



**Utilização da Biomassa do Eucalipto para  
Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**

*Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade*

**Celso Foelkel**

<http://www.celso-foelkel.com.br>

<http://www.eucalyptus.com.br>

<https://www.linkedin.com/profile/view?id=48985640&trk>

[https://www.researchgate.net/profile/Celso\\_Foelkel](https://www.researchgate.net/profile/Celso_Foelkel)

<https://twitter.com/AVTCPEP>

<https://twitter.com/CFoelkel>

**Maio 2016**



## EUCALYPTUS ONLINE BOOK

### CAPÍTULO 44

#### **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**

*Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade*

**Uma realização:**



Autoria: **Celso Foelkel**

## Organizações facilitadoras:



[ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel](#)



[IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores](#)



[IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais](#)



## Empresas e organizações patrocinadoras:



[Fibria](#)



[ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel](#)



[ArborGen Tecnologia Florestal](#)



[CENIBRA – Celulose Nipo Brasileira](#)



[CMPC Celulose Riograndense](#)



[IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores](#)



[Klabin](#)



[Lwarcel Celulose](#)



[Solenis](#)



[Stora Enso Brasil](#)



[Suzano Papel e Celulose](#)



# **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**

## *Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade*

### **CONTEÚDO DO CAPÍTULO**

- INTRODUÇÃO E AGRADECIMENTOS
- VALOR ENERGÉTICO DA BIOMASSA FLORESTAL
- ENERGIA LIBERADA PELA COMBUSTÃO DA BIOMASSA
- GERAÇÃO DE CALOR NA AGRICULTURA
- CALDEIRAS DE FORÇA PARA GERAÇÃO DE VAPOR
- GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM BASE NA BIOMASSA FLORESTAL
- COGERAÇÃO A PARTIR DA QUEIMA DA BIOMASSA DO EUCALIPTO
- TURBINAS E TURBOGERADORES
- EXEMPLOS DE CÁLCULOS NUMÉRICOS EM GERAÇÃO DE CALOR, VAPOR E ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA FLORESTAL DO EUCALIPTO
  - ALGUNS PROBLEMAS E CÁLCULOS PRÁTICOS SOBRE TEORIA DA COMBUSTÃO DAS BIOMASSAS
  - ALGUNS PROBLEMAS E CÁLCULOS PRÁTICOS SOBRE GERAÇÃO E CONSERVAÇÃO DE CALOR, VAPOR E ENERGIA
- CONSIDERAÇÕES FINAIS
- REFERÊNCIAS DA LITERATURA E SUGESTÕES PARA LEITURA

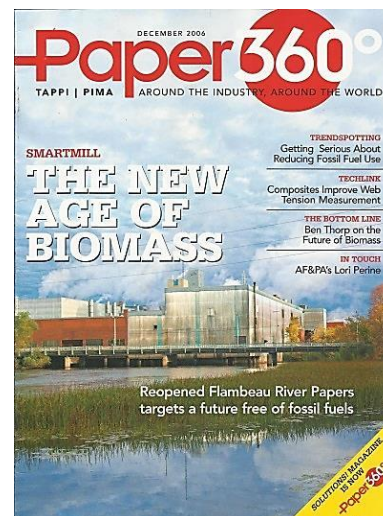
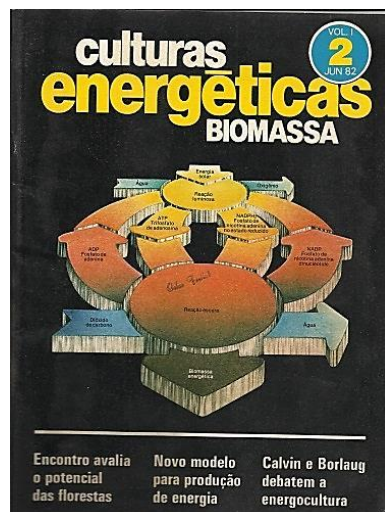


# Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade

## Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade



Lenha – uma das muitas utilizações energéticas para geração de calor no Brasil



Bioenergia florestal – Seria outra vez a bola da vez?



# Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade

## Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade



### INTRODUÇÃO E AGRADECIMENTOS

Esse capítulo dá continuidade a uma série de capítulos sobre o uso energético da biomassa do eucalipto. O tema é bastante amplo e variado, com diversas opções de abordagem. Por isso mesmo, não serei tão abrangente, procurando manter mais o foco em alguns temas que elegi como relevantes ao setor de base florestal plantada. De qualquer forma, eu já escrevi alguns outros textos sobre usos energéticos do eucalipto em nosso livro virtual denominado **Eucalyptus Online Book**:

- Como carvão vegetal no capítulo 18;
- Sobre ecoeficiência energética no capítulo 19;
- Como fonte de biocombustíveis no capítulo 29, onde discorri sobre as biorrefinarias integradas;
- Sobre biomassa florestal e florestas energéticas no capítulo 43...

...como também tive alguns artigos sobre energia em nossas Eucalyptus Newsletter e PinusLetter. Muitos desses meus capítulos e textos de cunho energético estão relacionados na seção final desse capítulo, onde foram colocados como referências e recomendações de literatura, junto a muitas outras referências fantásticas para a leitura e aprendizado de vocês, estimados leitores.

Tenho notado muitas ansiedades e enormes expectativas para o uso energético da biomassa eucaliptica, em especial por pequenos empresários, produtores rurais e até mesmo empresas de grande porte. Existem muitos projetos, sonhos e mesmo realizações em curso focadas em atender a produção de energia e de energéticos a partir dessa biomassa, inclusive com produtos para exportações, como péletes, briquetes, cavacos e biocombustíveis líquidos. Exatamente por isso, quero oferecer com meus textos algumas informações básicas importantes e muitos dados práticos e fundamentais para que as pessoas interessadas possam melhor entender esses assuntos, melhorando assim os seus processos de tomada de decisão ou de avaliações conceituais e quantificações numéricas.

A literatura sobre isso tudo é muitíssimo vasta e merece toda minha admiração pelo que se gerou sobre esse tema no Brasil. São ofertas de conhecimentos, estudos e pesquisas, que aparecem abundantemente na web ou em textos impressos para serem estudados e lidos. Debrucei-me sobre algumas centenas deles, lendo-os cuidadosa e criticamente. Com isso, eu pude aprender muito com diversos estudiosos e grandes autores, podendo assim melhorar meu embasamento sobre esses importantes assuntos.

Eu tinha como meta escrever apenas um capítulo sobre bioenergia do eucalipto, mas logo descobri que se assim o fizesse, deveria produzir não um capítulo, mas uma enciclopédia em energia da biomassa, tamanha é a amplitude desse assunto. Com isso, procurei dividir a temática de acordo com os seguintes tópicos, cada um compondo um capítulo específico do **Eucalyptus Online Book** sobre a mesma temática central.

Eu sempre tive uma atração especial sobre a geração e utilização da energia. Por isso, agora e de forma muito motivada, estou lhes entregando essa série de três capítulos (números 43 a 45) para compartilhar e interagir com os interessados em temas energéticos de vitais importâncias para o setor de base florestal.

Série de capítulos:

### **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**

Capítulo 43:

[Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas](#)

Capítulo 44:

[Parte 2: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade](#)



## Capítulo 45:

### Parte 3: Resíduos Florestais Energéticos

Antes de lhes trazer meus considerandos, meus questionamentos, minhas experiências e diversos cálculos práticos para cooperar para a melhoria do entendimento do que me propus para transferir desses conhecimentos nesse capítulo 44, eu gostaria de homenagear alguns autores de textos magníficos, que tive oportunidade de ler antes de iniciar a redação desses três capítulos. Todos eles têm sido vetores de agregação de mais conhecimentos sobre esse assunto e me ajudaram tanto com seus estudos e textos, bem como me fornecendo dados, fotos e informações vitais para que eu melhor pudesse lhes oferecer algo de utilidade. Conheço muito bem grande parte desses autores, muitos são excelentes amigos, mas alguns desses autores, infelizmente eu ainda não conheço pessoalmente, mas a leitura de seus textos, teses, artigos e mensagens de e-mail me fizeram sentir profundamente agradecido por ter encontrado suas reflexões e comentários para leitura cuidadosa e consolidado aprendizado.

Temos na seção de referências da literatura muitos textos escritos por uma longa lista de especialistas e estudiosos de bioenergia, mas que poderia ser muito maior, caso eu tivesse mais disponibilidade de tempo para mais leituras e buscas. Muitos dos autores citados são eminentes estudiosos nos temas da agroenergia ou da utilização energética da madeira e de resíduos florestais. Por outro lado, eu gostaria de reforçar o fato de que muitos desses textos se constituem em teses de doutorado, dissertações de mestrado e alguns são monografias de conclusão de cursos. Pela qualidade desses estudos e pela forma tecnológica clara dos textos, só posso parabenizar a todos os seus autores e deixar minha recomendação a esses autores para que continuem assim, trabalhando de forma objetiva e com muita qualidade em seus artigos e textos, de forma a difundir o que aprenderam com seus estudos e pesquisas. *Assim sendo, deixo meus agradecimentos sinceros e minha admiração pelas significativas contribuições técnicas e científicas aos seguintes autores e estudiosos da bioenergia florestal (em ordem alfabética de primeiro nome):*

- Alexandre dos Santos Dias
- Ana Teresa Oliveira Santos Silva
- Antônio Guilherme Garcia Lima
- Ari da Silva Medeiros
- Carla Célia Rosa Medeiros
- Carlos Alberto Busnardo
- Carlos Roberto de Lima
- Carolina Soares França

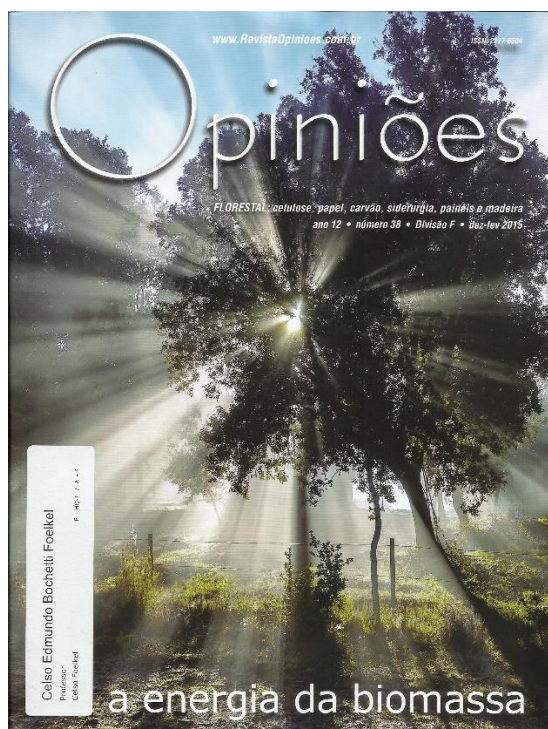
- Cláudio Ferreira de Moraes
- Denis Luís de Oliveira
- Electo Eduardo Silva Lora
- Élio Veit Preto
- Émerson Freitas Jaguaribe
- Estanislau Victor Zutautas
- Fernanda Augusto de Oliveira Melo
- Francisco de Assis Bertini Moraes
- Francisco Leonel C. Lima
- Francisco Luiz Sanchez Santiago
- Gladson Lima Mortoza
- Gunnar N.E. Krogh
- Hanniel Freitas
- Isaias C. Macedo
- José Luz Silveira
- José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira
- Júlio César Ferreira Macedo
- Leandro Calegari
- Leonardo Rosa Silva
- Luiz Antônio Perea
- Luiz Fernando dos Santos
- Luiz Gustavo Scartezini Rodrigues
- Marcelo Dias Müller
- Mário Donizeti do Nascimento
- Martha Andréia Brand
- Michael Vahrenkamp
- Newton Paterman Brasil
- Nilson Ribeiro Leite
- Patric Schürhaus
- Roberto de Aguiar Peixoto
- Roberto Villarroel
- Rodrigo Pereira Francisco
- Tiago Fiori Cardoso
- Vantuir Baptista Pereira Júnior
- Wesley Fernandes Queiroz

Espero sinceramente que esses capítulos e toda a literatura associada possam lhes ser de muita utilidade.

*Um grande abraço e um enorme muito obrigado a todos vocês leitores pela honra que me fazem ao realizarem a leitura desse e de outros de nossos textos acerca da biomassa energética dos eucaliptos.*



## VALOR ENERGÉTICO DA BIOMASSA FLORESTAL



Revista Opiniões – fonte de diversas edições sobre energia da biomassa

Nesse presente capítulo de nosso livro digital sobre o *Eucalyptus* procurarei fazer uma espécie de retrospectiva geral sobre a utilização da biomassa florestal para produção de calor, vapor e eletricidade. Portanto, não se trata de um capítulo que vá envolver e discorrer sobre todas as utilizações energéticas da biomassa florestal dos eucaliptos, mas apenas aquelas relacionadas à sua queima ou combustão para geração desses três tipos de produtos energéticos que as sociedades industrial, empresarial, urbana e agrícola demandam com frequência. Esse direcionamento está mais relacionado ao fato de que o **Eucalyptus Online Book** tem como finalidade principal atender à divulgação de conhecimentos e tecnologias mais diretamente relacionadas aos setores industriais de produção de celulose e papel, chapas e painéis de madeiras, bem como alguns outros tipos de utilizações industriais dessas madeiras.

Nesses setores produtivos mencionados como foco principal de nosso livro, os principais tipos utilizados de energia são os seguintes:

- Energia termoquímica, liberada pela combustão da biomassa, do óleo combustível, do gás natural e de outros combustíveis, para diversas finalidades, entre as quais a produção de calor e vapor;
- Energia termelétrica, produzida principalmente por turbogeradores, os quais são cativos de empresas do setor que atuam na geração distribuída de energia para atender demandas próximas do local onde essa eletricidade é gerada. As empresas de produção de celulose de mercado costumam atuar como âncoras energéticas, suprindo eletricidade e vapor para outras empresas de insumos localizadas em arranjos produtivos liderados energeticamente por elas.
- Energia química, liberada por reações químicas de natureza exotérmica, que acontecem por liberação de energia de reação que é prontamente incorporada aos processos.
- Energia mecânica, resultado da transferência de eletricidade ou de vapor para acionamento de eixos e rotores, etc.
- Energia da gravidade, para movimentação de fluxos, em geral de líquidos, graças à força da gravidade, em situações de desníveis de localização entre os pontos de transferência.

A energia termelétrica e a produção de vapor também são práticas comuns no setor sucroalcooleiro, que obtém a sua energia a partir do bagaço e da palha da cana de açúcar. Por essa razão, muitas das citações referenciadas na nossa literatura abarcam esses tipos de biomassas energéticas. Além disso, a biomassa florestal também abastece um número incontável de outros tipos de instalações geradoras de calor, vapor e eletricidade em outros tipos de setores da sociedade. Já discutimos bastante sobre isso no capítulo nº 43 do Eucalyptus Online Book, que pode ser obtido através do link a seguir: [http://eucalyptus.com.br/eucalptos/PT43\\_Florestas\\_Energeticas\\_Eucalptos.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucalptos/PT43_Florestas_Energeticas_Eucalptos.pdf)

O que considerei notável, ao buscar fontes de referências na web para poder oferecer a vocês uma literatura qualificada e rica, foi encontrar tantas teses, dissertações e monografias de conclusão de cursos sobre esses temas, o que indica que a academia brasileira está amplamente envolvida em colaborar para a agregação de conhecimentos sobre esses assuntos.

Apenas a título referencial, caso queiram ampliar suas buscas de literatura, sugiro que entrem e naveguem em bancos de teses digitais e repositórios acadêmicos de universidades de elite do Brasil, tais como:

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá  
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas  
USP – Universidade de São Paulo  
UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
UFPR – Universidade Federal do Paraná  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais  
UFV – Universidade Federal de Viçosa  
UFSM – Universidade Federal de Santa Maria  
UFF – Universidade Federal Fluminense  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos  
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo  
UFSE – Universidade Federal do Sergipe  
UERJ – Universidade Estadual do Rio de Janeiro  
UFBA – Universidade Federal da Bahia  
UnB – Universidade de Brasília

...dentre tantas outras mais de enorme relevância em lançamento de boas dissertações de mestrado, teses de doutorado e trabalhos de conclusão de cursos.

Também recomendo a navegação em publicações de alguns institutos de pesquisa como Embrapa Agroenergia, Embrapa Florestas, CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, RENABIO – Rede Nacional de Biomassa para Energia e inúmeras revistas, websites de fabricantes de equipamentos e de engenharias, etc. É muito simples se aprender muito sobre qualquer coisa nos dias de hoje, basta desejar e dedicar tempo e esforço a isso.

Como vocês bem sabem, existem fortes movimentos globais promovendo a substituição de fontes energéticas de origens fósseis por fontes renováveis da biomassa, principalmente pela lenha das árvores, carvão vegetal, resíduos agroflorestais, licor preto kraft e outros resíduos de processos de industrialização e urbanos. Na grande maioria das vezes, os estudos são orientados para os processos de combustão, que têm como missão a liberação rápida da energia primária contida nos combustíveis. Esse calor liberado pela queima do combustível pode ser utilizado para geração de calor (aquecimento, secagem, calefação, cocção, radiação, etc.) ou para produção de vapor.

A queima direta da biomassa florestal talvez tenha sido o primeiro processo utilizado pelo ser humano para conversão de uma forma de energia para outra, tão logo ele descobriu para que servia o fogo, ainda nos primórdios da civilização.

Como existe uma grande disponibilidade de tipos e formas de aproveitamento das biomassas de origem florestal, uma das principais preocupações dos que as utilizam é em como valorar ou valorizar as mesmas. Ou seja, como explicar e entender o valor energético de uma biomassa, ou de qualquer outro tipo de combustível.

Por isso mesmo, pretendo nessa seção lhes oferecer algumas considerações e reflexões sobre isso.

As razões para que existam confusões e conflitos de interesse nessas valorizações se devem ao fato de que os processos de comercialização de biomassa combustível exigem referenciais para estabelecer preços ou valores de compra/venda. As comercializações costumam acontecer por processos de avaliação de pesos, volumes ou da própria energia contida nos combustíveis.

A própria compra e venda de lenha, que sempre foi realizada com base no metro cúbico de madeira empilhada (estéreo) agora passa por uma séria crise com as recomendações do INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia para que essa unidade seja banida no setor pelos inconvenientes que ela traz em erros e facilidades de ajustes, beneficiando um ou outro lado da cadeia comercial. Também o comércio de lenha ou outro tipo de biomassa com base apenas em peso bruto não é muito confiável, pela possibilidade pouco ética de se introduzir água na carga (aumento da umidade), tendo em vista a facilidade que as biomassas vegetais possuem para serem molhadas e umedecidas.

As biomassas florestais ou de outros tipos e origens (bagaço de cana, bambu, gramíneas anuais, etc.) são muito influenciadas por três fatores vitais para se entender seu valor energético:

- Teor de umidade;
- Densidade aparente ou densidade a granel (em base de peso absolutamente seco por unidade de volume);
- Densidade energética, que é resultante do poder calorífico útil e da densidade a granel do combustível.

Existem outros parâmetros qualitativos importantes para valorização das biomassas, mas quando se desejam avaliações

expeditas e rápidas, esses são os principais. Isso porque eles afetam de imediato a quantidade de energia que será comercializada e para a qual se necessita faturar rapidamente para se obter o pagamento.

Outros fatores importantes como a própria determinação do poder calorífico superior ou a composição química da biomassa são consumidores de tempo analítico e não variam em faixas amplas que exijam que cada carga comercializada seja assim avaliada.

A confusão pode ficar ainda maior, porque o próprio teor de umidade pode ser determinado de duas maneiras, conforme as tradições de algumas empresas, acadêmicos, técnicos e de alguns setores industriais. Costuma-se determinar o mesmo com base em percentuais do peso úmido inicial ou do peso seco final do ensaio – confusão de números ou enganos terríveis por não se conhecer com quais metodologias estão se referindo os atores do comércio da biomassa.

Dependendo da metodologia empregada, os resultados podem ser significativamente diferentes. A indústria madeireira, que processa mecanicamente a madeira, prefere expressar o teor de umidade com base em peso seco final (PS). Já a indústria de celulose e papel e alguns outros setores industriais e energéticos preferem adotar o percentual com base no peso de água sobre o peso úmido inicial da biomassa (PU).

Minha total preferência, pela simplicidade nos entendimentos do que está acontecendo com a biomassa e também pelos cálculos, é pela metodologia baseada no peso úmido inicial, a saber:

$$\text{Umidade base PU (\%)} = 100 \cdot [(\text{Peso Úmido}) - (\text{Peso Seco})] : (\text{Peso Úmido})$$

...onde  $[(\text{Peso Úmido}) - (\text{Peso Seco})] = (\text{Peso Água})$

Ao valor que complementa para 100% se dá o nome de Consistência ou Percentual de Secos da biomassa:

$$\text{Consistência (\%)} = 100 \cdot [(\text{Peso seco}) : (\text{Peso Úmido})]$$

No caso de se determinar o teor de umidade com base no peso seco final, a fórmula ficaria:

$$\text{Umidade base PS (\%)} = 100 \cdot [(\text{Peso Úmido}) - (\text{Peso Seco})] : (\text{Peso Seco})$$

...onde  $[(\text{Peso Úmido}) - (\text{Peso Seco})] = (\text{Peso Água})$

Seja um exemplo numérico simples para fixação desses importantes conceitos:

**Exemplo 01:**

Amostra de madeira pesando no início dos ensaios um peso úmido de 40 gramas e após secagem até um valor constante de peso absolutamente seco (até peso constante em secagem em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) de 20 gramas secas.

$$\text{Umidade base PU (\%)} = 100 \cdot [(40) - (20)] : (40)$$

$$\text{Umidade base PU (\%)} = 50\%$$

$$\text{Consistência} = 100 \cdot [(20) : (40)]$$

$$\text{Consistência} = 50\%$$

.....

$$\text{Umidade base PS (\%)} = 100 \cdot [(40) - (20)] : (20)$$

$$\text{Umidade base PS (\%)} = 100\%$$

Ou seja, uma enorme diferença que precisa ser entendida e esclarecida para quem toma contato com esses números, sem conhecer a origem dos mesmos.

Para fins de padronização dessa presente série de capítulos em bioenergia, sempre estarei me referindo a teor de umidade base peso úmido e não base peso seco.





Para complementar ainda mais esse assunto e mostrar as diferenças marcantes que podem existir na vida diária dos usuários de bioenergia e biocombustíveis, vamos agora elaborar um quadro, onde serão apresentados dois tipos de biomassa e com dois níveis de umidade (em base peso úmido) e dois níveis de densidade aparente base peso seco por volume tal qual.

Como variam as umidades das biomassas, variarão também os poderes caloríficos úteis em quilocalorias por quilograma nas umidades de 20 e 40%, mesmo se considerando que o poder calorífico inferior base seca seja o mesmo (4.400 kcal/kg seco).

Tipo de biomassa A: Lenhas de toras de eucalipto com casca

Teores de umidade (U): 20% e 40%

Densidades aparentes das lenhas: 300 e 350 kg a.s./estéreo

Poder calorífico inferior: 4.400 kcal/kg a.s. (absolutamente seco)

Poder calorífico útil a 20%U: 3.400 kcal/kg a 20%U

Poder calorífico útil a 40%U: 2.400 kcal/kg a 40%U

Tipo de biomassa B: Cavacos obtidos de toras de eucalipto com casca

Teores de umidade: 20% e 40%

Densidades aparentes dos cavacos: 175 e 200 kg a.s./m<sup>3</sup>

Poder calorífico inferior: 4.400 kcal/kg seco

Poder calorífico útil a 20%U: 3.400 kcal/kg a 20%U

Poder calorífico útil a 40%U: 2.400 kcal/kg a 40%U

Para fins de facilitação de entendimento, vamos construir duas tabelas demonstrativas das sequências de cálculos e dos valores sendo produzidos: uma tabela para cada tipo de biomassa.



Tipo de biomassa A: Lenhas de toras de eucalipto com casca

Poder calorífico inferior (kcal/kg a.s.)	4.400	4.400	4.400	4.400
Teor de umidade (% base PU)	20	40	20	40
Densidade aparente base seca (kg a.s./st)	300	300	350	350
Peso úmido (kg úmidos/st)	375	500	438	584
Poder calorífico útil kcal/kg úmido	3.400	2.400	3.400	2.400
<b>Densidade energética (Mcal/st)</b>	<b>1.275</b>	<b>1.200</b>	<b>1.489</b>	<b>1.400</b>

Tipo de biomassa B: Cavacos obtidos de toras de eucalipto com casca

Poder calorífico inferior (kcal/kg a.s.)	4.400	4.400	4.400	4.400
Teor de umidade (% base PU)	20	40	20	40
Densidade aparente base seca dos cavacos (kg a.s./m <sup>3</sup> )	175	175	200	200
Peso úmido (kg úmidos/m <sup>3</sup> )	219	292	250	333
Poder calorífico útil kcal/kg úmido	3.400	2.400	3.400	2.400
<b>Densidade energética (Mcal/m<sup>3</sup>)</b>	<b>745</b>	<b>701</b>	<b>850</b>	<b>800</b>

Os dois quadros acima demonstram com enorme clareza que os mesmos metros cúbicos em volume, um de toras empilhadas e outro de cavacos, possuem significativas diferenças em quantidades de energia primária que possuem para liberação em processos de combustão, mesmo se levando em conta que as duas biomassas apresentavam o mesmo poder calorífico inferior base peso seco.

Pode-se ainda notar, que conforme variavam os teores de umidade e as densidades aparentes (base seca) dos materiais, variavam também as densidades energéticas de maneira muito significativa. Ou seja, mesmos volumes do mesmo tipo de biomassa (lenha ou cavacos) eram muito influenciados pela densidade dos materiais (quantidade de peso seco que a biomassa possuía por unidade de volume) e pelas suas umidades.

Resumidamente, pode-se dizer que a densidade energética de qualquer biomassa é extremamente influenciada pelo seu teor de umidade e pela densidade aparente ou densidade a granel (ambas em base seca) e pelo seu poder calorífico útil (que muda muito conforme altera o teor de umidade da biomassa).

Vamos considerar outro exemplo, agora bem mais prático e muito comum nas empresas que adquirem biomassas energéticas de origem florestal em mercados regionais.

Admitamos que uma determinada empresa receba para faturar as cargas de dois caminhões de 30 m<sup>3</sup> cada um deles, somente que transportando biomassas diferentes.

Caminhão 1: Costaneiras e refilos de eucalipto provenientes de serraria

Caminhão 2: Cavacos de serraria obtidos pela fragmentação de resíduos das operações de desdobro das toras de eucalipto

Em função dos tipos de madeira, das dimensões e arranjos dos fragmentos de madeira e das disposições dos resíduos e da maneira como foram colocadas as costaneiras na carroceria do caminhão, foram observadas as seguintes características em cada uma das cargas:

Costaneiras e refilos de eucalipto provenientes de serraria

- Peso efetivo da carga (excluída a tara do caminhão): 12 toneladas úmidas
- Densidade aparente da carga em base seca: 200 kg a.s./m<sup>3</sup>
- Teor de umidade: 50%
- Poder calorífico útil da biomassa a 50% de umidade: 1.900 kcal/kg a 50%U ou 1,9 Gcal/t a 50%U

### Cavacos de serraria obtidos pela fragmentação de resíduos das operações de desdobro das toras de eucalipto

- Peso efetivo da carga (excluída a tara do caminhão): 8,75 toneladas úmidas
- Densidade aparente da carga em base seca: 175 kg a.s./m<sup>3</sup>
- Teor de umidade: 40%
- Poder calorífico útil da biomassa a 40% de umidade: 2.400 kcal/kg a 40%U ou 2,4 Gcal/t a 40%U

Com cálculos simples, pode-se facilmente obter as quantidades de energia primária contidas nas biomassas adquiridas em cada uma das duas cargas.

### Costaneiras e refilos de eucalipto provenientes de serraria

Qenergia =  
(Peso da carga, toneladas úmidas) . (PCÚtil a 50%U, em Gcal/t úmida a 50%U)

$$Qenergia = (12 \text{ t}) \cdot (1,9 \text{ Gcal/t}) = \mathbf{22,9 \text{ Gcal na carga de } 30 \text{ m}^3}$$

*...e com densidade energética de 0,76 Gcal/m<sup>3</sup> [(22,9 Gcal)/(30 m<sup>3</sup>)]*

### Cavacos de serraria obtidos pela fragmentação de resíduos das operações de desdobro das toras

Qenergia =  
(Peso da carga, toneladas úmidas) . (PCÚtil a 40%U, em Gcal/t úmida a 40%U)

$$Qenergia = (8,75 \text{ t}) \cdot (2,4 \text{ Gcal/t}) = \mathbf{21 \text{ Gcal na carga de } 30 \text{ m}^3}$$

*...e com densidade energética de 0,7 Gcal/m<sup>3</sup> [(21 Gcal)/(30 m<sup>3</sup>)]*

Portanto, as costaneiras e refilos, mesmo com maior teor de umidade que os cavacos (50% versus 40%), conseguiram oferecer

maior quantidade de energia em mesmo volume equivalente dos cavacos de serraria, em função de sua maior densidade aparente e provavelmente de seu melhor arranjo volumétrico na carroceria do caminhão.



Alguns técnicos do setor de base florestal têm procurado desenvolver alguns fatores de equivalência entre os diferentes tipos de biomassa de origem florestal, como forma prática de corrigir e trazer para uma mesma unidade todos os variados tipos de biomassa (cavacos, casca fragmentada, maravalhas, pós de lixamento, costaneiras, refilos de painéis de madeira, serragem, etc.).

Ouso dizer, que eu gostaria de propor dois fatores práticos, que embora não sejam absolutamente exatos, podem ajudar a equalizar todos os diferentes tipos de biomassa em equivalentes a uma lenha referencial de eucalipto.

Esses dois equivalentes para a biomassa, que enunciarei em breve, se baseiam no mesmo conceito da mundialmente conhecida **TEP – Tonelada Equivalente de Petróleo**. A Agência Internacional de Energia/OECD (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) define 1 TEP como uma unidade de energia que equivale a 41,868 GJ; 11,630 MWh; 10.030 Mcal ou 10,03 Gcal.

Antes de eu me aventurar a falar e escrever sobre esses dois indicadores para as biomassas de origem florestal, que os chamarei de **TEL – Toneladas Equivalentes de Lenha** e **MEL – Metros Cúbicos Equivalentes de Lenha**, vamos entender a unidade de energia que originou essa reflexão, que é a TEP – Tonelada Equivalente de Petróleo.

A TEP ou tep pode servir de fator para se avaliar outros combustíveis, convertendo-se em uma interessante unidade de energia: ao invés de GJ ou Gcal, teríamos a TEP ou tep.

Com o uso da TEP se pode trazer um determinado combustível a valores de petróleo, estabelecendo uma equivalência entre ambos com base na energia que disponibilizam primariamente em sua constituição e por unidade de peso ou de volume.

Exemplos:

1 m<sup>3</sup> de gasolina = 0,86 TEP

1 tonelada de bioetanol = 0,64 TEP

1 tonelada de óleo combustível = 10 Gcal/t = 0,997 TEP

O MME – Ministério de Minas e Energia, através da Secretaria de Energia, ofereceu um valor de TEP para a lenha, mas de forma ampla e genérica, sem definir que lenha está sendo considerada ou em que teor de umidade ou fator de cubicação ela se encontra (<http://ecen.com/eee13/equiv.htm>). Sequer a espécie é referida, talvez seja mais um indicador que possa ser aperfeiçoado.

O valor assim referido para TEP da lenha pelo MME com poder calorífico útil de 3.300 Mcal/t tal qual seria de 0,306 toneladas equivalentes de petróleo por tonelada tal qual de lenha.

1 t tal qual de lenha = 0,306 TEP

Existem muitos outros relatórios de diversos autores e instituições, mostrando valores distintos para a TEP da lenha, como é o caso dos dados do CTGás – Centro de Tecnologias do Gás & Energias Renováveis, que fornece para a lenha um valor mais compatível e de 0,234 TEP, para um poder calorífico útil de lenha igual a 2.527 Mcal/t ou 2,527 Gcal/t tal qual – não se especificando o teor de umidade dessa lenha, nem tampouco o seu poder calorífico inferior base seca. Também foi usado um poder calorífico do petróleo de 10.800 Mcal/t.

O poder calorífico útil de uma tonelada úmida de lenha, conforme mencionado pela Secretaria de Energia do MME (3.300 kcal/kg tal qual) é relativamente alto, talvez função de ser lenha de madeiras nativas, muito secas e com excelente fator de cubicação, o que se consegue com toretes de lenha de um metro de comprimento, mais retílineos e com diâmetros mais avantajados (maiores que 15 cm). Existem casos como esses, mas existem casos bem distintos desse, como veremos em dois exemplos de lenhas de eucalipto, consideradas como sendo de toras com casca de árvores eucalipticas.

Mencionei acima a importância também do fator de cubicação (que é o oposto ao fator de empilhamento), que relaciona o volume de

madeira sólida e o volume de madeira empilhada. Quanto mais longas, tortuosas e finas as toras, pior se dá o arranjo das pilhas dessas toras e menor será o volume efetivo de madeira que se conseguirá por metro cúbico de madeira empilhada.

Para entenderem mais sobre esse conceito, sugiro a leitura do seguinte artigo que escrevi em 2015:

**Medição da madeira na forma de toras empilhadas.** C. Foelkel. Eucalyptus Newsletter nº 48. 27 pp. (2015)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news48\\_Toras\\_Empilhadas.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news48_Toras_Empilhadas.pdf)

*Vamos então aos nossos dois próximos exemplos numéricos:*

### **Exemplo 02:**

Lenha úmida de eucalipto consistindo de toras com casca

Comprimento das toras: 2 metros

Fator de cubicação: 0,65 m<sup>3</sup> sólido/m<sup>3</sup> estéreo

Densidade aparente das toras de lenha com casca: 0,49 t a.s./m<sup>3</sup> sólido

Peso seco de um estéreo da lenha 02 = (0,65 m<sup>3</sup>/st) . (0,49 t a.s./m<sup>3</sup>)

Peso seco de um estéreo da lenha 02 = 0,3185 t a.s./st

Os teores de umidade das lenhas de eucalipto variam bastante em termos práticos, mas se situam entre 30 a 50%. Caso se admita um valor de 45%, cada estéreo de madeira empilhada desse eucalipto do exemplo 02 pesaria 0,579 toneladas nesse nível umidade de lenha a 45%U.

Uma lenha com 45% de umidade, como essa em avaliação, poderia ter valores de poder calorífico útil entre 1.950 a 2.150 Mcal/t tal qual, ou seja, entre 1,95 a 2,15 Gcal/t tal qual.

Caso consideremos **2,05 Gcal/t tal qual**, poder-se-ia obter em primeiro lugar o valor equivalente em TEP (toneladas equivalentes de petróleo), a partir do peso dessa lenha:

1 tonelada de lenha do exemplo 02 = (2,05 Gcal/t) : (10,03 Gcal/t petróleo)

**1 tonelada de lenha do exemplo 02 = 0,204 TEP** (bastante mais aproximada ao valor relatado pelo CTGás)

É bastante simples se determinar também o valor em TEP de um estéreo dessa mesma lenha, pois temos que o peso úmido a 45% desse estéreo corresponde a 0,579 toneladas. Logo, a quantidade de energia primária em um estéreo dessa lenha seria:

$Q_{\text{energia/st}} = (0,579 \text{ t a } 45\%U/\text{st}) \cdot (2,05 \text{ Gcal/t a } 45\%U)$

$Q_{\text{energia/st}} = \mathbf{1,19 \text{ Gcal/st lenha a } 45\%U}$

A partir desses dados pode-se facilmente determinar a equivalência em petróleo de um estéreo dessa lenha do exemplo 02:

1 estéreo de lenha do exemplo 02 = (1,19 Gcal/st) : (10,03 Gcal/t petróleo)

**1 estéreo de lenha do exemplo 02 = 0,119 TEP**

### **Exemplo 03:**

Lenha relativamente seca de eucalipto consistindo de toras curtas com casca (árvores de maior idade e com maiores diâmetros que a lenha do exemplo 02):

Comprimento das toras: 1 metro

Fator de cubicação: 0,7 m<sup>3</sup> sólido/m<sup>3</sup> estéreo

Densidade aparente das toras de lenha com casca: 0,52 t a.s./m<sup>3</sup> sólido

Peso seco de um estéreo dessa lenha 03 = (0,7 m<sup>3</sup>/st) . (0,52 t a.s./m<sup>3</sup>)



Peso seco de um estéreo dessa lenha 03 = 0,364 t a.s./st

Teor de umidade da lenha: 25%

Peso úmido por estéreo da lenha a 25%U = 0,485 t a 25%U

Poder calorífico útil da lenha a 25%U = 3,23 Gcal/t a 25%U

[Valor obtido a partir da fórmula do professor Dr. José Otávio Brito (1993) diversas vezes utilizada como exemplo em nosso capítulo 43, adotando-se um poder calorífico inferior base seca dessa lenha de árvores mais idosas como sendo de 4.500 kcal/kg a.s., ou 4,5 Gcal/t a.s.]

Caso consideremos o valor de 3,23 Gcal/t de lenha a 25%U, se poderia obter em primeiro lugar o valor equivalente em TEP (toneladas equivalentes de petróleo), a partir do peso dessa lenha:

1 tonelada de lenha do exemplo 03 = (3,23 Gcal/t) : (10,03 Gcal/t petróleo)

### **1 tonelada de lenha do exemplo 03 = 0,322 TEP**

(Valor bastante próximo ao sugerido pelo MME – o que comprova que os valores de TEP podem ser muito variados entre diferentes tipos e qualidades das lenhas).

A partir desses dados, pode-se também se referir em TEP a energia contida em um estéreo dessa mesma lenha, pois temos que o peso úmido a 25% desse estéreo corresponde a 0,485 toneladas. Logo, a quantidade de energia primária em um estéreo dessa lenha seria:

$Q_{\text{energia/st}} = (0,485 \text{ t a } 25\%U/\text{st}) \cdot (3,23 \text{ Gcal/t a } 25\%U)$

$Q_{\text{energia/st}} = \mathbf{1,567 \text{ Gcal/st lenha a } 25\%U}$

A partir desses dados pode-se facilmente determinar a equivalência em petróleo de um estéreo dessa lenha do exemplo 03:

1 estéreo de lenha do exemplo 03 = (1,567 Gcal/st) : (10,03 Gcal/t petróleo)

**1 estéreo de lenha do exemplo 03 = 0,156 TEP**

Outra forma também muito interessante de relacionar esses dados de valor energético das biomassas seria, não com o petróleo, mas com o óleo combustível. Ambos são muito parecidos, pois o poder calorífico do petróleo tem sido utilizado como sendo 10,03 Gcal/t e o do óleo combustível é usualmente adotado como sendo 10 Gcal/t ou muito próximo disso, já que existem diversas qualidades desse tipo de combustível (BPF, A1, etc.).

A correção dos valores de TEP das lenhas desses nossos dois exemplos seria mínima, pois uma tonelada de óleo combustível equivale para esse nosso caso a 0,997 TEP.



A vantagem mais importante para se expressar as biomassas energéticas em toneladas equivalentes de óleo combustível é permitir que se possam estabelecer os valores máximos que se poderia pagar pela mesma em igualdades de equivalência energética com o óleo combustível.

Quando digo os preços máximos a pagar pela lenha seria exatamente pelo fato de a lenha exigir maiores custos em manuseio, estocagem, transportes e ser muito mais volumosa que o óleo combustível. Por isso, dificilmente ela seria um combustível vitorioso se fosse custar mais que o óleo combustível em energia equivalente.

Além disso, as termelétricas alimentadas a óleo costumam ser mais eficientes em termos de rendimentos térmicos de suas caldeiras do que as que se valem de caldeiras de biomassa. Isso em parte se deve à umidade contida nas biomassas e às variabilidades em seus formatos e tipos, coisas que não acontecem com o óleo combustível.

A seguir, essa tabela construída com os dados dos exemplos 02 e 03 nos mostra isso em detalhes:

<b>Base</b>	<b>Equivalências</b>	<b>Lenha Exemplo 02</b>	<b>Lenha Exemplo 03</b>
<b>Base peso</b>	Poder calorífico útil (Gcal/t tal qual)	2,05	3,23
	TEP base peso de lenha (TEP/t tal qual)	0,204	0,322
	<b>Peso de lenha (t tal qual) equivalente a 1 tonelada de petróleo</b>	<b>4,9</b>	<b>3,1</b>
	TEOC – Tonelada equivalente ao óleo combustível da lenha – base peso tal qual	0,205	0,323
	<b>Peso de lenha (t tal qual) equivalente a 1 TEOC</b>	<b>4,87</b>	<b>3,096</b>
<b>Base volume</b>	TEP base volume de lenha (TEP/estéreo)	0,119	0,156
	<b>Volume de lenha (st) equivalente a 1 tonelada de petróleo</b>	<b>8,4</b>	<b>6,41</b>
	TEOC – Tonelada equivalente ao óleo combustível da lenha – base volume (TEOC/st)	0,1194	0,1565
	<b>Volume de lenha (st) equivalente a 1 TEOC</b>	<b>8,37</b>	<b>6,39</b>

Admitindo um valor exemplo de preço de 1.000 reais por tonelada de óleo combustível, percebe-se com muita facilidade que as biomassas florestais do tipo lenha são bastante competitivas, pois poderiam ser compradas em valores de até 120 a 150 reais por estéreo e ainda assim poderiam se mostrar vantajosas ao usuário consumidor.

Depois desse longo preâmbulo sobre equivalência e valorização da lenha em relação ao petróleo e ao óleo combustível poderemos agora refletir sobre os indicadores de valoração de diversos tipos de biomassas florestais em relação à lenha.

Vamos colocar dessa vez um tipo de lenha que seja mais realístico para as empresas que utilizam grandes volumes de biomassa florestal para abastecimento de termelétricas.

Vamos chamar essa lenha de Lenha - Exemplo 04 e suas características qualitativas e quantitativas seriam as que mais representariam a maioria dos abastecimentos de lenha industrial em termelétricas.

Esse tipo de lenha, ou qualquer outro tipo de biomassa florestal, pode ser definido por uma empresa compradora de biomassa como sendo a referência básica para comparações de todas as cargas de biomassa comprada, inclusive outras cargas de lenha com características diferentes dessa considerada como referencial para comparações.

#### **Exemplo 04:**

#### **Lenha referencial para processos de comercialização**

Lenha úmida de eucalipto de toras com casca:

Comprimento das toras: 2 metros

Fator de cubicação: 0,65 m<sup>3</sup> sólido/m<sup>3</sup> estéreo

Densidade aparente das toras de lenha com casca: 0,5 t a.s./m<sup>3</sup> sólido

Peso seco de um estéreo dessa lenha 04 = (0,65 m<sup>3</sup>/st) . (0,5 t a.s./m<sup>3</sup>)

Peso seco de um estéreo dessa lenha 04 = 0,325 t a.s./st

Teor referencial de umidade = 35%

Peso úmido de um estéreo com 35% umidade = 0,5 t a 35%U

Poder calorífico útil da lenha com 35% umidade = **2,65 Gcal/t a 35%U ou tonelada tal qual úmida**

Quantidade de energia primária em um estéreo dessa lenha seria:

Qenergia/st = (0,5 t a 35%U/st) . (2,65 Gcal/t a 35%U)

Qenergia/st = **1,325 Gcal/st lenha a 35%U**

A partir de dados representativos médios para essa lenha referencial do exemplo 04, pretendo agora discorrer sobre dois indicadores, que podem ser de utilidade para os usuários de biomassa em seus processos de avaliação de desempenho das biomassas e de comercialização de insumos energéticos:

TEL – Toneladas Equivalentes de Lenha

e

MEL – Metros Cúbicos Equivalentes de Lenha

Ambos são derivados dos conceitos e exemplos recém-transmitidos sobre TEP e TEOC.

### **TEL – Toneladas Equivalentes de Lenha**

TEL seria uma espécie de fator de comparação entre as energias úteis contidas por unidade de peso de biomassas florestais e que seria calculado pela relação direta das energias primárias úteis contidas por tonelada úmida tal qual de uma determinada biomassa e de outra, que seria uma lenha considerada como referencial.

*Trata-se em realidade de uma comparação de qualquer biomassa com outra biomassa referência em termos de seus poderes caloríficos úteis, expressos em base de cada unidade de peso tal qual (tonelada).*

*Esse fator serve inclusive para fins de comercialização de biomassas florestais, atribuindo-se o preço justo de cada biomassa comprada em relação a uma biomassa considerada como referencial ou de especificação.*

Como exemplo, **a nossa lenha referencial tem um valor básico para efeitos de comparações de 2,65 Gcal/t tal qual**, como recém visto na página 28.

Vamos comparar com essa lenha referencial as biomassas dos exemplos 02 e 03, bem como com as biomassas dos caminhões 01 e 02 também anteriormente apresentadas como exemplos:

- Exemplo 02: Lenha úmida de eucalipto consistindo de toras com casca = **2,05 Gcal/t tal qual**
- Exemplo 03: Lenha relativamente seca de eucalipto consistindo de toras curtas com casca = **3,23 Gcal/t tal qual**
- Caminhão 1: Costaneiras e refilos de eucalipto provenientes de serraria = **2,4 Gcal/t tal qual**
- Caminhão 2: Cavacos de serraria obtidos pela fragmentação de resíduos das operações de desdobro das toras de eucalipto = **1,9 Gcal/t tal qual**

$$\text{TEL} = (\text{Gcal/t biomassa comprada}) : (\text{Gcal/t lenha referencial})$$

	<b>Gcal/t tal qual</b>	<b>TEL Tonelada Equivalente de Lenha</b>
Lenha referencial – Exemplo 04	2,65	<b>1</b>
Lenha Exemplo 02	2,05	<b>0,77</b>
Lenha Exemplo 03	3,23	<b>1,22</b>
Costaneiras e refilos – Caminhão 1	2,4	<b>0,90</b>
Cavacos de serraria – Caminhão 2	1,9	<b>0,72</b>

Os resultados obtidos indicam que a pior biomassa a ser comprada seria a dos cavacos do caminhão 2, pois cada tonelada dessa biomassa na forma de cavacos na umidade em que chegam à empresa corresponde a apenas 0,72 toneladas da lenha referencial desejada, em termos de peso.

Por outro lado, a lenha do exemplo 03 é altamente desejável, pois ela possui mais energia armazenada por tonelada tal qual do que a lenha referencial. Devido a isso, essa biomassa corresponderia a 1,22 toneladas da lenha referencial – ou seja, ela vale energeticamente mais do que a lenha referencial na comparação tonelada por tonelada de cada uma.

Em um processo de comercialização dessas biomassas em base a peso, as que são energeticamente mais ricas seriam mais bem remuneradas e as de menor conteúdo em energia útil por tonelada tal qual teriam um preço menor, sendo tudo comparado à especificação de uma lenha referencial. Até mesmo os pagamentos levariam em conta essas relações para serem ajustados ou corrigidos.

## **MEL – Metros Cúbicos Equivalentes de Lenha**

MEL seria uma espécie de fator de comparação de energias contidas em volumes de biomassas florestais e que seria calculado pela relação direta das energias primárias úteis contidas por metro cúbico de uma determinada biomassa e de outra, que seria uma lenha considerada como referencial ou especificação.

Trata-se de algo similar ao TEL, somente que apropriado para biomassas que sejam adquiridas em base volume e não em base peso.

*Na realidade, a MEL consiste de uma comparação de qualquer biomassa com outra biomassa referência em termos de suas densidades energéticas.*

Como exemplo, **a lenha referencial tem um valor básico para efeitos de comparações de 1,325 Gcal/st lenha** ou por m<sup>3</sup> de toras empilhadas (volume ocupado pela biomassa), conforme mostrado na página 28.

Vamos comparar com essa lenha referencial as biomassas dos exemplos 02 e 03, bem como com as biomassas dos caminhões 01 e 02 também anteriormente apresentados:

- Exemplo 02: Lenha úmida de eucalipto consistindo de toras com casca = **1,19 Gcal/st** (m<sup>3</sup> de toras empilhadas)
- Exemplo 03: Lenha relativamente seca de eucalipto consistindo de toras curtas com casca = **1,567 Gcal/st** (m<sup>3</sup> de toras empilhadas)
- Caminhão 1: Costaneiras e refilos de eucalipto provenientes de serraria = **0,76 Gcal/m<sup>3</sup>**

- Caminhão 2: Cavacos de serraria obtidos pela fragmentação de resíduos das operações de desdobro das toras de eucalipto = **0,7 Gcal/m<sup>3</sup>**

**MEL = (Gcal/st ou m<sup>3</sup> biomassa comprada) : (Gcal/st lenha referência ou especificada)**

Comparativamente,

	<b>Gcal/m<sup>3</sup></b>	<b>MEL – Metros Cúbicos Equivalentes de Lenha</b>
Lenha referencial – Exemplo 04	1,325	<b>1</b>
Lenha Exemplo 02	1,19	<b>0,90</b>
Lenha Exemplo 03	1,567	<b>1,18</b>
Costaneiras e refilos – Caminhão 1	0,76	<b>0,57</b>
Cavacos de serraria – Caminhão 2	0,7	<b>0,53</b>

Os resultados obtidos indicam que a pior biomassa a ser comprada em termos volumétricos seria a dos cavacos do caminhão 2, pois cada metro cúbico desses cavacos corresponderia energeticamente a apenas 0,53 st da lenha referencial ou especificada. Ou seja, em termos de ocupação de volume nos caminhões ou em pilhas de estocagem esses cavacos são bem menos efetivos para trazer a mesma quantidade de energia que a lenha referência.

Por outro lado, a lenha do exemplo 03 continua sendo uma biomassa altamente desejável, pois ela possui mais energia armazenada por metro cúbico de volume ocupado do que a lenha referencial. Por isso, ela consegue valer mais, ou seja, vale 1,18 st do valor referencial de energia especificada por unidade de volume.



Biomassas – cada qual com suas virtudes e seus defeitos





## ENERGIA LIBERADA PELA COMBUSTÃO DA BIOMASSA



Uma das formas mais antigas de se obter a liberação da energia contida em um combustível é pela sua queima ou combustão. A combustão consiste na oxidação rápida e enérgica da matéria de um combustível, com liberação para aproveitamento da quase totalidade de sua energia.

Entretanto, nem toda a energia do combustível se converte em energia disponível para utilização de quem o está queimando. Isso porque existem perdas associadas aos equipamentos de combustão (fogões, fornalhas, fornos, caldeiras, aquecedores de água, etc.) que podem ser devidas às perdas de calor por radiação, combustão incompleta ou energia perdida com os gases de exaustão. As perdas de rendimento costumam variar entre 10 a 60%, conforme o tipo e a idade tecnológica do sistema de combustão.

Apesar das altas perdas de energia em alguns tipos de processos de queima, em especial da biomassa, mesmo assim a combustão é bastante utilizada para esse tipo de biocombustível. Isso se deve ao fato de que a biomassa florestal, como a lenha entre outros tipos, costuma ter baixos preços, é facilmente processável, tem queima rápida e efetiva e pode ser encontrada praticamente em qualquer lugar e o ano todo. Definitivamente, existem vantagens para o uso da biomassa florestal, principalmente pelas facilidades que oferece aos usuários. Com equipamentos simples e de efetivo conhecimento tecnológico, acabam sendo obtidos bons resultados econômicos e adequada sustentabilidade das operações. A biomassa florestal gera poucos resíduos (cinzas e

materiais de varrição de biomassa suja), que podem ser usados na agricultura e silvicultura como fertilizantes e corretivos de solo.

Em qualquer processo de combustão existem três elementos imprescindíveis para que a queima aconteça com sucesso. São eles:

- **Disponibilidade de um combustível propício para ser queimado.** No caso da biomassa energética, ela deve estar seca, pois se contiver muita umidade pode até mesmo “não pegar fogo”, precisando de um combustível auxiliar para iniciar o processo e mesmo para manter a chama acesa. Algumas vezes, a biomassa está tão úmida, que a energia útil nela contida é insuficiente para secar a mesma durante a combustão. É o caso de alguns lodos orgânicos muito úmidos de estações de tratamento de efluentes. Mesmo assim, pode haver interesse nessa queima, mesmo com geração negativa de energia líquida, apenas para se dar algum tipo de destinação ambiental a um resíduo. Tratam-se então de processos mais de destinação segura de um resíduo sólido do que de processos de queima de combustível para se gerar energia.
  
- **Calor para ignição:** qualquer material combustível só inicia o processo de combustão com a ajuda de um iniciador do fogo, embora algumas vezes as condições ambientais possam ser propícias para uma autoignição. Nas residências, onde ocorre o uso doméstico da biomassa florestal, a ignição costuma ser feita com fósforos ou isqueiros. Na natureza, são os raios os principais agentes de ignição. Nas indústrias, existem sistemas auxiliares para ignição em praticamente todos os tipos de equipamentos de combustão, na maioria das vezes com uso de algum outro combustível que se inflama mais facilmente, como é o caso do óleo diesel ou gás natural.
  
- **Presença suficiente de ar de combustão,** ou seja, de oxigênio do ar. Como a combustão é um processo de oxidação química da matéria orgânica da biomassa, a presença de oxigênio em quantidades adequadas é fundamental para que ela aconteça dentro de rendimentos adequados. Em geral, costuma-se trabalhar com excesso de ar (quantidade de oxigênio acima das quantidades estequiométricas) para se obter a máxima combustão

do material sendo queimado. Caso falte oxigênio no sistema, a queima pode ficar incompleta ou a chama ser interrompida pelo apagamento. Entretanto, se o excesso de ar for exagerado, também ocorrem perdas de energia com os gases de exaustão e a chama pode ficar instável.

O fogo é o resultado da combustão. Fogo nada mais é do que o conjunto de reações químicas e das alterações físicas que estão mudando o combustível, conseguindo assim a liberação de sua energia, com ou sem emissão de luz. No caso da queima de biomassa consegue serem liberadas as energias térmica e luminosa (luz) com a queima.

Qualquer tipo de fogo só ocorre e se sustenta com a manutenção dos três elementos vitais acima mencionados, que são na prática referidos como "triângulo do fogo". Caso falte um deles, o fogo ou não acontece por falta de ignição, ou se extingue por falta de combustível ou de oxigênio comburente.

Enquanto a biomassa florestal estiver sendo queimada, ela estará se transformando em calor, luz e produtos químicos nas formas de calor, gases e resíduos sólidos.

O calor liberado precisa de algum suporte para ser transferido ou aproveitado. A combustão para ser um meio eficiente de prover energia ao ser humano precisa de meios intermediários para veiculação dessa energia liberada na queima do combustível. Algumas vezes esse suporte é o próprio gás de combustão bem quente, que pode ser usado em processos de secagem de folhas ou grãos na agricultura. Entretanto, na maioria das vezes essa energia é transferida para a água, ou para aquecer a mesma (água quente em processos de calefação) ou para se produzir vapor. Essa energia térmica presente no vapor pode ser movimentada, manuseada, transferida e convertida em outros tipos de energia, como mecânica e elétrica.

Qualquer processo de combustão leva invariavelmente à formação de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e água, como também de outros compostos menos abundantes, tais como monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e óxidos diversos (óxidos de enxofre e de nitrogênio).

A reação de combustão oxida a biomassa para liberar calor de seus constituintes. É uma reação similar à reação de respiração, processo metabólico que os seres vivos criaram e usam para obter a energia que necessitam dos alimentos ou de compostos por eles produzidos.

O hidrogênio presente na biomassa é bastante energético e consome grandes quantidades de oxigênio para retornar à forma de

água durante a combustão. Entretanto, a água que está presente nos gases de exaustão não se deriva apenas da combustão da matéria orgânica da biomassa, mas também e principalmente, da umidade dessa biomassa, que se evapora. A água da umidade da biomassa não libera calor algum, pelo contrário, ela consome calor para se aquecer, vaporizar e para ter esse vapor ainda mais aquecido devido às altas temperaturas da combustão.

Quando faltar oxigênio no processo, a combustão ou fica incompleta ou se interrompe. Por combustão incompleta entenda-se a transformação parcial do carbono orgânico em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), formando grandes quantidades de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) exatamente pela falta de oxigênio para que a oxidação seja completada. Paralelamente, durante a combustão incompleta, muitas partículas de biomassa não se queimam completamente e são expelidas como carvãozinhos ou fuligem, causando uma espécie de "fumaça preta" nos gases de exaustão da combustão.

Durante a combustão, o papel do oxigênio é fundamental, pois ele atua como comburente ou sustentador da queima. O oxigênio pode ser oferecido como ar de combustão ou pela injeção de oxigênio em processos de combustão enriquecida por introdução de oxigênio em concentrações maiores do que as existentes no ar (21% de oxigênio no ar, base molar ou base volume).

Infelizmente, o oxigênio não é o único gás presente no ar, tampouco sendo o mais abundante. O nitrogênio costuma ser um grande vilão dos processos de combustão, pois ele ocorre em proporção molar de 79% no ar, acaba sendo aquecido sem necessidade e ao ser lançado de volta à atmosfera com os gases de exaustão carrega significativa quantidade de calor em suas moléculas. Com isso, pode-se dizer que o nitrogênio rouba importante fração do calor liberado pelo combustível. Em função disso, quando se desejarem níveis maiores de eficiência em alguns processos de combustão, costuma-se ou se usar somente oxigênio ou então ar enriquecido com adição de algum percentual de oxigênio molecular.

A combustão da biomassa pode ser considerada como uma reação de oxidação muito enérgica, como já relatada, que libera calor e luz do combustível e retorna à atmosfera os gases formados, entre os quais o dióxido de carbono e o vapor de água resultante da queima. Também já vimos que a energia liberada pode ser então aproveitada, transferindo-se a mesma para a água/vapor ou usando diretamente os gases aquecidos ou o ar quente. Em alguns conceitos de aproveitamento

de calor, costuma-se usar a energia radiante liberada da camada de combustão dos equipamentos de combustão (fornos, fornalhas, etc.).

A combustão então nada mais é do que um processo de reações exotérmicas que busca oferecer para utilização o “poder calorífico do combustível”, conforme já discutido em nosso capítulo 43 do Eucalyptus Online Book.

Para se saber se a combustão está acontecendo de acordo como desejado, costuma-se monitorar os teores de monóxido de carbono e de oxigênio residual nos gases de exaustão. Ambos são indicadores de ocorrências de combustão incompleta.

Algumas vezes, existe quantidade adequada de oxigênio residual nos gases de exaustão, mas concomitantemente, também é alto o teor de monóxido de carbono. Isso costuma acontecer quando estão ocorrendo condições de inadequadas introduções de ar dentro do queimador, com desbalanceamentos dos fluxos internos. Em geral, isso se deve à parada de algum ventilador ou aerador, ou entupimentos internos com cinzas.



Fogo – ainda hoje um dos grandes orquestradores do crescimento da humanidade

O processo de combustão da biomassa florestal pode ser dividido em diversas fases conforme argumentam os estudiosos no assunto. Entretanto, na prática, o que acontece é que as diversas fases da combustão acontecem simultaneamente dentro do queimador. Enquanto existem partículas ainda sofrendo ignição e começando a se queimar,

outras estão finalizando a queima e quase convertidas em cinzas residuais.

As seis fases reconhecidas que acontecem durante a queima da madeira e de outros tipos de biomassa são as seguintes, conforme sugeridas por inúmeros autores:

**Fase 01:** Secagem da biomassa pela evaporação da água contida na mesma e que corresponde ao seu teor de umidade. Quanto maior for o teor de umidade, mais energia se consumirá nessa secagem com aumento também do tempo de duração dessa fase. Trata-se de uma fase que reduz a eficiência e o rendimento do processo. Em termos de estudos teóricos significa que ao invés de se obter o poder calorífico inferior da biomassa, acaba se obtendo o poder calorífico útil, que é de menor grandeza. Essa fase acontece até cerca de 200°C.

**Fase 02:** Pirólise térmica rápida da biomassa, com liberação de compostos voláteis da mesma. Essa fase passa a ocorrer a partir de 280°C e se mantém até 400°C. As hemiceluloses e a celulose são os componentes químicos da madeira que mais facilmente volatilizam compostos. Já a lignina volatiliza menos e mantém um residual maior de carbono fixo para ser queimado nas fases finais da combustão.

**Fase 03:** Ignição e inflamabilidade dos gases voláteis, que acontece em temperaturas acima de 400°C. Os gases voláteis são também muito combustíveis e se queimam com facilidade, correspondendo a mais de 50% da liberação de energia da combustão. Caso a combustão fique incompleta por falta de oxigênio para queimar os compostos voláteis, alguns deles saem pelas chaminés como poluentes aéreos indesejáveis.

**Fase 04:** Queima completa dos voláteis, com início da perda de peso do material carbonizado que ainda está presente no fundo da fornalha ou caldeira.

**Fase 05:** Combustão dos resíduos contendo altos teores de carbono fixo (espécie de carvão vegetal que sobrou da biomassa), que acontece a partir de 600°C, mas que é mais efetiva a partir de 800°C.

**Fase 06:** Término do processo e extinção da queima, por não mais existir material combustível para ser queimado, sobrando apenas as cinzas residuais quentes para serem descartadas.



As fases só podem ser perfeitamente acompanhadas se acontecer uma só injeção de combustível no processo. Como existe adição contínua de biomassa nos queimadores industriais, todas as fases acabam acontecendo sobrepostas, pois sempre existirá alguma biomassa precisando ser secada (fase inicial) e outra virando cinzas (fase terminal).

O objetivo de qualquer processo de combustão é manter a sustentação do fogo, ou seja, impedir que ele se apague, o que pode até acontecer com certa frequência na maioria das empresas que se valem da biomassa energética. Isso porque pode acontecer ou algum problema de operação (desligamento da injeção de ar por problema elétrico) ou por parada imprevista da correia de alimentação da biomassa para dentro do equipamento queimador.

O curioso nesse processo onde diversas fases da queima acontecem de maneiras sobrepostas é que a energia vai sendo liberada do combustível em áreas localizadas do queimador, em geral em caldeiras ou em fornalhas.

A queima dos materiais voláteis ocorre mais nas partes altas do equipamento e a queima do carbono fixo acontece mais no fundo da fornalha.

Com isso, a injeção de ar de combustão precisa ser perfeitamente desenhada e ter fluxos bem balanceados para que a queima em cada região aconteça em situação de ótimo.

Apesar do alto teor de oxigênio na constituição elementar da biomassa florestal (cerca de 42 a 46% de seu peso seco) esse oxigênio de constituição é insuficiente para manter a combustão, havendo necessidade de se suprir muito mais oxigênio do que o estequiométrico para que ocorra a queima de cada elemento da biomassa que precisa ser queimado. Isso será apresentado na forma de um problema de estequiometria da combustão logo mais adiante nessa seção.

Durante qualquer processo de combustão, enquanto estão ocorrendo reações de oxidação dos constituintes da biomassa, estão concomitantemente ocorrendo reações de redução do oxigênio, que perderá elétrons para poder se ligar ao carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, etc.

Somente a combustão completa de hidrocarbonetos (compostos constituídos de moléculas de carbono e hidrogênio) terá a formação de apenas gás carbônico e água. Como a biomassa florestal possui outros elementos passíveis de oxidação em sua constituição, são comuns as presenças de diversos óxidos nos gases de exaustão, além das tradicionais moléculas de água e gás carbônico.

Apenas para recordar o que já vimos no capítulo 43, esse gás carbônico produzido na queima da biomassa florestal é de origem renovável e não fóssil. Ao ser produzido, ele poderá ter nova oportunidade de ser convertido em biomassa florestal e retornar ao ciclo. Não é o caso do gás carbônico resultante da queima de combustíveis fósseis (óleo combustível, gasolina, diesel, gás natural), que acabará se acumulando na atmosfera, aumentando a concentração dos GEE – Gases de Efeito Estufa.

A queima da biomassa florestal é uma forma de se obter calor para uso humano há milênios. Conforme a inteligência humana passou a esclarecer as reações, as fases e as condições de otimização desse processo, toda uma ciência da combustão se originou e novas e eficientes tecnologias foram criadas. Além das tecnologias para



combustão completa, muitas outras baseadas na decomposição térmica da madeira passaram a ser criadas, com novas oportunidades de tecnologias eficientes e ecoeficientes.

Atualmente, existem diversas dessas tecnologias em plena utilização comercial, permitindo a conversão da biomassa florestal em biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos:

- ⇒ Carbonização, para produção de carvão vegetal, alcatrão e ácido pirolenhoso;
- ⇒ Pirólise rápida para produção de bioóleo;
- ⇒ Gaseificação para produção de gás combustível ou gás de síntese;
- ⇒ Torrefação para produção de gases combustíveis e madeira torrificada.

Os conhecimentos técnicos e teóricos desses processos e a disponibilidade de um biocombustível barato e local (biomassa florestal) têm permitido a associação de diversas dessas tecnologias, como o caso de processos conjugados de queima direta de biomassa para cogeração de eletricidade e vapor, associados com gaseificação da biomassa para geração de gás para uso em turbinas a gás. Esse tipo de associação eleva os rendimentos de geração térmica e elétrica, no que se costuma chamar de ciclo combinado de geração de termoeletricidade, como será discutido mais adiante.

São também frequentes as associações para combustão de biomassa conjugada a outros combustíveis líquidos ou gasosos, em processos denominados de co-combustão ou "co-firing". Os combustíveis mais usuais associados à queima conjunta com a biomassa florestal são: óleo combustível e gás natural. A combustão conjunta permite eliminar os problemas de flutuações de qualidade (umidade, composição e dimensões de partículas) da biomassa florestal e balancear melhor o desempenho dos processos industriais.

Um ponto importante a ser conhecido nesses processos de queima é o fato que a biomassa florestal se queimar de forma bem diferente do que o óleo combustível, gasolina ou diesel. Esses

combustíveis líquidos, quando queimados, geram chamas superficiais, onde existe o contato do líquido com o ar. A madeira já possui combustão ocorrendo inclusive em seu interior, da mesma forma que outros tipos de biomassa florestal (cascas, galhos, raízes, etc.). Isso se deve à porosidade da biomassa florestal, que deixa espaços internos, onde possa entrar o ar contendo o oxigênio requerido para a queima.

As diferenças de temperaturas e de concentrações de oxigênio acabam favorecendo o fluxo de gases para dentro e para fora do interior das partículas sólidas da biomassa florestal. Obviamente, esses fluxos são lentos, o que permite a queima, mas de forma mais demorada. Portanto, é desaconselhável se tentar queimar industrialmente fragmentos grandes de madeira como toras ou toretas. Nesses casos, mesmo ocorrendo queima interna, o processo é lento, pois a área de contato entre o ar e o combustível biomássico é tão pequena, que se torna impossível obter uma combustão completa em curtos períodos de tempo. Com a queima de toras ou toretas, os rendimentos caem, pois as perdas associadas a esses processos mais ineficientes e demorados são bem maiores.

A combustão é afetada por diversos fatores críticos que podem afetar o aproveitamento da energia contida nos combustíveis de biomassa florestal. Os principais são os seguintes:

- ☆ Qualidade da biomassa florestal (tema amplamente discutido em nosso capítulo número 43);
- ☆ Ar de combustão deve ser adequado, seja para não faltar (combustão incompleta) ou para não sobrar muito oxigênio (perdas de calor pelos gases);
- ☆ Qualidade da mistura da biomassa com o ar de combustão;
- ☆ Fluxos de ar adequados;
- ☆ Temperaturas corretas dentro do queimador, em suas diferentes zonas de queima;

- ☆ Trocadores de calor em condições suficientes para capturar a energia liberada com a queima do combustível para utilizá-la em outros processos.

## Estequiometria da combustão

Conforme ocorre a combustão, os átomos presentes na biomassa florestal como os de C, H, S, N vão sendo separados dos constituintes químicos moleculares da madeira (lignina, hemiceluloses, celulose, extrativos) pela rápida oxidação desses componentes. A cada oxidação, ocorrem alterações desses elementos e rearranjos em seus elétrons e átomos, formando os produtos da combustão (CO<sub>2</sub>; CO; H<sub>2</sub>O; SO<sub>2</sub>; SO<sub>3</sub>; NO; NO<sub>2</sub>; etc.). Todas essas oxidações liberam energia na medida que os produtos intermediários e depois finais da combustão vão sendo formados.

Os principais liberadores de energia são o hidrogênio e o carbono, sendo que enxofre e nitrogênio não são tão eficientes como geradores de energia de combustão (entalpias liberadas na queima).

As quantidades de calor liberadas em cada uma dessas oxidações se denominam de entalpias de combustão e costumam variar entre 10 a 150 GJ/t (2.400 a 35.800 Mcal/t) para cada um dos elementos presentes na biomassa. Os maiores valores correspondem ao energético hidrogênio e os menores ao enxofre.

A título de obtenção de conhecimentos teóricos sobre esse tema, sugiro a leitura de dois interessantes materiais disponíveis na web:

**Estequiometria das reações de combustão.** W.A. Bizzo; C.G. Sánches. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 27 pp. (SD = Sem referência de data)

[https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/01\\_estequiometria\\_Da\\_Combustao.pdf](https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/01_estequiometria_Da_Combustao.pdf)

e

**Combustão.** Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Portugal. Apresentação em PowerPoint: 41 slides. (SD = Sem referência de data)

<https://fenix.isa.ulisboa.pt/qubEdu/conteudos-publicos/ficheiros?oid=3972844773453>

Quando a combustão for incompleta, formam-se outros compostos intermediários pela oxidação parcial do carbono, nitrogênio e enxofre, sendo o mais importante deles é o monóxido de carbono. Esse composto, por não ter sofrido oxidação completa, libera menor quantidade de entalpia de combustão que o dióxido de carbono, mas mesmo assim sua contribuição como gerador de energia é relativamente expressiva, sendo bem melhor do que a do enxofre.

Os processos estequiométricos envolvendo a combustão da biomassa florestal costumam levar em conta para os cálculos, as composições elementares dessa biomassa quanto aos seus conteúdos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. O teor de oxigênio também é muito importante, pois esse oxigênio presente na biomassa também é aproveitado nas reações de oxidação.

A combustão é sempre realizada em condições de excesso de ar com o objetivo de máximo aproveitamento da energia contida no combustível. Entretanto, é muito difícil se conseguirem rendimentos próximos a 100% de aproveitamento. Os melhores resultados se situam na faixa de 90 a 95% em termos industriais, porém são comuns valores até mesmo abaixo de 50%. Isso se deve ao fato de que perdas de energia acontecem com facilidade. Essa é uma das razões pela qual as empresas que se valem de processos de combustão estão sempre sendo incentivadas a trabalharem pela melhoria da eficiência energética de seus equipamentos e operações.

Estequiometricamente, as relações entre ar, oxigênio e elementos da composição do combustível são feitas em base de moléculas e equivalentes químicos. Porém, a estequiometria permite converter com facilidade as relações entre moléculas para relações entre massas ou pesos (mais interessantes para quem trabalha com combustão industrial). Em exemplo numérico oferecido logo a seguir, estão apresentadas algumas formas de se fazer isso.

O ar a ser suprido costuma ser aquecido com energia reaproveitada e também deve ser limpo de poluentes. É fundamental se acompanhar com medições os residuais de oxigênio e de monóxido de carbono ao final da combustão.

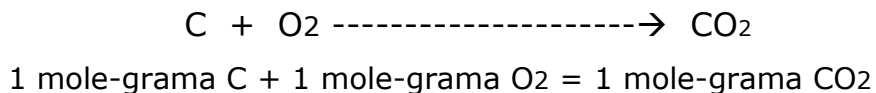
Os teores do oxigênio residual presente nos gases de exaustão se situam em geral entre 1,2 a 4% base molar em relação aos gases secos e a CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão. Esse teor residual de oxigênio depende muito do tipo e qualidade do combustível, do tempo e temperatura de combustão. A tecnologia sendo empregada na queima também é fator crítico para os resultados.

Importante ficar muito claro que excesso de ar e teor de oxigênio residual nos gases de exaustão são coisas bem diferentes, embora possam estar relacionadas.

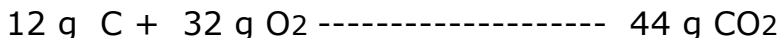
O teor de oxigênio residual consiste em uma medida percentual do que sobrou de oxigênio na combustão em relação aos demais gases que compõem o fluxo de gases secos na chaminé. Quando ele é muito baixo, teremos claras indicações de que a combustão foi incompleta e se perdeu energia que estava presente no combustível, e que não foi em parte aproveitada.

Para se garantir que sobre oxigênio e apareçam valores desejados de teor de oxigênio nos gases de exaustão se criou o conceito de Excesso de Ar. Esse excesso de ar é expresso em termos de uma percentagem a mais do que o ar teórico mostrado pelas reações estequiométricas. Por exemplo, um excesso de 25% de ar em uma combustão significa que se deve aplicar  $\frac{1}{4}$  a mais de peso de oxigênio em relação ao valor determinado estequiometricamente.

Exemplo:



Portanto, convertendo para uma base de peso ou massa:



Estequiometricamente para cada grama de carbono se deve aplicar 2,67 gramas de oxigênio para se formarem 3,67 gramas de gás carbônico.

Com excesso de ar de 25%, aplicam-se então 25% a mais de oxigênio, ou seja, 3,33 gramas de oxigênio por grama de carbono.

Como o ar contém nitrogênio na proporção de (79 moles-grama N<sub>2</sub> / 21 moles-grama O<sub>2</sub>), ou 3,7619 moles-grama N<sub>2</sub>/moles-grama O<sub>2</sub>, estaremos convertendo isso para relações de peso, o que se transforma em: 3,2917 g N<sub>2</sub>/g O<sub>2</sub>. A forma de se obter esse dado será elucidada mais adiante.

Com isso, estaremos colocando como ar de combustão com 25% de excesso de ar a seguinte relação:

- Para cada grama de carbono uma quantidade de 3,33 gramas de oxigênio e mais 10,96 gramas de nitrogênio.

Parte desse oxigênio oxidará o carbono e outra parte sobrá como residual nos gases de exaustão. Por outro lado, o nitrogênio só irá se aquecer e sairá integralmente nos gases de combustão pelas chaminés do queimador.

Por essa razão, quanto maior for o excesso de ar, melhor se queima o carbono, mas existirá um ponto em que as perdas de calor pelo nitrogênio superarão os ganhos com a melhor combustão devido ao *excessivo* excesso de ar.

O “excesso do excesso de ar” acabará afetando a qualidade da chama, poderá diminuir a temperatura da chama e as temperaturas em regiões internas do queimador, além de aumentar as perdas de calor. Por outro lado, deve-se evitar que a quantidade de ar seja igual ou inferior ao ar estequiométrico. Se isso acontecer, uma parte do combustível acabará não se queimando.

Deve-se sempre buscar, para cada fornalha, queimador ou caldeira a proporção ideal de ar em excesso, que é característica também para a biomassa sendo alimentada. Portanto, não há como se fixar um valor de excesso de ar em uma caldeira e variar os demais parâmetros operacionais. Em geral, são praticados valores entre 5,5 a 7,5 toneladas de ar por tonelada de biomassa seca, mas isso depende de muitas variáveis que estão em jogo, inclusive algumas de naturezas ambientais e econômicas.

Apenas recordando, as principais perdas de energia em um equipamento de combustão são as seguintes:

- Perdas devido à combustão incompleta do combustível;
- Perdas de calor arrastado pelos gases de exaustão;
- Perdas de partículas de combustível pelos gases nas chaminés, antes delas terem sido queimadas por completo;
- Perdas por radiação nas superfícies dos equipamentos;
- Perdas pela umidade da biomassa;
- Perdas com o calor que acompanha os resíduos sólidos;
- Outras perdas.

## Exemplo numérico 05 de estequiometria da combustão

Uma caldeira de recuperação de uma fábrica de celulose solúvel que opera pelo processo pré-hidrólise kraft queima diariamente 2.000 toneladas de licor preto a 65% de sólidos secos e que contém em base dos seus sólidos secos (orgânicos+inorgânicos) os seguintes elementos constituintes:

- 4% enxofre
- 32% carbono orgânico
- 25% oxigênio
- 6% hidrogênio
- 0,5% nitrogênio orgânico
- 32,5% cinzas minerais

Admitindo-se um excesso de ar de 25% (base mássica):

- Calcular a quantidade diária dos gases de combustão formados e saindo pela chaminé dessa caldeira em termos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  (somente para os gases referidos sem água, inclusive sem a água formada pelo hidrogênio).
- Calcular a proporção percentual molar de oxigênio nesses gases secos residuais da combustão (Oxigênio residual base gases secos, sem nenhum tipo de água).

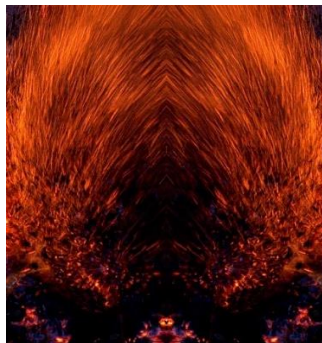
Admitir que não se formaram  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{SO}_3$ .

Considerar também que do total de enxofre presente na composição do licor preto sendo queimado, apenas 3% do peso seco se perde como  $\text{SO}_2$  para a atmosfera através dos gases de exaustão da caldeira e o restante é convertido em sulfeto de sódio, que é reciclado no processo kraft.

São dados: N: 14; O: 16; S: 32.

Composição do ar de combustão: 21% Oxigênio + 79% Nitrogênio em base volumétrica molar, o que corresponde a 3,2917 kg  $\text{N}_2$ /kg  $\text{O}_2$  em base de massa seca (Provar como se chega a essa relação).

Solução:



Base referencial: Um dia de operações

PROVANDO: Cálculo da proporção entre nitrogênio e oxigênio no ar de combustão em base de peso ao invés de volume ou moles-grama

Relação base volume: 79% N<sub>2</sub>/21% O<sub>2</sub>  
Fator de relação = 79/21 = 3,7619 Nm<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>

Relação base molar: 79 moles-grama N<sub>2</sub> / 21 moles-grama O<sub>2</sub>  
Relação base molar: 79 . 22,4 litros N<sub>2</sub> / 21 . 22,4 litros O<sub>2</sub>  
Fator de relação: 3,7619 litros N<sub>2</sub>/litro O<sub>2</sub>

Relação base peso: 79 moles-grama N<sub>2</sub> / 21 moles-grama O<sub>2</sub>  
Relação base peso: 79 . 28 g N<sub>2</sub> / 21 . 32 g O<sub>2</sub>  
Fator de relação: **3,2916 g N<sub>2</sub>/g O<sub>2</sub>**

Cálculo do peso seco diário de licor queimado como combustível:

Peso sólidos secos = (Peso úmido) . (% Sólidos Secos/100) =  
Peso sólidos secos = (2.000 t úmidas) . 0,65 = 1.300 t SS/dia

Pesos secos diários dos constituintes do licor preto a queimar e oxidar:

➤ 4% enxofre

Peso seco diário de enxofre = 1.300 . 0,04 = 52 t S/dia  
Perda de enxofre oxidado pela combustão através dos gases de exaustão: 3% de 52 t S/dia =

0,03 . 52 t = **1,56 t S /dia**

➤ 32% carbono orgânico

Peso seco diário de carbono = 1.300 . 0,32 = **416 t C /dia**



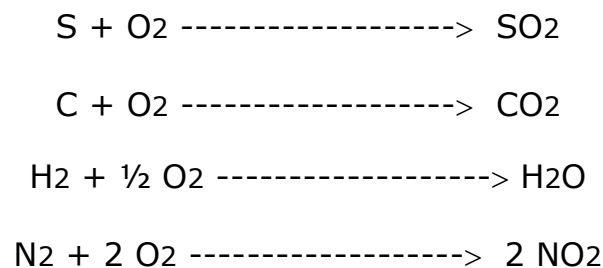
- 0,5% nitrogênio orgânico

Peso seco diário nitrogênio =  $1.300 \cdot 0,005 = \mathbf{6,5 \text{ t N base.orgânico/dia}}$

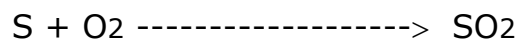
- 6% hidrogênio

Peso seco diário de carbono =  $1.300 \cdot 0,06 = \mathbf{78 \text{ t H /dia}}$

Reações de combustão simplificadas:



Cálculos para a combustão e geração de compostos oxidados de enxofre:



$32 \text{ gramas S} + 32 \text{ gramas O}_2 = 64 \text{ gramas SO}_2$

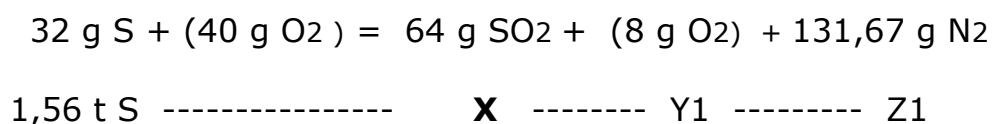
Com 25% de excesso de ar, teremos:

$$32 \text{ g S} + (1,25 \cdot 32 \text{ g O}_2) = 64 \text{ g SO}_2 + (0,25 \cdot 32 \text{ g O}_2)$$

E ainda o equivalente a nitrogênio do ar de combustão, que pode ser calculado como:

$$\begin{aligned} \text{Nitrogênio do ar de combustão introduzido} &= \\ (1,25 \cdot 32 \text{ g O}_2) \cdot (3,2917 \text{ g N}_2/\text{g O}_2) &= 131,67 \text{ gramas de N}_2 \end{aligned}$$

Voltando à reação de combustão do S para 25% de excesso de ar

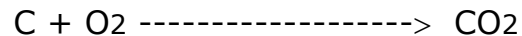


**X = 3,12 t SO<sub>2</sub> nos gases devido ao S/dia**

**Y1 = 0,39 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao S/dia**

**Z1 = 6,42 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao S/dia**

Cálculos para a combustão e geração de compostos oxidados de carbono orgânico:



$$12 \text{ gramas C} + 32 \text{ gramas O}_2 = 44 \text{ gramas CO}_2$$

Com 25% de excesso de ar, teremos:

$$12 \text{ g C} + (1,25 \cdot 32 \text{ g O}_2) = 44 \text{ g CO}_2 + (0,25 \cdot 32 \text{ g O}_2)$$

E ainda o equivalente a nitrogênio do ar de combustão, que pode ser calculado como:

$$\text{Nitrogênio do ar de combustão introduzido} = (1,25 \cdot 32 \text{ g O}_2) \cdot (3,2917 \text{ g N}_2 / \text{g O}_2) = 131,67 \text{ gramas de N}_2$$

Voltando à reação de combustão do C para 25% de excesso de ar

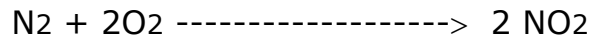
$$12 \text{ g C} + (40 \text{ g O}_2) = 44 \text{ g CO}_2 + (8 \text{ g O}_2) + 131,67 \text{ g N}_2$$
$$416 \text{ t C} \text{ ----- } \mathbf{W} \text{ ----- } Y_2 \text{ ----- } Z_2$$

**W = 1.525,3 t CO<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia**

**Y2 = 277,3 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia**

**Z2 = 4.564,56 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia**

Cálculos para a combustão e geração de compostos oxidados de nitrogênio:



$$28 \text{ gramas N}_2 + 64 \text{ gramas O}_2 = 92 \text{ gramas NO}_2$$

Com 25% de excesso de ar, teremos:

$$28 \text{ g N}_2 + (1,25 \cdot 64 \text{ g O}_2) = 92 \text{ g NO}_2 + (0,25 \cdot 64 \text{ g O}_2)$$

E ainda o equivalente a nitrogênio do ar de combustão, que pode ser calculado como:

$$\text{Nitrogênio do ar de combustão introduzido} = (1,25 \cdot 64 \text{ g O}_2) \cdot (3,2917 \text{ g N}_2 / \text{g O}_2) = 263,33 \text{ gramas de N}_2$$

Voltando à reação de combustão do Norgânico para 25% de excesso de ar:

$$28 \text{ g N}_2 + (80 \text{ g O}_2) = 92 \text{ g NO}_2 + (16 \text{ g O}_2) + 263,33 \text{ g N}_2$$

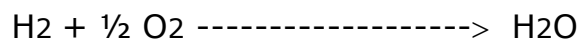
$$6,5 \text{ t Norgânico} \text{ ----- } \mathbf{Q} \text{ ----- } \mathbf{Y3} \text{ ----- } \mathbf{Z3}$$

**Q = 21,36 t NO<sub>2</sub> nos gases devido ao Norgânico/dia**

**Y3 = 3,71 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao Norgânico/dia**

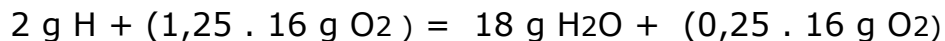
**Z3 = 61,13 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao Norgânico/dia**

Cálculos para a combustão e geração de compostos oxidados de hidrogênio:



$$2 \text{ gramas H} + 16 \text{ gramas O}_2 = 18 \text{ gramas H}_2\text{O}$$

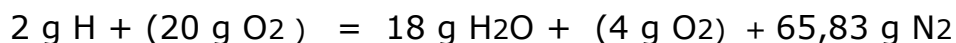
Com 25% de excesso de ar, teremos:



E ainda o equivalente a nitrogênio do ar de combustão, que pode ser calculado como:

$$\text{Nitrogênio do ar de combustão introduzido} = (1,25 \cdot 16 \text{ g O}_2) \cdot (3,2917 \text{ g N}_2/\text{g O}_2) = 65,83 \text{ gramas de N}_2$$

Voltando à reação de combustão do H para 25% de excesso de ar



**R = 702 t H<sub>2</sub>O residual nos gases devido ao H/dia**

**Y4 = 156 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao H/dia**

**Z4 = 2.567,37 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao H/dia**

Cálculo dos pesos totais e teóricos de gases secos presentes nos gases de exaustão da caldeira:

Os gases de exaustão teórica e estequiometricamente emitidos por dia com 25% de excesso de ar seriam em quantidades equivalentes a:

**X = 3,12 t SO<sub>2</sub> nos gases devido ao S/dia**

**W = 1.525,3 t CO<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia**

**Q = 21,36 t NO<sub>2</sub> nos gases devido ao Norgânico/dia**

**R = 702 t H<sub>2</sub>O residual nos gases devido ao H/dia**

E mais:

**Y1 + Y2 + Y3 + Y4 =** (0,39 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao S/dia) + (277,3 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia) + (3,71 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao Norgânico/dia) + (156 t O<sub>2</sub> residual nos gases devido ao H/dia)

**Y1 + Y2 + Y3 + Y4 = 437,4 t O<sub>2</sub> residual estequiométrico e com 25% de ar em excesso nos gases /dia**

Bem como:

**Z1 + Z2 + Z3 + Z4 =** (6,42 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao S/dia) + (4.564,56 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao C orgânico/dia) + (61,13 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao Norgânico/dia) + (2.567,37 t N<sub>2</sub> residual nos gases devido ao H/dia)

**Z1 + Z2 + Z3 + Z4 = 7.199,48 t N<sub>2</sub> residual estequiométrico nos gases/dia**

Entretanto, as quantidades de oxigênio e de nitrogênio que seriam emitidas pelos gases de exaustão (calculadas estequiometricamente) precisam ser corrigidas pelo desconto da quantidade do oxigênio presente na constituição do licor preto que é igual a 25% do peso de sólidos secos.

Esse desconto de oxigênio deve então resultar em concomitante desconto da quantidade correspondente de nitrogênio em função de ter sido requerida menor quantidade de ar atmosférico.

Lembrar que as quantidades residuais de oxigênio presentes nos gases de exaustão correspondem a apenas uma pequena parte do total de oxigênio que foi consumido durante a combustão, pois a maior parte do oxigênio se incorporou aos produtos oxidados da combustão (gás carbônico, vapor de água, óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, etc.)

Cálculo da quantidade de oxigênio presente no combustível licor preto:

0,25 . 1.300 = 325 toneladas O<sub>2</sub>/dia

Correção da quantidade residual de oxigênio em função da quantidade de oxigênio presente nos sólidos do licor preto, que ajudará a reduzir a quantidade de ar necessário

Q efetiva de oxigênio = 437,4 t O<sub>2</sub> calculado por estequiometria - 325 t O<sub>2</sub> de constituição do licor=  
**112,4 toneladas efetivas de O<sub>2</sub>/dia nos gases de exaustão**

Correção da quantidade de nitrogênio em função da quantidade de oxigênio presente no licor preto

Q efetiva de nitrogênio = (7.199,48 t N<sub>2</sub> residual estequiométrico nos gases/dia) - [(325 t O<sub>2</sub> constituição) . (3,2917 g N<sub>2</sub>/ g O<sub>2</sub>)]

**6.129,68 toneladas/dia de nitrogênio nos gases de exaustão**

Cálculo dos pesos ou massas das toneladas-moles ou moléculas-toneladas emitidas de cada gás:

Pesos ou massas das toneladas-moles de cada gás:

CO<sub>2</sub> = 44 toneladas

SO<sub>2</sub> = 64 toneladas

NO<sub>2</sub> = 46 toneladas

O<sub>2</sub> = 32 toneladas

N<sub>2</sub> = 28 toneladas

Quantidades em números de toneladas-moles ou moléculas-toneladas perdidas por dia pelos gases de exaustão, a exceção da água, mesmo da água formada na combustão:

➤ 1.525,3 t CO<sub>2</sub> residual nos gases/dia equivalem a:

$(1.525,3 \text{ t CO}_2) : (44 \text{ toneladas/tonelada-mole CO}_2) =$

**34,666 toneladas-moles de CO<sub>2</sub>/dia**

➤ 21,36 t NO<sub>2</sub> residual nos gases/dia equivalem a:

$(21,36 \text{ t NO}_2) : (46 \text{ toneladas/tonelada-mole NO}_2) =$

**0,46 toneladas-moles de NO<sub>2</sub>/dia**

➤ 3,12 t SO<sub>2</sub> nos gases/dia

$(3,12 \text{ t SO}_2) : (64 \text{ toneladas/tonelada-mole SO}_2) =$

**0,0488 toneladas-moles de SO<sub>2</sub>/dia**

➤ 112,4 t O<sub>2</sub> residual nos gases/dia equivalem a:

$(112,4 \text{ t O}_2) : (32 \text{ toneladas/tonelada-mole O}_2) =$

**3,51 toneladas-moles de O<sub>2</sub>/dia**

➤ 6.129,68 t N<sub>2</sub> residual nos gases/dia equivalem a:

$(6.129,68 \text{ t N}_2) : (28 \text{ toneladas/tonelada-mole N}_2) =$

**218,92 toneladas-moles de N<sub>2</sub>/dia**

Quantidade em número total de toneladas-moles ou mole-toneladas por dia nos gases de exaustão expressos como isentos de água:

$Q = (34,666 \text{ toneladas-moles de CO}_2) + (0,46 \text{ toneladas-moles de NO}_2) + (0,0488 \text{ toneladas-moles de SO}_2) + (3,51 \text{ toneladas-moles de O}_2) + (218,92 \text{ toneladas-moles de N}_2)$

**Q = 257,60 toneladas-moles de gases referidos como isentos de água**

Cálculo do percentual residual de oxigênio nos gases secos de exaustão:

$$\% \text{ Oxigênio residual} = 100 \cdot \{(\text{N}^\circ \text{ Toneladas-Moles Oxigênio}) : (\text{N}^\circ \text{ Toneladas-Moles Totais})\}$$

$$\% \text{ Oxigênio residual} = 100 \cdot \{(3,51) : (257,60)\}$$

$\% \text{ Oxigênio residual} = \mathbf{1,36\% \text{ base molar ou base volumétrica}}$ , já que cada molécula-tonelada de qualquer um desses cinco gases tem o mesmo volume pela lei dos gases)

Cálculo da relação em base peso do oxigênio no ar:

$$\text{Relação base peso} = 100 \cdot \{[21 \cdot 32\text{g}] / [(21 \cdot 32\text{g}) + (79 \cdot 28\text{g})]\} =$$

**23,3% de oxigênio no ar com base em peso seco (ou 0,233)**

**+  
76,7% de nitrogênio no ar base peso (ou 0,767)**

Cálculo da relação ar total aplicado para queima/tonelada de sólidos secos:

- Ar teórico total necessário por dia para oxidar enxofre:

$$\{[1,56 \text{ t S}] \cdot [40 \text{ g O}_2 / 32 \text{ g S}]\} : 0,233 = 8,37 \text{ t ar / dia}$$

- Ar teórico total necessário por dia para oxidar carbono orgânico:

$$\{[416 \text{ t C}] \cdot [40 \text{ g O}_2 / 12 \text{ g C}]\} : 0,233 = 5.951,4 \text{ t ar / dia}$$

- Ar teórico total necessário por dia para oxidar Norgânico:

$$\{[6,5 \text{ t Norgânico}] \cdot [80 \text{ g O}_2 / 28 \text{ Norgânico}]\} : 0,233 = 79,71 \text{ t ar / dia}$$



- Ar teórico total necessário por dia para oxidar hidrogênio:

$$\{[78 \text{ t H}_2] \cdot [20 \text{ g O}_2 / 2 \text{ g H}_2]\} : 0,233 = 3.347,6 \text{ t ar / dia}$$

- Total de ar teórico estequiométrico para 25% de excesso de ar/dia = Somatório dos valores calculados = **9.387,08 toneladas/dia**
- Desconto do ar que corresponderia ao oxigênio presente na constituição do licor preto

$$(325 \text{ t oxigênio}) : 0,233 = \mathbf{1.394,9 \text{ t ar a descontar devido ao oxigênio da constituição licor preto/dia}}$$

- Total de ar efetivamente aplicado para manter 25% de excesso de ar/dia

$$9.387,08 \text{ t/dia} - 1.394,9 \text{ t/dia} = \mathbf{7.992,18 \text{ t ar aplicado/dia}}$$

$$\text{Total de sólidos secos/dia} = \mathbf{1.300 \text{ toneladas/dia}}$$

$$\text{Relação ar aplicado/combustível sólido} = \mathbf{6,14 \text{ t ar/t licor preto base sólidos secos}}$$



Biomassa florestal sendo descarregada para combustão em caldeira de força



## GERAÇÃO DE CALOR NA AGRICULTURA



A agricultura brasileira é uma das principais clientes de biomassa florestal (ou mais especificamente, de lenha) do setor do agronegócio no País. Além da lenha são consumidos: resíduos da industrialização da madeira, briquetes e péletes, cavacos de toras de madeira, cavacos de resíduos da colheita florestal, etc. De acordo com o BEN – Balanço Energético Nacional, de 2015 (Ano base 2014), as biomassas representaram uma utilização conjugada de 68.820 tep (toneladas equivalentes a petróleo), sendo que os principais usuários das mesmas foram os setores: alimentos e bebidas (26,7%), transportes (18,9%, devido ao etanol), produção de energia (18,1%), papel e celulose (11,7%), uso doméstico (9,6%), ferro e aço (4,7%) e agronegócio (3,9%), dentre outros. Por biomassas, o BEN esclarece que elas são principalmente constituídas de: bagaço de cana de açúcar, lenha, lixívia, carvão vegetal e bioetanol.

Talvez o principal uso da biomassa florestal energética pela área rural seja como consumo direto pelo homem do campo para aquecer água e ambientes e para cozinhar. Essa quantificação é muito difícil de ser feita em função do fato que as pessoas no campo costumam usar lenha de suas próprias propriedades e não costumam realizar estatísticas de seus consumos. Também utilizam madeiras de abertura de fronteiras agrícolas, toras finas de desbastes de reflorestamentos, resíduos lenhosos diversos, etc.

Quando se comenta acerca do uso da biomassa florestal pela agricultura, a primeira de nossas associações ocorre com a lembrança de quase sempre se encontrar uma pilha de lenha em praticamente todas as propriedades rurais, quaisquer que sejam as suas dimensões territoriais e o seu estado de modernidade tecnológica. O agricultor tem na lenha a sua grande aliada para sua qualidade de vida e para o sucesso de seu negócio.

Por outro lado, um dos principais usos agrícolas da lenha consiste em aproveitar o calor gerado por ela para a secagem de grãos (soja, café, milho, arroz, trigo, amendoim, etc.), de folhas (erva-mate, fumo, ervas aromáticas, etc.) e de frutos (passas, frutos secos, etc.).

A lenha oferece aos seus usuários uma vantagem econômica apreciável e é disponível sempre no tempo certo e requerido por quem a utiliza. Seus únicos inconvenientes estão associados às necessidades de áreas cobertas para estocagem ou aceitar que ela vá se molhar em dias de chuva, perdendo, com isso, algumas de suas valiosas calorias. Também a estocagem da lenha por longos períodos de tempo pode acarretar degradação de seus constituintes orgânicos.

Para a secagem e desidratação de materiais agrícolas, o segredo está em aproveitar o máximo possível da energia primária da biomassa florestal para aquecer o ar, que será usado como agente de veiculação do calor. Esse ar quente e seco deve destinar sua energia para a evaporação da água contida como umidade em algum produto agrícola. Usualmente, as perdas de energia nesses processos são grandes, pois existem muitas instalações com estados tecnológicos primitivos e que fazem esse tipo de serviço energético.

Basicamente, as etapas desse processo envolvem: queima da lenha para liberação de calor, transferência desse calor para o ar, veiculação do ar quente através do material a secar e expulsar o ar quente e úmido residual da secagem. Em instalações mais modernas, esse ar quente e úmido pode colaborar com seu calor residual para pré-aquecer o ar ambiental frio que estará ingressando no processo.

As instalações mais simples são usualmente fornos para queimar a lenha na forma de toretes. O próprio ar de combustão é usado para a secagem, podendo sofrer antes disso alguma forma de limpeza para remoção de fagulhas e fuligem. Já os sistemas mais modernos utilizam sofisticadas fornalhas, muitas delas com adequados níveis tecnológicos, pois o mercado é ofertante desse tipo de equipamentos e a indústria nacional é competitiva nessa produção.

As fornalhas são equipamentos de concepção simples, que variam em formato, capacidade de produção, maneira de adicionar o combustível, forma de apresentação da biomassa florestal (serragens, pós, cavacos, briquetes, péletes, toretes de lenha, etc.), processo de saída do ar quente e das cinzas residuais da combustão.

O combustível é muito variado em tipo e qualidade, pois o agricultor também costuma queimar nas fornalhas os seus resíduos de biomassa, tais como casca e palha de arroz, palha de milho, casca de amendoim e café, etc.

As fornalhas para aquecimento de ar de secagem de materiais podem ser de dois tipos principais:

- Fogo direto: os gases de combustão são misturados ao ar ambiental nas proporções requeridas para atingimento das temperaturas desejadas no ar de secagem e a mistura desses gases é insuflada nos secadores para se proceder à secagem de algum produto. Os gases liberados pela combustão podem passar antes por um procedimento de limpeza, como ciclones ou filtros de manga.
- Fogo indireto: os gases quentes liberados da combustão passam por trocadores de calor para aquecimento indireto do ar de secagem.

As fornalhas costumam queimar combustíveis sólidos: pó de biomassa, serragem, cavacos e fragmentos de biomassa florestal, péletes, briquetes, bagaço de cana e até mesmo toretes de lenha. Em todos os casos, é importante se dispor de combustível biomássico bem seco e armazenado nas proximidades da fornalha.

O dimensionamento das fornalhas para aquecimento de ar envolve uma engenharia que necessita se apoiar em alguns critérios e parâmetros, tais como: umidade do material a ser secado, teor de umidade requerido no produto após a secagem, eficiência de queima do combustível, isolamento térmico das instalações, eficiência de transferência de calor, forma de remoção dos resíduos do processo, chaminé para liberação de gases residuais, etc.

Alguns dos principais fatores do dimensionamento das fornalhas são: o volume da câmara de combustão e as potências dos ventiladores de ar frio e dos exaustores de ar quente.

O princípio de funcionamento é muito simples: o máximo de calor liberado pela queima deve ser incorporado aos gases quentes. Logo, a combustão deve ser muito eficiente e as quantidades de entrada e saída de gases devem ser bem equilibradas. Caso isso não aconteça, a chama pode se apagar.

O combustível é injetado sobre a grelha da fornalha e queima sobre ela (concepção mais tradicional) ou em suspensão no ar de combustão (em fornalhas concebidas para trabalhar com combustível na forma de partículas finas e com altas relações de ar/combustível). O

material preferido para essas fornalhas que queimam material em suspensão consiste em serragem de serrarias ou pós de lixamento da produção de móveis ou de painéis de madeira.

A queima em suspensão ou em semi-suspensão pode ser também realizada para o aproveitamento de resíduos agrícolas de pequenas dimensões, como casca de arroz, trigo, farelos secos, etc.

Uma fornalha bem dimensionada deve ter o menor volume possível, a melhor e mais eficiente combustão e o excesso de ar correto e ajustado.

Os rendimentos térmicos desse processo não costumam ser muito altos e variam bastante, pois a diversidade de fornalhas é enorme: podem variar entre 50 a 80%.

Um dos principais fatores para se calcular a quantidade de combustível e de ar de combustão para as fornalhas consiste na diferença de temperaturas entre o que se deseja para os gases de secagem e o quanto se necessita desse ar de secagem.

Em função disso, a fornalha demandará de uma quantidade de combustível para ser operada, sendo que essa quantidade é influenciada por:

- ☞ Poder calorífico útil do combustível;
- ☞ Fluxo mássico e/ou volumétrico de ar frio (em geral, ar ambiental);
- ☞ Diferença de temperaturas entre o ar aquecido para ser usado na secagem e o ar frio que deve ser aquecido;
- ☞ Calor específico médio do ar;
- ☞ Rendimento teórico da fornalha;
- ☞ Perdas de calor pós-combustão (nas transferências de ar quente e nos próprios secadores).

Bem dimensionada e operada, a fornalha vai oferecer o fluxo de ar quente requerido e equilibrado para a secagem, que também não pode e não deve ser exagerada. É o calor dos gases quentes que vai aquecer e evaporar a água do material que se deseja secar, devendo sempre se cuidar para máximo aproveitamento do calor.

Quanto mais primitivas forem as tecnologias, maiores serão as perdas de energia na produção de ar quente e no uso desse ar quente para secagem. Com isso, aumentam o consumo de combustível e os custos também.

Outros fatores a influenciar no consumo de energia são os teores de umidade inicial e final do material que se deseja secar. Podemos ter teores de umidades iniciais bem altos, como é caso dos grãos de café que podem ter até 40 a 45% de umidade. Em geral, os grãos de soja e milho chegam mais secos aos secadores, entre 20 a 25% de umidade. Quase sempre se desejam teores de umidades finais entre 10 a 13%.

Quanto mais tempo o grão ficar secando no campo (ainda nas áreas de plantações, antes da colheita), menores serão os consumos de energia na secagem dois mesmos. Entretanto, as perdas de grãos na colheita podem ser maiores. Sempre a necessidade de busca incansável das condições de ótimo.

Os consumos mais usuais de "lenha" para secagem de grãos costumam variar entre 0,05 a 0,8 estéreos de lenha por tonelada de grãos úmidos. Os valores mais baixos (0,05 a 0,15 st/t) são relatados para os grãos de soja e milho e os mais altos para o café (já que costuma ter umidade mais alta nos grãos a serem secados).

Existem dois tipos de rendimentos associados nessa secagem: o rendimento da fomalha para aquecer os gases e o rendimento dos secadores (para secar os grãos). Os rendimentos das fomalhas variam entre 50 a 80% e os rendimentos dos secadores entre 45 a 70%. O rendimento final do processo de secagem é então o multiplicativo dos dois, levando a valores globais entre 25 a 50%.

#### ☪ **Exemplo numérico 06 - Cálculos em secagem de grãos:**

Peso úmido de grãos para secagem = 100 toneladas

Teor de umidade inicial dos grãos = 25%

Consistência ou percentual seco dos grãos = 75%

Teor de umidade final dos grãos após secagem = 10%

Consistência ou percentual seco dos grãos após secagem = 90%

Cálculo da quantidade de água a ser evaporada

Peso absolutamente seco de grãos = (100 t) . (0,75 t a.s./t úmida)

Peso absolutamente seco de grãos = 75 t a.s.

Peso inicial da água presente nos grãos = 25 toneladas

Peso final da água nos grãos após secagem =

$[(75 \text{ t}) : (0,9 \text{ t a.s./t úmida})] - 75 = 8,33 \text{ t água nos grãos finais}$

Peso de água a evaporar = (Peso água inicial) - (Peso água final) =

$25 - 8,33 = \mathbf{16,67 \text{ t água a evaporar}}$

Outros dados requeridos:

Temperatura inicial da água = 30°C

Entalpia da água a evaporar dos grãos = 30 Mcal/t

Entalpia do vapor produzido pela evaporação da água = 610 Mcal/t

Cálculo da quantidade de calor para aquecer e evaporar cada tonelada de água

$Q_{\text{calor evaporar água}} = \Delta \text{ Entalpia} = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água}) =$

$Q_{\text{calor evaporar água}} = 610 - 30 = 580 \text{ Mcal/t água}$

Cálculo da quantidade de calor para aquecer e evaporar todas as 16,67 toneladas de água

$Q_{\text{calor evaporar toda água}} = (16,67 \text{ t água}) \cdot (580 \text{ Mcal/t})$

$Q_{\text{calor evaporar toda água}} = \mathbf{9.668,6 \text{ Mcal}}$

Cálculo da quantidade de calor a ser oferecida pelos gases quentes que entram nos secadores

Essa quantidade de calor vai depender do rendimento dos secadores.

Admitir:

Rendimento dos secadores = 75%

$Q_{\text{calor a entrar nos secadores}} = (9.668,6 \text{ Mcal}) : 0,75 = \mathbf{12.891,5 \text{ Mcal}}$

Esse calor deve ser provido pela fornalha que queima o combustível biomássico. Por sua vez, a fornalha também tem seu rendimento, que vamos admitir como sendo:

Rendimento térmico da fornalha = 80%

Cálculo da quantidade de calor que deve estar presente na biomassa combustível que alimentará a fornalha

$Q_{\text{calor combustível}} =$   
(Quantidade calor requerida para os gases quentes) : (Rendimento fornalha)

$Q_{\text{calor combustível}} = (12.891,5 \text{ Mcal}) : 0,80 = \mathbf{16.115 \text{ Mcal a ser alimentado como biomassa florestal à fornalha}}$

Cálculo da quantidade de combustível biomássico

Deve-se nesse caso conhecer o poder calorífico útil da biomassa florestal, no caso vamos admitir como sendo:

Poder calorífico útil da "lenha" = 2.400 Mcal/t úmida

Peso lenha úmida = (16.115 Mcal a ser alimentado como biomassa florestal à fornalha) : (2.400 Mcal/t úmida) =

Peso lenha úmida = **6,71 toneladas úmidas**

Densidade aparente da lenha úmida

Admitir:

Peso úmido de um estéreo de lenha = 0,55 t úmida/st

Cálculo do volume requerido de biomassa florestal ou de lenha

$V_{\text{lenha}} = (6,71 \text{ t úmidas lenha}) : (0,55 \text{ t úmidas/st}) = \mathbf{12,2 \text{ st de lenha para secagem de 100 toneladas de grãos}}$

O que dá a relação prática de consumo específico de lenha de **0,122 st de lenha/t de grãos**



Essa lenha oferecida tem uma densidade energética que pode ser também calculada como a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Densidade energética lenha} &= \\ (\text{PCÚtil, em Mcal/t úmida}) \cdot (0,55 \text{ t úmida/st}) &= \\ (2.400 \text{ Mcal/t úmida}) \cdot (0,55 \text{ t úmida/st}) &= \mathbf{1.320 \text{ Mcal/st}} \end{aligned}$$

A partir desse dado, pode-se igualmente determinar o volume de lenha requerido, da seguinte forma:

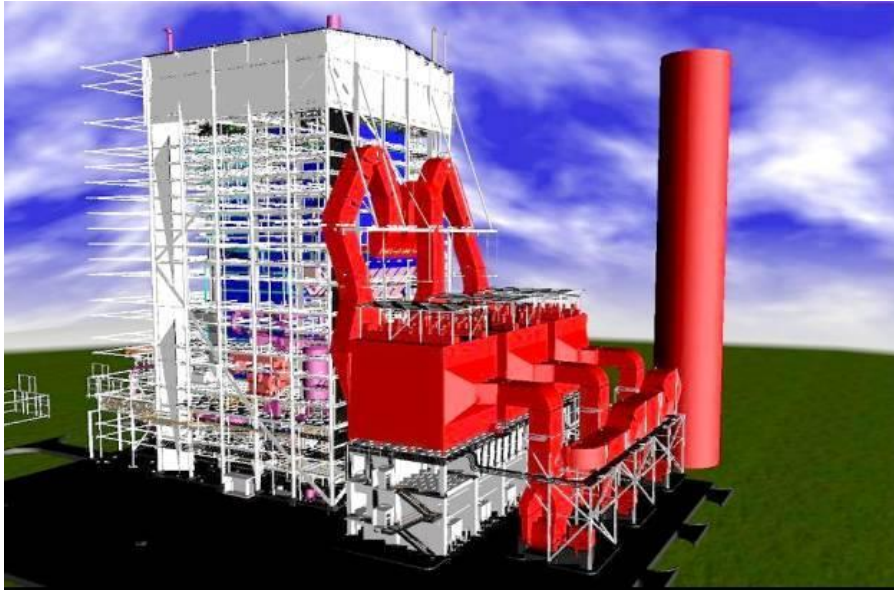
$$\text{Volume+lenha} = (16.115 \text{ Mcal requeridas}) : (1.320 \text{ Mcal/st}) = \mathbf{12,2 \text{ st de lenha para secagem de 100 toneladas de grãos}}$$

Uma vez mais quero enfatizar que a quantidade de biomassa florestal a utilizar nesses tipos de processos de secagem agrícola é altamente dependente da quantidade de água a evaporar do material, rendimentos dos processos (fornalha e secadores) e densidade energética da biomassa combustível.

Por isso amigos, toda a atenção a esses pontos – os mesmos que também são válidos em queimas em caldeiras para geração de vapor.



## CALDEIRAS DE FORÇA PARA GERAÇÃO DE VAPOR



Esquema de caldeira de recuperação kraft que queima a biomassa licor preto

Caldeiras são equipamentos térmicos de concepção simples, mas de engenharias sofisticadas, que possuem a finalidade de queimar um combustível e com a energia liberada por essa combustão direta aquecer e vaporizar a água de forma a se ter no vapor (saturado ou superaquecido) uma forma de transferência da energia primária do combustível para alguma utilização prática no mundo industrial ou rural.

Muitas das caldeiras são utilizadas para produção de vapor para utilização direta desse vapor em processos como secagem, aquecimento, esterilização e lavagem, bem como na produção de eletricidade.

Existem caldeiras nas mais variadas concepções, formatos e capacidades de produção.

No caso de caldeiras de biomassa, elas podem ser alimentadas com combustíveis como toretes ou toras de lenha, cavacos de madeira, fragmentos de casca e de resíduos florestais.

As caldeiras alimentadas com lenha na forma de toretes são em geral de pequeno porte e cada vez menos frequentes em unidades industriais detentoras de tecnologias mais modernas. Essas caldeiras possuem baixas eficiências e não conseguem um bom aproveitamento da energia do combustível. As toras de lenha demoram a queimar pela baixa relação entre o ar comburente e a área superficial do combustível.

As toras não possuem muito contato com o ar, o que dificulta e atrasa o processo de combustão.

Caldeiras, comumente presentes como partes integrantes e vitais de centrais termelétricas, são equipamentos de maior porte cuja função é a produção de vapor superaquecido, muito rico em energia. Com ele são alimentados sistemas de turbogeração de energia elétrica tanto para produção somente de eletricidade, como de eletricidade e vapor em menores níveis de temperatura e pressão. Esses processos que produzem simultaneamente vapor e eletricidade são denominados genericamente de cogeração.

As caldeiras de centrais termelétricas podem variar bastante em capacidade de geração, podendo as pequenas centrais terem capacidades de produção de eletricidade tão baixa como 1 a 5 MW de potência. Já as grandes e modernas caldeiras de biomassa alimentam sistemas de turbogeração entre 50 a 150 MW.

O calor liberado pela combustão da biomassa é utilizado para produzir vapor d'água nas regiões de troca térmica das caldeiras (tubulações das paredes e sistemas de balões ou cilindros de água e de vapor).

A água é aquecida e se mantém pressurizada dentro das tubulações. Entretanto, ao atingir o sistema de balões, sofre uma expansão no balão superior de vapor e a maior parte dela se converte em vapor d'água. Esse vapor recém-formado é saturado e pode ser utilizado como tal ou enviado para superaquecimento nos superaquecedores, onde suas temperatura e pressão são aumentadas ainda mais para que cada tonelada do vapor possa carregar mais energia (cerca de 750 a 850 Mcal/tonelada de vapor).

O vapor superaquecido pode ser utilizado para geração apenas de eletricidade em turbinas de condensação (ciclo Rankine) ou para produção simultânea de vapor de mais baixa pressão e eletricidade. Nesse caso, utilizam-se outros tipos de turbinas a vapor, como as que permitem extrações de vapores em temperaturas e níveis de pressão inferiores às do vapor superaquecido que foi introduzido na turbina (turbinas de cogeração com extração de vapor ou de contrapressão).

As caldeiras que operam em conformidade com essas tecnologias são denominadas de aquatubulares e são as mais usuais formas de produção simultânea de eletricidade e vapor em fábricas do setor de manufatura de celulose de mercado. Nesse setor, o principal biocombustível é uma espécie de produto residual do processo de polpação da madeira para individualização de suas fibras: o licor preto

ou lixívia negra. Esse licor nada mais é do que o líquido residual do cozimento e lavagem das fibras celulósicas, onde está armazenado cerca de 50% do peso original da madeira, quando se adota o processo kraft de polpação.



Caldeira de recuperação kraft

O licor preto, logo que produzido, é muito diluído, possuindo aproximadamente 15% de sólidos secos. Entretanto, ele pode ser concentrado com muita eficiência em sistemas de evaporação com múltiplos efeitos até teores de 70 a 80% de sólidos secos. Nessas condições, com apenas 20 a 30% de umidade, o licor preto acaba se convertendo em combustível biomássico de boa qualidade e desempenho.

As caldeiras de recuperação do licor preto são caldeiras que queimam uma biomassa derivada da madeira e elas possuem dupla finalidade:

- ⊗ Recuperar os compostos químicos que são utilizados para acelerar o processo de polpação e individualização das fibras celulósicas;

- ⊗ Libertar a energia contida nos componentes da madeira que foram dissolvidos e que consistem na fração orgânica do licor preto (entre 50 a 65% do peso seco do licor preto consiste de material orgânico derivado da madeira e que entrou no sistema dos digestores de polpação na forma de cavacos).

As caldeiras de recuperação usadas no processo kraft trabalham frequentemente associadas a caldeiras de biomassa, que costumam queimar os cavacos rejeitados para a produção de celulose, bem como resíduos lenhosos florestais e industriais. Os vapores produzidos pelos dois sistemas de caldeiras alimentam uma espécie de anel de vapor a mesma temperatura (entre 400 a 510°C) e pressão (entre 65 a 110 bar). Esses vapores são direcionados para turbinas, onde parte se converte apenas em eletricidade (geração termelétrica) e parte em eletricidade e vapor (cogeração). A cogeração só não é mais intensa no setor de celulose de mercado porque não existe tanta demanda de vapor nas fábricas desse tipo de celulose. Logo, sobra vapor e que precisa ser condensado, produzindo-se eletricidade em turbinas de condensação. O condensado de vapor retorna ao sistema de água de alimentação das caldeiras porque se trata de água limpíssima e desmineralizada, própria, portanto, para nova geração de vapor.



Uma central termelétrica desse tipo se fundamenta basicamente em alguns subsistemas vitais:

- ☆ Geração de vapor nas caldeiras;
- ☆ Distribuição do vapor superaquecido ao anel de vapor;
- ☆ Aproveitamento do insumo vapor superaquecido pelos turbogeradores;
- ☆ Produção de eletricidade;
- ☆ Distribuição da energia elétrica aos sistemas usuários;
- ☆ Extração de vapores de menores temperaturas e pressões para utilização na própria fábrica ou no arranjo produtivo que essa central termelétrica sustenta;
- ☆ Retorno dos condensados para reutilização em nova produção de vapor superaquecido.

As caldeiras podem ser consideradas como máquinas produtoras de vapor. O vapor é um fluido de transferir calor muito eficiente, pois ele possui alta capacidade de reter energia, que pode depois ser recuperada pelo abaixamento das pressões e temperaturas, ou pela condensação e trocas térmicas.

O vapor é utilizado em larga escala na indústria, seja para proceder a aquecimentos de sistemas (inclusive do ar) ou para acionamento mecânico. As turbinas são exemplos desse tipo de conversão de energia térmica em energia mecânica, pois o vapor transfere sua energia para o eixo rotativo das turbinas. Essa energia mecânica será a fonte de energia para os geradores produzirem eletricidade.

A maior parte dos processos, que se valem do vapor, utiliza o vapor saturado, com pressões abaixo de 10 bar para aquecimento e secagem em instalações industriais, rurais e mesmo domésticas.

Já o vapor superaquecido costuma ser empregado para conversão em energia mecânica e para geração de eletricidade.

A utilização do vapor como forma de transferência da energia de um combustível para um fluido fácil de ser gerenciado e manuseado é bastante antiga. As primeiras máquinas a vapor datam do século XVIII. Elas se baseavam no conceito de captar com a água (em vaporização) a energia que estava sendo liberada com a queima de um combustível. O vapor é fácil de ser manuseado e pode assim ser alimentado com simplicidade a outras unidades térmicas circunvizinhas que precisam do calor que pode ser suprido pelo vapor. Logo, essa propriedade converteu o vapor no principal meio fluido de captar energia liberada por um combustível e de transferi-la para alguma utilização.

As caldeiras a vapor são, portanto, equipamentos bastante comuns de troca térmica e elas são altamente eficientes para realização dessa tarefa.

Simplificadamente, uma caldeira de biomassa consegue, com a queima do combustível, liberar a energia química presente como energia primária em uma biomassa energética. Essa energia liberada (calor) é transferida para a água, que se converte em vapor. Quanto mais se aquecer o vapor e o pressurizar, maior será a capacidade desse vapor em reter energia térmica para depois transferir essa energia a outros processos demandando por energia.



Caldeira de biomassa - International Paper do Brasil, 2015

Uma caldeira de biomassa, para poder ser considerada com uma máquina de combustão eficiente e fornecedora de vapor para transferência de energia ao diversos processos, necessita ter as seguintes características vitais:

- Segurança nas operações, já que ela pode eventualmente se converter em um perigoso processo, capaz de causar danos ao patrimônio e às pessoas. As explosões de caldeiras são processos ruidosos e violentos, que surgem em situações eventuais pelo rompimento da estrutura das paredes das caldeiras, com grande liberação de calor e vapor para o ambiente.
- Concepção tecnológica simples e efetiva;
- Construção eficiente na utilização dos materiais;
- Construção de componentes herméticos e em materiais muito resistentes para suportar as drásticas condições de temperaturas e pressões;
- Capacidade de suportar as expansões e contrações dos materiais em sua operação;
- Boa eficiência na queima do combustível e na retenção pelo vapor dessa energia liberada (eficiência térmica ou rendimento da caldeira);
- Sistema eficiente de trocas térmicas;
- Acessibilidade para limpezas, lavagens e manutenções;
- Sistemas de abatimento de poluentes aéreos (particulados e gases poluentes problemáticos como óxidos de enxofre e nitrogênio, etc.);
- Capacidade de responder bem a mudanças bruscas nas condições operacionais, tais como as causadas por alimentação variada de ar de combustão ou de combustível, apagamento da chama, falta de água na alimentação da caldeira, etc.

O princípio básico de operação de uma caldeira aquatubular de produção de vapor é bastante simples. A tarefa mais difícil está em conseguir engenheirar um sistema desse tipo que seja seguro, eficiente e com altas capacidades de produção e de continuidade operacional.

Os objetivos de quaisquer caldeiras devem ser os seguintes:



- φ Máxima liberação de energia química de um combustível;
- φ Máxima absorção pelo vapor da quantidade de calor liberada no processo de combustão.

Para que essas coisas aconteçam e bem, as caldeiras são dotadas de quatro seções vitais:

- φ Fornalha ou câmara de combustão para queima do combustível e liberação de sua energia primária;
- φ Áreas de troca térmica para aquecimento da água, geração de vapor e aquecimento do vapor (tubulações, câmaras, balões, etc.);
- φ Sistemas para eficiente distribuição e transferência do vapor gerado para outros locais onde esse vapor fará a sua função de entregar essa energia;
- φ Sistemas eficientes para a condução dos gases de exaustão (fumaças) e chaminés para que as velocidades de remoção dos gases sejam compatíveis às necessidades de alimentação de ar de combustão à fornalha. A tiragem dos gases é tão crítica que devem ser acoplados ventiladores induzidos ou exaustores que permitam o equilíbrio entre a entrada de ar de combustão e a saída de gases quentes das caldeiras.

O calor liberado pela combustão pode ser transferido para os sistemas de captação de calor e acúmulo de energia pelas três formas teóricas de transmissão de calor:

- ❖ Radiação: é o calor irradiado de uma fonte de calor na forma de ondas eletromagnéticas de calor em direção a um corpo mais frio. A intensidade dessa transferência depende das diferenças de calor entre a fonte emissora de calor (fornalha) e a de recepção da energia (tubulações com água em movimentação);
- ❖ Condução: é o processo de caminhamento do calor feito primeiro através dos gases quentes para o metal dos tubos, os quais por

sua vez, vão se esquentando para conduzir esse calor para os fluidos que contenham (água ou vapor em processo de superaquecimento);

- ❖ Convecção: é o calor que passa para os fluidos (água e vapor) através do contato dos tubos aquecidos com os gases quentes que se movimentam no interior da caldeira. Como o aquecimento ocorre mais nas posições de contato dos fluidos com o metal, existem correntes de convecção que acontecem dentro dos tubos, com as moléculas de água mais quentes mudando de posição em relação às moléculas mais frias, que se aproximam por sua vez dos tubos aquecidos. O mesmo fenômeno acontece do lado dos gases quentes.

Em qualquer caldeira em operação existem essas três formas de transmissão de calor acontecendo simultaneamente. Não é nada fácil se identificar quais as formas mais importantes e sua intensidade e proporção de ocorrência em caldeiras de força em operação, uma vez que as três acontecem simultaneamente.

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com a pressão/temperatura do vapor produzido, com o tipo de combustível empregado (biomassa, óleo combustível, gás natural, carvão mineral), com o tipo de troca térmica, com o tipo de fluido captador de energia para transferência (água/vapor; óleo mineral, fluido térmico, etc.), com a forma de proceder à combustão na fornalha, dentre outras.

Os vapores gerados pelas caldeiras têm sido utilizados em milhares de utilizações, desde as mais simples, como aquecimento de água ou do ar (calefação) como em utilizações de maiores complexidades, como em reatores químicos ou em turbogeradores para produção de eletricidade.

Uma infinidade de processos industriais utiliza o vapor d'água gerado por caldeiras, seja na forma de vapor saturado como de vapor superaquecido. Os principais usos desses vapores podem ser apontados como sendo:

- ✓ Higienização e lavagem;
- ✓ Aquecimento de materiais líquidos, sólidos, gasosos;

- ✓ Secagem direta e indireta de materiais, como celulose e papel, tábuas de madeira, grãos de cereais, etc.;
- ✓ Aceleração de reações químicas, como no caso do processo de polpação da madeira para produção de celulose;
- ✓ Para amolecimento de materiais, como no caso de produção de pastas celulósicas pelos processos termomecânicos e termomecanoquímicos;
- ✓ Insumos vitais em operações de autoclaves, estufas, reatores, trocadores de calor, torres de destilação, vasos de pressão, turbinas, etc.



Biomassas variáveis e variadas podem colaborar para aumento de perdas de calor

Um dos principais itens que exige constante atenção de todos que utilizam o vapor processual são as perdas de calor, que são muito fáceis de ocorrer. Essas perdas de calor e de vapor reduzem os rendimentos, aumentam os custos operacionais e prejudicam o meio ambiente, pois mais material vai ter que ser queimado para compensar as perdas ocorridas. Essas perdas podem acontecer tanto no próprio processo de produção e movimentação do vapor, como nos processos de utilização do vapor.



As principais perdas de energia nas caldeiras de biomassa são as seguintes:

- Energia desperdiçada para aquecer e evaporar a água presente na biomassa como teor de umidade. Essa água consumirá energia e sairá como vapor d'água com os gases de exaustão da caldeira, aumentando os fluxos de tiragem de gases pela chaminé.
- Energia desperdiçada pelo excesso exagerado de excesso de ar de combustão (já que grandes quantidades de nitrogênio inerte acabam se aquecendo e sendo lançada fora do sistema sem utilização valiosa alguma nos processos de combustão e trocas térmicas);
- Deficiências nas trocas térmicas em função de entupimentos, incrustações, corrosão de materiais, etc.;
- Queima incompleta da biomassa combustível, liberando partículas de carvão (fuligem) pelas cinzas volantes ou pedaços mal queimados de biomassa (carvões) pelas cinzas de fundo das caldeiras;
- Energia desperdiçada pelas cinzas quentes que são constantemente removidas da caldeira como resíduos sólidos processuais;
- Energia perdida por radiação e convecção para a atmosfera, seja através paredes da caldeira, tanques e tubulações mal isoladas

dos meios usados para condução dos vapores com seus calores neles contidos;

- Perdas de energia por perdas constantes e contínuas de água da caldeira, vapores, purgas eventuais de vapor, etc.;
- Instabilidades de processo (mudanças nos padrões de queima da fornalha, mudanças de qualidade do combustível ou da relação ar de combustão/combustível), etc.



Uma das principais causas de perdas energéticas em caldeiras de biomassa é o teor de umidade da biomassa combustível, que em geral varia entre 25 a 50%.

O aumento do teor de umidade não é danoso apenas pela quantidade de água a maior que deve ser evaporada e aquecida nos processos internos das caldeiras, mas também e principalmente pelas inúmeras alterações operacionais que isso acarreta, tais como:

- ⊗ Redução da temperatura de queima da camada de material em combustão no interior da fornalha;
- ⊗ Aumento da necessidade de ar de combustão para ser possível a manutenção da chama;
- ⊗ Aumento considerável dos gases de exaustão, tanto pelo aumento do ar de combustão a maior, como pela evaporação da água da

umidade que se converte em vapor que deve ser expelido pela chaminé. Com isso, deve-se aumentar a tiragem dos gases, o que resulta na necessidade paralela de se adicionar mais ar de combustão, para não se desequilibrar o sistema de gases na fornalha.

- ⊗ Aumento no arraste de partículas de biomassa ainda não totalmente queimadas, devido arrastes pelos gases de exaustão em grandes fluxos mássicos;
- ⊗ Aumento nas flutuações de pressão e temperatura do vapor sendo produzido, em função das instabilidades na geração de calor (pela variação da temperatura da fornalha e dos gases de exaustão);
- ⊗ Aumento das perdas de calor por radiação e convecção;
- ⊗ Aumento dos desbalanceamentos entre quantidades de ar de combustão aplicado por unidade de biomassa em bases úmida e seca;
- ⊗ Redução da liberação de calor útil pela fornalha;
- ⊗ Redução na capacidade de queima e de produção de vapor pela caldeira;
- ⊗ Aumento da frequência de entupimentos da caldeira devido a arraste de partículas de fuligem nas partes internas da caldeira;
- ⊗ Necessidade de se colocar um combustível auxiliar para manter a chama ou evitar seu apagamento (óleo combustível, gás natural ou cavacos mais secos de biomassa florestal);
- ⊗ Perdas associadas às variações de quantidade e qualidade do vapor em outras unidades consumidoras de vapor (turbinas, aquecedores, trocadores de calor, etc.).

Portanto, a biomassa muito úmida não traz consigo apenas uma redução do poder calorífico útil do combustível, como demonstrado em exemplos numéricos ao longo dessa série de capítulos sobre uso energético da biomassa florestal dos eucaliptos. Existem muito maiores danos e prejuízos associados a isso, do que apenas os efeitos no poder calorífico útil da biomassa.

Para acompanhar o processo de combustão e do aproveitamento de energia liberada em relação à energia adicionada pelo combustível, costumam-se estabelecer alguns cálculos para quantificação do Rendimento Térmico ou Eficiência Térmica de uma caldeira.

Esse rendimento ou eficiência térmica podem ser calculados de duas maneiras tradicionais:

- ✿ Pela identificação e quantificação de todas as perdas térmicas, deduzindo o somatório das perdas do valor de energia calorífica que ingressa no sistema através da biomassa. Trata-se de um método mais trabalhoso, mas que descortina onde a energia está sendo perdida. Com isso, pode-se com maior facilidade avaliar as melhorias econômicas e ambientais de ações para reduções dessas perdas quantificadas e identificadas no sistema.
- ✿ Pela identificação de toda entrada líquida de energia através do combustível e da saída de calor agregado à água e que se converteu em vapor superaquecido produzido, já que o calor é o único produto energético da caldeira. Esse é um método muito mais simples e mais comumente empregado nas organizações que produzem vapor com caldeiras. Com sistemas automáticos de controle online, pode-se sempre ter o valor atual desses rendimentos, o que ajuda no controle operacional das caldeiras.

A adoção do segundo procedimento relatado acima necessita de muito pouca coisa e de pouquíssimos cálculos e valores para serem medidos e aferidos.

Basta se terem os seguintes dados:

- ❖ Entrada de energia útil (líquida) pela adição do combustível, que pode ser obtido em uma base referencial, de tempo (dia ou hora, por exemplo). Esse valor é derivado de outros dois dados: Fluxo de alimentação da biomassa combustível e Poder Calorífico Útil dessa biomassa.

Quantidade de calor entrando na caldeira (Mcal/hora) =

(Fluxo de alimentação de biomassa) x (Poder calorífico útil da biomassa)  
(toneladas úmidas/hora) (Mcal/tonelada úmida)

- ❖ Agregação efetiva de calor à água de alimentação da caldeira na geração de vapor superaquecido, que depende tão somente de três parâmetros: Fluxo de produção de vapor; Entalpia de vapor sendo produzido; Entalpia da água de alimentação ao sistema da caldeira.

A diferença entre a entalpia do vapor produzido e a entalpia da água de alimentação ao sistema fornece o real valor de energia agregada pela caldeira a cada tonelada de água na sua conversão ao vapor com as características que apresenta de pressão e temperatura.

A energia total para a produção de vapor consiste no somatório de três quantidades de calor:

- ☞ Quantidade de calor sensível para aquecimento da água da temperatura em que se encontra ao ser alimentada ao sistema até à temperatura de sua mudança de estado por vaporização;
- ☞ Quantidade de calor latente para mudança de estado da água de líquido para gasoso;
- ☞ Quantidade de calor consumida para se aquecer o vapor recém-produzido até a temperatura e pressão do vapor superaquecido.

Conhecidas as características do vapor superaquecido, pode-se obter a sua quantidade total de calor (Entalpia do vapor -  $H_{\text{vapor}}$ ). Também, ao se conhecer a temperatura da água que alimenta o sistema da caldeira, pode-se quantificar a entalpia da água de entrada ao sistema (Entalpia da água -  $H_{\text{água}}$ ). A diferença entre a entalpia do vapor e a entalpia da água se traduz na efetiva agregação de calor à água em seu processo de conversão a vapor. A energia usada nessa agregação de calor provém da utilização de uma parte do calor que foi introduzido pela biomassa ao sistema. Diz-se que apenas uma parte foi



realmente utilizada em função de ocorrerem perdas, como já explicadas nessa seção.

Quantidade de calor agregado à água pela caldeira para conversão da mesma em vapor superaquecido =

$$\begin{aligned} & (\text{Fluxo vapor produzido}) \times (\text{Hvapor} - \text{Hágua}) \\ & (\text{toneladas vapor/hora}) \quad (\text{Mcal/tonelada de vapor ou água}) \end{aligned}$$

A maneira matemática de se calcular o rendimento térmico de uma caldeira pode ser a seguinte:

**Rendimento térmico da caldeira =**

$$100 \cdot \left[ \frac{(\text{Qcalor agregada na conversão da água para vapor})}{(\text{Qcalor biomassa ingressante ao sistema})} \right]$$

Para fins de exemplificação numérica, vamos considerar um **exemplo numérico 07** como sendo o de uma central térmica com uma caldeira de biomassa que produza 150 toneladas por hora de vapor superaquecido com entalpia de 800 Mcal/tonelada e cuja água de alimentação ao sistema possuía entalpia de 80 Mcal/tonelada de água. A biomassa utilizada era de origem de resíduos lenhosos e cavacos de madeira de serrarias da região, contendo casca. A alimentação de biomassa à caldeira acontecia em um fluxo horário de 65 toneladas de biomassa (com 45% de umidade e com o poder calorífico útil de 1.900 Mcal/tonelada tal qual).

Pergunta-se:

1. Rendimento térmico bruto da caldeira em questão
2. Relação entre toneladas de vapor produzido por tonelada de biomassa a 45% de umidade
3. Relação entre toneladas de vapor produzido por tonelada da mesma biomassa, mas referida base seca.

Base referencial: Uma hora de operações

- Qcalor ingressando ao sistema como biomassa = **123.500 Mcal/hora**

$$(\text{Fluxo de biomassa} - \text{t úmidas/hora}) \times (\text{PCÚtil da biomassa} - \text{Mcal/t tal qual})$$

$$(65 \text{ t/hora}) \times (1.900 \text{ Mcal/t tal qual})$$

- Qcalor agregado à água para se formar vapor = **108.000 Mcal/hora**

$$(\text{Fluxo de vapor} - \text{t/hora}) \times (\text{Hvapor} - \text{Hágua})$$

$$(150 \text{ toneladas/hora}) \times [(800 - 80) \text{ em Mcal/tonelada vapor}]$$

- Rendimento térmico bruto da caldeira de força = **87,45%**
- $$[(108.000 \text{ Mcal/hora}) : (123.500 \text{ Mcal/hora})] \times 100$$

A partir desses dados podem ser calculadas as gerações específicas de vapor por unidade de peso úmido e seco dessa biomassa pela caldeira:

#### ☺ Geração específica de vapor por tonelada úmida de biomassa

Geração específica de vapor base biomassa úmida =

$$(\text{Peso vapor produzido/hora}) : (\text{Peso de biomassa adicionada em base úmida/hora})$$

Geração específica base úmida = **(150 t vapor/hora) : (65 t úmidas biomassa/hora)**

Geração específica base úmida = **2,3 toneladas de vapor superaquecido/tonelada de biomassa úmida com 45% de umidade**

↳ Geração específica de vapor por tonelada dessa biomassa referida em base seca

Geração específica de vapor base biomassa referida como seca =  
(Peso vapor produzido/hora) : (Peso de biomassa adicionada em base seca/hora)

Geração específica base seca = **(150 t vapor/hora) : {(65 t úmidas biomassa/hora) . (0,55 t secas/t úmida biomassa)}**

Geração específica base seca = **4,2 toneladas de vapor superaquecido/tonelada referida como base seca da biomassa utilizada com 45% de umidade**

Quanto mais úmida for a biomassa florestal, menor será a quantidade de vapor que será produzida por unidade de peso úmido dessa mesma biomassa. Também diminuirá a quantidade de vapor produzido quando a biomassa se tornar mais úmida, mesmo se for referida em base seca, pois quanto mais úmida, maior será a quantidade de calor do Poder Calorífico Inferior que será consumida para aquecer e evaporar a água representada por essa umidade.

*Para uma mesma caldeira em operação, quanto maior for a umidade da biomassa sendo consumida, menor deverá ser o rendimento térmico dessa caldeira.*

A partir desse tipo de dados de produção de vapor por unidade de peso de biomassa úmida ou de biomassa base seca, pode-se estimar as quantidades de biomassa que uma termelétrica necessitará consumir por dia de operação, seja em estéreos, metros cúbicos sólidos, metros cúbicos de cavacos, ou mesmo em metros cúbicos de casca fragmentada. Tudo isso se consegue a partir dos dados de densidade a granel ou da densidade aparente desses materiais, conforme já foi relatado em seções passadas desse capítulo e do capítulo 43.

É muito importante que sejam calculados esses fatores de relação entre peso de vapor/peso de biomassa para cada situação específica à termelétrica em questão. Isso porque a biomassa florestal pode ser distinta em tipo e em teor de umidade, bem como o vapor a ser

produzido pode ter diferentes pressões e temperaturas, com distintas entalpias no vapor pronto para uso, conforme a termelétrica.

Devemos ficar então muito atentos a: teores de umidade e poderes caloríficos úteis das biomassas, entalpias de vapor e rendimentos térmicos das caldeiras.

As eficiências térmicas ou rendimentos térmicos em base bruta de caldeiras de biomassa costumam variar entre 65% a 90%, dependendo da idade tecnológica das caldeiras, da qualidade da biomassa combustível e dos cuidados de manutenção e procedimentos processuais da fábrica.

A eficiência ou rendimento térmico de uma caldeira pode incluir (eficiência líquida) ou não incluir (eficiência bruta) os consumos de energia elétrica de ventiladores, sopradores de fuligem, alimentadores de biomassa, injetores de combustíveis auxiliares, bombas e demais equipamentos auxiliares para que ela possa operar bem.

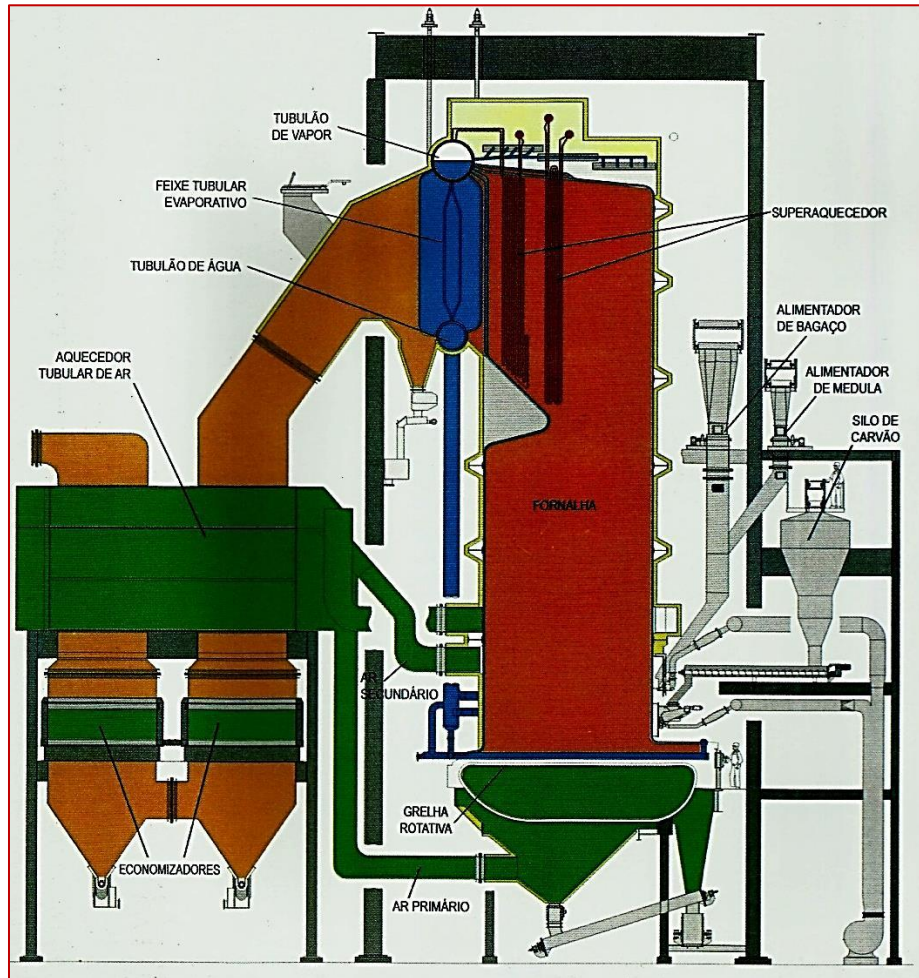
Da forma como foi apresentado o exemplo, calculou-se apenas o rendimento térmico bruto (eficiência bruta), que consiste na efetiva transferência e captação de energia da fase combustível para a fase vapor superaquecido (que é o produto da caldeira). Não foram incluídos no cálculo desse rendimento os consumos energéticos da própria caldeira de biomassa, principalmente de eletricidade para movimentar diversos de seus componentes essenciais. Até mesmo vapor uma caldeira pode usar para soprar fuligens em processos de limpeza de seus interiores.

Em termos de acompanhamento das operações e verificação da efetividade dos procedimentos operacionais, o cálculo do rendimento térmico bruto é bastante recomendado. Ele pode inclusive ser realizado em frequências curtas, como a cada hora, a cada dia, etc. Há possibilidades inclusive de se calcular o rendimento térmico atual (no exato momento da medida) de uma caldeira.

Por outro lado, para finalidades de projetos de engenharia e de seleção de equipamentos é interessante também se determinar a eficiência térmica líquida, para poder comparar equipamentos ou aperfeiçoar projetos para mínimos consumos de energia elétrica nas seções auxiliares dessa central térmica. Ao se deduzirem os consumos de energia para manter a caldeira operando, é possível se calcular a

efetiva contribuição dessa caldeira em oferecer energia líquida ao sistema fabril como um todo.

## Descrição do processo de uma caldeira de força aquatubular



Caldeira de biomassa (bagaço de cana de açúcar)

Fonte: HPB – B&W

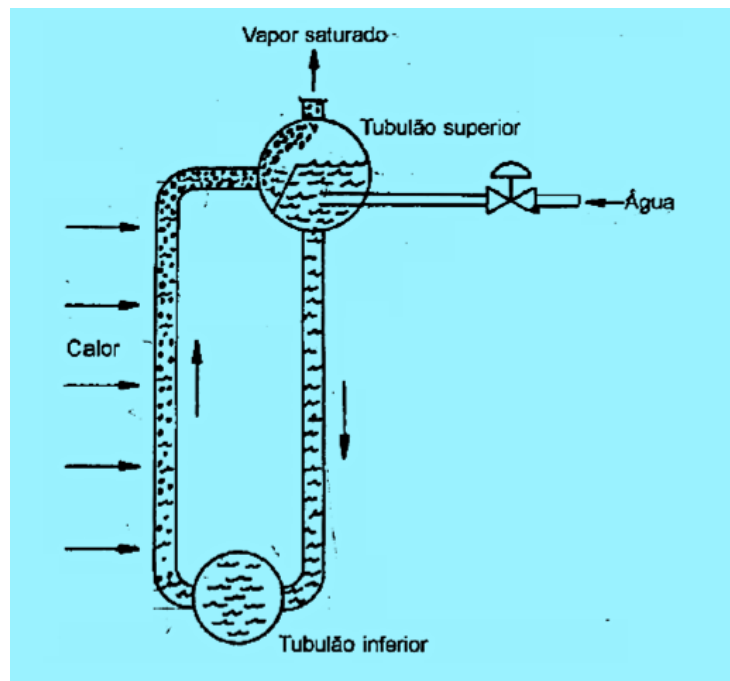
O setor de base florestal tem nas caldeiras aquatubulares o principal tipo de equipamento para geração de calor e de vapor. Nessas caldeiras, os produtos da combustão (gases quentes) e o calor irradiado da camada incandescente da fornalha aquecem as paredes de tubos de aço (que formam essas paredes) e outros elementos de troca térmica no interior da caldeira. No interior desses tubos circulam água ou vapor

para serem aquecidos intensamente. Não há nenhum tipo de contato direto entre a água, a camada incandescente e os gases quentes que circulam dentro da caldeira. Se isso vier a acontecer por algum vazamento de água ou de vapor por rompimento de alguma dessas tubulações, teremos um grande choque térmico, denominado de "explosão da caldeira", que pode trazer consequências sérias e imprevisíveis.

A água circula através das tubulações que formam as paredes da fornalha e outros tipos de arranjos tubulares e de balões contendo água e vapor. O objetivo é aumentar a superfície de contato para intensificar as trocas térmicas com o calor disponibilizado pela queima do combustível. Deseja-se com isso promover o aquecimento da água e depois do vapor formado, até se obter o vapor superaquecido para ser encaminhado para geração de eletricidade.

O vapor se forma no chamado tubulão, balão ou cilindro de vapor, o qual é mantido parcialmente cheio com água para permitir sua rápida expansão devido à despressurização parcial da mesma – com isso, forma-se o vapor. A água que permanece no cilindro de vapor se concentra em sais e se adensa.

O aquecimento dos tubulões também é feito pelos gases quentes de exaustão, que sobem dentro da caldeira em direção à chaminé.



Fonte do desenho: Francisco, 2012

Em geral, as caldeiras aquatubulares podem ter somente um tubulão (o de vapor) ou dois (um de água e outro de vapor).

O tubulão de vapor costuma se situar na parte superior da caldeira e é nele que acontece a separação das fases água e vapor. O tubulão inferior é o tubulão de água, onde se dá a decantação de impurezas e a concentração da água em sais. Existe aí um sistema para remoção da mesma em um processo de purga contínua da água desmineralizada adensada de dentro da caldeira, em fluxo que é mantido e controlado com a finalidade de evitar que a água se endureça (aumente em concentração de sais de cálcio, magnésio, ferro, etc.) em função da produção continuada de vapor.

As paredes aquatubulares são continuamente aquecidas e a água bastante quente e pressurizada alimenta o tubulão de vapor. No interior desse tubulão ocorre a expansão e formação do vapor. Esse vapor formado ainda não é vapor superaquecido, suas características são mais de vapor saturado para as condições de temperatura e pressão ali encontradas.

Nem toda a água que foi colocada no tubulão de vapor se vaporiza, sobra na parte de baixo do tubulão uma água mais concentrada e mais densa do que a água do tubulão de água, que se localiza abaixo do tubulão de vapor. A água mais densa do tubulão de vapor então desce para o tubulão de água em função de sua maior densidade e a água desse tubulão de água acaba subindo ao tubulão de vapor, através de um processo conhecido como sifão térmico, ou termossifão.

Como se deseja produzir vapor superaquecido e não vapor saturado nas caldeiras para posterior uso na geração de eletricidade, são instalados superaquecedores na parte superior das caldeiras de força. Com isso, continua-se o aquecimento, agora não mais da água, mas do próprio vapor. Os superaquecedores são constituídos por feixes de tubos em serpentinas, de forma a aumentar a superfície para trocas térmicas do vapor interno com os gases quentes da parte alta da caldeira.

Após passar pelos superaquecedores, os gases quentes ainda possuem bastante calor para ser trocado. Para aproveitar ainda esse calor disponível, esses gases aquecem outras serpentinas gigantescas que são os economizadores e os pré-aquecedores. A função desses sistemas é o aquecimento da água que chega à caldeira, em temperaturas que podem ser de 50 a 90°C em sistemas convencionais, ou em temperaturas bem mais altas (acima de 120°C) em situações de sistemas de recuperação do calor perdido pelas turbinas.

De uma forma simplificada do que foi apresentado, pode-se dizer que uma caldeira de biomassa do tipo aquatubular é constituída dos seguintes componentes básicos estruturais:

- Fornalha ou câmara de combustão;
- Bicos ou queimadores que injetam o combustível;
- Tubulações de parede contendo água;
- Tubulações de serpentinas contendo vapor;
- Tubulão de água;
- Tubulão de vapor;
- Coletores de cinzas;
- Superaquecedores de vapor;
- Sopradores de fuligem para limpeza interna;
- Ventiladores para injeção de ar de combustão;
- Economizador e pré-aquecedor de água de alimentação;
- Bomba de pressurização da água para o interior da caldeira;
- Chaminé de exaustão dos gases;
- Ventilador induzido para forçar a expulsão dos gases pela chaminé;
- Válvulas de segurança e de alívio de pressão;
- Sistemas de abatimento de particulados (precipitador eletrostático, ciclones separadores de partículas, filtros de mangas, etc.);
- Instrumentação e controles; etc.

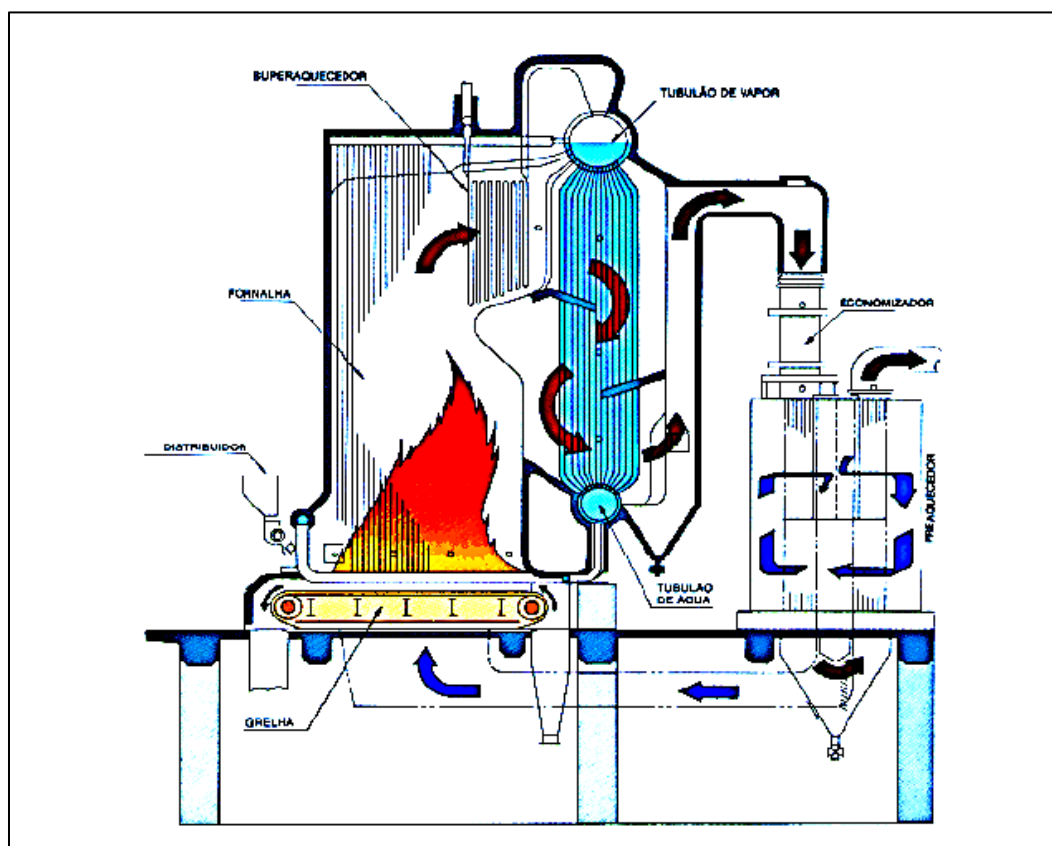


Para maior e melhor entendimento da estrutura e componentes de uma caldeira de biomassa florestal, recomendamos a leitura do seguinte documento preparado pela International Paper do Brasil:

**Caldeira de biomassa - Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio.** International Paper do Brasil. Prêmio FIESP de Mérito Ambiental. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. 20 pp. (2015)

<http://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=192787>

### Tipos de caldeiras aquatubulares utilizadas com biomassa florestal



Vista de uma caldeira a grelha em leito fixo  
Fonte do desenho: Macedo, 2006

## ➤ Caldeiras de grelha em leito fixo

Os processos mais tradicionais de queimar combustíveis baseados na madeira energética são aqueles que se valem de uma fornalha que sustenta um leito fixo de queima com a adição do combustível sobre uma grelha, com a retirada das cinzas através dessa grelha móvel.

As grelhas são espécies de chapas perfuradas onde a biomassa é depositada para ser queimada. Em geral, as grelhas não são fixas, recebem alguns movimentos de rotação ou de vibração, para favorecer que as partículas de cinzas ("cinzas de fundo da fornalha") caiam e possam ser removidas. Outra parte maior das cinzas geradas na combustão são as "cinzas volantes", que sobem com os gases de combustão e devem ser recolhidas em sistemas de abatimento de particulados antes dos gases saírem pela chaminé.

O ar de combustão é adicionado em parte pela parte de baixo da grelha (ar primário) e em outra parte colocada logo acima da zona de combustão (ar secundário).

Normalmente, a biomassa é alimentada continuamente na forma de cavacos ou de casca fragmentada, da mesma forma que o ar de combustão, que tem adição também contínua nos pontos de adição já mencionados.

As temperaturas de trabalho variam entre 850 a 1.000°C para minimização da formação de NOx e ao mesmo tempo, impedir que ocorra a fusão das cinzas que se depositam sobre a grelha. Um problema que pode acontecer com as cinzas é a vitrificação das mesmas, o que pode ocorrer quando o teor de areia (sílica) for demasiadamente alto na biomassa.

As caldeiras a grelha mais antigas utilizam toretes de lenha como biomassa combustível, mas os rendimentos térmicos são inferiores e a combustão é significativamente mais lenta.

As eficiências térmicas brutas desse tipo de caldeira podem estar entre 65% até 90%, em função de detalhes conceituais de engenharia, idade tecnológica e qualidade do combustível.



Casca combustível



Lenha combustível

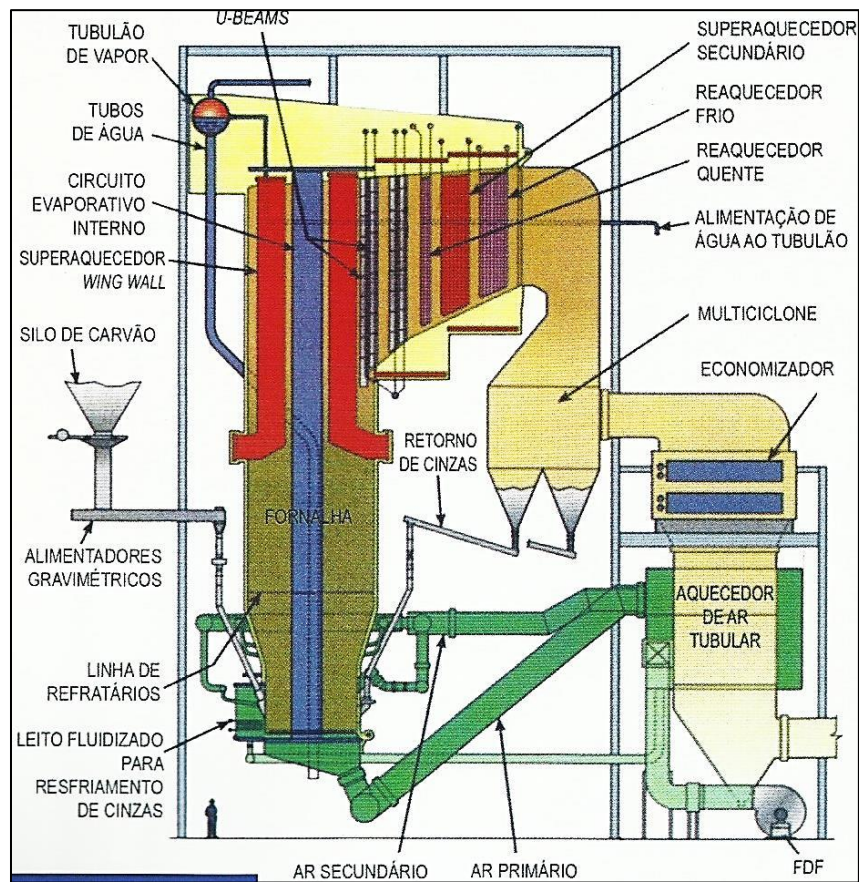


Casca fragmentada - Um combustível renovável muito usado no setor



Cavacos de madeira contendo altas proporções de casca

➤ **Caldeiras de leito fluidizado**



Caldeira de leito fluidizado circulante  
Fonte da imagem: HPB – B&W

A ideia básica para a combustão em leito fluidizado consiste na fluidização do leito de queima, ou seja, a colocação das partículas a serem queimadas em suspensão no meio gasoso.

As partículas do leito são geralmente constituídas de areia inerte não inflamável e das cinzas formadas pela própria queima da biomassa. Conforme a areia for sendo contaminada com cinzas, de tempos em tempos ela deve ser trocada (troca do leito).

O leito funciona como uma espécie de reservatório de calor, pelo seu forte aquecimento. Com isso, se consegue uma maior estabilidade da queima.

O combustível pode ser adicionado acima ou no interior desse leito quente. Dependendo da velocidade de injeção do ar de combustão e das dimensões das partículas de areia, o leito de combustão pode ter diferentes comportamentos.

As caldeiras de leito fluidizado têm-se tornado bastante populares para queima de biomassas florestais.

Em geral, existem algumas vantagens a elas atribuídas em relação às caldeiras de leito fixo:

- ☆ Maior flexibilidade em relação ao tipo e qualidade do combustível biomássico;
- ☆ Maior tolerância à variação das partículas da biomassa (cavacos, lascas e fragmentos lenhosos e de casca);
- ☆ Altas eficiências térmicas (acima de 90%);
- ☆ Menores emissões de óxidos de nitrogênio e de enxofre;
- ☆ Menores investimentos em sistemas de abatimento de óxidos de enxofre, causadores de chuvas ácidas;
- ☆ Maior versatilidade operacional.

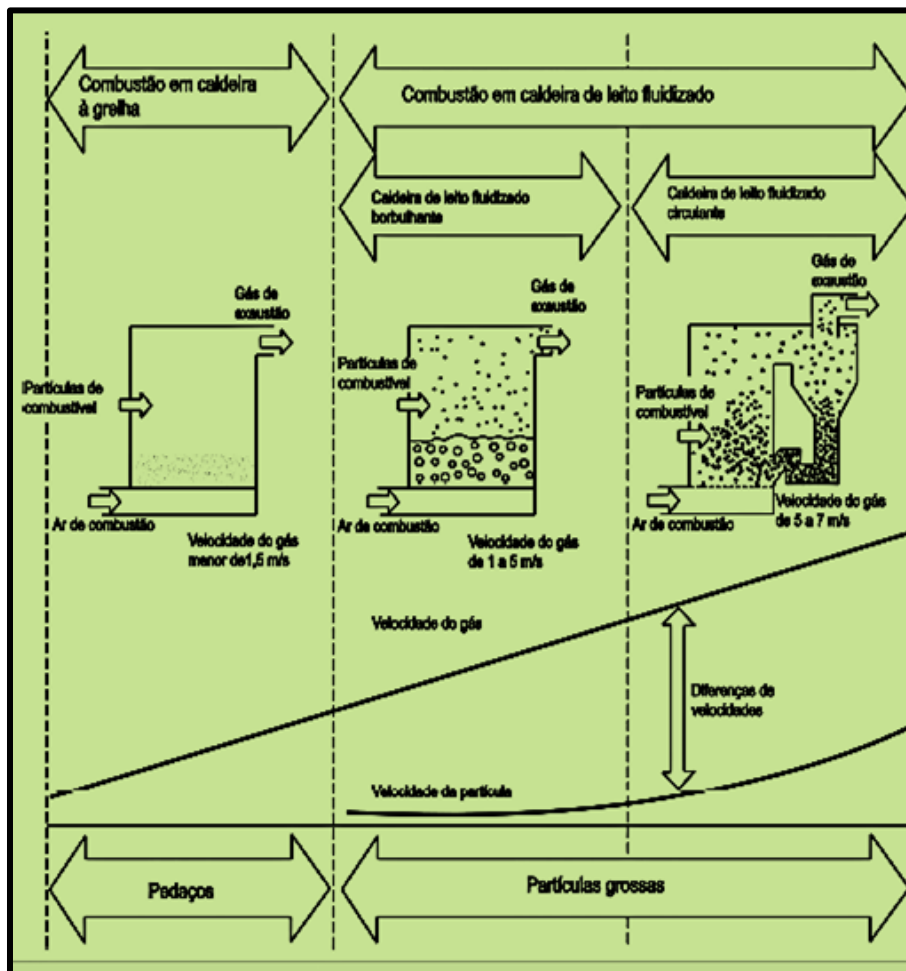
Existem diversos tipos de caldeiras de leito fluidizado, sendo as mais usuais as que são dos conceitos de leito fluidizado circulante e leito fluidizado borbulhante.

As **caldeiras de leito circulante** possuem grãos de areia bem finos (0,2 a 0,4 mm) que formam um conjunto circulante junto com as

partículas do combustível, melhorando assim a queima do mesmo, pois o leito está bastante quente e o combustível tem facilidade para se aquecer, perder umidade e se queimar de forma intensa.

Na saída da fornalha, os grãos de areia, agora contaminados com as cinzas do combustível recém-queimado, são recolhidos em um sistema de ciclone separador. A seguir, essas partículas do leito são de novo realimentadas na fornalha. Tudo isso acontece de forma contínua, sempre entrando combustível, ar de combustão e partículas do leito.

Ocorre uma intensa mistura do combustível com o ar de combustão, sendo que ambos ficam mais ou menos aprisionados no leito para melhorarem seu contato e as reações de combustão. Entretanto, essa caldeira pode ser sensível a excesso exagerado de ar de combustão, que pode arrastar demasiadamente rápido esse leito circulante.



Tipos de fluidização em caldeiras  
 Fonte da imagem adaptada: Macedo, 2006

Outro tipo de caldeira de leito fluidizado é aquele baseado em um **leito de fluidização borbulhante**, onde as partículas de areia são ligeiramente maiores (0,5 a 1 mm) e não são carregadas para fora da fornalha, sendo que a combustão ocorre logo acima do leito de areia, que se mantém em contínua agitação pela entrada de ar por baixo dele.

Em ambos os casos de leitos de fluidização, a forma e a eficiência do leito são governadas pelas velocidades dos gases de combustão e pelas dimensões das partículas de areia. As menores velocidades de injeção de ar de combustão acontecem nas caldeiras de leito fixo e as maiores nas caldeiras de leito fluidizado circulante, ficando as caldeiras de leito borbulhantes em posição intermediária em relação às velocidades do ar.

### **Emissões atmosféricas poluentes nos gases de exaustão das caldeiras de biomassa**



Os principais aspectos para controle na liberação de poluentes pelos gases de exaustão nas chaminés das caldeiras de biomassa são os seguintes:

- ☞ Material particulado, representado por partículas finas de cinzas volantes de origem mineral (sais residuais resultantes da constituição química da biomassa florestal) e por pequenas

partículas de material carbonizado (carvãozinhos e fuligens resultantes da queima incompleta da biomassa).

- ☞ Óxidos de nitrogênio (NOx), que são derivados ou da oxidação do próprio nitrogênio do ar de combustão (NOx térmico) ou derivados da queima de nitrogênio presente no combustível (NOx do combustível). A biomassa florestal, em especial as folhas das árvores possuem razoáveis quantidades de nitrogênio, que podem variar entre 0,1 a 0,4% na madeira e casca até 2% nas folhas dos eucaliptos. NOx é uma sigla genérica para englobar dois óxidos de nitrogênio: NO e NO<sub>2</sub>. Em geral, o NOx é expresso como NO<sub>2</sub>.
- ☞ Óxidos de enxofre (SOx), que são produtos da oxidação do enxofre presente nas biomassas vegetais. Apesar de reduzido teor nas biomassas em relação ao óleo combustível, o enxofre é um nutriente das plantas e existe em sua composição, e, portanto, nas biomassas combustíveis. Em geral, o SOx é expresso como SO<sub>2</sub>.
- ☞ Monóxido de carbono (CO), que ocorre devido à combustão incompleta de partículas ou gases voláteis da biomassa florestal, devida a alguma eventual falta de oxigênio ou a desbalanceamentos entre o combustível e o ar de combustão.
- ☞ Dioxinas e furanos (DBD e DBF – Di-benzo-dioxinas e Di-benzo-furanos), que são poluentes orgânicos persistentes que se formam em todos os processos de combustão na natureza, desde que existam condições de temperatura propícias na queima e presença do cloro na constituição do biocombustível. A biomassa florestal contem cerca de 400 a 800 ppm de cloretos em sua constituição, sendo maior nas regiões próximas ao mar.

Os dois fatores operacionais mais críticos a gerenciar para se atingirem com sucesso as recomendações de baixos níveis de poluentes atmosféricos são: teor de oxigênio residual nos gases da combustão e teor de nitrogênio nos combustíveis.

Como o excesso de ar nas caldeiras não pode ser exagerado, senão haverá maior arraste de material particulado e menor eficiência térmica, aos operadores resta a missão de controlar muito bem isso tudo. Para tanto devem ter equipamentos online com aferida confiabilidade para fazerem os ajustes necessários na combustão.



Portanto, o excesso de ar de combustão deve ser aquele exato que venha a favorecer o equilíbrio:

- ☆ Ser suficientemente baixo para minimizar as emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>;
- ☆ Ser suficientemente baixo para minimizar o arraste de material particulado e evitar perdas significativas na eficiência térmica da caldeira;
- ☆ Ser suficientemente alto para destruir o monóxido de carbono e promover a boa combustão da matéria orgânica da biomassa combustível.

Atualmente, as principais restrições impostas pela legislação às caldeiras de biomassa no Brasil são as relacionadas ao teor de particulados, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

Como o teor de enxofre nas biomassas é bastante baixo, em geral não se tem seu controle como crítico, embora existam órgãos de licenciamento que exijam atendimentos a certos níveis variados de conformidade.

As emissões de particulados são as mais críticas, pois os limites são bem rígidos. O objetivo é minimizar a ocorrência de partículas poluindo o ambiente das comunidades circunvizinhas à caldeira.

As restrições mais usuais para material particulado estão na ordem de 70 a 130 mg de material particulado por Nm<sup>3</sup>, em termos de gases tendo seu volume corrigido para 8% de oxigênio.

As restrições gerais do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente para fontes fixas de emissões de poluentes atmosféricos em processos de combustão com derivados de madeira como biomassa combustível mostram limites de 1.300 mg/Nm<sup>3</sup> para o monóxido de carbono, com resultados corrigidos para 8% de oxigênio e de 650 mg/Nm<sup>3</sup> para os óxidos de nitrogênio, expressos como NO<sub>2</sub>, também com correções dos volumes para 8% de oxigênio.

Embora não existam recomendações para emissões de dioxinas e furanos para grande parte das caldeiras de combustão de biomassa no Brasil, sugerimos que sempre se estejam atentos às recomendações da UNEP – United Nations Environmental Programme, em seu famoso

"Dioxin Toolkit", de 2005. Em relação à poluição aérea de dioxinas e furanos em processos de combustão em fontes fixas, as recomendações do "toolkit" da UNEP para o setor de celulose e papel são as seguintes, expressas em ETT (Equivalente Tóxico Total):

Caldeiras de biomassa:

0,07 a 0,2  $\mu\text{g}$  ETT/a.d. t polpa (tonelada de polpa seca ao ar)

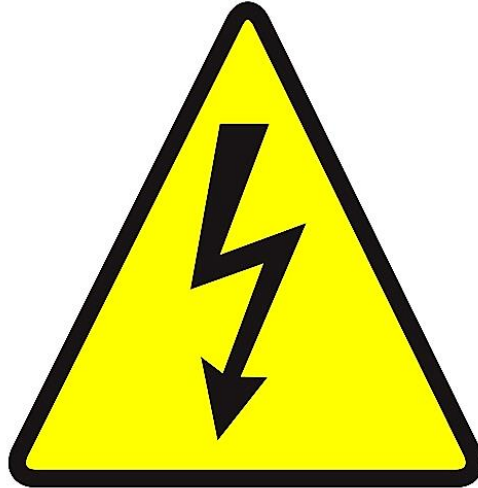
50  $\mu\text{g}$  ETT/tonelada de cinzas volantes ou de fundo de fornalha

Caldeiras de recuperação queimando licor preto kraft:

0,07  $\mu\text{g}$  ETT/a.d. t polpa (tonelada de polpa seca ao ar)



## GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM BASE NA BIOMASSA FLORESTAL



As biomassas florestais e da cana de açúcar têm-se revelado como fontes relevantes de biocombustíveis renováveis para geração de eletricidade no Brasil. De acordo com o BEN – Balanço Energético Nacional de 2015 (Ano base 2014), editado pelo MME – Ministério de Minas e Energia, as biomassas responderam pela geração de 7,4% de toda eletricidade no País, o que correspondeu a uma capacidade instalada de 12.341 MW. As biomassas referidas no BEN como resíduos de madeira e lixívia (licor preto) responderam juntas pela capacidade nominal agregada de 2.143 MW da eletricidade gerada em termelétricas, sendo que a maior parte delas se constituiu de centrais privadas de geração de eletricidade e vapor. Dentre as biomassas, os grandes heróis são o bagaço de cana (9.881 MW de capacidade) e o licor preto ou lixívia das fábricas de celulose e papel (1.785 MW). Além disso, as biomassas vêm mostrando crescimento regular e constante como fonte de insumos energéticos para geração elétrica. Esse crescimento se apoia na grande alavancagem do crescimento do setor brasileiro de celulose de mercado, que tem crescido mais de 8% ao ano nas recentes décadas no País.

O setor brasileiro de celulose e papel gera eletricidade para consumo próprio e consegue ainda gerar excedentes para atuar como setor âncora em geração distribuída, abastecendo empresas situadas nas proximidades das centrais termelétricas geradoras. Também tem crescido a oferta e compartilhamento de seus excedentes em eletricidade através do sistema elétrico nacional.

As principais biomassas de origem florestal que suportam a sua significativa contribuição em eletricidade no Brasil são:

- φ Licor preto kraft ou lixívia negra residual do processo de polpação kraft;
- φ Lenha ou toras do tronco de árvores com ou sem a casca;
- φ Cavacos de madeira obtidos pela picagem de toras com casca da colheita de florestas plantadas;
- φ Resíduos florestais, tanto os gerados pelos próprios processos industriais (resíduos industriais) como resíduos comprados da indústria de conversão madeireira ou recolhidos de restos da colheita das florestas.

A biomassa florestal sempre foi um componente relevante na matriz energética brasileira, inicialmente mais como fonte de obtenção de calor e vapor, para agora se converter em fonte significativa para abastecer centrais termelétricas.

Até o momento, o aproveitamento energético da biomassa florestal aproveita rotas tecnológicas simples, como a combustão direta para geração de vapor superaquecido, que por sua vez alimenta turbinas a vapor para geração de eletricidade de origem térmica. Entretanto, existe forte tendência para o crescimento de outras tecnologias de geração de eletricidade a partir das biomassas florestais, em unidades que vêm sendo denominadas de biorrefinarias de base florestal.

Uma das propostas das biorrefinarias seria a produção de gás de madeira, através de sua gaseificação. O gás produzido pode abastecer caldeiras a gás e produzir eletricidade por essa rota, porém ainda são em casos esporádicos no País, apesar de ser uma tecnologia comprovada e razoavelmente utilizada em países como Suécia, Alemanha, Finlândia, Canadá e Estados Unidos da América.

Dessa forma, podemos simplificadamente dizer que existem dois grupos de tecnologias que podem se tornar as principais rotas para geração de eletricidade a partir da biomassa florestal:

- ❖ Rotas tecnológicas baseadas em ciclos de vapor (ciclo Rankine), que consistem na queima direta da biomassa em caldeiras para produção de vapor superaquecido, o qual moverá potentes turbinas a vapor e geradores para produção de eletricidade;
- ❖ Rotas tecnológicas baseadas na gaseificação da biomassa para usar o gás formado no abastecimento de turbinas a gás (ciclo a gás, ou ciclo Brayton).

Existem outras alternativas tecnológicas em evolução, como a produção de bioóleo pela pirólise rápida da biomassa florestal. O bioóleo é um biocombustível líquido, mas que também pode ser considerado uma excelente alternativa para ser destilado e fracionado para produção de biomateriais mais valiosos do que a energia que ele possa conter. Trata-se, portanto, de uma rota ainda incerta quanto à real contribuição de geração de um combustível líquido derivado da madeira, em uma rota tecnológica, que às vezes é referida como “liquefação da madeira”.

A produção de eletricidade no Brasil ocorre principalmente através dos seguintes tipos de empresas:

- ✓ Empresas concessionárias para atendimento do serviço público de geração de eletricidade;
- ✓ Produtores independentes de eletricidade para consumo próprio e venda de excedentes, ou através de geração distribuída ou pela introdução de energia no sistema elétrico nacional, em geral para se favorecerem do sistema compensatório disponibilizado pelo mesmo.

O sistema de compensação de energia elétrica é baseado no seguinte princípio:

“A energia elétrica que foi efetivamente injetada no sistema por uma empresa ou por um empresário individual fica cedida ao sistema como um empréstimo gratuito, mas que poderá ser posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica pela mesma empresa que inseriu a eletricidade em outra localidade, desde que possua o mesmo CNPJ ou CPF”.

É o caso, por exemplo, de uma empresa que insira energia elétrica no sistema elétrico no estado do Mato Grosso do Sul e vá

consumir a eletricidade, compensando o empréstimo, em outros estados, como Espírito Santo ou São Paulo.

Outra forma de comercialização de eletricidade que vem sendo muito praticada é através do que se chama de "geração distribuída", que consiste no consumo de parte pelo próprio produtor da eletricidade e de outra parte por empresas terceiras localizadas nas proximidades da central geradora. Trata-se de um sistema bastante interessante, pois não exige grandes investimentos em redes de distribuição, bem como são reduzidas as perdas elétricas com essa distribuição, o que é comum em redes de distribuição de longas distâncias. Os impactos ambientais são também muito menores, ao se adotar esse tipo de geração e distribuição.

Em geral, na geração distribuída existe uma empresa âncora que possui a central termelétrica, sendo que essa empresa consome parte e distribui outra parte, vendendo-a como produtos energéticos a uma ou mais empresas consumidoras próximas. Em geral, esse arranjo dá origem aos chamados "*clusters* florestais", ou arranjos produtivos locais.

O setor brasileiro de celulose e papel tem desfrutado com intensidade dessas alternativas, tanto da geração distribuída, como do sistema compensatório de eletricidade.

Ainda que existam diferenças tecnológicas conceituais entre as diversas unidades de produção de celulose de mercado, o certo é que as modernas fábricas de celulose de mercado são praticamente consideradas como autossuficientes na geração de vapor e eletricidade, conseguindo obter esses dois energéticos valiosos para elas através de processos de cogeração e/ou condensação.

O vapor costuma ser completamente utilizado pela empresa geradora (ou por alguma outra empresa do arranjo produtivo local) e o excedente em eletricidade é comercializado pelas duas formas mencionadas.

As turbinas a vapor dessas centrais costumam ser de extração, condensação e contrapressão, o que permite obter vapores de menores níveis de pressão por cogeração (13 ou 14 bar e 3 ou 4 bar), eletricidade e condensado de água quente para retornar ao processo de geração de vapor nas caldeiras.

As modernas fábricas de celulose kraft têm sido instaladas com capacidade de geração de eletricidade com potências acima de 100 a 150 MW, operando com pelo menos 2 ou 3 turbogeradores.

Apesar de se falar muito em plantações energéticas para suprimento de biomassa florestal para alimentação dessas centrais termelétricas, a maior parte da energia elétrica gerada pelo setor de

base florestal ainda se apoia no licor preto kraft e nos seus próprios resíduos lenhosos gerados em seus processos e florestas. Como resíduos dos processos industriais podem ser citados: cavacos de dimensões inadequadas, serragens, pós de lixamento, cascas removidas das toras, etc. Como resíduos florestais existem as chamadas toras ou toretes finos (de pequenos diâmetros), galhos grossos, touças ou tocos removidos, etc.

É por essa razão que existe uma grande diversidade nas centrais termelétricas do setor de base florestal, algumas de muito pequeno porte (1 a 10 MW), diversas de médio porte (10 a 50 MW) e outras operando com gerações entre 100 a 150 MW. Algumas dessas centrais termelétricas produzem apenas eletricidade, outras cogeram eletricidade e vapor, bem como existem pequenas fábricas no setor papelero e de base florestal que produzem apenas vapor em caldeiras para aplicações nos seus processos.

No caso do setor de base florestal, a geração de eletricidade é usualmente realizada através de:

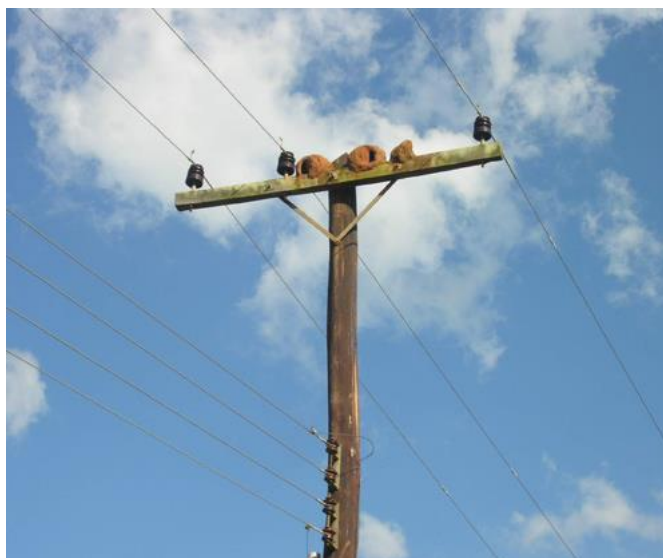
- ❖ Pequenas centrais de hidroeletricidade;
- ❖ Centrais termelétricas que possuem entre 10 a 150 MW de potência para geração apenas de eletricidade;
- ❖ Centrais termelétricas entre 10 a 150 MW de potência para cogeração de vapor e eletricidade, de forma simultânea. O vapor costuma ser utilizado no arranjo produtivo em sua totalidade e os excedentes em eletricidade são vendidos ou cedidos ao sistema elétrico nacional.

As eficiências de conversão da energia da biomassa em eletricidade e vapor são fortemente dependentes da escala de produção, da pressão/temperatura do vapor superaquecido e da adoção ou não de processos de cogeração (e em que intensidade eles são praticados). Algumas empresas são totalmente baseadas em cogeração, mas muitas adotam sistemas mistos: parte da eletricidade é cogorada com extração de vapor de processo e parte é obtida apenas com turbinas de condensação, com produção de eletricidade e resultando em um condensado residual que retorna para a caldeira para nova produção de vapor superaquecido.

A taxa de cogeração depende fundamentalmente da quantidade requerida de vapor para consumo local, uma vez que é muito difícil se

vender vapor ou extrai-lo como um produto para ser comercializado a mais longas distâncias.

Tanto as caldeiras para queima da biomassa florestal, como as turbinas para geração e cogeração são praticamente todas produzidas no País, com exceção de alguns componentes tecnológicos mais críticos e algumas instrumentações. Todos esses equipamentos têm incorporado avanços tecnológicos que os têm tornado mais eficientes e com melhores rendimentos e continuidade operacional. Pode-se dizer que o Brasil domina essas tecnologias e consegue assim se auto abastecer em termos de unidades industriais de geração de vapor e eletricidade.



### **Ciclo Rankine ou ciclo a vapor**

A maior parte da eletricidade produzida em centrais termelétricas alimentadas com biomassa florestais se fundamenta no uso de água/vapor como fluidos de transporte e armazenamento de energia, através do que se chama de ciclo a vapor ou ciclo Rankine, em homenagem ao físico William John Rankine. Existe uma grande diversidade na aplicação desse ciclo, mas em quaisquer dos sistemas utilizados, a principal característica do mesmo para produção apenas de eletricidade é o baixo rendimento da conversão da energia primária útil do combustível em eletricidade. Esses rendimentos costumam estar



entre 15 a 35% (na melhor das melhores hipóteses). As pequenas centrais termelétricas, que trabalham com vapores superaquecidos de mais baixas pressões são as mais penalizadas, com os menores rendimentos de conversão.

Escala de produção e pressão/temperatura do vapor superaquecido são os principais fatores que permitem alguma elevação do rendimento do ciclo a vapor. A melhor forma de melhorar os rendimentos globais desse ciclo é pela adoção da cogeração e evitar ao máximo a condensação do vapor liberado pelas turbinas. Também as concepções tecnológicas das turbinas e caldeiras podem colaborar para melhorar ou piorar os rendimentos globais do ciclo.

De qualquer forma, por mais que tenhamos eficiências e rotas tecnológicas no estado-da-arte, o ciclo Rankine como tal foi desenhado para produção apenas de eletricidade pelo ciclo a vapor não consegue oferecer rendimentos acima de 35%. Os avanços tecnológicos têm então surgidos mais na elevação dos rendimentos das caldeiras que queimam a biomassa (elevações dos antigos rendimentos de 65% para os atuais 90%) e nas turbinas.

Por mais que se melhorem as caldeiras e as turbinas, o grande destruidor de rendimento é a necessidade de condensar o vapor expelido pelas turbinas. Com essa condensação, muita da energia armazenada pelo vapor acaba não sendo aproveitada, o que traz o rendimento do ciclo a vapor drasticamente para baixo. Observar que um vapor superaquecido com 800 Mcal/t de entalpia tem em sua energia armazenada mais de 2/3 dela como calor latente (para mudança de estado da água para vapor e vice-versa), por isso a razão desses baixos rendimentos.

Uma das formas de se minimizar esse problema de baixos rendimentos consiste na cogeração, que ao invés de provocar a condensação do vapor, permite reduzir sua pressão e extrair vapores de processo com características adequadas para utilizações industriais próximas à central termelétrica. Com isso, consegue-se aumentar o rendimento total do ciclo Rankine, pela possibilidade de se somar ao rendimento elétrico (geração de eletricidade) um rendimento térmico (geração de vapor). Isso será mais discutido na seção seguinte desse capítulo do Eucalyptus Online Book.

O ciclo Rankine consiste então de um ciclo de potência apoiado no uso da água e vapor, que visa a obter:

- ✓ Energia elétrica;

- ✓ Energia térmica (vapor extraído para utilização);
- ✓ Energia mecânica (para rotação do eixo da turbina);
- ✓ Água quente (condensado) para retorno ao processo de geração de vapor superaquecido.

O ciclo ideal de Rankine inclui diversos sub-processos, onde a água se converte em vapor superaquecido e o vapor em água quente, novamente, para ser reintroduzida novamente no sistema, por isso o nome de ciclo a vapor.

A sua concepção é extremamente inteligente e segura, porém são os rendimentos do ciclo que não colaboram muito, já que grande parte da energia no sistema água/vapor se trata de calor latente de vaporização/condensação. Se essa energia não puder ser aproveitada em sistemas de trocas térmicas ou uso direto do vapor para aquecimentos e processos evaporativos, estaremos jogando fora a maior parte da energia contida no vapor superaquecido.

O ciclo Rankine é constituído então das seguintes etapas ou sub-processos:

1. Compressão da água para alimentação de uma caldeira através de uma possante bomba compressora. O bombeamento consome energia e ajuda a reduzir ainda mais o rendimento líquido do ciclo.
2. Transferência do calor liberado pela combustão da biomassa energética para a água pressurizada nas tubulações das caldeiras para que ela seja convertida em vapor superaquecido;
3. Expansão do vapor superaquecido através da turbina, que permite a conversão da energia térmica do vapor em energia mecânica no eixo da turbina. Com essa expansão, tanto a pressão como a temperatura do vapor superaquecido são reduzidas e parte do calor desse vapor se converte em energia mecânica.
4. Transferência da energia mecânica do eixo da turbina para geradores de eletricidade, produzindo-se assim a eletricidade desejada.

5. Encaminhamento do vapor residual da turbina para condensação até a formação de água quente (condensado), de forma a se resgatar a água quente para ser reintroduzida na etapa 1, através da compressão pela bomba, fechando-se assim o ciclo.

A concepção desse ciclo energético é muito mais impactante sobre o rendimento global do ciclo do que os rendimentos individuais das caldeiras e turbinas. Por mais que otimizemos os rendimentos das caldeiras e turbinas, caso se utilizar do ciclo com condensação do vapor residual liberado da turbina, o rendimento será definitivamente prejudicado. Apesar disso, o ciclo Rankine é bastante utilizado com turbinas de condensação. A principal razão é o baixo custo da biomassa florestal ou do bagaço de cana. Com isso, mesmo que se tenham baixos rendimentos energéticos no ciclo Rankine, ele tem sido bastante útil para gerar eletricidade a baixo custo e para eliminar alguns resíduos que se acumulariam nas fábricas e usinas, caso não fossem queimados.

Na cogeração, o vapor residual de saída da turbina pode ser extraído em condições de ser utilizado industrialmente, o que pode melhorar significativamente o rendimento global do ciclo. Também, o condensado gerado em turbinas de condensação deve ser retornado ao processo novamente, caso contrário o rendimento se torna ainda pior.

Apenas para se observar o que acontece com a entalpia do sistema água+vapor, observem os seguintes dados:

- ✓ Entalpia da água quente na bomba de alimentação da caldeira = 50 a 100 Mcal/t
- ✓ Entalpia do vapor a cerca de 90 a 100 bar = 800 a 810 Mcal/t
- ✓ Entalpia do vapor extraído da turbina = 700 Mcal/t
- ✓ Entalpia do vapor extraído para uso industrial = 640 - 670 Mcal/t
- ✓ Calor latente do vapor extraído = 470 Mcal/t na pressão de extração como vapor saturado

Atualmente, com o aperfeiçoamento do fechamento de circuitos de água e calor, a água de alimentação do economizador das caldeiras de força, já pode estar sendo oferecida com temperaturas de 115 a 150°C, o que se consegue com a recuperação de calor do vapor extraído das turbinas, que pode estar com pressões de 20 a 25 bar.

Outro uso para o vapor residual das turbinas pode ser o aquecimento do ar quente de combustão, que necessita ser adicionado à

fornalha da caldeira de combustão para suprimento do oxigênio comburente. Em caldeiras de idades tecnológicas mais recentes, esse ar pode ser aquecido até 105°C, portanto, bastante mais eficiente do que os ares de combustão com temperaturas de 30 a 40°C em caldeiras de concepção tecnológica de décadas passadas.

Com águas e ares mais quentes sendo injetados ao sistema da caldeira de força, consegue-se pelo menos evitar que se perca calor que pode ser útil e que torne mais eficiente a operação da caldeira de gerar vapor superaquecido.

Com água de alimentação mais quente, pode-se agregar calor em maior quantidade de água, a partir da mesma quantidade de energia do combustível, o que torna o processo mais eficiente no uso da energia do combustível. Isso significa algum ganho adicional no rendimento térmico da caldeira.

Outra forma que se está praticando nas caldeiras mais novas que operam no ciclo Rankine consiste em se elevar a temperatura e a pressão do vapor superaquecido (SHS – “Super Heated Steam”). Isso permite oferecer mais energia para uso das turbinas pela mesma quantidade de peso de vapor, o que tem resultado em aumentos dos rendimentos elétricos e térmicos das turbinas.

Além do problema de baixos rendimentos do ciclo a vapor, também existem as perdas de energia nas redes de distribuição de eletricidade, nos transformadores, nos painéis elétricos, etc. Com isso, mesmo com as melhores intenções e tecnologias, o rendimento final da geração elétrica acaba ficando em cerca de 25%; ou seja, da energia primária útil oferecida pelo combustível à caldeira de força, apenas 25% dela consegue chegar ao usuário final para ser utilizada como eletricidade pelo consumidor.

São por essas e outras razões que o consumo de biomassa florestal para geração de eletricidade varia bastante e que existem oportunidades a serem perseguidas para melhoria disso, principalmente através da cogeração (obtendo além da energia elétrica também energia térmica) e da qualidade da biomassa florestal.

Em geral, existem índices de consumo de biomassa florestal por unidade de geração elétrica. Esses índices são muito variados, pois podem ser alterados pela eficiência energética das caldeiras e das turbinas, pela qualidade da biomassa (teor de umidade e densidade energética), pela qualidade do vapor superaquecido, pelas perdas nos processos de conversão e de distribuição, pelo tipo de turbina, etc.

Costuma-se dizer que se necessita de algo como 1 a 1,5 toneladas de “lenha” ou biomassa úmida com cerca de 30% de umidade por MWh efetivamente gerado.

Vejam com esses dados, quais os rendimentos de geração de eletricidade obtidos, através dos exemplos numéricos 08 e 09:

**Exemplo 08:**

Consumo específico de lenha de 1 tonelada a 30% de umidade por MWh gerado:

1 t lenha a 30%U equivale a 2.870 Mcal/t a 30%U (para um poder calorífico inferior de 4.400 Mcal/t a.s.)

2.870 Mcal/t equivalem a 3,33 MWh pela mera conversão de unidades de energia

Rendimento para 1 MWh gerado por alimentação de 3,33 MWh pela biomassa combustível = **30%**

**Exemplo 09:**

Consumo específico de lenha de 1,5 toneladas a 30% de umidade por MWh gerado:

1,5 t lenha a 30%U equivale a cerca de 4.305 Mcal

4.305 Mcal equivalem a 5 MWh pela mera conversão de unidades de energia

Rendimento para 1 MWh gerado por alimentação de 5,0 MWh pela biomassa combustível = **20%**

São valores de rendimentos elétricos e de consumos de biomassa que em geral são obtidos na vida rotineira através do ciclo a vapor, mas que podem ser piores do que isso, quando a biomassa estiver muito úmida ou os rendimentos das caldeiras forem muito baixos, como veremos mais adiante nesse capítulo.

É comum também se expressar os consumos específicos de lenha por MWh em termos de biomassa ou “lenha” seca.

Vejam como ficariam nossos recém-apresentados exemplos 08 e 09:

Consumo específico de lenha equivalente a lenha seca a partir de 1 tonelada a 30% de umidade (70% secos) por MWh gerado e vice-versa:

1 t lenha a 30%U equivale a 0,7 t lenha absolutamente seca

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ t lenha } 30\%U & \text{-----} & 0,7 \text{ t a.s.} & \text{-----} & 1 \text{ MWh} \\ & & 1 \text{ t a.s.} & \text{-----} & X \end{array}$$

Geração específica base biomassa seca = **1,43 MWh gerado/t a.s. de lenha equivalente a uma lenha original úmida a 30%U**

... e inversamente:

Consumo específico base biomassa seca = **0,7 toneladas de lenha a.s. equivalente a uma lenha original com 30%Umidade/MWh gerado**

Consumo específico de lenha equivalente a lenha seca a partir de 1,5 toneladas a 30% de umidade (70% secos) por MWh gerado e vice-versa

1,5 t lenha a 30%U equivale a  $[0,7 \cdot (1,5)] =$

**1,05 t lenha absolutamente seca**

$$\begin{array}{rcl} 1,5 \text{ t lenha } 30\%U & \text{-----} & 1,05 \text{ t a.s.} & \text{-----} & 1 \text{ MWh} \\ & & 1 \text{ t a.s.} & \text{-----} & X \end{array}$$

Geração específica base biomassa seca = **0,95 MWh gerado/t a.s. de lenha equivalente a uma lenha original úmida a 30%U**

... e inversamente:

**Consumo específico base biomassa seca = 1,05 toneladas de lenha a.s. equivalente a uma lenha original com 30% Umidade/MWh gerado**

Observem que todos esses indicadores de produção ou consumo específico estão relatados para uma biomassa com 30% de umidade. Esse teor de umidade (ou teores de umidade menores do que 30%) não costumam ser tão usuais nas biomassas florestais. Em geral as termelétricas operam com maiores teores de umidade nas suas biomassas, entre 35 a 50% - o que prejudica ainda mais esses indicadores, como será demonstrado em diversos de nossos problemas resolvidos em uma das próximas seções desse capítulo.

Caso o teor de umidade da biomassa florestal fosse diferente de 30%, os valores de produção e consumo específico mudariam em relação aos obtidos para 30% de umidade. Isso acontece mesmo para os índices desenvolvidos para serem expressos com base em peso de biomassa seca. Isso porque parte da energia presente no combustível como poder calorífico inferior acaba sendo consumida para se ter o valor de poder calorífico útil. Quanto maior o teor de umidade da biomassa, maior será o consumo de calor para aquecer e evaporar essa água da umidade. Portanto, mesmo quando se expressarem os consumos específicos base peso de biomassa seca, os valores e as relações específicas de geração e consumo se alteram.

Para corroborar isso, veremos o que acontece quando utilizamos a mesma biomassa, que possua agora um teor de umidade de 50% e mesmos valores de poder calorífico inferior e de rendimento de conversão para eletricidade pelo ciclo Rankine. Nessas situações, vamos então considerar que o poder calorífico útil dessa biomassa a 50%U passaria a ser 1.900 Mcal/t de biomassa a 50%U. Para esse caso, o poder calorífico inferior dessa biomassa em termos de peso seco original será o mesmo usado anteriormente, de 4.400 Mcal/t seca.

Se considerarmos o rendimento do ciclo Rankine para essa biomassa sendo convertida em eletricidade de 30% (o mesmo valor do exemplo anterior com a biomassa a 30% de umidade), teríamos uma geração específica líquida de eletricidade de 0,662 MWh/t biomassa a 50%U. Logo, para se produzir um MWh de biomassa base úmida é necessário um consumo específico de 1,51 toneladas úmidas de biomassa a 50%U.

Caso se convertam esses indicadores para a base seca, ficaríamos com:

Geração específica = 1,324 MWh/t de biomassa absolutamente seca equivalente a uma biomassa original com 50% de umidade

Consumo específico = 0,755 t de biomassa base seca equivalente a uma biomassa original com 50% umidade

Comparativamente entre os dois exemplos de mesma biomassa denominada de "lenhas", mesmo rendimento de ciclo Rankine e apenas variando o teor de umidade se teriam como **exemplo 10**:

<b>Biomassa</b>	<b>"Lenha" 30%Umidade</b>	<b>"Lenha" 50%Umidade</b>
PCIinferior Mcal/t a.s.	4.400	4.400
PCÚtil Mcal/t úmida	2.870	1.900
Rendimento do ciclo a vapor Rankine	30%	30%
Produção específica eletricidade – base úmida - MWh/t úmida	1	0,662
Produção específica eletricidade – base seca – MWh/t a.s.	1,43	1,324
Consumo específico "lenha" – base úmida – (t úmida/MWh)	1	1,51
Consumo específico "lenha" – base seca – (t a.s./MWh)	0,7	0,755



No próximo quadro apresentado a seguir como **exemplo 11**, estarei repetindo o mesmo tipo de cálculos, mas para um rendimento global do ciclo Rankine de 20% e não de 30%.

Rendimentos próximos a 30% são comuns em termelétricas de excelente geração tecnológica. Já rendimentos próximos a 20% são usuais em termelétricas com caldeiras e turbinas de menor capacidade de geração e com níveis tecnológicos menos avançados.

Até mesmo rendimentos tão baixos como 15% são encontrados para algumas termelétricas citadas em literatura.

<b>Biomassa</b>	<b>"Lenha" 30%Umidade</b>	<b>"Lenha" 50%Umidade</b>
PCInferior Mcal/t a.s.	4.400	4.400
PCÚtil Mcal/t úmida	2.870	1.900
Rendimento do ciclo a vapor Rankine	20%	20%
Produção específica eletricidade – base úmida - MWh/t úmida	0,667	0,441
Produção específica eletricidade – base seca – MWh/t a.s.	0,95	0,883
Consumo específico "lenha" – base úmida – (t úmida/MWh)	1,5	2,27
Consumo específico "lenha" – base seca – (t a.s./MWh)	1,05	1,132

Os dois quadros recém-apresentados acima como exemplos numéricos 10 e 11 nos mostram o que precisa ser mostrado: mesmo em base de matéria seca, quando a mesma biomassa contiver maior teor de umidade, o seu desempenho energético será pior – menos energia se

liberará na caldeira de força com sua queima e maiores serão os consumos específicos para se gerar a mesma quantidade de eletricidade.

O oposto também é muito claro – quanto mais seca estiver a biomassa, menores serão os consumos específicos de madeira e maiores serão as disponibilizações de energia na queima dessa biomassa.

Acredito que isso tenha ficado claro. Ou ainda não?

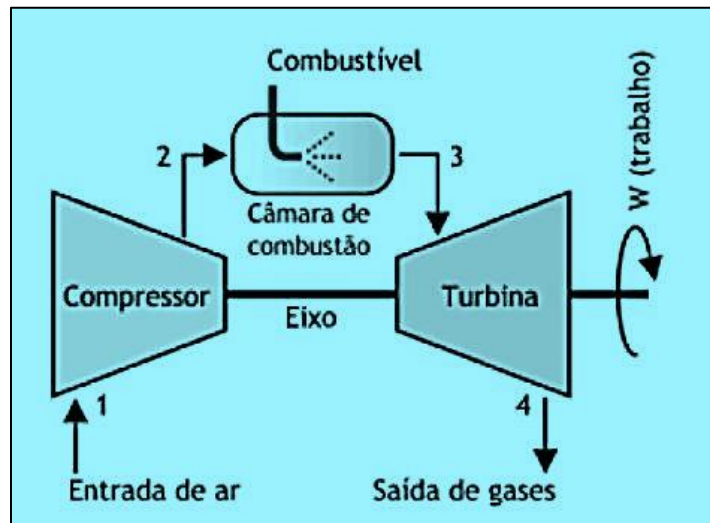
A partir desses inúmeros dados e exemplos práticos, é possível lhes apresentar algumas faixas de amplitudes para as variações dessas importantes relações de enorme praticidade para os que se valem da biomassa florestal para geração de eletricidade com base no ciclo a vapor:

- ☆ Uma tonelada de biomassa florestal úmida pode produzir entre 0,45 a 1 MWh em eletricidade
- ☆ Uma tonelada de biomassa florestal base seca pode resultar em eletricidade algo entre 0,75 a 1,5 MWh
- ☆ Um MWh de eletricidade requer para sua geração entre 1 a 2,3 toneladas de biomassa florestal base úmida
- ☆ Um MWh de eletricidade requer para sua geração entre 0,65 a 1,2 toneladas de biomassa florestal em base absolutamente seca

Tudo vai depender de três fatores básicos: poder calorífico útil da biomassa, teor de umidade da mesma e rendimento global do ciclo Rankine, que por sua vez depende das matérias-primas energéticas e do nível tecnológico dos equipamentos utilizados.

Os teores de umidade podem variar entre 25 a 50%; os poderes caloríficos úteis entre 1.750 a 3.300 Mcal/t tal qual e os rendimentos globais do ciclo a vapor entre 15 a 35%. Portanto, os diversos quadros apresentados ao longo desse capítulo acabam refletindo isso e podem colaborar para um melhor entendimento de todas as mágicas envolvidas nessa mágica geração de eletricidade.

## Ciclo Brayton & Ciclo Combinado



Fonte da imagem: Márcio Kimpara, 2014

O ciclo Brayton utiliza o ar e não a água como fluido de trabalho para receber, agregar e transferir energia. O princípio é simples: o ar atmosférico é comprimido através do uso de um compressor e alimenta uma câmara de combustão, onde também se injeta um gás combustível para ser queimado. Temos então na câmara de combustão: o combustível e o comburente, além de muito nitrogênio. Nessa câmara ocorre a ignição contínua desse gás combustível e o ar se aquece muito e se expande pelo aquecimento. Esse ar superquente e muito pressurizado é transferido para uma turbina a gás para que sua energia térmica seja convertida em energia mecânica para o eixo da turbina. Essa energia mecânica pode ser aproveitada como trabalho ou para acionar um gerador de eletricidade.

A eficiência de geração de eletricidade pelo ciclo Brayton é um pouco superior à do ciclo Rankine, mas também é baixa (mais próxima a 35%). Nesse ciclo não existe uma caldeira de força para gerar vapor e nem a necessidade de transferir um vapor que tem alto calor latente agregado. Porém existe a necessidade de um possante compressor que consome muita eletricidade para ser operado.

Os gases quentes residuais expelidos pela turbina podem ser descartados ou aproveitados ou para gerar vapor ou para aquecer água ou vapor, em um ciclo paralelo que se baseia no ciclo de Rankine. A combinação desses ciclos contendo ar e vapor como fluidos energéticos

dá origem ao que se chama de Ciclo Combinado, que pode apresentar níveis bem melhores de rendimentos. O vapor ou é produzido em uma caldeira normal, ou é aquecido pelos gases quentes e residuais expelidos pela turbina.

Quando o vapor for produzido a partir apenas dos gases quentes da turbina, nem sempre se podem obter altas temperaturas e pressões com ele. Por isso, em muitos casos o vapor se caracteriza mais como um vapor para utilização em processos do que um vapor superaquecido para alimentar uma turbina a vapor. Configura-se aqui e com isso, um tipo de cogeração no ciclo Brayton. Mesmo sem ter uma turbina a vapor, o ciclo Brayton pode permitir a geração de vapor e, com isso, melhorar o rendimento térmico e o rendimento global através dessa combinação água/vapor.

A esses tipos de sistemas de recuperação de calor para geração de vapor se costumam denominar de "Sistemas de Recuperação de Calor dos Gases" (*Heat Recovery Steam Generation*). A recuperação de calor se consegue pelo acoplamento de uma espécie de aquecedor/vaporizador para aquecer e vaporizar a água, convertendo-a em vapor de processo.

Dessa forma, o rendimento total do ciclo Brayton pode incluir um componente de geração elétrica (rendimento de 35%) e um componente de geração térmica de vapor (rendimentos entre 15 a 25%). Com isso, através dessa combinação podem-se atingir rendimentos globais em cogeração de 50 a 60%.

Um ciclo combinado típico consiste do uso simultâneo de turbinas a gás e a vapor, sem necessidade de se queimar mais biomassa em outra caldeira de força. Quem vai ser responsável pela produção de vapor para alimentar geradores especiais para gerar eletricidade a partir do fluido vapor serão os gases quentes liberados pelas turbinas a gás.

O ciclo combinado se vale de diversos tipos de turbinas para maximizar rendimentos: turbinas de contrapressão, turbinas de condensação e turbinas de extração. Através da extração de vapor de menores níveis de pressão e temperatura, conseguem-se vapores para usos em processos industriais como aquecimento, evaporação, secagem, etc. Esse último tipo de arranjo configura um típico Ciclo Combinado com Geração de Eletricidade e Vapor.

Conforme a demanda e a capacidade de produção de vapor através dessa combinação, pode-se aumentar o rendimento global desse ciclo para valores entre 60 a 85%, somados os rendimentos em eletricidade e em vapor de processo. Quanto maior for a quantidade de

vapor que possa ser aproveitado na instalação (ou instalações próximas), maior será a chance de se aumentar o rendimento energético total do ciclo.

Quando o consumo de vapor for muito alto e os gases aquecidos liberados pela turbina não forem suficientes para atender essa demanda em calor, a solução é acoplar ao ciclo uma caldeira de força, queimando biomassa combustível, por exemplo. Portanto, teremos água, ar, gás combustível, biomassa combustível e ar quente participando desse ciclo combinado, que estaria buscando, como deveria ser, a maior eficiência energética.

As eficiências podem ser melhoradas quando se trabalham com:

- Temperaturas e pressões elevadas de vapor;
- Maior produção possível de vapor através de cogeração;
- Menor umidade da biomassa florestal;
- Maior eficiência e poder calorífico do gás combustível.

O gás combustível do ciclo Brayton pode ser um gás fóssil (gás natural ou gás de petróleo) ou um gás obtido de fonte natural renovável (biogás/metano ou gás da gaseificação da biomassa).

Fica também evidente, que quando se utiliza o Ciclo Combinado, a própria geração de eletricidade pode ficar algo maior em relação ao que se obtém somente a partir do ciclo Rankine ou do ciclo Brayton, isoladamente. O rendimento elétrico pode atingir assim valores próximos ou acima de 40%, pois a partir de cada tonelada de combustível, maior pode ser a geração de eletricidade. São relatados valores de geração específica de 1,2 a 1,4 MWh/tonelada de biomassa a 35% Umidade, portanto, melhores do que os rendimentos dados como exemplos numéricos 10 e 11 anteriormente.

Evidentemente, dispendo-se de gases aquecidos residuais das turbinas a gás, muitas podem ser as utilizações dos mesmos: aquecimento de ar ou de água, secagem da própria biomassa, etc. Enfim, são inúmeras as oportunidades que se abrem para as empresas industriais e para as centrais termelétricas.



## COGERAÇÃO A PARTIR DA QUEIMA DA BIOMASSA DO EUCALIPTO



A produção de energia elétrica através tecnologias baseadas no ciclo a vapor é bastante comum, pois essas tecnologias são conhecidas, dominadas e confiáveis, representando com isso a certeza de obter eletricidade de forma segura para o investidor. Entretanto, essa geração apenas de eletricidade através do renomado ciclo Rankine tem como inconveniente a baixa eficiência de aproveitamento da energia presente primariamente no combustível. Apenas algo como 15 a 35% da energia disponível no combustível acaba sendo efetivamente convertida em eletricidade, com o agravante de que outras perdas ainda acontecem no processo de transmissão e distribuição dessa energia elétrica.

A eficiência do ciclo Rankine depende também das condições do vapor superaquecido utilizado (temperatura e pressão), mas mesmo nas melhores condições os rendimentos permanecem pouco acima de 30% e nada mais se ganha. Com isso, mesmo as plantas mais modernas de geração termelétrica funcionam com valores de rendimentos entre 25 a 30%.

Além das necessidades de mais altas pressões e temperaturas no vapor (por volta de 100 bar e 500°C), também a escala de produção influencia nos rendimentos quando se produz somente eletricidade através desse ciclo a vapor.

Dessa forma, é difícil para um investidor conhecer e aceitar o fato de que a maior parte da energia primária que ele compra como combustível vai acabar se perdendo e não se convertendo em eletricidade.

Uma das formas de se obter melhores rendimentos energéticos e aproveitar melhor a energia primária da biomassa florestal combustível é através do processo de cogeração, que vem sendo aplicado com enorme sucesso nos sistemas de ciclo a vapor. A indústria de celulose e papel conhece muito bem essas vantagens, pois a sua geração de eletricidade e vapor a partir do licor preto é basicamente um processo bem sucedido de cogeração.

A cogeração é um processo tecnológico aplicável com muito sucesso nos processos de geração elétrica a partir do ciclo a vapor. Ela pode ter também muita efetividade em sistemas combinados de geração elétrica em ciclos a vapor e a gás, operando simultaneamente.

A cogeração é um processo de produção simultânea de dois tipos de energia: térmica e elétrica, a partir de um mesmo insumo energético, que pode ser o vapor superaquecido.

Os sistemas de cogeração são também referidos como CHP (*Combined Heat & Power*) ou Sistemas de Produção Combinada de Calor e Força, ou de Vapor e Eletricidade.

Heat = calor ou vapor

Power = trabalho, força ou eletricidade.

A principal desvantagem na cogeração é que o vapor é um produto energético de baixa mobilidade, ele precisa ser utilizado localmente, pois tem dificuldades para ser transferido a longas distâncias. Portanto, a cogeração acaba sendo limitada em sua aplicação plena em função da quantidade de calor/vapor que se pode utilizar localmente. Se houver excedente de vapor, como é difícil se vendê-lo ou transportá-lo para longe, esse excedente acabará tendo que ser condensado, reduzindo os rendimentos globais da geração conjunta.

Por essas razões, o rendimento total da cogeração depende do equilíbrio entre a demanda simultânea de eletricidade e vapor. Caso o fator limitante seja a eletricidade, a cogeração pode avançar a seu limite, mas se o fator limitante for o vapor, a cogeração pode ser efetivada até o limite do consumo de vapor. Então, tudo que se produzir a mais de vapor para maior produção de eletricidade vai acabar tendo que ser condensado. É por essa razão que uma central termelétrica a vapor acaba tendo pelo menos dois ou três tipos de turbinas, sendo as mais usuais as turbinas de extração, de condensação e de contrapressão.

Já a sobra de excedentes de eletricidade não causa problemas e sim alegrias, pois excedentes de eletricidade costumam ter mercado em

qualquer parte do mundo. Em geral, essa eletricidade excedente é comercializada com empresas próximas à central termelétrica através de um processo que se denomina de geração distribuída. Caso os excedentes sejam muito grandes, algumas dezenas de MW de potência, existe também a possibilidade de introdução de eletricidade no sistema elétrico nacional, permitindo assim que essa energia seja compensada em outros locais, ou então seja apenas um processo venda simples em acordos de compra/venda.

A cogeração é um processo tecnológico muito utilizado pelo setor brasileiro de celulose e papel, que tem grandes demandas de vapor e eletricidade. Uma fábrica de celulose de mercado consome entre 5 a 6 toneladas de vapor por tonelada de celulose produzida e entre 0,5 a 0,6 MWh por tonelada de celulose. Os principais tipos de vapor de processo que se utilizam são os próprios para aquecimentos, evaporações e secagens, em geral com pressões entre 4 a 15 bar.

Nas fábricas de celulose pelo processo kraft, o principal combustível de biomassa florestal é o licor preto kraft. A cogeração é o processo dominante para as centrais termelétricas que se fundamentam nesse combustível. Isso porque há enorme demanda local nas fábricas de celulose e papel, tanto pela eletricidade como pelos vapores gerados para o processo de produção.

O licor preto kraft não é um combustível muito energético, pois seu poder calorífico inferior não é muito alto (entre 11,5 a 13,5 GJ/t base seca, ou então 2.750 a 3.250 Mcal/t base seca). Isso se deve ao fato de ser um combustível rico em elementos minerais (compostos químicos utilizados na polpação da madeira), que representam entre 35 a 50% do peso total de sólidos secos do licor. Entretanto, as eficientes caldeiras de recuperação conseguem recuperar entre 80 a 90% da energia útil que está presente no licor preto, transferindo então grande parte dessa energia para o vapor superaquecido que elas produzem.

A cogeração é atualmente vista como a melhor e mais fácil maneira de aumentar a eficiência térmica de um processo de produção de eletricidade pelo ciclo a vapor, pois ela pode resultar em eficientes rendimentos globais, tornando as centrais termelétricas mais ecoeficientes. Além disso, a cogeração pode ser classificada como uma tecnologia limpa. Ela também traz a enorme vantagem de reduzir os custos de produção, pois as perdas energéticas são bem menores e sua eficiência energética bem mais atrativa.

Outra vantagem significativa é que permite a uma empresa produtora e consumidora de eletricidade e vapor atingir um *status* de autossuficiência nesses dois produtos energéticos.



A cogeração ideal em termos de máximo rendimento é aquela que permite o equilíbrio pleno entre a produção de vapor e eletricidade, sem ocorrerem excedentes de um ou de outro desses energéticos. Mesmo que ocorram excedentes para a empresa âncora que possui a central termelétrica, se houver clientes diretos e vizinhos nos arranjos produtivos locais, esses rendimentos ótimos podem ser atingidos e mantidos.

As fábricas de celulose e papel estão sempre tentando buscar o melhor equilíbrio nos arranjos produtivos onde estão inseridas. Na maior parte das vezes, esses arranjos produtivos (*clusters*) são orquestrados desde a origem do projeto da fábrica ou empresa âncora, que na maior parte das vezes é a própria fábrica de celulose e/ou papel.

Esse equilíbrio envolve o correto balanço de produção e consumo de:

- ❖ Vapor superaquecido;
- ❖ Vapor de 13 a 14 bar;
- ❖ Vapor de 3 a 4 bar;
- ❖ Eletricidade para comercialização via geração distribuída;
- ❖ Geração de excedentes maiores de eletricidade para inserção no sistema elétrico nacional;
- ❖ Condensados derivados da condensação requerida para o vapor sem uso direto no *cluster* ou arranjo produtivo.

Apesar de o licor preto ser suficiente para geração de todas as demandas de vapor e eletricidade de uma fábrica estado-da-arte de celulose kraft branqueada, em geral esse tipo de fábrica também possui caldeira auxiliar que queima excedentes de biomassa florestal que sobram nos seus processos industriais (casca, cavacos de forma e dimensões inapropriadas, etc.)

Essa eletricidade adicional gerada nessas fábricas de celulose sempre pelo ciclo a vapor pode ter dois destinos:

- ❖ Venda ou empréstimo ao sistema elétrico nacional para ser compensada;
- ❖ Produção de papel dentro de limites aceitáveis e em projeto equilibrado para produção de eletricidade e vapor. Podem ser citados os exemplos da parceria entre as empresas

## Fibria/International Paper em Três Lagoas/MS e o caso da Suzano Papel e Celulose em Mucuri/BA.

Entretanto, nem todas as fábricas de celulose e papel são estado-da-arte tecnológico, por isso nem todas possuem excepcionais níveis de eficiências tecnológica e energética. Dessa maneira, existem diversas situações que são encontradas nesse universo das fábricas brasileiras de celulose de mercado, de produção integrada de celulose e papel e de produção apenas de papel (não integradas).

As situações mais comuns nas fábricas brasileiras que se valem do processo kraft para produção de celulose e papel são as seguintes:

- ⇒ Somente o licor preto é insuficiente para suprir toda a necessidade de eletricidade e vapor, havendo necessidade de se ter uma caldeira auxiliar, que na maioria das vezes é uma caldeira de biomassa. Essa caldeira vai produzir tudo o que a fábrica necessite e que esteja em falta de energia elétrica e de vapor e ainda uma quantidade em eletricidade para venda. Isso geralmente acontece porque a caldeira de biomassa precisa ter escala condizente de produção, o que acaba levando a uma produção adicional de eletricidade e a ter que se condensar algum vapor.
- ⇒ O licor preto kraft supre as necessidades de vapor pela sua combustão, mas não consegue fornecer toda a eletricidade requerida. Esse é um caso mais comum em fábricas integradas de celulose e papel. Essas fábricas possuem duas opções: ou compram eletricidade de concessionárias locais de produção e venda de eletricidade; ou geram mais eletricidade com uma caldeira auxiliar. Essa geração de eletricidade adicional pode ser dar tanto pelo ciclo a vapor, como poderia ser também pelos ciclos combinado ou a gás.
- ⇒ O licor preto kraft supre de forma equilibrada os consumos de vapor e eletricidade da fábrica, não sendo necessário se dispor de uma grande caldeira auxiliar para produção de vapor e eletricidade. Nesse caso, ou a empresa compra uma pequena central termelétrica para combustão equilibrada dos seus resíduos de biomassa florestal ou dá outro destino a esses resíduos (venda, compostagem, doação, aterro industrial, etc.).

- ⇒ O licor preto supre as necessidades de eletricidade, mas não as de vapor. Empresas nessa situação instalam caldeiras auxiliares para produção do vapor em falta e comercializam os excedentes de eletricidade gerados através do sistema de geração distribuída. Para isso, ela vai precisar encontrar clientes locais para seus excedentes.
- ⇒ O licor preto kraft supre integralmente as necessidades de vapor e eletricidade da fábrica, mas mesmo assim a empresa instala uma grande caldeira de força para produção de eletricidade como mais um produto vendável pela fábrica.

Em todas essas situações relatadas, as empresas precisam ponderar muito bem as relações entre as quantidades a gerar e a vender de eletricidade e de usar e/ou condensar vapor. Também devem buscar empresas parceiras que possam consumir excedentes de vapor ou de eletricidade.

Uma vantagem que pode ser inserida nesse contexto é a que se adquire com a instalação de um *cluster* de base florestal. É o caso exemplo da empresa chilena Celulosa Arauco y Constitución em sua fábrica em Nueva Aldea/Chile, que possui diversas fábricas em um arranjo produtivo que envolve produção de celulose de mercado e chapas e painéis de madeira. Com apenas uma caldeira de biomassa e uma de recuperação de licor kraft ela supre as demandas de vapor e eletricidade que todo o arranjo produtivo ou *cluster* necessita. Como vantagem adicional, a caldeira de biomassa queima todos os resíduos de biomassa que são gerados nas diversas fábricas do *cluster*, bem como de serrarias regionais.

Acredito que dessa rápida exposição fica claro que os *clusters* de base florestal são muito interessantes e eles deveriam ser estruturados desde a concepção original das fábricas que possam vir a se tornar as âncoras energéticas dos mesmos.

A meta deve ser a máxima utilização da cogeração nesses projetos, pois cogeração representa redução de custos, de perdas, de resíduos e agrega melhoria significativa nos aspectos ambientais, econômicos e de balanceamento de operações.

Uma vantagem muito positiva da cogeração é a melhoria da eficiência e continuidade operacional. A cogeração se apoia em tecnologias seguras e dominadas, com excepcionais níveis de desempenho. Já as fábricas que não cogeram e precisam comprar eletricidade de alguma concessionária, quase sempre acabam sendo

inviavelmente surpreendidas com falta de energia (apagões) e amarguram perdas onerosas em produção e resultados.

Apresentadas essas considerações introdutórias para esclarecimento do que possa ser a tecnologia da cogeração, vamos resumir isso tudo pelo relacionamento das vantagens que a cogeração oferece:

- Ψ Aumento significativo dos rendimentos energéticos, que chegam a atingir 80%, conforme os modelos que possam ser criados;
- Ψ Minimização das perdas de energia de vapor por condensação do mesmo;
- Ψ Minimização de perdas por transmissão elétrica pelo suprimento local por geração distribuída;
- Ψ Melhoria da ecoeficiência e utilização dos recursos naturais que são matérias-primas do processo industrial;
- Ψ Minimização da quantidade de poluentes gerados para descarte, principalmente de resíduos sólidos;
- Ψ Redução dos custos de produção dos produtos energéticos (eletricidade e vapor de processo);
- Ψ Utilização de combustíveis renováveis de base florestal (biomassas florestais e licor preto kraft);
- Ψ Maior continuidade operacional das fábricas que geram suas próprias quantidades requeridas de vapor e eletricidade;
- Ψ Possibilidade de utilização também da energia mecânica gerada pelos eixos das turbinas;
- Ψ Possibilidade de geração de frio para as plantas químicas, além da eletricidade e vapor, em um processo tecnológico denominado de trigeração;
- Ψ Obtenção de certificados de carbono para comercialização em mercados de carbono incentivados pelo MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Isso se consegue pela substituição de

uma caldeira ou de uma central termelétrica que queima um combustível fóssil por uma que use biomassa florestal.

Ψ Etc., etc.

### **Tecnologias de cogeração:**

Já sabemos que as centrais termelétricas que se baseiam no ciclo Rankine pelo uso do vapor conseguem em geral rendimentos de conversão da energia do combustível em energia elétrica com valores entre 15 a 35% (muito raramente nessas faixas mais altas). O restante se perde como energia desperdiçada ou desprezada.

A cogeração procura obter utilizações para esse calor que se está desperdiçando e sendo extraído em turbinas de condensação. Partindo do mesmo combustível, o processo de cogeração pode permitir rendimentos somados (térmico e elétrico) entre 60 a 80%, dependendo tudo do arranjo engenheirado para a termelétrica (geradoras) e as unidades consumidoras de vapor e eletricidade.

Uma central termelétrica que se baseia no ciclo a vapor e que utiliza biomassa combustível como fonte de energia para a caldeira de força, possui em sua constituição estruturada os seguintes processos:

- θ Sistema de preparação e alimentação da biomassa florestal;
- θ Caldeira de força para liberação da energia primária da biomassa e sua conversão em vapor superaquecido através da combustão direta do combustível;
- θ Turbina para converter a energia térmica do vapor superaquecido em energia mecânica no eixo da turbina e vapores de escape liberados pela turbina;
- θ Gerador de eletricidade que converte a energia mecânica do eixo rotativo da turbina em eletricidade;
- θ Sistemas de distribuição da eletricidade e dos vapores;
- θ Sistemas de abatimento de poluentes aéreos;

- θ Sistemas de condensação dos vapores residuais;
- θ Sistemas de automação e controle, segurança e garantia operacional.

O principal equipamento de um sistema de cogeração é a conjugação de turbinas para controlar a extração e produção de vapores de processo e de condensação eventual das sobras de vapor. Esse sistema permite derivar parte do fluxo de vapor com ajustes para usos térmicos e parte para condensação. Quando a demanda por vapor de processo é alta, a central termelétrica não tem problemas e pode atingir melhores rendimentos. Já quando diminui a demanda por vapor de processo, a central termelétrica precisa condensar os excedentes de vapor e os rendimentos diminuem.

As propriedades dos vapores extraídos dependem de cada arranjo, conforme a destinação que se der a cada um deles.

A cogeração não é uma exclusividade dos ciclos a vapor (Rankine), ela pode ser também praticada nos ciclos combinados e no ciclo a gás de Brayton.

Em todos os casos, a extensão da aplicação da cogeração é definida pela quantidade de vapor requerido pelos usuários. Como consequência dessa impossibilidade de transferir vapor para clientes distantes, as centrais de cogeração acabam sendo limitadas em capacidades pela demanda de vapor pelo arranjo produtivo ou pela fábrica a qual ela alimenta.

Como as centrais de cogeração podem ter diferentes e variadas capacidades, mesmo pequenas fábricas de celulose/papel ou de painéis de madeira podem adquirir centrais de cogeração compatíveis com as suas necessidades. Com isso adquirem maiores flexibilidades operacionais e redução de custos pela economia na conta de energia.

Tenho valorizado bastante o fato de que a cogeração permite mais do que dobrar o rendimento energético do processo termelétrico, em função da produção de dois tipos de energia (vapor e eletricidade).

A razão para esse enorme aumento de rendimento é simples. O rendimento global da cogeração possui dois componentes:

- θ Um rendimento elétrico que se deve à eletricidade gerada, que pelo ciclo Rankine varia entre 15 a 35%;
- θ Um rendimento térmico devido ao vapor gerado para utilização direta, que vai depender basicamente da relação entre os vapores

de processo requeridos e o condensado produzido com os excedentes. Em situações de ótimo, quando se necessita de muito vapor de processo, o rendimento térmico parcial obtido pelo vapor produzido pode atingir 40 a 45% em relação à energia suprida pelo vapor superaquecido às turbinas. Caso não se necessite de vapor no nível de ótimo, o rendimento térmico parcial em vapor pode ser qualquer valor entre 15 a 45%.

São por essas razões que são encontrados na literatura valores os mais variados para o rendimento global da cogeração, que costuma se posicionar desde 40% até 80%.

O rendimento da cogeração também pode ser calculado de duas formas:

- Ψ Com base na energia do vapor superaquecido oferecido ao sistema de turbinas;
- Ψ Com base na energia primária do combustível que alimenta a termelétrica pela sua introdução na caldeira de força.

Observem que em função do rendimento energético da caldeira de força (variável entre 65 a 90%), as duas formas de mostrar o rendimento da cogeração podem ser bastante diferentes.

Existem definitivamente dois pontos chaves nesses cálculos de rendimentos: um é na geração do vapor superaquecido pela caldeira de força e o outro na conversão nos turbogeradores desse vapor superaquecido em eletricidade e em vapor extraído para utilização em processos industriais.

Com isso, a confusão é enorme para as pessoas menos avisadas e que encontram na literatura valores muito díspares para rendimentos da cogeração.

Proponho disciplinar isso, denominando o rendimento global da cogeração como sendo o rendimento conjunto da caldeira e dos turbogeradores.

Por outro lado, podemos denominar de rendimentos parciais da cogeração, os rendimentos térmicos e elétricos apenas do sistema de turbogeração.

Ficariamos então com as seguintes relações numéricas:

⇒ Rendimento energético da caldeira de força

Rcaldeira =

$$[(\text{Energia agregada vapor superaquecido}) : (\text{Energia útil do combustível})] \cdot 100$$

⇒ Rendimento elétrico parcial da cogeração nos turbogeradores

Relétrico parcial turbogeradores =

$$[(\text{Quantidade energia elétrica produzida}) : (\text{Energia suprida vapor superaquecido alimentado ao sistema de turbogeração})] \cdot 100$$

⇒ Rendimento térmico parcial da cogeração nos turbogeradores

Rtérmico parcial turbogeradores =

$$[(\text{Quantidade energia térmica produzida como vapor de processo}) : (\text{Energia suprida vapor superaquecido alimentado ao sistema de turbogeração})] \cdot 100$$

⇒ Rendimento parcial da cogeração nos turbogeradores com base na energia do vapor superaquecido alimentado

Rparcial processo cogeração =

$$(\text{Relétrico parcial turbogeradores}) + (\text{Rtérmico parcial turbogeradores})$$

⇒ Rendimento global da termelétrica praticando cogeração

Rglobal processo cogeração (em percentagem) =

$$[(\text{Rcaldeira}/100) \cdot (\text{Rparcial processo cogeração}/100)] \cdot 100$$



Seja agora um **exemplo numérico 12** de uma situação ideal de cogeração para facilitar entendimentos:

$$R_{\text{caldeira}} = 90\%$$

$$R_{\text{elétrico parcial turbogeradores}} = 35\%$$

$$R_{\text{térmico parcial turbogeradores}} = 45\%$$

$$R_{\text{parcial processo cogeração}} = 35 + 45 = 80\%$$

$$R_{\text{global processo cogeração (em percentagem)}} = [(90:100) \cdot (80:100)] \cdot 100$$

$$R_{\text{global processo cogeração (em percentagem)}} = \mathbf{72\%}$$

Seja agora um **exemplo numérico 13** de uma situação de menores níveis de eficiência e onde nem todo o vapor extraído das turbinas pode ser convertido em vapor de processo:

$$R_{\text{caldeira}} = 80\%$$

$$R_{\text{elétrico parcial turbogeradores}} = 25\%$$

$$R_{\text{térmico parcial turbogeradores}} = 20\%$$

$$R_{\text{parcial processo cogeração}} = 25 + 20 = 45\%$$

$$R_{\text{global processo cogeração (em percentagem)}} = [(80:100) \cdot (45:100)] \cdot 100$$

$$R_{\text{global processo cogeração (em percentagem)}} = \mathbf{36\%}$$

Combinaremos agora os exemplos numéricos 12 e 13 em um quadro **exemplo 14** onde estaremos colocando também as mesmas termelétricas citadas como cogerao com seus valores sem cogeração, ou seja, sem extração de vapor de processo e sim de condensados que foram produzidos desprezando a energia do vapor liberado pela turbina.

### Exemplo 14:

	Com Cogeração		Sem cogeração	
	Exemplo 12	Exemplo 13	Exemplo 12	Exemplo 13
Rcaldeira	90	80	90	80
Relétrico parcial turbogeradores	35	25	35	25
Rtérmico parcial turbogeradores	45	20	0	0
Rparcial processo cogeração	80	45	35	25
Rglobal processo cogeração (%)	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>31,5</b>	<b>20</b>

Acredito que com esses exemplos 12, 13 e 14, fica mais claro e mais entendível porque os valores de rendimentos de cogeração são variados conforme a forma de se expressá-los. Da mesma forma, acredito que também ficam muito claros os vantajosos ganhos que se observam quando se usa a cogeração em relação a não se adotar o procedimento.

Observem que ao não se utilizar da cogeração os rendimentos globais do processo de geração de uma termelétrica a base de biomassa florestal pode variar entre 20 a 31,5%, conforme os exemplos apresentados. Por outro lado, com a adoção da cogeração, os rendimentos globais que foram atingidos foram quase o dobro em relação aos valores sem cogeração.

Quando se adotar também o ciclo combinado, com o aproveitamento das vantagens que esses procedimentos oferecem, tem-se como certo que os rendimentos globais da cogeração podem atingir cerca de 80%.

As principais perdas de rendimento em um processo de cogeração acontecem ou na caldeira de força ou no sistema de turbogeração.

Vejam alguns exemplos de causadores dessas perdas:

Na caldeira de força:

- θ Umidade da biomassa florestal;
- θ Poder calorífico útil da biomassa florestal;
- θ Conceito tecnológico da caldeira de força;
- θ Excesso de ar de combustão;
- θ Presença de nitrogênio nos gases de combustão;
- θ Queima incompleta da biomassa combustível;
- θ Temperatura da água de alimentação;
- θ Temperatura dos gases de exaustão;
- θ Radiação, irradiação e perdas ambientais de calor;
- θ Isolamentos deficientes;
- θ Perdas de vapor;
- θ Continuidade operacional inadequada; etc.

No sistema de turbogeradores:

- θ Transferências dos fluídos térmicos (água e vapor);
- θ Condensação de vapor por não ser possível cogeração;
- θ Perdas de energia mecânica nas turbinas;
- θ Perdas nos geradores de eletricidade;

- θ Perdas nas conversões de um tipo de energia para outro (Exemplos: térmica para mecânica; mecânica para elétrica, etc.);
- θ Perdas por radiação/irradiação;
- θ Perdas na transmissão da eletricidade, etc.

Agora que colocamos de forma ampla e descortinada as virtudes e fraquezas da cogeração, bem como as confusões que podem ser encontradas nas literaturas sobre esse tema, acredito que ficará mais fácil se tentar aperfeiçoar esse valioso e útil conceito tecnológico (cogeração), que pode ser muito aplicável na conservação da energia em nossas fábricas e em nosso ambiente.

Apesar de eu ter tentado lhes mostrar as causas técnicas para perdas de rendimentos em processos de cogeração, eu poderia ainda acrescentar que a principal causa de rendimentos baixos é não se encontrar utilizações para o vapor de processo que poderia ser extraído pelas turbinas.

***Portanto, se quiserem aumentar o rendimento da cogeração, encontrem usuários que aceitem ou precisem de vapor de processo, para se evitar ter que descartar vapor valioso pela sua mera e ineficiente condensação.***

Acredito fortemente que o maior pecado de todos que possuem cogeração em seus processos é o fato de não se interessarem em tentar obter mais usuários pagantes por vapores de processo. Isso pode até mesmo ser incentivado pela atração de outras empresas para as proximidades da termelétrica. Em geral, os gestores das termelétricas se dedicam muito a olhar o que está dentro de seu mundo interno (dentro das cercas) e não querem incomodações com o que pode vir de fora, mesmo que o que venha possa ser muito bom para o negócio.



## TURBINAS E TURBOGERADORES



A energia elétrica pode ser produzida de diferentes formas e processos, dependendo de como as turbinas são acionadas, ou conforme o tipo de combustível.

Podem ser citadas:

- φ Hidreletricidade: onde a energia mecânica que faz mover o eixo das turbinas é obtida pelo acionamento com água, em processos onde a quantidade de energia depende do fluxo de água e dos desníveis para influenciar o efeito gravitacional.
- φ Termeletricidade com base em ciclos a vapor: onde o elemento acionador das turbinas é o vapor superaquecido, que é gerado em caldeiras de força.
- φ Termeletricidade com base em ciclos a gás: onde o elemento acionador das turbinas são gases quentes e pressurizados associados a processos de combustão violentos. Esses gases transferem a energia que carregam aos eixos das turbinas, da mesma forma como faz o vapor nos ciclos a vapor.

- φ Energia elétrica de origem nuclear: onde a fonte de energia é a gerada na transformação do átomo.
- φ Energia elétrica de origem eólica: onde a fonte de energia para acionar as turbinas é a energia de movimentação dos ventos.

Há em geral uma confusão entre os leigos sobre qual equipamento produz a eletricidade. Na verdade, a turbina produz trabalho mecânico em seu eixo, sendo que os geradores de eletricidade é que fazem a conversão da energia mecânica em energia elétrica. A confusão se origina do fato que as turbinas estão intimamente associadas aos geradores, no que muitas vezes se denominam de turbogeradores. A eletricidade é gerada pelo movimento de um condutor em um campo magnético, que é acionado pelo eixo da turbina.

Dessa forma, podemos discorrer um pouco sobre as turbinas e seus tipos, para logo depois fazermos o mesmo procedimento para os geradores.

## Ψ **Turbinas**

Turbinas são equipamentos destinados a captar a energia de um fluido rico em energia (água, vapor, gás, vento) e transformar essa energia em trabalho mecânico em um eixo rotativo. A engenharia básica de uma turbina é muito parecida em todos os tipos de turbinas, independentemente da fonte de energia que a movimenta. Trata-se de um equipamento que possui um eixo rotor que é movimentado pelo impacto dos fluidos ricos em energia em pás ou paletas que estão presentes no eixo. O fluido rico em energia empurra com sua imensa força as paletas e produzem intensa rotação do eixo, do que resulta enorme trabalho mecânico no mesmo.

Os principais tipos de turbinas a vapor que são utilizados pelo setor de base florestal em suas centrais termelétricas são os seguintes:

- Ψ Turbinas de contrapressão: nas quais o vapor expandido na turbina é liberado acima da pressão atmosférica e pode servir para uso industrial;

- Ψ Turbinas de condensação: onde o vapor liberado pelas turbinas sai abaixo da pressão atmosférica e acaba sendo condensado em condensadores especiais, já que não existe uma possibilidade de utilização industrial para esse vapor. O condensado não apresenta potencial energético relevante, é apenas uma água quente, que pode e deve ser reutilizada em nova produção de vapor, ou em outros usos para aquecimento de processos. Com a condensação, existe perda importante da energia do calor latente do vapor, por isso, essas turbinas possuem rendimentos globais menores. Elas, porém, são largamente utilizadas pelo fato de que muitas vezes há a possibilidade de se produzir mais eletricidade, mas não há chances de se usar vapor extraído nos processos denominados de cogeração.
  
- Ψ Turbinas de extração: onde parte ou partes do vapor deixam a turbina entre a entrada e a saída final, com possibilidades de se ajustarem as pressões/temperaturas desses vapores para usos nos processos industriais. A extração de vapor de processo pode ser conseguida em turbinas de contrapressão e de extração.

As turbinas podem ser de estágio simples, onde tudo acontece em um único ciclo, ou turbinas de estágios múltiplos, onde se podem dividir e segmentar os processos envolvidos na recepção do vapor e liberação dos vapores extraídos e condensados.

### **Turbinas a vapor:**

As turbinas a vapor recebem energia térmica de vapores superaquecidos e convertem essa energia calorífica em energia mecânica no eixo do rotor. O elemento fundamental dessas turbinas é o seu rotor ou eixo rotativo, que é movimentado de forma rotacional intensa pelos impactos do vapor com paletas presas nesse eixo.

O trabalho mecânico gerado no eixo da turbina pode ser aproveitado em geradores de eletricidade, ou movimentando máquinas (como compressores, bombas, etc.).

Quando sobra vapor nesse processo, ele pode ser simplesmente condensado em um processo que se caracteriza como sendo uma espécie de rejeição de seu conteúdo energético. Essa forma de turbinas com condensação é, portanto, muito menos interessante do que as

turbinas que permitem que o vapor liberado pela turbina seja convertido em vapor ou vapores de processo, com menores níveis de pressões e temperaturas. Esses vapores podem ser utilizados em operações industriais próximas. Isso acontece com o uso de turbinas de contrapressão e de extração.

As turbinas de contrapressão e de extração são ideais para serem utilizadas em processos de cogeração, visto que podem liberar vapores com pressões acima da pressão atmosférica e com temperaturas ainda elevadas. Esses vapores de extração são aproveitados em processos térmicos nas circunvizinhanças.

As turbinas a vapor se constituem na principal opção das centrais termelétricas da indústria de base florestal. Isso se deve a algumas de suas vantagens principais, quais sejam:

- λ Longa vida útil das turbinas;
- λ Possibilidades de efetiva cogeração;
- λ Tecnologias dominadas e comprovadas;
- λ Alta continuidade operacional.

Qualquer turbina a vapor precisa liberar o vapor residual, após ele ter cedido uma parte importante de sua entalpia para acionamento do eixo da turbina para esse trabalho ser depois convertido em eletricidade.

Esse vapor liberado pode ser de dois tipos:

- ✚ Vapor de muito baixa pressão, que necessita de condensação, pois não possui valor energético como vapor, ou mesmo não possui utilização aplicável nas vizinhanças.
- ✚ Vapores de médias pressões (entre 4 a 15 bar), que podem ser destinados a processos industriais, pois ainda possuem muita entalpia aproveitável.

Quando o vapor liberado pela turbina for condensado, a água quente obtida não deve ser desperdiçada. Ela pode retornar para a caldeira de força como água de alimentação, pois se trata de um condensado de vapor virgem ou vivo - praticamente uma água desmineralizada. Quando o vapor se condensa, ele libera muita energia de seu calor latente. Essa energia pode ser de alguma forma aproveitada em trocadores de calor para aquecimento de água ou



gases. Com isso, nem toda energia do vapor estará sendo rejeitada e desperdiçada.

Resumidamente, os produtos de uma turbina a vapor são os seguintes:

- ☞ Energia mecânica de acionamento, oferecida pelo seu eixo rotativo;
- ☞ Energia térmica na forma de vapores extraídos para uso em processos;
- ☞ Energia térmica oferecida para trocas térmicas em trocadores de calor para aquecimentos;
- ☞ Condensado quente de vapor virgem para retornar à caldeira de força como água de alimentação;
- ☞ Águas quentes ou condensados.

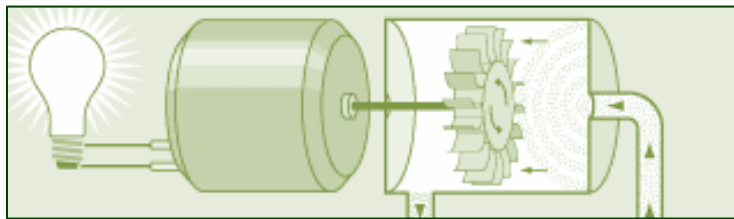
### **Turbinas a gás:**

Em geral, as turbinas a gás operam em ciclo aberto. Isso porque o ar atmosférico é comprimido por um compressor possante para uma câmara de combustão. Nessa câmara ocorre também injeção de um combustível gasoso, que incendeia e sua explosão eleva a temperatura e a pressão do ar e dos gases resultantes da combustão. O combustível gasoso pode ser o gás natural, o gás de petróleo, o biogás ou o gás da gaseificação da madeira.

Os gases quentes resultantes dessa mistura de ar de combustão e ar atmosférico comprimido estarão em altas pressões e temperaturas. Eles acionam a turbina a gás, de onde são expelidos mais frios. Logo, o ar entra como ar atmosférico e sai como ar atmosférico modificado pela sua mistura com gases residuais da queima do combustível (em geral gás carbônico, vapor de água, óxidos de enxofre e de nitrogênio, hidrogênio, etc.). Esses gases de exaustão podem ser simplesmente rejeitados, liberados para a atmosfera. Outra alternativa é aproveitar o calor residual dos mesmos para trocas térmicas, da mesma forma que se faz com os vapores expelidos pelas turbinas a vapor.

Infelizmente, o compressor de ar consome uma fração significativa da potência elétrica gerada pelos turbogeradores (pode chegar a quase 50%). Com isso, a potência líquida que sobra para virar eletricidade útil para exportação para outros setores fica bem reduzida em função do conceito tecnológico desse processo. É por isso que o ciclo a gás de Brayton não tem um rendimento significativamente maior que o ciclo a vapor de Rankine.

## Ψ **Geradores de eletricidade**



Adaptado de: <http://energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>

A energia mecânica produzida no eixo da turbina pode ser transformada em eletricidade através do giro em um campo magnético do conjunto rotor/estator. A rotação do eixo da turbina faz girar o rotor do gerador, produzindo a geração de eletricidade no estator do mesmo.

O rotor do gerador constitui-se de um equipamento de aço especial dotado de fendas para os condutores, ou bobinas de campo. Uma corrente elétrica é passada através dessas bobinas, causando a formação de um campo magnético dentro do gerador. Esse campo magnético gira com a rotação do eixo da turbina, pois a turbina e o gerador estão acoplados um ao outro. O rotor é envolvido pelo estator do gerador, que inclui os condutores de cobre. O campo magnético e a rotação do conjunto provoca intenso movimento nos elétrons, que forma uma corrente elétrica. A corrente elétrica pode ser simples ou alternada, conforme se dá o movimento dos elétrons que produzem a corrente. A produção de correntes elétricas alternadas é a mais comum nos processos de geração em termelétricas.

O sistema produz não apenas a corrente, mas também a voltagem. Tudo é muito bem controlado para manter esses valores em equilíbrio e homogeneidade. A potência é o resultado da multiplicação da voltagem e da intensidade da corrente.

A produção de energia elétrica de um gerador varia então conforme a potência criada e o período de tempo que o gerador funcionou (Eletricidade = Potência vezes Tempo). Uma pequena central, que possua uma potência de 1 MW, consegue gerar 1 MWh em uma hora, ou 2 MWh em duas horas de operação.

A geração de eletricidade total em um ciclo a vapor (Rankine) é função de:

- Ψ Rendimento da caldeira de força;
- Ψ Rendimento da turbina;
- Ψ Rendimento do gerador de eletricidade;
- Ψ Perdas de energia com a transmissão da eletricidade;
- Ψ Perdas de energia na condensação de vapores;
- Ψ Perdas na forma de energia radiante.

Pode-se dizer que as perdas energéticas são muito comuns nesses processos. Já foram diversas vezes enunciadas as causas de perdas de rendimentos na geração de vapor a partir de uma determinada biomassa energética.

Já no caso de turbogeradores, as perdas principais de rendimentos se devem a:

- ☞ Desgastes de estruturas;
- ☞ Problemas de nivelamento ou de falta de simetria ou de balanceamento dos rotores;
- ☞ Níveis de selagem;
- ☞ Incrustações internas;
- ☞ Erosões em setores críticos;
- ☞ Danos internos;
- ☞ Pressões e temperaturas do vapor (entalpias do vapor de entrada nas turbinas);

- ☞ Aquecimento exagerado dos equipamentos;
- ☞ Taxa de condensação em relação à taxa de extração de vapor de baixa e média pressão;
- ☞ Percentual de cogeração.

Conforme o tipo e a qualidade do vapor utilizado pelos turbogeradores, bem como das capacidades nominais e ganhos em escala e em tecnologias dos equipamentos, acabam sendo encontrados valores bastante diferentes para consumo de vapor por MWh gerado. Há centrais termelétricas muito eficientes com utilização de 3 a 4 toneladas de vapor por MWh gerado, mas também são encontrados valores acima de 5 e até mesmo acima de 7 toneladas de vapor por MWh sendo gerado.

Por essas e outras razões é que temos rendimentos globais do ciclo Rankine entre 15 a 35% (só na fração de geração de eletricidade e sem considerar cogeração térmica e elétrica).

Entre vantagens e desvantagens, defeitos e virtudes, os sistemas combinados de produção simultânea de vapor e eletricidade (*Combined Heat and Power*) vão tendo crescente participação nas novas centrais termelétricas, que costumam ser centrais âncoras de geração térmica e elétrica para alimentar arranjos produtivos, distritos ou *clusters* industriais.

E a vida continua, com contínua evolução desses sistemas no setor de base florestal.



## EXEMPLOS DE CÁLCULOS NUMÉRICOS EM GERAÇÃO DE CALOR, VAPOR E ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA FLORESTAL DO EUCALIPTO



O objetivo dessa seção é o de apresentar uma série de exemplos numéricos na forma de problemas resolvidos de tal maneira que os leitores possam melhor aprender e entender a lógica de calcular e aplicar os conceitos apresentados nas seções anteriores desse capítulo 44 e também ao longo do capítulo de número 43.

Em geral, a maioria dos textos disponíveis na literatura sobre geração de calor, vapor e eletricidade são de cunho teórico ou acadêmico e com alguns poucos casos de aplicações numéricas e muitas vezes não explanados de maneira didática, até mesmo por serem trabalhos acadêmicos de maior grau de profundidade científica. Por outro lado, o que tenho notado nas questões sobre esse tema que recebo de muitos dos meus leitores e alunos são por respostas orientadas para a necessidade de aprendizado em cálculos que possam permitir ajustes em seus processos, sistemas e até mesmo para dimensionar as plantações de florestas energéticas para que elas possam suprir de biocombustíveis os empreendimentos de geração de energia.

Assim sendo, depois de lhes trazer um conjunto de conceitos técnicos e alguns exemplos numéricos nas seções iniciais desse capítulo 44, vou lhes trazer agora pouco mais de 40 problemas resolvidos sobre

a teoria de combustão e sobre a geração de calor, vapor e eletricidade. Espero que eles possam ajudar de alguma forma a que aqueles que tiverem interesse nesse intrigante assunto possam encarar com sucesso os desafios que porventura venham a encontrar em suas vidas profissionais.

Inicialmente, antes de ingressar nesses problemas que estão sendo também chamados de exemplos numéricos, ofereço para consulta, a qualquer momento, uma tabela que fornece algumas relações entre as principais unidades de energia. Com isso, se o leitor estiver mais familiarizado com outras unidades além das apresentadas nos exemplos, ele pode facilmente verificar as equivalências entre as mesmas através das relações de conversão apresentadas.

<b>UNIDADE</b>	<b>MWh</b>	<b>kWh</b>	<b>Mcal</b>	<b>kcal</b>	<b>GJ</b>	<b>MJ</b>
<b>1 MWh =</b>	1	1.000	861	861.000	3,6	3.600
<b>1 kWh =</b>	0,001	1	0,861	861	$3,6 \cdot 10^{-3}$	3,6
<b>1 Mcal =</b>	$1,16 \cdot 10^{-3}$	1,16	1	1.000	$4,19 \cdot 10^{-3}$	4,19
<b>1 kcal =</b>	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,001	1	$4,19 \cdot 10^{-6}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$
<b>1 GJ =</b>	$278 \cdot 10^{-3}$	278	238,8	$238,8 \cdot 10^3$	1	1.000
<b>1 MJ =</b>	$278 \cdot 10^{-6}$	0,278	0,2388	238,8	0,001	1



Biomassas de origem florestal prontas para consumo energético

- **Alguns problemas e cálculos práticos sobre teoria da combustão das biomassas**



**Problema 01:**

Quantos litros de ar contendo 21% de oxigênio em volume são requeridos para queimar completamente 5 toneladas de metanol (CH<sub>3</sub>OH)? Qual o volume de gás carbônico gerado como resíduo desse combustível? Caso o excesso de oxigênio na combustão fosse de 50%, qual seria a quantidade requerida de ar?

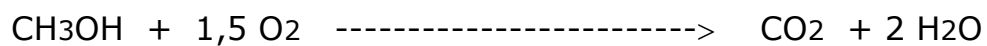
Solução:

Base referencial: 5.000 quilogramas de metanol

Reação de combustão completa do metanol:

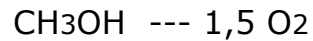
Metanol: CH<sub>3</sub>OH

Peso molecular: 32 gramas



32 gramas --- 1,5 moles-grama O<sub>2</sub> ----- 1 mole-grama CO<sub>2</sub>

Cálculo da demanda estequiométrica de oxigênio para combustão:

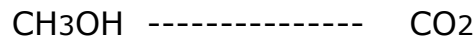


32 gramas --- 33,6 litros (1,5 . 22,4 litros)

32 kg ----- 33,6 Nm<sup>3</sup>  
5.000 kg ----- X

**X = 5.250 Nm<sup>3</sup> de oxigênio estequiométrico**

Cálculo da produção estequiométrica de gás carbônico pela combustão:



32 g ----- 22,4 litros

32 kg ----- 22,4 Nm<sup>3</sup>  
5.000 kg ----- Y

**Y = 3.500 Nm<sup>3</sup> de gás carbônico residual da queima completa**

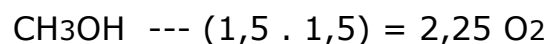
Cálculo do ar estequiométrico requerido nessa combustão:

Ar = (Volume requerido oxigênio) : (21 Nm<sup>3</sup> oxigênio/100 Nm<sup>3</sup> de ar) =

Ar = (5.250 Nm<sup>3</sup> oxigênio) : (21 Nm<sup>3</sup> oxigênio/100 Nm<sup>3</sup> de ar) =

Ar estequiométrico requerido = **25.000 Nm<sup>3</sup> de ar de combustão**

Cálculo do ar com 50% de excesso de ar ou de oxigênio:



32 gramas ----- 50,4 litros



$$\begin{array}{r} 32 \text{ kg} \text{ ----- } 50,4 \text{ Nm}^3 \\ 5.000 \text{ kg} \text{ ----- } Z \end{array}$$

**Z = 7.875 Nm<sup>3</sup> de oxigênio**

Que correspondem a  $(7.875/0,21) =$

**37.500 Nm<sup>3</sup> de ar de combustão com 50% de excesso de oxigênio**

### **Problema 02:**

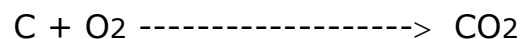
Um carvão vegetal é rico em carbono fixo que ocorre na proporção de 80% de seu peso seco. Ao ser queimado, qual deverá ser a quantidade estequiométrica de ar de combustão requerido por tonelada de carvão? Caso se optar por um excesso de ar de 25%, qual passará a ser a quantidade de ar a se insuflar por tonelada de carvão? Dados do ar = O<sub>2</sub>: 21%; N<sub>2</sub>: 79%

Solução:

Base referencial: 1.000 kg de carvão vegetal com 80% de carbono fixo

1.000 kg carvão  $\cong$  800 kg Carbono

Cálculo estequiométrico da demanda de oxigênio para queima:



12 gramas de C demandam um mole-grama de oxigênio ou 22,4 litros ou 32 gramas de oxigênio

12 kg de C demandam 22,4 Nm<sup>3</sup> ou 32 kg de oxigênio ou 1 kmole O<sub>2</sub>

800 kg de C vão demandar = [(800kg) .(22,4 Nm<sup>3</sup>)] : (12 kg) =

**1.493,3 Nm<sup>3</sup> de oxigênio por tonelada de carvão vegetal**

Ou

**66,67 kmoles de oxigênio por tonelada de carvão vegetal**

Cálculo estequiométrico da demanda de ar para queima:

Composição do ar em volume ou moles-quilograma:

21% Oxigênio

79% Nitrogênio

Ar estequiométrico requerido = (66,67 kmoles O<sub>2</sub> /t carvão) : (21 kmoles O<sub>2</sub>/100 kmoles de ar) =

**317,48 moléculas-quilograma ou kmoles de ar**

Como cada kmole de ar corresponde a 22,4 Nm<sup>3</sup>, teremos:

**7.111,47 Nm<sup>3</sup> de ar**

Cálculo do ar com excesso de 25% de oxigênio:

12 gramas de C demandam 1 mole-grama de oxigênio estequiométrico

12 gramas de C demandarão 1,25 moles-grama de oxigênio em função dos 25% de excesso de ar

12 kg de C demandarão 1,25 moles-quilograma de oxigênio em função dos 25% de excesso de ar, ou seja, 28 Nm<sup>3</sup> de oxigênio

800 kg de C vão demandar:  $(800 \cdot 28 \text{ Nm}^3)/12 =$

**1.866,67 Nm<sup>3</sup> de oxigênio/tonelada de carvão vegetal**

ou **83,33 moléculas-quilograma de oxigênio/ t carvão**

Composição do ar em volume ou em moles-quilograma:

21% Oxigênio

79% Nitrogênio

$(83,33 \text{ kmoles O}_2/\text{t carvão}) : (21 \text{ kmoles O}_2/100 \text{ kmoles ar}) =$

**396,8 moléculas-quilograma de ar/t carvão vegetal**

ou

**8.888,6 Nm<sup>3</sup> de ar/t carvão vegetal**

O que poderia ser também obtido através de outra forma mais simples, sendo que a anterior foi feita apenas para demonstrar conceitos sobre kmoles e volumes a CNTP:

$(1.866,67 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio/t carvão}) : (21 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2/100 \text{ Nm}^3 \text{ ar}) =$

**8.888,6 Nm<sup>3</sup> de ar/t carvão vegetal**



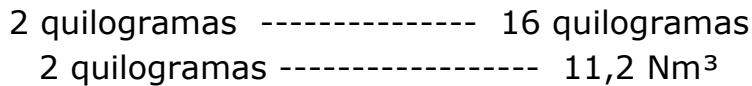
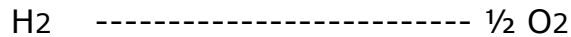
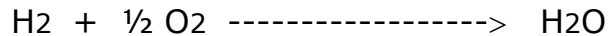
### **Problema 03:**

Se o hidrogênio gasoso for utilizado como combustível em um queimador especializado, calcular a demanda estequiométrica de oxigênio por tonelada desse combustível. Expressar os resultados em peso e em volume de oxigênio. Calcular ainda a relação entre os pesos e volumes de oxigênio e hidrogênio para cada molécula-quilograma de ambos os gases.

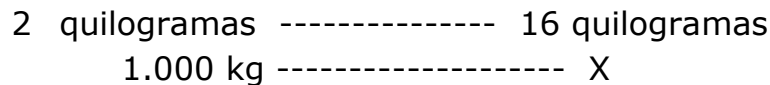
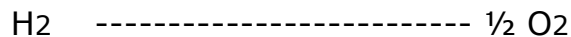
Solução:

Base referencial: Uma tonelada de hidrogênio

Reação de queima do hidrogênio:

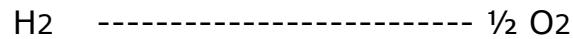


Cálculo da necessidade estequiométrica de oxigênio para queima de 1 tonelada de hidrogênio:



**X = 8.000 kg de oxigênio**

Ou ainda:



$$\begin{array}{l} 2 \text{ quilogramas ----- } 11,2 \text{ Nm}^3 \\ 1.000 \text{ kg ----- } Y \end{array}$$

$$Y = \mathbf{5.600 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio}}$$

Cálculo da relação entre os pesos e volumes das moléculas-quilograma de ambos os gases (oxigênio e hidrogênio):

1 molécula-quilograma de H<sub>2</sub> = 2 quilogramas e 22,4 Nm<sup>3</sup>

1 molécula-quilograma de O<sub>2</sub> = 32 quilogramas e 22,4 Nm<sup>3</sup>

Relação entre os pesos= (32 kg O<sub>2</sub>/mole-quilograma) : (2 kg H<sub>2</sub>/mole-quilograma)

Relação entre os pesos = **16 kg de oxigênio/kg de hidrogênio**

Relação entre os volumes= (22,4 Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/mole-quilograma) : (22,4 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/mole-quilograma)

Relação entre os volumes = **1 Nm<sup>3</sup> de oxigênio/1 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio**

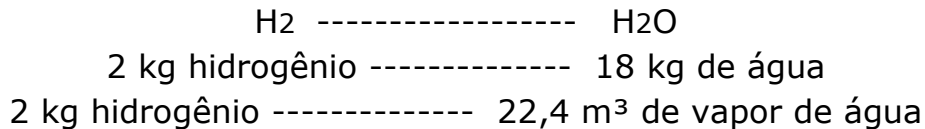
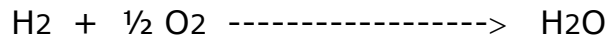
#### **Problema 04:**

No problema anterior, calcular o peso do gás formado pela combustão completa e estequiométrica de uma tonelada de hidrogênio no equipamento queimador em questão. Calcular também a análise em equipamento Orsat para um excesso de 32% de excesso de ar.

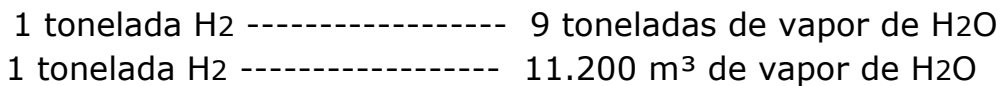
Solução:

Base referencial: Uma tonelada de hidrogênio

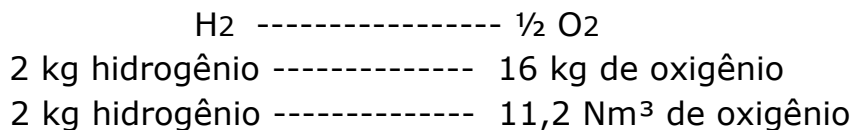
Reação de queima do hidrogênio:



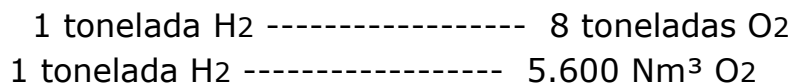
Ou ainda:



e

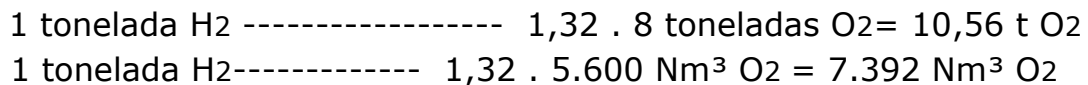


Ou ainda:



Adequações para excesso de 32% no oxigênio de combustão:

Um excesso de ar de 32% significa que a quantidade de oxigênio calculada por estequiometria deve ser aumentada em 32%; ou seja:



Adequações para excesso de 32% no ar de combustão:

O oxigênio está presente no ar de combustão na proporção de 21% de seu volume. Logo o volume de ar de combustão por tonelada de hidrogênio queimado com 32% de excesso de ar será:

$$1 \text{ tonelada H}_2 \text{ ----- } 7.392 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$1 \text{ tonelada H}_2 \text{ ----- } (7.392 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2) : 0,21 = \mathbf{35.200 \text{ Nm}^3 \text{ de ar}}$$

Desse total de ar de combustão, o nitrogênio permanecerá incólume, mas o oxigênio será em grande parte consumido na combustão para formar o vapor de água.

$$\text{Nitrogênio residual} = (35.200 \text{ Nm}^3 \text{ totais} - 7.392 \text{ Nm}^3 \text{ do oxigênio}) = \mathbf{27.808 \text{ Nm}^3 \text{ de nitrogênio}}$$

Oxigênio em excesso e que aparecerá nos gases de exaustão como oxigênio corresponderá apenas ao excesso de 32%, ou seja:

$$\text{Oxigênio} = (7.392 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio no ar em excesso}) - (5.600 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio consumido na combustão do hidrogênio}) =$$

**1.792 Nm<sup>3</sup> de oxigênio residual**

Cálculo dos gases residuais analisados para cada 1 tonelada de hidrogênio sendo queimado:

- 0 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio (combustão total)
- 11.200 m<sup>3</sup> de vapor de H<sub>2</sub>O
- 1.792 Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>
- 27.808 Nm<sup>3</sup> N<sub>2</sub>

Cálculo do volume total de gases nas fumaças deixando o queimador:

Volume final e total dos gases residuais após a combustão de 1 tonelada de hidrogênio com 32% de excesso de ar de combustão será a soma dos gases e vapores residuais: vapor de água, oxigênio e nitrogênio =

$$(11.200 \text{ m}^3 \text{ de vapor de água}) + (1.792 \text{ Nm}^3 \text{ de oxigênio}) + (27.808 \text{ Nm}^3 \text{ de nitrogênio}) = \mathbf{40.800 \text{ m}^3 \text{ de gases de exaustão}}$$

Análise percentuais base volumétrica dos gases em equipamento Orsat:

Vapor de água =  $100 \cdot \{11.200/40.800\}$  = **27,45% Vapor H<sub>2</sub>O**

Oxigênio =  $100 \cdot \{1.792/40.800\}$  = **4,40% O<sub>2</sub>**

Nitrogênio =  $100 \cdot \{27.808/40.800\}$  = **68,15% N<sub>2</sub>**

Considerar que esse processo de combustão do hidrogênio não gera gás carbônico, como acontece na maioria dos combustíveis, o que exigirá para outros tipos de combustão que as quantidades desse gás devam ser cuidadosamente calculadas para se avaliar corretamente a composição final dos gases de exaustão da combustão.

---

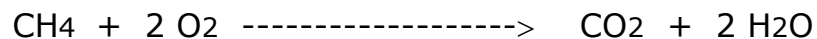
### **Problema 05:**

Um gás combustível constituído de 100% metano (CH<sub>4</sub>) é queimado com ar de forma tal que uma chama de excelente qualidade possa ser obtida. Calcular a quantidade de oxigênio e nitrogênio presentes na queima e nos gases de exaustão quando a combustão for realizada com um excesso de oxigênio de 50%. Dados= C: 12; O: 16; N: 14; H: 1

Solução:

Base referencial: Uma molécula-grama do metano

Reação de combustão do metano:



A cada mole-grama de metano se consomem dois moles-grama de oxigênio e se gera um mole-grama de gás carbônico e dois moles de água. O metano consome então 2 moles-grama de oxigênio para sua completa e estequiométrica combustão.



Todo o gás carbônico do gás de exaustão é gerado pela queima do metano e a relação é 1 mole-grama de CO<sub>2</sub> por mole-grama de metano.

A cada 1 mole-grama de oxigênio, o ar de queima traz junto consigo e estequiometricamente:

79 moles-grama N<sub>2</sub>/21 moles-grama O<sub>2</sub> =

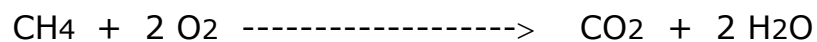
3,7619 moles-grama N<sub>2</sub>/mole-grama de O<sub>2</sub> estequiométrico

Logo, como a estequiometria prevê 2 moles-grama de O<sub>2</sub> por mole-grama de metano, teríamos

7,5238 moles-grama de nitrogênio (da estequiometria) que permaneceriam incólumes no gás de exaustão

Estamos, porém, falando em 50% de excesso de oxigênio, o que resultará em sobra de oxigênio e aumento da sobra de nitrogênio, isso acontecendo na relação de 1,5 vezes.

Estequiometricamente:



Com excesso de ar:

1 mole-grama CH<sub>4</sub> ---- (2. 1,5) = 3 moles-grama O<sub>2</sub>

Essas 3 moles-grama de oxigênio corresponderão a:

11,286 moles-grama de nitrogênio/mole-grama de metano

Dessa quantidade de moléculas-grama de oxigênio, duas serão consumidas pela reação de combustão por mole-grama de metano para se formar o gás carbônico e sobrar apenas uma em excesso.

O ar de exaustão dessa queima terá então em sua composição:

1 molécula-grama de oxigênio residual  
11,286 moléculas-grama de nitrogênio  
1 molécula-grama de gás carbônico  
2 moléculas-grama de água

**E tudo isso para se queimar apenas uma molécula-grama de metano.**

São por essas e outras razões que a geração de energia através da combustão é uma atividade de alto impacto ambiental e de utilização de recursos naturais e deve ser otimizada em processos de ecoeficiência energética.

---

### **Problema 06:**

Uma caldeira a gás opera queimando metano e monóxido de carbono os quais estão presentes em um gás combustível na proporção 80% de metano e 20% monóxido de carbono. A caldeira opera com um total de 50.000 Nm<sup>3</sup> de ar de combustão por hora, trabalhando com um excesso de ar de 5.000 Nm<sup>3</sup>/hora, ambos referidos às condições normais de temperatura e pressão. Calcular a quantidade de oxigênio estequiométrico sendo consumido por hora pela caldeira. Com base na quantidade de ar e de oxigênio estequiométricos, calcular a quantidade queimada por hora de metano e de monóxido de carbono.

Solução:

Base referencial: Uma hora de operação

Dados do problema:

- Gás contendo 80% metano (CH<sub>4</sub>) e 20% monóxido de carbono (CO) em base volumétrica (e também em número de moles-grama)
- Ar de combustão injetado por hora: 50.000 Nm<sup>3</sup>
- Excesso de ar de combustão: 5.000 Nm<sup>3</sup>/hora

Reações estequiométricas de combustão completa dos gases presentes no combustível:



1 mole-grama de metano consome 2 mole-grama de oxigênio

16 gramas de metano requerem 64 gramas de oxigênio ou 44,8 litros

**16 kg de metano requerem 44,8 Nm<sup>3</sup> de oxigênio**



2 moles-grama de monóxido de carbono consomem 1 mole-grama de oxigênio

56 gramas de monóxido de carbono requerem 32 gramas de oxigênio ou 22,4 litros

**56 kg de monóxido de carbono requerem 22,4 Nm<sup>3</sup> de oxigênio**

Cálculo da quantidade estequiométrica de ar de combustão:

Ar de combustão injetado: 50.000 Nm<sup>3</sup>/hora

Excesso de ar de combustão: 5.000 Nm<sup>3</sup>/hora

Ar estequiométrico = 50.000 – 5.000 = **45.000 Nm<sup>3</sup>/hora**

1 molécula-grama (mol ou mole) corresponde a 22,4 litros

1 molécula-quilograma (kmol ou kmole) corresponde a 22,4 Nm<sup>3</sup>

Cálculo da distribuição e peso de 100 moléculas-quilograma do gás combustível:

- 100 moléculas-quilograma do gás combustível possuem:

80 moléculas-quilograma de metano

1.792 Nm<sup>3</sup> de metano

1.280 kg de metano

20 moléculas-quilograma de monóxido de carbono

448 Nm<sup>3</sup> de monóxido de carbono

1.120 kg de monóxido de carbono

100 moléculas-quilograma do gás combustível misto sendo queimado representam:

2.400 kg da mistura dos dois gases na proporção do enunciado

2.240 Nm<sup>3</sup> de volume de gás combustível

Cálculo do consumo de oxigênio estequiométrico correspondente a 100 moléculas-quilograma do gás combustível:

100 moléculas-quilograma do gás combustível possuem:

- 80 moléculas-quilograma de metano que consumirão 160 moléculas-quilograma de oxigênio
- 20 moléculas-quilograma de monóxido de carbono que consumirão 10 moléculas-quilograma de oxigênio

Logo, 100 moléculas-quilograma do gás combustível pesam 2.400 kg e consumirão 170 moléculas-quilograma de oxigênio, ou seja 3.808 Nm<sup>3</sup> de oxigênio estequiométrico, que por sua vez correspondem a:

$(3.808 \text{ Nm}^3) : 0,21 = 18.133 \text{ Nm}^3$  de ar de combustão estequiométrico

Do que resulta:

2.400 kg gás --- 3.808 Nm<sup>3</sup> oxigênio ---- 18.133 Nm<sup>3</sup> ar estequiométrico

Cálculo das necessidades horárias de oxigênio estequiométrico para 45.000 Nm<sup>3</sup> de ar estequiométrico injetado na caldeira:

3.808 Nm<sup>3</sup> oxigênio ---- 18.133 Nm<sup>3</sup> ar estequiométrico

X ----- 45.000 Nm<sup>3</sup>

**X = 9.450 Nm<sup>3</sup> de oxigênio estequiométrico para queima do combustível misto por hora**

Cálculo do peso queimado por hora do combustível misto:

2.400 kg ----- 3.808 Nm<sup>3</sup> oxigênio

Y ----- 9.450 Nm<sup>3</sup> oxigênio

**Y = 5.956 kg por hora de gás combustível sendo queimado**

Cálculo das quantidades horárias de metano e monóxido de carbono:

Lembrando que:

100 moléculas-quilograma do gás sendo queimado representam:

2.400 kg da mistura dos dois gases na proporção do enunciado

2.240 Nm<sup>3</sup> de volume de gás

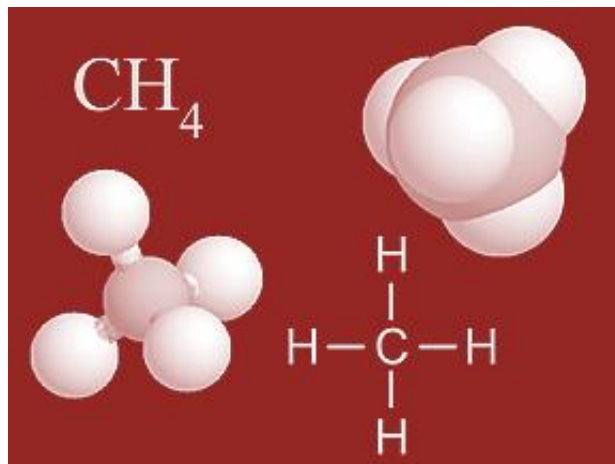
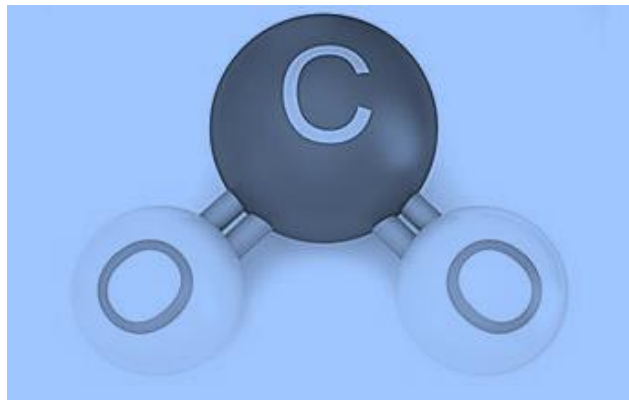
2.400 kg ----- 2.240 Nm<sup>3</sup>

5.956 kg ----- Z

Z = 5.559 Nm<sup>3</sup> de gás combustível, sendo que:

80% desse volume é metano = **4.447 Nm<sup>3</sup> de metano/hora**

20% desse volume é monóxido de carbono = **1.112 Nm<sup>3</sup> de monóxido de carbono/hora**



- **Alguns problemas e cálculos práticos sobre geração e conservação de calor e energia**



### **Problema 07:**

Uma caldeira de biomassa queima cavacos de madeira e seu consumo específico de combustível é de 600 kg de biomassa úmida por Gcal útil produzida.

- Considerando que a eficiência térmica dessa caldeira seja de 85%, qual o poder calorífico útil dessa biomassa em Mcal/tonelada úmida?
- Considerando ainda que o preço da biomassa energética seja de 50 dólares por tonelada úmida, calcular o custo do combustível por unidade de Gcal útil produzida.

Solução:

Base referencial: Uma Gcal útil produzida

Cálculo da quantidade de energia primária no combustível por Gcal útil produzida:

Eficiência energética da caldeira = 85% - ou seja: 0,85 Gcal útil por Gcal primária no combustível

Quantidade calor combustível/Gcal útil produzida= (1 Gcal útil) : 0,85 =

**1,1764 Gcal combustível/Gcal útil**

Cálculo do poder calorífico útil da biomassa úmida:

600 kg de biomassa úmida ----- 1,1764 Gcal  
1.000 kg de biomassa úmida ----- X

X = 1,961 Gcal/tonelada úmida de biomassa

X = **1.961 Mcal/t úmida**

Cálculo do gasto com biomassa por Gcal útil produzida:

1.000 kg de biomassa úmida ----- 50 US\$  
600 kg de biomassa/Gcal ----- X

X = **30 US\$ por Gcal útil produzida pela caldeira produzida**

---

### **Problema 08:**

A emissão de material particulado da caldeira do exercício anterior foi legislada como devendo ser de no máximo 20 gramas/GJ no combustível primário queimado. Qual seria a quantidade diária em peso seco de particulados que essa caldeira de força poderia emitir como limite máximo caso ela estivesse gerando 6.000 Gcal de energia útil nesse período?

Solução:



Base referencial: 6.000 Gcal de energia útil produzida por dia

Conhece-se que:

1 Gcal = 4,1868 GJ

Equivalência entre 6.000 GCal/dia e GJ/dia:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ Gcal} & = & 4,1868 \text{ GJ} \\ 6.000 \text{ GCal/dia} & \text{-----} & X \end{array}$$

X = 25.121 GJ de energia útil produzida/dia

Cálculo das necessidades diárias de energia primária na biomassa combustível:

Eficiência térmica da caldeira = 85%

Energia primária do combustível = (25.121 GJ de energia útil produzida/dia) : 0,85 =

Y = **29.554 GJ de energia primária no combustível**

Cálculo da geração diária limitada pela legislação para particulados emitidos:

Limite máximo particulados gerados = (20 g particulados/GJ de energia primária no combustível) . (29.554 GJ de energia primária/dia) =

Limite máximo particulados gerados = 591.080 gramas de particulados/dia =

**591 kg de particulados por dia de operação da caldeira**

### **Problema 09:**

Uma caldeira de força queima carvão vegetal com poder calorífico útil de 8.000 kcal/kg a uma razão de 1 kg de combustível por segundo. Admitindo-se que a caldeira tenha uma eficiência térmica de 85%, qual a quantidade horária de calor que essa caldeira oferece como produção de vapor?

Solução:

Base referencial: Uma hora de queima da caldeira

Cálculo do consumo horário de carvão vegetal:

Consumo: 1 kg/segundo . (60 seg./minuto) . (60 minutos/hora) =  
3.600 kg de carvão vegetal por hora

Quantidade de calor primário oferecido à caldeira por hora:

3.600 kg/hora . 8.000 kcal/kg = 28.800.000 kcal/hora

**28,8 Gcal/hora**

Cálculo da quantidade de calor convertida em vapor em função da eficiência térmica de 85%:

28,8 Gcal/hora . 0,85 = **23,04 Gcal/hora**



### **Problema 10:**

Uma pequena fornalha aquece uma serpentina na qual circula água com vazão igual a 18.000 kg/hora. A água entra com temperatura de 20°C e sai a 80°C. A fornalha opera com lenha bastante seca de eucalipto com um poder calorífico útil de 3.000 kcal/kg base peso úmido. O rendimento do processo de aquecimento da água é de 80%. Qual a quantidade de calor que deve ser oferecida à água em uma hora para se conseguir esse aquecimento? Qual o consumo de lenha na base horária?

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade líquida de calor necessário para aquecer a água de 20° para 80°C:

$$Q_{\text{calor}} = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Onde:

$$m = 18.000 \text{ kg/hora}$$

$$c = 1 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 80 - 20 = 60^\circ\text{C}$$

Logo:

$$Q_{\text{calor}} = 18.000 \cdot 1 \cdot 60 = 1.080.000 \text{ kcal/hora}$$

Cálculo da quantidade total de calor necessário para aquecer a água em função do rendimento térmico da fornalha ser 80%:

$$Q_{\text{calor total}} = (1.080.000) : 0,8 = \mathbf{1.350.000 \text{ kcal/hora}}$$

Cálculo da quantidade de lenha requerida por hora:

$$\begin{array}{r} 1 \text{ kg lenha} \text{ -----} 3.000 \text{ kcal} \\ X \text{ -----} 1.350.000 \text{ kcal} \end{array}$$

$$X = \mathbf{450 \text{ kg lenha/hora}}$$

## **Problema 11:**

Uma fábrica de celulose kraft consome 15 GJ de vapor de aquecimento por tonelada de celulose seca ao ar. A geração de efluente líquido bruto é de 30 m<sup>3</sup> por tonelada seca ao ar e a temperatura desse efluente que chega à torre de resfriamento é de 65°C. Sabendo-se que a temperatura da água do rio de onde se capta a água para a fábrica é de 25°C, pede-se determinar qual a quantidade específica de calor perdido e a respectiva percentagem do calor utilizado que a fábrica desperdiça através dos efluentes hídricos para cada tonelada de celulose produzida.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada seca ao ar de celulose

Dados do problema:

Calor consumido por tonelada seca ao ar de celulose: 15 GJ

Geração específica de efluente: 30 m<sup>3</sup>

Temperatura da água captada: 25°C

Temperatura do efluente para resfriamento: 65°C

Cálculo da quantidade de calor perdido nos efluentes por cada tonelada de celulose seca ao ar:

$$QC = M \cdot C \cdot \Delta T$$

onde:

- QC = Quantidade de calor em Mcal
- M = Massa ou peso de efluente em toneladas (ou equivalentes em m<sup>3</sup>)
- C = Calor específico da efluente, assumido igual ao da água em Mcal/t.°C = 1
- ΔT = Diferencial de temperatura do efluente a 65°C para a água captada a 25°C

$$QC = M \cdot C \cdot \Delta T$$

$$QC \text{ (Mcal)} = (30 \text{ t}) \cdot (1 \text{ Mcal/t.}^\circ\text{C}) \cdot (65^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

QC (Mcal) = 1.200 Mcal equivalentes a cada tonelada seca ao ar de celulose

Ou

QC (Gcal) = 1,200 Gcal equivalentes a cada tonelada seca ao ar de celulose

Sabe-se que:

$$1 \text{ Gcal} = 4,1868 \text{ GJ}$$

Logo

$$1,2 \text{ Gcal} \text{ ----- } X$$

**X = 5,02 GJ de calor perdido nos efluentes por tonelada seca ao ar de celulose**

Cálculo do desperdício percentual do calor perdido nos efluentes em relação ao calor consumido:

Calor específico consumido = 15 GJ/t celulose

Calor desperdiçado via efluentes = 5,02 GJ/t celulose

$$\% \text{Calor Perdido ou Desperdiçado} = 100 \cdot \{(5,02) / (15)\} =$$

**33,5% do calor adicionado na fabricação da celulose se perde como efluente quente a ser resfriado e descartado**

## **Problema 12:**

O poder calorífico útil de uma lenha de eucalipto vem sendo estimado através da seguinte fórmula prática empírica desenvolvida especificamente para ela:

$$PC_{\text{Útil}} = 4.800 - 55 \cdot (\text{Teor de Umidade})$$

PC<sub>Útil</sub> – em Mcal/tonelada de biomassa tal qual

Umidade – em percentagem base material úmido

Calcular através da aplicação dessa fórmula o poder calorífico de uma lenha absolutamente seca e de outra lenha com 50% de umidade. Calcular também o consumo de calor requerido para evaporar a água dessa lenha a 50% de umidade quando ela for queimada como combustível em uma caldeira. Expressar esse consumo de calor em Mcal/tonelada seca de biomassa. Calcular ainda qual a percentagem do calor potencialmente contido nessa biomassa que acaba sendo consumido para evaporação da água presente na lenha úmida.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada absolutamente seca de lenha de eucalipto

Cálculo do poder calorífico útil de uma lenha totalmente seca de eucalipto:

$$PC_{\text{Útil}} = 4.800 - 55 \cdot (\text{Teor de Umidade})$$

Quando Teor de Umidade = 0%

Tem-se:

$PC_{\text{Útil\_lenha seca}} = 4.800 \text{ Mcal/t a.s.}$  (que equivale ao seu poder calorífico inferior)

Cálculo do poder calorífico útil de uma lenha de eucalipto com 50% de umidade:

$$PC_{\text{Útil}} = 4.800 - 55 \cdot (\text{Teor de Umidade})$$

Quando Teor de Umidade = 50%

Tem-se:

$$PC_{\text{Útil}} = 4.800 - 55 \cdot (50)$$

PC<sub>Útil</sub>\_lenha50% = 2.050 Mcal/t de lenha a 50% umidade

Ou melhor – 500 quilogramas a.s. e 500 quilogramas de água estarão compondo essa lenha úmida com poder calorífico de 2.050 Mcal/t úmida

Cálculo da quantidade de calor para evaporar a água presente em uma lenha a 50% de umidade:

$$\begin{array}{r} 0,5 \text{ t a.s. madeira} + 0,5 \text{ t água} \text{ ----- } 2.050 \text{ Mcal/t úmida} \\ 1 \text{ t a.s.} \text{ ----- } 1 \text{ t água} \text{ ----- } X \end{array}$$

X = 4.100 Mcal para uma biomassa a 50% de umidade, mas expresso base em 1 t a.s.

Cálculo da quantidade de energia requerida para evaporar a umidade presente em 1 t a.s. de biomassa energética:

Q<sub>calor</sub> evaporação água = (4.800 Mcal/t a.s.) – (4.100 Mcal para uma biomassa a 50% de umidade/t a.s.) =

**700 Mcal de calor/t absolutamente seca de biomassa para aquecer e evaporar 1 t de água** (umidade presente em uma tonelada seca e correspondente a 2 toneladas de biomassa úmida com 50% de teor umidade)

Cálculo em percentagem do calor que será utilizado para aquecer e evaporar a água da umidade:

Calor total em 1 t a.s. de biomassa seca = 4.800 Mcal/t a.s.  
Calor para aquecer e evaporar a água presente em 1 t a.s. de biomassa = 700 Mcal/t a.s.

%Perda de calor = 100 . (700/4.800) =

%Perda de calor = **14,6% se perdem para aquecer e evaporar a água da biomassa úmida com 50% de umidade**

### **Problema 13:**

Uma tora de eucalipto recém cortada e ainda verde contém 12% de seu volume como sendo casca e 88% madeira. Medindo-se imediatamente a densidade dessa casca e dessa madeira se observaram os seguintes valores médios: Casca = 0,3 t a.s./m<sup>3</sup> casca; Madeira = 0,55 t a.s./m<sup>3</sup> madeira. Calcular o teor de casca dessa tora com base em seu peso seco.

Solução:

Base referencial: Um metro cúbico de uma tora de madeira de eucalipto com casca

Dados do problema:

Teor volumétrico de casca na tora: 12%

Teor volumétrico de xilema ou madeira: 88%

Densidade básica da casca: 0,3 t a.s./m<sup>3</sup> de casca

Densidade básica da madeira: 0,55 t a.s./m<sup>3</sup> de madeira

Cálculo dos volumes de madeira e casca na tora referencial de 1 m<sup>3</sup> de volume:

12% do volume total da tora é casca = 0,12 m<sup>3</sup> de casca

88% do volume total da tora é madeira = 0,88 m<sup>3</sup> de madeira

Cálculo dos pesos secos de casca e madeira na tora referencial de 1 m<sup>3</sup>:

Peso = (Volume) . (Densidade)

Peso de casca = (0,12 m<sup>3</sup>) . (0,3 t a.s./m<sup>3</sup> de casca) =

Peso de casca = 0,036 t a.s./m<sup>3</sup> de casca

Peso de madeira = (0,88 m<sup>3</sup>) . (0,55 t a.s./m<sup>3</sup> de madeira) =

Peso de madeira = 0,484 t a.s. de madeira

Cálculo das percentagens de madeira e casca base peso da tora:

Peso total da tora = (Peso casca) + (Peso madeira) =

Peso total da tora = (0,036 t a.s. casca) + (0,484 t a.s. madeira) =



Peso total da tora = 0,52 t a.s.

% Casca base peso =  $100 \cdot (\text{Peso Casca}/\text{Peso Total}) =$

% Casca base peso =  $100 \cdot (0,036/0,52)$

% Casca base peso = **6,923% de casca base peso seco**

% Madeira base peso =  $100 \cdot (\text{Peso Madeira}/\text{Peso Total}) =$

% Madeira base peso =  $100 \cdot (0,484/0,52)$

% Madeira base peso = **93,077% de madeira base peso seco**

---

### **Problema 14:**

Um licor preto kraft com 75% de sólidos secos apresenta a seguinte composição:

- Teor de umidade: 25%
- Sólidos orgânicos: 65%
- Sólidos inorgânicos: 35%
- Teor de lignina no material orgânico: 45% base a.s.
- Teor de holocelulose no material orgânico: 55% base a.s.

Sabe-se ainda que:

- Poder calorífico inferior da lignina: 27 GJ/tonelada a.s.
- Poder calorífico inferior da holocelulose: 21 GJ/tonelada a.s.

Estimar qual deverá ser o poder calorífico aproximado de uma tonelada dos sólidos secos desse licor a 75% de umidade e com temperatura de 100°C. Admitir que os sólidos orgânicos e inorgânicos não consumirão calor pois não se aquecerão ou evaporação na determinação do poder calorífico.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada de licor preto kraft a 75% de Sólidos Secos (SS)

Composição de uma tonelada de licor preto kraft a 75% de Sólidos Secos:

Peso seco = 0,75 t SS (pois se trata de uma tonelada de licor a 75% de SS)

Peso úmido = 1 t

Peso água = 0,25 t água

65% de sólidos orgânicos na fração de Sólidos Secos =  $0,65 \cdot 0,75 =$   
**0,4875 t a.s. de sólidos orgânicos**

35% sólidos inorgânicos na fração de Sólidos Secos =  $0,35 \cdot 0,75 =$   
**0,2625 t a.s. de sólidos inorgânicos**

Composição e quantidade dos sólidos orgânicos:

45% de lignina nos sólidos orgânicos =  $0,45 \cdot (0,4875 \text{ t a.s. de sólidos orgânicos}) =$   
**0,2194 t a.s. de lignina/t licor a 75% de SS**

55% de holocelulose nos sólidos orgânicos =  $0,55 \cdot (0,4875 \text{ t a.s. de sólidos orgânicos}) =$   
**0,2681 t a.s. de holocelulose/t licor a 75% de SS**

Quantidade de calor oferecido pelos constituintes orgânicos secos do licor preto kraft concentrado:

$Q_{\text{Lignina}} = (0,2194 \text{ t a.s. lignina}) \cdot (27 \text{ GJ/t a.s. lignina}) =$   
**5,93 GJ da lignina**

$Q_{\text{Holocelulose}} = (0,2681 \text{ t a.s. holocelulose}) \cdot (21 \text{ GJ/t a.s. holocelulose}) =$   
**5,63 GJ da holocelulose**

$Q_{\text{Total}} = 5,93 + 5,63 =$   
**11,56 GJ primariamente presentes na fração orgânica e seca do licor preto**

Quantidade de calor roubada pela água para se aquecer e evaporar:

Admitir:

Calor específico da água =  $C = 1 \text{ Mcal/t.}^\circ\text{C}$

Calor latente de evaporação da água =  $C_{\text{Latente}} = 540 \text{ Mcal/t a } 100^\circ\text{C}$

Peso de água =  $M = 0,25 \text{ t}$

Temperatura do licor preto =  $100^\circ\text{C}$

Logo, a água desse licor não demandará energia para se aquecer, apenas para mudar de estado físico de líquido para vapor

$$QC = M \cdot C \cdot \Delta T + M \cdot C_{\text{Latente}}$$

$$QC = (0,25 \text{ t}) \cdot (1 \text{ Mcal/t.}^\circ\text{C}) \cdot (100^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) + (0,25 \text{ t}) \cdot (540 \text{ Mcal/t})$$

$$QC = 0 + 135 = 135 \text{ Mcal}$$

Por outro lado:

$$1 \text{ Gcal} = 1.000 \text{ Mcal} = 4,1868 \text{ GJ}$$

$$135 \text{ Mcal} \text{ ----- } Y$$

**$Y = 0,56 \text{ GJ}$  que a água roubará para se evaporar**

Cálculo do poder calorífico útil desse licor preto kraft concentrado a 75%SS:

$$Q_{\text{CLíquido}} = 11,56 - 0,56 =$$

**Poder Calorífico Útil = 11 GJ /t de licor preto a 75% de SS**



### **Problema 15:**

Uma empresa queima carvão mineral em sua caldeira de força para gerar 15.000 GJ/dia de energia térmica útil na forma de vapor superaquecido. Admitindo que a eficiência da caldeira seja de 88% e que o poder calorífico útil desse carvão seja de 4.500 kcal/kg base umidade tal qual, qual a necessidade diária de carvão para queima? Se o teor de cinzas base seca do carvão for de 30% e sua umidade 10%, qual a quantidade de cinzas passíveis de serem recuperadas pelos sistemas de coleta de cinzas leves (precipitadores eletrostáticos) e pesadas (cinzas de fundo da fornalha) e que podem fazer parte do sistema de reciclagem da empresa? São conhecidos: Eficiência de remoção de cinzas: 95%. Perda de cinzas para o ambiente: 5%.

Solução:

Base referencial: Um dia de operações da caldeira de força

Dados do problema:

Geração de energia térmica: 15.000 GJ/dia

Eficiência térmica da caldeira de força: 88%

Poder calorífico útil carvão mineral: 4.500 kcal/kg base umidade tal qual

Umidade do carvão mineral: 10%

Teor de cinzas do carvão base peso seco: 30%

Eficiência de remoção de cinzas: 95% base peso seco

Perda de cinzas: 5% base peso seco

Cálculo do poder calorífico do carvão mineral em GJ/t tal qual:

Poder calorífico útil relatado = 4.500 kcal/kg carvão 10% umidade

Poder calorífico útil relatado = 4.500 Mcal/t carvão 10% umidade

Por outro lado:

$$1 \text{ Gcal} = \frac{1.000 \text{ Mcal}}{4.500 \text{ Mcal/t carvão}} = \frac{4,1868 \text{ GJ}}{X}$$

**X = 18,84 GJ/ t carvão 10% umidade**

Cálculo da demanda de carvão requerido por dia de operação, admitindo eficiência térmica de 100%:

Produção total de energia = 15.000 GJ/dia

Demanda "teórica" carvão para 100% eficiência térmica = (15.000 GJ/dia) : (18,84 GJ/t carvão) =

796,2 t carvão a 10% umidade/dia

Cálculo da demanda de carvão requerido por dia de operação, admitindo eficiência térmica de 88%:

Demanda efetiva carvão = (796,2 t carvão 10% umidade/dia) : 0,88 =

**904,8 t carvão a 10% umidade/dia**

Cálculo do peso diário de sólidos secos do carvão mineral consumido:

Peso seco = (Peso úmido) . (Teor Sólidos Secos) = 904,8 . 0,9 =

Peso seco = **814,3 t SS de carvão mineral/dia**

Cálculo da quantidade diária de cinzas presentes nesse carvão:

Quantidade cinzas = (Peso seco carvão) . (Teor de Cinzas)

Quantidade cinzas = (814,3 t SS/dia) . 0,30 =

**244,3 t cinzas por dia**

Cálculo da quantidade diária de cinzas potencialmente destinadas para processos de reciclagem externa:

Quantidade cinzas a reciclar = (244,3 t cinzas por dia) . 0,95 =

**232 t cinzas secas de carvão mineral a reciclar por dia**

### **Problema 16:**

Uma turbina de extração a vapor recebe 1.000 toneladas de vapor com entalpia de 3,4 MJ/kg, produz eletricidade e expõe um vapor residual com 2,0 MJ/kg. A eficiência energética dessa turbina é de 78%. Determinar a energia elétrica líquida em MWh, que é gerada nessas condições pela turbina. Determinar também a relação entre consumo de vapor ingressante na turbina por MWh gerado.

Solução:

Cálculo do calor ou energia cedida por tonelada de vapor:

(Entalpia do vapor de entrada) - (Entalpia do vapor expelido) =

$$3,4 - 2 = 1,4 \text{ MJ/kg de vapor} = 1,4 \text{ GJ/t vapor}$$

Cálculo da energia cedida por 1.000 toneladas de vapor:

$$(1.000 \text{ t vapor}) \cdot (1,4 \text{ GJ/t vapor}) = 1.400 \text{ GJ}$$

Cálculo da energia líquida convertida em eletricidade pela turbina:

(Energia recebida do vapor) . (Eficiência energética) =

$$1.400 \text{ GJ} \cdot 0,78 = \mathbf{1.092 \text{ GJ úteis de energia elétrica gerada na conversão}}$$

Por outro lado:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ ou } 1 \text{ MWh} = 3,6 \text{ GJ}$$

Consequentemente:

$$(1.092 \text{ GJ}) : (3,6 \text{ GJ/MWh}) = \mathbf{303,3 \text{ MWh}}$$

Cálculo da quantidade de vapor consumido por MWh gerado:

$$\text{Geração de eletricidade} = 303,3 \text{ MWh}$$

$$\text{Suprimento de vapor (para consumo da turbina)} = 1.000 \text{ toneladas}$$

$$\text{Relação vapor/eletricidade} = (1.000 \text{ t}) : (303,3 \text{ MWh}) =$$

$$\mathbf{3,3 \text{ t vapor superaquecido/MWh}}$$

### **Problema 17:**

Um motor a gás queima gás natural com poder calorífico inferior de 35 MJ/Nm<sup>3</sup>. O consumo desse combustível pelo motor é de 105 Nm<sup>3</sup>/hora e a potência do motor em seu eixo de saída é de 450 kW. Qual a eficiência energética desse motor em relação à energia primária do combustível que está queimando?

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade de energia recebida através do gás natural como energia primária:

Energia primária do combustível ao motor =  
(Fluxo de combustível) . (Poder calorífico inferior do combustível)  
(105 Nm<sup>3</sup>/hora) . (35 MJ/m<sup>3</sup>) = 3.675 MJ/hora = 3,675 GJ/hora

Cálculo da energia efetivamente disponibilizada em uma hora pelo motor:

Energia = (Potência) . (Tempo) = (450 kW) . (1 hora) = 450 kWh

...que correspondem a:

1 kWh = 3,6 MJ

450 kWh = (450 kWh) . (3,6 MJ/kWh) = 1.620 MJ = 1,62 GJ/hora

Cálculo da eficiência energética do motor a gás:

Eficiência energética = 100 . {(Energia líquida oferecida pelo motor) :  
(Energia primária do combustível)}

Eficiência energética = 100 . {(1,62 GJ/hora) : (3,675 GJ/hora)} =

Eficiência energética = **44,08% de eficiência energética**



---

### **Problema 18:**

Qual a área de efetivo plantio que uma empresa de base florestal deve possuir para conseguir suprir integralmente o abastecimento de uma usina térmica (caldeira de biomassa) que produz vapor superaquecido, sendo conhecidos os seguintes dados:

- Sobre a usina térmica - Caldeira de biomassa:

Produção nominal de vapor superaquecido = 100 t/hora

Vapor: 450°C de temperatura e 75 bar de pressão absoluta

Entalpia do vapor: 784 Mcal/t de vapor

Temperatura da água de alimentação da caldeira: 70°C

Entalpia da água de alimentação: 70 Mcal/t

Rendimento térmico da caldeira: 75% para conversão da biomassa em vapor nessas condições de entalpia

Eficiência de produção (percentual da capacidade nominal teórica da central térmica que é efetivamente utilizada) = 95%

- Sobre a floresta plantada de eucalipto:

Produtividade florestal em toneladas secas/hectare.ano = 20

Idade de corte: 7 anos

Poder calorífico inferior da biomassa seca (madeira + casca) = 4.300 Mcal/tonelada

Perdas de biomassa na colheita, transporte e na usina térmica: 4%

Umidade da biomassa no momento da alimentação da caldeira: 30%

- Observação:



Adotar a fórmula do professor José Otávio Brito (1993) para se determinar o poder calorífico útil da biomassa a 30% de umidade:

$$\text{PCÚtil} = \text{PCI} \times [(\text{100} - \text{U})/\text{100}] - \text{6.U}$$

Onde:

U = Teor percentual de umidade base peso úmido = 30% (Equivalente a 70% de percentual seco)

PCI = Poder Calorífico Inferior (Mcal/t seca)

PCÚtil = Poder Calorífico Útil na umidade de 30% (Mcal/t a 30%)

Solução:

Base referencial: Um ano de produção da usina térmica

Cálculo da produção efetiva de vapor por ano, com 95% de utilização da capacidade ou carga nominal

$$\begin{aligned} Q_{\text{vapor}} &= [(100 \text{ t/hora}) \cdot (24 \text{ h/dia}) \cdot (365 \text{ d/ano})] \cdot 0,95 = \\ Q_{\text{vapor}} &= \mathbf{832.200 \text{ t vapor/ano}} \end{aligned}$$

Cálculo da quantidade efetiva de calor agregado por tonelada de água até sua conversão a vapor nas condições do problema:

$$\begin{aligned} Q_{\text{calor unitário}} &= (\text{Entalpia do vapor/t}) - (\text{Entalpia da água/t}) \\ Q_{\text{calor unitário}} &= 784 - 70 \\ Q_{\text{calor unitário}} &= \mathbf{714 \text{ Mcal/t de vapor}} \end{aligned}$$

Admite-se aqui que a água de alimentação consiste de água aquecida com calor recuperado de outras unidades da fábrica, tendo sua temperatura subido de aproximadamente 25°C até 70°C com uso de outros calores a ela disponibilizados e por retorno de condensados de vapor vivo.

Cálculo da quantidade total de calor agregado à água para produção de vapor por ano:

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= (714 \text{ Mcal/t de vapor}) \cdot (832.200 \text{ t vapor/ano}) \\ Q_{\text{total}} &= \mathbf{594.191 \text{ Gcal/ano}} \end{aligned}$$

Cálculo da quantidade total de energia primária da biomassa que deve ser fornecida à caldeira com 75% de rendimento térmico:

$$Q_{\text{energia}} = (594.191 \text{ Gcal/ano}) : 0,75 =$$
$$Q_{\text{energia}} = \mathbf{792.254 \text{ Gcal/ano}}$$

Essa será a energia a ser suprida pela biomassa energética que vai alimentar a usina térmica.

Cálculo do poder calorífico útil da biomassa através da fórmula do professor Brito:

$$PC_{\text{Útil}} = PCI \times [(100 - U)/100] - 6 \cdot U$$
$$PC_{\text{Útil}} = 4.300 \times [(100 - 30)/100] - 6 \cdot 30$$
$$PC_{\text{Útil}} = 2.830 \text{ Mcal/tonelada biomassa a 30\%} =$$
$$PC_{\text{Útil}} = \mathbf{2,830 \text{ Gcal/tonelada biomassa a 30\%}}$$

Cálculo da quantidade total de biomassa a 30% de umidade para suprir essa necessidade energética ao longo de um ano de operações:

$$\text{Peso de biomassa a 30\% umidade/ano} =$$
$$(Q_{\text{energia}}) : (PC_{\text{Útil}}) = (792.254 \text{ Gcal/ano}) : (2,83 \text{ Gcal/t 30\%})$$

Peso de biomassa a 30% umidade/ano = **279.948 t biomassa a 30% de umidade**

Produção de biomassa efetiva a 30% de umidade por um hectare de floresta no momento da colheita aos 7 anos:

$$\text{Produção biomassa seca} = (20 \text{ t/hectare.ano}) \cdot (7 \text{ anos}) = 140 \text{ t secas/hectare colhido}$$

$$\text{Produção de biomassa equivalente a 30\% de umidade/hectare} =$$
$$(140 \text{ t secas/hectare}) : 0,7 = 200 \text{ toneladas de biomassa aos 7 anos com 30\% de umidade e 70\% de secos por hectare colhido}$$

Oferta de biomassa efetiva por hectare em função de 4% de perdas de biomassa no processamento e logística:

(200 toneladas de biomassa) . 0,96 =  
**192 toneladas de biomassa equivalente a 30% de umidade por hectare colhido aos 7 anos**

Cálculo da área a ser colhida anualmente:

(279.948 t biomassa a 30% de umidade) : (192 t biomassa a 30% de umidade por hectare) =

**= 1.458 hectares de florestas energéticas por ano**

Para uma rotação de 7 anos, a área total de efetivo plantio deverá ser igual a:

(1.458 hectares de florestas energéticas/ano) . (7 anos) =

**10.206 hectares totais de efetivo plantio**

Como dado prático desses cálculos se obtém um índice de praticamente 3 toneladas desse tipo vapor sendo produzido por tonelada de biomassa a 30% de umidade.

(832.200 t vapor/ano) : (279.948 t biomassa a 30% de umidade) =  
**2,97 t vapor/tonelada de biomassa a 30%**



## **Problema 19:**

Calcular a relação aproximada e efetiva (líquida) que possa ser considerada ao se avaliar o potencial energético de uma biomassa lenhosa a 30% de umidade em relação ao óleo combustível derivado do petróleo. O objetivo da avaliação deve substanciar a substituição de uma caldeira a óleo (combustível fóssil) por uma caldeira a biomassa (combustível renovável).

Admitir que:

- O poder calorífico útil do óleo combustível foi medido como sendo de 9.800 Mcal/tonelada e a eficiência energética da caldeira que o queima para geração de energia na forma de vapor é de 94%
- O poder calorífico útil da biomassa lenhosa na forma de cavacos de madeira é de 2.900 Mcal/tonelada de biomassa a 30% de umidade e a eficiência energética da caldeira será de 88%.

Considerando essa mesma biomassa a 30% de umidade, criar também um fator de conversão que relacione (peso de óleo combustível) e (peso seco de biomassa), tendo como base a mesma quantidade de energia disponibilizada como vapor ao processo e obtido da operação das duas caldeiras mencionadas.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada de óleo combustível

Cálculo da quantidade de energia produzida na forma de vapor pela caldeira de força movida pela alimentação de óleo combustível:

(1 tonelada de óleo) . (Poder calorífico útil óleo) . (Eficiência energética da caldeira de força) =

(1 t) . (9.800 Mcal/t) . 0,94 =

**9.212 Mcal úteis na forma de vapor/t óleo**

Cálculo da quantidade de energia produzida na forma de vapor pela caldeira de biomassa alimentada com cavacos de madeira a 30% de umidade:

(1 tonelada de biomassa a 30% umidade) . (Poder calorífico útil biomassa) . (Eficiência energética da caldeira de biomassa) =

(1 t) . (2.900 Mcal/t) . 0,88 =

**2.552 Mcal úteis na forma de vapor/t biomassa**

Cálculo da relação base pesos tais quais entre o óleo combustível e a biomassa a 30% de umidade para mesma geração energética:

(9.212 Mcal úteis na forma de vapor/t óleo) : (2.552 Mcal úteis na forma de vapor/t biomassa) =

**3,61 toneladas de biomassa a 30% umidade/tonelada de óleo combustível**

Ou, inversamente:

**0,277 toneladas de óleo combustível / tonelada de biomassa a 30% de umidade**

Cálculo do fator de conversão entre o peso seco de biomassa dessa biomassa a 30% de umidade e o peso óleo combustível para mesma geração energética:

[(3,61 toneladas de biomassa a 30% umidade) . 0,7] / (tonelada de óleo combustível) =

**2,527 toneladas de biomassa absolutamente seca presente na biomassa alimentada à caldeira / tonelada de óleo combustível**

Ou, inversamente:

**0,396 toneladas de óleo combustível por tonelada de biomassa seca equivalente à biomassa a 30% de umidade**

Esse fator tem muita validade prática, pois o produtor florestal sabe que ele pode eventualmente vender a sua floresta através de um cálculo matemático que converta o peso de biomassa a peso de óleo combustível equivalente (*a chamada equivalência energética da biomassa em termos de óleo combustível, conforme amplamente discutida anteriormente nesse capítulo*)

O produtor florestal pode assim, com base na produtividade volumétrica de sua floresta plantada para finalidades energéticas e na densidade básica média da biomassa, estimar a produção equivalente em peso seco de biomassa energética e em quanto de óleo combustível essa biomassa estará equivalendo.



### **Problema 20:**

Qual a produção de um vapor com 765 Mcal/tonelada que se conseguiria teoricamente produzir a partir de uma tonelada tal qual de cavacos de eucalipto com 30% de umidade e um poder calorífico útil de 2.970 Mcal/tonelada? Admitir um rendimento térmico bruto da caldeira de biomassa como sendo de 85% e a entalpia da água de alimentação ao sistema da caldeira de 50 Mcal/tonelada.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada de cavacos úmidos a 30% de umidade

Cálculo da quantidade de energia que deverá ficar disponível para ser agregada na produção do vapor superaquecido sendo produzido pela caldeira de biomassa quando essa queimar uma tonelada desses cavacos

$$Q_{\text{calor disponível ao vapor}} = [(Rendimento\ caldeira)/100] \cdot (PC_{\text{Útil cavacos}})$$

$$Q_{\text{calor disponível ao vapor}} = [(85/100)] \cdot (2.970\text{ Mcal/t}) =$$

$$Q_{\text{calor disponível ao vapor}} = \mathbf{2.524\text{ Mcal/t cavacos}}$$

Cálculo da quantidade de calor que uma tonelada de vapor nessas condições requer para ser formado a partir da água alimentada

$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água}) =$

$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = (765 - 50) \text{ Mcal/t vapor}$

$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = \mathbf{715 \text{ Mcal/t vapor}}$

Cálculo da produção em toneladas de efetivo vapor por tonelada tal qual de cavacos

Produção de vapor em toneladas por tonelada de cavacos a 30%U=

(Quantidade de calor disponibilizado pelos cavacos) : (Quantidade de calor requerido pelo vapor) =

$(2.524 \text{ Mcal/t cavacos}) : (715 \text{ Mcal/t vapor}) = \mathbf{3,5 \text{ t vapor/t cavacos a 30\%Umidade}}$

---

### **Problema 21:**

Expressar a produção de vapor por tonelada de cavacos na umidade de 30% do problema anterior para uma tonelada de cavacos base absolutamente seca equivalente a esse teor de umidade.

Solução:

Base referencial: 3,5 toneladas de vapor/tonelada de cavacos a 30%U

Cálculo da quantidade de matéria absolutamente seca em uma tonelada de cavacos a 30% de umidade

1 t úmida a 30%U ----- 0,7 t a.s. cavacos ----- 3,5 t vapor  
1 t a.s. cavacos ----- X

X =

**5 toneladas vapor/t a.s. cavacos** equivalentes à biomassa com 30% de umidade

---

### **Problema 22:**

Uma caldeira de biomassa produz 150 t/hora de um vapor com 800 Mcal/t de entalpia. Para essa produção, faz-se uma alimentação de água desmineralizada ao sistema com uma entalpia de 80 Mcal/t e se obtém um rendimento térmico bruto na caldeira de 90%. A biomassa florestal utilizada na combustão possui um poder calorífico útil na umidade em que se encontra de 2.000 Mcal/t tal qual. Qual a quantidade em peso tal qual de biomassa florestal que se deve alimentar à caldeira por hora de operações? Criar uma fórmula prática para simplificar esse tipo de cálculo em situações similares em que se necessite estimar a demanda de biomassa de uma caldeira em função da quantidade de vapor produzido.

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade útil de calor que se necessita agregar a uma tonelada de água para se produzir 1 tonelada desse vapor

$$Q_{\text{calor a agregar/t vapor}} = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água})$$

$$Q_{\text{calor a agregar/t vapor}} = (800 - 80) \text{ Mcal/t vapor} = \mathbf{720 \text{ Mcal/t vapor}}$$

Cálculo da quantidade total de calor que se necessita agregar à água para serem produzidas 150 toneladas de vapor por hora



$$\begin{aligned}
 &Q \text{ calor a agregar/hora} = \\
 &(\text{Produção horária vapor}) \cdot [(\Delta \text{ Entalpia})/\text{tonelada vapor}] = \\
 &(150 \text{ t vapor/hora}) \cdot [720 \text{ Mcal/t vapor}] = \\
 &Q \text{ calor a agregar/hora} = \mathbf{108.000 \text{ Mcal/hora}}
 \end{aligned}$$

Cálculo da quantidade efetiva de energia primária que se necessita oferecer com a biomassa combustível por hora de operações em função do rendimento energético da caldeira

O cálculo deriva da fórmula do rendimento energético ou térmico bruto de uma caldeira de força:

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{\text{Rendimento (\%)} =} \\
 &\mathbf{100 \cdot \{(\text{Energia agregada ao vapor}) : (\text{Energia disponibilizada pelo combustível alimentado na combustão})\}}
 \end{aligned}$$

De onde se deriva:

$$\mathbf{(\text{Energia disponibilizada pelo combustível alimentado}) = [\text{Energia agregada ao vapor}) : [(\text{Rendimento}/100)]}$$

$$\text{E}_{\text{biomassa combustível}} = [\text{Energia agregada ao vapor}) : [(\text{Rendimento}/100)]$$

$$\text{E}_{\text{biomassa combustível}} = [108.000 \text{ Mcal/h}) : [90/100] =$$

$$\text{E}_{\text{biomassa combustível}} = \mathbf{120.000 \text{ Mcal/hora}}$$

Cálculo do peso requerido de biomassa combustível a ser alimentado por hora para se produzirem 150 t de vapor por hora

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ tonelada úmida de biomassa} ===== 2.000 \text{ Mcal} \\
 &X ----- 120.000 \text{ Mcal/h}
 \end{aligned}$$

$$X = \mathbf{60 \text{ toneladas de biomassa por hora de operações}}$$

O que nos dá uma relação de  $[150/60] = 2,5$  toneladas de vapor por tonelada dessa biomassa combustível na umidade em que se encontra (não relatada no enunciado do problema, mas possivelmente entre 45 a 50%)

Fórmula desenvolvida para simplificação dos cálculos

**Peso biomassa/hora =**

**$[(\text{Quantidade vapor/h}) \cdot (\Delta \text{ Entalpia})] : [(\text{Rendimento}/100) \cdot (\text{PCÚtil biomassa})]$**

Que pode ser testada numericamente:

$[(150 \text{ t vapor/h}) \cdot (720 \text{ Mcal/t vapor})] : [(90/100) \cdot (2.000 \text{ Mcal/t biomassa})]$   
=

**60 toneladas de biomassa/hora de operações**

A fórmula prática assim desenvolvida pode ser aplicada com distintas unidades, desde que mantida a equivalência das mesmas. Por exemplo, a unidade de tempo pode ser dia, ou mês, ou ano. A unidade de energia pode ser GJ/t, ou MWh/t, ou outras. Entretanto, se for escolhida uma unidade para um determinado parâmetro, ela deve ser mantida a mesma em toda a fórmula.



### **Problema 23:**

Qual a quantidade de vapor com entalpia de 810 Mcal/t que se pode obter queimando em uma caldeira a produção em lenha de um hectare de uma plantação de eucalipto que foi colhida com 7 anos e que rendeu 280 m<sup>3</sup> de toras com casca.

São dados:

- Densidade básica média das toras de lenha = 0,5 t a.s./m<sup>3</sup> sólido
- Umidade a ser praticada nos cavacos resultantes dessa lenha no momento da queima na caldeira = 35%
- Poder calorífico útil desses cavacos com 35% de umidade = 2.700 Mcal/tonelada a 35%U
- Rendimento da caldeira de força = 85%
- Entalpia de água de alimentação = 70 Mcal/t
- Perdas de madeira no processo: Admitir que não ocorram

Solução:

Base referencial: Produção de um hectare de floresta (280 m<sup>3</sup> sólidos de toras de lenha com casca)

Cálculo de peso de toras de lenha sendo produzidas em um hectare

Peso a.s. toras = (Volume, m<sup>3</sup>/ha) . (Dbásica, t a.s./m<sup>3</sup>)

Peso a.s. toras = (280 m<sup>3</sup>/ha) . (0,5 t a.s./m<sup>3</sup>)

Peso a.s. toras = **140 t a.s. / hectare**

Cálculo de peso equivalente a 35% umidade de toras de lenha sendo produzidas em um hectare

100 t úmidas lenha ----- 65 t a.s. lenha ----- 35 t água  
X ----- 140 t a.s.

X = **215,4 t úmidas de toras a 35% umidade**

Cálculo da quantidade de calor disponibilizado pela produção equivalente de lenha a 35%Umidade em cada hectare colhido

$$Q_{\text{calor-lenha 35\%U/ha}} = (\text{Produção em peso a 35\%U}) \cdot (\text{PCÚtil a 35\%U})$$

$$Q_{\text{calor-lenha35\%U/ha}} = (215,4 \text{ t lenha 35\%U}) \cdot (2.700 \text{ Mcal/t lenha 35\%U})$$

$$Q_{\text{calor-lenha 35\%U/ha}} = \mathbf{581.580 \text{ Mcal/hectare}}$$

Cálculo do calor que será efetivamente disponibilizado pela caldeira para produção de vapor superaquecido em função de seu rendimento térmico

$$Q_{\text{calor a agregar ao vapor}} = (\text{Rendimento}/100) \cdot (Q_{\text{calor-lenha 35\%U/ha}})$$

$$Q_{\text{calor a agregar ao vapor}} = (85/100) \cdot (581.580 \text{ Mcal/ha}) =$$

$$Q_{\text{calor a agregar ao vapor}} = \mathbf{494.343 \text{ Mcal/hectare}}$$

Cálculo do calor que cada tonelada de água deve ter a ela agregada na caldeira para se converter em uma tonelada de vapor nas condições do problema

$$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = (\Delta \text{ Entalpia}) = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água})$$

$$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = (810 - 70) \text{ Mcal/t vapor} =$$

$$Q_{\text{calor agregado/t vapor}} = \mathbf{740 \text{ Mcal/t vapor}}$$

Cálculo da quantidade de vapor que pode ser produzida pelo calor liberado na caldeira pela combustão da biomassa florestal produzida em um hectare da plantação de eucalipto

$$\text{Peso vapor obtenível por hectare} =$$

$$(\text{Qcalor disponibilizado pela caldeira ao queimar a biomassa de um hectare de floresta}) : (\text{Quantidade de calor requerido para se formar uma tonelada de vapor})$$

$$(494.343 \text{ Mcal/hectare}) : (740 \text{ Mcal/t vapor}) =$$

## **668 t vapor produzido/hectare de floresta colhida**

Os cálculos acima podem ser condensados na forma de uma fórmula simples, como se segue:

$$\text{Peso vapor obtenível (em toneladas de vapor) =} \\ \text{(Peso tal qual biomassa disponível) . (PCÚtil biomassa tal qual) .} \\ \text{[(Rendimento caldeira)/100] : (\Delta Entalpia)}$$

Do que resulta o seguinte com as unidades de nosso exemplo:

$$\text{Peso vapor obtenível (em toneladas de vapor) =} \\ \text{(215,4 t biomassa úmida) . (2.700 Mcal/t úmida) . [85/100] : [(810 -} \\ \text{70) Mcal/t vapor] =}$$

## **668 t vapor produzido por hectare de floresta colhida**

De onde podem ser obtidas as seguintes relações unitárias:

$$\text{Peso biomassa/t vapor} = \text{(215,4 t biomassa 35\%U) : (668 t vapor)}$$

$$\text{Peso biomassa/t vapor} = \mathbf{0,322 \text{ t biomassa 35\%U / t vapor}}$$

E ainda:

$$\text{Peso vapor/t biomassa tal qual} = \text{(668 t vapor) : (215,4 t biomassa a} \\ \text{35\%U)}$$

$$\text{Peso vapor/t biomassa tal qual} = \mathbf{3,1 \text{ t vapor/t biomassa a 35\%U}}$$

As relações e valores obtidos na resolução desse problema são informações extremamente relevantes que nos permitem relacionar a quantidade de biomassa produzida por uma floresta energética com a quantidade e a qualidade de energia que ela pode prover em uma central térmica ou em uma central termelétrica.

Apenas devemos estar muito atentos, porque não existem fatores de conversão universais, ou seja, que sejam válidos em quaisquer situações.

Essas variáveis e as relações numéricas encontradas variam muito em função de:

- Teor de umidade da biomassa combustível;
- Poder calorífico útil da biomassa combustível em questão;
- Entalpia do vapor que se deseja produzir;
- Entalpia da água de alimentação ao sistema da caldeira de força;
- Rendimento térmico bruto da caldeira de força;
- Densidade básica e densidade a granel ou aparente da biomassa;
- Densidade energética da biomassa combustível.

Finalmente e essencialmente, a fórmula simplificada proposta deve estar em equilíbrio em termos das unidades de energia, peso, massa, etc.

Essa fórmula simplificada apresentada pode ser também utilizada de forma inversa, ou seja, não apenas para se calcular a quantidade de vapor que pode ser produzido a partir de um determinado peso de biomassa úmida, mas também da quantidade em peso úmido ou seco de uma determinada biomassa para se gerar uma certa quantidade de vapor superaquecido em uma caldeira de força operando com essa biomassa florestal.

Para se fazer isso, basta apenas se isolar como incógnita o parâmetro peso de biomassa florestal:

**Peso de biomassa requerida =**

$$\frac{[(\text{Quantidade de vapor desejada}) \cdot (\Delta \text{ Entalpia})]}{[(\text{Rendimento da caldeira})/100]} : \{(\text{PCÚtil biomassa}) \cdot$$

## **Problema 24:**

Com a fórmula recém-desenvolvida no problema anterior, calcular a quantidade em peso de biomassa úmida a 40% de umidade que seria necessário para alimentar uma caldeira de força e produzir 300 t/hora de vapor com 800 Mcal/t de entalpia.

São também conhecidos:

- Poder calorífico útil da biomassa florestal a 40%U = 2.500 Mcal/t tal qual
- Rendimento térmico bruto da caldeira de força = 90%
- Entalpia da água de alimentação = 90 Mcal/t água alimentada

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade de biomassa em termos de seu peso úmido a 40%U para alimentação da caldeira de força e produzir 300 t/hora de vapor

**Peso de biomassa requerida =**

$$\frac{[(\text{Quantidade de vapor desejada}) \cdot (\Delta \text{ Entalpia})]}{[(\text{Rendimento da caldeira})/100]} : \{(\text{PCÚtil biomassa}) \cdot [90/100]\}$$

Peso de biomassa requerida =

$$\frac{[(300 \text{ t vapor/h}) \cdot [(800 - 90) \text{ Mcal/t vapor}]]}{[90/100]} : \{(2.500 \text{ Mcal/t a 40\%U}) \cdot [90/100]\}$$

Peso de biomassa requerida =

**94,67 t biomassa combustível a 40%U/hora**

De onde se podem obter as seguintes relações práticas de enorme valor prático:

$$\text{Peso biomassa/t vapor} = (94,67 \text{ t biomassa } 40\%U/\text{hora}) : (300 \text{ t vapor/hora})$$

Peso biomassa/t vapor = **0,315 t biomassa 40%U / t vapor**

E ainda:

Peso vapor/t biomassa tal qual = (300 t vapor/hora): (94,67 t biomassa a 40%U/hora)

Peso vapor/t biomassa tal qual = **3,17 t vapor/t biomassa a 40%U**

---

### **Problema 25:**

Qual a quantidade de vapor que se consegue produzir a partir de um estéreo de lenha de eucalipto?

Dados:

- 1 st de lenha de eucalipto = 540 kg úmidas
- Poder calorífico útil da lenha tal qual se encontra empilhada = 2.700 Mcal/tonelada tal qual
- Rendimento da caldeira de força = 80%
- Entalpia do vapor superaquecido produzido pela caldeira = 750 Mcal/t vapor
- Entalpia da água de alimentação da caldeira = 50 Mcal/t água

Solução:

Base referencial: Um estéreo de lenha de eucalipto

Cálculo da quantidade de calor disponível em um estéreo de lenha pesando 540 kg úmidos (0,54 t lenha úmida)

$Q_{\text{calor/st}} = (2.700 \text{ Mcal/t tal qual}) \cdot (0,54 \text{ t lenha úmida/st})$

$Q_{\text{calor/st}} = 1.458 \text{ Mcal/st de lenha úmida}$

Cálculo da quantidade de calor que pode ser disponibilizada para produção de vapor pela combustão da lenha úmida na caldeira de biomassa com 80% de rendimento térmico



$Q_{\text{calor disponível para formar vapor na caldeira}} = (\text{Rendimento caldeira}/100) \cdot (Q_{\text{calor/st}})$

$Q_{\text{calor disponível para formar vapor na caldeira}} = 0,8 \cdot (1.458 \text{ Mcal/st})$

$Q_{\text{calor disponível para formar vapor na caldeira}} = \mathbf{1.166,5 \text{ Mcal/st}}$

Cálculo da quantidade de calor necessária para se adicionar por tonelada de água para se formar uma tonelada de vapor superaquecido

$Q_{\text{calor para formar 1 t vapor}} = \Delta \text{ Entalpia} = (\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água})$

$Q_{\text{calor para formar 1 t vapor}} = (750 - 50) = \mathbf{700 \text{ Mcal/t vapor}}$

Cálculo da quantidade de vapor que pode ser teoricamente produzida a partir de um estéreo de lenha de eucalipto com as características enunciadas nesse problema

$Q_{\text{vapor/st}} =$

$(Q_{\text{calor disponível para formar vapor na caldeira}}) : (Q_{\text{calor para formar 1 t vapor}})$

$Q_{\text{vapor/st}} =$

$(1.166,5 \text{ Mcal/st}) : (700 \text{ Mcal/t vapor})$

$Q_{\text{vapor/st}} = \mathbf{1,67 \text{ t vapor / estéreo}}$

Ou inversamente:

**0,6 st de lenha úmida/t vapor superaquecido**

## **Problema 26:**

Uma caldeira de força de uma termelétrica é alimentada com uma biomassa florestal mista de casca e cavacos de madeira de eucalipto. Essa biomassa possui 45% de umidade e consegue produzir 2,4 toneladas de vapor por tonelada de biomassa com essa umidade. A entalpia do vapor produzido é de 795 Mcal/t vapor bem como a entalpia da água de alimentação da caldeira corresponde a 69 Mcal por tonelada de água. O rendimento térmico bruto da caldeira de biomassa para converter a energia primária do biocombustível em vapor superaquecido é de 90%. O poder calorífico da biomassa mista com 45% de umidade é de 1.935 Mcal/t tal qual de biomassa úmida a 45%U. Caso esse vapor superaquecido seja integralmente utilizado na produção de eletricidade em uma turbina de ciclo vapor conforme o ciclo Rankine, com rendimento de 26,5% na conversão da energia agregada e disponível no vapor superaquecido em eletricidade, calcular a quantidade de eletricidade que seria produzida por uma tonelada de biomassa em base úmida e em base seca a partir dessa biomassa. Calcular também o rendimento global do ciclo Rankine, obtido a partir da energia da biomassa combustível em sua conversão em eletricidade. Comprovar ainda se o poder calorífico útil relatado como sendo 1.935 Mcal/t biomassa a 45%U está correto.

Solução:

Base referencial: Uma tonelada de biomassa úmida com 45%Umidade

Tem-se como definição do problema que: **1 tonelada de biomassa a 45%U fornece 2,4 toneladas de vapor**

Cálculo da agregação de vapor na caldeira de força para se produzir 2,4 toneladas de vapor com entalpia de 795 Mcal/t

$$Q_{\text{calor agregado à água}} = (2,4 \text{ t água}) \cdot (\Delta \text{Entalpia}) = \\ (2,4 \text{ t água}) \cdot [(795 - 69) \text{ Mcal/t vapor}] =$$

**1.742 Mcal agregadas pela caldeira a 2,4 t de água para converter essa água em 2,4 t de vapor**

Cálculo da quantidade de calor que seria necessária estar presente em uma tonelada úmida da biomassa combustível úmida para se formarem 2,4 t de vapor na caldeira de força com 90% de rendimento

Qcalor na biomassa úmida/tonelada =

(1.742 Mcal/t vapor) : [(Rendimento caldeira)/100] =

**1.935 Mcal/t úmida de biomassa a 45%U**

***Conforme mencionado no enunciado do problema, o que confirma o dado de poder calorífico útil da biomassa.***

Cálculo da produção de eletricidade a partir de 2,4 toneladas de vapor superaquecido que tinha uma agregação de calor de 726 Mcal/t em sua entalpia:

Qeletricidade =

(Energia presente nas 2,4 t vapor) . [(Rendimento do ciclo Rankine a partir do vapor)/100] =

[(2,4 t vapor) . (726 Mcal/t vapor)] . (0,265) =

**461,74 Mcal/t biomassa (equivalente às 2,4 toneladas de vapor)**

Convertendo Mcal em MWh, usando o fator de

1 MWh = 861 Mcal, teremos

Qeletricidade = (461,74 Mcal) : (861 Mcal/MWh) =

Qeletricidade = **0,536 MWh/t biomassa a 45%U** (em base de biomassa úmida)

Ou

Qeletricidade = (0,536 MWh/ t biomassa 45%U) : (0,55 t biomassa a.s./t biomassa úmida)

Qeletricidade =

**0,975 MWh/t biomassa absolutamente seca equivalente a uma biomassa 45%U**

Cálculo do rendimento global do ciclo Rankine a partir da energia contida na biomassa combustível:

Rendimento global do ciclo Rankine =

$100 \cdot [(\text{Rendimento na conversão do vapor em eletricidade}) \cdot (\text{Rendimento térmico da caldeira})] =$

$100 \cdot [(0,265) \cdot (0,9)] = \mathbf{23,85\%}$

---

### **Problema 27:**

Uma turbina de condensação apresenta um consumo de 3,5 toneladas de vapor superaquecido com entalpia de 780 Mcal/t para gerar um MWh de eletricidade. Calcular o rendimento energético da conversão dessa turbina que opera segundo o ciclo de Rankine.

Solução:

Base referencial: 3,5 toneladas de vapor

Cálculo da quantidade de energia entregue pela turbina para se gerar 1 MWh

Q energia consumida turbina = (3,5 toneladas vapor) . (780 Mcal/t vapor)

Q energia consumida turbina = **2.730 Mcal/Mwh gerado**

Ou em MWh

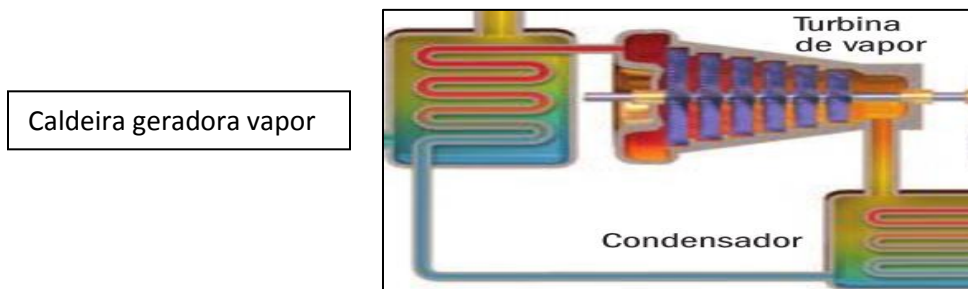
$$Q \text{ energia consumida turbina} = (2.730 \text{ Mcal}/861 \text{ Mcal/MWh}) = \mathbf{3,17 \text{ MWh}}$$

### Cálculo do rendimento da turbina

Rendimento (%) =  $100 \cdot [(Q \text{ energia saindo como eletricidade}) : (\text{Quantidade de energia entrando como vapor})]$

$$\text{Rendimento (\%)} = 100 \cdot [(1 \text{ MWh}) : (3,17 \text{ MWh})]$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \mathbf{31,54\%}$$



### **Problema 28:**

Uma biomassa florestal mista de casca e madeira de eucalipto tem um poder calorífico inferior (base seca) de 3.900 Mcal/t base seca. O poder calorífico útil dessa biomassa a 45%U passa a ser de 1.870 Mcal/t úmida a 45%U. O rendimento térmico bruto onde essa biomassa costuma ser queimada para gerar vapor superaquecido é de 90%. Qual a quantidade de vapor com 802 Mcal/t de entalpia pode ser produzida pela caldeira quando a caldeira queimar uma tonelada base úmida dessa biomassa e a entalpia da água de alimentação para gerar vapor for de 80 Mcal/t?

Solução:

Base referencial: Uma tonelada de biomassa úmida a 45%U

Cálculo da energia que é disponibilizada pela queima de uma tonelada de biomassa combustível a 45%U e com poder calorífico útil de 1.870 Mcal/t a 45%U

Qcalor destinado à produção vapor =  
(PC<sub>Útil</sub>, em Mcal/t biomassa 45%U) . [(Rendimento da caldeira) / 100]  
(1.870 Mcal/t a 45%U) . (0,9) =  
**1.683 Mcal/t úmida a 45%U**

Cálculo da quantidade de energia para ser adicionada à água que alimenta a turbina para se gerar uma tonelada de vapor

Qcalor/t vapor = Δ Entalpia = [(Entalpia Vapor) – (Entalpia água)]  
Qcalor/t vapor = Δ Entalpia = [802 – 80] = **722 Mcal/t vapor**

Cálculo da quantidade de vapor produzida pela combustão na caldeira de força de 1 tonelada de biomassa a 45%Umidade

Produção de vapor/t biomassa úmida a 45%U =  
(1.683 Mcal/t biomassa a 45%U) : (722 Mcal / t vapor) =  
**2,33 t vapor/t biomassa úmida a 45%U**

Cálculo da quantidade de vapor produzido por tonelada de biomassa seca correspondente a essa biomassa de 45%Umidade

Produção de vapor/t de biomassa absolutamente seca =  
(2,33 t vapor / t biomassa 45%U) : (0,55 t biomassa a.s./t biomassa a 45%U)  
= **4,24 t vapor/t biomassa a.s.** correspondente a uma biomassa original com 45% Umidade

## **Problema 29:**

Uma termelétrica tem uma capacidade nominal de 33 MW de potência. Em sua operação rotineira ela tem mostrado um fator de carga de 0,8 e um fator de disponibilidade de 0,95. Considerando que a eficiência global do ciclo a vapor do tipo Rankine em relação à energia oferecida pela biomassa seja de 30%, calcular a energia elétrica que ela gerará por dia e a demanda diária de uma biomassa com um poder calorífico útil de 2,5 Gcal/tonelada tal qual.

Solução:

Base referencial: Um dia de operações

### Cálculo da produção diária de eletricidade por essa termelétrica

Fator de carga = 0,80 – significa que um percentual de 80% da capacidade nominal vem sendo efetivamente utilizada, quando a termelétrica está disponível para operação

Fator de disponibilidade = 0,95 – significa que a termelétrica utiliza 95% do tempo em operação em relação ao tempo total disponível para operar

Produção eletricidade/dia =

(Potência) . (Tempo em horas) . (Fcarga) . (Fdisponibilidade)

Produção eletricidade/dia = (33 MW) . (24 horas/dia) . 0,8 . 0,95

Produção eletricidade/dia = **601,92 MWh/dia**

Produção eletricidade/dia = (601,92 MWh/dia) . (861 Mcal/MWh)

Produção eletricidade/dia = **518.253 Mcal/dia**

Cálculo da quantidade a ingressar através da biomassa florestal à termelétrica em função do rendimento global da termelétrica ser de 30%

Qenergia ingressante pela biomassa/dia =

(Qenergia na eletricidade gerada) : [(Rendimento ciclo Rankine):100]  
(518.253 Mcal eletricidade/dia) : 0,30 =  
1.727.510 Mcal/dia =  
**1.727,51 Gcal/dia**

Cálculo da demanda de biomassa combustível por dia de operações considerando um poder calorífico útil na biomassa de 2,5 Gcal/t úmida

Peso biomassa úmida/dia = (Qenergia total ingressando no ciclo via biomassa, em Gcal/dia) : (PCÚtil da biomassa, em Gcal/t úmida) =

Peso biomassa úmida/dia = (1.727,51 Gcal/dia) : (2,5 Gcal/t biomassa úmida)

Peso biomassa úmida/dia = **691 t de biomassa úmida/dia**

O que nos oferece uma relação de geração específica de:

Qeletricidade (em MWh/dia) : (tonelada de biomassa tal qual/dia) =  
(601,92 MWh/dia) : (691 t biomassa úmida/dia) =

**0,871 MWh/t biomassa úmida tal qual**

Ou então, como consumo específico de biomassa por MWh:

(Peso de biomassa úmida, em toneladas/dia) : Qeletricidade (em MWh/dia) =

(691 t biomassa úmida/dia) : (601,92 MWh/dia) =

**1,15 t biomassa úmida por MWh**



### **Problema 30:**

Uma central termelétrica tem uma potência instalada líquida de 30 MW (de eficiente geração). O consumo que ela apresenta de biomassa florestal por dia é de 1.200 toneladas de biomassa base úmida a 40% de umidade. O poder calorífico útil dessa biomassa é de 2.400 Mcal/t úmida. Considerando que a eficiência da caldeira de biomassa que gera o vapor seja de 75%, calcular o rendimento global do ciclo (a partir da energia da biomassa) e o de geração de eletricidade a partir apenas do vapor através do ciclo Rankine.

Solução:

Base referencial: Um dia de operações

Cálculo da efetiva produção de eletricidade por dia de funcionamento da central termelétrica:

$$\begin{aligned} Q_{\text{eletricidade}} &= (\text{Potência}) \cdot (\text{Tempo em horas}) \\ Q_{\text{eletricidade}} &= (30 \text{ MW}) \cdot (24 \text{ horas}) = 720 \text{ MWh} \\ Q_{\text{eletricidade}} &= \mathbf{720 \text{ MWh/dia}} \end{aligned}$$

Cálculo da energia primária oferecida pela biomassa combustível a 40%U por dia de operações

$$\begin{aligned} Q_{\text{calor na biomassa consumida}} &= (1.200 \text{ t biomassa a } 40\%U/\text{dia}) \cdot (2.400 \text{ Mcal/t úmida a } 40\%U) \\ Q_{\text{calor na biomassa consumida}} &= 2.880.000 \text{ Mcal/dia} \end{aligned}$$

$$Q_{\text{calor na biomassa consumida}} = \mathbf{3.345 \text{ MWh/dia}}$$

Cálculo da quantidade de energia agregada na geração de vapor pela caldeira de biomassa:

$$Q_{\text{calor vapor}} = (2.880.000 \text{ Mcal/dia}) \cdot (75/100 \text{ de rendimento da caldeira})$$

$$Q_{\text{calor vapor}} = 2.160.000 \text{ Mcal/dia}$$

$$Q_{\text{calor vapor}} = \mathbf{2.508,7 \text{ MWh/dia}}$$

### Cálculo do rendimento da fase de geração da eletricidade a partir do vapor superaquecido

Rendimento da fase de geração com base no vapor consumido =

$$100 \cdot [(Elettricidade gerada, \text{ MWh/dia}) : (Q_{\text{calor no vapor alimentado à turbina, MWh/dia)}}] =$$

$$100 \cdot [(720 \text{ MWh/dia}) : (2.508,7 \text{ MWh/dia})] =$$

**28,7% de rendimento do turbogerador em relação à energia líquida do vapor alimentado**

### Cálculo do rendimento global do ciclo Rankine em relação à energia disponibilizada pela biomassa florestal combustível

Rendimento global de geração elétrica com base na energia da biomassa =

$$100 \cdot [(Elettricidade gerada, \text{ MWh/dia}) : (Q_{\text{calor disponibilizado pela biomassa ao sistema da termelétrica, MWh/dia}})] =$$

$$100 \cdot [(720 \text{ MWh geração/dia}) : (3.345 \text{ MWh de energia da biomassa/dia})] =$$

**21,52% de rendimento do turbogerador em relação à energia primária disponibilizada pela biomassa florestal**

---

### **Problema 31:**

Uma central termelétrica tem capacidade nominal de 10 MW. O seu consumo anual de biomassa florestal na forma de lenha é de 175.000 metros cúbicos estéreos. O peso médio de cada estéreo de lenha é de 0,6 toneladas úmidas. Calcular o consumo de lenha por cada MWh gerado pela central termelétrica. Calcular também a produção de energia elétrica por cada tonelada de lenha na umidade tal qual. Considerar 350 dias de efetiva produção pela central termelétrica.

Solução:

Base referencial: Um ano de operações

Cálculo da produção anual de eletricidade pela central termelétrica

Produção eletricidade/ano = (Potência, em MW) . (Tempo, em horas)

Produção eletricidade/ano = (10 MW) . (350 . 24 horas)

Produção eletricidade/ano = **84.000 MWh/ano**

Cálculo do consumo específico de lenha para geração dessa eletricidade

Consumo específico lenha, em st/MWh = (Consumo total de lenha/ano)  
: (Produção eletricidade/ano) =

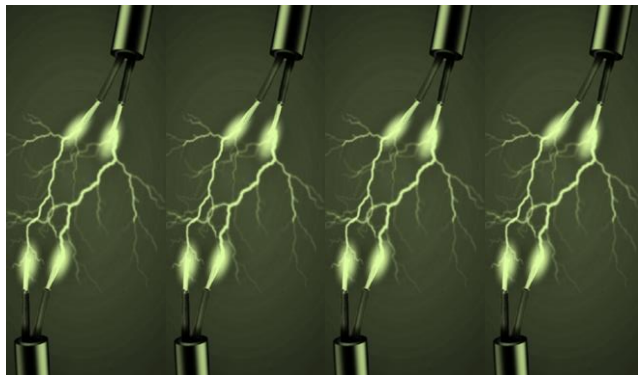
Consumo específico lenha, em st/MWh = (175.000 estéreos lenha/ano)  
: (84.000 MWh/ano)

Consumo específico lenha, em st/MWh = **2,08 st lenha/MWh de eletricidade gerada**

Cálculo do consumo específico de lenha em base de seu peso úmido para geração de eletricidade

Consumo específico lenha, em t úmidas/MWh =  
(2,08 st lenha) . (0,6 t úmidas lenha/st lenha)/MWh de eletricidade gerada =

**1,248 t lenha úmida por MWh gerado**



### **Problema 32:**

Uma pequena caldeira térmica é alimentada com casca fragmentada de eucalipto com algum percentual variável de cavacos de madeira. O poder calorífico dessa biomassa florestal mista é relativamente baixo, em média 1.650 Mcal/tonelada úmida da biomassa. Essa caldeira é utilizada para a produção de 10 t de vapor/hora, sendo que se trata de um vapor usado para secagem de materiais (grãos de cereais). A entalpia desse vapor é de 690 Mcal/t e a água de alimentação dessa caldeira é de 40 Mcal/tonelada de água. Qual a quantidade de biomassa florestal que se tornaria necessária para alimentação horária da caldeira, conhecendo que o rendimento energético da caldeira é de 65%?

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade de calor agregada na produção de vapor para uso no processo de secagem de grãos!

$$\begin{aligned} Q_{\text{calor-vapor}} &= (\text{Fluxo vapor, t/h}) \cdot [(\text{Entalpia vapor}) - (\text{Entalpia água})] \\ Q_{\text{calor-vapor}} &= (10 \text{ t vapor/hora}) \cdot [(690 - 40) \text{ Mcal/t vapor}] \\ Q_{\text{calor-vapor}} &= \mathbf{6.500 \text{ Mcal/hora}} \end{aligned}$$

Cálculo da energia disponibilizada pela biomassa florestal como combustível na caldeira considerando um rendimento energético bruto de 65%

$$\begin{aligned} Q_{\text{energia na biomassa ingressante caldeira}} &= (6.500 \text{ Mcal/h}) : 0,65 \\ Q_{\text{energia na biomassa ingressante caldeira}} &= \mathbf{10.000 \text{ Mcal/hora como energia primária na biomassa úmida}} \end{aligned}$$

Cálculo da quantidade de combustível biomássico por hora de operação

$$\text{Peso úmido biomassa combustível/hora} = (10.000 \text{ Mcal ingressantes como energia/hora}) : (1.650 \text{ Mcal/t biomassa base úmida})$$

$$\text{Peso úmido biomassa combustível/hora} = \mathbf{6,06 \text{ toneladas de biomassa úmida/hora}}$$

O que conduz às seguintes relações práticas para essa pequena caldeira consumindo uma biomassa relativamente pobre em energia:

Vapor/Biomassa = (10 toneladas vapor/hora) : (6,06 t biomassa úmida/hora) =

**1,65 toneladas de vapor produzido por tonelada de biomassa ingressante na pequena caldeira**

Biomassa/Vapor = (6,06 t biomassa úmida/hora) : (10 toneladas vapor/hora) =

**0,606 toneladas de biomassa úmida por tonelada de vapor produzido**

---

### **Problema 33:**

Uma pequena central termelétrica opera 7.000 horas por ano e possui um rendimento em eletricidade pelo ciclo Rankine de 25% em relação à energia da biomassa que ingressa em sua caldeira para geração de vapor que será a seguir usado na produção de eletricidade. Essa central tem como fonte de combustível uma biomassa florestal úmida, sendo que o poder calorífico útil dessa biomassa é de 2.500 Mcal/t úmida, ou 2,5 Gcal/t úmida. A potência nominal com que opera é de 10 MW. Qual a expectativa de consumo de biomassa, expresso em peso úmido de biomassa por ano?

Solução:

Base referencial: Um ano de operações

Cálculo da produção anual de eletricidade dessa central termelétrica

Produção eletricidade (MWh/ano) = (Potência, MW) . (Tempo de operação, horas)

Produção eletricidade (MWh/ano) = (10 MW) . (7.000 horas)

Produção eletricidade (MWh/ano) = **70.000 MWh/ano**

O que corresponde a:

$$(70.000 \text{ MWh/ano}) \cdot (861 \text{ Mcal/MWh}) = 60.270.000 \text{ Mcal/ano}$$

Ou seja: **60.270 Gcal/ano**

Cálculo da energia requerida em biomassa combustível entrando por ano na central termelétrica, levando em conta o rendimento de 25% de seu ciclo a vapor de geração de eletricidade

$$\begin{aligned} Q_{\text{energia primária biomassa/ano}} &= (60.270 \text{ Gcal/ano}) : (25/100) = \\ Q_{\text{energia primária biomassa/ano}} &= \mathbf{241.080 \text{ Gcal/ano}} \end{aligned}$$

Cálculo da quantidade anual de biomassa úmida requerida para a central termelétrica, considerando o PCÚtil da biomassa úmida igual a 2,5 Gcal/t úmida

$$\begin{aligned} \text{Peso biomassa úmida/ano} &= (241.080 \text{ Gcal/ano}) : (2,5 \text{ Gcal/t biomassa úmida}) = \\ \text{Peso biomassa úmida/ano} &= \mathbf{96.432 \text{ t de biomassa por ano}} \end{aligned}$$

O que nos oferece as seguintes relações práticas:

$$\begin{aligned} \mathbf{\text{Biomassa combustível/Eletricidade}} &= \\ (96.432 \text{ t biomassa úmida/ano}) : (70.000 \text{ MWh/ano}) &= \end{aligned}$$

**1,378 t biomassa úmida por MWh gerado na central**

Ou inversamente:

$$\begin{aligned} \mathbf{\text{Eletricidade/Biomassa combustível}} &= \\ (70.000 \text{ MWh}/96.432 \text{ t biomassa úmida/ano}) &= \end{aligned}$$

**0,72 MWh gerado efetivamente / t biomassa úmida alimentada**

### **Problema 34:**

Uma biomassa florestal de eucalipto na forma de toras com casca teve determinado o seu poder calorífico útil como sendo de 2.070 Mcal/m<sup>3</sup> sólido ou 1.350 Mcal/estéreo. Considerando a sua alimentação em uma termelétrica que opera segundo o ciclo Rankine com rendimento global de 28% a partir da energia da biomassa, calcular qual seria a produção em eletricidade, como MWh, a partir de cada metro cúbico e de cada estéreo da mesma.

Solução:

Base referencial: Uma unidade de volume de toras de eucalipto com casca

Cálculo da quantidade de energia elétrica gerada por unidade de volume da biomassa florestal

- Para um metro cúbico sólido de toras:

Qeletricidade/m<sup>3</sup> = (Rendimento ciclo Rankine) . (PC<sub>Útil</sub> combustível, Mcal/m<sup>3</sup>)

Qeletricidade/m<sup>3</sup> = (28/100) . (2.070 Mcal/m<sup>3</sup>) =

Qeletricidade/m<sup>3</sup> = 579,6 Mcal/m<sup>3</sup>

Considerando que 1 MWh = 861 Mcal, temos:

Qeletricidade/m<sup>3</sup> = (579,6 Mcal/m<sup>3</sup>) : (861 Mcal/MWh) =

Qeletricidade/m<sup>3</sup> = **0,674 MWh/m<sup>3</sup> sólido de biomassa florestal na forma de toras**

Ou inversamente:

**1,484 m<sup>3</sup> de biomassa/MWh efetivamente gerado**

- Para um estéreo de toras empilhadas:

Qeleticidade/st = (Rendimento ciclo Rankine) . (PCÚtil combustível, Mcal/st)

Qeleticidade/st = (28/100) . (1.350 Mcal/st) =

Qeleticidade/st = 378 Mcal expressos como eleticidade/st

Considerando que 1 MWh = 861 Mcal, temos:

Qeleticidade/m<sup>3</sup> = (378 Mcal/m<sup>3</sup>) : (861 Mcal/MWh) =

Qeleticidade/m<sup>3</sup> = **0,439 MWh/st de biomassa florestal na forma de toras**

Ou inversamente:

**2,277 st de biomassa/MWh efetivamente gerado**

### **Problema 35:**

Uma caldeira de biomassa utiliza como combustível uma mistura de 85% em peso de casca fragmentada removida de toras de eucaliptos e 15% de cavacos obtidos pela picagem de lenha fina (toras de pequeno diâmetro e toretes). O teor de umidade médio dessa biomassa é de 40% e o poder calorífico superior dessa biomassa tem sido encontrado como sendo 4.100 Mcal/t a.s., com teor de hidrogênio médio de 6%. Calcular a disponibilidade de energia primária que essa biomassa oferece por metro cúbico de "cavacos fragmentados mistos" (densidade aparente dessa biomassa), sabendo que a densidade a granel do material é de 0,240 toneladas úmidas por metro cúbico de material fragmentado ("cavacos").

Solução:



Base referencial: Um metro cúbico de material fragmentado, referido como cavacos

Cálculo do poder calorífico inferior dessa biomassa florestal

$$\text{PCI (base seca)} = \text{PCS} - 600 \cdot (9.H/100)$$

Onde H = teor de hidrogênio em percentagem

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 324$$

$$\text{PCI} = 4.100 - 324 =$$

$$\text{PCI} = \mathbf{3.776 \text{ Mcal/t a.s.}}$$

Cálculo do poder calorífico útil dessa biomassa florestal

$$\text{PCÚtil (base úmida)} = \text{PCI} \times [(100 - U)/100] - 6 \cdot U$$

Onde U = teor de umidade em percentagem

$$\text{PCÚtil} = 3.776 \times [(100 - 40)/100] - 6 \cdot 40$$

$$\text{PCÚtil} = \mathbf{2.026 \text{ Mcal/tonelada de biomassa a 40\%U}}$$

Cálculo da disponibilidade energética útil dessa biomassa, como densidade energética (Mcal/m<sup>3</sup> cavacos)

$$\text{Energia útil/m}^3 =$$

$$(\text{Densidade a granel, em t úmidas a 40\%U/m}^3) \cdot (\text{PCÚtil, em Mcal/t a 40\%U})$$

$$\text{Energia útil/m}^3 =$$

$$(0,24 \text{ t úmidas/m}^3) \cdot (2.026 \text{ Mcal/t úmidas})$$

$$\text{Energia útil/m}^3 = \mathbf{486,24 \text{ Mcal/m}^3 \text{ de cavacos}}$$



### **Problema 36:**

Considerando que a densidade energética de uma biomassa florestal na forma de cavacos produzidos de casca de eucalipto seja de 500 Mcal/m<sup>3</sup>, calcular a quantidade de vapor que pode ser obtida por tonelada dessa biomassa, em base de peso seco e em base de peso úmido. São ainda dados os seguintes valores característicos dessa biomassa e da caldeira de força que a queima:

Densidade a granel da biomassa = 0,250 t úmidas/m<sup>3</sup>

Teor de umidade da biomassa = 45%

Entalpia do vapor superaquecido produzido = 700 Mcal/t vapor

Entalpia da água de alimentação = 50 Mcal/t água

Rendimento térmico da caldeira = 85%

Solução:

Base referencial: Um metro cúbico de cavacos de casca

Cálculo da quantidade de matéria seca e úmida por metro cúbico de cavacos de casca

1 m<sup>3</sup> cavacos casca = **0,25 t úmidas/m<sup>3</sup>** que equivalem a  
(0,25 t úmidas) . (0,55 t seca/t úmida) =

**0,138 t a.s. de biomassa de casca/m<sup>3</sup>**

Cálculo da quantidade de energia que pode ser obtido por metro cúbico dessa biomassa

Densidade energética desses cavacos de casca = 500 Mcal/m<sup>3</sup>

Rendimento da caldeira de biomassa = 85%

Logo:

Q calor efetivamente convertido em vapor por m<sup>3</sup> de biomassa é igual a  
= (500 Mcal/m<sup>3</sup>) . (85/100) = **425 Mcal úteis/m<sup>3</sup>**

Cálculo da quantidade de calor requerido para se produzir uma tonelada de vapor com as características definidas no enunciado

Q calor para vapor = (Δ Entalpia) = (Entalpia vapor – Entalpia água) =

Q calor para vapor = 700 – 50 = 650 Mcal/t vapor

Cálculo da quantidade de vapor produzido por um metro cúbico de cavacos de casca

1 m<sup>3</sup> de biomassa casca fragmentada em cavacos = 425 Mcal/m<sup>3</sup>

Produção vapor/m<sup>3</sup> = (425 Mcal/m<sup>3</sup> biomassa) : (650 Mcal/t vapor)

Produção vapor/m<sup>3</sup> = **0,654 t vapor/m<sup>3</sup> de biomassa casca**

Cálculo da produção de vapor em toneladas de vapor por tonelada de biomassa úmida

$$\begin{array}{l} 1 \text{ m}^3 \text{ cavacos casca} \text{ ----- } 0,25 \text{ t úmidas} \text{ ----- } 0,654 \text{ t vapor} \\ \phantom{1 \text{ m}^3 \text{ cavacos casca}} \phantom{\text{ ----- }} \phantom{0,25 \text{ t úmidas}} \text{ ----- } 1 \text{ t úmida} \text{ ----- } X \end{array}$$

**X = 2,61 t vapor/t casca fragmentada e úmida**

Cálculo da produção de vapor em toneladas de vapor por tonelada de biomassa seca

$$\begin{array}{l} 1 \text{ m}^3 \text{ casca} \text{ ----- } 0,25 \text{ t úmidas} \text{ ----- } 0,138 \text{ t a.s.} \text{ ----- } 0,654 \text{ t vapor} \\ \phantom{1 \text{ m}^3 \text{ casca}} \phantom{\text{ ----- }} \phantom{0,25 \text{ t úmidas}} \phantom{\text{ ----- }} \phantom{0,138 \text{ t a.s.}} \text{ ----- } 1 \text{ t a.s.} \text{ ----- } Y \end{array}$$

**Y = 4,74 t vapor/t casca fragmentada e absolutamente seca equivalente à casca original com 45% umidade**



### **Problema 37:**

Uma fábrica de celulose de mercado possui duas caldeiras em sua central termelétrica, conforme dados a seguir:

#### Caldeira de biomassa:

Capacidade de 100 t/hora de um vapor com entalpia de 800 Mcal/t

Teor de umidade da biomassa = 45%

Poder calorífico útil da biomassa = 1.950 Mcal/t biomassa a 45%U

Entalpia da água de alimentação = 80 Mcal/t água

Rendimento térmico bruto da caldeira de biomassa = 90%

#### Caldeira de recuperação do licor preto kraft:

Capacidade = 500 t/hora de um vapor com entalpia de 800 Mcal/t

Teor de sólidos secos no licor preto concentrado sendo queimado = 80%

Teor de umidade do licor preto concentrado = 20%

Poder calorífico útil do licor a 20%Umidade = 2.500 Mcal/t a 20%U

Entalpia da água de alimentação ao sistema = 80 Mcal/t água

Rendimento térmico bruto da caldeira de recuperação = 80%

Perguntam-se:

- Qual a quantidade horária da biomassa requerida para a produção do vapor na caldeira de biomassa (expressar os resultados em: biomassa base úmida e biomassa base absolutamente seca)
- Qual a quantidade horária de licor preto kraft que deve estar alimentando a caldeira de recuperação (expressar os resultados em licor preto base úmida e base seca)

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

### **Parte 01: Caldeira de biomassa**

#### 1.1. Cálculo da quantidade de calor que é agregado à água para a produção de vapor

$$Q_{\text{calor}} = (100 \text{ t vapor/hora}) \cdot (\Delta \text{ Entalpia})$$

$$Q_{\text{calor}} = (100 \text{ t/h}) \cdot [(800 - 80) \text{ Mcal/t vapor}] =$$

$$Q_{\text{calor}} = \mathbf{72.000 \text{ Mcal/hora}}$$

1.2. Cálculo da quantidade de energia que deve ser disponibilizada pela biomassa para produção de 72.000 Mcal/hora de calor agregado ao vapor

$$Q_{\text{energia biomassa/h}} = (72.000 \text{ Mcal/hora}) : (\text{Rendimento caldeira}/100)$$

$$Q_{\text{energia biomassa/h}} = (72.000 \text{ Mcal/h}) : (90/100) =$$

$$Q_{\text{energia biomassa/h}} = \mathbf{80.000 \text{ Mcal/hora}}$$

1.3. Cálculo da quantidade de biomassa combustível na forma úmida para ser alimentada à caldeira de biomassa

$$\text{Peso biomassa a 45\%U/hora} = (80.000 \text{ Mcal/h}) : (\text{PCÚtil biomassa})$$

$$\text{Peso biomassa a 45\%U/hora} = (80.000 \text{ Mcal/h}) : (1.950 \text{ Mcal/t úmida})$$

$$\text{Peso biomassa a 45\%U/hora} = \mathbf{41 \text{ t biomassa a 45\%U/hora}}$$

1.4. Cálculo da produção de vapor por cada tonelada de biomassa a 45%Umidade introduzida como combustível na caldeira de biomassa

$$\text{Produção específica vapor (t vapor/t biomassa úmida)} =$$

$$(100 \text{ t vapor/hora}) : (41 \text{ t biomassa a 45\%U/hora})$$

$$\text{Produção específica vapor} = \mathbf{2,44 \text{ t vapor/t biomassa úmida a 45\%U}}$$

1.5. Cálculo da produção de vapor por cada tonelada de biomassa absolutamente seca equivalente à biomassa com 45% de umidade introduzida como combustível na caldeira de biomassa

$$\text{Produção específica vapor (base seca)} =$$

$$(2,44 \text{ t vapor/t biomassa úmida 45\%U}) : (0,55 \text{ t a.s. biomassa/t biomassa úmida a 45\%U}) =$$

Produção específica vapor (base seca) =

**4,43 t vapor/t a.s. biomassa equivalente a uma biomassa com 45%Umidade**

## **Parte 2: Caldeira de recuperação kraft**

2.1. Cálculo da quantidade de calor que é agregado à água para a produção de vapor

$Q_{\text{calor}} = (500 \text{ t vapor/hora}) \cdot (\Delta \text{ Entalpia})$

$Q_{\text{calor}} = (500 \text{ t/h}) \cdot [(800 - 80) \text{ Mcal/t vapor}] =$

$Q_{\text{calor}} = \mathbf{360.000 \text{ Mcal/hora}}$

2.2 Cálculo da quantidade de energia que deve ser disponibilizada pelo licor preto concentrado e úmido para produção de 360.000 Mcal/hora de calor agregado ao vapor

$Q_{\text{energia licor preto/h}} = (360.000 \text{ Mcal/hora}) : (\text{Rendimento caldeira}/100)$

$Q_{\text{energia licor preto/h}} = (360.000 \text{ Mcal/h}) : (80/100) =$

$Q_{\text{energia licor preto/h}} = \mathbf{450.000 \text{ Mcal/hora}}$

2.3 Cálculo da quantidade base úmida de licor preto concentrado e úmido para ser alimentado à caldeira de biomassa

$\text{Peso licor a } 20\%U/\text{hora} = (450.000 \text{ Mcal/h}) : (\text{PCÚtil licor preto a } 20\%U)$

$\text{Peso licor a } 20\%U/\text{hora} = (450.000 \text{ Mcal/h}) : (2.500 \text{ Mcal/t úmida a } 20\%U)$

$\text{Peso licor a } 20\%U/\text{hora} = \mathbf{180 \text{ t licor preto a } 20\%U/\text{hora}}$

2.4 Cálculo da produção específica de vapor por cada tonelada de licor preto concentrado a 20%Umidade (80% em sólidos secos) que foi introduzido como combustível na caldeira de recuperação kraft

Produção específica vapor (t vapor/t licor preto a 20%U) =  
(500 t vapor/hora) : (180 t licor preto 20%U/hora)

Produção específica vapor = **2,78 t vapor/t licor preto a 20%U**

2.5 Cálculo da produção específica de vapor por cada tonelada de licor preto concentrado base absolutamente seca (tonelada de sólidos secos que foi introduzido como combustível na caldeira de recuperação kraft

Produção específica vapor (base seca) =  
(2,78 t vapor/t licor preto a 20%U) : (0,80 t a.s. licor preto/t licor preto a 20%U) =

Produção específica vapor (base seca) =

**3,475 t vapor/t sólidos secos do licor preto concentrado e que foi alimentado à caldeira com 20%Umidade**



Licor preto kraft



### **Problema 38:**

Admitindo no problema anterior que a fábrica de celulose kraft tivesse uma produção média de 100 toneladas de celulose seca ao ar (adt = 90% de consistência) por hora de efetiva produção, calcular:

- Produção de vapor superaquecido por tonelada de celulose seca ao ar na caldeira de recuperação
- Quantidade de sólidos secos do licor preto concentrado sendo queimado por tonelada seca ao ar de celulose

Solução:

Base referencial: Uma hora de produção

Cálculo da produção de vapor superaquecido por tonelada de celulose seca ao ar na caldeira de recuperação

Produção específica de vapor superaquecido =  
(500 t/hora de vapor) : (100 adt de celulose/hora) =

**5 t vapor superaquecido/adt celulose**

Cálculo da quantidade de sólidos secos por hora de produção

tSS/h - (toneladas sólidos secos/hora) =

tSS = (180 t licor preto 80%SS/hora) . (0,8 tSS/t licor preto 80%SS)

tSS/h - (toneladas sólidos secos/hora) = **144 tSS/hora**

Cálculo da relação toneladas de sólidos secos por tonelada seca ao ar de celulose produzida pela fábrica

tSS/adt celulose = (144 t SS/hora) : (100 adt celulose/hora)

tSS/adt celulose = **1,44 tSS/adt cellulose**

### **Problema 39:**

Uma central termelétrica está em projeto de engenharia para ser construída em uma determinada região ao norte do Brasil. A central será totalmente alimentada com cavacos de madeira com casca a serem produzidos a partir de florestas plantadas de eucalipto e cativas da empresa para se deter autossuficiência no abastecimento desse biocombustível. A central de geração elétrica não operará com cogeração, sendo 100% destinada à produção de eletricidade de acordo com o ciclo de vapor de Rankine. A capacidade nominal da central será de 150 MW de potência e algumas das especificações do projeto a serem seguidas e preenchidas são as seguintes:

- Fator de disponibilidade = 95%
- Fator de carga = 90%
- Teor de umidade da biomassa combustível = 35%
- Poder calorífico útil da biomassa a 35% de umidade = 2.700 Mcal/t úmida a 35%U
- Rendimento global do ciclo Rankine a partir da energia primária na biomassa combustível = 25%

Em termos florestais, as expectativas de produtividade e qualidade da biomassa de eucalipto a ser queimada são as seguintes:

- Produtividade florestal em metros cúbicos por hectare de toras comerciais com casca = 35 m<sup>3</sup>/ha.ano
- Idade de colheita da floresta = 8 anos
- Densidade básica média das toras comerciais = 0,5 t a.s. / m<sup>3</sup> de toras com casca

Admitir que as perdas de madeira e casca não estejam ainda quantificadas e por isso mesmo os cálculos não deverão levar em conta nesse momento essas perdas de biomassa nas operações florestais e industriais. Caso elas sejam quantificadas, os cálculos necessitarão de ajustes para levar em conta as novas demandas de biomassa para a central termelétrica em virtude de perdas de biocombustível nas operações.

Perguntam-se:

- Qual a demanda anual de madeira em metros cúbicos de toras com casca?
- Qual deve ser a área mínima e teórica de efetivo plantio que deve ser implantada pelo empreendimento para que se possa garantir autossuficiência de suprimento madeira com casca (biomassa combustível para ser convertida em cavacos)?

- Qual a densidade energética das toras de eucalipto com casca, em Mcal/m<sup>3</sup> sólido de toras?

Solução:

Base referencial: Um ano de consumo de biomassa

Cálculo da produção anual de eletricidade pela central termelétrica

Produção eletricidade/ano =

(Potência, MW) . (Tempo, horas/ano) . (Fator carga) . (Fator disponibilidade)

(150 MW) . (365 dias/ano) . (24 horas/dia) . (0,90) . (0,95)

Produção eletricidade/ano = **1.123.470 MWh/ano**

...que em Mcal/ano equivalem a:

Produção eletricidade/ano = (1.123.470 MWh/ano) . (861 Mcal/MWh)

Produção eletricidade/ano = **967.307,7 Gcal/ano**

Cálculo da necessidade de energia primária na biomassa florestal para permitir essa produção em eletricidade

Qenergia biomassa/ano =

(Energia disponível eletricidade/ano) : (Rendimento ciclo Rankine/100) =

(967.307,7 Gcal/ano) : (25/100) = **3.868.231 Gcal/ano** em termos de energia a ser suprida pela biomassa combustível (toras de madeira com casca)

Cálculo da produção florestal em volume toras de madeira com casca, conforme expectativas de produtividade de 35 m<sup>3</sup>/hectare.ano e colheita aos 8 anos de idade da floresta

Volume toras/colheita =  $(35 \text{ m}^3/\text{hectare.ano}) \cdot (8 \text{ anos})$

Volume toras/colheita = **280 m<sup>3</sup> de toras com casca/hectare**

Cálculo da produção florestal em peso absolutamente seco de toras de madeira com casca

Peso colheita/hectare =

$(\text{Volume colhido aos 8 anos, m}^3/\text{ha}) \cdot (\text{Dbásica média, t/m}^3) =$

Peso colheita/hectare =  $(280 \text{ m}^3/\text{ha}) \cdot (0,5 \text{ t a.s./m}^3)$

Peso colheita/hectare = **140 t a.s. / hectare**

Cálculo da produção equivalente da floresta em toras com 35% de umidade ou 65% de percentual de secos

Peso colheita a 35%U/hectare =  $(140 \text{ t a.s./hectare}) : (0,65 \text{ t a.s./t úmida a 35\%U})$

Peso colheita a 35%U/hectare = **215,4 t biomassa úmida a 35%U/hectare**

Cálculo da energia primária produzida em um hectare de floresta de eucalipto, com a colheita feita aos 8 anos e com poder calorífico útil da biomassa produzida equivalente a 35%U de 2.700 Mcal/t a 35%U

Qenergia primária biomassa/hectare =

$(\text{Peso úmido biomassa 35\%U - em t/ha}) \cdot (2.700 \text{ Mcal/t biomassa 35\%U})$

$(215,4 \text{ t biomassa úmida 35\%U/ha}) \cdot (2.700 \text{ Mcal/t biomassa 35\%U})$

Qenergia primária biomassa/hectare = **581.580 Mcal/hectare colhido aos 8 anos**

Ou – **581,58 Gcal/hectare**

Cálculo da área a ser colhida anualmente para abastecer a termelétrica em termos de autossuficiência de suprimento da biomassa combustível

Área anual de produção de biomassa florestal para ser colhida =  
(Energia total contida na biomassa requerida por ano, Gcal/ano) :  
(Produção de energia em termos de Gcal/hectare colhido) =  
(3.869.231 Gcal/ano) : (581,58 Gcal/hectare colhido) =

**6.653 hectares a serem colhidos anualmente** para suprir integral e teoricamente a central de geração de eletricidade

Cálculo da área total a ser efetivamente plantada com florestas de eucalipto com 35 m<sup>3</sup>/hectare.ano de produtividade e colheita aos 8 anos de idade

Área total de reflorestamento, em hectares =  
(Área consumo anual, em hectares/ano) . (Idade de colheita, em anos)  
(6.653 hectares/ano) . (8 anos) =

**53.224 hectares de efetivo reflorestamento** para autossuficiência energética pela produção da biomassa combustível

Cálculo da densidade energética da biomassa florestal na forma de toras sólidas de madeira com casca

1 m<sup>3</sup> sólido toras ---- 0,5 t a.s. ----- 0,77 t úmidas a 35%U

Densidade energética = (0,77 t úmidas 35%U/m<sup>3</sup> sólido) . (2.700 Mcal/t úmida 35%U)

Densidade energética = **2.079 Mcal/m<sup>3</sup> de biomassa** na forma de toras colhidas aos 8 anos

Ou equivalente a = **2,079 Gcal/m<sup>3</sup>**

Cálculo da produção total de madeira a ser colhida por ano como volume de toras de madeira com casca para posterior conversão em cavacos

Procedimento 1 para o cálculo:

Volume anual madeira = (Área colhida/ano) . (280 m<sup>3</sup> toras/hectare)

Volume anual madeira = (6.653 ha/ano) . (280 m<sup>3</sup> toras/hectare) =

Volume anual madeira = **1.862.840 m<sup>3</sup>/ano de toras de madeira com casca**

Procedimento 2 para o cálculo:

Volume anual madeira = (Energia total requerida como biomassa; Gcal/ano) : (Densidade energética da biomassa, Gcal/m<sup>3</sup>)

Volume anual madeira = (3.869.231 Gcal/ano) : (2,079 Gcal/m<sup>3</sup>)

Volume anual madeira = **1.861.102 m<sup>3</sup>/ano de toras**, valor um pouco diferente do obtido no procedimento 1 em função das aproximações nos cálculos serem distintas em ambos os casos

**Adotar valor médio de 1.862.000 m<sup>3</sup>/ano de toras**

### **Problema 40:**

Com os dados obtidos no problema anterior para a central termelétrica alimentada por biomassa florestal de eucalipto, estabelecer relações práticas de consumos e produções específicas entre eletricidade gerada e biomassa florestal (MWh/m<sup>3</sup> biomassa e também m<sup>3</sup> biomassa/MWh gerado).

Solução:

Dados obtidos por cálculos diversos no problema 39:

Geração de eletricidade por ano de operações = 1.123.470 MWh/ano

Consumo anual de biomassa na forma de toras de madeira com casca = 1.862.000 m<sup>3</sup> de toras com casca/ano

Geração específica de eletricidade /m<sup>3</sup> biomassa:

MWh/m<sup>3</sup> sólidos toras eucalipto =

(1.123.470 MWh) : (1.862.000 m<sup>3</sup> sólidos biomassa) =

**0,603 MWh/m<sup>3</sup> sólidos toras de eucalipto**

Consumo específico de biomassa em m<sup>3</sup> toras /MWh gerado:

(1.862.000 m<sup>3</sup> sólidos biomassa) : (1.123.470 MWh) =

**1,65 m<sup>3</sup> sólidos toras de eucalipto/MWh gerado**



### **Problema 41:**

Uma caldeira de recuperação kraft produz 250 toneladas de vapor a partir de uma água de alimentação com 80 Mcal/t. O vapor produzido pela caldeira é superaquecido e possui uma entalpia de 800 Mcal/t. O rendimento térmico bruto dessa caldeira é de 85%. O combustível utilizado para combustão é totalmente representado pelo licor preto kraft concentrado a 75% de sólidos secos, com poder calorífico de 2.400 Mcal/t úmida a 75% de sólidos secos ou 25% de umidade. O calor produzido nessa caldeira na forma de vapor superaquecido é totalmente enviado para o sistema de turbinas e geradores para cogeração de eletricidade e vapor de processo. A cogeração não é total, pois uma parte do vapor liberado pelas turbinas é condensado e retorna como água quente ao processo. A quantidade de eletricidade produzida corresponde a uma potência de 50 MW, enquanto o fluxo de vapor de entalpia e pressão mais reduzidas e que é utilizado pelo processo vem sendo produzido em um fluxo de 150 t/hora e com uma entalpia de 640 Mcal/t. Esse vapor é basicamente utilizado em processos de evaporação e ao ser condensado gera uma água condensada de 75 Mcal/t. A fábrica produz celulose kraft não branqueada para produção de papéis de embalagem.

Perguntam-se:

- O rendimento elétrico global do ciclo Rankine a partir da energia contida no combustível de licor preto?
- O rendimento térmico do ciclo de vapor, considerando a quantidade de 150 t/h de vapor extraído para novos usos processuais?
- O rendimento global dessa cogeração parcial?

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da energia que foi agregada à água de alimentação da caldeira de recuperação com 80 Mcal/t para convertê-la em vapor superaquecido com 800 Mcal/t

Qcalor agregado vapor=

(250 t vapor/hora) . (Entalpia vapor – Entalpia água) =

(250 t vapor/hora) . (720 Mcal/t) = **180.000 Mcal/hora**



Cálculo da quantidade de calor que está sendo alimentada por hora como energia do combustível licor preto kraft concentrado

Qenergia licor preto alimentado para queima =

(180.000 Mcal/hora) : (Rendimento caldeira/100)

(180.000 Mcal/hora) : 0,85 =

Qenergia licor preto alimentado para queima = **211.765 Mcal/hora**

Cálculo da energia presente na eletricidade gerada pela turbina em uma hora de operação

Qenergia eletricidade = (50 MW) . (1 hora) = 50 MWh/hora

Que equivale a:

(50 MWh/hora) . (861 Mcal/MWh) =

Qenergia eletricidade = **43.050 Mcal/hora**

Cálculo do rendimento elétrico na cogeração a partir da energia do licor preto alimentado à caldeira de recuperação

Rendimento elétrico na cogeração =

100 . [(Qenergia eletricidade/hora) : (Qenergia licor preto alimentado para queima/hora)] =

100 . [(43.050 Mcal/hora) : (211.765 Mcal/hora)] =

Rendimento elétrico na cogeração = **20,33% de rendimento na produção de eletricidade pelo ciclo a vapor**

Cálculo da quantidade de energia térmica líquida que é extraída como vapor de processo para utilização em processos evaporativos

$$\begin{aligned} \text{Qenergia líquida no vapor de processo} &= \\ (150 \text{ t vapor processo/hora}) \cdot (\text{Entalpia vapor} - \text{Entalpia água}) &= \\ (150 \text{ t/h}) \cdot [(640 - 75) \text{ Mcal/t vapor}] &= \end{aligned}$$

$$\text{Qenergia líquida no vapor de processo} = \mathbf{84.750 \text{ Mcal/hora}}$$

Cálculo do rendimento térmico líquido na cogeração a partir da energia do licor preto alimentado à caldeira de recuperação

$$\begin{aligned} \text{Rendimento térmico na cogeração} &= \\ 100 \cdot [(\text{Qenergia vapor processo/hora}) : (\text{Qenergia licor preto} & \\ \text{alimentado para queima/hora})] &= \\ 100 \cdot [(84.750 \text{ Mcal/hora}) : (211.765 \text{ Mcal/hora})] &= \end{aligned}$$

Rendimento térmico na cogeração = **40,02% de rendimento na produção de vapor de uso processual em sistema com cogeração parcial pelo ciclo a vapor**

Cálculo do rendimento global nesse sistema de cogeração

$$\begin{aligned} \text{Rendimento global nessa cogeração} &= \\ (\text{Rendimento elétrico}) + (\text{Rendimento térmico}) &= \\ 20,33\% + 40,02\% &= \\ \text{Rendimento global nessa cogeração} &= \mathbf{60,35\%} \end{aligned}$$

Esse rendimento poderia ser melhorado se houvesse um rendimento elétrico melhor na geração de eletricidade e se houvesse maior aproveitamento de vapor de processo.

## **Problema 42:**

Com os dados do problema anterior, calcular a quantidade de licor preto kraft que está sendo utilizada por hora para alimentar a caldeira de recuperação kraft. Caso essa fábrica de celulose kraft não branqueada da forma como descrita produzisse uma quantidade horária de celulose de 50 adt, qual seria a relação de sólidos secos por tonelada seca ao ar de celulose que esse sistema estaria gerando?

Solução:

Base referencial: Uma hora de operações

Cálculo da quantidade de licor preto sendo alimentado para produção de calor suficiente para atendimento das necessidades térmicas da central termelétrica

Qenergia alimentada à caldeira de recuperação pelo licor preto =  
**211.765 Mcal/hora**

Poder calorífico útil do licor preto com 75%SS ou 25%U =  
**2.400 Mcal/t a 25%U**

Quantidade alimentada de licor preto/hora (em base úmida)=  
(211.765 Mcal/hora) : (2.400 Mcal/t úmida com 25%U)  
**88,23 t licor preto com 75%SS** (em base úmida)

Quantidade alimentada de licor preto/hora (em base seca) =  
(88,23 t licor preto com 75%SS) . (0,75 t SS/t úmida a 25%U) =  
**66,18 tSS como licor preto a.s./hora** (em base seca)

Cálculo da relação tSS/adt celulose

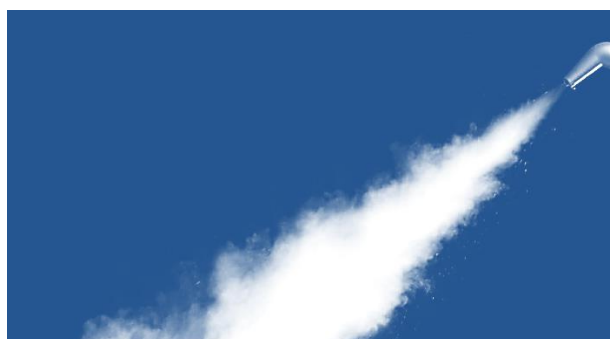
Relação tSS/adt = (66,18 tSS/hora) : (50 adt celulose/hora)

Relação tSS/adt = (66,18 tSS/hora) : (50 adt celulose/hora)

Relação tSS/adt = **1,32 tSS/adt celulose**



Máquinas e utensílios a vapor e a calor são nossos amigos há centenas de anos



## CONSIDERAÇÕES FINAIS



Meus propósitos com esse presente capítulo da série sobre uso energético da biomassa florestal dos eucaliptos foram os seguintes:

- Discorrer sobre as potencialidades, virtudes e fraquezas das biomassas florestais como biocombustíveis para a sociedade humana;
- Debater conceitos básicos e fundamentais sobre a produção de calor, vapor e eletricidade a partir da biomassa florestal;
- Entender as razões para as causas de ineficiências e sugerir maneiras de se trabalhar as mesmas para melhoria dos rendimentos e eficiências;
- Demonstrar através de maneiras numéricas com problemas práticos e muitos exemplos de aplicação como os interessados

poderiam entender mais e penetrar com intensidade na intimidade desses conceitos tecnológicos;

- Oferecer a todos vocês, meus estimados leitores, as oportunidades de encontrarem uma literatura de fácil leitura, aplicável e didática. Oferecer, com isso, uma relação importante de artigos, teses, dissertações, vídeos, websites e outras fontes de consulta bibliográfica para que todos possam estudar mais sobre o tema a partir de uma base sólida de literatura, que já tenha sido previamente lida e selecionada por mim;
- Valorizar os técnicos e acadêmicos que estejam estudando esses assuntos de forma que eles possam ter seus trabalhos difundidos e possam se sentir motivados a trazer mais de seus conhecimentos ao grande público que tem carência dessas informações e tecnologias.
- Finalmente, minha sempre constante preocupação é garantir o interesse dos leitores pela leitura do que lhes trago com os capítulos de nosso Eucalyptus Online Book. Espero que tenham apreciado esse capítulo e os demais dessa série. Podem acreditar que procurei fazer o melhor que podia para lhes oferecer algo didático, prático e quase inexistente na literatura nacional.

Um abraço a todos, obrigado por tudo e boa leitura.



A singela beleza de uma planta jovem de *Corymbia citriodora* que pode se converter em uma fonte de energia renovável da maior significância ambiental



## REFERÊNCIAS DA LITERATURA E SUGESTÕES PARA LEITURA



Sustentabilidade é algo que se deve buscar sempre no setor de base florestal plantada – qualquer que seja a destinação dos produtos da floresta...  
Inclusive para os produtos energéticos da biomassa florestal...

As literaturas brasileira e mundial são bastante ricas em artigos, eventos, palestras, teses, dissertações, vídeos, websites e outros tipos de materiais técnicos sobre o uso da biomassa florestal para geração de calor, vapor e eletricidade. Trata-se de um tema sempre atual e que tem despertado incontestável aumento de interesse em função dos incentivos e estímulos para a busca de fontes alternativas de energia, que não sejam fósseis e que possam ser renováveis e viabilizadas em custos acessíveis aos produtores e de preços atrativos aos consumidores.

Dessa forma, não foi difícil selecionar mais de 180 referências orientadas apenas para os assuntos que estão sendo discutidos nesse segundo capítulo dessa série sobre uso energético da biomassa do eucalipto. Como esse capítulo atual trata mais especificamente da geração de calor, vapor e eletricidade, nossas referências dessa vez estão focadas apenas nesses assuntos e nas suas interligações diretas com os outros dois capítulos da série. Acabamos por adotar essa opção para evitar que as referências se avolumassem demais nesse processo.

Quem estiver curioso sobre as literaturas do capítulo anterior para navegação e leitura, pode perfeitamente encontrar as mesmas obtendo e lendo o capítulo 43 desse Eucalyptus Online Book.

Esse presente capítulo, de número 44, procura ter um direcionamento prático e direto, por isso, essa seleção de referências da literatura está mais relacionada ao que procuramos elencar como foco dos temas que foram aqui abordados, não sendo, portanto, uma busca exaustiva de milhares de publicações, com variadas vertentes tecnológicas.

Espero que esses artigos possam ser de utilidade a vocês, pois foram escritos por uma ampla e diversificada seleção de autores que atuam no setor de geração de produtos florestais e de energia a partir da madeira, da cana de açúcar e de outros tipos de biomassa florestal e agrícola.

Também acredito que esses conjuntos selecionados de referências somados ao nosso texto desse capítulo poderão ajudar em muito a que qualquer pessoa interessada em conhecer mais sobre a geração de calor, vapor e eletricidade a partir da biomassa florestal do eucalipto (ou de outra qualquer) possa estudar e se aperfeiçoar mais sobre esse tema.

Aproveitem então o que lhes trazemos como literatura para vocês lerem e aprenderem mais sobre isso:

**Tabelas de vapor online.** Steam Tables Online. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx?lang=pt>

**Tablas de vapor.** TLV – Compañía Especialista en Vapor. Website com tabelas de vapor. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.tlv.com/global/LA/calculator/steam-table-pressure.html> (em Espanhol)

**Teoria do vapor.** TLV – Compañía Especialista en Vapor. Website com tutoriais sobre aplicações do vapor. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/how-to-read-a-steam-table.html> (em Espanhol)

**Conversor de unidades de energia.** Convertworld. Website internacional especializado em conversão de inúmeros tipos de unidades e sistemas de medidas. Acesso em 09.05.2016:



<http://www.convertworld.com/pt/energia/>

**Parâmetros energéticos gerais.** Revista Economia & Energia. Acesso em 09.05.2016:

<http://ecen.com/eee13/equiv.htm>

**Oportunidades para a energia da madeira.** Encontro Brasileiro de Energia da Madeira. Lignum Brasil. Acesso em 09.05.2016:

[http://lignumbrasil.com.br/2016/03/oportunidades-para-a-energia-da-madeira/?utm\\_source=ALLINMAIL&utm\\_medium=email&utm\\_content=111828262&utm\\_campaign=Newsletter\\_Lignum\\_-\\_Edi\\_\\_o\\_09\\_\\_Base\\_Geral\\_\\_Repique&utm\\_term=\\_.in.yu02bj5.cblt.gbl9m.zt82cs.v2.y.a92cs.v2.y](http://lignumbrasil.com.br/2016/03/oportunidades-para-a-energia-da-madeira/?utm_source=ALLINMAIL&utm_medium=email&utm_content=111828262&utm_campaign=Newsletter_Lignum_-_Edi__o_09__Base_Geral__Repique&utm_term=_.in.yu02bj5.cblt.gbl9m.zt82cs.v2.y.a92cs.v2.y)

**Curso “Tecnologia de Fabricação de Biocombustíveis”.** Professor Hanniel Freitas. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Norte – Brasil. Acesso em 09.05.2016:

<http://docente.ifrn.edu.br/hannielfreitas/disciplinas/tecnologia-de-producao-de-biomassa-energetica> (Página do curso)

e

<https://docente.ifrn.edu.br/hannielfreitas/disciplinas/tecnologia-de-producao-de-biomassa-energetica/estqueuimetria-da-combustao-e-analise-energetica-de-combustiveis> (Aula - Combustão: Uma análise estequiométrica)

**NIPE – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético.** UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.nipe.unicamp.br/2013/>

e

<http://www.nipe.unicamp.br/2013/publicacoes.php>

e

<http://www.nipe.unicamp.br/2013/eventos.php>

**NEST - Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída.** UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. Acesso em 09.05.2016:

[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/index\\_pt.html](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/index_pt.html)

e

[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/teses/teses\\_pt.html](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/teses/teses_pt.html) (Teses e dissertações)

e

[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads\\_pt.html](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads_pt.html) (*Downloading's* de documentos)

**Curso Geração de Energia Elétrica.** A.G.G. Lima. Faculdade de Engenharia. UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.antoniolima.web.br.com/default.htm> (Website)

e

<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/geracaotermica.htm> (Geração térmica)

**Embrapa Agroenergia.** Website de centro brasileiro especializado em energia rural. Acesso em 09.05.2016:

<https://www.embrapa.br/agroenergia>

e

<https://www.embrapa.br/agroenergia/publicacoes>

**EPE – Empresa de Pesquisa Energética.** Website de empresa do governo federal brasileiro destinada a estudar recursos energéticos. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>

e

<http://www.epe.gov.br/Publicacoes/Paginas/default.aspx> (Publicações)

e

[http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos\\_27.aspx](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos_27.aspx) (Série “Estudos Energéticos” e “Notas Técnicas”)

**Congressos Internacionais de Bioenergia.** Porthus Eventos. Website de organização brasileira especializada em eventos florestais e energéticos. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.bioenergia.net.br/>

e

<http://www.porthuseventos.com.br/eventos.php>

e

<http://www.porthuseventos.com.br/site/eventos/2009/eventobioenergia.com.br/congresso/br/palestras.php> (Palestras do 4º Congresso – 2009)

**Biomass Magazine.** Website de revista internacional especializada em biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://biomassmagazine.com/> (em Inglês)

e

<http://biomassmagazine.com/tag/power/> (“Geração de força” - em Inglês)

**Biomass Power Association.** Website de entidade internacional especializada em energia e eletricidade da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.biomasspowerassociation.com/> (em Inglês)

e

<http://www.biomasspowerassociation.com/pages/links.php> (Publicações, links e recursos tecnológicos - em Inglês)

**Biomassaworld.** Website de entidade brasileira especializada em biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.biomassaworld.com.br/> (Website)

e

<http://www.biomassaworld.com.br/videos> (Vídeos)

e

<http://www.biomassaworld.com.br/artigos-tecnicos/3/biomassa> (Artigos sobre biomassa)

e

<http://www.biomassaworld.com.br/revistas> (Revistas florestais online)

**Biomassa BR – Energias Renováveis.** Website de entidade brasileira especializada em biomassa energética. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.biomassabr.com/bio/> (Website institucional)

e

<http://www.biomassabr.com/bio/revista.asp> (Revista Biomassa BR)

**Brasil Biomassa e Energia Renovável.** Website de entidade brasileira especializada em biomassa energética. Acesso em 09.05.2016:

<http://abibbrasil.wix.com/brasilbiomassa#!biomassa/cu7h>

e

[http://media.wix.com/ugd/09c803\\_2921876af45949fc8d83e28b8eff2263.pdf](http://media.wix.com/ugd/09c803_2921876af45949fc8d83e28b8eff2263.pdf) (Revista Brasil Biomassa & Pellets)

**Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável.** Website de entidade brasileira especializada em energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.biomassabioenergia.com.br/>

e

<https://www.magtab.com/reader/biomassa-bioenergia/15082> (Revista digital)

e

<http://abibbrasil.wix.com/abib#!biblioteca/cmil> (Revistas e estudos digitais sobre péletes)

e

[http://www.ahkbrasilien.com.br/fileadmin/ahk\\_brasilien/portugiesische\\_seite/departamentos/Meio\\_Ambiente/Ecogerma\\_2015/Celso\\_Oliveira\\_-\\_A\\_energia\\_da\\_biomassa\\_e\\_o\\_potencial\\_do\\_Brasil.pdf](http://www.ahkbrasilien.com.br/fileadmin/ahk_brasilien/portugiesische_seite/departamentos/Meio_Ambiente/Ecogerma_2015/Celso_Oliveira_-_A_energia_da_biomassa_e_o_potencial_do_Brasil.pdf) (Palestra "A energia da biomassa e o potencial do Brasil" – por Celso Oliveira)

**LQCE - Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia.** Website de laboratório universitário especializado em estudos e pesquisas sobre bioenergia de base florestal na Universidade de São Paulo. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.lqce.esalq.usp.br/lqce1.php> (Website)

e

<http://www.lqce.esalq.usp.br/documentos.php> (Documentos técnicos)

e

<http://www.lqce.esalq.usp.br/capacitacao.php> (Fotos da capacitação laboratorial)

**Biomassa e Bioenergia.** Grupo Gessulli. Website brasileiro especializado em biomassas e publicações sobre biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.biomassabioenergia.com.br/>

e

<http://www.biomassabioenergia.com.br/noticia/biomassa>

e

[http://www.biomassabioenergia.com.br/edicao/12/20151203110622\\_V\\_733](http://www.biomassabioenergia.com.br/edicao/12/20151203110622_V_733) (Revista Biomassa e Bioenergia)

**Portal Brasileiro de Energias Renováveis.** Website brasileiro especializado em energias renováveis. Acesso em 09.05.2016:

<http://energiarenovavel.org/>

e

[http://energiarenovavel.org/index.php?option=com\\_seyret&Itemid=309](http://energiarenovavel.org/index.php?option=com_seyret&Itemid=309) (Vídeos)

**World Bioenergy Association.** Website de entidade internacional especializada em bioenergia. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.worldbioenergy.org/> (Website institucional – em Inglês)

e

<http://www.worldbioenergy.org/content/wba-fact-sheets> (“Fact sheets” – em Inglês)

**IEA – Bioenergy. Energy Technology Network. Task 43: Biomass Feedstocks for Energy Markets.** Website de entidade internacional especializada em energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.ieabioenergytask43.org/> (em Inglês)

e

[http://www.ieabioenergytask43.org/wp-content/uploads/2013/09/Brochure\\_T43\\_final\\_-april-27\\_2011.pdf](http://www.ieabioenergytask43.org/wp-content/uploads/2013/09/Brochure_T43_final_-april-27_2011.pdf) (“Folder Task 43” – em Inglês)

e

[http://www.ieabioenergytask43.org/wp-content/uploads/2013/09/Task\\_43\\_Overview\\_report\\_2013.pdf](http://www.ieabioenergytask43.org/wp-content/uploads/2013/09/Task_43_Overview_report_2013.pdf) (“Task 43 overview paper” – em Inglês)

e

<http://www.ieabioenergytask43.org/httpwww-iewp-contentuploads201309cover-tr2014-1-png/> (Relatórios técnicos – em Inglês)

**Centro da Biomassa para a Energia.** Portugal. Website de instituto português especializado em energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.centrodabiomassa.pt/> (Website)

e

<http://www.centrodabiomassa.pt/index.php/pt/documentos> (Publicações)

**Projeto ENERSILVA.** Website de projeto de estudos e divulgação da biomassa para finalidades energéticas no sudeste da Europa. Acesso em 09.05.2016:

<http://enersilva.navegantes.info/> (Website)

e

<http://enersilva.navegantes.info/informes.php> (Informes)

e

<http://enersilva.navegantes.info/ponencias.php> (Apresentações)

e

<http://enersilva.navegantes.info/revistas.php> (Revistas digitais)

e

<http://enersilva.navegantes.info/articulos.php> (Artigos)

e

<http://enersilva.navegantes.info/publicaciones.php> (Publicações)

**SBPE – Sociedade Brasileira de Planejamento Energético.** Website de entidade focada em estudos e planejamento da produção, geração e uso da energia. Acesso em 09.05.2016:

<http://new.sbpe.org.br/>

e

<http://new.sbpe.org.br/rbe/> (Revista Brasileira de Energia)

**INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética.** Website de instituto brasileiro especializado em eficiência energética. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.inee.org.br/>

e

[http://www.inee.org.br/forum\\_downloads.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_downloads.asp?Cat=gd) (*Downloading* de artigos e palestras sobre cogeração e geração distribuída)

e

[http://www.inee.org.br/biomassa\\_downloads.asp?Cat=biomassa](http://www.inee.org.br/biomassa_downloads.asp?Cat=biomassa) (*Downloading* de artigos e palestras sobre bioenergia)

**NREL – National Renewable Energy Laboratory.** Website de laboratório internacional especializado em energias renováveis. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.nrel.gov/biomass/> (“Biomass” – em Inglês)

e

[http://www.nrel.gov/biomass/analytical\\_procedures.html](http://www.nrel.gov/biomass/analytical_procedures.html) ("Standard Procedures for Biomass Compositional Analysis" – em Inglês)

**HPB Sistemas de Energia.** Website de empresa brasileira especializada em geração de eletricidade. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.hpb.com.br/>

e

<http://www.hpb.com.br/produtos/> (Caldeiras)

**Biomass boilers.** Andritz. Website de empresa global especializada em caldeiras de biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<https://www.andritz.com/no-index/pf-detail?productid=11205> (em Inglês)

**TGM. Grupo TGM.** Website de empresa global especializada em produção e geração de eletricidade. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.grupotgm.com.br/>

e

<http://www.grupotgm.com.br/media-center/catalogos-tecnicos/turbinas-a-vapor>  
(Turbinas a vapor)

**Energia.** Demuth Energy. Website de empresa brasileira especializada em energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.demuth.com.br/segmentos/index.php?id=1>

**Tractebel Energia.** Website de empresa brasileira especializada em geração de termelétricidade. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet>

e

<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-termelétricas> (Usinas termelétricas)

**Biomass power and energy systems.** Wellons. Website de empresa global especializada em sistemas de energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.wellons.com/> (em Inglês)

**KMW Energy.** Website de empresa global especializada em sistemas de energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://kmwenergy.com/introtobiomass/> (Biomassa – em Inglês)

e

<http://kmwenergy.com/energygeneration/> (Geração de energia – em Inglês)

**Biomass boilers.** Metso. Website de empresa global especializada em sistemas de geração de energia para as biomassas. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.metso.com/search-page/#/search/biomass%20boilers> (em Inglês)

**Biomass low temperature vaccum dryer.** Thermal Energy International. Website de empresa global especializada em sistemas de secagem de biomassas. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.thermalenergy.com/dry-rex-biomass-dryer.html> (em Inglês)

**Wood chip dryers.** Ponndorf GmbH. Website de empresa global especializada em sistemas de secagem de biomassas. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.ponndorf-gmbh.de/index.php/en/wood-chip-dryers> (em Inglês)

**Sherman Biomass Power Plant in Stayceville, Maine-Video Tour.** Niagara. Vídeo de empresa global especializada em sistemas de geração de termelétricidade a partir de biomassas. Acesso em 09.05.2016:

<https://www.youtube.com/watch?v=ZgwI5dMIz7U> (em Inglês)

**Equipalcool Soluções Térmicas.** Website de empresa brasileira especializada em geração de termelétricidade. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.equipalcool.com.br/>

e

<http://www.equipalcool.com.br/servicos-e-produtos/segmentos/geracao-de-energia/>  
(Geração de energia elétrica e térmica)

e

<http://www.equipalcool.com.br/servicos-e-produtos/segmentos/papel-e-celulose>  
(Setor de papel e celulose)

e



<http://www.equivalcool.com.br/servicos-e-produtos/segmentos/madeireiro> (Setor madeireiro)

**Biomass Energy Centre.** Website de centro internacional especializado em energia da biomassa. Acesso em 09.05.2016:

[http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?\\_pageid=73,1&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=73,1&_dad=portal&_schema=PORTAL) (em Inglês)

**RENABIO – Rede Nacional de Biomassa para Energia.** Website de entidade brasileira especializada em biomassas florestais para energia. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.renabio.org.br/>

e

<http://www.renabio.org.br/publicacoes.htm> (Publicações da Renabio - Revista Biomassa & Energia)

**Combustão da biomassa.** Lippel Equipamentos. Website de empresa brasileira especializada em energia da biomassa florestal. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/combustao-da-biomassa#>

**Secador rotativo para secagem de biomassa.** Lippel Equipamentos. Website de empresa brasileira especializada em energia da biomassa florestal. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.lippel.com.br/br/queimadores-e-secadores-de-biomassa/secador-rotativo/secadores-rotativos-para-biomassa.html#.Vv0dDcL2b3g>

**Secadores de biomassa.** Rohden Termo Engenharia. Website de empresa brasileira especializada em sistemas térmicos para a biomassa. Acesso em 09.05.2016:

<http://www.queimadores.ind.br/tecnologia/>

e

<http://www.queimadores.ind.br/produtos/> (Outros produtos para biomassa florestal)

**Turbine.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine> (em Inglês)

**Electric generator.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_generator) (em Inglês)

**Boiler (Power generation).** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Boiler\\_\(power\\_generation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boiler_(power_generation)) (em Inglês)

**Caldeira (Gerador de vapor).** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Caldeira\\_\(gerador\\_de\\_vapor\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Caldeira_(gerador_de_vapor))

**Eletricidade.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Eletricidade>

**Energia elétrica.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_el%C3%A9trica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_el%C3%A9trica)

**Potência.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pot%C3%Aancia>

**Vapor de água.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Vapor\\_de\\_%C3%A1gua](https://pt.wikipedia.org/wiki/Vapor_de_%C3%A1gua)

**Tonelada equivalente de petróleo.** Enciclopédia Livre Wikipédia. Acesso em 09.05.2016:

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Tonelada\\_equivalente\\_de\\_petr%C3%B3leo](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tonelada_equivalente_de_petr%C3%B3leo)

**Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas.** C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 43. 239 pp. (2016)

[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT43\\_Florestas\\_Energeticas\\_Eucaliptos.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT43_Florestas_Energeticas_Eucaliptos.pdf)

**Encontro Brasileiro de Energia da Madeira.** Malinovski Florestal. Página de evento sobre energia da madeira. (2016)

<http://www.energiadamadeira.com.br/>

**BEN - Balanço Energético Nacional 2015 (Ano base 2014). Relatório final.** MME – Ministério das Minas e Energia. 155 pp. (2015)

[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)

**Medição da madeira na forma de toras empilhadas.** C. Foelkel. Extraído de Eucalyptus Newsletter nº 48. 27 pp. (2015)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news48\\_Toras\\_Empilhadas.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news48_Toras_Empilhadas.pdf)

**Qualidade da biomassa florestal do eucalipto para fins energéticos.** C. Foelkel. Extraído de Eucalyptus Newsletter nº 49. 33 pp. (2015)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news49\\_Biomassa\\_Florestal\\_Eucalipto.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news49_Biomassa_Florestal_Eucalipto.pdf)

**As biorrefinarias integradas no setor brasileiro de fabricação de celulose e papel de eucalipto.** C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 29. Revisão 06. 270 pp. (2015)

[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT29\\_BiorrefinariasCelulosePapel.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT29_BiorrefinariasCelulosePapel.pdf)

**Cálculos, problemas e balanços aplicados ao setor de produção de celulose e papel de eucalipto: Parte 01:** Uma centena de exemplos sobre qualidade e suprimento de madeira e processo de fabricação de celulose (Linha de fibras). C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 38. 177 pp. (2015)

[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT38\\_Calculos\\_Setor\\_Madeira\\_Celulose.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT38_Calculos_Setor_Madeira_Celulose.pdf)

**Cálculos, problemas e balanços aplicados ao setor de produção de celulose e papel de eucalipto: Parte 03:** Noventa exemplos sobre geração e conservação de energia, recuperação do licor preto kraft, utilidades e polpação química sulfito. C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 40. 234 pp. (2015)

[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT40\\_Calculos\\_Recuperacao\\_Utilidades\\_Energia.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT40_Calculos_Recuperacao_Utilidades_Energia.pdf)

**Produção de lenha de eucalipto para energia: o desafio do pequeno produtor fumicultor de Santa Cruz do Sul/RS.** F.J. Simioni; C.C.A. Buschinelli; J.M.M.A.P. Moreira; B.M. Passos; S.B.F.T. Giroto. 53º Congresso SOBER – Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 18 pp. (2015)

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1032263/1/2015J.MauroSOBERProducao.pdf>

**A energia da biomassa.** Revista Opiniões Florestal. (2015)

<http://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/energia-da-biomassa/>

**Caldeira de Biomassa - Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio.** International Paper do Brasil. Prêmio FIESP de Mérito Ambiental. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. 20 pp. (2015)

<http://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=192787>

**2º Anuário Brasileiro das Indústrias de Biomassa a Energias Renováveis.** T. Fraga. (2014)

[https://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario\\_biomassa\\_e\\_energias\\_renovav?e=3524626/5496897](https://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovav?e=3524626/5496897)

**Soluções de cogeração para uma planta industrial utilizando o ciclo Brayton.** M.S. Carvalho; L.A.M. Pontes. Revista Eletrônica de Energia 4(1): 53 – 64. (2014)

<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/ree/article/download/3348/2457>

**Mercado de lenha voltado ao beneficiamento de grãos e tabaco na região centro-noroeste do Rio Grande do Sul.** T.F. Schulte; H.P. Greff; L.H. Oliveira. I Prêmio Serviço Florestal Brasileiro em Estudos de Economia e Mercado Florestal - 2013/2014. 42 pp. (2014)

<http://www.esaf.fazenda.gov.br/assuntos/premios/premios-1/i-premio-florestal-brasileiro/3o-lugar-008g.pdf>

**Qualidade dos cavacos para combustão.** Lippel Equipamentos. 03 pp. (2014)

<http://www.lippel.com.br/lippel/uploads/downloads/05-05-2014-10-36qualidade-dos-cavacos-para-combustao.pdf>

**Fornalha a lenha para secagem de café e grãos.** J.S. Silva; R.P. Lopes; D.G. Vitor; S.M.L. Donzeles. Embrapa. Comunicado Técnico 6. 14 pp. (2014)

[http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/comunicadotecnico/Comunicado\\_Tecnico\\_06.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/comunicadotecnico/Comunicado_Tecnico_06.pdf)

**Matriz energética. Aula 3: Centros de transformação e energias secundárias.** M. Kimpara. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Apresentação em PowerPoint: 97 slides. (2014)

<http://docplayer.com.br/8074042-Aula-3-centros-de-transformacao-e-energias-secundarias.html>

**Potencial de energias renováveis: Volume II – Biomassa, resíduos e hidroeletricidade.** Plano de Energia e Mudanças Climáticas de Minas Gerais. 119 pp. (2014)

[http://pemc.meioambiente.mg.gov.br/upload/documents-pdf/eleicoes/pemc\\_potencial\\_er\\_vol\\_2\\_v1.0\\_15\\_04\\_2014\\_com\\_adequaa-a-es.pdf](http://pemc.meioambiente.mg.gov.br/upload/documents-pdf/eleicoes/pemc_potencial_er_vol_2_v1.0_15_04_2014_com_adequaa-a-es.pdf)

**Aproveitamento da biomassa florestal para fins energéticos.** Forestis – Associação Florestal de Portugal. Apresentação em PowerPoint: 27 slides. (2014)

[http://www.cm-pontedelima.pt/imagens/geral/ambiente/jornadastecnicas2014/Apresentacao\\_FORESTIS.pdf](http://www.cm-pontedelima.pt/imagens/geral/ambiente/jornadastecnicas2014/Apresentacao_FORESTIS.pdf)

**Potencial de utilização do eucalipto para geração de energia no município de Paragominas/PA, Brasil.** E.W. Nogueira; C.J.C. Bispo; D.S. Franco. 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. 07 pp. (2014)

<http://vbaco01.ucs.br/congressoAnais2014/getArtigo.php?id=96>

**Combustão de biomassa.** L.A.C. Tarelho. Projeto AirUse. Universidade de Aveiro. Apresentação em PowerPoint: 56 slides. (2013)

[http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/12/1\\_PT\\_COURSES-BIOMASS-MATERIALS2.pdf](http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/12/1_PT_COURSES-BIOMASS-MATERIALS2.pdf)



no Brasil (Florestal & Biomassa 2013). Vídeos YouTube. Canal Painel Florestal. (2013)

[https://www.youtube.com/watch?v=sx\\_8wOCn7LI](https://www.youtube.com/watch?v=sx_8wOCn7LI)

**Panorama e desafios na geração de energia a partir da biomassa.** W.F. Quirino. Seminário: A importância da Biomassa Compactada para a Geração de Energia Limpa no Brasil (Florestal & Biomassa 2013). Vídeos YouTube. Canal Painel Florestal. (2013)

<https://www.youtube.com/watch?v=fPg2w11Nyg0>

**Geração de energia a partir de cavaco de madeira (biomassa).** M. Vahrenkamp; M. Teixeira. STEAG Energy Systems. Apresentação em PowerPoint: 15 slides. (2013)

[http://vdibrasil.com/uploads/media/Biomassa\\_Michael\\_Vahrenkamp\\_Steag.pdf](http://vdibrasil.com/uploads/media/Biomassa_Michael_Vahrenkamp_Steag.pdf)

**Estudo comparativo da queima de petróleo de baixa fluência e biomassa em caldeiras.** C.A. Oliveira. Centro Universitário UNIVATES. Monografia de Conclusão de Curso. 79 pp. (2013)

<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/369/1/CarlosOliveira.pdf>

**Introdução à combustão. Conceitos e aplicações** S.R. Turns. McGraw Hill Education. 3ª Edição. Tradução: A.A.M. Oliveira Júnior. 420 pp. (2013)

<https://books.google.com.br/books?id=4Pk4AgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=stephen+r.+turns&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjHuJG-w9nMAhWGUZAKHZGIDL0Q6AEILzAC#v=onepage&q=stephen%20r.%20turns&f=false>

**Utilização dos conceitos da ecoeficiência na gestão das emissões atmosféricas do processo de fabricação de celulose kraft de eucalipto.** C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo 22. 152 pp. (2013)

<http://www.eucalyptus.com.br/eucalptos/PT22EmissoesAtmosfericas.pdf>

**Cogeração de energia: o desafio da sustentabilidade energética.** C. Tofanetto. LANXESS. AHK - Câmara de Comércio e Indústria Brasil – Alemanha. Apresentação em PowerPoint: 21 slides. (2013)

[http://www.ahkbrasiliem.com.br/fileadmin/ahk\\_brasiliem/download\\_dateien/eventos\\_interior\\_lanxess\\_27-02-2013/Cogeracao\\_LANXESS.pdf](http://www.ahkbrasiliem.com.br/fileadmin/ahk_brasiliem/download_dateien/eventos_interior_lanxess_27-02-2013/Cogeracao_LANXESS.pdf)

**Avaliação de projeto de cogeração a partir de biomassa florestal. Uma abordagem pela teoria das opções reais.** D.L. Oliveira. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. (2012)

[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=1012767\\_2012\\_In dice.html](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=1012767_2012_In dice.html)

**Demanda de lenha para secagem de grãos no estado do Paraná.** R.A.O. Bell. Dissertação de Mestrado. UFPR – Universidade Federal do Paraná. 153 pp. (2012)

[http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf\\_ms/2012/d613\\_0800-M.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/defesas/pdf_ms/2012/d613_0800-M.pdf)

**Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia.** R.P. Francisco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del Rei. 148 pp. (2012)

[http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo\\_Pereira\\_Francisco.pdf](http://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo_Pereira_Francisco.pdf)

**Renewable energy technologies: cost analysis series. Volume 1: Biomass for power generation.** IRENA – International Renewable Energy Agency. 60 pp. (2012)

[http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE\\_Technologies\\_Cost\\_Analysis-BIOMASS.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-BIOMASS.pdf) (em Inglês)

**Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha.** J.M.M.A.P. Moreira; E.A. Lima; I.C.G.R. Goulart. Embrapa Florestas. Comunicado Técnico nº 293. 05 pp. (2012)

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65182/1/CT293.pdf>

**Structuring a biomass-to-energy project to industries.** L.F. Pelegrini; E. Rietmann. EnerBiomassa12. Apresentação em PowerPoint: 08 slides. (2012)

<https://2100.org/enerbiomassa/slides/B2/B2.1.pdf> (em Inglês)



**Tecnologia e soluções para melhor eficiência na geração de energia. Ciclo a vapor com aquecimento regenerativo.** J.T. Sabia Júnior. TGM Turbinas Apresentação em PowerPoint: 25 slides. (2012)

[http://www.stab.org.br/13\\_sba\\_palestras/02\\_TGM.pdf](http://www.stab.org.br/13_sba_palestras/02_TGM.pdf)

**Análise energética e exergetica do ciclo Rankine de cogeração em uma usina de cana de açúcar.** W.F. Queiroz. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe. 62 pp. (2012)

<http://files.nmc.webnode.com.br/200000099-2dcc42e21f/TCC%20-%20Wesley%20-%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf>

**Uso da biomassa como alternativa energética.** B.M. Cardoso. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 112 pp. (2012)

<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005044.pdf>

**Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação.** E.G.M. Lemos; N. Stradiotto. Cultura Acadêmica. 1072 pp. (2012)

[http://www.culturaacademica.com.br/\\_img/arquivos/Bioenergia-DIGITAL.pdf](http://www.culturaacademica.com.br/_img/arquivos/Bioenergia-DIGITAL.pdf)

**Cogeração de energia através do bagaço de cana de açúcar. Revisão de literatura.** T.F. Cardoso. Monografia de Pós-Graduação. UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos. 22 pp. (2011)

<http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-ii-c/trabalhos/monografia-tiago-fiori-cardoso.pdf>

**Análise econômica da implantação de um sistema de cogeração de energia por biomassa: um estudo de caso de uma fábrica de carbonato de cálcio precipitado situada no centro-oeste de Minas Gerais.** L.F. Santos. Trabalho de Conclusão de Curso. UNIFOR - Centro Universitário de Formiga. (2011)

<http://bibliotecadigital.uniformg.edu.br:21015/jspui/bitstream/123456789/116/1/LuizFernandoSantos-EP.pdf>

**Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia.** A.C.F. Vital; A.B. Hora. BNDES Setorial 33: 261 – 314. (2011)

[http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4030/BNDES\\_Perspectivas-do-setor-de-biomassa-de-madeira-para-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4030/BNDES_Perspectivas-do-setor-de-biomassa-de-madeira-para-gera%C3%A7%C3%A3o-de-energia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

e

[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3308.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3308.pdf)

**Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira.** A.D. Salum. Monografia de Pós-Graduação. UFBA – Universidade Federal da Bahia. 54 pp. (2011)

<http://www.pei.ufba.br/novo/uploads/biblioteca/TFC%20-%20ANDERSON%20DOURADO%20SALUM.pdf>

**Energia da celulose, desafios e oportunidades.** R. Villarroel. Website Grau Celsius. 03 pp. (2011)

[http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Energia\\_da\\_Celulose%20-Villarroel.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Energia_da_Celulose%20-Villarroel.pdf)

**Um guia referencial sobre ecoeficiência energética para a indústria de papel e celulose kraft de eucalipto no Brasil.** C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo nº 19. 140 pp. (2010)

[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT19\\_EcoeficienciaEnerg.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT19_EcoeficienciaEnerg.pdf)

**Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose e papel de eucalipto. Parte 04: "Casca Suja".** C. Foelkel. Eucalyptus Online Book. Capítulo nº 21. 100 pp. (2010)

[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT21\\_CascaSuja.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT21_CascaSuja.pdf)

**Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar.** F.A.O. Melo; J.N. Silva; J.S. Silva; C.P. Sampaio; D.F. Silva. Acta Scientiarum 32(2): 129 – 136. (2010)

<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/1575/1575>

**Alternativa para redução do consumo de combustível fóssil em uma fábrica de celulose kraft de eucalipto.** F.A. Silva. Dissertação de Mestrado. UFV – Universidade Federal de Viçosa. 39 pp. (2010)

[http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/2883/dissertacao\\_FL%20via%20Azevedo%20Silva.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/2883/dissertacao_FL%20via%20Azevedo%20Silva.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



<http://www.uchile.cl/uchile/download.jsp?document=57122&property=attachment&index=7&content=application/pdf>

**Co-combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactes nas emissões atmosféricas de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, dioxinas e furanos e material particulado.** D.S.S. Araújo. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. 157 pp. (2008)

[http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/418/1/Tese%20Mestrado%20D.\\_Salema.pdf](http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/418/1/Tese%20Mestrado%20D._Salema.pdf)

**Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de *Coffea canephora* var. Conilon.** O. Saiter. Monografia de Conclusão de Curso. UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 29 pp. (2008)

[http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/2008II/Monografia\\_Osmir.pdf](http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/2008II/Monografia_Osmir.pdf)

**The handbook of biomass combustion & co-firing.** Editores: S.van Loo; J. Kopejan. Earthscan. 442 pp. (2008)

[https://books.google.com.br/books?id=KE565zmFumQC&printsec=frontcover&dq=combustion+of+biomass&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwily\\_eExNnMAhVGjJAKHdgkA4MQ6AEIKzAA#v=onepage&q=combustion%20of%20biomass&f=false](https://books.google.com.br/books?id=KE565zmFumQC&printsec=frontcover&dq=combustion+of+biomass&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwily_eExNnMAhVGjJAKHdgkA4MQ6AEIKzAA#v=onepage&q=combustion%20of%20biomass&f=false) (em Inglês)

**Energy from biomass in pulp and paper mills.** D. Gavrilescu. Environmental Engineering and Management Journal 7(5): 537 – 545. (2008)

[http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/vol7/no5/9\\_Gavrilescu\\_D.pdf](http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/vol7/no5/9_Gavrilescu_D.pdf) (em Inglês)

**Tipos e aplicações de caldeiras.** N.R. Leite; R.A. Militão. Disciplina de Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Petrobrás. Escola Politécnica. USP – Universidade de São Paulo. 112 pp. (2008)

[https://lcsimei.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras\\_prominp.pdf](https://lcsimei.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)

**Capítulo 4 - Biomassa. Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 3ª Edição. (2008)

[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf)

e

[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)

e

[http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1689](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689) (Todos os capítulos do Atlas)

**Biomassa para energia.** L.A.B. Cortez; E.E.S. Lora; E.O. Gómez. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 29 pp. (2008)

<http://www.nipe.unicamp.br/2013/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>

**Viabilidade econômica de um projeto de cogeração via um turbogerador de eletricidade.** C.S. França. Monografia de Conclusão de Curso. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 78 pp. (2008)

<http://tcc.bu.ufsc.br/Economia293382>

**Geração termelétrica a partir da biomassa. Plano Nacional de Energia 2030. Volume 8.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. 250 pp. (2007)

[http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_8.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf)

**Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica.** M.D. Nascimento. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 103 pp. (2007)

[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90683/nascimento\\_md\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90683/nascimento_md_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Metodologia de análise de desempenho de turbinas a vapor operando em ciclos convencionais e combinado.** C.F. Morais. Dissertação de Mestrado. UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá. 341 pp. (2007)

<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031619.pdf>

**Produtos e propriedades energéticas da madeira.** P. Schürhaus. UNIUV – Centro Universitário de União da Vitória. 162 pp. (2007)

<http://engmadeira.yolasite.com/resources/Energia%20da%20madeira.pdf>

**Análise de viabilidade econômica em co-geração de energia elétrica.** M.P.T. Nagaoka; M.S.T. Esperancini; J.S. Virgens Filho; A.M. Magalhães; M.E. Nagaoka; S.P.S. Guerra. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal 5(9). 15 pp. (2007)

[http://www.faeff.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/4v0FmIXuDwu1NDC\\_2013-4-26-14-57-45.pdf](http://www.faeff.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/4v0FmIXuDwu1NDC_2013-4-26-14-57-45.pdf)

**Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem.** M.A. Brand. Tese de Doutorado. UFPR – Universidade Federal do Paraná. 169 pp. (2007)

<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/10397/Tese-vers%20o%20final%20-%20Martha%20Andreia%20Brand.pdf;jsessionid=8E54FFE84CE46F74ECA9AA4563E1F90E?sequence=1>

**Análise preliminar da viabilidade de cultivos florestais para produção de energia elétrica.** S.I. Gomes; P.R. Paraiso; C.M.G. Andrade. Espaço Energia 4. 10 pp. (2006)

<http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/4/004-04.pdf>

**Uso da biomassa florestal na geração de energia.** T.S. Soares; A.C.O. Carneiro; E.O. Gonçalves; J.G. Lellis. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal. 09 pp. (2006)

[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/florestal1\\_000gapwcajw02wx5ok04xjloyxd3fpu2.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/florestal1_000gapwcajw02wx5ok04xjloyxd3fpu2.pdf)

**Viabilidade econômica de produção de lenha de eucalipto para secagem de produtos agrícolas.** P.C. Afonso Júnior; D. Oliveira Filho; D.R. Costa. Engenharia Agrícola 26(1): 28 – 35. (2006)

<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30093.pdf>

**Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha.** J.C.F. Macedo. Dissertação de Mestrado. UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. 216 pp. (2006)

<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030153.pdf>

**Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006.** MMA – Ministério do Meio Ambiente. Governo Federal do Brasil. 49 pp. (2006)

[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_2006\\_382.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2006_382.pdf)

**Estudo de viabilidade de instalações energéticas.** S. Malheiro. Seminário Internacional "A biomassa florestal, energia e o desenvolvimento rural". UTAD/Portugal. Apresentação em PowerPoint: 31 slides. (2005)

<http://enersilva.navegantes.info/resultados/SalvadorMmalheiro%2014%20dezembro.pdf>

**Oportunidades do aproveitamento da biomassa florestal.** E. Rodrigues. Projeto ENERSILVA. Centro de Biomassa para a Energia. Universidade Católica do Porto. Apresentação em PowerPoint: 33 slides. (2005)

[http://enersilva.navegantes.info/resultados/eugenia\\_rodrigues\\_cbe.pdf](http://enersilva.navegantes.info/resultados/eugenia_rodrigues_cbe.pdf)

**Apostila de cogeração.** N.P. Brasil. Curso Engenharia de Equipamentos. NEST/EFEI/FUPAI. UFF – Universidade Federal Fluminense. 35 pp. (2005)

[http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)

**Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** F. Rosillo-Calle; S.V. Bajay; H. Rothman. Editora UNICAMP. 447 pp. (2005)

[http://www.saraiva.com.br/uso-da-biomassa-para-producao-de-energia-na-industria-brasileira-1389287.html?sku=1389287&force\\_redirect=1&pac\\_id=123134](http://www.saraiva.com.br/uso-da-biomassa-para-producao-de-energia-na-industria-brasileira-1389287.html?sku=1389287&force_redirect=1&pac_id=123134)

**Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba - MG.** M.D. Müller. Tese de Doutorado. UFV – Universidade Federal de Viçosa. 108 pp. (2005)

[http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/31/129121\\_c.pdf?sequence=2&isAllowed=y](http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/31/129121_c.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

e

<http://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/muller,md.pdf>

**Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Brasil.** L. Calegari; C.E.B. Foelkel; C.R. Haselein; J.L.S.

Andrade; P. Silveira; E.J. Santini. Biomassa e Energia 2(1): 37 – 46. (2005)

<http://www.renabio.org.br/04-B&E-v2-n1-2005-p37-46.pdf>

**Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana de açúcar.** L.G.S. Rodrigues. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 145 pp. (2005)

[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/145-dissertacao\\_luiz\\_gustavo\\_scartezini\\_rodrigues.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/145-dissertacao_luiz_gustavo_scartezini_rodrigues.pdf)

**Avaliação técnico-econômica do processo de cogeração em uma indústria sucroalcooleira.** L.A. Perea. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 132 pp. (2005)

[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90596/perea\\_la\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90596/perea_la_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Informe de la misión técnica a la central de biomassa forestal de Mortágua. (Portugal).** Asociación Forestal de Galícia – Espanha. 11 pp. (2004)

<http://enersilva.navegantes.info/areasubir/resultados/INFORME%20MORTAGUA.pdf>  
(em Espanhol)

**Aproveitamento da biomassa para a geração de energia elétrica.** O.S. Martins. 1º Seminário sobre a Utilização de Energias Renováveis para Eletrificação Rural do Norte e Nordeste do Brasil. Apresentação em PowerPoint: 31 slides. (2004)

[http://www.eletronbras.gov.br/elb/portal/data/documents/storedDocuments/%7BA550763A-377A-4EFC-B5F4-7FB3FFD886CB%7D/%7B6632A665-43B7-4D5B-838F-E2283345D2D2%7D/1%B0Semin%E1rioFRE\\_ANEEL\\_CENBIO\\_Biomassa\\_041209.pdf](http://www.eletronbras.gov.br/elb/portal/data/documents/storedDocuments/%7BA550763A-377A-4EFC-B5F4-7FB3FFD886CB%7D/%7B6632A665-43B7-4D5B-838F-E2283345D2D2%7D/1%B0Semin%E1rioFRE_ANEEL_CENBIO_Biomassa_041209.pdf)

**Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos.** J.N. Silva; J. Cardoso Sobrinho; E.T. Saiki. Engenharia Agrícola 24(2): 405 – 411. (2004)

<http://www.agrolink.com.br/downloads/105923.pdf>



**Controle de combustão em fornalhas a lenha.** R.P. Lopes; D. Oliveira Filho; S.M.L. Donzeles; W.P.M. Ferreira. Atas do 3º Encontro de Energia no Meio Rural. (2003)

[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200023&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000200023&script=sci_arttext)

**Geração de energia elétrica em pequena escala utilizando ciclos a vapor e lenha como combustível.** R.C. Carpio; F.N. Teixeira; E.S. Lora. Anais do IV Encontro de Energia no Meio Rural. 04 pp. (2002)

<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v2/076.pdf>

**Simulação de sistemas térmicos de potência para geração de energia elétrica.** A.E.C. Paz. Dissertação de Mestrado. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 192 pp. (2002)

<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1873/000360649.pdf?sequence=1>

**Energy cost reduction in the pulp and paper industry.** D.W. Francis; M.T. Towers; T.C. Browne. PAPRICAN - Pulp and Paper Research Institute of Canada. 30 pp. (2002)

<https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/publications/infosource/pub/cipec/pulp-paper-industry/pdf/pulp-paper-industry.pdf> (em Inglês)

**Estudo termodinâmico e análise de custos da ampliação de um sistema de cogeração de energia em uma destilaria de cana de açúcar.** E.F. Jaguaribe; P.C. Lobo; J.R. Lima Neto; W.L. Souza; F.A.A. Rocha. IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. 09 pp. (2002)

<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2002/Paper-title/24/CIT02-0240.PDF>

**Balanco e rendimento energéticos de uma indústria integrada de base florestal.** M.A. Brand; D.A. Silva; G.I.B. Muñiz; U. Kloch. Floram – Floresta e Ambiente 9(1): 45 – 53. (2002)

<http://www.floram.org/files/v9núnico/v9nunicoa6.pdf>

**Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento.** I.C. Macedo. CGEE – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. 11 pp. (2001)

[http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003\\_02.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf)

**Secagem e armazenagem de café.** J.S. Silva et all. UFV – Universidade Federal de Viçosa. (2001)

<ftp://www.ufv.br/poscolheita/LIVRO%20SECAGEM%20E%20ARMAZENAGEM%20DE%20CAFE/prefacio.pdf>

**Alternativas para a cogeração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira.** V.B. Pereira Júnior. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 101 pp. (2001)

[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90700/pereirajunior\\_vb\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90700/pereirajunior_vb_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**A guide to energy savings opportunities in the kraft pulp industry.** AGRA Simmons. PAPTAC – Pulp & Paper Technical Association of Canada. 181 pp. (2000)

<http://www.paptac.ca/images/stories/PDF/ListePublications.pdf> (em Inglês – Vide página 12 do arquivo)

**Produtividade e equivalência energética de *Eucalyptus* sp. em relação ao óleo combustível e à energia elétrica.** C.R. Lima. Anais do 3º Encontro Energia no Meio Rural. 09 pp. (2000)

[http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2000/1\\_7.pdf](http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2000/1_7.pdf)

**Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies.** P. Quaak; H. Knoef; H.E. Stassen. World Bank. 78 pp. (1999)

<https://books.google.com.br/books?id=M2WMrePIIxC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false> (em Inglês)

**Experiências de geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: Aspectos técnicos e econômicos.** L.A.H. Nogueira; A.C.S. Walter. In: Memoria - Reunión Regional sobre Generación de Electricidad a partir de Biomasa. FAO – Food and Agriculture Organization. (1996)

<http://www.fao.org/docrep/T2363S/T2363S00.htm> (em Espanhol)

**Generación eléctrica a partir de combustibles vegetales: Aspectos técnicos, económicos y ambientales.** M.A. Trossero. In: Memoria - Reunión Regional sobre Generación de Electricidad a partir de Biomasa. FAO – Food and Agriculture Organization. (1996)

<http://www.fao.org/docrep/T2363S/T2363S00.htm> (em Espanhol)

**Uso de biomassa florestal para geração elétrica em grande escala: O projeto "WBP-SIGAME" brasileiro.** L.A.H. Nogueira. In: Memoria - Reunión Regional sobre Generación de Electricidad a partir de Biomasa. FAO – Food and Agriculture Organization. (1996)

<http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0m.htm>

**Estudo energético e econômico de um sistema de cogeração associado à indústria de celulose.** J.L. Silveira. O Papel (Fevereiro): 47 - 51. (1994)

[http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/17\\_estudo%20energ%20tico%20cogera%20.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/17_estudo%20energ%20tico%20cogera%20.pdf)

e

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1994\\_Estudo\\_Cogerao.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1994_Estudo_Cogerao.pdf)

**Análise de auto-suficiência e excedentes em indústria de papel e celulose empregando turbina de condensação e extração.** J.L. Silveira; J.A.P. Balestieri. 23º Congresso Anual da ABTCP. p. 765 - 775. (1990)

[http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/37\\_turbinas%20de%20vapor.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/37_turbinas%20de%20vapor.pdf)

e

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1990\\_Turbinas\\_de\\_vapor.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1990_Turbinas_de_vapor.pdf)

**Sistema de secagem de biomassa – combustível alternativo para caldeiras auxiliares e fornos de cal.** F.L.C. Lima. O Papel (Outubro): 49 – 59. (1988)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1988\\_Secagem\\_biomassa.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1988_Secagem_biomassa.pdf)

**Otimização energética de caldeira a lenha através da pré-secagem de cavacos utilizando gases efluentes da combustão.** R.A. Peixoto; L. Amaral Jr. 19º Congresso Anual da ABTCP. p. 381-401. (1986)

[http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/34\\_secagem%20biomassa%20para%20caldeira%20for%E7a.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/34_secagem%20biomassa%20para%20caldeira%20for%E7a.pdf)

e

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1986\\_Secagem\\_biomassa\\_caldeira.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1986_Secagem_biomassa_caldeira.pdf)

**A lenha e seus derivados no balanço energético do Rio Grande do Sul.** FEE – Fundação de Economia e Estatística. 62 pp. (1984)

[http://catcrd.bn.br/scripts/odwp032k.dll?t=nav&pr=bec\\_pr&db=bec&use=pb&rn=3&disp=card&sort=off&ss=22422328&arg=cenergs](http://catcrd.bn.br/scripts/odwp032k.dll?t=nav&pr=bec_pr&db=bec&use=pb&rn=3&disp=card&sort=off&ss=22422328&arg=cenergs)

**Casca de *Eucalyptus globulus*: polpação versus queima.** C.F. Silva. 16º Congresso Anual. ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. 10 pp. (1983)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1983\\_Casca\\_Eucalyptus\\_globulus.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1983_Casca_Eucalyptus_globulus.pdf)

**Serragem de madeira ao forno de cal: uma opção para economia de energia.** C.A. Busnardo; P.E.D. Varante; F.R. Barreto Neto; W.E. Luders; A.L. Raffin; F. Puig; C.E.B. Foelkel. 13º Congresso Anual. ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. p.: 225 – 237. (1980)

[http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/35\\_serragem%20madeira%20ao%20forno%20de%20cal%20busnardo.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/35_serragem%20madeira%20ao%20forno%20de%20cal%20busnardo.pdf)

**Secagem a contrapressão. Um novo sistema para secagem de combustíveis de madeira em substituição ao petróleo.** T. Olson. 13º Congresso Anual. ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. p.: 257 - 263. (1980)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1980\\_Secagem\\_biomassa.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1980_Secagem_biomassa.pdf)

**Anais do Seminário "Abastecimento energético industrial com recursos florestais".** Séria Técnica IPEF Edição nº 2. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. (1980)

[http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr02.asp#\\_blank](http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr02.asp#_blank)

**Tecnologia para queimar madeira.** G.N.E. Krogh. O Papel (Novembro): 105 – 108. (1979)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1979\\_Krogh\\_Queima\\_madeira.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/1979_Krogh_Queima_madeira.pdf)

**Economic analysis of wood- or bark-fired systems.** T.H. Ellis. U.S.D.A. Forest Products Laboratory. Gen. Tech. Rep. FPL-16. 24 pp. (1978)

<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr16.pdf> (em Inglês)

**Introduction to thermal analysis in the combustion of wood.** F.C. Beall. Wood Science 5(2): 102 – 108. (1972)

[https://www.researchgate.net/publication/280963029\\_Introduction\\_to\\_thermal\\_analysis\\_in\\_the\\_combustion\\_of\\_wood](https://www.researchgate.net/publication/280963029_Introduction_to_thermal_analysis_in_the_combustion_of_wood) (em Inglês)

**A guide to small-scale wood fuel (biomass) heating systems.** South West Woodland Renaissance. Forestry Commission England. 24 pp. (SD = Sem referência de data)

<https://www.cse.org.uk/pdf/guide%20to%20small-scale%20wood-fuelled%20heating.pdf> (em Inglês)

**Controle das emissões atmosféricas da combustão da biomassa.** T.A. Pacheco. Vortex Consultoria Industrial. 12 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://www.vortexindustrial.com.br/media/DIR\\_25601/1fc0282151a9e37ffff866dffaf2815.pdf](http://www.vortexindustrial.com.br/media/DIR_25601/1fc0282151a9e37ffff866dffaf2815.pdf)

**Eucalipto: realidade energética em Alagoas. Estudo Setorial.** Log Estratégia. 75 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://www.logestrategia.com.br/cms/assets/uploads/\\_PUBLICACOES/\\_PDF/f405e06001c8252b3108fbe5773d33d5\\_EUCALIPTO%20FINAL.pdf](http://www.logestrategia.com.br/cms/assets/uploads/_PUBLICACOES/_PDF/f405e06001c8252b3108fbe5773d33d5_EUCALIPTO%20FINAL.pdf)

**The experience of Brazilian pulp and paper industry in reducing fuel oil consumption.** C.E.B. Foelkel; G. Krogh. PPI – Pulp and Paper International. 14 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/SD\\_Foelkel\\_Krogh\\_Brazilian\\_experience.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/SD_Foelkel_Krogh_Brazilian_experience.pdf) (em Inglês)

**PDIS – Biomassa e cogeração.** A.S. Dias; R.N.F. Neves; F.G.G. Mesquita; L.G.A.V. Silva. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. 23 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://paginas.fe.up.pt/~ee02035/Biomassa\\_e\\_Cogeracao.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ee02035/Biomassa_e_Cogeracao.pdf)

**Aplicações água quente e vapor.** ASCA. 06 pp. (SD = Sem referência de data)

<http://www.ascoval.com.br/literatura/FluidControl/31B/catalogo/aplicacao-agua-quente-vapor.pdf>

**Reuso de água na cogeração de energia.** A. Rothbarth. 07 pp. (SD = Sem referência de data)

<http://docplayer.com.br/15180404-Reuso-de-agua-na-cogeracao-de-energia.html>

**Correlação entre características da biomassa para geração de vapor em uma caldeira.** M.C. Rosa; E.D. Oliveira Júnior. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal. 10 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://fait.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/dFs369avdGLfgb8\\_2014-4-16-15-54-35.pdf](http://fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/dFs369avdGLfgb8_2014-4-16-15-54-35.pdf)

**Steam boiler calculations.** E.E.S. Lora. NEST – Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída. Apresentação em PowerPoint: 53 slides. (SD = Sem referência de data)

[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Steam\\_Boiler\\_Calculations.pdf](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Steam_Boiler_Calculations.pdf)

**Cogeneración y generación de electricidad en la industria azucarera.** E.E.S. Lora. NEST – Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída. Apresentação em PowerPoint: 53 slides. (SD = Sem referência de data)

[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Cogeneracion\\_y\\_generacion.pdf](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/Cogeneracion_y_generacion.pdf) (em Espanhol)

**Geração distribuída: pequenas termelétricas a biomassa.** E.E.S. Lora. Seminário Estadual “O Futuro da Energia”. Apresentação em PowerPoint: 15 slides. (SD = Sem referência de data)

<http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/files/GD-AMDA.pdf>

**Dados de unidades de conversão.** CTGás – Centro de Tecnologias do Gás & Energias Renováveis. 15 pp. (SD = Sem referência de data)

[http://ispsteam.dominiotemporario.com/doc/dados\\_unidade\\_conversao%5b1%5d.pdf](http://ispsteam.dominiotemporario.com/doc/dados_unidade_conversao%5b1%5d.pdf)

**Estequiometria das reações de combustão.** W.A. Bizzo; C.G. Sánches. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 27 pp. (SD = Sem referência de data)

[https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/01\\_estequiometria\\_Da\\_Combustao.pdf](https://eva.fing.edu.uy/file.php/392/01_estequiometria_Da_Combustao.pdf)

e

**Combustão.** Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Portugal Apresentação em PowerPoint: 41 slides. (SD = Sem referência de data)

<https://fenix.isa.ulisboa.pt/qubEdu/conteudos-publicos/ficheiros?oid=3972844773453>



