



Universidade de São Paulo – USP



Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Esalq
Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição - LAN

LAN 685 - Tecnologia do Álcool

8ª Aula

INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Prof. Antonio Sampaio Baptista



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



◆ INTRODUÇÃO

1 Fluxograma industrial da geração e uso de energia

1.1 Tipos de caldeiras

1.2 Instalação típica de uma caldeira aquatubular

1.3 Principais componentes de uma caldeira aquatubular

1.4 Classificação das caldeiras aquatubulares

1.5 Características das caldeiras aquatubulares

1.6 Tipos de combustíveis para caldeiras

1.7 O bagaço e a palha como combustíveis

1.8 Poder calorífico

2 Sistema de transporte de bagaço

3 Considerações finais

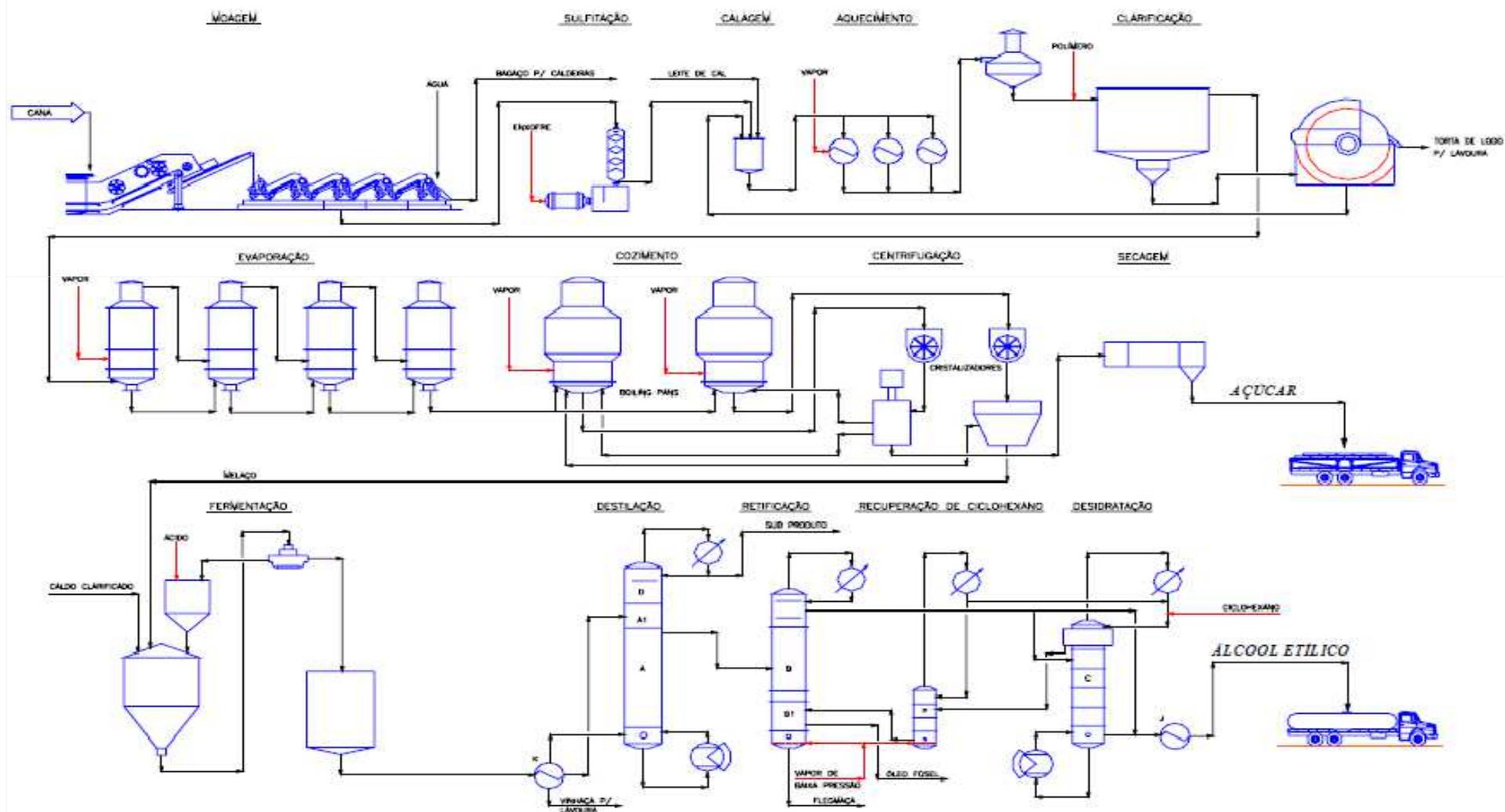
5 Referências



◆ INTRODUÇÃO



FLUXOGRAMA DE PROCESSO - AÇÚCAR E ALCOOL





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Uso da Energia na Usina





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Energia Consumida na Usina

- Usina necessita de duas formas básicas de energia:
 - Eletromecânica (acionamentos, iluminação, etc.)
 - Térmica (aquecimento, evaporação, cozimento, etc.)

Lamonica, 2005



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Como obter esta energia ?





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



No Passado (antes 1980)

- Energia eletromecânica obtida comprando-se energia elétrica da rede pública
- Energia térmica obtida com a combustão de combustível fóssil ou lenha para geração de vapor d'água a baixa pressão

Portanto a usina tinha que comprar a energia necessária ao seu processo ☹



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Atualmente (após 1980)

- Usina obtém toda energia térmica e eletromecânica a partir da combustão do bagaço.
- Como ?
 - Gera vapor a uma pressão superior a necessária no processo
 - Este vapor é expandido em turbinas a vapor sendo convertido em energia mecânica/elétrica
 - O calor rejeitado no escape das turbinas fornece a energia térmica necessária ao processo

Portanto é auto-suficiente em energia ☺



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Isto é COGERAÇÃO de energia !

- Cogeração é a obtenção, integrada, de mais de uma forma de energia a partir de um único combustível

Portanto a Usina já é um COGERADOR de energia





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Cenário Médio (22 bar)

- Pressão de operação: 22 bar / 300 °C
- Auto-suficiente em energia térmica e elétrica
 - Consumo de energia eletromecânica: 28 kWh/tc
 - Consumo de energia térmica: 330 kWh/tc
(equivalente a 500 kg vapor / tc)
 - Sobra de bagaço: 7 %
 - Não utiliza palha

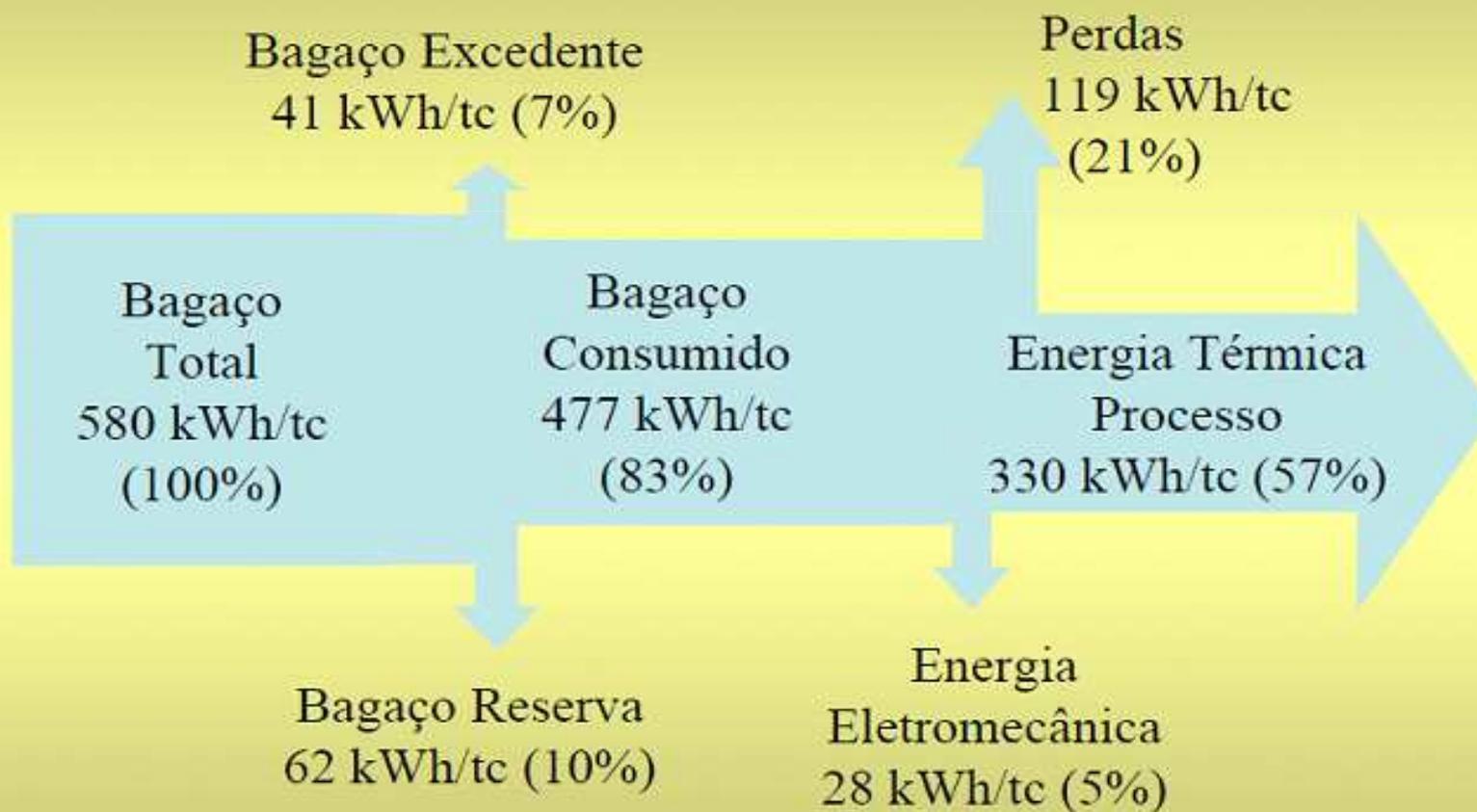




INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Distribuição de Energia na Usina 22 bar





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1 Fluxogramas industriais

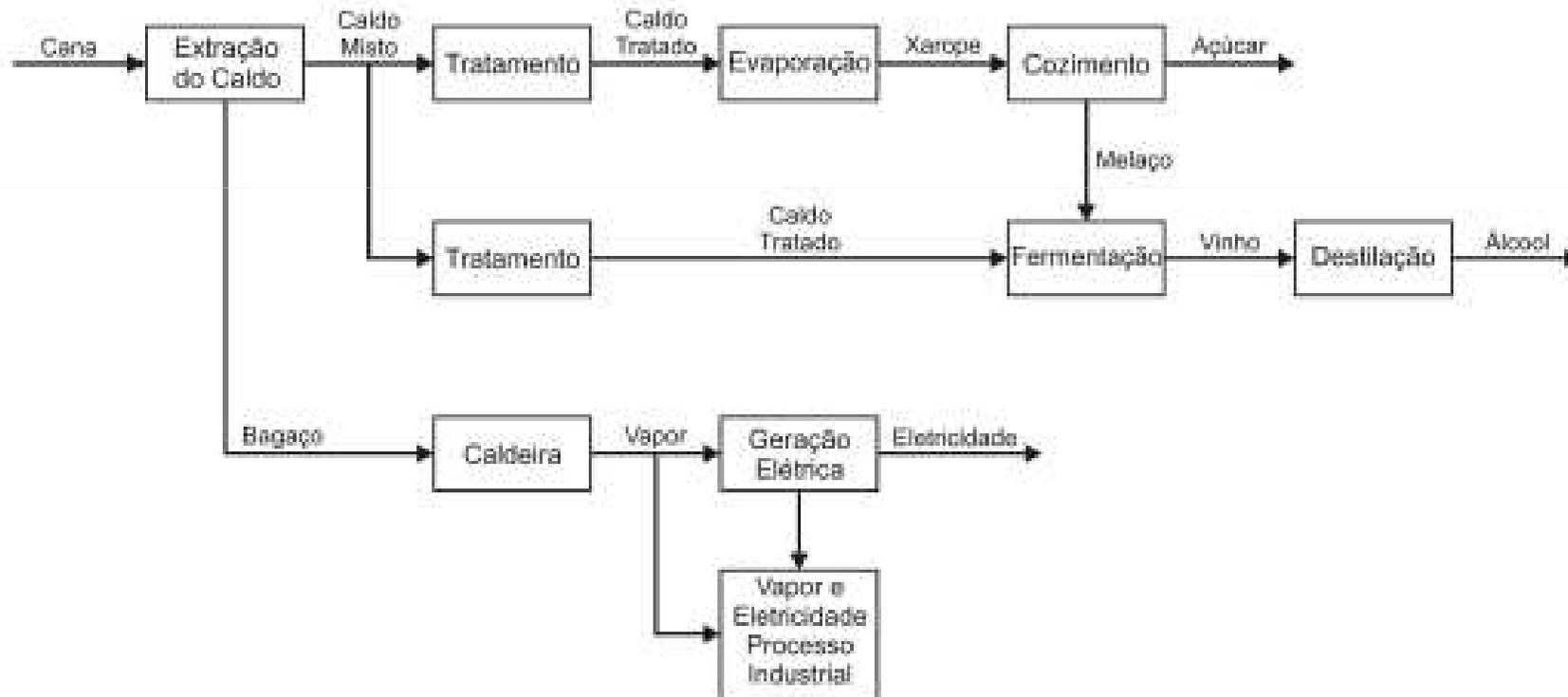


Figura 2.1: Fluxograma de produção de açúcar álcool e energia elétrica.

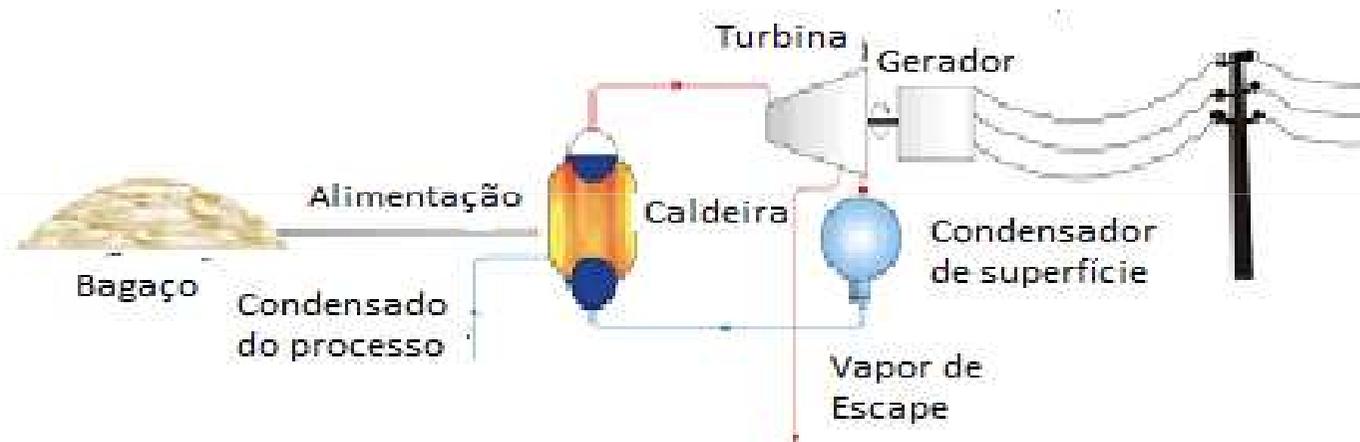
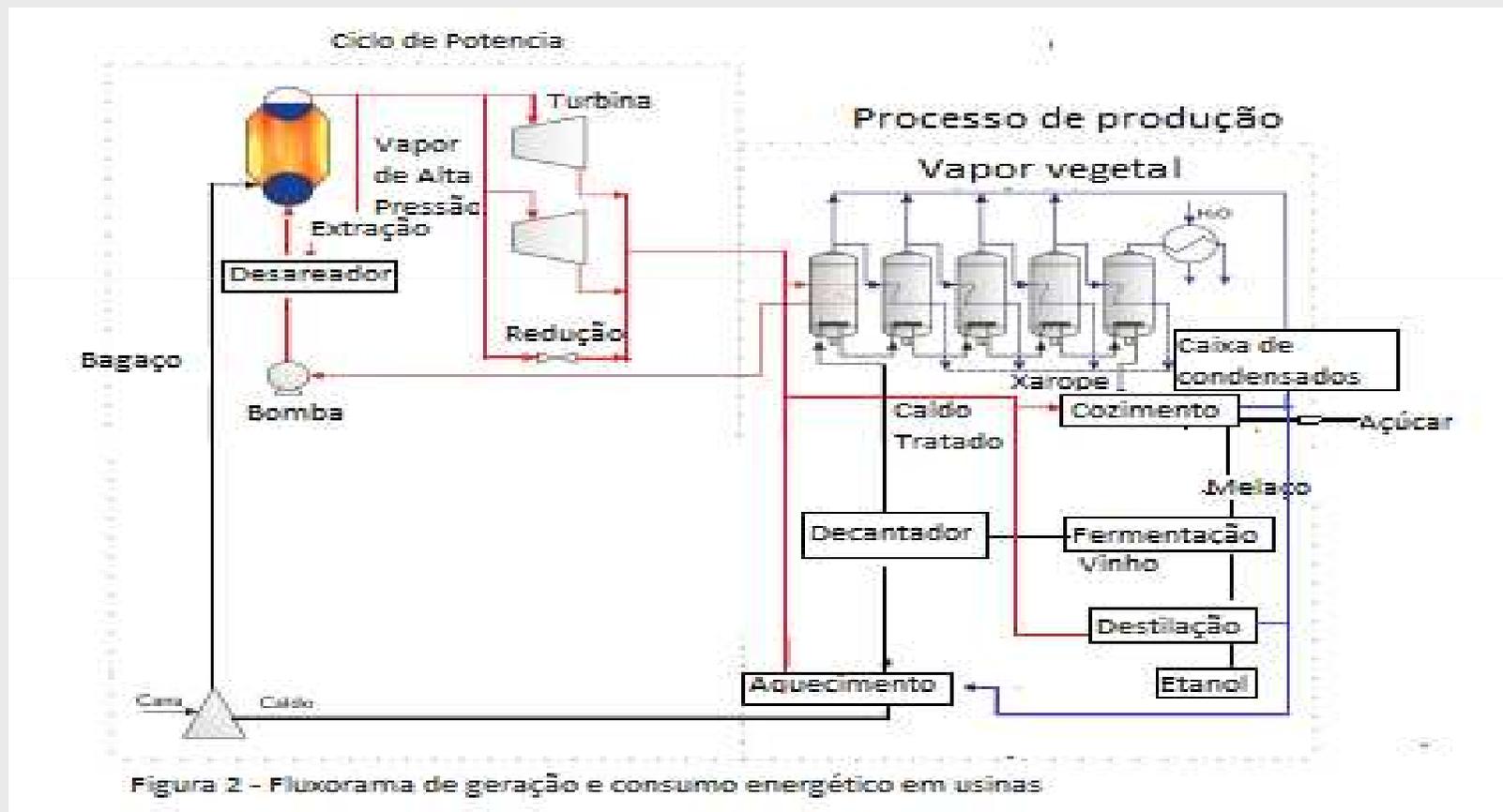


Figura 3 - Fluxograma de geração de vapor

1 Fluxograma industrial da geração e uso de energia





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

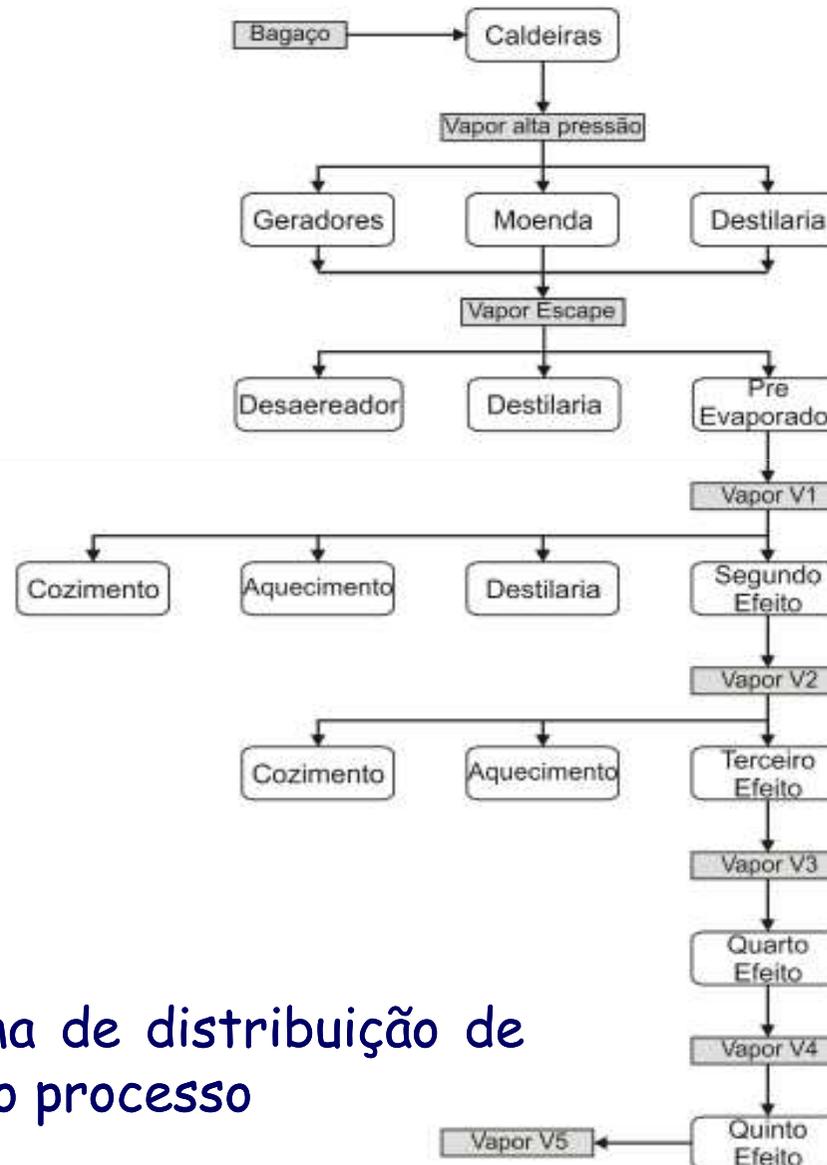


Figura 5 - Fluxograma de distribuição de vapores no processo



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1.1 Geradores de vapor

DEFINIÇÃO:

- Geradores de Vapor (GV's) podem ser considerados como sendo trocadores de calor complexos que produzem vapor de água sob pressões superiores a atmosférica a partir da energia de um combustível e de um elemento comburente (Ar).





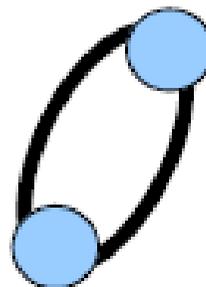
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1.1 Geradores de vapor

DEFINIÇÃO:

- Estes equipamentos, são constituídos por diversos dispositivos associados estando estes perfeitamente integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Estes equipamentos são conhecidos popularmente como caldeiras de vapor.



Representação esquemática de um GV



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1.1 Geradores de vapor

DEFINIÇÃO:

- Caldeiras de vapor são essencialmente recipientes pressurizados no qual a água é introduzida e pela aplicação contínua de energia é evaporada. A água evaporada é chamada de vapor, consistindo um dos fluídos de trabalho mais empregados na industria.





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1.1 Geradores de vapor

VAPOR:

- Fisicamente é a água no estado gasoso.



Vapor de água

1.1 Geradores de vapor

VAPOR:

Vapor gerado

Mudança de estado físico

Transferência de energia



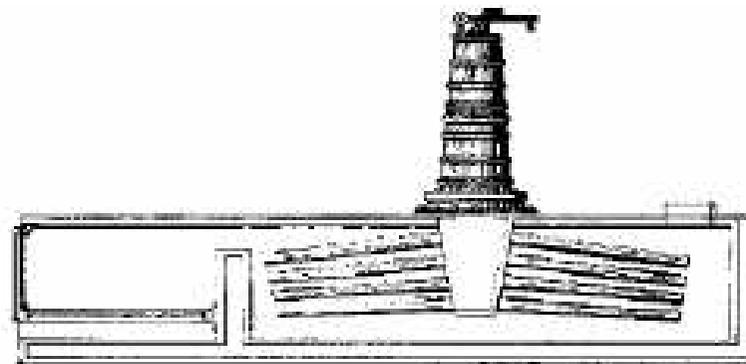
Energia despreendida
pelo combustível



1.1 Geradores de vapor

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:

- Nos finais do século 18 e início do século 19 houveram os primeiros desenvolvimentos da caldeira com tubos de água. O modelo de John Stevens movimentou um barco a vapor no Rio Hudson.

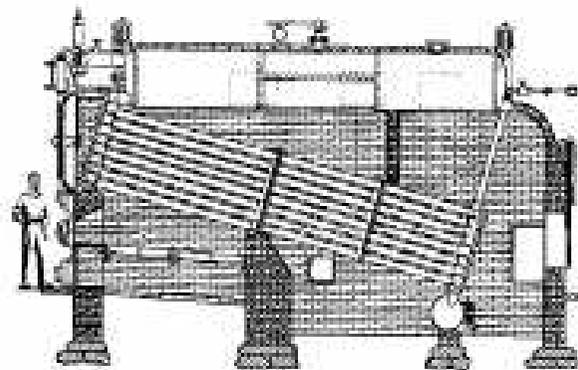


Caldeira de tubos de água, 1803

1.1 Geradores de vapor

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:

- Stephen Wilcox, em 1856, projetou um gerador de vapor com tubos inclinados, e da associação com George Babcock tais caldeiras passaram a ser produzidas, com grande sucesso comercial.

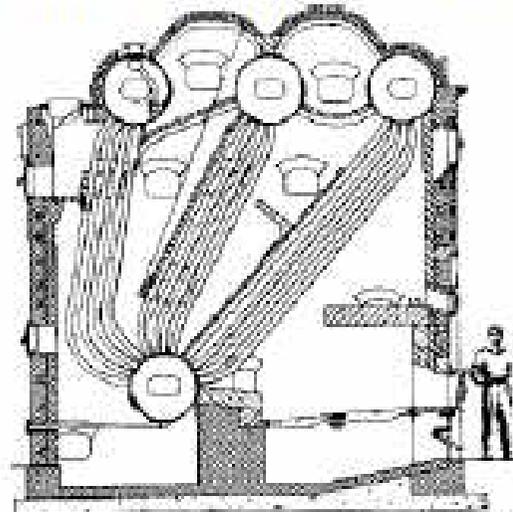


Caldeira de tubos retos, Babcock e Wilcox, 1877

1.1 Geradores de vapor

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:

- Em 1880, Stirling desenvolveu uma caldeira de tubos curvados, cuja concepção básica é ainda hoje utilizada nas grandes caldeiras de tubos de água.



Caldeira de tubos curvados, Stirling, 1880



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



1.1 Geradores de vapor

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:

- Nos últimos anos o desenvolvimento técnico dos geradores de vapor se deu principalmente no aumento das pressões e temperaturas de trabalho, no rendimento térmico, na utilização dos mais diversos combustíveis e principalmente em formas de controle automático dos equipamentos.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



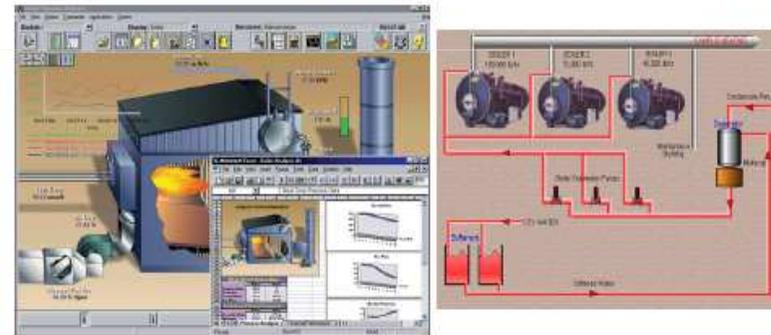
1.1 Geradores de vapor

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:



Formas de controle automático dos equipamentos

DESENVOLVIMENTO DOS GV's:



Monitoramento em tempo real



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



CLASSIFICAÇÃO DOS GV's:

- Industrialmente, podemos arbitrar uma classificação de geradores de vapor em relação a pressão de trabalho:
 - Baixa pressão: até 10kgf/cm^2
 - Média pressão: de 11 a 40kgf/cm^2
 - Alta pressão: maior que 40kgf/cm^2



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



CLASSIFICAÇÃO DOS GV's:

- Quanto a posição dos gases quentes:
 - Flamotubulares,
 - Aquatubulares,
 - Mistas.
- Quanto a posição dos tubos:
 - Verticais,
 - Horizontais,
 - Inclínados.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



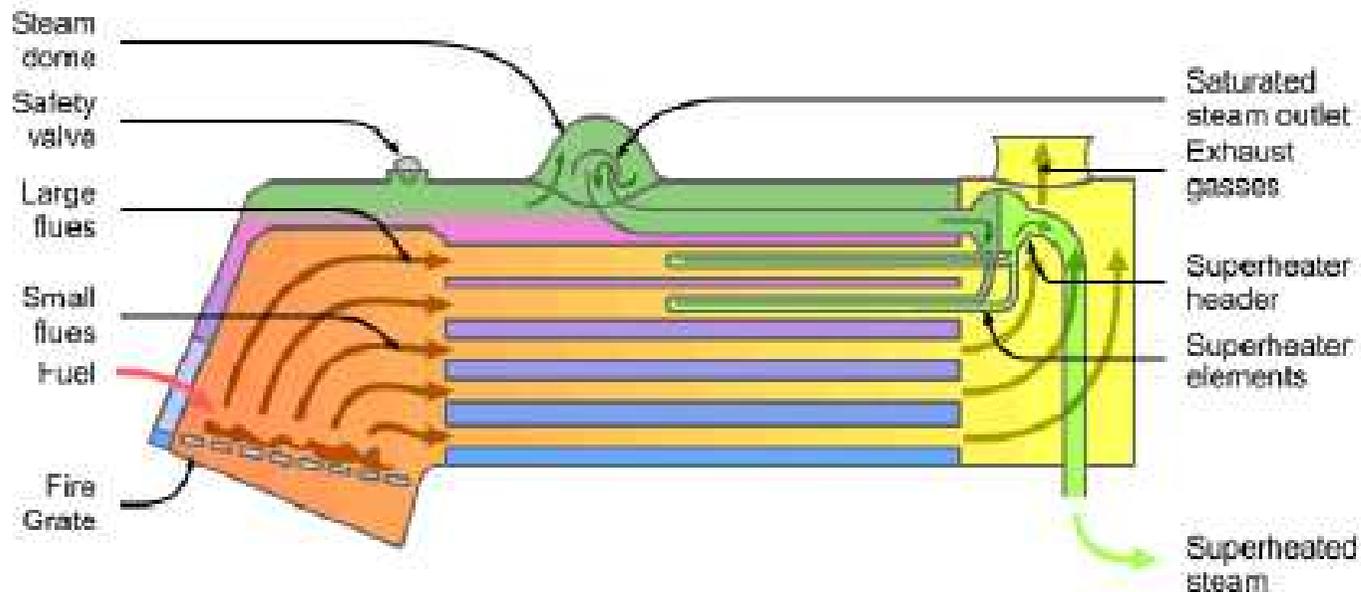
CALDEIRAS FLAMOTUBULARES:

- Neste tipo de caldeira, os gases quentes circulam pelo interior de tubos e a água se encontra na parte externa aos tubos.

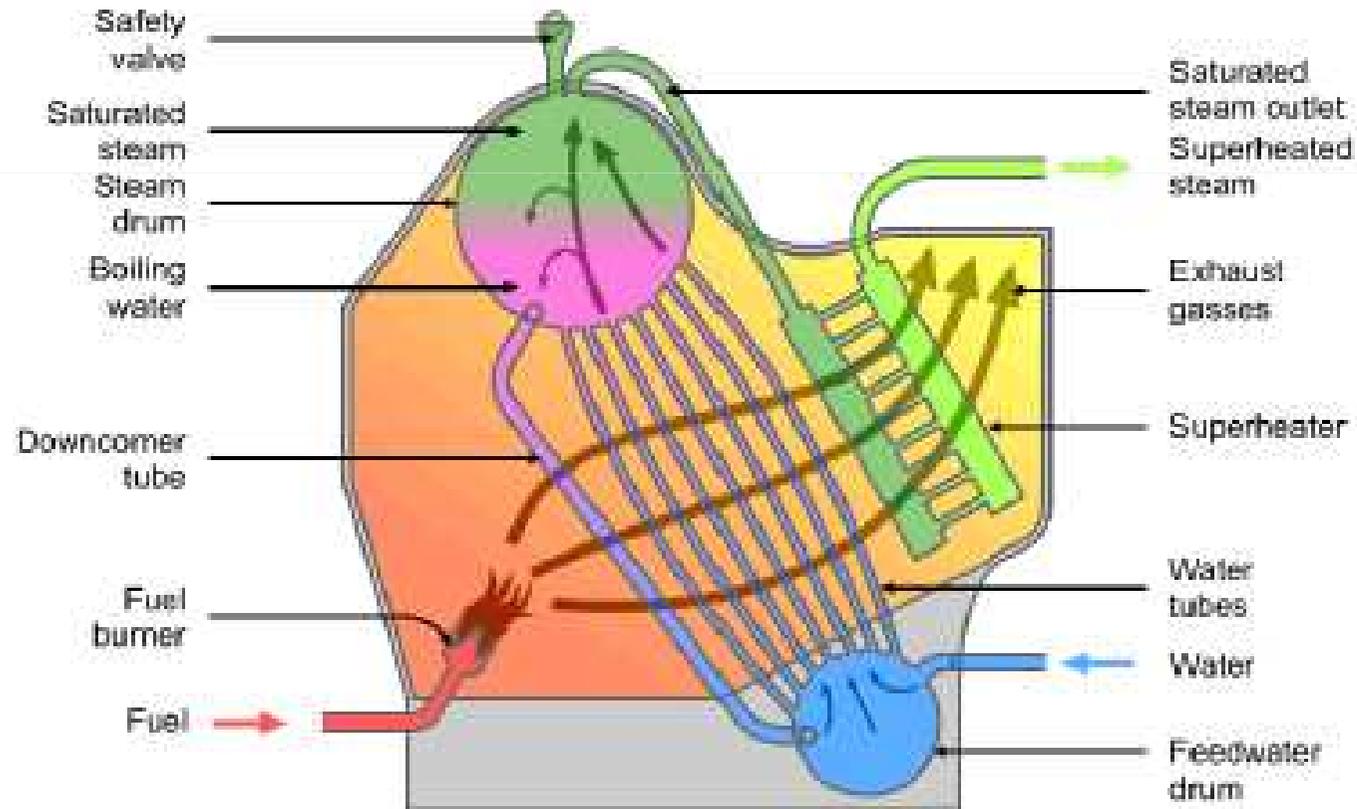
CALDEIRAS FLAMOTUBULARES:

- Neste tipo de caldeira, os gases quentes circulam pelo interior de tubos e a água se encontra na parte externa aos tubos.

CALDEIRAS FLAMOTUBULARES:



CALDEIRAS AQUATUBULARES:





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



CALDEIRAS AQUATUBULARES:

- São caldeiras mais difíceis de serem construídas e necessitam de maior controle na operação. Suas características operacionais são: Alta produção de vapor, chegando a 750ton/h – normalmente entre 15 e 150ton/h e alta pressão de operação, normalmente entre 90kgf/cm² a 100kgf/cm².



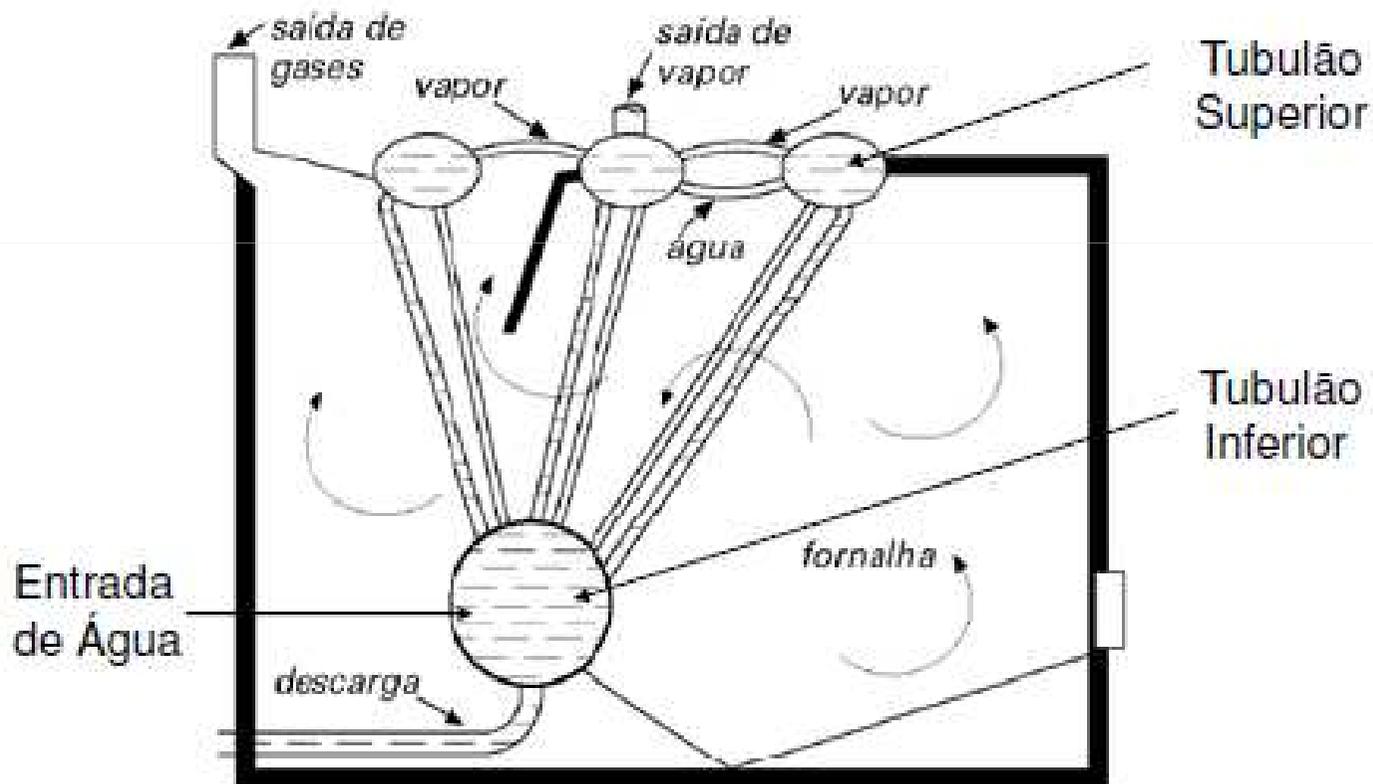
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



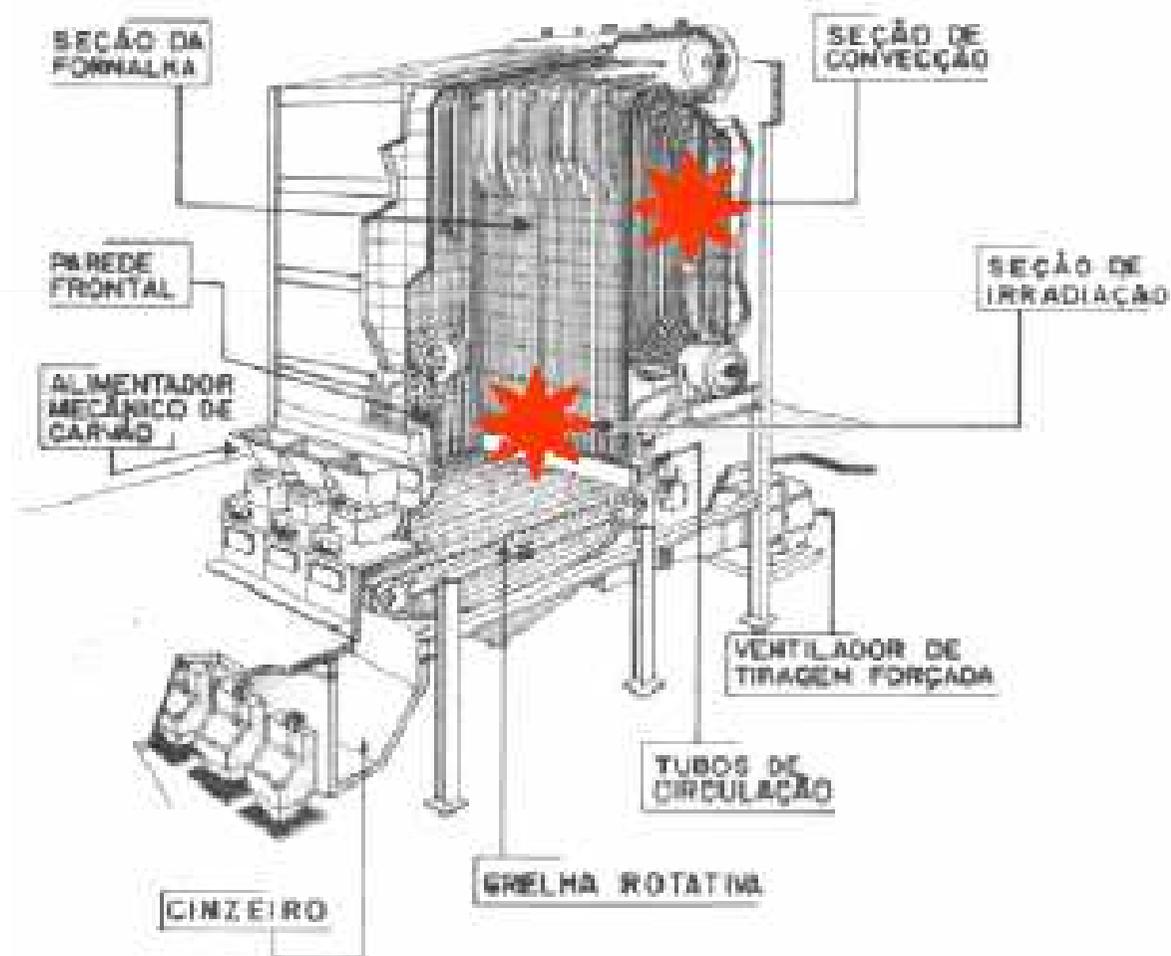
CALDEIRAS AQUATUBULARES:

- A produção de vapor ocorre nos tubos que interligam dois (paredes de água) ou mais reservatórios cilíndricos, chamados coletores ou tubulões:
 - Tubulão superior – onde ocorre a separação da fase líquida e do vapor;
 - Tubulão inferior – onde é feita a adição de água e decantação e purga do material sólido e em suspensão;

CALDEIRAS AQUATUBULARES:



CALDEIRAS AQUATUBULARES:





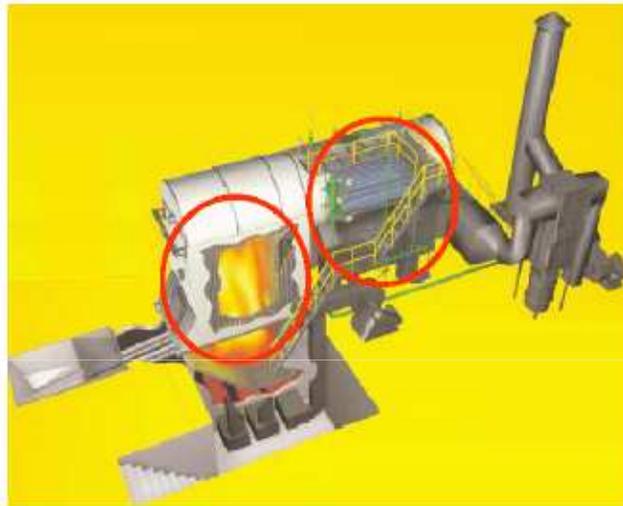
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



CALDEIRAS AQUATUBULARES:

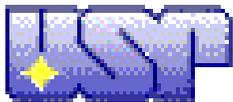


CALDEIRAS MISTAS:



CALDEIRAS MISTAS:

- Não possuem todas as vantagens da aquatubular, como: segurança, maior eficiência térmica, etc. É uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Podem usar combustível líquido ou gasoso, com queimador apropriado.



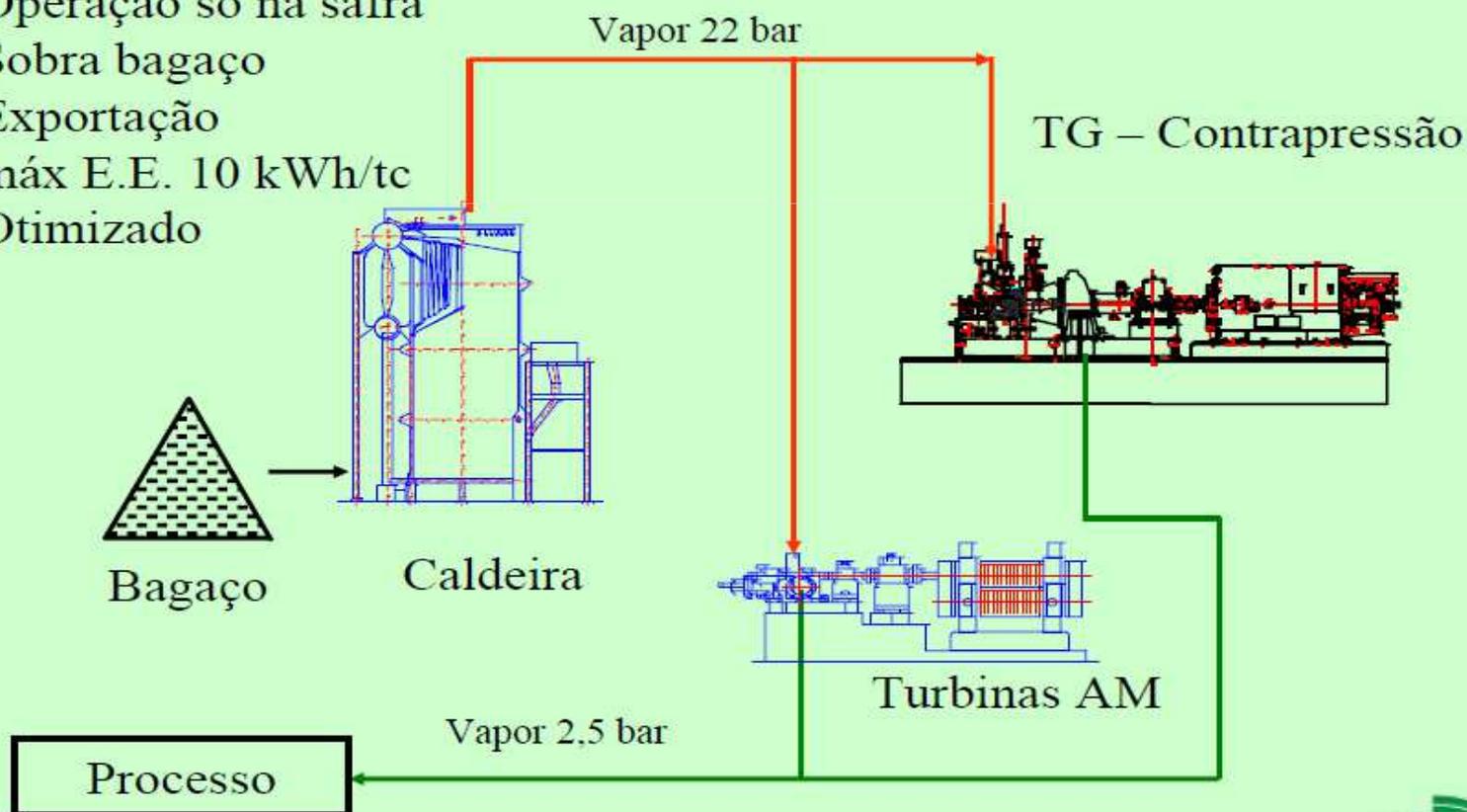
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Tipos de caldeiras usuais na indústria sucroenergética

Fluxograma – 22 bar

Operação só na safra
Sobra bagaço
Exportação
máx E.E. 10 kWh/tc
Otimizado





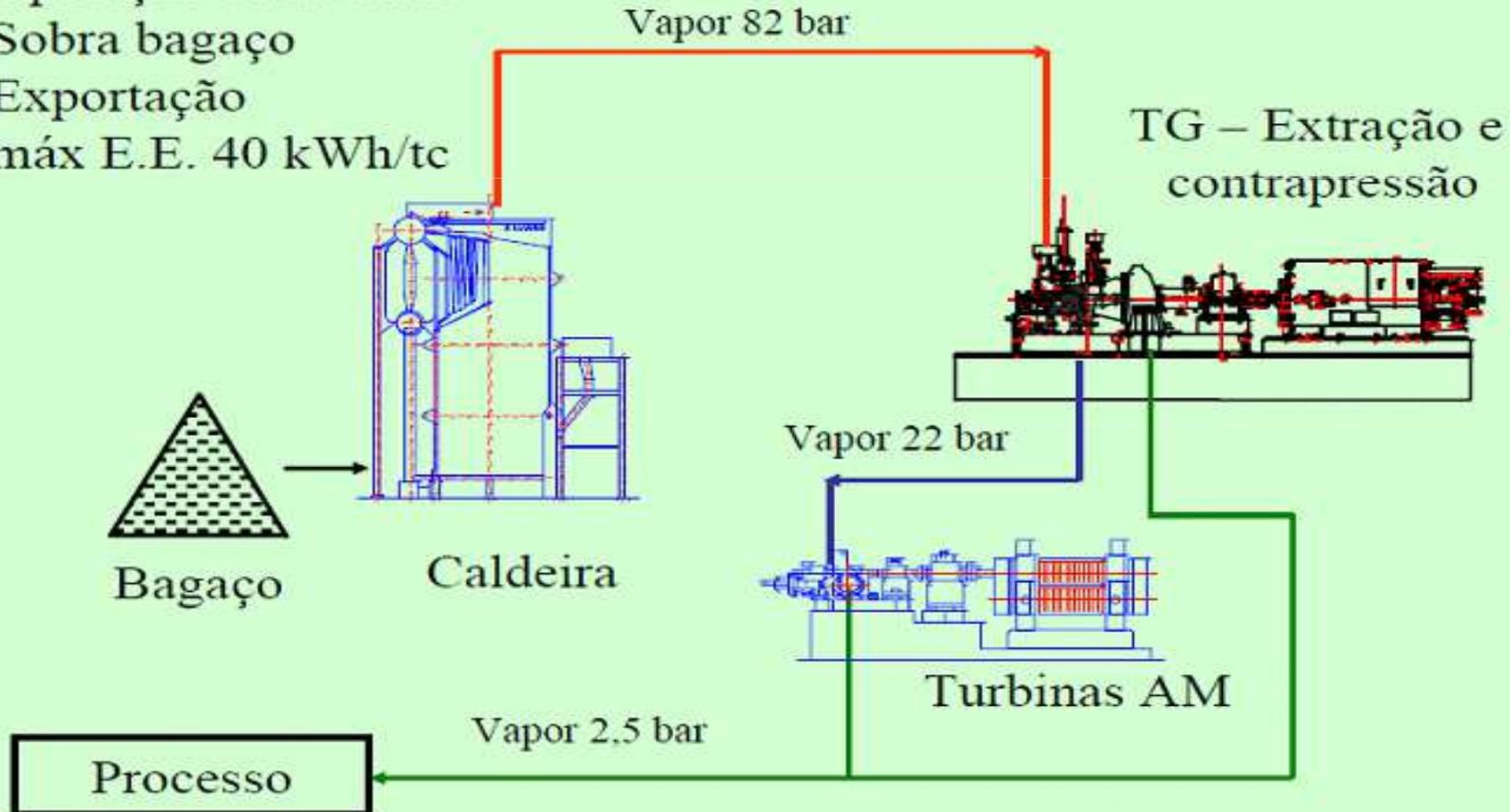
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Tipos de caldeiras usuais na indústria sucroenergética

Convencional – Cogeração Safra

Operação só na safra
Sobra bagaço
Exportação
máx E.E. 40 kWh/tc





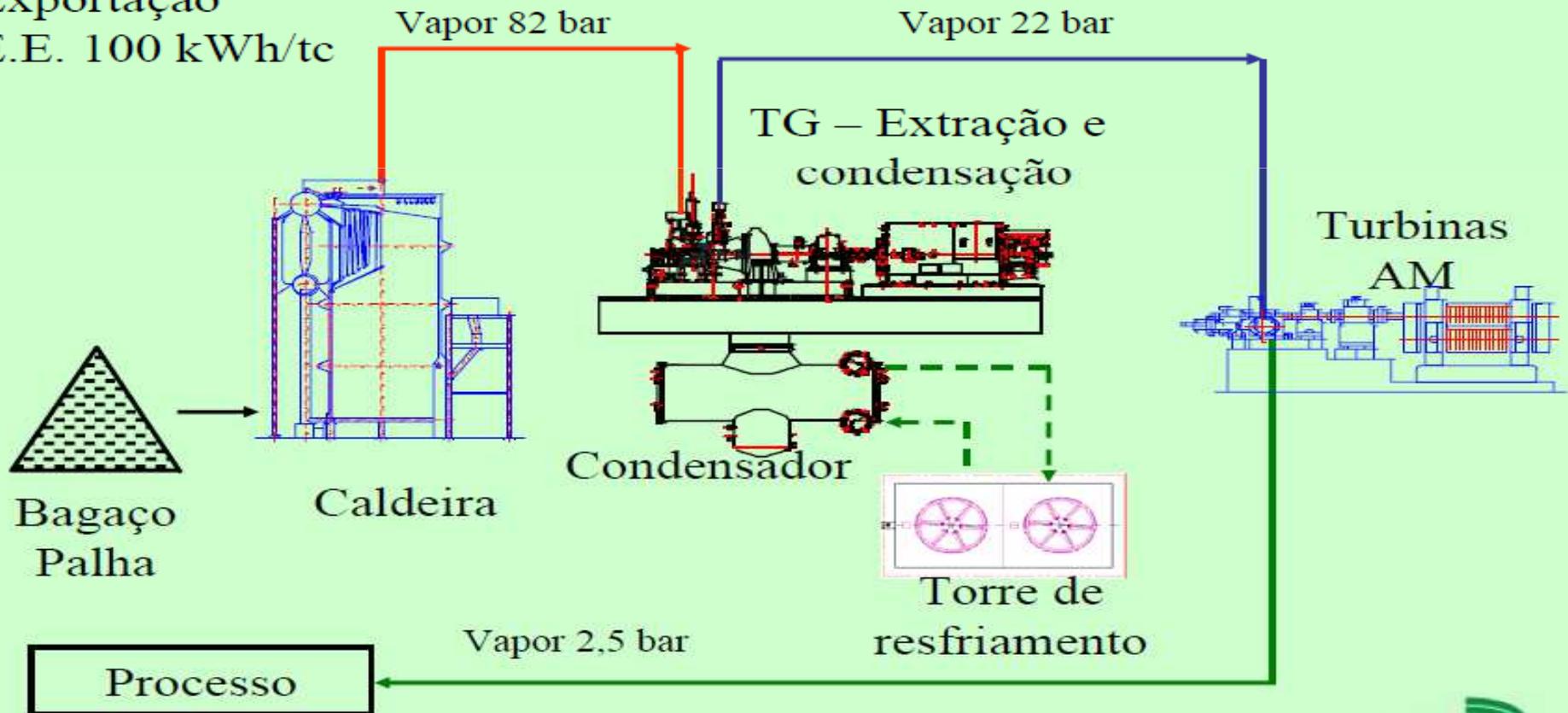
INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Tipos de caldeiras usuais na indústria sucroenergética

Convencional – Condensação

Exportação
E.E. 100 kWh/tc



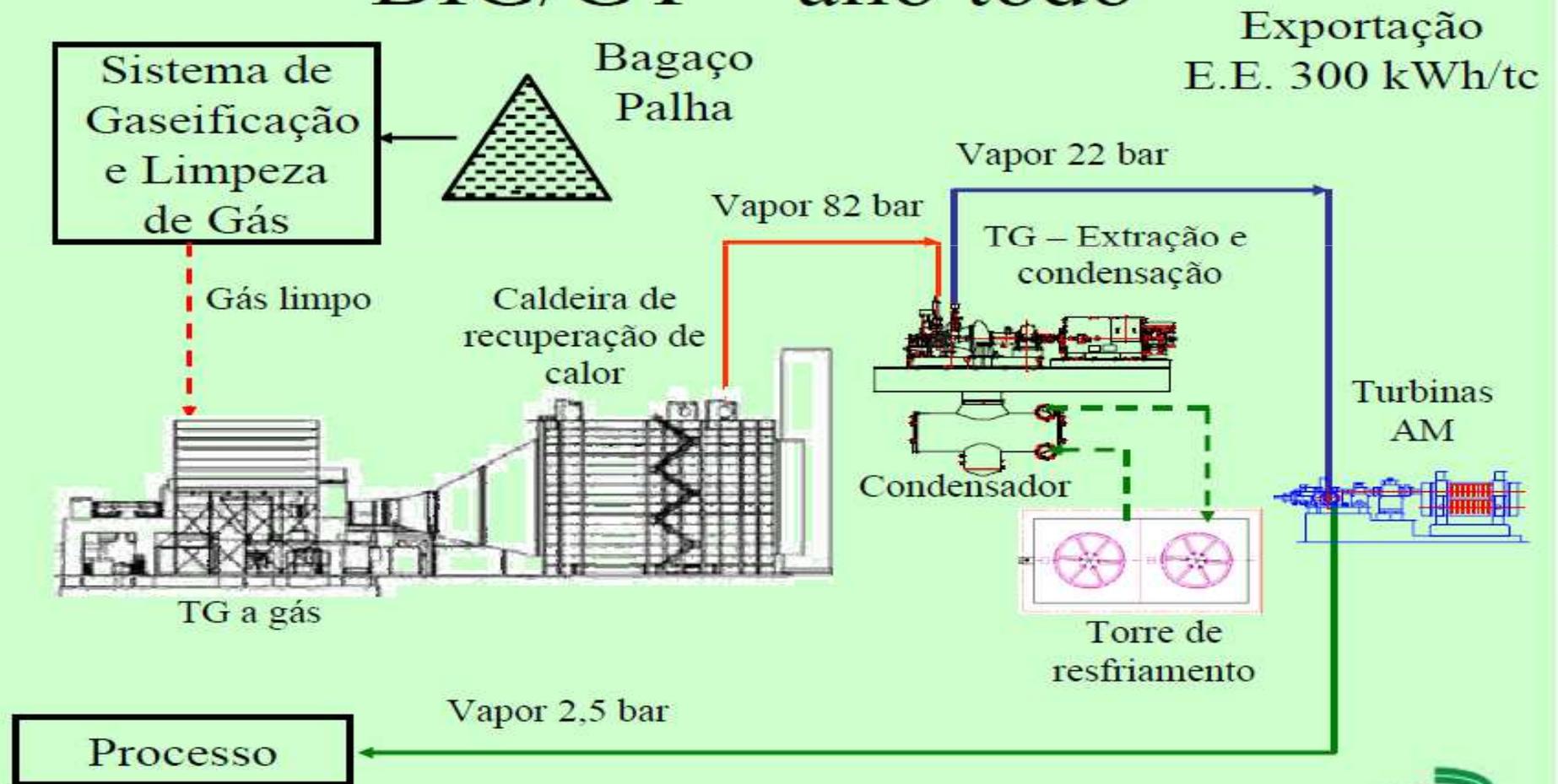


INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Tipos de caldeiras usuais na indústria sucroenergética

BIG/GT – ano todo





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Alternativas de Geração em Usinas

Tecnologia	Operação	Consumo Processo kgv/tc	Excedente Energia kWh/tc	Potencial Brasil		% Consumo Brasil
				GWh	MW	
22bar-300C TG Contrapressão	Safra	500	0 – 10	3 600	900	1
80bar-480C TG Contrapressão	Safra	500	40 – 60	22 000	5 500	6
80bar-480C TG Condensação	Ano todo	340	100 – 150	54 000	7 200	16
BIG/GT	Ano todo	< 340	200 - 300	110 000	14 500	32

Obs.: Consumo residencial médio 150 kWh/mês
Consumo nacional de energia elétrica $342 \cdot 10^3$ GWh/ano (BEN 2004)
Moagem anual de 360 milhões de toneladas de cana





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

- De modo geral, denomina-se combustível como sendo qualquer substância natural ou artificial que em combinação química com o oxigênio libere energia térmica por meio de uma reação exotérmica.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

COMPOSIÇÃO:

- Os elementos químicos que entram na composição da maioria dos combustíveis são:
 - *carbono,*
 - *hidrogênio,*
 - *oxigênio,*
 - *nitrogênio e*
 - *enxofre.*



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

COMPOSIÇÃO:

- A qualidade do combustível é dada pelos elementos **carbono (C)** e **hidrogênio (H)**; o **enxofre (S)**, apesar de combustível, é indesejável, o **oxigênio (O)** diminui a quantidade unitária de calor despreendida, pois é considerado como já combinado com o hidrogênio; o **nitrogênio (N)** também não é desejável, pois não apresenta, no campo da combustão industrial, reação com oxigênio com liberação de calor.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

PODER CALORÍFICO:

- É a quantidade de energia desprendida por unidade de massa ou de volume na combustão completa de um material combustível. Depende basicamente da composição química de cada combustível sendo expressa em J/kg, cal/kg, ou J/Nm³.

Existem dois poderes caloríficos:

- Poder Calorífico Superior e
- Poder Calorífico Inferior.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

PODER CALORÍFICO:

- **Poder Calorífico Superior (PCS):**
É a quantidade de calor (energia) liberada quando um material entra em combustão e os gases da descarga são resfriados de modo que o vapor de água neles seja condensado.
- **Poder Calorífico Inferior (PCI):**
É a quantidade de calor (energia) liberada quando um material entra em combustão e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

PODER CALORÍFICO:

- Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nas máquinas térmicas, a água contida nelas se encontra sempre no estado de vapor, portanto, o que deve ser considerado é o poder calorífico inferior e não o superior.



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

CLASSIFICAÇÃO DOS GV's:

- Fonte de aquecimento:
 - Elétricas (Eletrodo submerso),
 - Combustíveis,
 - Sólidos (Carvão, Biomassa)
 - Líquidos (Óleo combustível)
 - Gasosos (GN e GLP)
 - Reatores nucleares.

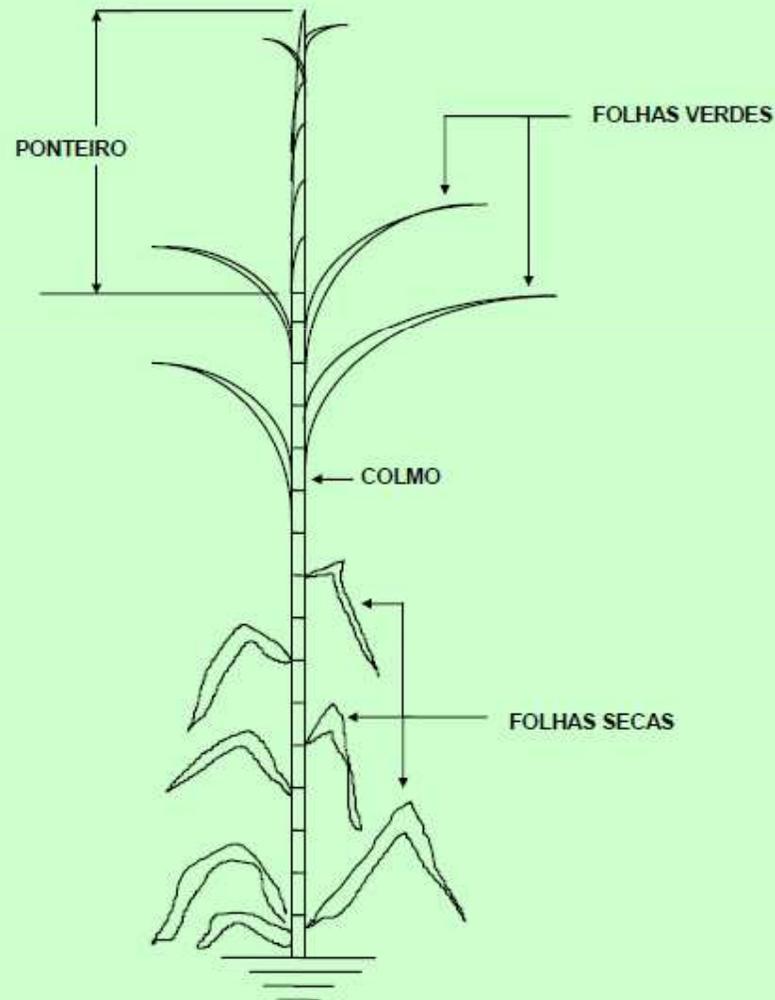


INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

Cana





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

Energia da Cana

1 TON DE CANA (COLMOS)	Energia (MJ)
• 140 kg de açúcar	2 300
• 280 kg de bagaço (50% umidade)	2 500
• 280 kg de palha (50% umidade)	2 500
TOTAL	7 300 (0.174 tep)

Fontes: Unica e MME BEN 2006 – ano base 2005



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Uso da Palha da Cana-de-açúcar





INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis

Disponibilidade de Palha

- Produtividade média da cana: 82,4 t/ha
- Palha disponível (base seca): 11,5 t/ha
- Palha % de cana (base seca): 14%

Obs.: Valores médios para as variedades plantadas no Brasil
Cana de ano e meio (média de 5 cortes)



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis – Poder calorífico

PODER CALORÍFICO:

- Determinação do poder calorífico dos combustíveis.

$$PCS = (33900 * \%C) + (141800 * (\%H - (\%O/8))) + (9200 * \%S)$$

$$PCI = PCS - (2440 * ((9 * \%H) + \%U))$$

% em Escala absoluta

PCS=Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)

C= Teor de Carbono

H= Teor de Hidrogênio

S= Teor de Enxofre

O= Teor de Oxigênio

PCI=Poder Calorífico Inferior (KJ/Kg)

U= Teor de umidade



INTRODUÇÃO À GESTÃO DE PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA



Combustíveis – Poder calorífico

Determine através das fórmulas o poder calorífico superior e inferior do combustível, sabendo que este apresenta a seguinte composição química:

$$C = 44,8 \%$$

$$H = 5,4 \%$$

$$O = 39,6 \%$$

$$S = 0,0 \%$$

$$U = 50 \% \text{ e}$$

$$U = 15 \%$$

Considerações finais

- ◆ A geração de vapor nas usinas é essencial, pois esta forma de energia é responsável pelo acionamento de vários equipamentos e para a produção de energia eletromecânica;
- ◆ A capacidade de produção de energia depende do tipo de caldeira utilizado;
- ◆ No setor sucroenergético, tanto o bagaço quanto a palha podem ser utilizados para a co-geração;

Referências

- ◆ DELGADO, A. ; CESAR, M.A.A. **Elementos de Tecnologia e Engenharia do açúcar de cana.** Piracicaba : Zanini,1990. 1061p.
- ◆ PAYNE, J.H. **Operações unitárias na produção de cana-de-açúcar.** São Paulo: NOBEL, 1989. 245p.
- ◆ USHIMA, A.K., RIBEIRO, A.M.M., SOUZA, M.E.P., SANTOS N.F. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool.** São Paulo, IPT, 1990. 796p.

Referências

◆ ANDRADE, A.S. Máquinas
Termicas.2012.

Lamonica, H. Produção de vapor e
eletricidade, 2007.