas forrageiras...	Plantas aquáticas, algas, plantas daninhas, resíduos de aterro (perigosos, não-perigosos e inertes), resíduos líquidos, resíduos orgânicos, esgoto municipal, microalgas...



[http://www.usp.br/agen/wp-content/uploads/podas\\_bol.jpg](http://www.usp.br/agen/wp-content/uploads/podas_bol.jpg)



<http://www.griinreciclaje.es/reciclaje-de-residuos-de-madera/>



Marinho, Y. F.

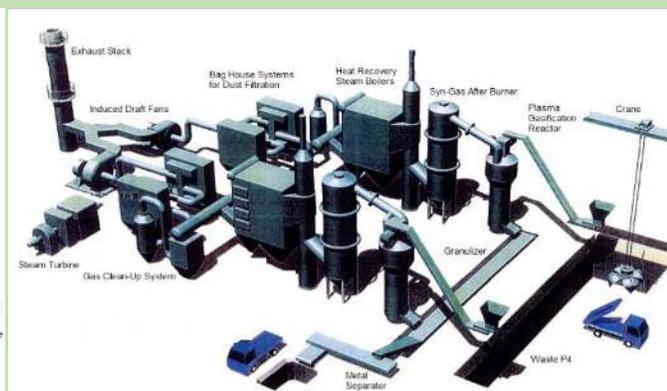
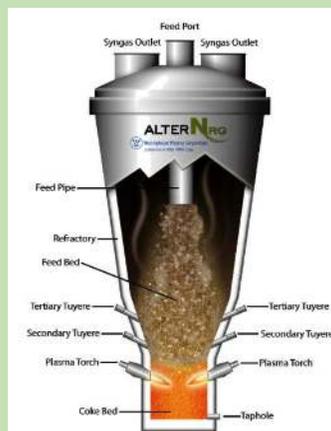
# Possibilidades

- Desenvolvimentos em sistemas de gaseificação nas últimas décadas permitiram a **utilização de matérias-primas perigosas ou com alto teor de água, como RSU, lamas, borracha, plásticos**, etc.
- A **gaseificação do plasma** é uma dessas vias desenvolvidas para destruir esses tipos de resíduos.
- Um produto com gás de alta qualidade (**baixo teor de alcatrão e CO<sub>2</sub>**) é obtido via gaseificação de plasma.

Geração de energia a partir de uma matéria-prima tóxica (fábrica de Utashinai, no Japão).

Instalado em 2002 para tratar MSW e gerar energia.

A partir de 2014, são necessárias 268 toneladas de RSU por dia e gera 7,9 MWh de eletricidade.



Willis, et al., 2010

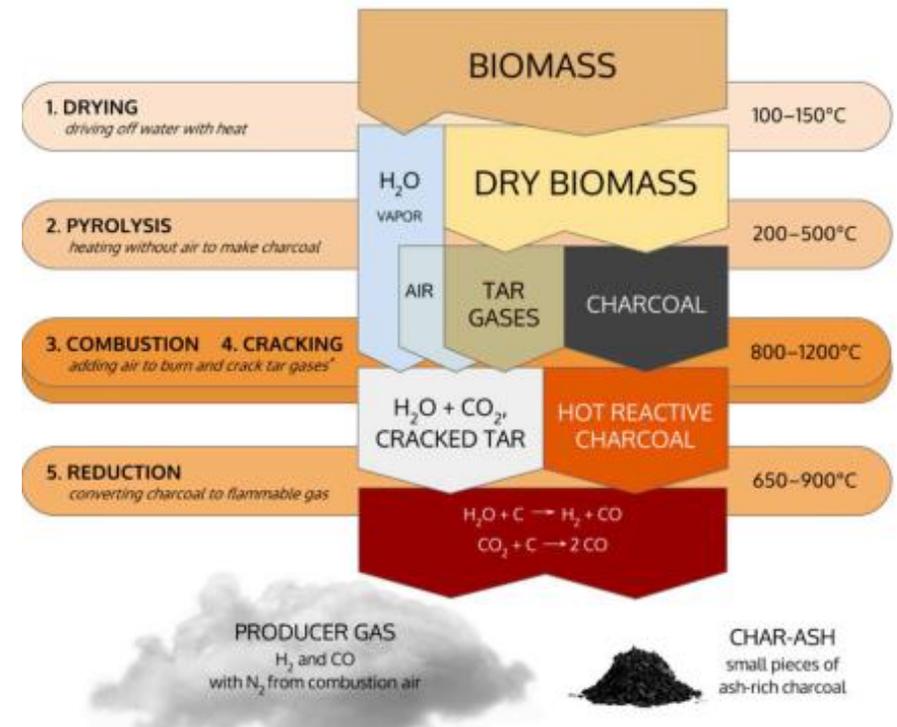
# Possibilidades

- **Torrefação é uma rota para aumentar o potencial de algumas biomassas para gaseificação;**
- **É uma forma de pirólise leve;**
- **Aquecimento a 200-300 °C sob uma atmosfera inerte, levando a perda umidade (preferencialmente), hidrogênio e espécies oxigenadas;**
- **A integração dos processos pode gerar alta eficiência energética para um processo geral;**
- **Simulações indicam, conversões superiores a 90%, para a integração de um ciclo de vapor com uma central de torrefação.**

# Etapas da Gaseificação de biomassa

**Etapa I:** Pirólise ou decomposição térmica (600 °C).

- Decomposição térmica da biomassa (ausência de oxigênio ou ar);
- O material volátil na biomassa é reduzido;
- Liberação de hidrocarbonetos gasosos da biomassa, a biomassa é reduzida ao carvão sólido (*Char*).



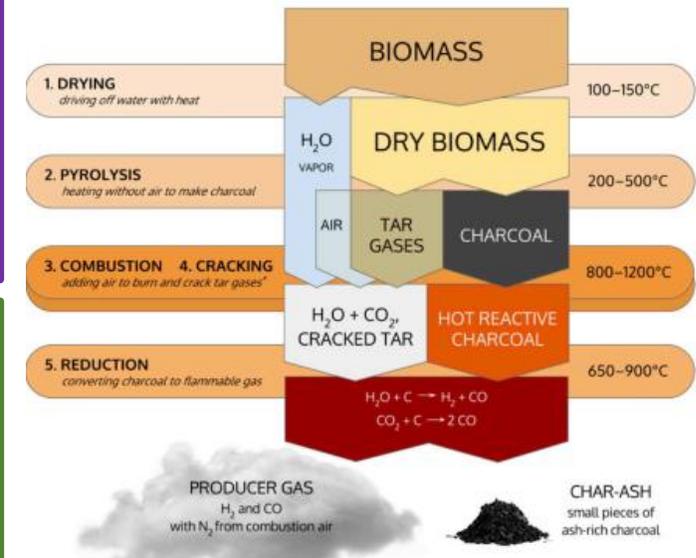


# Etapas da Gaseificação de biomassa

**Etapa II:** Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, etapa que constitui a fonte de energia térmica para os processos de volatilização e gaseificação;



- Hidrogênio presente na biomassa também é oxidado para gerar H<sub>2</sub>O.
- Grande quantidade de calor é liberada com a oxidação do carbono e hidrogênio;
- Se o **oxigênio** estiver presente em **quantidades inferiores a estequiométrica**, pode ocorrer **oxidação parcial do carbono** – gerando CO.

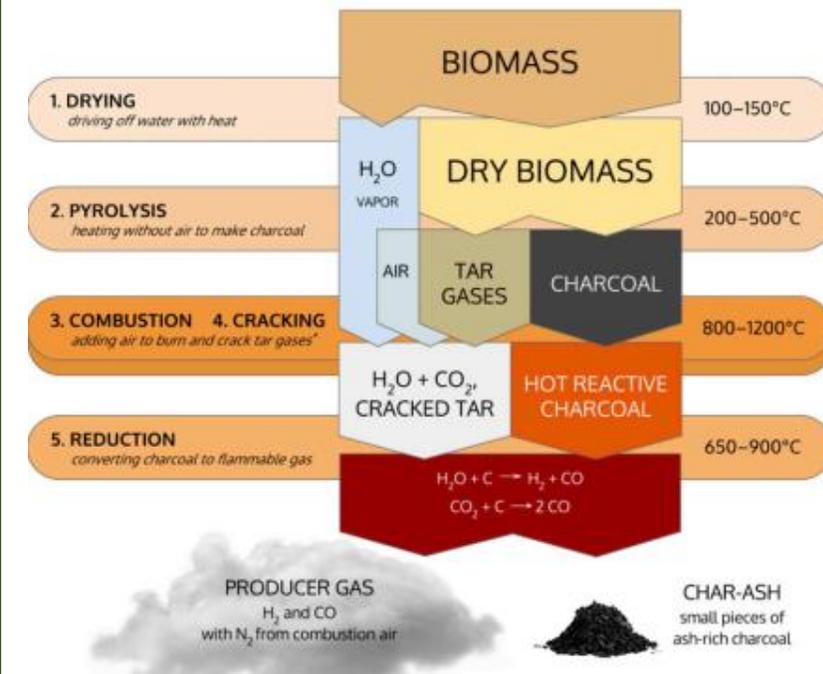


# Etapas da Gaseificação de biomassa

- Etapa III: **Gaseificação propriamente** - reações heterogêneas (gases e o coque residual) e reações homogêneas (entre os produtos já formados);

## REAÇÕES HETEROGÊNEAS

- A etapa de redução (gaseificação) - composta de uma série de outras **reações endotérmicas** que irão  **ditar a composição final do gás produzido**;
- Maior  **formação de  $H_2$  e  $CO$**  na composição final do gás de síntese;
- As reações de gaseificação, ou redução, são:  **reação de Boudouard, reação de Shift, reação de metanização e reação  $H_2O$ -gás.**



# Etapas da Gaseificação de biomassa

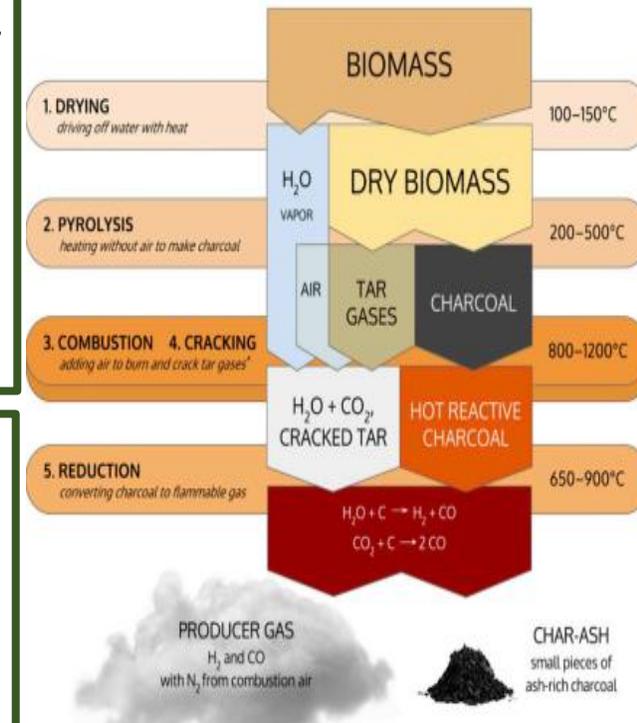
## REAÇÕES HETEROGÊNEAS

- BOUDOUARD: O  $\text{CO}_2$  presente no gaseificador reage com o *Char* (representado por carbono) - formando  $\text{CO}$ ;



- SHIFT: Importante e desejável para a composição final do gás de síntese;

Reduz vapor de água – produz  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}$  (maiores valores caloríficos).



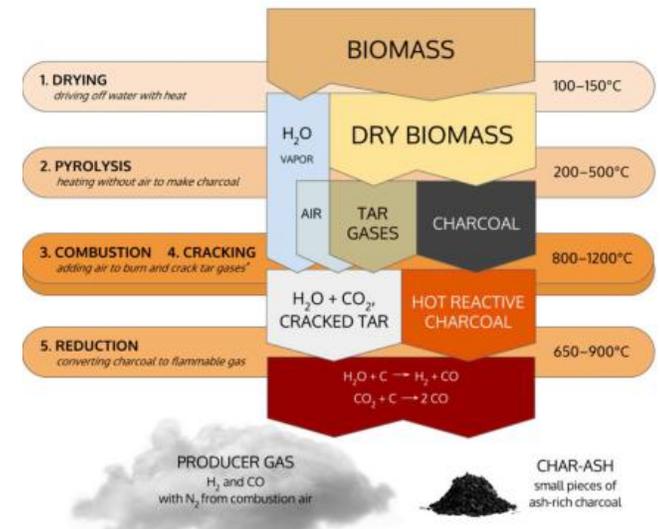
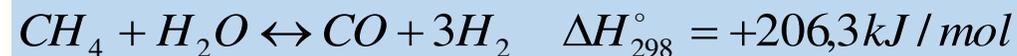
# Etapas da Gaseificação de biomassa

- METANO: Formado pela reação de metanização;
- O C presente no combustível reage com  $H_2$ ;



## REAÇÕES HOMOGÊNEAS

- ÁGUA-GÁS: oxidação parcial do C pelo vapor de água;
- Pode vir de **diferentes fontes** no reator: da evaporação na etapa de secagem, associado ao ar de entrada, e também da pirólise;

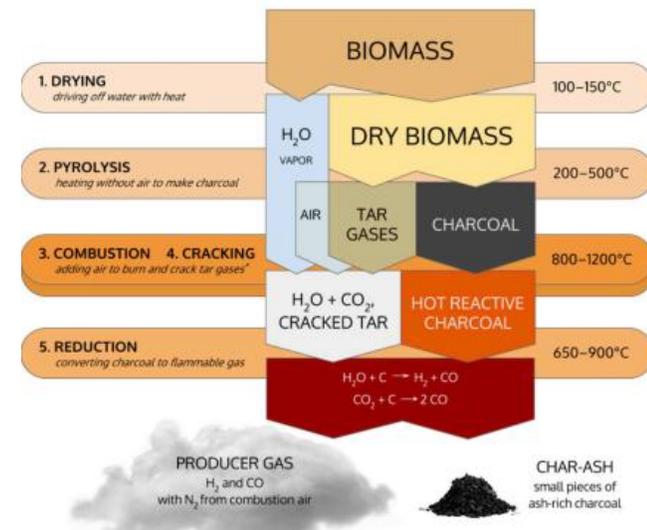


# Etapas da Gaseificação de biomassa

- **Etapa IV:** Craqueamento do alcatrão;
  - processo de degradação térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros gases como produtos;



- **Etapa V:** Oxidação parcial dos produtos da pirólise;



# Produtos da gaseificação



## Gaseificação

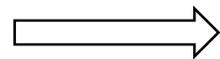
Estes gases combustíveis contêm  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , outros hidrocarbonetos, gases inertes e diversos contaminantes (**ex. particulados e alcatrões**).

Os sistemas de gaseificação operam de forma a limitar a oxidação completa do hidrogênio para água, e do monóxido de carbono para dióxido de carbono.

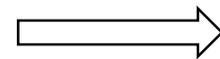
LORA, et al., 2012.

**Alcatrão** (misturas de oxigenados, alquila fenóis, éteres fenólicos, éteres heterocíclicos e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares)

**Rota Tecnologia**



**Eficiência**



**Aplicações**

Sikarwar et al., 2017

# Produtos da gaseificação

## Aplicações

Em processos industriais de produção de hidrogênio para células combustíveis, metanol, hidrocarbonetos, combustíveis e vários produtos químicos, tais como amônia. Pode ser utilizado em equipamentos como Turbinas a Gás.

- **Motores Alternativos de Combustão Interna.**
- **É possível obter hidrocarbonetos com características semelhantes aos combustíveis líquidos comerciais, tais como gasolina e diesel.**

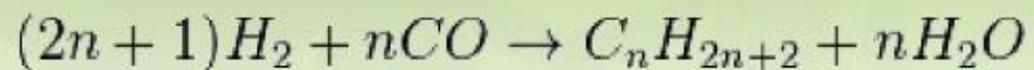
**A qualidade do gás produzido depende de fatores, tais como:**

- O tipo do reator
- Parâmetros de operação
- Agentes de gaseificação

# Produtos da gaseificação

## Aplicações

*Síntese de Fischer Tropsch*



*Geração de energia elétrica*

*Produção do biometanol*

*Produção de hidrogênio*



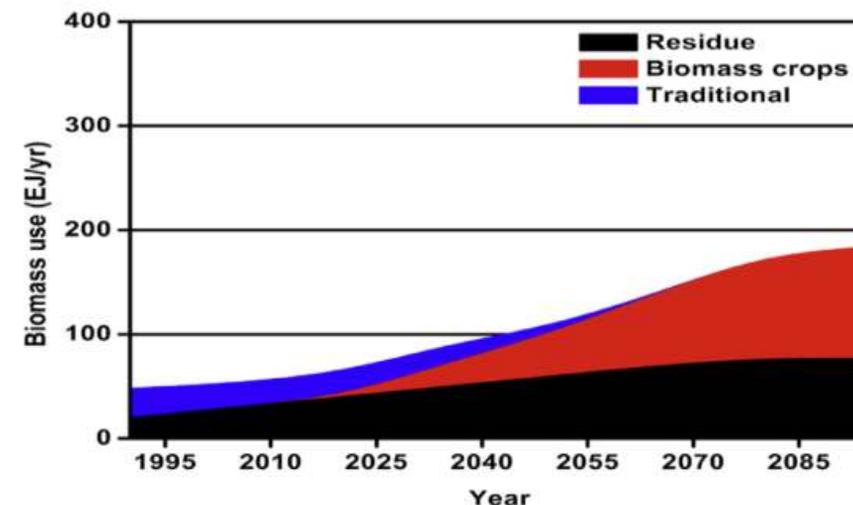
Hidrogênio



# Produtos da gaseificação

## *Gás de síntese para FT*

Passado, presente e futuro da bioenergia



Fonte: Sikarwar et al., 2017

É o nome dado a uma mistura de  $H_2$  e  $CO$  que pode ser produzido a partir do ***gás natural, carvão, petróleo, biomassa e até mesmo resíduos orgânicos.***

A disponibilidade e flexibilidade da base de recursos são as chaves para os usos atuais e futuros do gás de síntese.

# Produtos da gaseificação

Embora existam numerosas plantas de GB em escala comercial, para aplicações térmicas e elétricas, a geração de combustíveis via FT, ainda não atingiu essa escala.

- Tabela 1- Plantas comerciais FT

Organization	Location	Date of commissioning	Raw material	Capacity (bpd)
Shell	Qatar	2009	Natural gas	140,000
SasolChevron	Escravos	2007	Natural gas	34,000
Sasol/Qatar Petroleum	Qatar	2006	Natural gas	34,000
Shell	Bintulu	1993	Natural gas	12,500
MossGas	Mossel Bay	1992	Natural gas	30,000
Sasol	Secunda	1982	Coal	85,000
Sasol	Secunda	1980	Coal	85,000
Sasol	Sasolburg	1955	Coal	2500

# Exemplos gaseificação

**Table 13**  
FT plants based on biomass gasification around the globe [409–412,420,421].

Organization/year	Gasifier/feedstock	FT synthesis	Scale	Duration	Details
Red Rock Biofuels (USA), 2017	TRI steam reformer, forest and saw mill waste	Velocys reactor, Co catalyst	Commercial	– <sup>a</sup>	460 t day <sup>-1</sup> biomass feed, 1100 barrels day <sup>-1</sup> liquid fuel
Sierra Biofuels, Fulkrum Bio-energy (USA), 2016	TRI steam reformer, MSW	Velocys reactor, Co catalyst	Commercial	–	400 t day <sup>-1</sup> MSW feed, 657 barrels day <sup>-1</sup> liquid fuel
Solena Fuels, Green Sky (UK), 2015	Solena plasma gasifier, municipal and commercial waste	Velocys micro-channel reactor, Co catalyst	Commercial	–	1157 barrels day <sup>-1</sup> jet fuel
SYNDIESE (USA), 2015	Entrained flow, oxygen-blown, forest and agricultural waste	–	Commercial	–	205 t day <sup>-1</sup> biomass feed, 530 barrels day <sup>-1</sup> liquid fuel
KITECH/KIER/KRICT (Korea), 2011	BFB (20 kW <sub>th</sub> ), steam-blown, wood pellet	Fixed bed, Fe catalyst	Bench	500 h	No poisoning of catalyst, 2.8 L/d product, over 92% overall CO conversion, C <sub>5+</sub> selectivity above 50%
Cearfuels/Rentech (USA), 2011	HEHTRR (8 ton day <sup>-1</sup> ) (entrained flow gasifier), steam-blown, various wood	Slurry, Fe catalyst	Pilot	–	1600 L d <sup>-1</sup> product
TRI (USA), 2011	BFB (5 t day <sup>-1</sup> ), steam-blown, black liquor	Fixed bed, Co catalyst	Pilot	Over 1300 h	80 L d <sup>-1</sup> product, 70% CO conversion
CUTEC (Germany), 2010	CFB (400 kW <sub>th</sub> ) steam/oxygen-blown, mainly straw	Fixed bed, Co catalyst	Pilot/lab	900 h	150 mL d <sup>-1</sup> product
Velocys (USA), 2010	DFB (8 kW <sub>th</sub> ) (Gussing gasifier), steam-blown, wood chip	Microchannel, Oxford catalyst	Demo/pilot	Over a month	115 kg day <sup>-1</sup> product, 70% CO conversion
AIST (Japan), 2010	Downdraft (40 kg/h), oxygen-enriched air blown, wood chips	Slurry bed, Co/SiO <sub>2</sub> catalyst	Bench	–	C <sub>5+</sub> selectivity 87.5%, 0.1625 L-hydrocarbon kg-wood <sup>-1</sup>
MIUN (Sweden), 2008	DFB (150 kW <sub>th</sub> ), steam-blown, wood pellet	Fixed bed, Fe or Co catalyst	Lab	–	–
CHOREN (Germany), 2007	Carbo-VR (45 MW <sub>th</sub> ) (Entrained flow 3-stage gasifier), oxygen-blown, waste wood/wood chip	Fixed bed, Co catalyst	Commercial	–	43 t day <sup>-1</sup> product
Integrated project RENEW (UN), 2007	DFB (8 kW <sub>th</sub> ) (Gussing gasifier), steam-blown, wood chip	Slurry, Co catalyst	Demon	495 h	C <sub>5+</sub> selectivity above 90%, no loss of catalyst activity
TUV (Austria), 2005	DFB (8 kW <sub>th</sub> ) (Gussing gasifier), steam-blown, wood chip	Tubular slurry, Co or Fe catalyst	Demo/lab	–	2.5–5 kg d <sup>-1</sup> product, 90% CO conversion
ECN (Netherlands), 2003	CFB, oxygen-blown, willow	Fixed bed, Co catalyst	Pilot/lab	500 h	C <sub>5+</sub> selectivity around 90%, no loss of catalyst activity

- *Resíduos florestais e serraria*
- FT- Catalisador Co
- Planta- Comercial
- 460 t dia<sup>-1</sup> alimentação por biomassa,
- 1100 barris dia<sup>-1</sup> de combustível líquido



(Sikarwar et al., 2017)

# Exemplos

## • PROJETO RED ROCK BIOFUELS NOS EUA

Fundada em 2011 e está posicionada para ser a principal produtora de combustíveis para jatos e diesel drop-in, renováveis e de baixo carbono.

A indústria da aviação civil exigirá cerca de 1,5 bilhão de galões por ano de capacidade de produção de novos combustíveis renováveis para atender aos acordos.

Para atender a essas altas demandas por combustíveis renováveis de baixo carbono, a RRB construirá um portfólio global de biorrefinarias para converter a biomassa lenhosa de resíduos em combustível renovável para jatos e diesel.



# Classificação dos gaseificadores

## Poder Calorífico do Gás Produzido:

- baixo poder calorífico ( $5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ );
- médio Poder Calorífico ( $5 \text{ a } 10 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ );
- alto Poder Calorífico, de  $10 \text{ a } 40 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ .

## Tipo de Agente Gaseificador:

- Ar;
- Vapor d'água;
- Oxigênio;
- hidrogênio (hidrogaseificação);
- $\text{CO}_2$ .

## Pressão de Trabalho:

Baixa pressão (atmosférica);  
Pressurizados (até 6 mpa).

## Natureza da biomassa:

Resíduos agrícolas;  
Resíduos industriais;  
RSU;  
Biomassa in natura;  
Biomassa peletizada;  
Biomassa pulverizada.

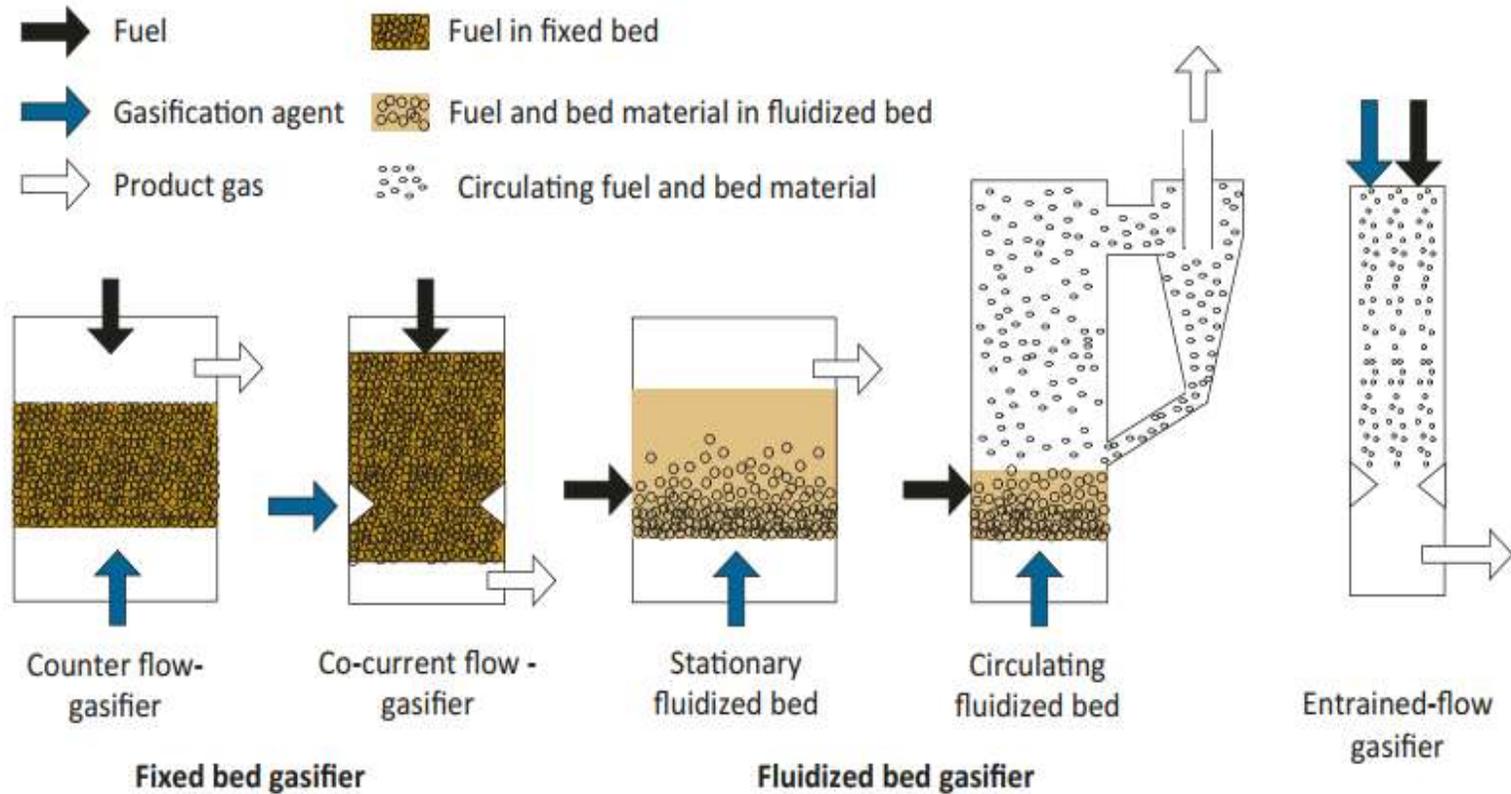
# Classificação dos gaseificadores



LACO, UFPE

## Movimento Relativo das Massas:

- Contrafluxo (contracorrente)
- Fluxo direto (concorrente)
- Leito fluidizado (borbulhante, circulante, duplo)



Rauch et al.,  
2018

# Classificação dos gaseificadores

Design do gaseificador	Principais vantagens	Principais limitações
Leito fixo	Mais simples e robusto. Econômico para pequena escala. Tolerante para ampla variedade de biomassa.	Não possui temperatura uniforme. Alto rendimento de alcatrão e carvão
Gaseificador de leito fluidizado	Distribuição de temperatura uniforme. Baixo rendimento de carvão e alcatrão. Pouco tempo de permanência. Alta capacidade de processar matéria-prima.	Não econômico para pequena escala. Altas frações de material particulado no gás de síntese.
Gaseificador de fluxo arrastado	Muito baixo rendimento de alcatrão. Econômico para larga escala. Gás de alta qualidade.	Impróprio para uso com biomassa. Não tolera partículas grosseiras.
Gaseificador único (integrado com Purificador de gás)	Design robusto Econômico	É necessário mais P&D para avançar para um nível comercial. Requer muita energia.
Gaseificador de plasma	Capaz de tratar resíduos tóxicos	Alto custo de instalação e manutenção.

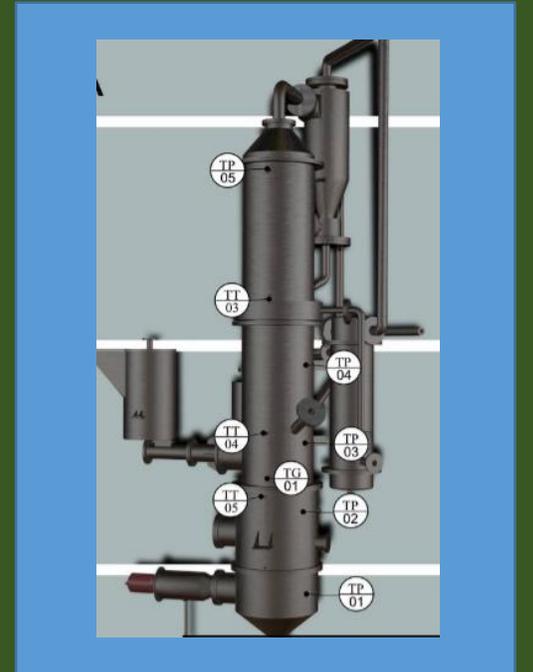
# Agentes de gaseificação

- É crucial para a produção de gás de síntese para Querosene de Fischer-Tropsch.
- Agentes apropriados de gaseificação: oxigênio, vapor e  $\text{CO}_2$ .
- O vapor é o agente de gasificação mais desejável, pois o vapor é facilmente disponível e leva ao maior conteúdo de  $\text{H}_2$ .
- $\text{CO}_2$  seria um agente de gaseificação possível, no entanto, nenhum projeto de demonstração usa esta opção até agora.
- Ar acarreta problemas (presença de nitrogênio).

# Fatores de desempenho

## OS FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO

- Razão de equivalência (ER);
- Temperatura;
- Vazão de aquecimento;
- Tipo de agente de gaseificação;
- Pressão;
- Propriedades da alimentação;
- Catalisadores;
- Tempo de residência;
- As características da biomassa em termos físico-químicos e energéticos;



LORA, et al., 2012.

# Fatores de desempenho

Fator de ar (razão de equivalência)

- É uma das variáveis operacionais mais importantes na **gaseificação com ar** (NARVÁEZ et al., 1996; DOGRU et al., 2002).
- Corresponde ao valor da relação ar-combustível real utilizada no processo, dividida pela relação ar-combustível teórico ou estequiométrico.

**A velocidade superficial do agente de gaseificação é** definida como quociente entre a vazão volumétrica de gás produzido e área transversal do reator), para a gaseificação desenvolvida em reatores de leito fixo.

# Fatores de desempenho

## Temperatura

- Do ponto de vista termodinâmico, a temperatura deve estar condicionada principalmente as quantidades de ar e combustível que participam da reação.
    - A composição elementar e as características imediatas (voláteis e carbono fixo) do combustível.
  - Deve-se garantir que a **temperatura tenha o valor adequado** para que o carbono presente no combustível seja transformado por completo e não se acumule nas cinzas.
- 
- Altas temperaturas favorecem a formação de  $H_2$  e  $CO$ , enquanto a concentração de metano diminui;
  - No caso de gaseificadores de leito fixo (tipo concorrente e contracorrente), a temperatura no interior do reator pode variar numa ampla faixa (pela heterogeneidade das reações do processo);
  - Em reatores de leito fluidizado, a temperatura de operação está limitada pela temperatura de sinterização das partículas que compõem a mistura (inerte, cinzas), a qual geralmente não supera os  $950^\circ C$ .

# Composição do gás

## *Capacidade de produção de gás*

Expressa a vazão do gás gerado por unidade de massa do combustível alimentado ao sistema.

A produção de gás tem uma relação diretamente proporcional com o fator de ar (NATRRAJAN et al. 1998; ZAINAL et al., 2002) e o tempo de residência dos gases na zona de redução (GARCIA-BACAICOA et al., 1994).

# Composição do gás

## *Composição e poder calorífico do gás produzido*

- É composto por: **CO<sub>2</sub>**, **CO**, **CH<sub>4</sub>**, **H<sub>2</sub>O**, **H<sub>2</sub>**, **N<sub>2</sub>** e poucas quantidades de alcatrão;
- Pode conter também algumas quantidades de **O<sub>2</sub>**;
- As concentrações de **CO**, **H<sub>2</sub>** e **CH<sub>4</sub>** estão condicionadas ao desenvolvimento das reações envolvidas na gaseificação;
- O agente de gaseificação utilizado tem uma influência considerável na **composição** e no **poder calorífico** do gás produzido.

# Composição do gás

Compound	Unit	Oxygen gasification (entrained flow)	Oxygen/steam gasification (fluidized bed)	Steam gasification	CO <sub>2</sub> gasification [10]
CO	[vol.-%]	40–60	20–30	20–25	35–45
CO <sub>2</sub>	[vol.-%]	10–15	25–40	20–25	25–35
H <sub>2</sub>	[vol.-%]	15–20	20–30	30–45	15–25
CH <sub>4</sub>	[vol.-%]	0–1	5–10	6–12	7–10
N <sub>2</sub>	[vol.-%]	0–1	0–1	0–1	0–1
H <sub>2</sub> /CO ratio <sup>a</sup>	–	0.4	1	1.7	0.5
LHV	[MJ/Nm <sup>3</sup> ]	10–12	10–12	10–14	10–13
Tar content	[g/Nm <sup>3</sup> ]	<0.1	1–20	1–10	1–10

Rauch et al., 2018

# Composição do gás

- composição química elementar - frações em peso dos elementos (C, H, N, S e O);
- **Composição imediata da biomassa** – refere-se a % carbono fixo, materiais voláteis, umidade e percentual residual de cinzas;

(SANTOS, 2013)

- A composição do gás de síntese depende do tipo de reator utilizado e do agente de gaseificação;
- Situação ideal - completa conversão dos carbonos, dos alcatrões e dos hidrocarbonetos em **gases combustíveis**;
- Diversos fatores impedem esta situação - relativos às próprias reações termoquímicas da gaseificação e outros, relativos aos detalhes do projeto do gaseificador;

(ROSAL, 2008)

(BASU, 2006; ANTOS et al., 2013; EICHLER et a., 2015)

# Composição do gás

- Vapor, o ar ou o  $O_2$  podem ser fornecidos à reação como agente oxidante;
- O gás produzido pode ser padronizado em sua qualidade (mais fácil e versátil de usar do que a biomassa original);
- A gaseificação agrega valor à matéria-prima de baixo custo ao convertê-la em combustíveis e produtos comercializáveis;

(PUIG-ARNAVAT et al., 2010)

A composição do gás obtido a partir de um gaseificador depende de vários parâmetros:

- Composição do combustível
- Pressão de operação
- Temperatura
- Teor de umidade dos combustíveis
- Design do gaseificador

**\* muito difícil prever a composição exata do gás a partir de um gaseificador**

(BASU, 2006; PUIG-ARNAVAT et al., 2010)

# Limpeza do gás

- Retirada de inertes como nitrogênio (no caso de gaseificação com ar);
- Remoção de excesso de dióxido de carbono (no caso de produção de biometanol);
- Limpeza do gás;

(JOHANSSON, 2013)

Para não ocorrer diluição do gás de síntese com nitrogênio, **usa-se oxigênio e vapor de água ao invés de ar** para gaseificação;

Conveniente no caso de **conversão do gás de síntese, em produtos químicos**  
(Ex.: BIOMETANOL).

(SCHUSTER et al., 2001; EICHLER et al., 2015).

# Remoção de partículas

Tabela 3- Gás de síntese (requisitos de limpeza para as aplicações)

Contaminantes	Aplicações			
	Síntese de metanol (mg m <sup>-3</sup> )	Síntese FT (μ L L <sup>-1</sup> )	Gás de turbina (μ L L <sup>-1</sup> )	Motor IC (mg m <sup>-3</sup> )
Tars (condensável)	- <sup>a</sup>	<0.01 <sup>b</sup>	-	-
Tars (heteroátomos, BTX)	<0.1	<1	-	<100
Particulado (fuligem, poeira, cinza)	<0.02	Não detectável	<0.03 (PM <sub>5</sub> )	<50 (PM <sub>10</sub> )
Alcalino	-	<0.01	<0.024	-
Nitrogenado (NH <sub>3</sub> , HCN)	<0.1	<0.02	<50	-
Enxofre (H <sub>2</sub> S, COS)	<1	<0.01	<20	-
<b>Haletos (principalmente HCl)</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>&lt;0.01</b>	<b>1</b>	<b>-</b>

<sup>a</sup> Dados não disponíveis na literatura original.

(Sikarwar et al., 2017)

P&D - a cinza gerada pode ser misturada com cimento na produção de concreto

Gás de alta qualidade: baixo teor de alcatrão.

# Exemplos

**Munique Sul**



**Bourgoin-Jallieu**

**Zurique - Suíça**



**Tokyo Minato – Japão**

3x360 t/dia

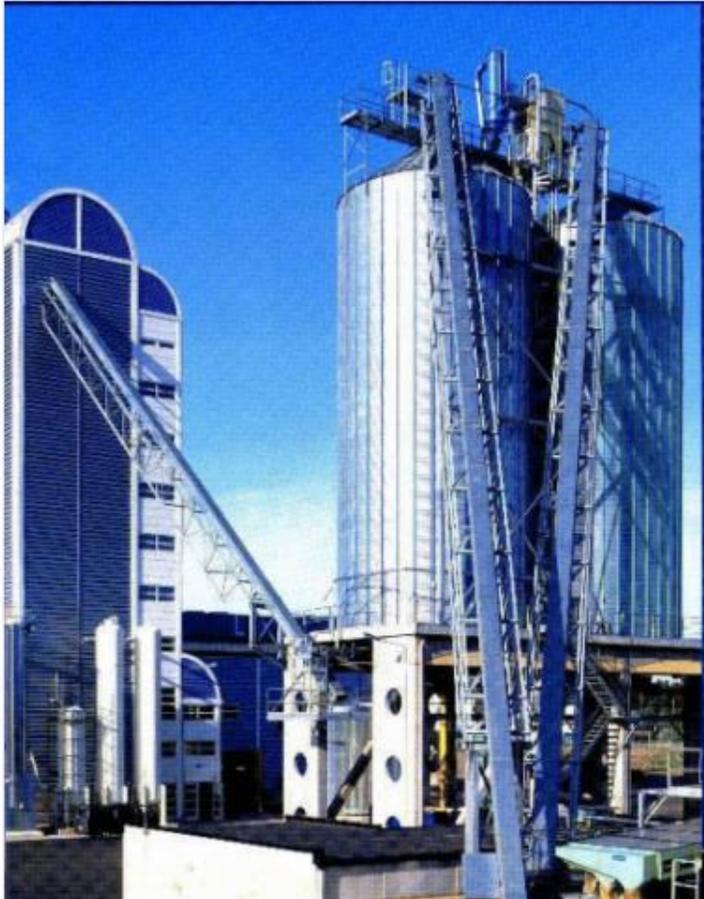


**Marchwood, Inglaterra**

2 x 288 t/d



# Exemplos



## Värnamo, Suécia

- Leito fluidizado circulante pressurizado (1,8 MPa), ar
- Matéria-prima: madeira, palha, etc.
- 6 MW<sub>e</sub> e 9 MW<sub>t</sub>
- 8.500 horas de operação (3.600 IGCC)



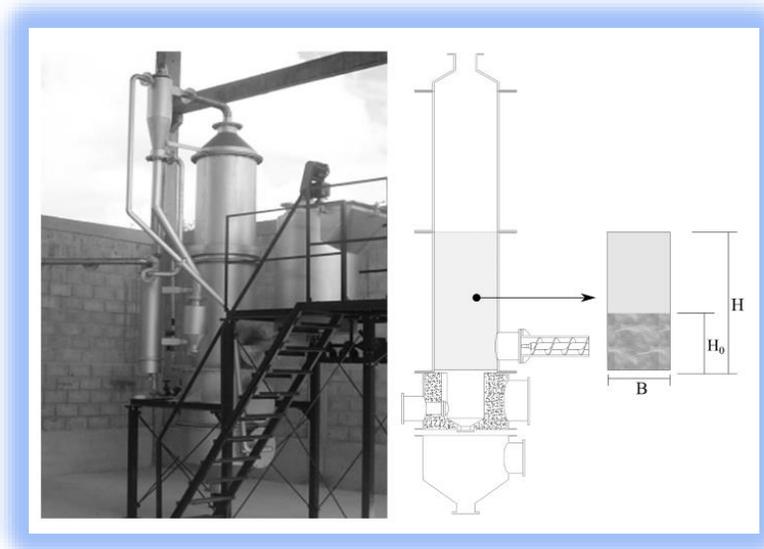
## Vermont, EUA

- Capacidade 200 t/dia
- Gás 16,75 MJ/Nm<sup>3</sup>
- Matéria-prima: cavaco de madeira
- Tecnologia: leito fluidizado, vapor
- Temp. 700-750°C
- > 7-8 MW

# Ferramentas para otimização

Embora a gaseificação seja conhecida há muito tempo, *seu controle exige esforços de pesquisadores e fabricantes.*

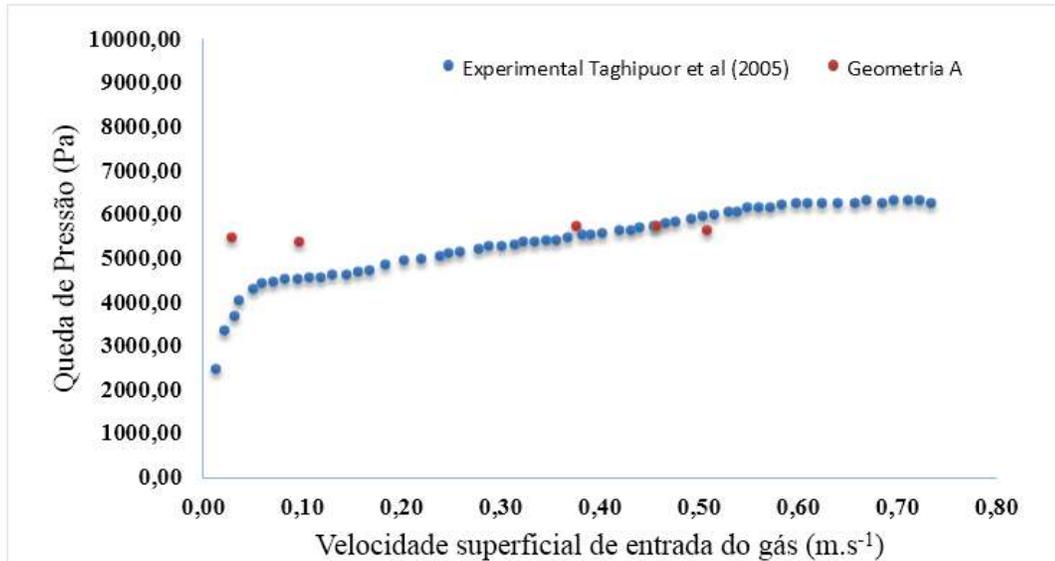
*Atualmente, novas perspectivas são imagináveis, graças ao uso de ferramentas computacionais*



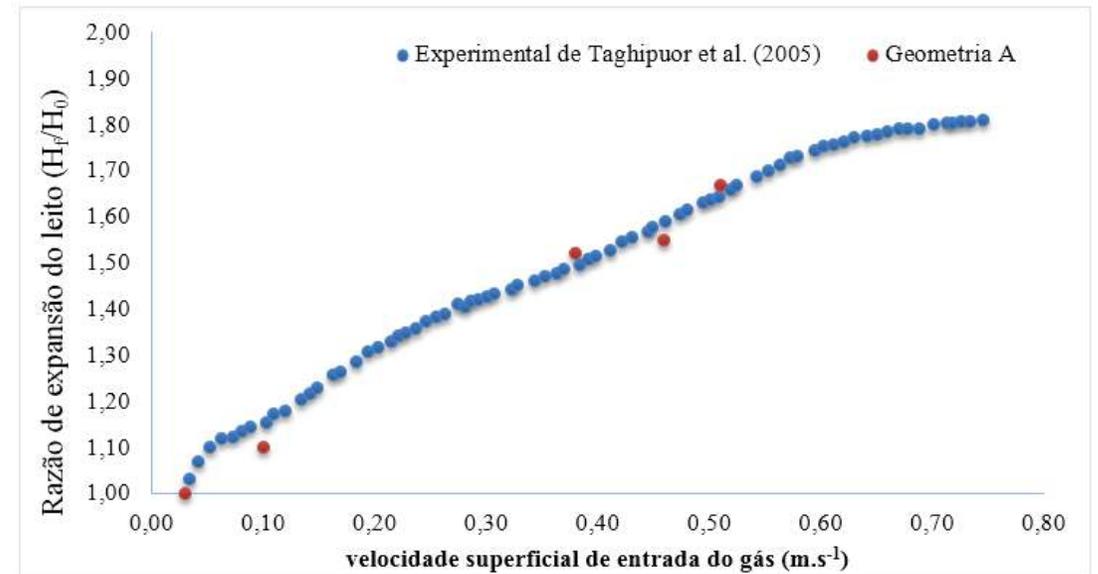
- **Análises hidrodinâmicas**
- **Análises cinéticas**
- **Otimizações**
- **Proposições de novas geometrias de reatores**
- **Dimensionamento de unidades gaseificadoras**

# Ferramentas para otimização

## Sistema gás-areia



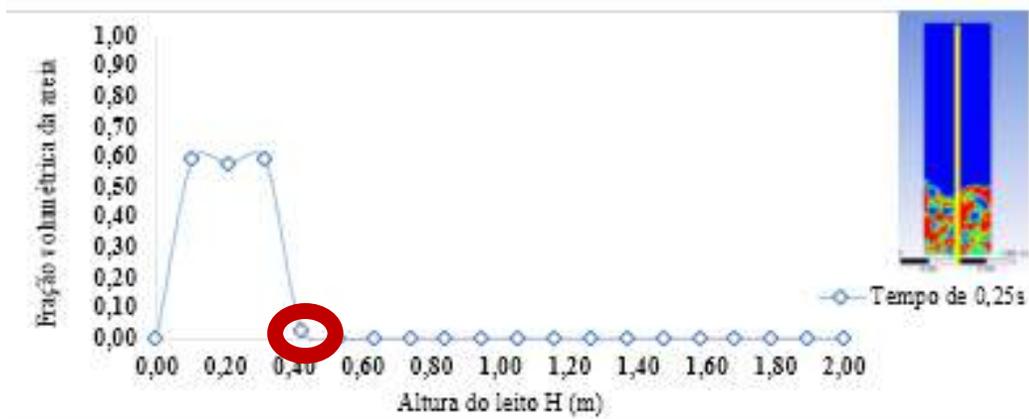
Queda de pressão experimental versus simulada



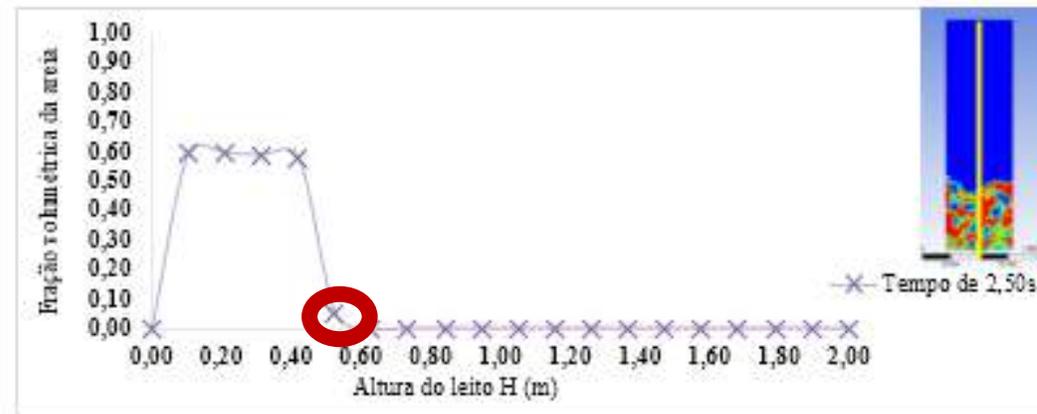
Expansão do leito experimental versus leito simulado

# Ferramentas para otimização

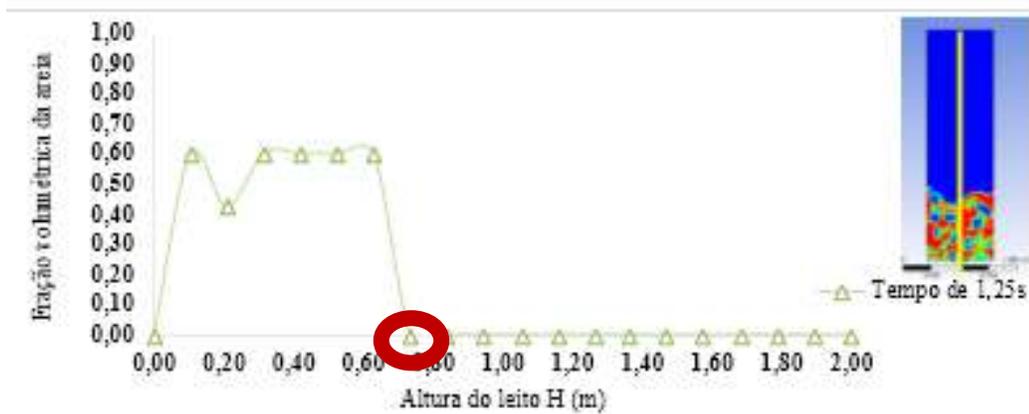
(sistema gás-areia)



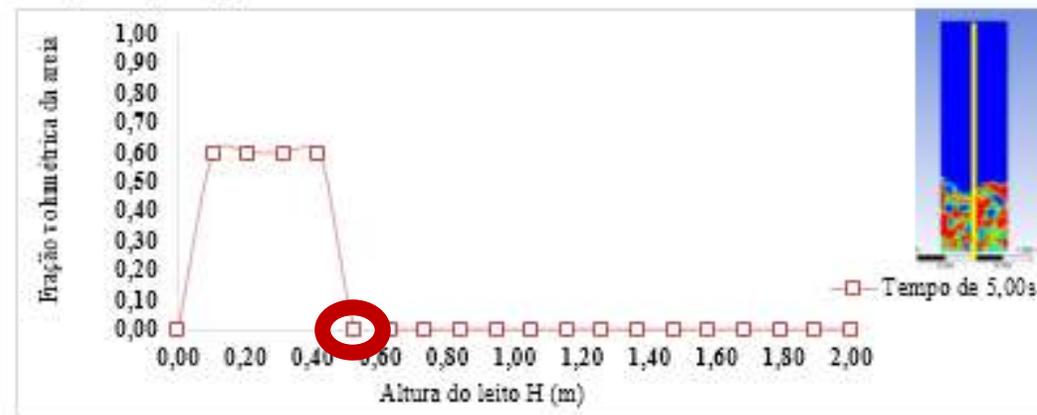
a) T=0,25 segundos



c) T=2,50 segundos



b) T=1,25 segundos



d) T=5,00 segundos

Expansão do leito para o sistema gás-areia ( $v_g = 0,38$ ).

# Ferramentas para otimização

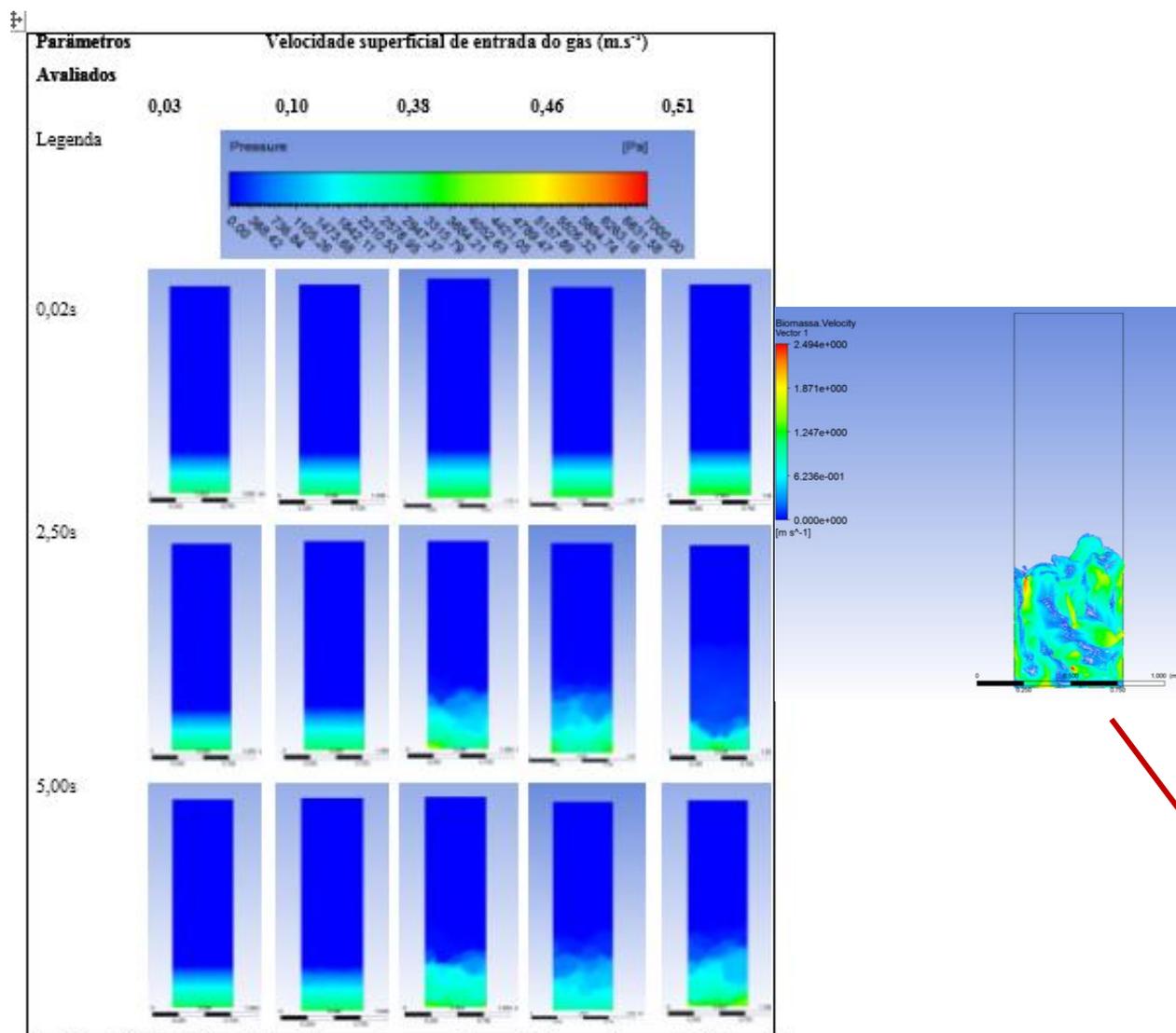


Figura 4.17- Perfis longitudinais de pressão para o sistema gás-biomassa (geometria B).

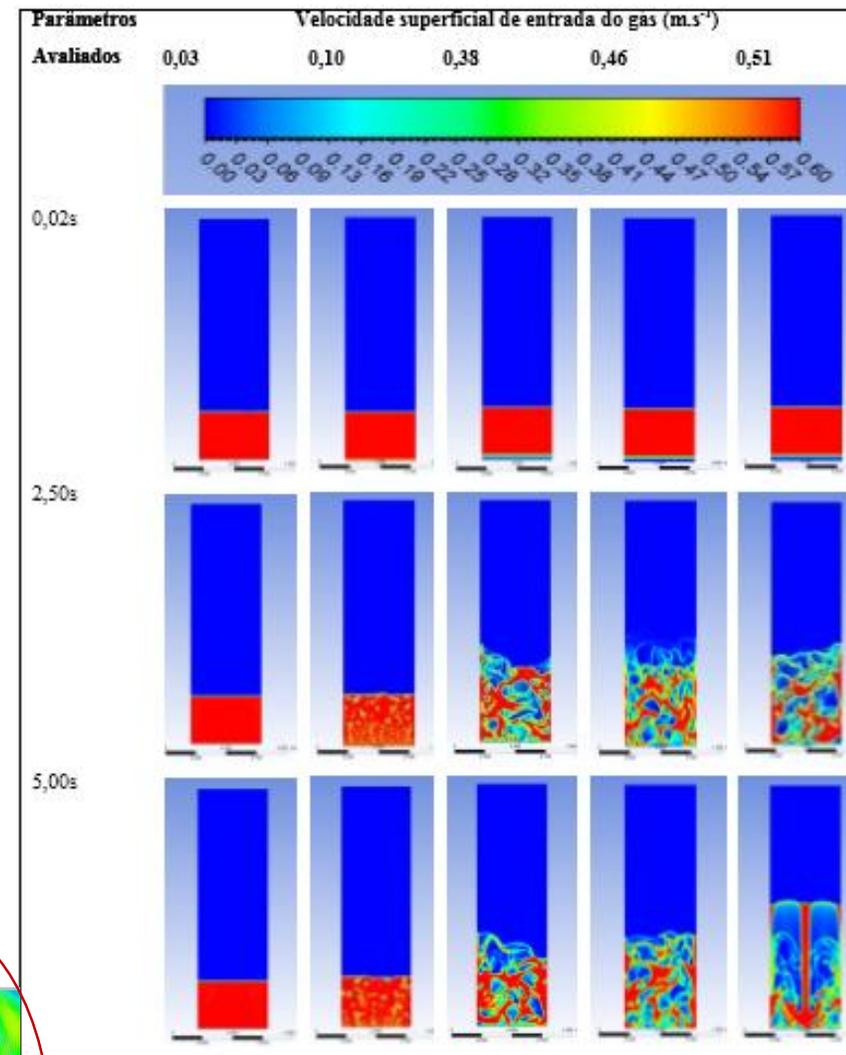


Figura 4.14- Perfis longitudinais de fração volumétrica de biomassa (geometria B).

# Ferramentas para otimização

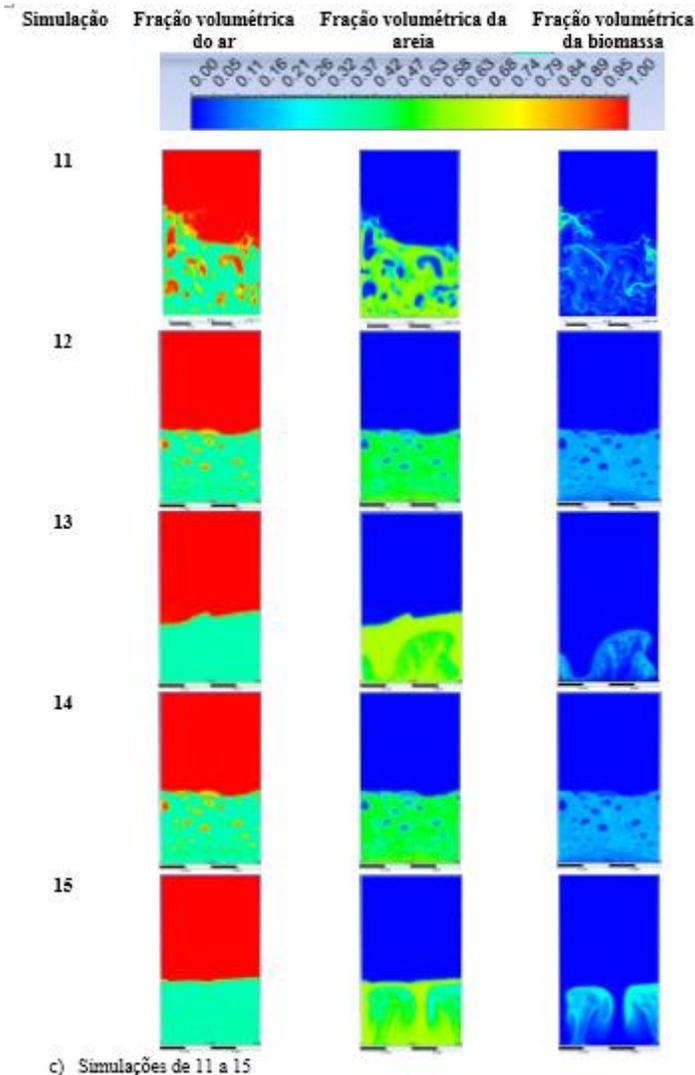


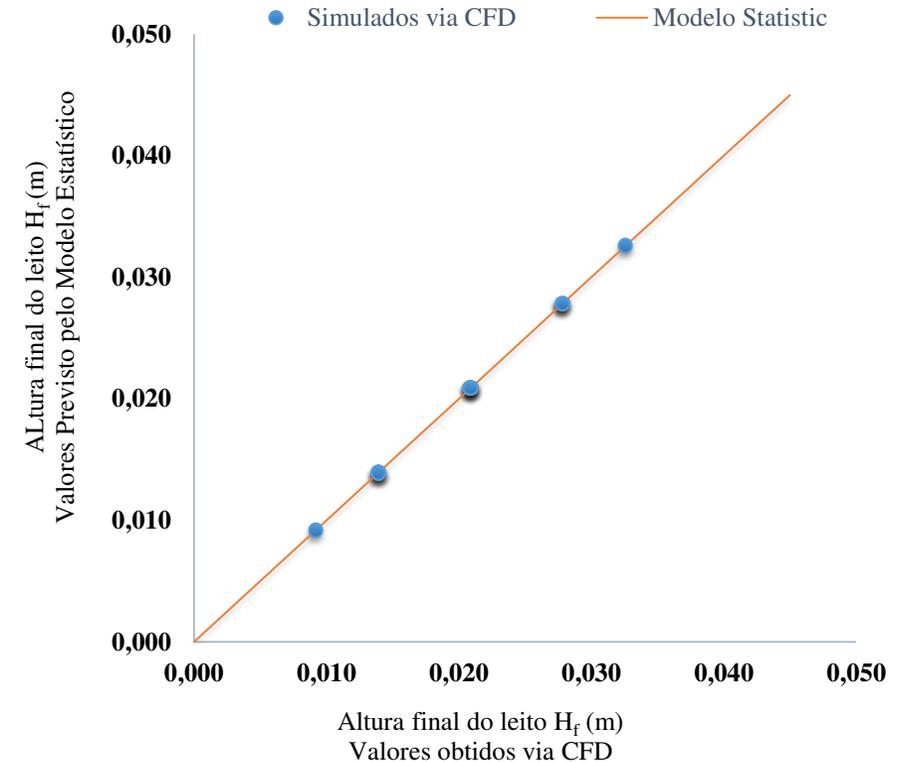
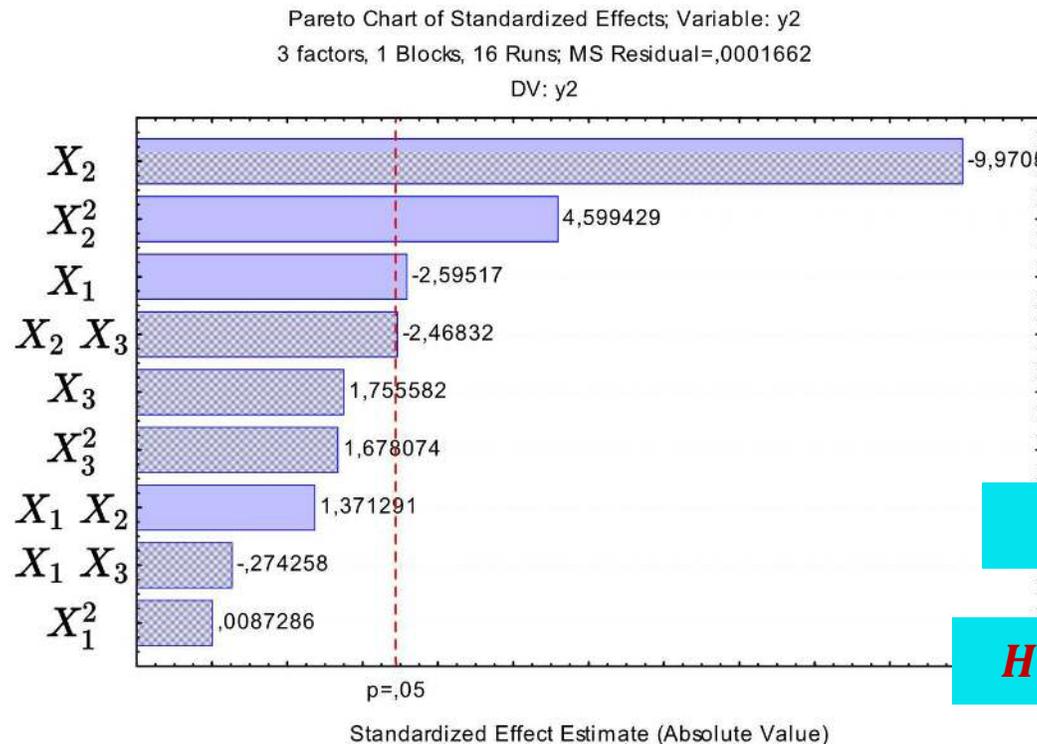
Tabela 4.5-Resposta do Planejamento Experimental.

Ensaio	X1 $\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	X2 $d_B$ ( $\mu$ m)	X3 %biomassa	* $H_f$ (m)
1	700	250	10	0,47
2	1300	250	10	0,43
3	700	500	10	0,40
4	1300	500	10	0,40
5	700	250	20	0,50
6	1300	250	20	0,47
7	700	500	20	0,40
8	1300	500	20	0,38
9	496	375	15	0,40
10	1504	375	15	0,38
11	1000	165	15	0,50
12	1000	585	15	0,39
13	1000	375	6,6	0,40
14	1000	375	23,4	0,42
15	1000	375	15	0,40
16	1000	375	15	0,40

\* $H_f$  é um valor médio, devido as oscilações causadas pelas formações de bolhas que ocorrem no leito durante a fluidização.

Resultado do Planejamento Experimental.

# Ferramentas para otimização



$$Y = 0,398 - 0,018X_1 - 0,069X_2 + 0,039X_2^2 - 0,022X_2X_3$$

$$H_f = 0,398 - 0,018\rho_B - 0,069d_B + 0,039d_B^2 - 0,022d_B\%_B$$

Através da análise da é possível observar que apenas os termos:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_2^2$  e  $X_2X_3$  apresentaram valores significativos com 95% de confiança ou  $p < 0,05$ .

# Ferramentas para otimização

Parâmetros da cinética de primeira ordem para pirólise primária (NUNN *et al.*, 1985)

Componentes	$\log k_i$ (1/s)	$E_i$ (kJ/mol)	$V_i^*$ $\left( \frac{kg}{kg \text{ biomassa}} \right)$
Total de voláteis	8,30	133,01	0,969
Total de gás	2,88	49,37	0,476
H <sub>2</sub>	6,17	114,18	0,0016
CH <sub>4</sub>	13,00	251,21	0,0241
C <sub>2</sub>	9,06	173,85	0,1227
CO	11,75	220,66	0,2164
CO <sub>2</sub>	5,39	97,99	0,0308
H <sub>2</sub> O	6,71	103,01	0,0804
Carvão	Carvão = 1 - total de voláteis		
Bio-óleo	Bio-óleo = total de voláteis – total de gás		

**Gás: ar**

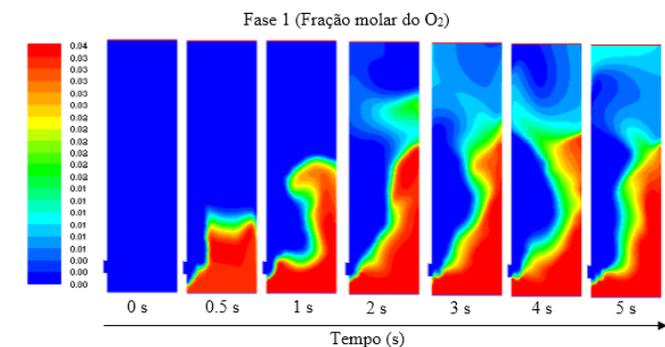


Figura 6 – Fração molar do O<sub>2</sub> na fase 1

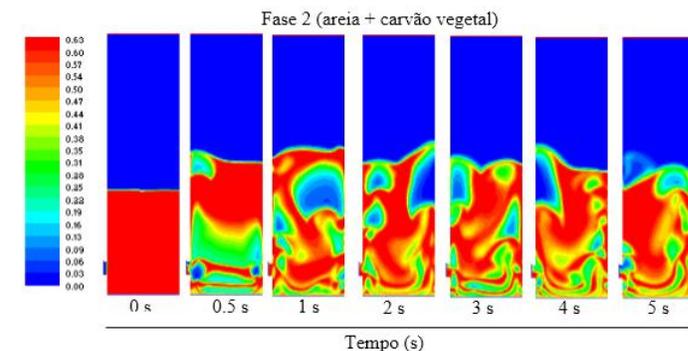


Figura 5 – Fração da fase 2 presente no reator.

# Ferramentas para otimização

Gás: ar

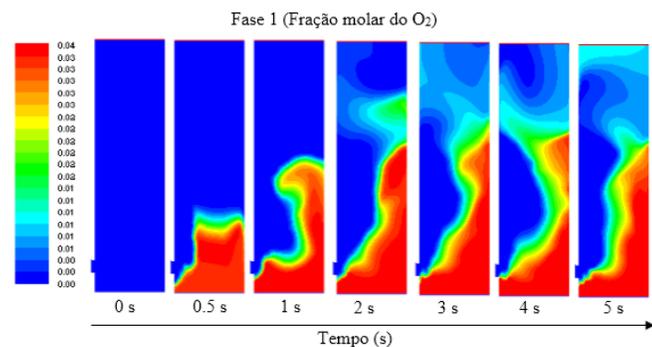


Figura 6 – Fração molar do  $O_2$  na fase 1

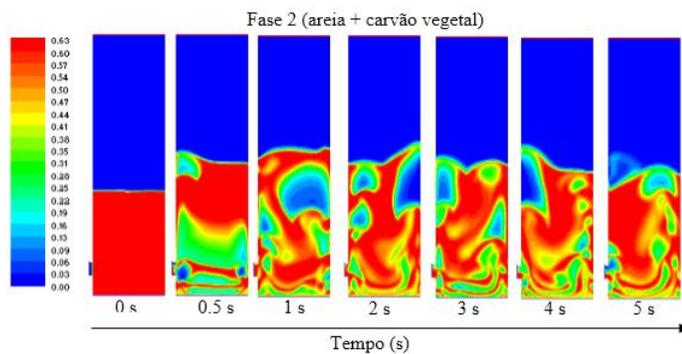


Figura 5 – Fração da fase 2 presente no reator.

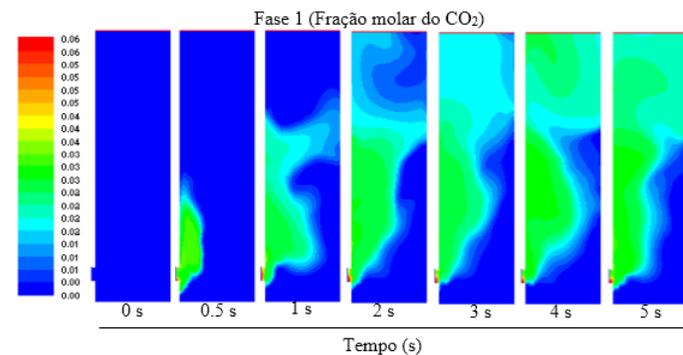
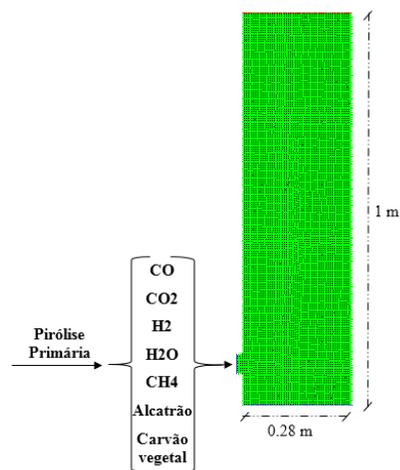


Figura 8 – Fração molar do  $CO_2$  na fase 1

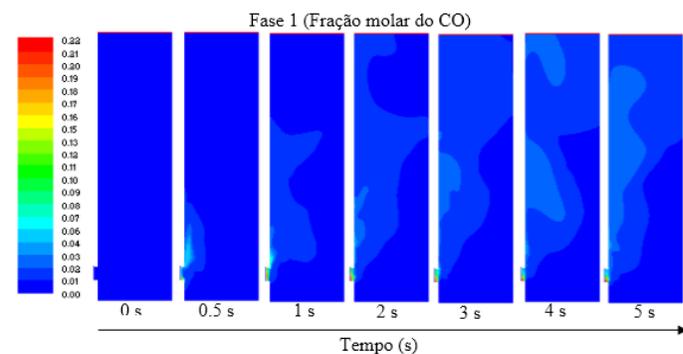


Figura 7 – Fração molar do CO na fase 1

# Ferramentas para otimização

Gás: vapor

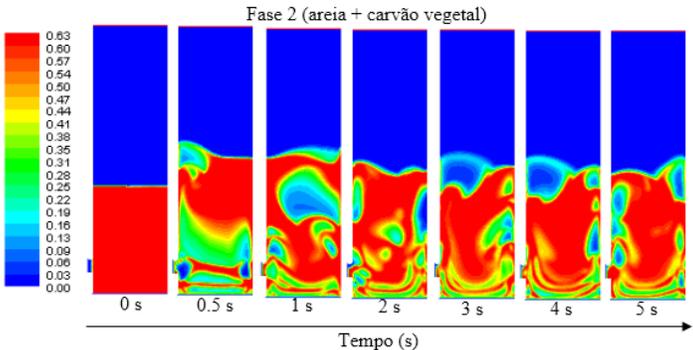


Figura 9 - Fração da fase 2 presente no reator.

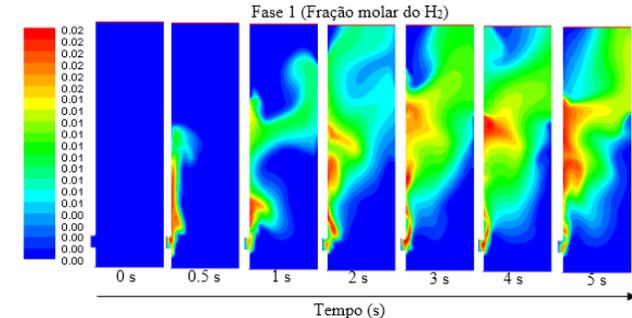
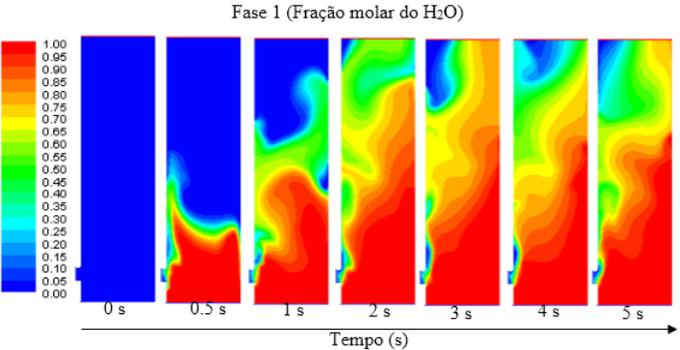


Figura 11 - Fração molar do H<sub>2</sub> na fase 1

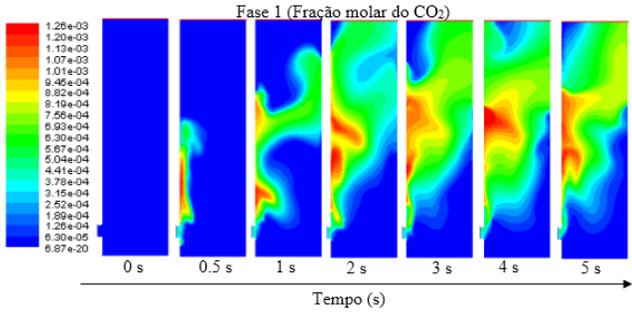


Figura 14 - Fração molar do CO<sub>2</sub> na fase 1

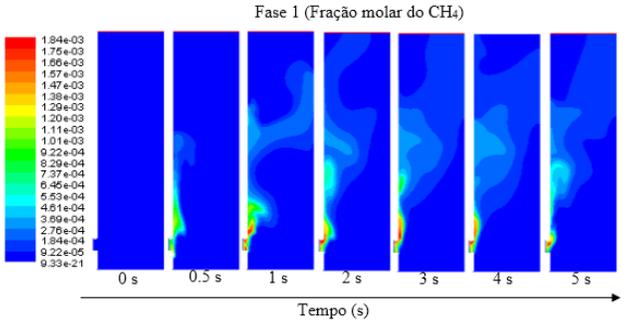


Figura 12 - Fração molar do CH<sub>4</sub> na fase 1

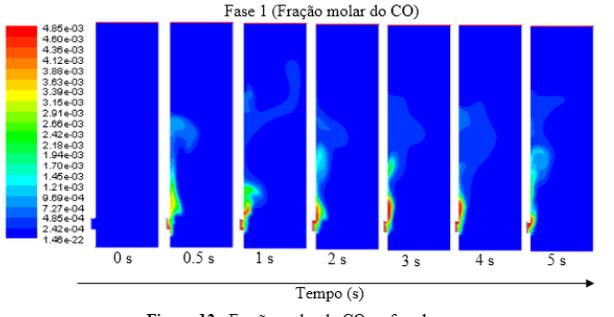


Figura 13 - Fração molar do CO na fase 1

Obrigada!!!

Contato:

*mikelecandida@gmail.com*

